



# ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*Συσχέτιση των παραμέτρων του μετώπου και της μεθόδου εξόρυξης  
με την παραγωγικότητα και τα χαρακτηριστικά του παραγόμενου  
μεταλλεύματος σε υπόγεια ορυχεία*

**Βασιλάκης Κωνσταντίνος**

Εξεταστική Επιτροπή:

Καθηγητής Γαλετάκης Μιχαήλ (επιβλέπων)

Καθηγητής Εξαδάκτυλος Γεώργιος

Αναπληρωτής Καθηγητής Στειακάκης Εμμανουήλ

ΧΑΝΙΑ, 2024

## Πρόλογος

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε όλο αυτό το διάστημα τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Γαλετάκη Μιχαήλ έναν εξαιρετικό καθηγητή της σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, ο ρόλος του οποίου για την πραγματοποίηση της διπλωματικής μου εργασίας ήταν καθοριστικός μέσω της πολύτιμης βοήθειας και καθοδήγησης που μου προσέφερε. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Εξαδάκτυλο Γεώργιο και τον καθηγητή κ. Στειακάκη Εμμανουήλ, μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής.

Ακόμη θα ήθελα να εκφράσω ιδιαίτερα τις ευχαριστίες μου στον διευθυντή του μεταλλείου Ολυμπιάδας Δημήτρη Παπαδόπουλο και στην εταιρεία Ελληνικός Χρυσός για την εμπιστοσύνη και παραχώρηση των δεδομένων της εταιρείας για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος δεν θα μπορούσα να παραλείψω την οικογένεια μου για την εμπιστοσύνη και την θερμή υποστήριξη όλα αυτά τα χρόνια.

## Περίληψη

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται στατιστική ανάλυση των δεδομένων του κύκλου εργασιών που εκτελείται σε υπόγεια εκμετάλλευση με στόχο την συσχέτιση των παραμέτρων του μετώπου και της μεθόδου εξόρυξης με την παραγωγικότητα και τα χαρακτηριστικά του παραγόμενου μεταλλεύματος καθώς και την καλύτερη κατανόηση συμπεριφοράς δεικτών που αναπτυχθήκαν σε σχέση με τις παραμέτρους των μετώπων και της εκμετάλλευσης. Οι δείκτες που αναπτύχθηκαν διαχωρίζονται σε παραγωγής και υποστήριξης. Δείκτες παραγωγής είναι ειδική κατανάλωση, η γόμωση διατρήματος, η προχώρηση %, ενώ υποστήριξης είναι ο δείκτης αγκυρίων και ο δείκτης εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Gunite). Οι παράμετροι εκμετάλλευσης που εξετάστηκαν ήταν η ζώνη εκμετάλλευσης (ανατολική ή δυτική), ο τύπος ανατίναξης (V-Cut και Burn-Cut), ενώ οι παράμετροι μετώπου ήταν η γεωτεχνική ταξινόμηση (γεωτεχνικοί δείκτες ή ποιότητας της βραχόμαζας) και η γεωμετρία (διατομή) του μετώπου.

Αρχικά έγινε προεπεξεργασία των δεδομένων για τον έλεγχο της ορθότητας και της οργάνωσης τους έτσι ώστε να είναι σε κατάλληλη μορφή για στατιστική επεξεργασία. Στη συνέχεια ακολούθησε η περιγραφική στατιστική ανάλυση και παρουσίαση των δεδομένων μέσω κατάλληλων διαγραμμάτων. Επιπλέον, έγινε υπολογισμός των δεικτών βάρδιας για την κατανόηση των απαιτήσεων και απόδοσης του μεταλλείου. Στη συνέχεια επειδή ο όγκος των δεδομένων ήταν μεγάλος και κάποια στοιχεία καταγράφονται σε μηνιαία βάση, τα δεδομένα ομαδοποιήθηκαν ανά μήνα και έγινε η στατιστική ανάλυση. Η ανάλυση περιλαμβάνει έλεγχο διαφοράς των μέσων τιμών δεικτών και παραμέτρων μεταξύ ανατολικής και δυτικής ζώνης εκμετάλλευσης. Ακολουθεί συσχέτιση των δεικτών και παραμέτρων των μετώπων με κατασκευή των διαγραμμάτων συσχέτισης και υπολογισμό των αντίστοιχων συντελεστών. Τέλος, δημιουργήθηκαν μοντέλα απλής και πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης που συνδέουν τους δείκτες παραγωγής με τις παραμέτρους του μετώπου και της εκμετάλλευσης.

Τα αποτελέσματα της περιγραφικής στατιστικής ανάλυσης για τους δείκτες παραγωγής έδειξαν ότι η ειδική κατανάλωση και η γόμωση διατρήματος αυξάνεται βαθμιαία με την αύξηση των γεωτεχνικών δεικτών δείχνοντας ότι χρειάζονται περισσότερα κιλά εκρηκτικής ύλης για την εξόρυξη πιο «υγιούς» βραχόμαζας ενώ η προχώρηση % μειώνεται. Στους δείκτες υποστήριξης ο δείκτης αγκύρια δεν δείχνει να επηρεάζεται με

την αύξηση γεωτεχνικών παραμέτρων ενώ αντίθετα, ο δείκτης Gunité μειώνεται βαθμιαία με αύξηση της ποιότητας της βραχώμαζας. Επίσης, δημιουργήθηκαν δείκτες βάρδιας για την αξιολόγηση των απαιτήσεων του μεταλλείου.

Τα αποτελέσματα της στατιστικής συμπερασματολογίας έδειξαν να συμφωνούν με εκείνα της περιγραφικής στατιστικής. Για τους δείκτες παραγωγής όπως η ειδική κατανάλωση και η γόμωση διατρήματος έδειξε ότι συσχετίζονται θετικά με τους γεωτεχνικούς δείκτες ενώ η προχώρηση έχει αρνητική συσχέτιση. Επιπλέον, η ειδική κατανάλωση και η γόμωση διατρήματος έδειξε ότι επηρεάζεται από τον τύπο ανατίναξης που εφαρμόζεται. Από την άλλη πλευρά, στους δείκτες υποστήριξης ο δείκτης εκτοξευόμενου σκυροδέματος συσχετίζεται αρνητικά με τους γεωτεχνικούς δείκτες εμφανίζοντας μια πτωτική τάση με την αύξηση της ποιότητας της βραχώμαζας. Τέλος, δημιουργήθηκε μοντέλο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης της ειδικής κατανάλωσης και της γόμωσης διατρήματος με γεωτεχνικό δείκτη και τύπο ανατίναξης σχηματίζοντας έτσι ένα μοντέλο πρόβλεψης των παραγωγικών δεικτών.

## **Abstract**

In this thesis, a statistical analysis of underground mining data is carried out with the aim of correlating the parameters of the mine face and the mining method with the productivity and characteristics of the ore extracted, as well as a better understanding of the behaviour of the indicators developed in relation to the face and mining parameters. The indicators developed are divided into production and roof support. The production indicators are powder factor, charge per hole, mine advance, while the roof support indicators are the number of bolts and the quantity of shotcrete (gunite) used. In addition, the mining parameters include the mining zone (east or west), the type of blasting (v-cut and burn-cut), while the face parameters include the geological classification (geotechnical factor or rock quality) and the cross section of the face.

In the initial phase of the study, data pre-processing was employed to verify the accuracy and integrity of the data, and to prepare them for statistical analysis. Subsequent to this, descriptive statistical analysis and the presentation of the data were conducted through the use of appropriate charts. Additionally, shift factors were calculated in order to gain insight into the operational requirements and production of the mine. Subsequently, due to the voluminous nature of the data set and the provision of records on a monthly basis, the data was grouped and processed on a monthly basis. The analysis entails the examination of the mean values of factors and parameters in the eastern and western exploitation zones to identify any significant differences. Subsequently, the correlation between the factors and face parameters was investigated through the construction of correlation diagrams and the calculation of corresponding coefficients. Finally, simple and multiple linear regression models were developed to establish a link between production factors and face and exploitation parameters.

The results of the descriptive statistical analysis on the production indicators demonstrate that powder factor and charge per hole increase with the enhancement of rock mass quality. With regard to the roof support indicators, the number of bolts appears to be relatively uninfluenced by alterations in rock mass quality. Conversely, the quantity of gunite utilised appears to diminish with the improvement of rock mass quality. Furthermore, shift factors were devised to evaluate the mine's requirements.

The results of the statistical inference were found to be consistent with the descriptive statistical results. For the production indicators, such as powder factor and charge per hole, it was demonstrated that they are positively correlated with geotechnical parameters, while the mine advance exhibited a negative correlation. Additionally, powder factor and charge per hole were found to be influenced by the blasting type. Conversely, the gunite consumption indicator was found to be negatively correlated with geotechnical values, indicating a decreasing trend with the increase in rock mass quality. Finally, a multiple linear regression model was constructed for powder factor and charge per hole with geotechnical parameters and blasting type, forming a predictive model for production indicators.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

.....	i
Πρόλογος.....	ii
Περίληψη .....	iii
Abstract .....	v
Εισαγωγή.....	ix
1. Μεταλλείο Ολυμπιάδας.....	1
1.1 Γενικά στοιχεία.....	1
1.2 Γεωλογία Ολυμπιάδας .....	1
1.3 Κοιτασματολογία Ολυμπιάδας .....	2
1.4 Εκμετάλλευση μεταλλείου Ολυμπιάδας .....	5
1.4.1 Τεχνικοί παράμετροι για την επιλογή μεθόδου εκμετάλλευσης.....	5
1.4.2 Μέθοδος Εκμετάλλευσης .....	5
1.4.3 Μέθοδος εξόρυξης.....	7
1.4.4 Κύκλος εργασιών.....	10
1.5 Γεωτεχνικοί δείκτες ταξινόμησης πετρώματος.....	11
1.5.1 Ταξινόμηση κατά RQD.....	12
1.5.2 Ταξινόμηση κατά IRS .....	13
1.5.3 Ταξινόμηση κατά RMR .....	13
1.5.4 Ταξινόμηση κατά Q .....	16
1.6 Δείκτες Παραγωγής Και Υποστήριξης .....	20
2. Συλλογή, περιγραφή δεδομένων και μεθοδολογία ανάλυσης.....	23
2.1 Αρχεία πρωτογενών δεδομένων.....	23
2.2 Μεθοδολογία επεξεργασίας και ανάλυσης δεδομένων.....	24
2.3 Χρήση λογισμικών και ανάπτυξη κώδικα για την επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων .....	24
3. Στατιστική ανάλυση .....	30
3.1 Εισαγωγή.....	30
3.2 Περιγραφική στατιστική .....	30
3.2.1 Γραφικές απεικονίσεις .....	30
3.3 Στατιστική συμπερασματολογία.....	31
4. Επεξεργασία και αποτελέσματα περιγραφικής στατιστικής ανάλυσης.....	36
4.1 Γεωτεχνικοί δείκτες.....	36
4.2 Στοιχεία ανατινάξεων.....	39
4.3 Στοιχεία προχωρήσεων .....	41
4.4 Στοιχεία Υποστηρίξεων .....	42

4.5	Στοιχεία Δρομολόγιων .....	43
4.6	Δείκτες ανά βάρδια.....	44
4.7	Δείκτες παραγωγής και υποστήριξης .....	47
5.	Επεξεργασία και αποτελέσματα στατιστικής συμπερασματολογίας.....	52
5.1	Έλεγχος Κανονικότητας Δεδομένων.....	52
5.2	Έλεγχος διαφοράς μέσων τιμών με χρήση του t - test .....	58
5.3	Συσχέτιση .....	59
5.4	Μοντέλα πρόβλεψης δεικτών παραγωγής με βάση την πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση.....	65
5.5	Σύγκριση αποτελεσμάτων αντίστοιχες εργασίες από τη διεθνή βιβλιογραφία.....	76
	Συμπεράσματα - προτάσεις – βιβλιογραφική έρευνα .....	78
6.	Βιβλιογραφία .....	81
	Παράρτημα .....	83



## Εισαγωγή

Στην μεταλλευτική βιομηχανία είναι σημαντικό να παρακολουθούνται δείκτες που σχετίζονται με την παραγωγικότητα. Έτσι καταγράφονται όλο και περισσότερο πληροφορίες σε βάσεις δεδομένων από τις μεταλλευτικές εταιρείες που σχετίζονται με τον κύκλο εργασιών που εκτελούνται για την καλύτερη παρακολούθηση της απόδοσης και την βελτιστοποίηση της εκμετάλλευσης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων από τα υπόγεια μεταλλεία της Ολυμπιάδας της εταιρείας Ελληνικός Χρυσός με κύριο στόχο την συσχέτιση των παραμέτρων του μετώπου και της μεθόδου εξόρυξης με την παραγωγικότητα και τα χαρακτηριστικά του παραγόμενου μεταλλεύματος.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας λήφθηκαν αρχεία από την εταιρεία που παρέχουν πληροφορίες ανά βάρδια σε κάθε στοά που έχουν να κάνουν με την εξόρυξη, την υποστήριξη, τα δρομολόγια μεταφοράς του ανατιναχθέντος υλικού, την προχώρηση σε μέτρα, τις διαστάσεις των στοών καθώς και την ποιότητα της βραχόμαζας.

Η ανάλυση γίνεται στο σύνολο των δεδομένων και παρουσιάζονται σε μορφή συγκεντρωτικών πινάκων και διαγραμμάτων συνοπτικά οι πληροφορίες που αφορούν τον κύκλο εργασιών που εκτελούνται. Στην συνέχεια επειδή ο όγκος των δεδομένων είναι μεγάλος και πολλές καταγραφές πραγματοποιούνται ανά μήνα, τα δεδομένα ομαδοποιούνται σε μηνιαία βάση. Τα ομαδοποιημένα αυτά δεδομένα χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για την στατιστική ανάλυση και την εξαγωγή των συσχετίσεων μεταξύ των μεταλλευτικών δεικτών. Επιπλέον γίνεται σύγκριση μεταξύ ανατολικής και δυτικής ζώνης εκμετάλλευσης για τυχόν διαφορές που υφίστανται.

Η δομή της διπλωματικής εργασίας είναι η εξής:

Το 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναφέρονται στοιχεία για το μεταλλείο της Ολυμπιάδας όπως η γεωλογία και κοιτασματολογία της περιοχής, η μέθοδος εκμετάλλευσης και εξόρυξης του κοιτάσματος, οι γεωτεχνικοί δείκτες ταξινόμησης της βραχομάζας που χρησιμοποιούνται, ο κύκλος εργασιών που εκτελείται συνοπτικά και ο ορισμός των δεικτών παραγωγής και υποστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν.

Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζονται τα δεδομένα που λήφθηκαν από την εταιρεία και ο τρόπος επεξεργασίας τους.

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις τεχνικές της στατιστικής ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία των δεδομένων.

Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιλαμβάνει την περιγραφική στατιστική ανάλυση για το σύνολο των αρχικών και ομαδοποιημένων δεδομένων.

Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται στατιστική ανάλυση στα ομαδοποιημένα δεδομένα μέσω του ελέγχου υποθέσεων στους δείκτες μεταξύ ανατολικής και δυτικής ζώνης εκμετάλλευσης, των συσχετίσεων μεταξύ των δεικτών και την δημιουργία σχέσεων πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης.

Τέλος, στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, σχόλια και συμπεράσματα που προέκυψαν καθώς και αποτελέσματα από άλλους ερευνητές. Επίσης παρατίθεται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

# **1. Μεταλλείο Ολυμπιάδας**

## **1.1 Γενικά στοιχεία**

Το μεταλλείο της Ολυμπιάδας ανήκει στην εταιρεία Ελληνικός Χρυσός θυγατρική της Καναδικής Eldorado Gold Corporation. Η εταιρεία διαχειρίζεται τα μεταλλεία της Κασσάνδρας και πιο συγκεκριμένα στις περιοχές Στρατώνι, Ολυμπιάδα, Σκουριές στη βορειοανατολική Χαλκιδική. Εξορύσσει μέταλλευμα χρυσού, άργυρου, μολύβδου, ψευδαργύρου και χαλκού. Οι μεταλλευτικές εγκαταστάσεις της Ολυμπιάδας οροθετούνται εντός του Δήμου Αριστοτέλη του Νομού Χαλκιδικής. Το μεταλλείο της Ολυμπιάδας ήταν ανενεργό τουλάχιστον 15 χρόνια από την τελευταία φορά που βρισκόταν σε παραγωγική φάση από την εταιρεία TVX Hellas (θυγατρική της Καναδικής πολυεθνικής Kinross Gold) και επανήλθε σε παραγωγική φάση το 2018 με σκοπό την δημιουργία ενός πλήρως ανεπτυγμένου και εκσυγχρονισμένου μεταλλείου.

## **1.2 Γεωλογία Ολυμπιάδας**

Η βορειοανατολική Χαλκιδική όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.1 ανήκει γεωτεχνικά στην Σερβομακεδονική Ζώνη η οποία διακρίνεται από τα δυτικά προς τα ανατολικά σε δυο λιθοστρωματογραφικές ενότητες την κατώτερη ενότητα των Κερδυλλίων και την ανώτερη ενότητα Βερτίσκου αντίστοιχα, η επαφή των οποίων δύσκολα εντοπίζεται αλλά κατά θέσεις διαπιστώνεται ότι πρόκειται για μείζοντα ρηγματογενή ζώνη.

Ο σχηματισμός Κερδυλλίων συνίσταται από βιοτιτικό γνεύσιο με ενστρώσεις κεροστιλβικού γνεύσιου, αμφιβολιτών και μαρμάρου. Ο υπερκείμενος σχηματισμός του Βερτίσκου αποτελείται κυρίως από διμαρμαρυγικό γνεύσιο με παρεμβολές διμαρμαρυγιακών σχιστόλιθων και βιοτιτικών γνεύσιων.

Γενικά, τα μεταμορφωμένα πετρώματα της Σερβομακεδονικής Μάζας λόγω των Αλπικών πτυχώσεων και της Νεοτεκτονικής δραστηριότητας είναι έντονα κατακερματισμένα από συστήματα επωθήσεων, ρηγμάτων και κατακλάσεων. Κοινό χαρακτηριστικό των σχιστοποιημένων και γνευσιακών πετρωμάτων είναι οι μεταγενέστερης ηλικίας ακανόνιστοι φακοί και οι φλεβικού τύπου διεισδύσεις πηγματιτών και απλιτών, που είναι νεότεροί τους και φιλοξενούν τους μεταλλοφόρους

ορίζοντες. Οι νεότερες αποθέσεις στην περιοχή μελέτης είναι Πλειστοκαινικής-Ολοκαινικής ηλικίας και εντοπίζονται κύρια στις πεδινές περιοχές Ολυμπιάδας.

Τα μεταμορφικά πετρώματα της Σερβομακεδονικής μάζας από το Άνω Κρητιδικό έως το Τριτογενές υπόκεινται σε συνεχείς διαφορικές ανοδικές κινήσεις που είχαν σαν αποτέλεσμα την κορύφωση των ανατηκτικών φαινομένων, αλλά και τον ασβεσταλκαλικό μαγματισμό. (Orykta.gr)



Σχήμα 1.2 :Απλοποιημένος Γεωλογικός Χάρτης Χαλκιδικής (Orykta.gr)

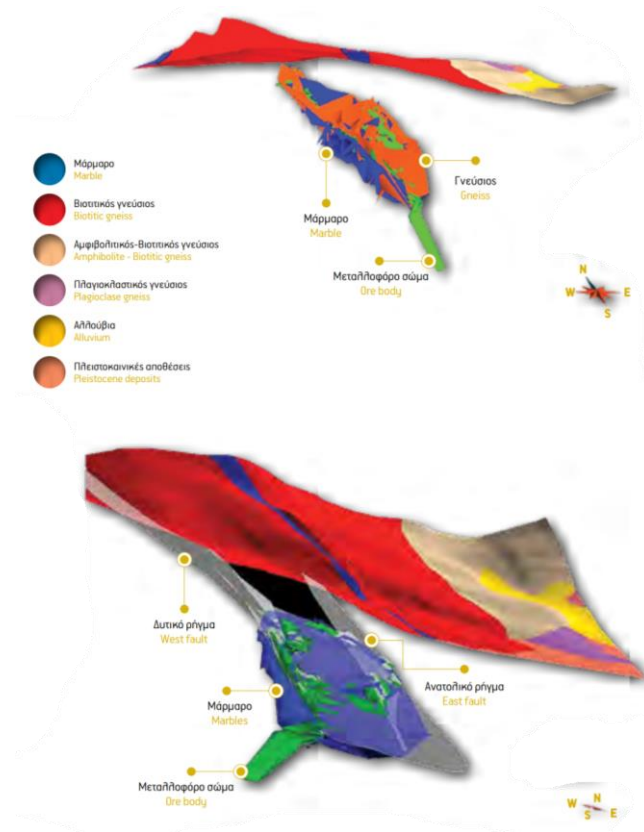
### 1.3 Κοιτασματολογία Ολυμπιάδας

Οι κοιτασματολογικοί τύποι που απαντώνται στην περιοχή της Ολυμπιάδας είναι συμπαγή θειούχα πολυμεταλλικά μετασωματικά στρωματέγκλειστα κοιτάσματα, τύπου manto (Σχήμα 1.3). Τα πολυμεταλλικά (μόλυβδος Pb, ψευδάργυρος Zn, άργυρος Ag, χρυσός Au) θειούχα μεταλλοφόρα σώματα βρίσκονται σε μαρμαρίνους ορίζοντες που ανήκουν στην λιθοστρωματογραφική σειρά των Κερδυλλίων. Πιο συγκεκριμένα, μεταλλοφόρα υδροθερμικά διαλύματα που κινούνται σε βαθιά σχεδόν κατακόρυφα ρήγματα, αποθέτουν πλούσιες κοιτασματολογικές συγκεντρώσεις κάθε φορά που τα ρήγματα διασχίζουν και διαπερνούν μαρμαρίνους ορίζοντες και έτσι αντικαθιστούν και

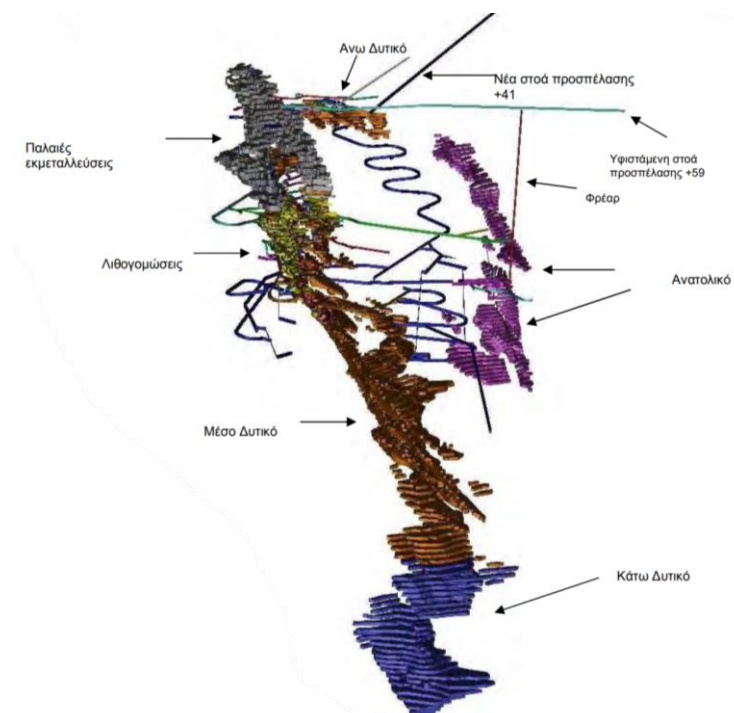
παίρνουν πλήρως την θέση αυτών των τμημάτων των μαρμάρινων οριζόντων στην επαφή τους με τους υπερκείμενους γνεύσιους. Η διαδικασία αυτή αναφέρεται σαν μετασώματωση, σχηματίζοντας έτσι στρωματέγκλειστα μεταλλοφόρα σώματα, που διεθνώς αποκαλούνται σαν mantos.

Η θειούχος μεταλλοφορία αποτελείται από σιδηροπυρίτη, αρσеноπυρίτη, σφαλερίτη, γαληνίτη, τετραεδρίτη-τεναντίτη, βουλανξεριτή και χαλκοπυρίτη και από δευτερογενή ορυκτά κερουσίτη, χαλκοσίνη, κοβελίνη κ.α. Τα οξείδια του μαγγανίου αντιπροσωπεύουν τα οξειδωμένα τμήματα της μεταλλοφορίας του πρωτογενούς ροδοχρωσίτη σε περιοχές που βρίσκονται κυρίως στα υψηλότερα τμήματα του κοιτάσματος. Στα στεία ορυκτά της παραγένεσης συμπεριλαμβάνονται χαλαζίας, ασβεστίτης, άστριοι, καολίνης, χλωρίτης, ανκερίτης κλ.π. Τα μεταλλεύματα είναι κυρίως υπό την μορφή μεγάλων φακοειδών σωμάτων.

Υπάρχουν δύο μεταλλοφόρα σώματα, το δυτικό και το ανατολικό (Σχήμα 1.3). Το δυτικό κοιτάσμα είναι πλάτους περίπου 250 m και βυθίζεται κατά 1200 m προς τα νοτιοδυτικά. Έχει διαπιστωθεί σε βάθος 600 m από την επιφάνεια και είναι ανοιχτό προς τα κάτω. Το πάχος του κυμαίνεται μεταξύ 5 m και 15 m, με κλίση κατά μέσο όρο 30°-35° ανατολικά. Το ανατολικό κοιτάσμα βρίσκεται 150 m ανατολικά του δυτικού κοιτάσματος και έχει αντικλινική δομή. Η κλίση του είναι κατά μέσο όρο 25°-30° προς τα νοτιοανατολικά. Το πλάτος του κυμαίνεται περί τα 75 m κατά μέσο όρο και το μέσο πάχος του είναι 7 m. Ακολουθεί μια τρισδιάστατη απεικόνιση του θειούχου κοιτάσματος της Ολυμπιάδας(πράσινο χρώμα) με εμφανή τον τεκτονικό του έλεγχο από δύο ρήγματα και την άμεση λιθοστρωματογραφική του σχέση με τα μάρμαρα (μπλε χρώμα) και μια απεικόνιση σχεδίου του μεταλλείου της Ολυμπιάδας (Orykta.gr).



Σχήμα 1.4: Τρισδιάστατη απεικόνιση του πολυμεταλλικού θειούχου κοιτάσματος (Orykta.gr)



Σχήμα 1.5: Τρισδιάστατη απεικόνιση ανατολικού και δυτικού κοιτάσματος Ολυμπίδας (Τεχνική μελέτη Enveco A.E.)

Τα βεβαιωμένα αποθέματα ανέρχονται σε 11,5 Mt με μέση περιεκτικότητα 9,0 g/t Au, 137,5 g/t Ag, 4,6% Pb και 6,1% Zn. Συνολικά στο κοιτάσμα περιέχονται 3,33 εκατ. ουγγιές Au, 50,9 εκατ. ουγγιές Ag, 530.000 t Pb και 700.000 t Zn. (Ελληνικός Χρυσός)

## **1.4 Εκμετάλλευση μεταλλείου Ολυμπιάδας**

### **1.4.1 Τεχνικοί παράμετροι για την επιλογή μεθόδου εκμετάλλευσης**

Οι παράγοντες που απαιτούνται για τον σχεδιασμό ενός συστήματος υπογείων έργων περιλαμβάνουν (Εξαδάκτυλος, 2005):

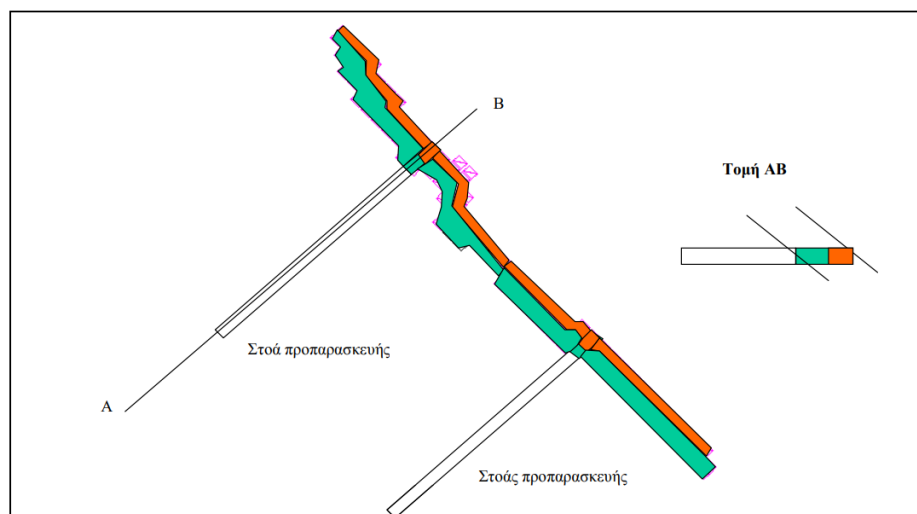
- 1) Γεωλογικές έρευνες,
- 2) Γεωμηχανική ταξινόμηση του μεταλλεύματος και των περιβαλλόντων πετρωμάτων,
- 3) Η αντοχή του μεταλλεύματος,
- 4) Το σχήμα και οι διαστάσεις, η κλίση και το βάθος του κοιτάσματος,
- 5) Ο λόγος εμβαδού επιφάνειας του κοιτάσματος προς τον όγκο του κοιτάσματος,
- 6) Οι μελέτες μηχανικής των πετρωμάτων (rock engineering),
- 7) Η κατακρημνισιμότητα του κοιτάσματος και των περιβαλλόντων πετρωμάτων,
- 8) Ευστάθεια της βραχομάζας,
- 9) Γεωγραφικοί και περιβαλλοντικοί παράγοντες,
- 10) Η θέση και η αντοχή των οριζόντων εξόρυξης,
- 11) Η αλληλοδιαδοχή των διαφόρων εργασιών εκμετάλλευσης,
- 12) Οι τάσεις που επάγονται στα περιβάλλοντα πετρώματα κατά την εκμετάλλευση,
- 13) Οι απαιτήσεις σε υποστήριξη,
- 14) Η παραγωγή και οικονομική αξία κοιτάσματος,
- 15) Η μεταφορά του εξορυγμένου μεταλλεύματος και η προσπέλαση

### **1.4.2 Μέθοδος Εκμετάλλευσης**

Οι ζώνες μεταλλοφορίας στο μεταλλείο της Ολυμπιάδας εμφανίζουν διαφοροποιήσεις σχετικά με την γεωμετρία και τις συνθήκες του εδάφους. Η γεωμετρία της μεταλλοφορίας έχει προσδιοριστεί με μεγάλη ακρίβεια βάσει ενός μεγάλου αριθμού γεωτρήσεων. Από τη γεωμετρία αυτή έχει διαπιστωθεί ότι η στρώση της μεταλλοφορίας απαντάται σε μεγάλο βαθμό σε ακανόνιστη μορφή. Η μέθοδος εκμετάλλευσης είναι η μέθοδος των εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομώσεων με ανερχόμενη φορά, στην οποία οι στοές

ορύσσονται με διαμήκη ή εγκάρσια φορά ανάλογα με την γεωμετρία του κοιτάσματος, ενώ σε περιοχές μεταβλητού πάχους σχεδιάζεται μικτή μέθοδος διαμήκους και εγκάρσιας ανάπτυξης. Η μέθοδος αυτή είναι ευέλικτη, επιτρέποντας στα μέτωπα να αλλάζουν κατεύθυνση ανάλογα με τη γεωμετρία του μεταλλεύματος. Η παραγωγή μεταλλεύματος ξεκινάει αφού η δευτερεύουσα στοά πρόσβασης, που έχει ξεκινήσει από την κύρια ράμπα προσπέλασης, οδηγηθεί εντός της μεταλλοφορίας. Η στοά ορύσσεται κατά μήκος του κοιτάσματος μέχρι να συναντήσει το ταβάνι της μεταλλοφορίας.

Η μέθοδος εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομών με διαμήκη προσανατολισμό εφαρμόζεται σε περιοχές του κοιτάσματος με πάχος μικρότερο ή ίσο των 10m. Η στοά παραγωγής αναπτύσσεται κατά μήκος της μεταλλοφορίας (Σχήμα 1.4), δηλαδή αναπτύσσεται στη στρώση της μεταλλοφορίας αποφεύγοντας την επαφή με το ταβάνι. Μετά την εξόρυξή της και ανάλογα με το πλάτος του κοιτάσματος και τις συνθήκες του περιβάλλοντος πετρώματος, το μέταλλευμα πλησίον της περιοχής στο ταβάνι είτε θα ληφθεί με πλευρική διεύρυνση κατά την οπισθοχώρηση ή θα λιθογομωθεί η στοά και θα ξεκινήσει εξόρυξη δεύτερης στοάς κοντά στο ταβάνι της μεταλλοφορίας.

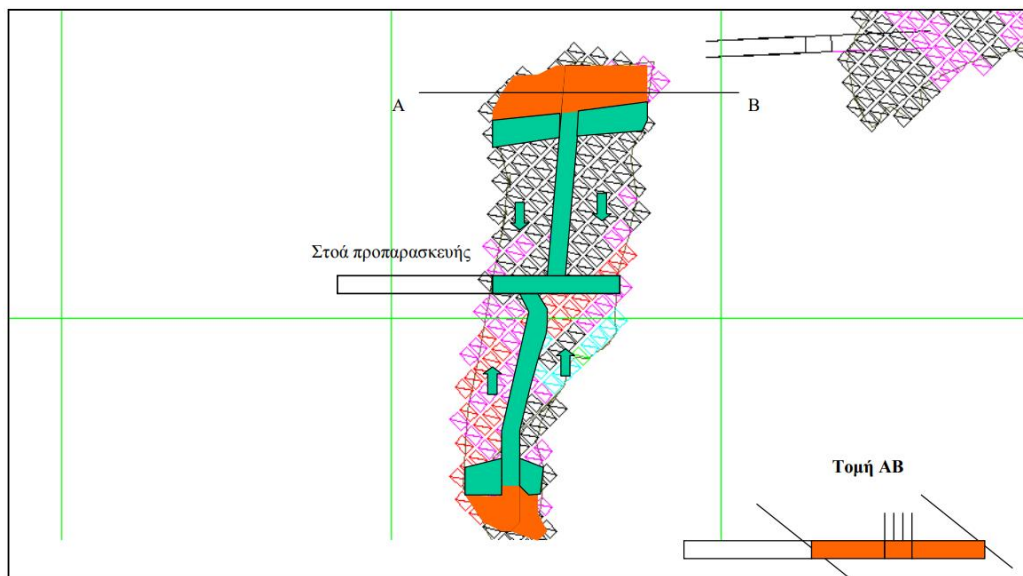


Σχήμα 1.6: Κάτοψη διαμήκους εκμετάλλευση στις στενές περιοχές του κοιτάσματος (Orykta.gr)

Μέθοδος εναλλασσόμενων κοπών και λιθογομών με εγκάρσιο προσανατολισμό εφαρμόζεται σε τμήματα της μεταλλοφορίας που έχουν πάχος μεγαλύτερο των 10m (Σχήμα 1.5). Η διαφορά αυτή οφείλεται λόγω του μεγάλου πάχους του κοιτάσματος και απαιτείται η δημιουργία άλλων δύο στοών πρόσβασης εντός του κοιτάσματος. Πιο



συγκεκριμένα, την όρυξη της κύριας στοάς πρόσβασης που δίνει πρόσβαση από το δάπεδο του κοιτάσματος προς το ταβάνι αυτού, ακολουθεί η δημιουργία άλλων δύο δευτερευουσών στοών στο κέντρο του κοιτάσματος. Έπειτα ξεκινάει η έναρξη της εκμετάλλευσης του κοιτάσματος με τη βοήθεια δημιουργίας εγκάρσιων στοών, οι οποίες εκτείνονται δεξιά και αριστερά των δύο δευτερευουσών στοών, οι οποίες είναι κάθετες στο ταβάνι και στο δάπεδο. Οι στοές αυτές είναι παραγωγικές και ξεκινούν από το κοίτασμα και φτάνουν ως την κύρια στοά πρόσβασης. Στο τέλος κάθε παραγωγικής στοάς γίνεται η λιθογόμωση (Εξαδάκτυλος, 2005). Κατά την εξόφληση του κοιτάσματος η περιοχή αυτού θα λιθογομωθεί πλήρως. Η μέθοδος εξόρυξης από το δάπεδο προς το ταβάνι της μεταλλοφορίας παρουσιάζει το πλεονέκτημα αυξημένης σταθερότητας και μειώνει τον χρόνο έκθεσης στο ταβάνι της μεταλλοφορίας. Επίσης, στην μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται μεγαλύτερη παραγωγικότητα λόγω του μεγαλύτερου διαθέσιμου αριθμού μετώπων εργασίας.



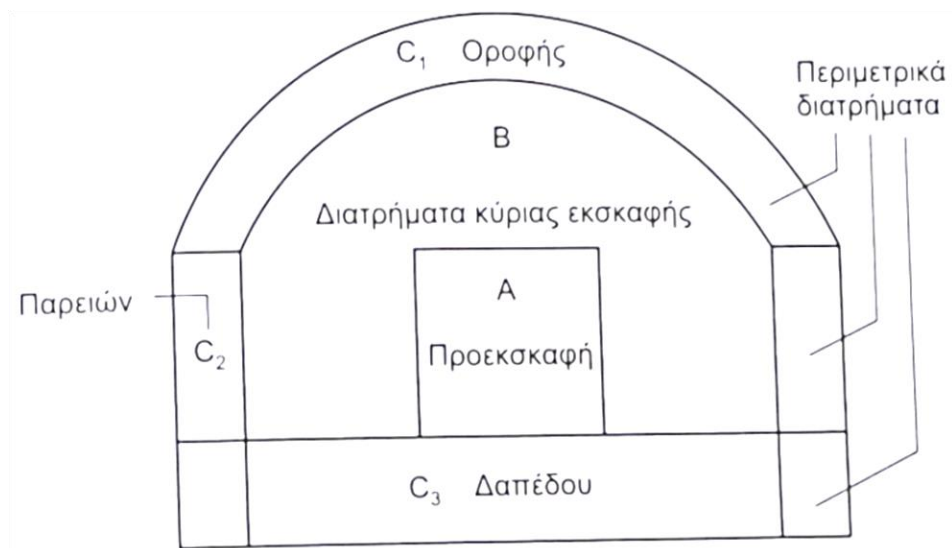
Σχήμα 1.7: Κάτοψη εγκάρσιας εκμετάλλευση σε μεγάλα τμήματα του κοιτάσματος (Orykta.gr)

#### 1.4.3 Μέθοδος εξόρυξης

Η εξόρυξη του πετρώματος (μεταλλεύματος) στα υπόγεια μέτωπα εκμετάλλευσης ή παραγωγής γίνεται με τον συμβατικό τρόπο της διατρήσεως και ανατινάξεως (Drilling and Blasting Method) με τη χρήση εκρηκτικών υλών. Ως διάτρηση θεωρείται η όρυξη

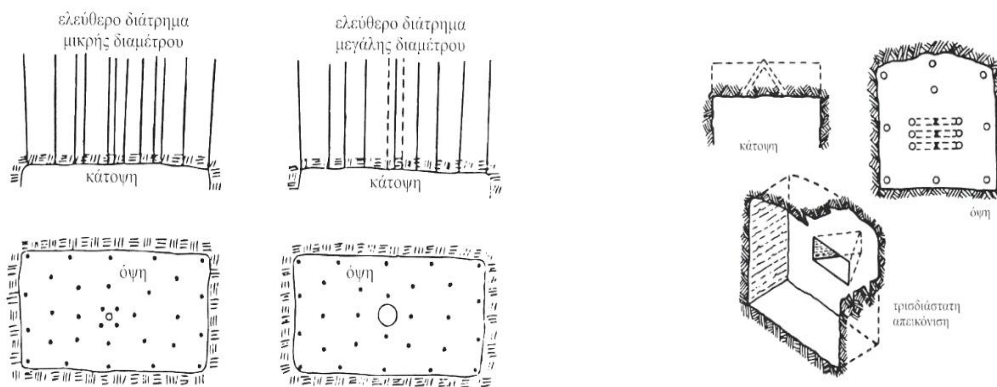
επιμηκών οπών (διατρήματα) συγκεκριμένου μήκους διατρήσεως με χρήση μηχανημάτων (Jumbo), για την δημιουργία θέσεων εντός του μετώπου εξόρυξης ικανών για πλήρωση με εκρηκτική ύλη. Οι εκρηκτικές ύλες έχουν την δυνατότητα να παράγουν σημαντικές ποσότητες ενέργειας σε μικρό χρονικό διάστημα και επομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον θρυμματισμό των πετρωμάτων. Αν και πρόκειται για σύνθετο μηχανισμό θραύσης του πετρώματος υπό την επίδραση εκρηκτικών υλών μπορεί να χωριστεί σε δυο τρόπους, την κρουστική φάση μέσω της διάδοσης του κρουστικού παλμού όπου εφαρμόζεται ένα υψηλό εντατικό πεδίο με αποτέλεσμα να θραύεται το πέτρωμα και την ωστική φάση μέσω της εκτόνωσης των αερίων της έκρηξης που συνεισφέρουν στην απομάκρυνση του θραυσμένων τεμαχίων από την φυσική τους θέση.

Η όλη διάταξη των διατρημάτων μπορεί να χωριστεί σε τρεις κατηγορίες στην περιοχή του μετώπου της στοάς όπου με τη χρήση επιβραδυνόμενων μέσων έναυσης οι εκρήξεις γίνονται σταδιακά με σκοπό κάθε επόμενο στάδιο να εκμεταλλευτεί τις ελεύθερες επιφάνειες. Η πρώτη κατηγορία (Α) είναι τα διατρήματα προεκσκαφής (opening cut) ή αρχικής διάνοιξης (αρχικής κοπής). Σημαντικό τμήμα μιας υπόγειας ανατίναξης είναι η αρχική διάνοιξη ή προεκσκαφή όπου η βασική της λειτουργία είναι να δημιουργήσει ελεύθερες επιφάνειες για τη βελτίωση του μηχανισμού θραύσης του πετρώματος από την ανατίναξη των υπόλοιπων διατρημάτων. Έπειτα γύρω από τα διατρήματα προεκσκαφής διατάσσονται τα διατρήματα της κυρίας εκσκαφής (B stoping holes - B) και στην τρίτη κατηγορία (C) ακολουθούν τα περιμετρικά διατρήματα ή περιφερειακά (perimeter ή contour holes) τα οποία υποδιαιρούνται σε διατρήματα οροφής (roof holes - C1), διατρήματα παρειών ή αλλιώς πλευρικά (wall holes - C2) και σε διατρήματα δαπέδου (lifter holes ή floor holes - C3).



Σχήμα 1.8: Διαίρεση των διατρημάτων του μετώπου σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την σειρά εκρήξεως τους.

Αν και υπάρχουν πολλοί τύποι αρχικής διάνοιξης αυτοί μπορούν να ταξινομηθούν σε δυο κατηγορίες τις παράλληλες κοπές και τις κοπές υπό γωνία. Τα κριτήρια επιλογής ενός συγκεκριμένου τύπου κοπής εξαρτάται από 1) τον τύπο του πετρώματος, 2) τον τύπο των συστημάτων διάτρησης, 3) διαστάσεις διατομής μετώπου και 4) ικανότητα χειριστών. Στο παρόν μεταλλείο έγινε χρήση κοπών τύπου Burn Cut που ανήκουν στις παράλληλες κοπές και τύπου V Cut σφηνοειδής κοπές που ανήκουν στην υπό γωνία κοπές και μπορούν να χαρακτηριστούν ως ανατινάξεις παραγωγής. Τα Burn Cut αποτελούνται από ένα σύνολο παράλληλων διατρημάτων (ορισμένα διατρήματα μπορεί να μην περιέχουν εκρηκτική ύλη αποκαλούμενα ως διατρήματα ανακούφισης ή κενά) που είναι διατεταγμένα κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι αποστάσεις μεταξύ τους να είναι πάρα πολύ μικρές. Από την άλλη στα V Cut τα διατρήματα προεκσκαφής είναι διατεταγμένα σε ζεύγη και κάθε ζεύγος πρέπει θεωρητικά να συγκλίνει σε ένα σημείο υπό συγκεκριμένη γωνία. Επιπλέον γίνονται διαμορφωτικές ανατινάξεις μετώπου, οροφής, παραμέντου, δαπέδου για διάφορους λόγους όπως είναι για δημιουργία χώρου κατά την έναρξη νέας στοάς, για διαμόρφωση του μετώπου στην μορφή που θα έπρεπε να είναι αν δεν έχει επιτευχθεί με ανατίναξη παραγωγής, για αλλαγή κατεύθυνσης, για εξόφληση της στοάς κατά το τέλος της και σε περιπτώσεις αναγόμενης αν βρεθούν διατρήματα που δεν έχουν ανατιναχτεί (Τσουτρέλης 2001, Αγιουτάντης 2019).



Σχήμα 1.9: Αριστερά: Τυπική Διάταξη Burn Cut (Dick et al., 1983). Δεξιά: V Cut (Gregory, 1984)

#### 1.4.4 Κύκλος εργασιών

Μετά από κάθε ανατίναξη ακολουθεί ο αερισμός για να γίνει η απαγωγή των αερίων ανατίναξης, του αεροφερόμενου κονιορτού (σκόνης) και η βελτίωση της ποιότητας αέρα στην περιοχή του μετώπου εκσκαφής ώστε να διασφαλίζεται η διατήρηση της ασφάλειας και της υγείας των εργαζομένων. Ο μηχανισμός του κυκλώματος αερισμού ορυχείου που μελετήθηκε αποτελείται από δυο ανεμιστήρες των 1000KW σε παράλληλη διάταξη στην επιφάνεια όπου ο καθαρός αέρας εισάγεται στην περιοχή των ραμπών πρόσβασης όπου μεταφέρεται στην Δυτική και στην Ανατολική ράμπα προς τις αντίστοιχες περιοχές εξόρυξης ανάλογα με τις δραστηριότητες. Έπειτα ακολουθεί ξεσκάρωμα που αποτελεί την διαδικασία εκούσιας και ελεγχόμενης απόσπασης επισφαλών και ασταθών τμημάτων/όγκων της οροφής ώστε να αποφευχθεί η μη ελεγχόμενη πτώση τους στο μέλλον. Ακολουθως γίνεται η αποκομιδή του μεταλλεύματος ή στείρου ανατιναχθέντος υλικού με χρήση φορτωτών που το μεταφέρουν είτε σε λούκια μεταλλεύματος προσωρινά ή φορτώνεται κατευθείαν σε φορτηγά. Μετά γίνεται η υποστήριξη της διατομής των υπόγειων ανοιγμάτων με την τοποθέτηση ή κοχλίωση (rock bolting) ήλων (αγκύρια) διαφόρων τύπων όπως είναι τα αγκύρια ρητίνης, σωληνοειδείς κοχλίες (Swellex), διαχωριζόμενοι σωλήνες (Spil Set), επιπλέον εφαρμόζονται ανάλογα την περίπτωση πλέγματα, ραβδοχάλυβες (RRS) και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Gunitite) όπου για την παρασκευή και μεταφορά του σκυροδέματος χρησιμοποιούνται αυτοφορτούμενοι ανάμεικτες σκυροδέματος. Η τοποθέτηση των αγκυρίων γίνεται με ηλεκτρο-υδραυλικά διατρητικά φορεία υποστήριξης (bolting jumbo). Τέλος ακολουθούν οι ομάδες των μηχανικών και εργοδηγών (Μηχανικοί Ορυκτών Πόρων -Μεταλλειολόγοι, Τοπογράφοι, Γεωλόγοι) για την καταγραφή μετρήσεων - παρατηρήσεων. Στην εξόφληση

των παραγωγικών στοών ακολουθεί η λιθογόμωση. Ως υλικό λιθογόμωσης χρησιμοποιείτε το αδρομερές κλάσμα του αποβλήτου εμπλουτισμού μετά από ανάμειξη με τσιμέντο. Η κατά βάρος σύνθεση του υλικού λιθογόμωσης είναι περίπου 72% αδρομερές απόβλητο εμπλουτισμού, 5% τσιμέντου και 23% νερό.

## 1.5 Γεωτεχνικοί δείκτες ταξινόμησης πετρώματος

Στο πλαίσιο της γεωτεχνικής μηχανικής και εξόρυξης ο όρος βραχώμαζα ή μάζα πετρώματος (rock mass) αναφέρεται σε τμήμα του φυσικού υλικού το οποίο περιλαμβάνει όλες τις δομικές ατέλειες λόγω της ύπαρξης ασυνεχειών φυσικές ή τεχνικές ή άλλων χαρακτηριστικών που καθιστούν την μάζα του ασυνεχή. Σε αντίθεση με τον ορισμό της βραχώμαζας, ο όρος ακέραιο (συμπαγές άρρηκτο) πέτρωμα (intact rock) αναφέρεται σε ένα εξιδανικευμένο τμήμα του φυσικού υλικού το οποίο δεν χαρακτηρίζεται από φυσικές ατέλειες στην δομή του και είναι δυνατό να θεωρηθεί ως συνεχές, ομοιογενές και ισότροπο (ή ανισότροπο) υλικό σε ότι αφορά στην μελέτη των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων του. Ο όρος ασυνέχειες (discontinuities) αποδίδεται στους διάφορους τύπους επιφανειών αδυναμίας, οι οποίες προέρχονται από οποιαδήποτε μηχανική διακοπή στη συνέχεια, ομοιογένεια και ισοτροπία του πετρώματος. Γενικά οι ασυνέχειες μπορούν να χαρακτηρίσουν ένα πέτρωμα από τις ακόλουθες παραμέτρους:

- 1) Τον προσανατολισμό στον χώρο (διεύθυνση και κλίση),
- 2) Την ύπαρξη ομάδων (συστημάτων) με τον ίδιο προσανατολισμό επιφανειών αδυναμίας,
- 3) Την διάταξη, έκταση, απόσταση (spacing) και τομή των συστημάτων ασυνεχειών στον χώρο,
- 4) Την πυκνότητα τους (ασυνέχειες ανά μονάδα μήκους ή όγκου)
- 5) Την επιμονή τους (persistence) (μετρούνται σε μονάδες μήκους)
- 6) Τον τύπο των επιφανειών τους (αδρές, λείες, κλπ),
- 7) Την ορυκτολογία και την κοκκομετρία του υλικού πλήρωσης,
- 8) Τον βαθμό αποσάθρωσης (weathering) των τοιχωμάτων μιας ασυνέχειας,
- 9) Το ποσοστό υγρασίας και το πάχος του υλικού πλήρωσης,
- 10) Την αρχική μετακίνηση των επιφανειών της ασυνέχειας,
- 11) Την τραχύτητα και ενδεχόμενη αλλοίωση των επιφανειών της ασυνέχειας,
- 12) Την ύπαρξη νερού στα ανοίγματα μεταξύ των επιφανειών των ασυνεχειών.

(Αγιουτάντης, 2019)

Ο τρόπος δημιουργίας και η υφή των πετρωμάτων, η διάστρωση τους, η ύπαρξη ασυνεχειών, η δυνατότητα παραλαβής φορτίων και ο τρόπος παραμόρφωσης τους είναι μερικές παράμετροι που είναι απαραίτητες για την εκτίμηση των ιδιοτήτων των πετρωμάτων και γι' αυτό τον σκοπό δημιουργήθηκαν τα συστήματα ταξινόμησης των πετρωμάτων και της βραχομάζας (rock and rock mass classification systems). Τα συστήματα ταξινόμησης συνδυάζουν την εμπειρία και την παρατήρηση και πρέπει να είναι θέση να δώσουν μια ποιοτική ή ποσοτική περιγραφή των φυσικών, γεωλογικών χαρακτηρισμών και μηχανικών ιδιοτήτων ενός πετρώματος. Σκοπός του γεωτεχνικού χαρακτηρισμού και αξιολόγησης του στις γεωτεχνικές και μεταλλευτικές δραστηριότητες είναι ο σχεδιασμός της υπόγειας εξόρυξης, τα κατάλληλα μέτρα υποστήριξης που πρέπει να εφαρμοστούν για την διασφάλιση της ασφάλειας των υπογείων εργασιών εξόρυξης (προσωπικό και μηχανικός εξοπλισμός) και στην βελτιστοποίηση των εργασιών εξόρυξης. Η εταιρεία χρησιμοποιεί μια σειρά από τέτοιους δείκτες που θα περιγράψουν συνοπτικά παρακάτω όπως είναι ο RQD, RMR, Q, IRS.

### 1.5.1 Ταξινόμηση κατά RQD

Ο δείκτης ποιότητας του πετρώματος ή δείκτης κερματισμού του πετρώματος (Rock Quality Designation, RQD) χρησιμοποιείται ευρύτατα είτε ως παράμετρος συνδυαστικά και με άλλα συστήματα ταξινόμησης πετρωμάτων είτε αυτόνομα. Υπολογίζεται σε πυρήνες δειγματοληψίας με διάμετρο μεγαλύτερη από 54.8mm (2.15 in) και για μήκος πυρήνα που αντιστοιχεί σε ένα τύπο πετρώματος. Η σχέση που μας δίνει αυτόν τον δείκτη είναι:

$$RQD = \frac{\text{συνολικό μήκος τμημάτων πυρήνα} > 100mm}{\text{συνολικό μήκος πυρήνα}} \times 100 \quad (1.1)$$

Η τιμή του RQD% κυμαίνεται από 0 έως 100 με υψηλότερες τιμές να υποδεικνύουν καλύτερη ποιότητα βραχομάζας όπως φαίνεται στον πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1: Γεωμηχανική ταξινόμηση δείκτη RQD

Ταξινόμηση του πετρώματος με βάση τον συνολικό συντελεστή RQD					
Συνολικός συντελεστής	100-90	90-75	75-50	50-25	<25
Κλάση	I	II	III	IV	V
Περιγραφή	πολύ καλό	καλό	μέτριο	κακό	πολύ κακό

Το σχέδιο που χρησιμοποιείται για την διάτρηση και την συλλογή πυρήνων δειγματοληψίας αναφέρεται ως κánaβος και χρησιμοποιείται για την δημιουργία μιας συστηματικής και δομημένης προσέγγισης για την δειγματοληψία του υπεδάφους και τη συλλογή αντιπροσωπευτικών πυρήνων. Στην εταιρεία χρησιμοποιείται ο κánaβος 14x14 m<sup>2</sup> για τα παραγωγικά πατώματα και 40x40 m<sup>2</sup> για τα πατώματα ανάπτυξης.

### **1.5.2 Ταξινόμηση κατά IRS**

Ο δείκτης σημειακής φόρτισης (Intact Rock Strength, IRS) αντιπροσωπεύει την μέγιστη δυνατή τιμή αντοχής του ακέραiou μέσου σε μονοαξονική θλίψη μέχρι να συμβεί η αστοχία και προσδιορίζεται μέσω εργαστηριακών δοκιμών. Αξίζει να σημειωθεί ότι το IRS αντιπροσωπεύει την αντοχή ενός μεμονωμένου δείγματος πετρώματος υπό μονοαξονική συμπίεση και ενδέχεται να μην αποτυπώνει πλήρως τη σύνθετη συμπεριφορά μιας βραχομάζας, η οποία επηρεάζεται από ασυνέχειες και άλλους γεωτεχνικούς παράγοντες.

### **1.5.3 Ταξινόμηση κατά RMR**

Το σύστημα ταξινόμησης RMR (Rock Mass Rating) χρησιμοποιεί έξι παραμέτρους οι οποίες μπορούν να μετρηθούν επί τόπου ή να υπολογισθούν από πυρήνες γεωτρήσεων. Οι παράμετροι αυτοί είναι:

- 1) Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του ακέραiou πετρώματος,
- 2) Ο δείκτης ποιότητας του πετρώματος (RQD),
- 3) Η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών.
- 4) Η κατάσταση των ασυνεχειών,
- 5) Η επίδραση των υπόγειων νερών,
- 6) Ο προσανατολισμός των ασυνεχειών σε σχέση με τον άξονα ή τη θέση του εκτελούμενου τεχνικού έργου.

Ο συντελεστής επίδρασης (rating) κάθε παραμέτρου προσδιορίζεται από τις αντίστοιχες τιμές στους παρακάτω πίνακες 1.1, 1.2 και στην συνέχεια υπολογίζεται ο συνολικός δείκτης από το άθροισμα των επιμέρους επιδράσεων. Από το πίνακα 1.3 και σχήμα 1.9 είναι δυνατό να εκτιμηθεί ως συνάρτηση του πλάτους του ανοίγματος ο χρόνος αυτοϋποστήριξης του ανοίγματος αυτού. Οι τιμές του RMR δείκτη κυμαίνονται από 0 έως 100 και οι υψηλότερες τιμές υποδεικνύουν καλύτερη ποιότητα βραχομάζας.

Πίνακας 1.2: Γεωμηχανική ταξινόμηση. Μέρος Α (Bieniawski 1984)

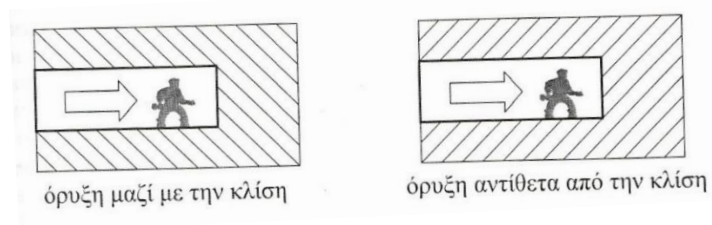
Παράμετρος		Αντοχή πετρώματος					
$I_s$ (MPa)	>10	4-10	2-4	1-2	-	-	-
$\sigma_c$ (MPa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	< 1
Συντελεστής	15	12	7	4	2	1	0
Όπου $I_s$ (MPa) δείκτης σημειακής φόρτισης $\sigma_c$ (MPa) η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη							
Παράμετρος		Δείκτης ποιότητας του πετρώματος					
RQD (%)	90-100	75-90	50-75	25-50	< 25		
Συντελεστής	20	17	13	8	3		
Παράμετρος		Απόσταση των ασυνεχειών (mm)					
Απόσταση	>2000	600-2000	200-600	60-200	<60		
Συντελεστής	20	15	10	8	5		
Παράμετρος		Κατάσταση Ασυνεχειών					
Περιγραφή	A1	A2	A3	A4	A5		
Συντελεστής	30	25	20	10	0		
όπου A1: τραχείες επιφάνειες, ασυνεχείς, χωρίς ανοίγματα, ακέραια τοιχώματα A2: ελαφρώς τραχείες επιφάνειες, άνοιγμα < 1 mm, ελαφρώς αποσπασθωμένα τοιχώματα A3: ελαφρώς τραχείες επιφάνειες, άνοιγμα < 1 mm, πολύ αποσπασθωμένα τοιχώματα A4: λείες επιφάνειες, συνεχείς, άνοιγμα 1-5 mm, υλικό πλήρωσης < 5 mm A5: συνεχείς, άνοιγμα > 5 mm, υλικό πλήρωσης > 5 mm (μαλακό)							
Παράμετρος		Επίδραση των Υπόγειων Υδάτων					
Εισροή/10 m (L/min)	0	<10	10-25	25-125	>125		
$u/\sigma_1$	0	0.0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5		
Κατάσταση	ξηρό	λίγο υγρό	υγρό	σταγόνες	ροή νερού		
Συντελεστής	15	10	7	4	0		
όπου $u$ = η πίεση νερού στα επίπεδα των ασυνεχειών και $\sigma_1$ = η μέγιστη κύρια τάση							

Πίνακας 1.3: Γεωμηχανική ταξινόμηση. Μέρος Β (Bieniawski 1984)

Παράμετρος		Διόρθωση λόγω του προσανατολισμού των ασυνεχειών				
Προσανατολισμός	πολύ καλός	καλός	μέτριος	κακός	πολύ κακός	
Σήραγγες	0	-2	-5	-10	-12	
Θεμελιώσεις	0	-2	-7	-15	-25	
Πρανή	0	-5	-25	-50	-60	
Όπου ο χαρακτηρισμός του προσανατολισμού των ασυνεχειών προκύπτει με βάση τα παρακάτω:						



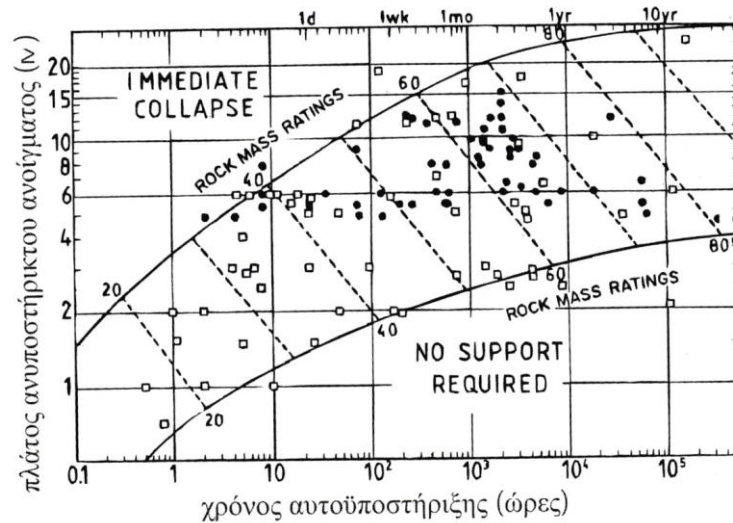
Περιγραφή ασυνέχειας		Κλίση ασυνέχειας (μοίρες)	Χαρακτηρισμός ασυνέχειας
Διεύθυνση ασυνέχειας κάθετη στον άξονα της σήραγγας	Όρυξη μαζί με την κλίση	45-90 20-45 0-20	πολύ καλός καλός μέτριος
	Όρυξη αντίθετα από την κλίση	45-90 20-45 0-20	πολύ καλός καλός μέτριος
Διεύθυνση ασυνέχειας παράλληλη στον άξονα της σήραγγας		45-90 20-45 0-20	πολύ καλός καλός μέτριος



Σχήμα 1.10: Σχετική κλίση ασυνεχειών και φοράς όρυξης ανοιγμάτων

Πίνακας 1.4: Γεωμηχανική Ταξινόμηση. Μέρος Γ (Bieniawski 1984).

Ταξινόμηση του πετρώματος με βάση τον συνολικό συντελεστή					
Συνολικός συντελεστής	100-81	80-61	60-41	40-21	<20
Κλάση	I	II	III	IV	V
Περιγραφή	πολύ καλό	καλό	μέτριο	κακό	πολύ κακό
Ερμηνεία της ταξινόμησης					
Τάξη	I	II	III	IV	V
Χρόνος ζωής	10 χρόνια	6 μήνες	1 εβδομάδα	10 ώρες	30 λεπτά
Άνοιγμα	15 m	8 m	5 m	2.5 m	1 m
Συνοχή πετρ. (kPa)	> 400	300-400	200-300	100-200	< 100
Γωνία εσωτ. τριβής (°)	< 45	35-45	25-35	15-25	< 15



Σχήμα 1.11: Σχέση μεταξύ δείκτη RMR και του χρόνου αυτοϋποστήριξη ανυποστήρικτων ανοιγμάτων (Bieniawski 1979)

#### 1.5.4 Ταξινόμηση κατά Q

Ο δείκτης ποιότητας Q χρησιμοποιεί έξι παραμέτρους που συνδυάζονται στην παρακάτω σχέση:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{SRF} \quad (1.2)$$

Οι παράμετροι αυτοί εξηγούνται παρακάτω ενώ οι τιμές που λαμβάνουν στους αντίστοιχους πίνακες παρακάτω:

- 1) RQD δείκτης ποιότητας πετρώματος,
- 2)  $J_n$  δείκτης του αριθμού των συστημάτων ασυνεχειών (joint set number)
- 3)  $J_r$  δείκτης τραχύτητας του χειρότερου συστήματος ασυνεχειών (joint roughness number)
- 4)  $J_a$  δείκτης εξαλλοίωσης του ασθενέστερου επιπέδου αδυναμίας (joint alteration number)
- 5)  $J_w$  δείκτης επίδρασης του νερού στις ασυνέχειες (joint water reduction number)
- 6) SRF συντελεστής επίδρασης της εντατικής κατάστασης του πετρώματος (ή συντελεστής απομείωσης τάσεων, stress reduction factor).

Η φυσική σημασία των τριών κλασμάτων στην σχέση (1.2) του δείκτη Q έχουν ως εξής:

(RQD /  $J_n$ ) αποτυπώνει την δομή της βραχομάζας και είναι μια χονδρική εκτίμηση του μέσου μεγέθους τεμάχους (block),

( $J_r$  /  $J_a$ ) εκτιμά την κατάσταση των ασυνεχειών,

( $J_w$  / SRF) εκτιμά τις ενεργές τάσεις που ασκούνται στο πέτρωμα.

Στην σχέση 1.2 η παράμετρος RQD εξ ορισμού λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 έως 100 και σε περιπτώσεις όπου  $RQD < 10$  λαμβάνεται ως  $RQD = 10$  ενώ οι τιμές που λαμβάνουν οι υπόλοιπες παράμετροι  $J_n$ ,  $J_r$ ,  $J_a$ ,  $J_w$ , SRF παρουσιάζονται στους πίνακες 1.4, 1.5, 1.6. Έπειτα από το σχήμα 1.10 υπολογίζεται το είδος υποστήριξης που απαιτείται συναρτήσει του δείκτη Q. Ο δείκτης Q μεταβάλλεται σε μία κλίμακα από 0.001 έως 1000.

Πίνακας 1.5: Σύστημα Q Μέρος Α (Καββαδάς 2000)

Ορισμός της παραμέτρου $J_n$	
Οικογένειες ασυνεχειών	$J_n$
Ακέραιο πέτρωμα	0.5-1
Μία οικογένεια	2
Μία οικογένεια και μερικές τυχαίες ασυνέχειες	3
Δυο οικογένειες	4
Δυο οικογένειες και μερικές τυχαίες ασυνέχειες	6
Τρεις οικογένειες	9
Τρεις οικογένειες και μερικές τυχαίες ασυνέχειες	12
Τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες	15
Θρυμματισμένο πέτρωμα	20
Σημείωση: σε περίπτωση διασταύρωσης σηράγγων η τιμή του $J_n$ τριπλασιάζεται ενώ σε περιοχές στομίων η τιμή του $J_n$ διπλασιάζεται	
Ορισμός της παραμέτρου $J_r$	
(α) Περίπτωση βραχομάζας με ασυνέχειες χωρίς υλικό πλήρωσης ή με υλικό πλήρωσης μικρού πάχους (ώστε να αποκαθίσταται επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τεμαχών για σχετική ολίσθηση μικρότερη των 10cm).	
Κατάσταση επιφάνειας των ασυνεχειών	$J_r^{(1)}$
Ασυνεχείς διακλάσεις	4
Τραχείες και ακανόνιστες κυματώδεις	3
Ομαλές, κυματώδεις	2
Λείες ή ολισθηρές, κυματώδεις	1.5
Τραχείες ή ακανόνιστες επίπεδες	1.5
Ομαλές επίπεδες	1
Ολισθηρές επίπεδες	0.5
(β) Περίπτωση βραχομάζας χωρίς επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τοιχωμάτων του πετρώματος, ακόμη και μετά από σημαντική σχετική ολίσθηση κατά μήκος της ασυνέχειας.	
Κατάσταση επιφάνειας των ασυνεχειών	$J_r^{(1)}$

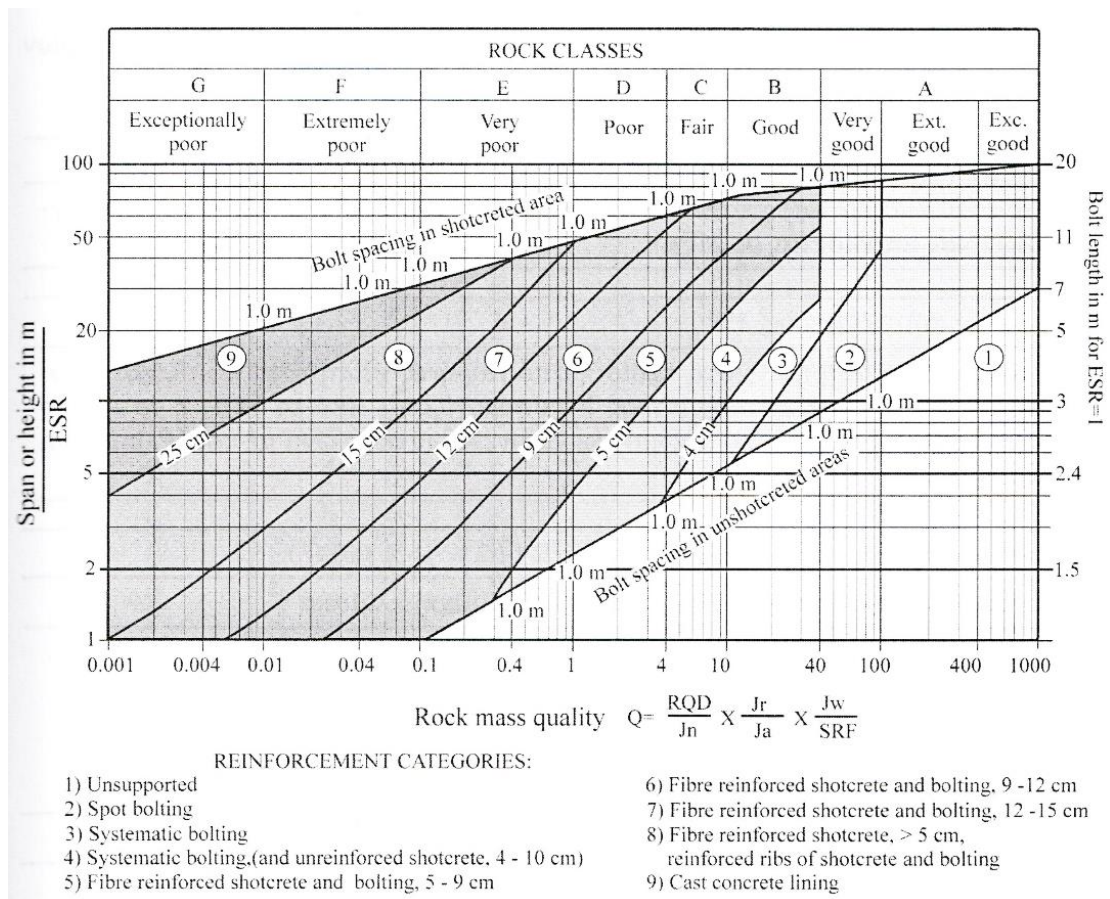
Με υλικό πλήρωσης από αργιλικό υλικό σε επαρκές πάχος ώστε να παρεμποδίζεται η επαφή των τοιχωμάτων του πετρώματος.	1
Με υλικό πλήρωσης από αμμώδες ή χαλικώδες υλικό σε επαρκές πάχος ώστε να παρεμποδίζεται η επαφή των τοιχωμάτων του πετρώματος.	1
<sup>(1)</sup> Σε περίπτωση που η μέση απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών υπερβαίνει τα τρία μέτρα η τιμή $J_r$ αυξάνεται κατά 1.	

Πίνακας 1.6: Σύστημα Q Μέρος Β (Καββαδάς 2000)

<b>Ορισμός της παραμέτρου <math>J_a</math></b>	
(α) Περίπτωση βραχύμαζας με επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τοιχωμάτων του πετρώματος	
Κατάσταση εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών	$J_a$
Υγιή και πλήρως “επουλωμένα” τοιχώματα	0.75
Οξειδωμένα τοιχώματα χωρίς αποσάρθρωση	1
Ελαφρώς αποσαθρωμένα τοιχώματα με αμμώδες (αργιλικό) υλικό πλήρωσης	2
Αμμώδες ή ιλυώδες υλικό πλήρωσης	3
Υλικό πλήρωσης από αργιλικά ορυκτά πάχους έως 2mm	4
(β) Περίπτωση βραχύμαζας με υλικό πλήρωσης μικρού πάχους (να αποκαθίσταται επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τεμαχών για σχετική ολίσθηση μικρότερη των 10cm).	
Κατάσταση εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών	$J_a$
Υλικό πλήρωσης από αμμώδη συστατικά	4
Υλικό πλήρωσης από στιφρή άργιλο πάχους έως 5 mm	6
Υλικό πλήρωσης από μαλακή άργιλο πάχους έως 5 mm	8
Υλικό πλήρωσης από διογκούμενη άργιλο πάχους έως 5 mm. Η τιμή του $J_a$ εξαρτάται από το ποσοστό της διογκούμενης άργιλου	8-12
(γ) Περίπτωση βραχύμαζας χωρίς επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τοιχωμάτων του πετρώματος, ακόμη και μετά από σχετική ολίσθηση κατά μήκος της ασυνέχειας.	
Κατάσταση εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών	$J_a$
Ζώνες από θρυμματιζόμενο ιλυο-αμμώδες υλικό	5
Παχιές ζώνες από αργιλικό υλικό (στιφρή άργιλος, μαλακή άργιλος ή διογκούμενη άργιλος)	6-24
<b>Ορισμός της παραμέτρου <math>J_w</math></b>	
Παρουσία υπόγειων υδάτων	$J_w$
Στεγνή εκσκαφή ή μικρή τοπική εισροή νερού έως 5 L/min	1
Μέτρια εισροή νερού με μερική απόπλυση του υλικού πλήρωσης	0.66
Μεγάλη εισροή νερού σε καλό πέτρωμα με ρωγμές, χωρίς υλικό πλήρωσης	0.5
Μεγάλη εισροή νερού με σημαντική απόπλυση του υλικού πλήρωσης	0.33
Πολύ μεγάλη εισροή νερού, βαθμιαίως μειούμενη με τον χρόνο	0.2-0.1
Πολύ μεγάλη εισροή νερού χωρίς μείωση με την πάροδο του χρόνου	0.05-0.1

Πίνακας 1.7: Σύστημα Q Μέρος Γ (Καββαδάς 2000)

Ορισμός της παραμέτρου SRF			
(α) διέλευση από ζώνες ρηγμάτων. Διέλευση από ασθενείς ζώνες που είναι δυνατό να προκαλέσουν χαλάρωση της βραχώμαζας.			
Περίπτωση			SRF
Αφθονες ασθενείς ζώνες με αργιλικό ή αποσαθρωμένο πέτρωμα, πολύ χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα (για οποιοδήποτε βάθος)			10
Μεμονωμένες ασθενείς ζώνες ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας < 50 m)			5
Μεμονωμένες ασθενείς ζώνες ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας > 50 m)			2.5
Αφθονες ζώνες διάτμησης σε σκληρό πέτρωμα, χωρίς αργιλικό υλικό, χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα (για οποιοδήποτε βάθος)			7.5
Μεμονωμένες ζώνες διάτμησης ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας < 50 m)			5
Μεμονωμένες ζώνες διάτμησης ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας > 50 m)			2.5
Χαλαρές ανοιχτές ασυνέχειες, έντονα διακλασμένη μάζα (για οποιοδήποτε βάθος)			5
Σημείωση η τιμή του SRF πρέπει να μειωθούν από 25% έως 50% αν οι σχετικές ζώνες διάτμησης επηρεάζουν μεν αλλά δεν τέμνουν την εκσκαφή			
(β) Πέτρωμα ικανής αντοχής υπό σχετικώς υψηλές τιμές γεωστατικών τάσεων			
Περίπτωση	$\sigma_c/\sigma_1$	$P/\sigma_1$	SRF
Χαμηλές τάσεις κοντά στην επιφάνεια, ανοιχτές ασυνέχειες	> 200	> 13	2.5
Μέσες τάσεις	200-10	13-0.66	1
Υψηλές τάσεις πολύ “σφιχτή” δομή	10-5	0.66-0.33	0.5-0.2
Μέτρια “εκτίναξη” σκληρού πετρώματος μετά από 1 ώρα	5-2.5	0.33-0.16	5-10
Έντονη “έκρηξη” και δυναμικές παραμορφώσεις σκληρού πετρώματος	< 2.5	< 0.16	10-20
(γ) Συνθλίβουν πέτρωμα, έντονες πλαστικές παραμορφώσεις λόγω πολύ υψηλών τάσεων			
Περίπτωση			Srf
Μέτρια πίεση εξαιτίας της συμπίεσης			5-10
Μεγάλη πίεση εξαιτίας της συμπίεσης			10-20
(δ) Διογκούμενο πέτρωμα λόγω χημικής ενεργότητας με προσρόφηση νερού			
Περίπτωση			SRF
Μέτρια πίεση εξαιτίας της διόγκωσης			5-10
Μεγάλη πίεση εξαιτίας της διόγκωσης			10-15



Σχήμα 1.12: Νομόγραμμα επιλογής τύπου υποστήριξης με βάση την τιμή της παραμέτρου Q (Palmstrom 2009)

## 1.6 Δείκτες Παραγωγής Και Υποστήριξης

Στα υπόγεια ορυχεία υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που σχετίζονται με την απόδοση και βελτιστοποίηση των εργασιών εξόρυξης. Οι δείκτες παραγωγής που χρησιμοποιήθηκαν είναι η ειδική κατανάλωση εκρηκτικής ύλης (powder factor), η προχώρηση % (pull - out) και η γόμωση διατρήματος. Ο ορισμός των δεκτών αυτών δίνεται στις αντίστοιχες εξισώσεις 1.3 έως 1.5.

i) Η ειδική κατανάλωση αποτελεί μια παράμετρο αξιολόγησης των ανατινάξεων και της απόδοσης της εκμετάλλευσης. Ορίζει την χρήση εκρηκτικής ύλης σε κιλά (kg) που απαιτείται για την εξόρυξη ενός κυβικού ( $m^3$ ) πετρώματος (Τσουτρέλης 2001) (σχέση 1.3).

$$\text{Ειδική Κατανάλωση} = \frac{\text{Συνολικά κιλά εκρηκτικής ύλης μετώπου ανά μήνα}}{\text{Συνολική προχώρηση (m) μετώπου ανά μήνα επί την μέση διατομή } m^2} \quad (1.3)$$

Σημείωση: Η μέση διατομή  $m^2$  μετώπου ανά μήνα υπολογίζεται από την εταιρεία.

Επιπλέον αποτελεί μια αξιολόγηση του κόστους των ανατινάξεων καθώς επιθυμητός σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση της ποσότητας των εκρηκτικών που χρησιμοποιούνται με το επιθυμητό μέγεθος κατακερματισμού του πετρώματος. Τέλος διασφαλίζει ότι η διαδικασία ανατίναξης παραμένει εντός ασφαλών ορίων, ελαχιστοποιώντας τον κίνδυνο δονήσεων εδάφους και άλλους κινδύνους που σχετίζονται με την υπερβολική χρήση εκρηκτικών. Η απαιτούμενη ειδική κατανάλωση εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως είναι ο τύπος του πετρώματος, το επιθυμητό μέγεθος θρυμματισμού, η ασφάλεια και η σχέσης κόστους - αποτελεσματικότητας.

ii) Η προχώρηση % αποτελεί επίσης μια παράμετρο αξιολόγησης των ανατινάξεων, της απόδοσης της εκμετάλλευσης καθώς και περιοχών προς βελτίωση. Ορίζει την προχώρηση σε μέτρα (m) που επιτεύχθηκε προς το μήκος διάτρησης σε μέτρα (m) που εφαρμόστηκε (Τσουτρέλης 2001) (σχέση 1.4).

$$\text{Προχώρηση \%} = \frac{\text{Συνολική προχώρηση(m) μετώπου ανά μήνα}}{\text{Συνολικό μήκος διάτρησης(m) μετώπου ανά μήνα}} \quad (1.4)$$

Παρέχει πληροφορίες για το πόσο αποτελεσματική είναι η διαδικασία διάτρησης - ανατίναξης. Ο επιθυμητός σκοπός είναι η επίτευξη υψηλού δείκτη προχώρηση % καθώς υποδεικνύει ότι ένα σημαντικό μέρος του διατρηθέντος υλικού ανακτάται οδηγώντας σε πιο αποτελεσματική και οικονομική εξόρυξη.

iii) Η γόμωση διατρήματος αποτελεί και αυτή μια παράμετρο αξιολόγησης των ανατινάξεων και της απόδοσης της εκμετάλλευσης. Ορίζει τα κιλά εκρηκτικής ύλης που χρησιμοποιούνται ανά διάτρημα (σχέση 1.5).

$$\text{Γόμωση διατρήματος} = \frac{\text{Συνολικά κιλά εκρηκτική ύλης μετώπου ανά μήνα}}{\text{Συνολικά διατρήματα μετώπου ανά μήνα}} \quad (1.5)$$

Στόχος είναι να χρησιμοποιηθεί η κατάλληλη ποσότητα εκρηκτικών σε κάθε διάτρημα για να επιτευχθεί ο επιθυμητός κατακερματισμός του πετρώματος. Είναι μια βασική παράμετρος στο σχεδιασμό εκρήξεων και τις εργασίες εξόρυξης όπως και η ειδική κατανάλωση επηρεάζοντας παράγοντες όπως ο κατακερματισμός, το σχήμα του σωρού του ανατιναχθέντος υλικού, την ευκολία φόρτωσης - μεταφοράς και επεξεργασίας υλικού, την ασφάλεια και το κόστος.

Από την άλλη πλευρά στα υπόγεια ορυχεία χρησιμοποιούνται διάφοροι δείκτες υποστήριξης για την παρακολούθηση και την διασφάλιση της ασφάλειας των εργασιών. Οι δείκτες υποστήριξης χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας και της επάρκειας των συστημάτων υποστήριξης των υπόγειων εκμεταλλεύσεων. Τέτοιοι δείκτες υποστήριξης που υπολογίστηκαν (σχέσεις 1.6 και 1.7) είναι ο δείκτης αγκυρίων και ο δείκτης εκτοξευόμενο σκυροδέματος (Gunitite). Οι υψηλότερες τιμές των δεικτών αυτών υποδεικνύουν ότι έχει χρησιμοποιηθεί περισσότερο υλικό στήριξης για την ενίσχυση των υπόγειων εργασιών, υποδηλώνοντας υψηλότερο επίπεδο στήριξης ενώ οι χαμηλότερες τιμές μπορεί να υποδηλώνουν ότι έχει χρησιμοποιηθεί λιγότερο υλικό στήριξης το οποίο θα μπορούσε να είναι αποδεκτό σε περιοχές όπου οι γεωτεχνικές συνθήκες το επιτρέπουν.

$$\text{i) Δείκτης αγκυρίων (αγκύρια/m)} = \frac{\text{Συνολικά αγκύρια μετώπου ανά μήνα}}{\text{Συνολική προχώρηση(m) μετώπου ανά μήνα}} \quad (1.6)$$

$$\text{ii) Δείκτης gunitite (m}^3 \text{ gunitite/m)} = \frac{\text{Συνολικό gunitite μετώπου ανά μήνα}}{\text{Συνολική προχώρηση(m) μετώπου ανά μήνα}} \quad (1.7)$$



## **2. Συλλογή, περιγραφή δεδομένων και μεθοδολογία ανάλυσης**

### **2.1 Αρχεία πρωτογενών δεδομένων**

Για της ανάγκες της εργασίας λήφθηκαν 4 αρχεία δεδομένων που τηρούνται από τους αρμοδίους μηχανικούς της εταιρείας.

Το πρώτο αρχείο περιέχει πληροφορίες για τον κύκλο εργασιών που εκτελούνται ανά μήνα. Οι πληροφορίες είναι οργανωμένες ανά στοά, ημερομηνία καταγραφής και ανά βάρδια (3 βάρδιες). Περιέχει στοιχεία για την εξόρυξη όπως τύπος διάτρησης, μήκος διάτρησης, αριθμός διατρημάτων και κιλά εκρηκτικής ύλης (ΕΥ) που χρησιμοποιήθηκαν. Επιπλέον αναφέρονται πληροφορίες για την αποκομιδή του ανατιναχθέντος υλικού σε μορφή δρομολογίων και χαρακτηρισμό του τύπου του μεταλλεύματος και του τύπου του στείρου υλικού. Ακόμη περιέχονται πληροφορίες για την υποστήριξη με αγκύρια, πλέγματα, ραβδοχάλυβες (RRS), εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Gunit) και άλλες γενικές πληροφορίες για τις εργασίες που εκτελούνται.

Το δεύτερο αρχείο περιλαμβάνει πληροφορίες που καταγράφονται σε ημερήσια βάση. Οι πληροφορίες περιέχει είναι πληροφορίες θέσης μετώπου όπως η υψομετρική θέση του (Level), η στοά προσπέλασης (Stope Access), η θέση παραγωγής (Production Stope), η ζώνη εκμετάλλευσης (Ore Zone), η κατηγορία (Category) των εργασιών (παραγωγή ή ανάπτυξη), καθώς και οι συντεταγμένες XYZ. Ακόμη υπάρχουν πληροφορίες για τους γεωτεχνικούς δείκτες όπως είναι ο δείκτης ποιότητας του πετρώματος ή δείκτης κερματισμού του πετρώματος RQD (Rock Quality Designation), ο δείκτης αξιολόγησης βραχώμαζας RMR89 (Rock Mass Rating), ο δείκτης ποιότητας Q και τέλος ο δείκτης του ακεραίου βράχου IRS (Intact Rock Strength).

Το τρίτο αρχείο αφορά προχωρήσεις των μετώπων σε μέτρα ανά ημερήσια βάση και αναφέρεται κυρίως στην πρώτη βάρδια, ενώ υπάρχουν διαθέσιμες και περιορισμένες καταγραφές για την τρίτη βάρδια (από τον Ιούλιο 2020 και εφεξής). Η μέτρηση της προχώρησης του μετώπου σε μέτρα (m) γίνεται στο μέσο του δαπέδου της στοάς με χρήση γεωδαιτικού σταθμού.

Τέλος το τέταρτο αρχείο παρέχει πληροφορίες ανά μήνα για κάθε μέτωπο όπως η μέση διατομή της στοάς (average profile m<sup>2</sup>), οι εξορυχθέντες τόνοι μεταλλεύματος και στείρου, οι συνολικοί όγκοι που εξορύχθηκαν και οι συνολικές προχωρήσεις.

## **2.2 Μεθοδολογία επεξεργασίας και ανάλυσης δεδομένων**

Η ανάλυση δεδομένων είναι μια διαδικασία συλλογής, επεξεργασίας, ερμηνείας και ανάλυσης προκειμένου να εξαχθούν πληροφορίες, συμπεράσματα και να υποστηριχθεί η λήψη αποφάσεων. Περιλαμβάνει μια σειρά από τεχνικές και μεθόδους που εφαρμόζονται τόσο σε ποσοτικές όσο και σε ποιοτικές μεταβλητές δεδομένων. Τα βασικά στάδια είναι:

- Ο καθορισμός προβλήματος όπου προσδιορίζεται το πρόβλημα που χρειάζεται λύση μέσω της χρήσης της ανάλυσης δεδομένων. Η συλλογή δεδομένων (data collection) από βάσεις δεδομένων(εταιρειών), έρευνες ή πειράματα οποιασδήποτε μορφής (csv, excel κτλ.).
- Η προεπεξεργασία (preprocessing) των δεδομένων η οποία έχει σκοπό τον καθαρισμό τους, δηλαδή την τακτοποίηση, τον μετασχηματισμό (transformation) και την οργάνωση τους έτσι ώστε να είναι κατάλληλα για την επεξεργασία.
- Η στατιστική ανάλυση των δεδομένων.
- Ερμηνεία (Interpretation) και αξιολόγηση (Evaluation) των αποτελεσμάτων.

Η προεπεξεργασία δεδομένων οργανώνεται σε λογιστικά φύλλα, περιλαμβάνει ενέργειες όπως είναι αφαίρεση ή συγχώνευση στηλών, μετονομασία στηλών, δημιουργία νέων υπολογιζόμενων στηλών, φιλτράρισμα και ταξινόμηση στηλών, αφαίρεση σφαλμάτων, διόρθωση και συμπλήρωση τιμών που λείπουν, ομαδοποίηση και συγχώνευση δεδομένων καθώς και δημιουργία νέων αρχείων από τις παραμέτρους που μας ενδιαφέρουν. Η στατιστική ανάλυση και ερμηνεία αποτελεσμάτων, έχοντας τα δεδομένα στην κατάλληλη μορφή που απαιτείται, γίνεται με τη χρήση μεθόδων περιγραφικής στατιστικής και στατιστικής συμπερασματολογίας για τον εντοπισμό σημαντικών σχέσεων ή διαφορών, ερμηνεία και εξαγωγή συμπερασμάτων.

Η ανάλυση δεδομένων είναι ένα σύνθετο και διεπιστημονικό πεδίο που απαιτεί συνδυασμό γνώσεων τόσο στατιστικής όσο και δεξιοτήτων προγραμματισμού και χρήσης εξειδικευμένου λογισμικού.

## **2.3 Χρήση λογισμικών και ανάπτυξη κώδικα για την επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων**

Στη παρούσα εργασία για την προεπεξεργασία των δεδομένων έγινε η χρήση του Power Query. Το Power Query ένα εργαλείο μετασχηματισμού και ανάλυσης δεδομένων που είναι διαθέσιμο σε πολλά προϊόντα της Microsoft, όπως το Excel, το Power BI και το

SQL Server Management Studio. Για παράδειγμα οι πληροφορίες που παρέχονται όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 2.1 είναι ανά φύλλο εργασίας(worksheet) που αντιπροσωπεύει τον κάθε μήνα του έτους ξεχωριστά. Αρχικά έγινε η εισαγωγή αυτού του αρχείου στο Power Query και ακολούθησε η διαδικασία συγχώνευσης των μηνών (12 φύλλα εργασίας) με αποτελέσματα την δημιουργία ενός φύλλου εργασίας που να υπάρχουν όλα τα δεδομένα ομαδοποιημένα. Έπειτα ακολούθησαν ενέργειες προεπεξεργασίας και η δημιουργία «καθαρών» αρχείων όπως είναι αρχείο μόνο με παραμέτρους ανατίναξης, υποστήριξης, γεωτεχνικών δεικτών, προχωρήσεων, δρομολογίων και τελικώς ενός αρχείου ομαδοποιημένου ανά μήνα που να περιλαμβάνονται όλοι οι δείκτες για την διευκόλυνση της μετέπειτα στατιστικής επεξεργασίας και ερμηνείας των αποτελεσμάτων. Παρόμοιες ενέργειες ακολούθησαν και στα υπόλοιπα αρχεία που λήφθηκαν. Ενδεικτικά αποσπάσματα από την βάση δεδομένων που δημιουργήθηκε στο σύνολο των δεδομένων παρουσιάζεται στους παρακάτω πίνακες 2.1 έως 2.8 και στα ομαδοποιημένα δεδομένα από 2.9 έως 2.12.

Πίνακας 2.1: Τυπικό απόσπασμα εκμετάλλευσης που περιλαμβάνει τις γεωτεχνικές παραμέτρους (RQD, RMR, Q) των εξορυσσόμενων σχηματισμών.

Ημε/νία	Μέτωπο	Υψομετρικό Επίπεδο (m) (Level)	Ζώνη Εκμετάλλευσης (Ore Zone)	Κατηγορία (Category)	RQD	RMR	Q
23/06/2020	-295_2_2	-295	EOZ*	Παραγωγή	65	54	2.708
11/03/2020	-290_2_1	-290	WOZ*	Παραγωγή	50	31	0.138

\* EOZ= Eastern Ore Zone, WOZ= Western Ore Zone

Πίνακας 2.2: Τυπικό απόσπασμα στοιχείων που καταγράφονται κατά την ανατίναξη

Ημε/νία	Βάρδια	Μέτωπο	Υψομετρικό Επίπεδο (m) (Level)	Ζώνη Εκμετάλλευσης (Ore Zone)
29/08/2020	1	-230_1_6	-230	WOZ
27/10/2020	2	-300_1_3	-300	EOZ
05/04/2020	1	-300_3_3	-300	EOZ

Πίνακας 2.3: Τυπικό απόσπασμα στοιχείων που καταγράφονται κατά την ανατίναξη (συνέχεια του πίνακα 2.2)

Τύπος Ανατίναξης	Μήκος Διάτρησης (m)	Κιλά ΕΥ	Διατρήματα (αριθμός)
Burn cut	3	125	55
V cut	3	125	48
Δια/τική δαπέδου	1	8	8

Πίνακας 2.4: Τυπικό απόσπασμα στοιχείων των προχωρήσεων(m) μετώπου

Ημε/νία	Βάρδια	Μέτωπο	Υψομετρικό Επίπεδο (m) (Level)	Ζώνη Εκμετάλλευσης (Ore Zone)	Προχώρηση(m)
16/01/2020	1	-105_1	-105	EOZ	1.9
10/01/2020	1	-290_1_3	-290	WOZ	2.1

Πίνακας 2.5: Τυπικό απόσπασμα στοιχείων για υποστήριξη μέσω αγκυρίων

Ημε/νία	Βάρδια	Μέτωπο	Υψομετρικό Επίπεδο (m) (Level)	Ζώνη Εκμετάλλευσης (Ore Zone)	Αγκύρια (αριθμός)
14/01/2020	3	-105_1	-105	EOZ	10
24/09/2020	2	-225_2_2	-225	WOZ	12

Πίνακας 2.6: Τυπικό απόσπασμα στοιχείων για υποστήριξη μέσω Gunite

Ημε/νία	Βάρδια	Μέτωπο	Υψομετρικό Επίπεδο (m) (Level)	Ζώνη Εκμετάλλευσης (Ore Zone)	Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα Gunite (m <sup>3</sup> )
12/05/2020	3	-155_7	-155	EOZ	4
24/04/2020	3	-230_1_2	-230	WOZ	3

Πίνακας 2.7: Τυπικό απόσπασμα στοιχείων για υποστήριξη μέσω ραβδοχάλυβων (RRS)

Ημε/νία	Βάρδια	Μέτωπο	Υψομετρικό Επίπεδο (m) (Level)	Ζώνη Εκμετάλλευσης (Ore Zone)	Ραβδοχάλυβες RRS (αριθμός)
02/01/2020	3	-245_3_10	-245	WOZ	4

Πίνακας 2.8: Τυπικό απόσπασμα στοιχείων για δρομολόγια

Ημε/νία	Βάρδια	Μέτωπο	Υψομετρικό Επίπεδο (m) (Level)	Ζώνη Εκμετάλλευσης (Ore Zone)	Δρομολόγια	Τύπος
02/01/2020	1	-245_3_10	-245	WOZ	9	Μετάλλευμα
18/11/2020	1	-280_VD3	-280	WOZ	11	Στείρο

Πίνακας 2.9: Τυπικό απόσπασμα ομαδοποιημένων δεδομένων σε μηνιαία βάση

Μήνας	Μέτωπο	Υψομετρικό Επίπεδο (m) (Level)	Ζώνη Εκμετάλλευσης (Ore Zone)	Έτος	Μέσο RQD	Μέσο RMR	Μέσο Q
March	-105_1_1	-105	EOZ	2020	42	46	2
August	-290_2_1	-290	WOZ	2020	30	41	0.74

Πίνακας 2.10: Τυπικό απόσπασμα ομαδοποιημένων δεδομένων σε μηνιαία βάση (συνέχεια του πίνακα 2.9)

Μέση Διατομή Μετώπου (m <sup>2</sup> )	Χαρακτηρισμός RQD	Χαρακτηρισμός RMR	Χαρακτηρισμός Q	V - Cut	Burn - Cut
27.02	Poor	Fair	Poor	11	2
27.52	Poor	Fair	Very Poor	11	-

Πίνακας 2.11: Τυπικό απόσπασμα ομαδοποιημένων δεδομένων σε μηνιαία βάση (συνέχεια του πίνακα 2.10)

Ειδική Κατανάλωση (Kg/m <sup>3</sup> )	Γόμωση Διατρήματος	Προχώρηση %	Δείκτης Αγκύρια	Δείκτης Gunit (m <sup>3</sup> /m)
1.45	1.68	0.79	5.43	1.7
1.38	1.74	0.88	6.28	2.88

Πίνακας 2.12: Τυπικό απόσπασμα ομαδοποιημένων δεδομένων σε μηνιαία βάση (συνέχεια του πίνακα 2.11)

Συνολικά Κιλά ΕΥ	Συνολικό Μήκος Διάτρησης(m)	Συνολική Προχώρηση(m)	Συνολικά Διατρήματα (αριθμός)	Συνολικά Αγκύρια(αριθμός)	Συνολικό Gunit(m <sup>3</sup> )
1000	32.3	25.6	596	139	43.5
859	25.6	22.6	495	142	65

Για την στατιστική επεξεργασία έγινε η χρήση της γλώσσας προγραμματισμού R (είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για στατιστική ανάλυση δεδομένων) και των σχετικών βιβλιοθηκών της. Για την ανάπτυξη κώδικα χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω ρουτίνες (πακέτα) της R:

1) Το ggplot2 για την οπτικοποίηση - αναπαράσταση των δεδομένων με γραφικές απεικονίσεις διαφόρων τύπων όπως είναι διαγράμματα διασποράς, ραβδόγραμμα, κυκλικό διάγραμμα (Mailund, 2022).

2) Το ggpubr είναι μια επέκταση του πακέτου ggplot2. Χρησιμοποιείται για την δημιουργία κοινών τύπων γραφικών παραστάσεων. Προσφέρει λειτουργίες για ομαδοποίηση και διαμόρφωση των δεδομένων με απλό τρόπο, διευκολύνοντας τη δημιουργία γραφικών με πολλαπλές ομάδες ή υποσύνολα (<https://www.geeksforgeeks.org/>).

3) Το dplyr είναι ένα πακέτο που αναπτύχθηκε για να παρέχει ένα σύνολο λειτουργιών για τον χειρισμό και μετασχηματισμό δεδομένων όπως είναι η εντολή summarize () για τη συγκέντρωση δεδομένων και τη δημιουργία συνοπτικών στατιστικών (π.χ. μέση τιμή)

και για την ομαδοποίηση χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση `group_by()` κ.α. (Mailund, 2022).

4) Η εντολή `Shapiro.test` για τον έλεγχο κανονικότητας των δεδομένων και `qqplot` για τον έλεγχο κανονικότητας με διαγράμματα ποσοστημορίων (Q - Q Plot) (<https://www.geeksforgeeks.org/>).

5) Η εντολή `t.test` για τον έλεγχο υποθέσεων (<https://www.geeksforgeeks.org/>).

6) Το πακέτο `ggcorrplot` παρέχει έναν ισχυρό και ευέλικτο τρόπο οπτικοποίησης πινάκων συσχέτισης χρησιμοποιώντας γραφικά `ggplot2`. Ο κύριος σκοπός του `ggcorrplot` είναι να δημιουργήσει οπτικά ελκυστικά και ενημερωτικά διαγράμματα συσχέτισης, καθιστώντας ευκολότερη την εξερεύνηση των σχέσεων μεταξύ των μεταβλητών σε έναν πίνακα συσχέτισης. Επιπλέον το πακέτο `GGally` διευκολύνει τη δημιουργία μιας ποικιλίας οπτικοποιήσεων για εξερεύνηση δεδομένων και ανάλυση συσχέτισης. Παρέχει πολλές χρήσιμες συναρτήσεις που επιτρέπουν την δημιουργία πινάκων διασποράς για κάθε ζεύγος μεταβλητών, πίνακες συσχέτισης και άλλους τύπους γραφημάτων γρήγορα και αποτελεσματικά (<https://www.geeksforgeeks.org/>).

7) Η εντολή `lm` είναι μια συνάρτηση που χρησιμοποιείται για την προσαρμογή μοντέλων γραμμικής παλινδρόμησης σε δεδομένα. Η γραμμική παλινδρόμηση είναι μια στατιστική μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση της σχέσης μεταξύ μιας εξαρτημένης μεταβλητής και μιας ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών (ονομάζονται επίσης προγνωστικές ή επεξηγηματικές μεταβλητές) (McGibney, 2023).

### **3. Στατιστική ανάλυση**

#### **3.1 Εισαγωγή**

Η στατιστική είναι η επιστήμη των δεδομένων. Είναι ένας κλάδος μαθηματικών και επιστήμης που περιλαμβάνει την συλλογή, οργάνωση, ανάλυση, παρουσίαση και ερμηνεία δεδομένων. Παρέχει μεθόδους και τεχνικές για την εξαγωγή συμπερασμάτων και αποφάσεων επιτρέποντας στους ερευνητές και τους αναλυτές να κατανοήσουν πολύπλοκες πληροφορίες και να βγάλουν ουσιαστικά συμπεράσματα. Οι δυνατότητες αυτές διαφοροποιούνται ανάλογα με το είδος/τύπο των μεταβλητών. Οι μεταβλητές διακρίνονται σε ποσοτικές (quantitative) που παίρνουν μόνο αριθμητικές τιμές και διακρίνονται σε συνεχείς (continuous) και διακριτές (discrete). Επίσης υπάρχουν οι ποιοτικές (qualitative) μεταβλητές που δεν παίρνουν αριθμητικές τιμές και διακρίνονται σε κατηγορίες (categorical/nominal) και διατάξεις (ordinal). Η στατιστική μπορεί χονδρικά να χωριστεί σε δυο ενότητες, την περιγραφική στατιστική (Descriptive Statistic) και την στατιστική συμπερασματολογία (Inference Statistic) (Heumann et al., 2022).

#### **3.2 Περιγραφική στατιστική**

Η περιγραφική στατιστική αναφέρεται ως κλάδος περιγραφής των δεδομένων με τέτοιο τρόπο ώστε να διευκολυνθεί η ερμηνεία και η επακόλουθη ανάλυση τους. Τέτοιες τεχνικές είναι τα αριθμητικά περιγραφικά μέσα και οι γραφικές απεικονίσεις.

Τα αριθμητικά περιγραφικά μέσα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα μέτρα θέσης/κεντρικής τάσης (location measures/central tendency measures) τα οποία δίνουν πληροφορίες για τη θέση της κατανομής του δείγματος. Τέτοια μέτρα που χρησιμοποιήθηκαν είναι ο μέσος όρος (average) (Christian Heumann & Michael Schomaker & Shalabh 2022).

##### **3.2.1 Γραφικές απεικονίσεις**

Οι κατανομές συχνότητας είναι της μορφής πίνακα ή γραφικής αναπαράστασης που συνοψίζουν τον αριθμό ή την αναλογία κάθε διακριτής τιμής ή εύρους τιμών σε ένα σύνολο δεδομένων. Παρέχουν έναν τρόπο οργάνωσης και παρουσίασης κατηγορικών ή ποσοτικών δεδομένων. Βοηθούν στην κατανόηση της κατανομής των δεδομένων, στον



εντοπισμό των πιο κοινών ή συχνών τιμών και στην ανίχνευση ακραίων τιμών. Παρέχουν μια οπτική και συνοπτική περίληψη της σύνθεσης των δεδομένων, επιτρέποντας γρήγορες συγκρίσεις και αναλύσεις. Τέτοιες διαγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

1) Το ραβδόγραμμα (bar chart) που απεικονίζει τις τιμές ως ύψη ή μήκη ορθογωνίων ανάλογα με τις τιμές που αντιπροσωπεύουν. Οι ράβδοι μπορούν να σχεδιαστούν κατακόρυφα ή οριζόντια. Ένα γράφημα κάθετων ράβδων ονομάζεται μερικές φορές γράφημα στηλών.

2) Το κυκλικό διάγραμμα ή γράφημα πίτας (pie chart) που χωρίζεται σε φέτες για να απεικονίσει την αριθμητική αναλογία. Σε ένα κυκλικό διάγραμμα το μήκος τόξου κάθε φέτας είναι ανάλογο με την ποσότητα που αντιπροσωπεύει.

3) Το διάγραμμα διασποράς ή διασκόρπισης (scatter diagram) όπου απεικονίζεται κάθε ζεύγος παρατηρήσεων στο επίπεδο ώστε στον οριζόντιο άξονα να αντιστοιχεί μία τιμή του ζεύγους και στον κατακόρυφο η άλλη. Ένα διάγραμμα διασποράς είναι σημαντικό και ιδιαίτερα χρήσιμο στον εντοπισμό πιθανών σχέσεων μεταξύ δυο μεταβλητών. Τέλος όταν υπάρχουν δυο ή περισσότερες μεταβλητές μπορεί να κατασκευαστεί ένας πίνακας διαγραμμάτων διασποράς (matrix of scatter diagrams) και να φανούν όλες οι κατά ζεύγη σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών σε ένα δείγμα (Montgomery, 2017).

4) Το διάγραμμα ποσοστημορίων (quintile plot, Q-Q Plot) αποτελεί ένα μέγεθος απεικόνισης που βοηθάει στον προσδιορισμό της κατανομής που ακολουθούν τα δεδομένα. Εάν τα σημεία δεδομένων στο διάγραμμα πιθανοτήτων ή στο διάγραμμα ποσοστημορίων ακολουθούν στενά μια ευθεία γραμμή, υποδηλώνει ότι τα δεδομένα ακολουθούν την κατανομή που έχουμε επιλέξει να εξετάσουμε (Montgomery, 2017).

### **3.3 Στατιστική συμπερασματολογία**

Η στατιστική συμπερασματολογία είναι ο κλάδος της στατιστικής που χρησιμοποιούνται στατιστικές μέθοδοι για την εξαγωγή συμπερασμάτων και την λήψη αποφάσεων για ένα πληθυσμό με βάση τα δεδομένα που συλλέγονται από ένα δείγμα (Heumann et al., 2022). Τέτοιες τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

1) Η κανονικότητα αναφέρεται στην υπόθεση ότι τα δεδομένα σε ένα δεδομένο δείγμα ή πληθυσμό ακολουθούν μια κανονική κατανομή, γνωστή και ως Gaussian κατανομή. Η κανονική κατανομή είναι συμμετρική και χαρακτηρίζεται από τη μέση και τυπική της

απόκλιση. Μια κανονική κατανομή χαρακτηρίζεται από την καμπύλη σε σχήμα καμπάνας, με την πλειονότητα των δεδομένων να συγκεντρώνεται γύρω από τη μέση τιμή και τις συμμετρικές ουρές να εκτείνονται και στις δύο πλευρές. Επίσης ο μέσος όρος, η διάμεσος και η επικρατέστερη τιμή είναι όλα ίσα και βρίσκονται στο κέντρο της κατανομής. Αποτελεί μια σημαντική υπόθεση για πολλά παραμετρικά στατιστικά τεστ, όπως τα t test στον έλεγχο υποθέσεων, η ανάλυση διακύμανσης (ANOVA), η γραμμική παλινδρόμηση και άλλα. Αυτές οι δοκιμές βασίζονται στην υπόθεση της κανονικότητας για να διασφαλίσουν την εγκυρότητα του στατιστικού συμπεράσματος. Ενώ πολλές στατιστικές δοκιμές υποθέτουν την κανονικότητα, υπάρχουν επίσης διαθέσιμα ισχυρά τεστ που είναι λιγότερο ευαίσθητα σε αποκλίσεις από την κανονικότητα και αποτελούν τα μη παραμετρικά τεστ. Υπάρχουν διάφορες γραφικές και στατιστικές μέθοδοι για την αξιολόγηση της κανονικότητας των δεδομένων. Τέτοιες είναι γραφικές μέθοδοι περιλαμβάνουν ιστογράμματα και διαγράμματα ποσοστημορίων (Q-Q Plot) κ.α. Στατιστικά τεστ αποτελεί ένα τεστ Shapiro-Wilk κ.α. (<https://www.statology.org/>).

2) Έλεγχος υποθέσεων (hypothesis testing) χρησιμοποιείται για τη λήψη αποφάσεων ή την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τον πληθυσμό με βάση δειγματοληπτικά δεδομένα. Περιλαμβάνει τη διατύπωση μιας μηδενικής υπόθεσης (null hypothesis) και συμβολίζεται με  $H_0$  και μιας εναλλακτικής υπόθεσης (alternative hypothesis) που συμβολίζεται με  $H_1$ . Θέτουμε ως μηδενική αυτή που αμφισβητείται και εξετάζουμε αν ένα τυχαίο δείγμα που παίρνουμε από τον πληθυσμό δίνει αποδείξεις υπέρ της απόρριψής της έναντι της εναλλακτικής ( Janczyk & Pfister, 2022).

Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε το t-test όπου είναι μια παραμετρική στατιστική μέθοδος ελέγχου υποθέσεων που χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί εάν υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ των μέσων δύο ομάδων. Υπάρχουν δυο τύποι t test για ζεύγος δειγμάτων εξαρτημένων ή ανεξάρτητων και για ένα δείγμα. Επιπλέον το t-test βασίζεται σε ορισμένες παραδοχές όπως: α) Ανεξάρτητα δείγματα: Οι παρατηρήσεις σε κάθε ομάδα πρέπει να είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει ότι οι τιμές σε μια ομάδα δεν πρέπει να επηρεάζονται ή να σχετίζονται με τις τιμές της άλλης ομάδας. β) Κανονικά Κατανεμημένα Δεδομένα: Τα δεδομένα σε κάθε ομάδα πρέπει να ακολουθούν την κανονική κατανομή. Ωστόσο, για μεγάλα μεγέθη δείγματος (συνήθως μεγαλύτερα από 30), το t-test μπορεί να παρέχει αρκετά ακριβή αποτελέσματα ακόμα και αν παραβιαστεί η υπόθεση κανονικότητας. γ) Ίσες διακυμάνσεις (τεστ ίσης διακύμανσης): Οι διακυμάνσεις των δύο ομάδων πρέπει να είναι περίπου ίσες. Εάν οι διακυμάνσεις είναι

σημαντικά διαφορετικές, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια τροποποιημένη έκδοση του t - test που ονομάζεται Welch's t-test (άνιση διακύμανση t-test) (<https://www.geeksforgeeks.org/>).

3) Διαστήματα εμπιστοσύνης (Confidence Intervals) παρέχουν ένα εύρος τιμών εντός των οποίων η πραγματική παράμετρος πληθυσμού είναι πιθανό να εμπίπτει. Κατασκευάζονται με βάση τα δεδομένα του δείγματος και το επιθυμητό επίπεδο εμπιστοσύνης. Τα διαστήματα εμπιστοσύνης παρέχουν ένα μέτρο της ακρίβειας ή της αβεβαιότητας που σχετίζεται με την εκτίμηση.

4) Η συσχέτιση (correlation) μπορεί να βοηθήσει στον προσδιορισμό του πόσο στενά συνδέονται δύο μεταβλητές και αν τείνουν να κινούνται μαζί ή σε αντίθετες κατευθύνσεις. Ο συντελεστής συσχέτισης κυμαίνεται από -1 έως +1. Αν ο συντελεστής συσχέτισης είναι ή τείνει στο +1 αντιπροσωπεύει μια τέλεια θετική συσχέτιση υποδεικνύοντας ότι οι μεταβλητές έχουν μια ισχυρή γραμμική σχέση και κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση. Από την άλλη αν ο συντελεστής συσχέτισης είναι ή τείνει στο -1 αντιπροσωπεύει μια τέλεια αρνητική συσχέτιση υποδεικνύοντας ότι οι μεταβλητές έχουν ισχυρή γραμμική σχέση, αλλά κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις (Lee, 2023). Αν ο συντελεστής συσχέτισης είναι 0 δεν αντιπροσωπεύει συσχέτιση υποδεικνύοντας ότι δεν υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ των μεταβλητών. Αν είναι στα εύρη -0.19 έως 0.19 υπάρχει πολύ ασθενής συσχέτιση. Επιπλέον, υπάρχει ασθενής συσχέτιση στα εύρη -0.39 έως -0.2 ή 0.2 έως 0.39. Ακόμη, υπάρχει μέτρια συσχέτιση στα εύρη -0.59 έως -0.4 ή 0.40 έως 0.59 και ισχυρή στα εύρη -0.79 έως -0.6 και 0.6 έως 0.79. Τέλος, υπάρχει μια πολύ ισχυρή από 0.8 έως 1 και -0.8 έως -1.

5) Η ανάλυση παλινδρόμησης (Regression Analysis) είναι μια στατιστική τεχνική που χρησιμοποιείται για να εξετάσει τη σχέση μεταξύ μιας εξαρτημένης μεταβλητής (dependent variable) και μιας ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών (independent variable). Βοηθά να κατανοήσουμε πώς οι αλλαγές στις ανεξάρτητες μεταβλητές συνδέονται με τις αλλαγές στην εξαρτημένη μεταβλητή. Η εξαρτημένη μεταβλητή ονομάζεται επίσης μεταβλητή απόκρισης (response variable), ενώ οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι γνωστές ως προγνωστικές (predictors) ή επεξηγηματικές μεταβλητές (explanatory variables). Ο στόχος είναι να δημιουργηθεί ένα μοντέλο παλινδρόμησης που μπορεί να εκτιμήσει την επίδραση των ανεξάρτητων μεταβλητών στην εξαρτημένη μεταβλητή (Montgomery, 2017).

Στην απλή γραμμική παλινδρόμηση, υπάρχει μόνο μία ανεξάρτητη μεταβλητή και η σχέση μεταξύ της εξαρτημένης μεταβλητής και της ανεξάρτητης μεταβλητής μοντελοποιείται ως ευθεία γραμμή. Η εξίσωση για την απλή γραμμική παλινδρόμηση μπορεί να γραφτεί ως:  $Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon$  όπου το  $Y$  αντιπροσωπεύει την εξαρτημένη μεταβλητή, το  $X$  αντιπροσωπεύει την ανεξάρτητη μεταβλητή, το  $\beta_0$  είναι ο σταθερός όρος (η τιμή του  $Y$  όταν το  $X$  είναι 0), το  $\beta_1$  είναι η κλίση (η αλλαγή στο  $Y$  για μια μοναδιαία αλλαγή στο  $X$ ) και το  $\varepsilon$  ονομάζεται υπόλοιπο (residual) (Montgomery, 2017).

Στην πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση, η σχέση μεταξύ της εξαρτημένης μεταβλητής και των ανεξάρτητων μεταβλητών μοντελοποιείται ως ένας γραμμικός συνδυασμός των μεταβλητών πρόβλεψης, μαζί με έναν όρο σφάλματος. Η γενική εξίσωση για πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση μπορεί να εκφραστεί ως:  $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon$  όπου το  $Y$  αντιπροσωπεύει την εξαρτημένη μεταβλητή, τα  $X_1, X_2, \dots, X_n$  αντιπροσωπεύουν τις ανεξάρτητες μεταβλητές, τα  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$  αντιπροσωπεύουν τους συντελεστές παλινδρόμησης (γνωστοί και ως παράμετροι του μοντέλου) και το  $\varepsilon$  αντιπροσωπεύει το όρος τυχαίου σφάλματος (Montgomery, 2017). Οι ανεξάρτητες μεταβλητές μπορεί να είναι αριθμητικές και κατηγορηματικές. Ο στόχος της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης είναι να εκτιμηθούν οι τιμές των συντελεστών παλινδρόμησης που ταιριάζουν καλύτερα στα δεδομένα και να παρέχουν πληροφορίες για τη σχέση μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών και της εξαρτημένης μεταβλητής. Οι συντελεστές αντιπροσωπεύουν τη μέση μεταβολή της εξαρτημένης μεταβλητής που σχετίζεται με μια μεταβολή μιας μονάδας στην αντίστοιχη ανεξάρτητη μεταβλητή, διατηρώντας όλες τις άλλες μεταβλητές σταθερές. Για να διασφαλιστεί η εγκυρότητα ενός μοντέλου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, υπάρχουν αρκετές βασικές πτυχές που πρέπει να ελεγχτούν. Τέτοιες είναι η αξιολόγηση της συνολικής εφαρμογής του μοντέλου. Ο συντελεστής προσδιορισμού ( $R$ -τετράγωνο) μπορεί να εξεταστεί για να προσδιοριστεί πόσο από τη μεταβλητότητα στην εξαρτημένη μεταβλητή εξηγείται από τις ανεξάρτητες μεταβλητές. Στην πολλαπλή παλινδρόμηση εξετάζετε το προσαρμοσμένο  $R$ -τετράγωνο, το οποίο λαμβάνει υπόψη τον αριθμό των προβλέψεων και το μέγεθος του δείγματος. Επίσης αξιολογείται η σημασία των συντελεστών παλινδρόμησης. Συνήθως χρησιμοποιώντας το  $t$ -test ή το  $F$ -test, για να προσδιοριστούν εάν οι συντελεστές είναι σημαντικά διαφορετικοί από το μηδέν. Αυτό παρέχει πληροφορίες για τη σχέση μεταξύ κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής και της εξαρτημένης μεταβλητής (McGibney, 2023).

Τέλος, για να πραγματοποιηθεί η απλή ή η πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση, είναι σημαντικό να πληρούνται ορισμένες υποθέσεις, όπως η γραμμικότητα, η ανεξαρτησία των σφαλμάτων, η ομοσκεδαστικότητα (σταθερή διακύμανση των σφαλμάτων) και η κανονικότητα των σφαλμάτων, αποφυγή της πολυσυγγραμμικότητας μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών και της ύπαρξης ακραίων σημείων που μπορεί να επηρεάσουν δυσανάλογα τα αποτελέσματα της παλινδρόμησης. Αυτές οι υποθέσεις μπορούν να αξιολογηθούν μέσω υπολειμματικής ανάλυσης, διαγνωστικών γραφημάτων και στατιστικών δοκιμών (McGibney, 2023).

Στην πράξη, είναι σπάνιο να πληρούνται τέλεια όλες οι παραδοχές της γραμμικής παλινδρόμησης. Τα δεδομένα συχνά παρουσιάζουν κάποιο βαθμό απόκλισης από τις παραδοχές. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη η έκταση των παραβιάσεων και ο πιθανός αντίκτυπος στην εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Μικρές αποκλίσεις από τις παραδοχές ενδέχεται να μην επηρεάσουν σημαντικά τα συνολικά αποτελέσματα ή την ερμηνεία του μοντέλου. Ωστόσο, σημαντικές παραβιάσεις των υποθέσεων μπορεί να οδηγήσουν σε μεροληπτικές εκτιμήσεις, λανθασμένα στατιστικά συμπεράσματα και αναξιόπιστες προβλέψεις. Εάν οι παραδοχές παραβιάζονται μέτρια, υπάρχουν διάφορες στρατηγικές για την αντιμετώπιση των ζητημάτων όπως είναι ο μετασχηματισμός των παραμέτρων (όπως λογάριθμοι, τετραγωνική ρίζα), η απαλοιφή ακραίων τιμών που εμφανίζονται, η βελτίωση του μοντέλου συμπεριλαμβάνοντας πρόσθετες σχετικές μεταβλητές ή η διερεύνηση εναλλακτικών λειτουργικών μορφών και χρήση μη παραμετρικών μεθόδων.

## 4. Επεξεργασία και αποτελέσματα περιγραφικής στατιστικής ανάλυσης

Η ανάλυση που έγινε μέσω της χρήσης της περιγραφικής στατιστικής και των μεθόδων της που αναφέρθηκε στην ενότητα 3.2 γίνεται σε δυο σκέλη. Στο αρχικό μέρος παρουσιάζονται διαγράμματα περιγραφικής στατιστικής στο σύνολο των δεδομένων της εταιρείας που αναφέρονται στον κύκλο εργασιών που εκτελούνται σε ημερήσια βάση, στην δημιουργία δεικτών βάρδιας και στην εξαγωγή συμπερασμάτων. Στο δεύτερο σκέλος επειδή ο όγκος των δεδομένων είναι μεγάλος και κάποιες καταγραφές παρέχονται ανά μήνα, τα δεδομένα ομαδοποιήθηκαν και επεξεργάστηκαν ανά μήνα δημιουργώντας δείκτες που αντιπροσωπεύουν τον κύκλο εργασιών σε μηνιαία βάση. Στα πλαίσια αυτά αναλυθήκαν 110 μέτωπα από τα οποία προέκυψαν 200 σειρές δεδομένων. Οι παράμετροι που υπολογίστηκαν είναι:

- 1) Στα γεωτεχνικά η μέση τιμή RQD, RMR, Q κάθε μετώπου ανά μήνα.
- 2) Στους Δείκτες Παραγωγής:
  - i) Ειδική Κατανάλωσή ( $\text{kg/m}^3$ ) κάθε μετώπου ανά μήνα (σχέση 1.3)
  - ii) Προχώρηση % κάθε μετώπου ανά μήνα (σχέση 1.4)
  - iii) Γόμωση Διατρήματος κάθε μετώπου ανά μήνα (σχέση 1.5)
- 3) Στους δείκτες υποστήριξης:
  - i) Δείκτης Αγκυρίων κάθε μετώπου ανά μήνα (σχέση 1.6)
  - ii) Δείκτης Gunite κάθε μετώπου ανά μήνα (σχέση 1.7)

Τέλος παρουσιάζονται εκ νέου διαγράμματα περιγραφικής στατιστικής και γίνεται ο σχολιασμός τους.

### 4.1 Γεωτεχνικοί δείκτες

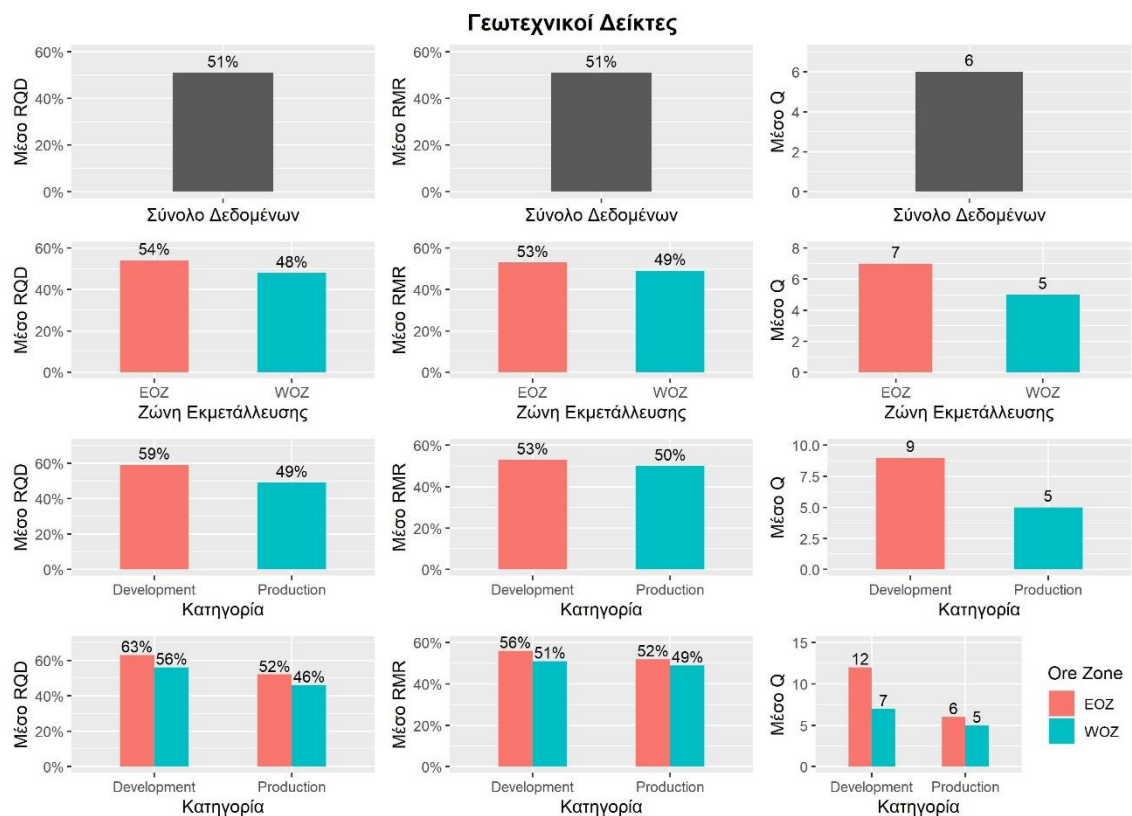
Αρχικά παρουσιάζεται η μέση τιμή των γεωτεχνικών δεικτών (σχήμα 4.1) στο σύνολο των δεδομένων συναρτήσει του συνόλου, έπειτα των δυο ζωνών εκμετάλλευσης Ανατολικά (EOZ, East Ore Zone) και Δυτικά (WOZ, West Ore Zone) και στην συνέχεια γίνεται ο διαχωρισμός ανά κατηγορία όπου Development θεωρούνται στοές προσπέλασης – ράμπες και Production θεωρούνται οι στοές παραγωγής μεταλλεύματος. Στην τελευταία γραφική απεικόνιση παρουσιάζονται οι δείκτες ανά κατηγορία και ανά

ζώνη εκμετάλλευσης. Επίσης παρουσιάζεται η μέση τιμή των γεωτεχνικών δεικτών (σχήμα 4.2) στα ομαδοποιημένα δεδομένα σε μηνιαία βάση συναρτήσει του συνόλου και των δυο ζωνών εκμετάλλευσης ανατολικά – δυτικά. Από τον τους πίνακες 1.1, 1.4 και σχήμα 1.12 ταξινόμησης των γεωτεχνικών δεικτών RQD, RMR, Q συνεπάγεται ο παρακάτω πίνακας 4.1.

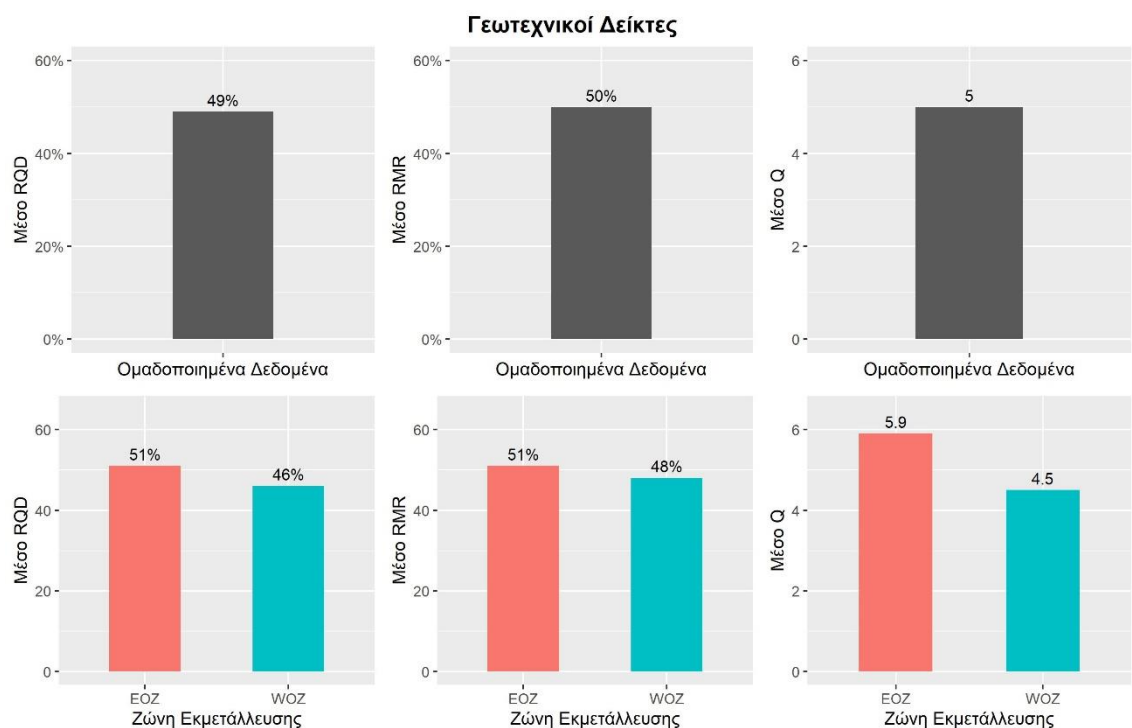
Πίνακας 4.1: Μέση τιμή των γεωτεχνικών δεικτών στο σύνολο των δεδομένων ανά ζώνη και κατηγορία εκμετάλλευσης

Σύνολο Δεδομένων	EOZ	Χαρακτηρισμός	WOZ	Χαρακτηρισμός
RQD	54	Μέτριο	48	Κακό
RMR	53	Μέτριο	49	Μέτριο
Q	7	Μέτριο	5	Μέτριο
Σύνολο Δεδομένων	Development	Χαρακτηρισμός	Production	Χαρακτηρισμός
RQD	59	Μέτριο	49	Κακό
RMR	53	Μέτριο	50	Μέτριο
Q	9	Μέτριο	5	Μέτριο

Όπως φαίνεται η μέση τιμή των γεωτεχνικών δεικτών στην ανατολική και δυτική ζώνη εκμετάλλευσης εμφανίζονται παρόμοιοι και στην ίδια ομάδα ταξινόμησης ποιότητας της βραχομάζας (δείκτες RMR και Q) με μια ελαφρώς υψηλότερη τιμή στα ανατολικά. Ομοίως, το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και ανά κατηγορία στις στοές Development και τις στοές Production. Τέλος όμοια είναι τα αποτελέσματα και στο σχήμα 4.2 στα ομαδοποιημένα δεδομένα σε μηνιαία βάση.



Σχήμα 4.1: Μέση τιμή των γεωτεχνικών δεικτών στο σύνολο των δεδομένων

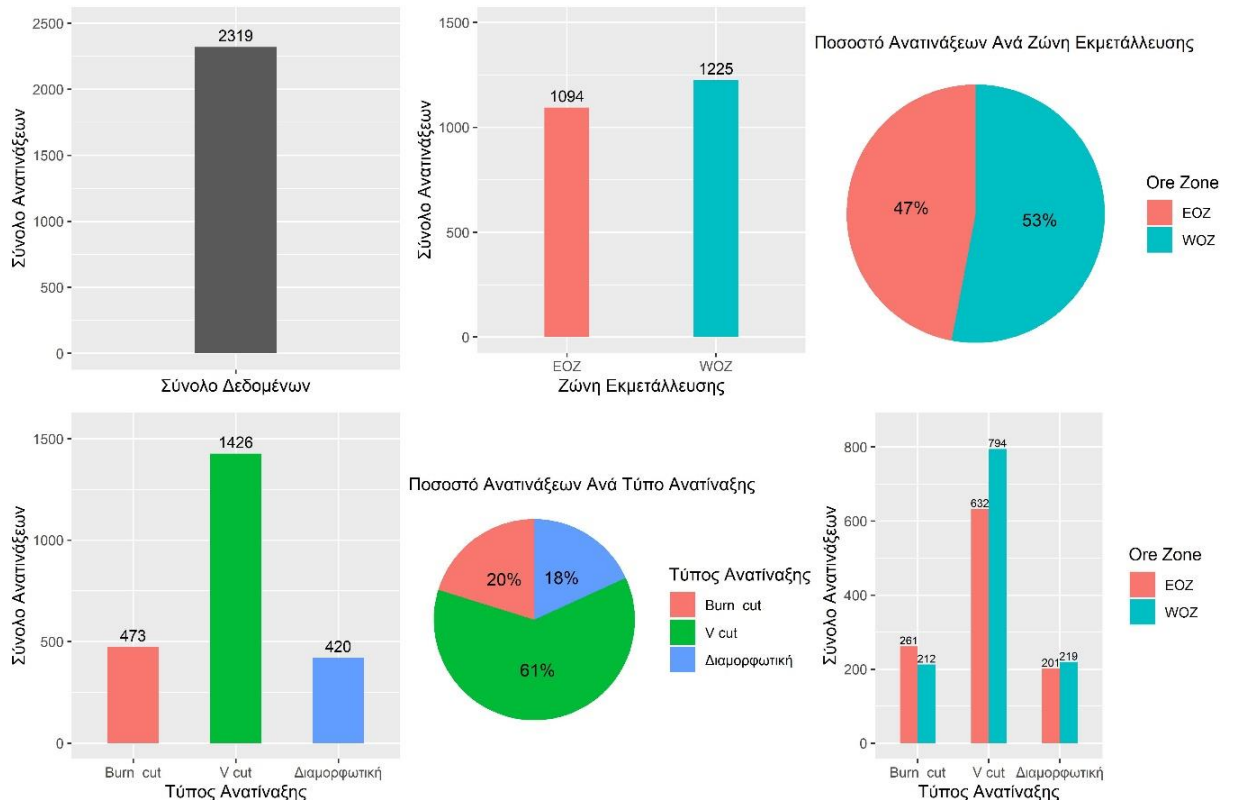


Σχήμα 4.2: Μέση τιμή γεωτεχνικών δεικτών στα ομαδοποιημένα δεδομένα σε μηνιαία βάση

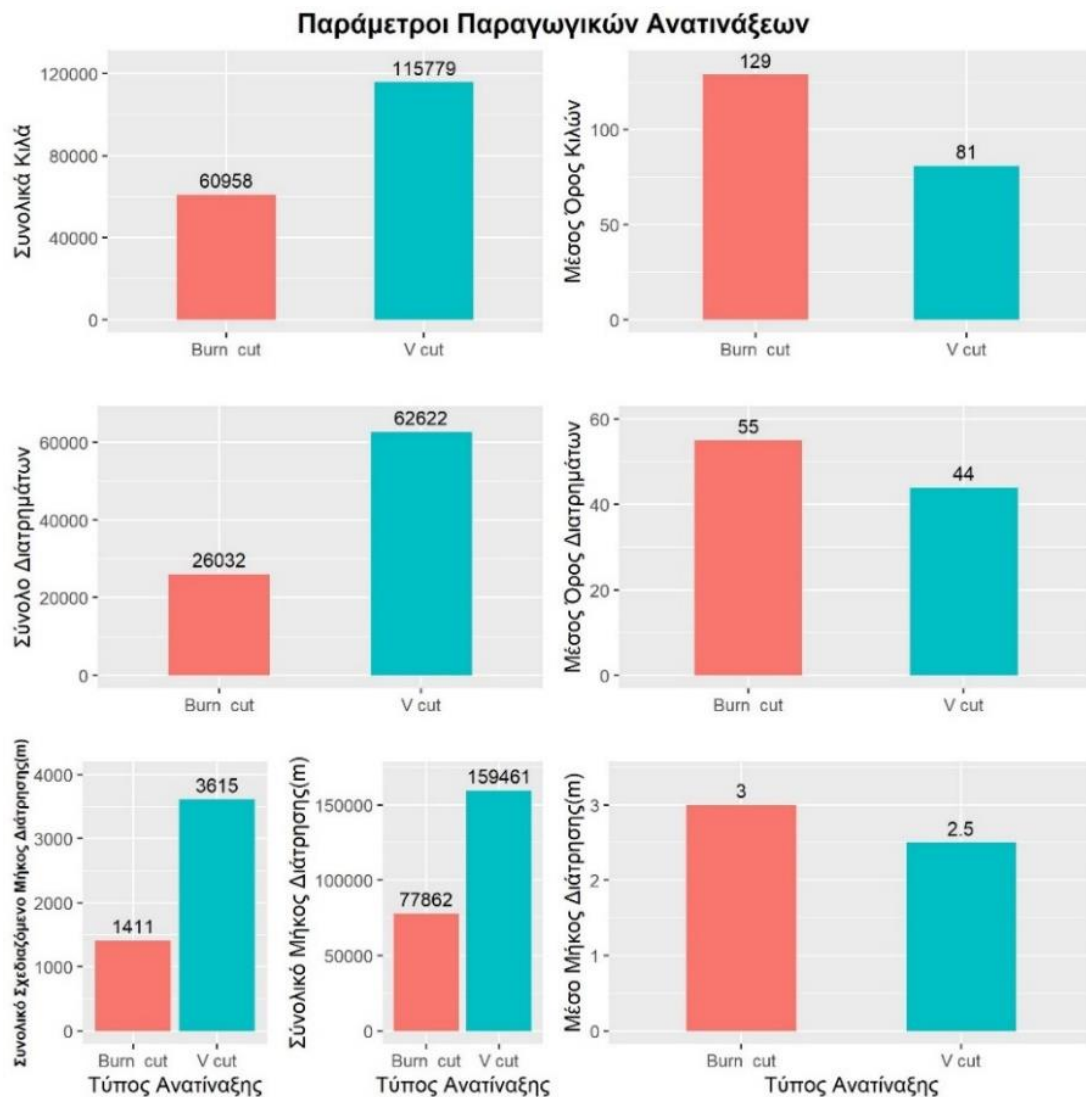


## 4.2 Στοιχεία ανατινάξεων

Σε αυτήν την ενότητα γίνεται ανάλυση των στοιχείων από τις ανατινάξεις στο σύνολο των δεδομένων. Αρχικά όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3 έγινε υπολογισμός των συνολικών ανατινάξεων και επιμερισμός τους στις δυο ζώνες εκμετάλλευσης δηλαδή ανατολική ζώνη (EOZ) και δυτική ζώνη(WOZ). Παρουσιάζουν παρόμοιο αριθμό ανατινάξεων, με την δυτική να υπερέχει ελάχιστα όπως φαίνεται και στο κυκλικό διάγραμμα της πρώτης σειράς του σχήματος 4.3. Επίσης οι ανατινάξεις τύπου V - Cut υπερέχουν κατά πολύ έναντι τύπου Burn - Cut όπως φαίνεται στο κυκλικό διάγραμμα της δεύτερης σειράς του σχήματος 4.3. Επιπλέον υπάρχουν διαφορές στις παραμέτρους ανατίναξης των δυο μεθόδων (σχήμα 4.4) καθώς η μέθοδος V - Cut έχει κατά μέσο όρο 81 κιλά εκρηκτικής ύλης, 44 διατρήματα και 2.5m μήκος διάτρησης ενώ η μέθοδος Burn - Cut εμφανίζει 129 κιλά, 55 διατρήματα και 3m μήκος διάτρησης. Τέλος υπολογιστήκαν οι συνολικές ποσότητες (kg) εκρηκτικής ύλης της κάθε παραγωγικής μεθόδου, τα συνολικά διατρήματα, το συνολικό μήκος διάτρησης (ανά διάτρημα) και τα συνολικά σχεδιαζόμενα μήκη διάτρησης (ανά ανατίναξη).



Σχήμα 4.3: Παρουσίαση της ανάλυσης των συνολικών ανατινάξεων

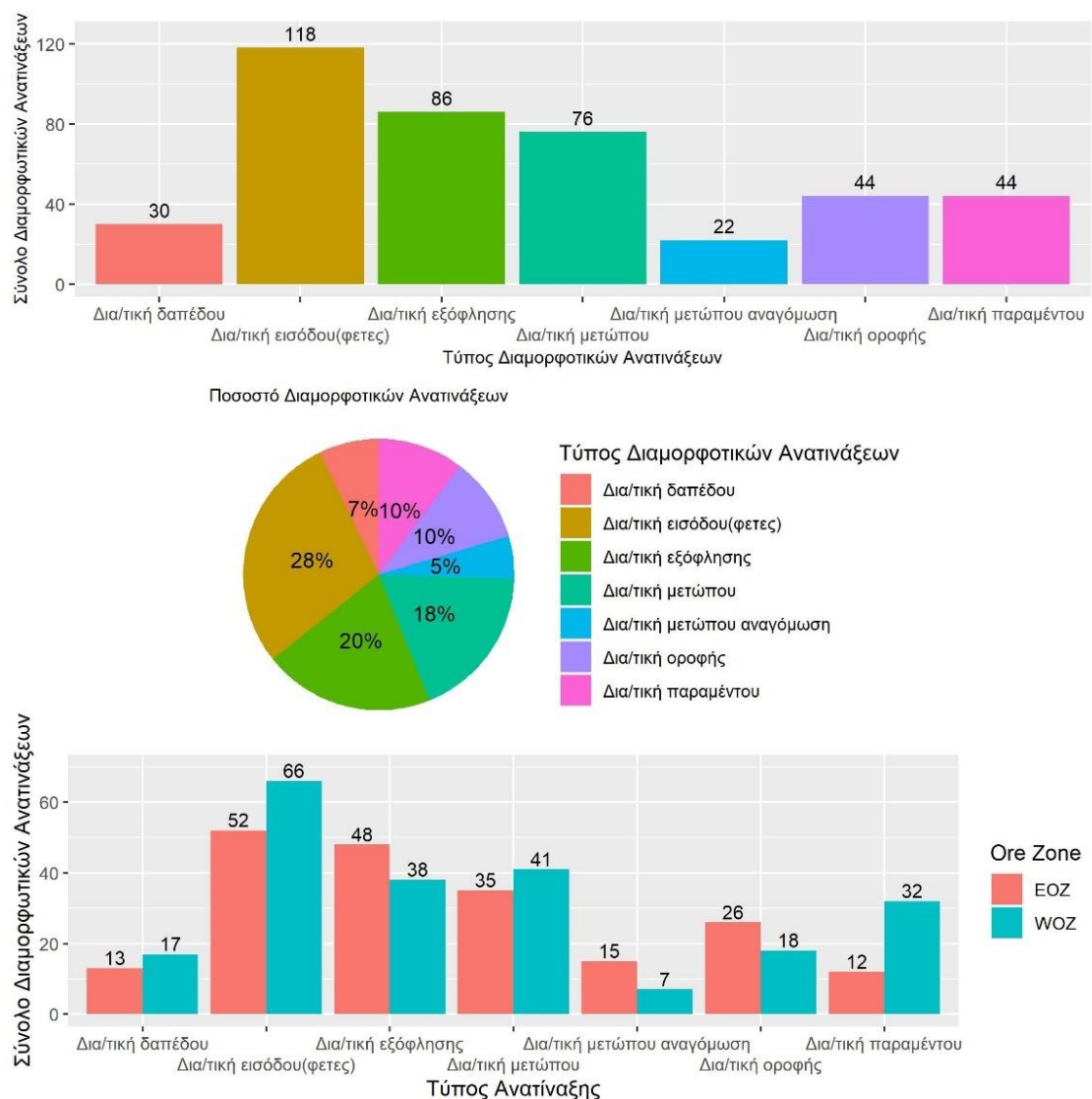


Σχήμα 4.4: Παρουσίαση παραμέτρων μεθόδων ανατίναξης

Σημείωση: Στο σχήμα 4.4 ως συνολικό σχεδιαζόμενο μήκος διάτρησης αναφέρεται το μήκος διάτρησης που εκτελέστηκε ανά ανατίναξη (πχ V-Cut 2.5m). Ενώ ως συνολικό μήκος διατήρησης αναφέρεται το μήκος διάτρησης επί τα διατρήματα που εκτελέστηκαν (πχ V-Cut 2.5m \* 40 διατρήματα).

Επίσης από την ανάλυση στις διαμορφωτικές ανατινάξεις (σχήμα 4.5) εκτός τις διαμορφωτικές ανατινάξεις εισόδου που γίνονται για την δημιουργία χώρου κατά την έναρξη νέας στοάς, διαμορφωτικές οροφής για την δημιουργία ράμπας για την άνοδο στο επόμενο υψομετρικό επίπεδο και τις διαμορφωτικές εξόφλησης που γίνεται στο τέλος της εκμετάλλευσης της στοάς για την εξόρυξη των εναπομείναντος μεταλλεύματος, οι υπόλοιπες διαμορφωτικές ανατινάξεις (μετώπου, δαπέδου, παραμέντου, αναγόμενης) γίνονται για την διαμόρφωση του μετώπου στην σωστή μορφή που θα έπρεπε να είναι

και την σωστή κατεύθυνση μετά από παραγωγικές ανατινάξεις. Αυτές οι ανατινάξεις επιφέρουν καθυστερήσεις στην παραγωγή και εμφανίζονται σε σημαντικό ποσοστό.

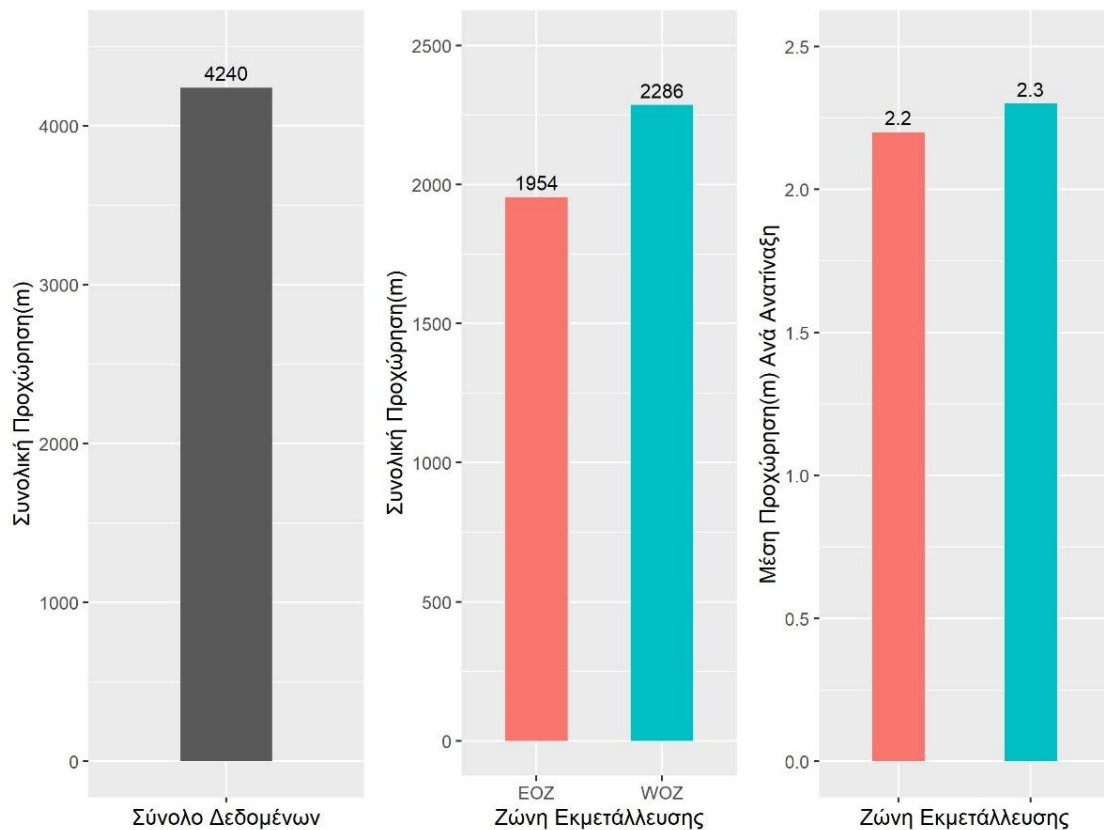


Σχήμα 4.5: Πλήθος διαμορφωτικών ανατινάξεων ανάλογα με τον τύπο τους για τις ζώνες εκμετάλλευσης EOZ και WOZ.

### 4.3 Στοιχεία προχωρήσεων

Σε αυτήν την ενότητα γίνεται ανάλυση για τις προχωρήσεις (m) (σχήμα 4.6) που υφίστανται στο σύνολο των δεδομένων της εταιρείας. Έγινε υπολογισμός στην συνολική και μέση προχώρηση(m) των ανατινάξεων στο σύνολο των δεδομένων και ανά ζώνη

εκμετάλλευσης. Όπως προκύπτει η συνολική προχώρηση είναι 4240m ενώ δεν φαίνεται να υπάρχει διαφορά στην μέση προχώρηση ανά ζώνη εκμετάλλευσης.

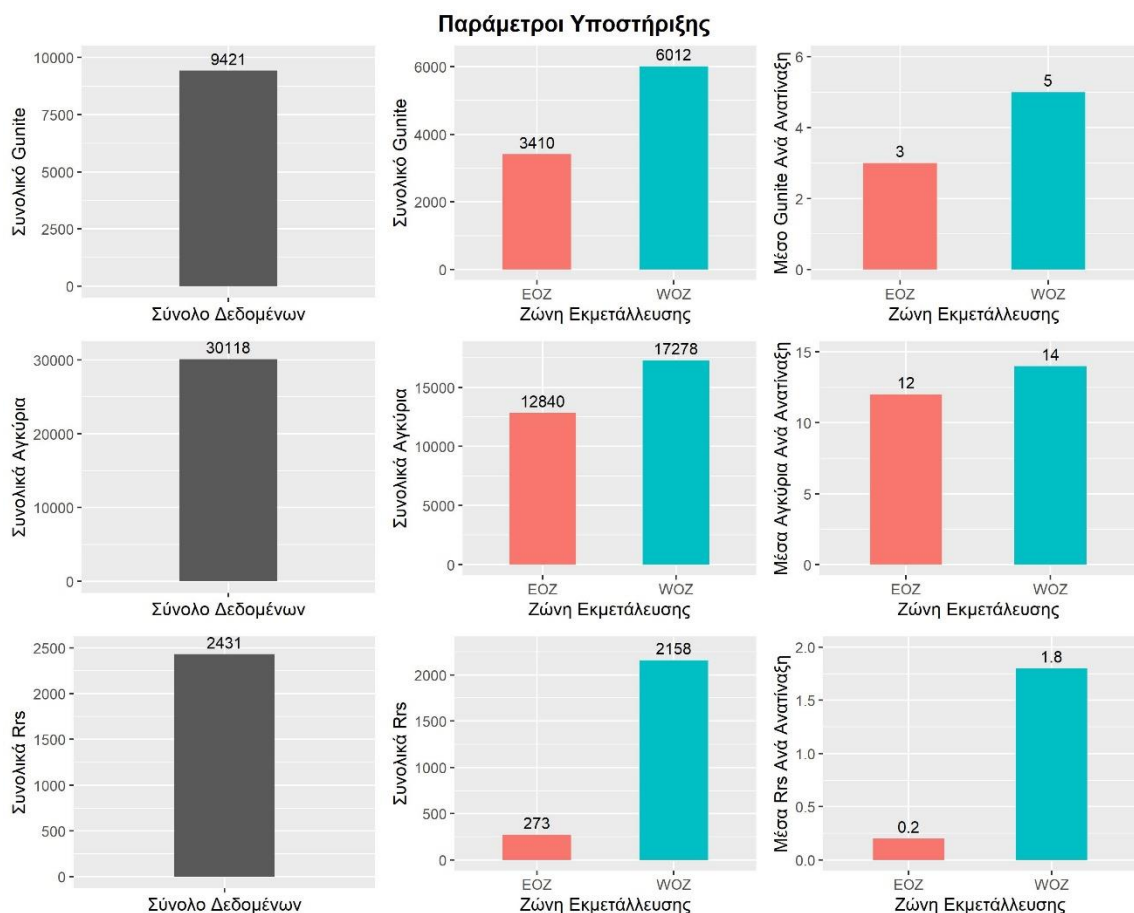


Σχήμα 4.6: Συνολική προχώρησης(m) και μέσης ανά ανατίναξη στις ζώνες εκμετάλλευσης EOX και WOZ

#### 4.4 Στοιχεία Υποστηρίξεων

Στην ενότητα αυτή γίνεται ανάλυση στις παραμέτρους που αφορούν την υποστήριξη όπως είναι τα αγκύρια, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα Gunite ( $\text{m}^3/\text{m}$ ) καθώς και οι ραβδοχάλυβες RRS στο σύνολο των δεδομένων της εταιρείας (σχήμα 4.7). Τα συνολικά αγκύρια είναι 30118, το συνολικό Gunite  $9421 \text{ m}^3/\text{m}$  και οι συνολικοί ραβδοχάλυβες RRS είναι 2431. Επιπλέον γίνεται ο διαχωρισμός στις ζώνες εκμετάλλευσης και παρουσιάζονται τόσο η συνολική και η μέση υποστήριξη ανά ανατίναξη. Τόσο η συνολική όσο και μέση τιμή των δεικτών που σχετίζονται με την υποστήριξη εμφανίζουν υψηλότερες τιμές στην δυτική ζώνη από ότι στην ανατολική ζώνη εκμετάλλευσης. Οι εμφανιζόμενες υψηλότερες συνολικές τιμές υποστήριξης στην ανατολική ζώνη εκμετάλλευσης είναι της εντονότερης εκμετάλλευσης σε αυτή αφού έχουν γίνει 113 περισσότερες ανατινάξεις παραγωγής τύπου V-Cut και Burn-Cut (σχήμα 4.3). Από την

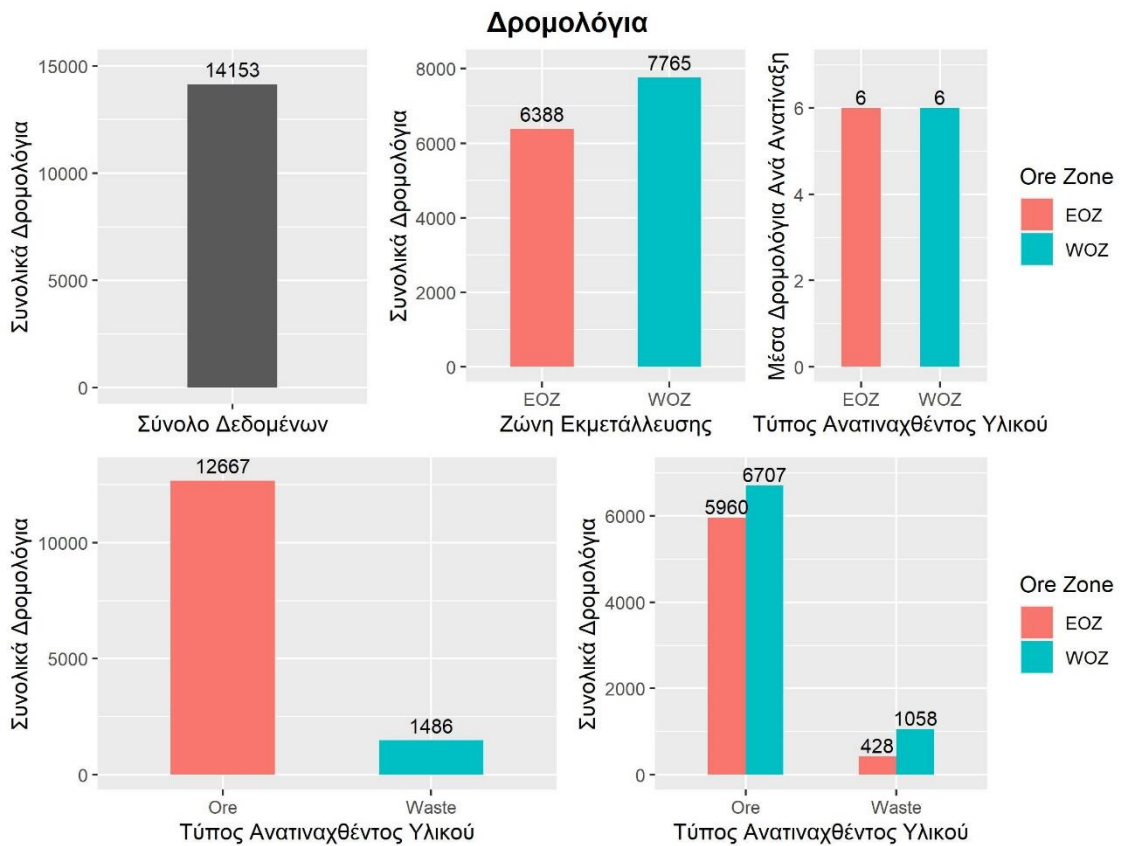
άλλη οι υψηλότερες μέσες τιμές υποστήριξης στην δυτική ζώνη εκμετάλλευσης φαίνεται να σχετίζονται με την ελαφρώς υποδεέστερη ποιότητα βραχομάζας αυτής της ζώνης, όπως προέκυψε από την ενότητα 4.1.



Σχήμα 4.7: Δείκτες που σχετίζονται με την υποστήριξη συνολικά και μέσα ανά ανατίναξη στις ζώνες εκμετάλλευσης ΕΟΖ και WOZ

## 4.5 Στοιχεία Δρομολόγιων

Στην ενότητα αυτή γίνεται ανάλυση στα συνολικά δρομολόγια των ανατινάξεων στο σύνολο των δεδομένων της εταιρείας και ανά ζώνη εκμετάλλευσης και τύπο εξορυχθέντος υλικού (σχήμα 4.8). Τα συνολικά δρομολόγια ανατιναχθέντος υλικού είναι 14153 εκ των οποίων τα 12667 είναι μέταλλευμα ενώ τα υπόλοιπα 1486 στείρου υλικού. Αυτό δείχνει ότι τα δεδομένα σχετίζονται κυρίως με στοές παραγωγικές δηλαδή μεταλλεύματος. Τέλος τα μέσα δρομολόγια ανά ανατίναξη δεν διαφέρουν στις ζώνες εκμετάλλευσης.



Σχήμα 4.8: Μέσος αριθμός δρομολογίων μεταφοράς εξορυχθέντων υλικών ανά ζώνη και τύπο υλικού.

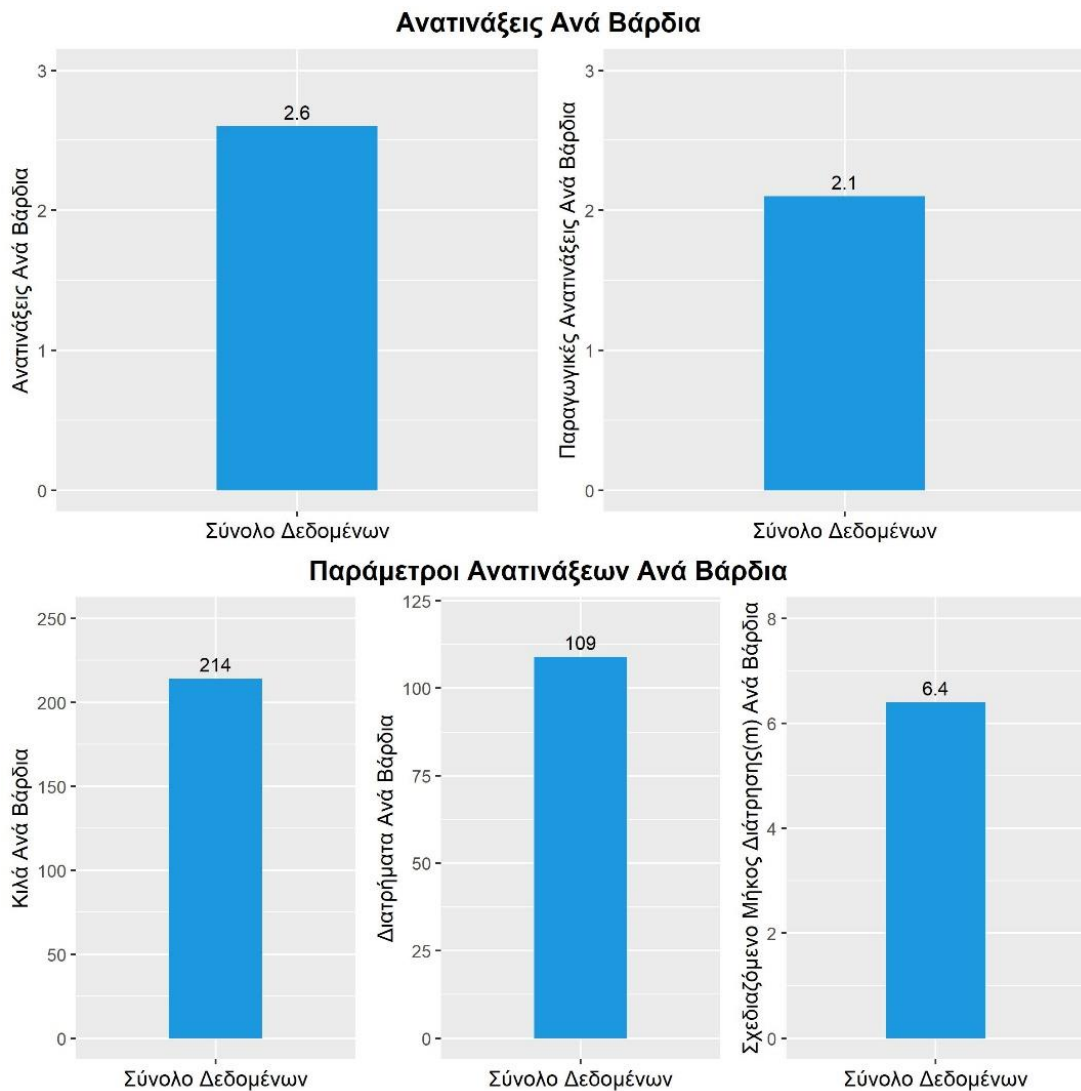
#### 4.6 Δείκτες ανά βάρδια

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται οι δείκτες ανά βάρδια που υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας τις συνολικές τιμές των παραμέτρων των παραπάνω ενοτήτων. Οι βάρδιες που ελήφθησαν υπόψη είναι 910. Οι δείκτες ανά βάρδια που παρουσιάζονται είναι δείκτες ανατινάξεων, ο δείκτης προχώρησης, οι δείκτες υποστήριξης και δείκτες δρομολογίων. Ο υπολογισμός του εκάστοτε δείκτη βάρδιας έγινε ως εξής

$$\text{Δείκτης βάρδιας} = \frac{\text{Συνολική τιμή παραμέτρου}}{910 \text{ (συνολικές βάρδιες)}} \quad (1.9)$$

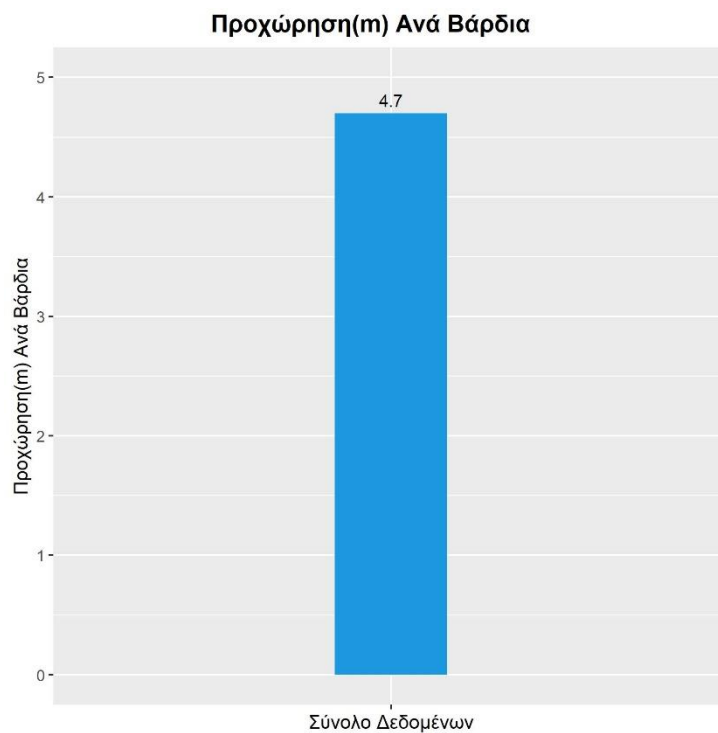
Αρχικά παρουσιάζονται οι δείκτες ανατινάξεων ανά βάρδια (σχήμα 4.9) όπου ο συντελεστής συνολικών ανατινάξεων ανά βάρδια είναι 2.6 ανατινάξεις ανά βάρδια ενώ ο συντελεστής παραγωγικών ανατινάξεων ανά βάρδια είναι 2.1, γίνονται 2 παραγωγικές ανατινάξεις ανά βάρδια και 1 διαμορφωτική διάφορου τύπου. Επίσης οι απαιτούμενες ποσότητες εκρηκτικής ύλης ανά βάρδια είναι 214 kg, τα διατρήματα 109 και το σχεδιαζόμενο μήκος διάτρησης 6.4m. Στις διαμορφωτικές ανατινάξεις που

παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.2 αναφέρθηκαν διαμορφωτικές που επιφέρουν καθυστερήσεις στην παραγωγή. Αυτές οι ανατινάξεις είναι συνολικά 172. Αυτός ο αριθμός αντιστοιχεί σε 0.2 διαμορφωτικές ανατινάξεις καθυστερήσεων ανά βάρδια δηλαδή, σε κάθε 5 βάρδιες ακολουθεί μία ανατίναξη καθυστέρησης στην παραγωγή.



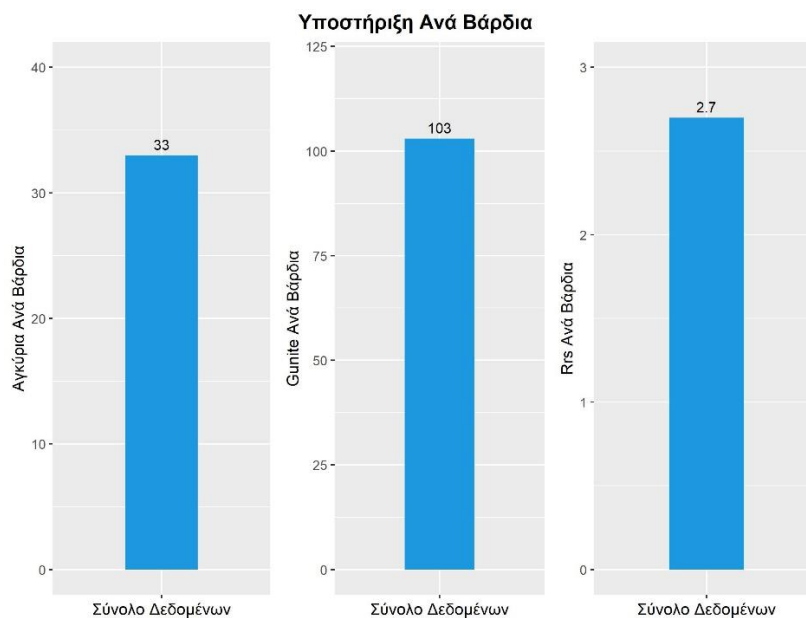
Σχήμα 4.9: Δείκτες ανατίναξης ανά βάρδια

Στην συνέχεια υπολογίστηκε η συνολική προχώρηση ανά βάρδια που ανέρχεται σε 4.7m (σχήμα 4.10)



Σχήμα 4.10: Δείκτης συνολικής προχώρησης(m) ανά βάρδια

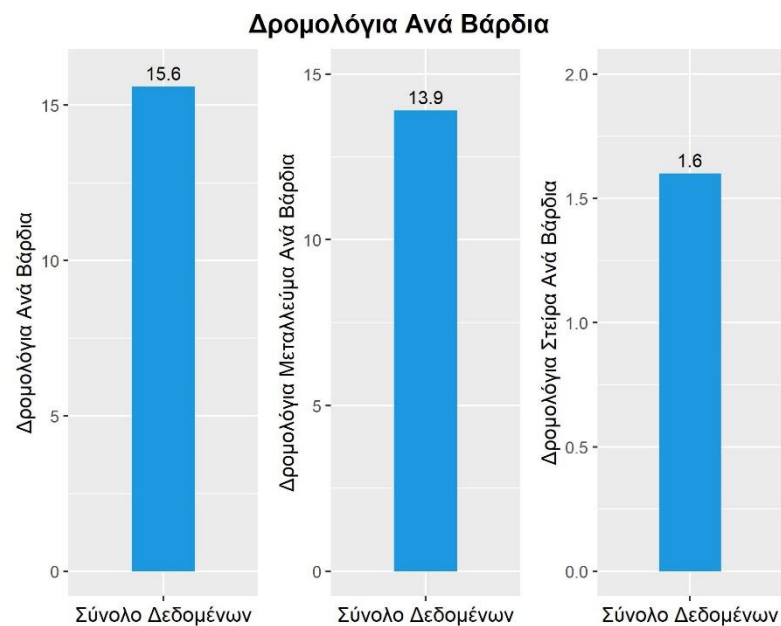
Επιπλέον υπολογίστηκαν οι δείκτες υποστήριξης ανά βάρδια (σχήμα 4.11) όπου απαιτούνται 33 αγκύρια ανά βάρδια, 103 (m<sup>3</sup>) Gunite και 2.7 Rrs ανά βάρδια.



Σχήμα 4.11: Δείκτες υποστήριξης ανά βάρδια



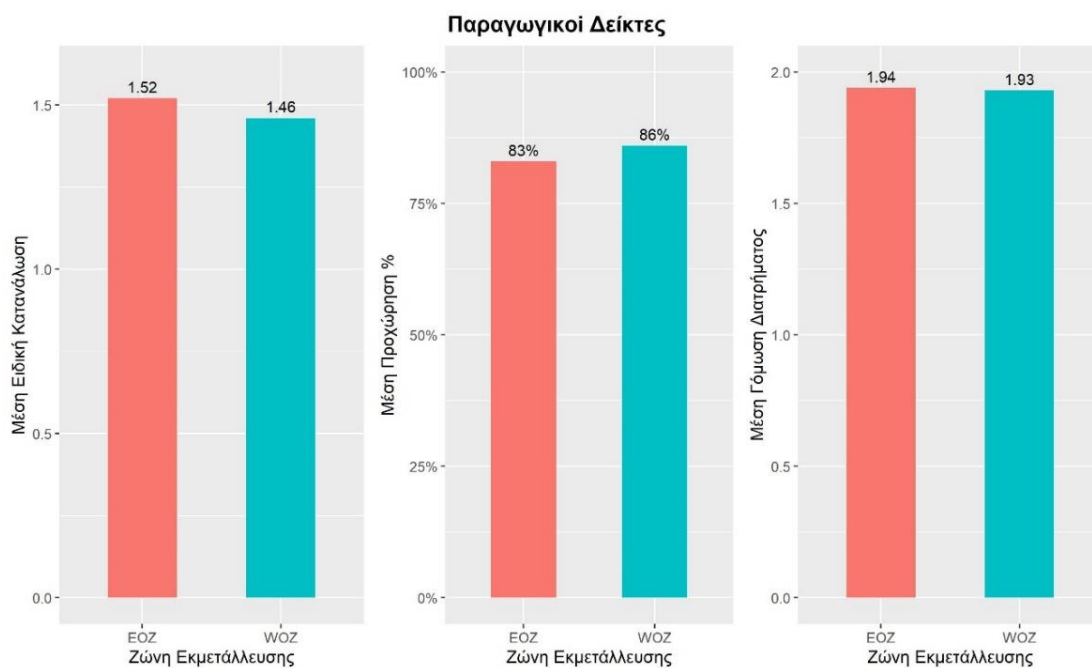
Τέλος ακολουθεί η παρουσίαση των δεικτών δρομολογίων ανά βάρδια (σχήμα 4.12) όπου τα συνολικά δρομολόγια ανά βάρδια είναι 15.6 δρομολόγια εκ των οποίων μεταλλεύματος είναι 13.9 και στείρων 1.6.



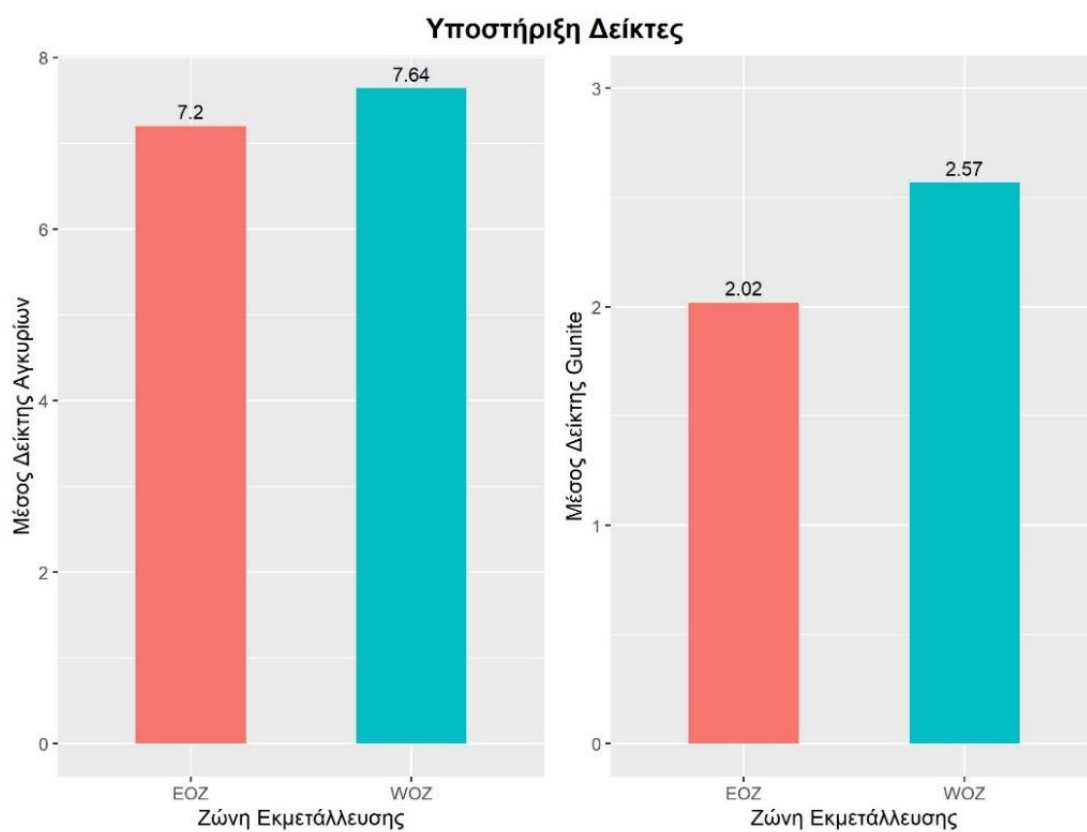
Σχήμα 4.12: Δείκτες δρομολογίων ανά βάρδια

#### 4.7 Δείκτες παραγωγής και υποστήριξης

Στην ενότητα αυτή γίνεται ανάλυση στα ομαδοποιημένα δεδομένα σε μηνιαία βάση με την χρήση των περιγραφικών μεθόδων στατιστικής για τους δείκτες παραγωγής και υποστήριξης (υπολογίζονται από τις σχέσεις 1.3 έως 1.7). Αρχικά παρουσιάζεται η μέση τιμή των δεικτών παραγωγής και υποστήριξης ανά ζώνη εκμετάλλευσης (σχήμα 4.13 και σχήμα 4.14). Η ειδική κατανάλωση και η γόμωση διατρήματος είναι ελαφρώς υψηλότερη στην ανατολική ζώνη απ' ό τι στη δυτική ενώ η προχώρηση % είναι ελαφρώς χαμηλότερη στην ανατολική ζώνη. Τέλος οι δείκτες υποστήριξης είναι ελαφρώς υψηλότεροι στη δυτική.

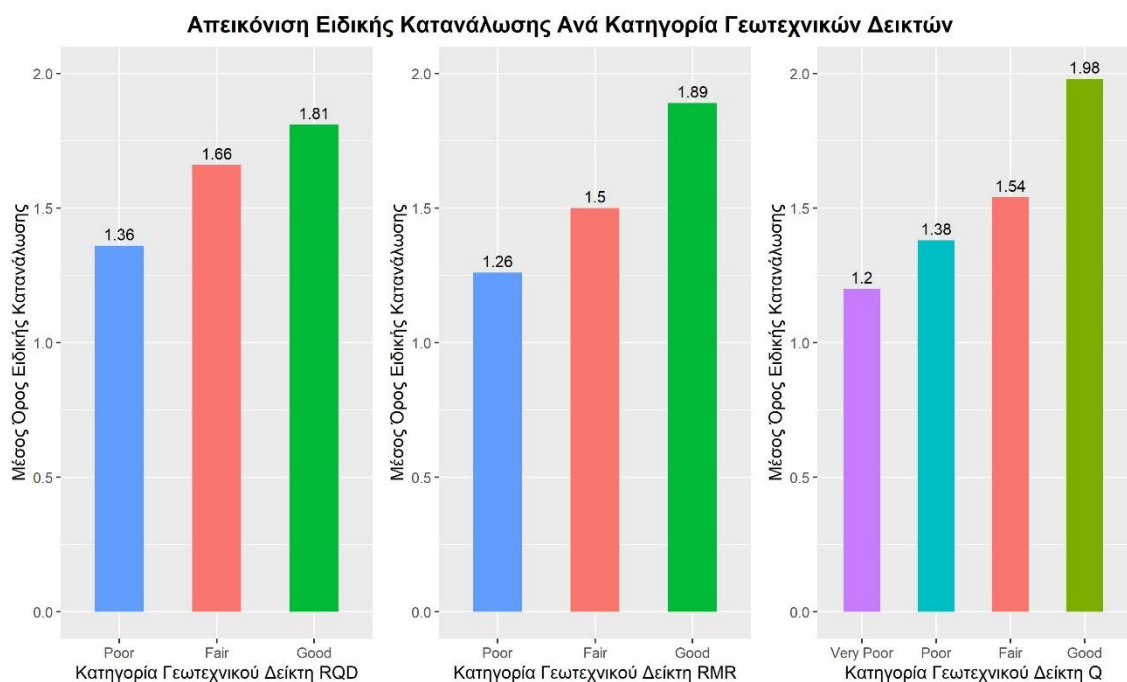


Σχήμα 4.13: Δείκτες παραγωγής σε μηνιαία βάση ανά ζώνη εκμετάλλευσης

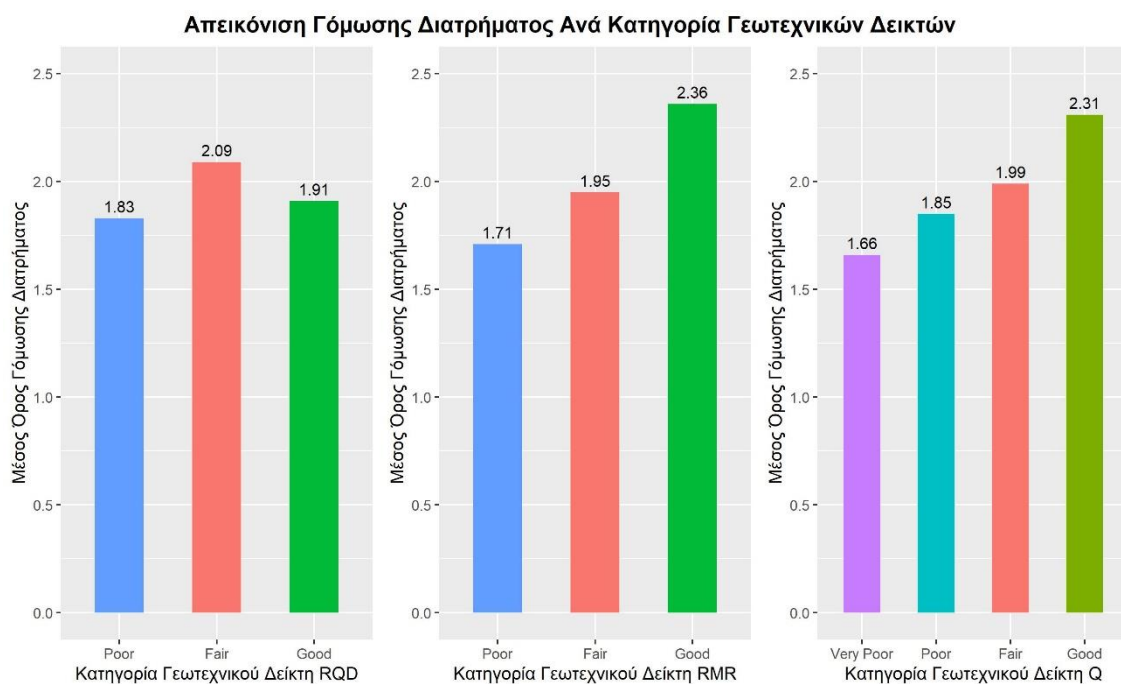


Σχήμα 4.14: Δείκτες υποστήριξη σε μηνιαία βάση ανά ζώνη εκμετάλλευσης

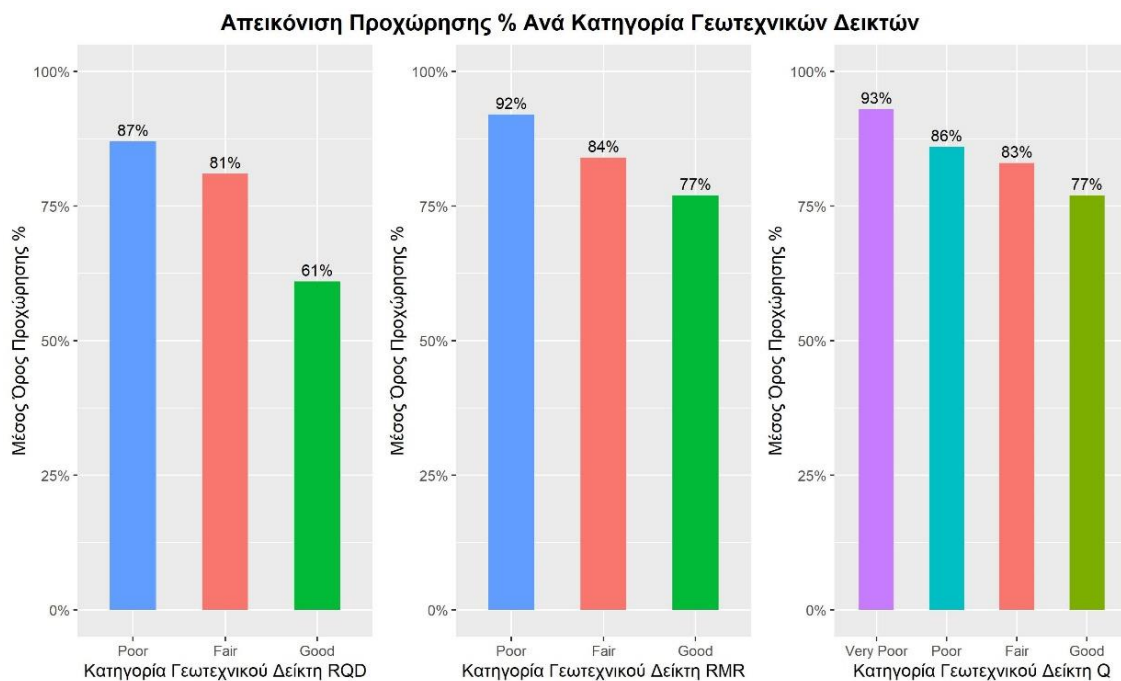
Στην συνέχεια παρουσιάζεται στα σχήματα 4.15 έως 4.19 η μέση τιμή των δεικτών παραγωγής και υποστήριξης ανά κατηγορία δεικτών βραχόμαζας RQD, RMR, Q . Στους δείκτες παραγωγής η ειδική κατανάλωση και η γόμωση διατρήματος αυξάνεται βαθμιαία με την αύξηση της ποιότητας της βραχόμαζας δηλαδή ανά κατηγορία ποιότητας. Αυτό σημαίνει ότι χρειάζονται περισσότερα κιλά εκρηκτικής ύλης για την εξόρυξη σε πιο «υγιή» γεωτεχνικά πετρώματα. Αντίθετα ο δείκτης προχώρηση % μειώνεται βαθμιαία με την αύξηση της ποιότητας της βραχομάζας που σημαίνει ότι η προχώρηση εκμετάλλευσης μειώνεται σε πιο «υγιή» γεωτεχνικά πετρώματα. Στους δείκτες υποστήριξης ο δείκτης υποστήριξης που σχετίζεται με τον αριθμό των αγκυρίων που χρησιμοποιήθηκαν δεν δείχνει να επηρεάζεται σημαντικά ανά κατηγορία γεωτεχνικών δεικτών βραχόμαζας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε χειρότερης ποιότητας βραχόμαζας αλλάζουν κυρίως οι παράμετροι των αγκυρίων, όπως είναι ο τύπος τους και το μήκος τους και όχι η πυκνότητα τοποθέτησης τους. Αντίθετα ο δείκτης Gunitite μειώνεται βαθμιαία με αύξηση της ποιότητας της βραχόμαζας.



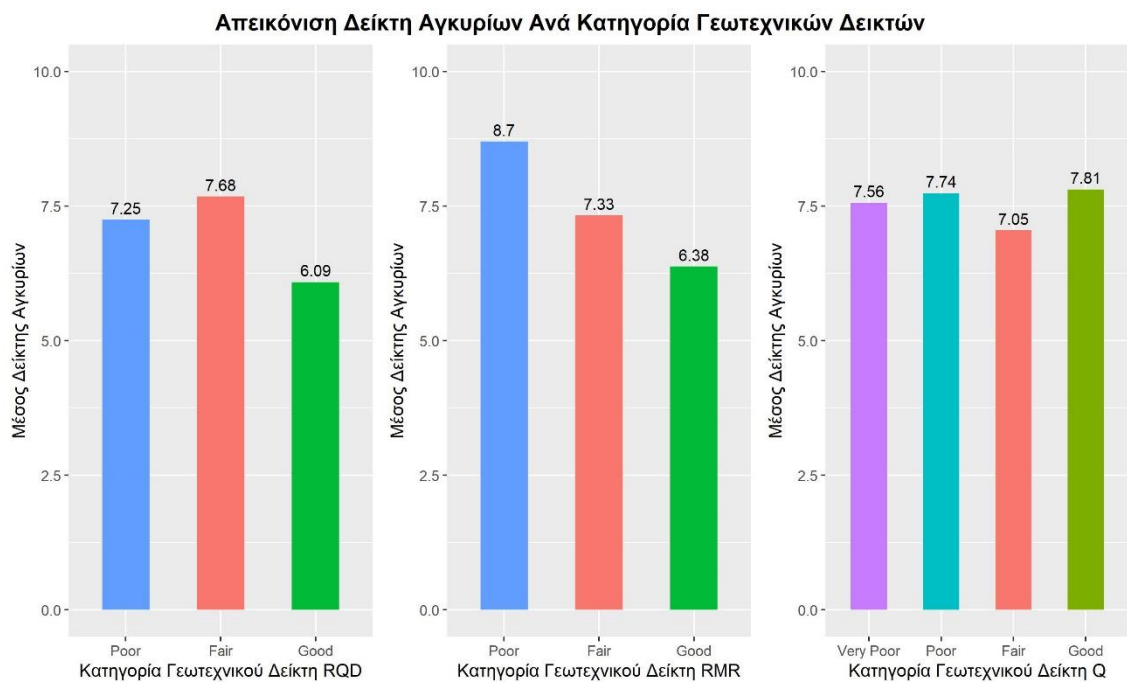
Σχήμα 4.15: Ειδική κατανάλωση ανά κατηγορία ποιότητας βραχομάζας με βάση τους δείκτες RQD, RMR και Q.



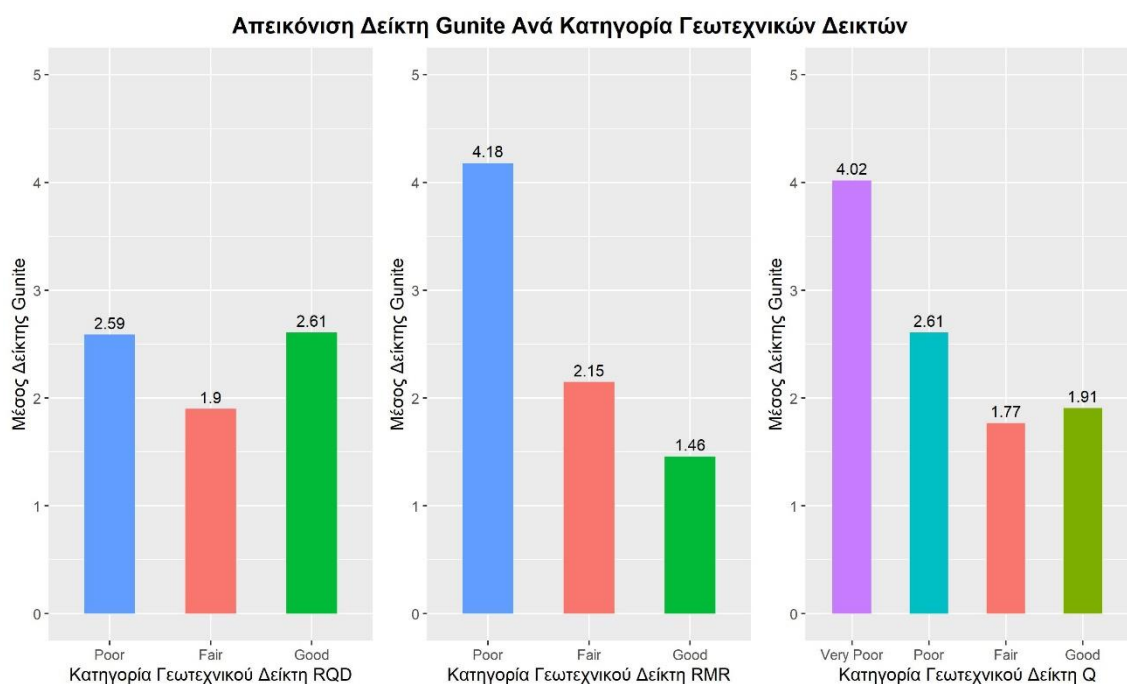
Σχήμα 4.16: Γόμωση διατρήματος ανά κατηγορία ποιότητας βραχομάζας με βάση τους δείκτες RQD, RMR και Q.



Σχήμα 4.17: Προχώρηση % ανά κατηγορία ποιότητας βραχομάζας με βάση τους δείκτες RQD, RMR και Q.



Σχήμα 4.18: Δείκτης Αγκυρίων ανά κατηγορία ποιότητας βραχομάζας με βάση τους δείκτες RQD, RMR και Q.



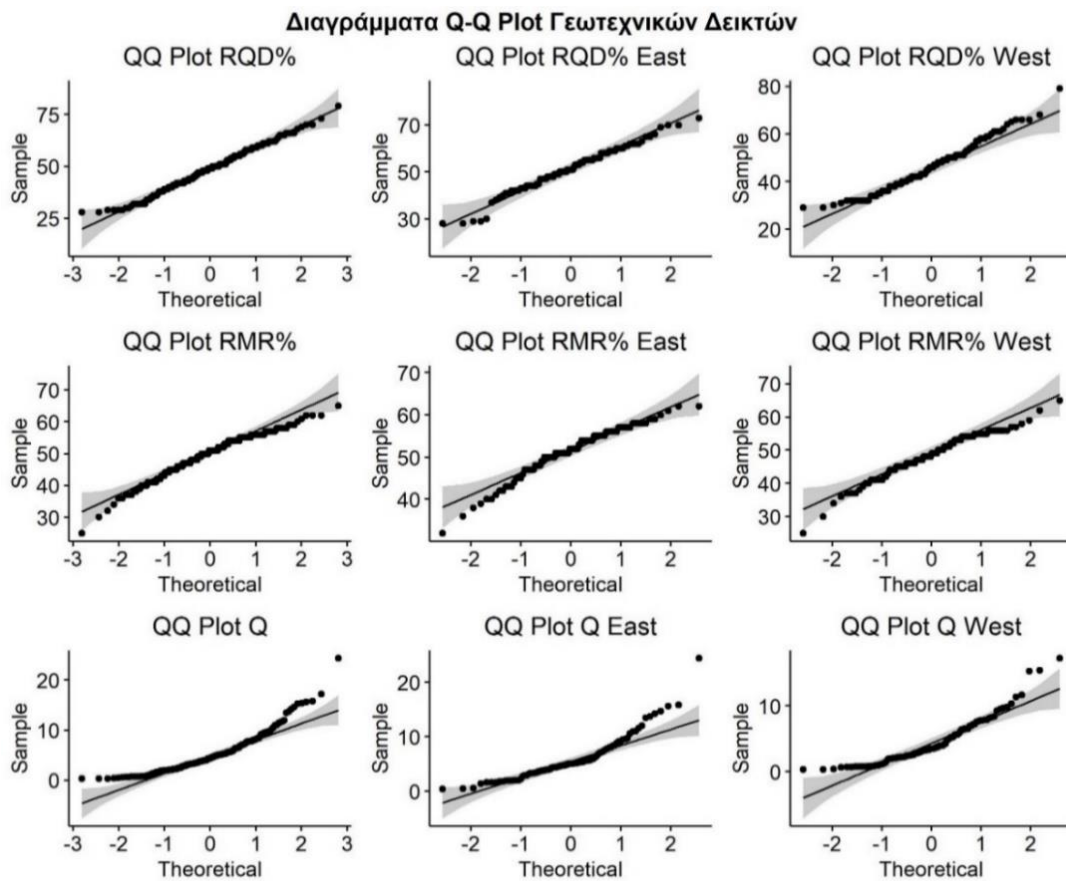
Σχήμα 4.19: Δείκτης Gunite ανά κατηγορία ποιότητας βραχομάζας με βάση τους δείκτες RQD, RMR και Q.

## **5. Επεξεργασία και αποτελέσματα στατιστικής συμπερασματολογίας**

Η ανάλυση έγινε στα ομαδοποιημένα δεδομένα στους δείκτες γεωτεχνικών, παραγωγής και υποστήριξης μέσω της χρήσης της στατιστικής συμπερασματολογίας και των μεθόδων της που αναφέρθηκαν στην ενότητα 3.3. Αρχικά παρουσιάζεται ο έλεγχος κανονικότητας των δεδομένων, έπειτα ο έλεγχος υποθέσεων, στην συνέχεια οι συσχετίσεις και τέλος το μοντέλο συσχέτισης με βάση τη γραμμική παλινδρόμηση.

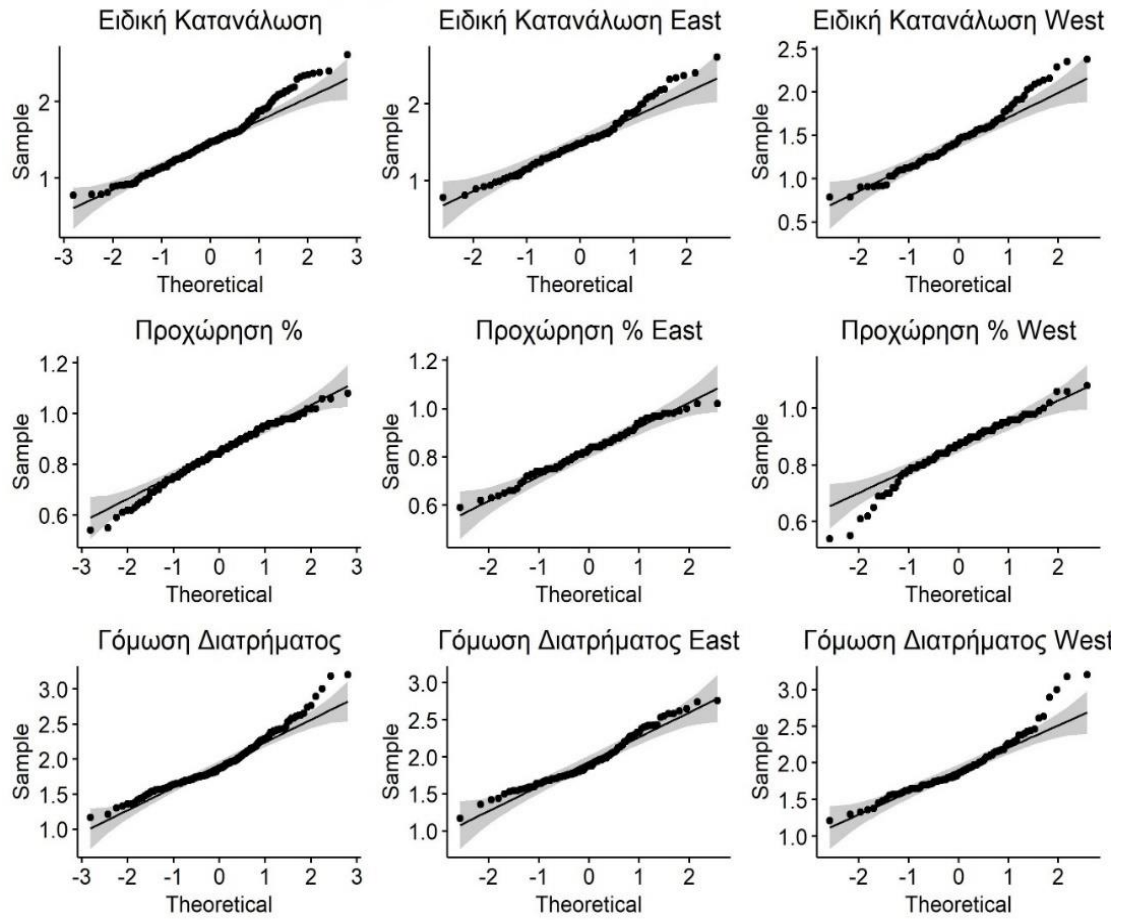
### **5.1 Έλεγχος Κανονικότητας Δεδομένων**

Το διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας της κατανομής των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε είναι το Q-Q Plot. Είναι μια γραφική απεικόνιση για την διαπίστωση αν τα δεδομένα ακολουθούν ή όχι την κανονική κατανομή. Γίνεται μια γραφική παράσταση των δειγματικών ποσοστημορίων ως προς τα θεωρητικά ποσοστημόρια της κανονικής κατανομής και όσο πιο κοντά είναι τα σημεία αυτά στην ευθεία γραμμή που αναπαριστά τα θεωρητικά ποσοστημόρια τόσο καλύτερη προσαρμογή έχουμε και άρα θεωρείται ότι τα δεδομένα ακολουθούν την κανονική κατανομή. Αλλιώς αν αποκλίνουν τα σημεία από την ευθεία τα δεδομένα δεν ακολουθούν την κανονική κατανομή. Τα διαγράμματα Q-Q Plot για τον έλεγχο κανονικότητας των δεδομένων στο σύνολο τους και ανά ζώνη εκμετάλλευσης ανατολικά (east) και δυτικά (west) δίνονται στα σχήματα 5.1 έως 5.4.



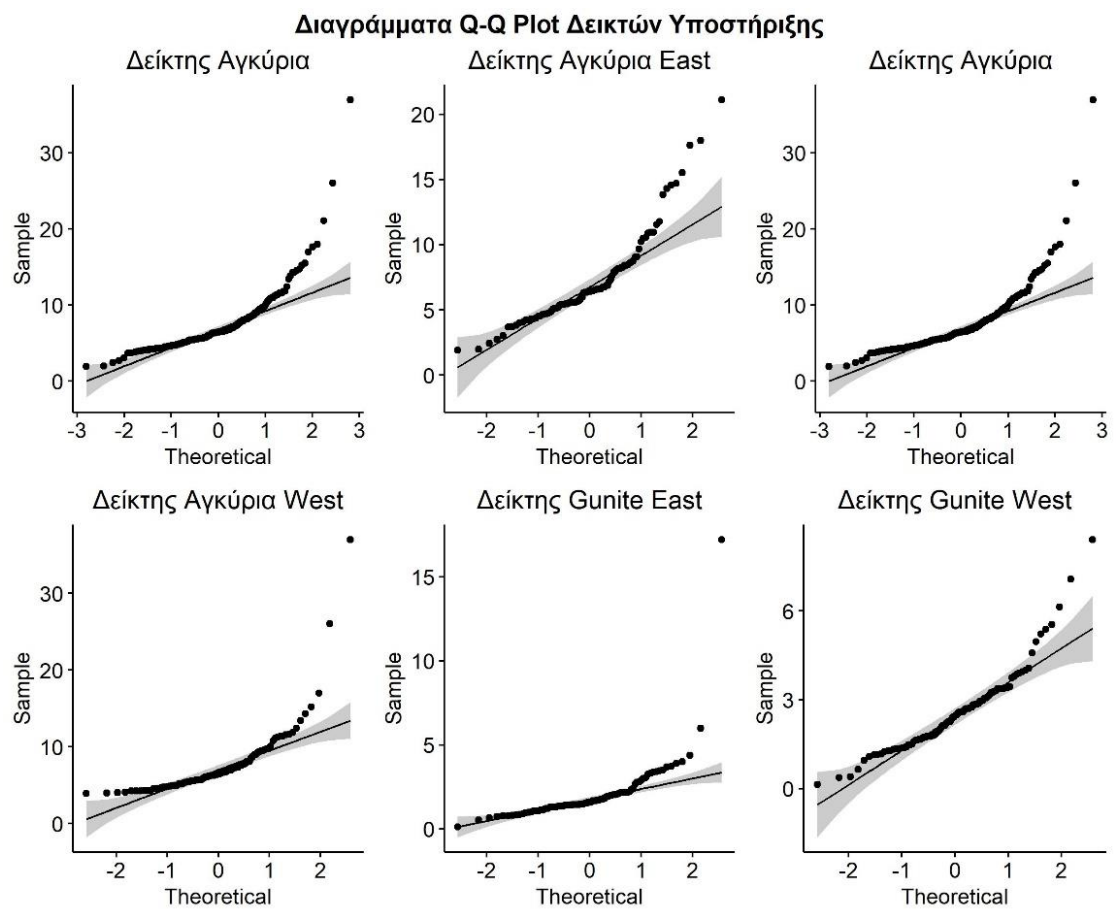
Σχήμα 5.1: Διάγραμμα ποσοστημορίων (Q-Q Plot) για τον έλεγχο της κανονικότητας της κατανομής των γεωτεχνικών δεικτών

### Διαγράμματα Q-Q Plot Παραγωγικών Δεικτών

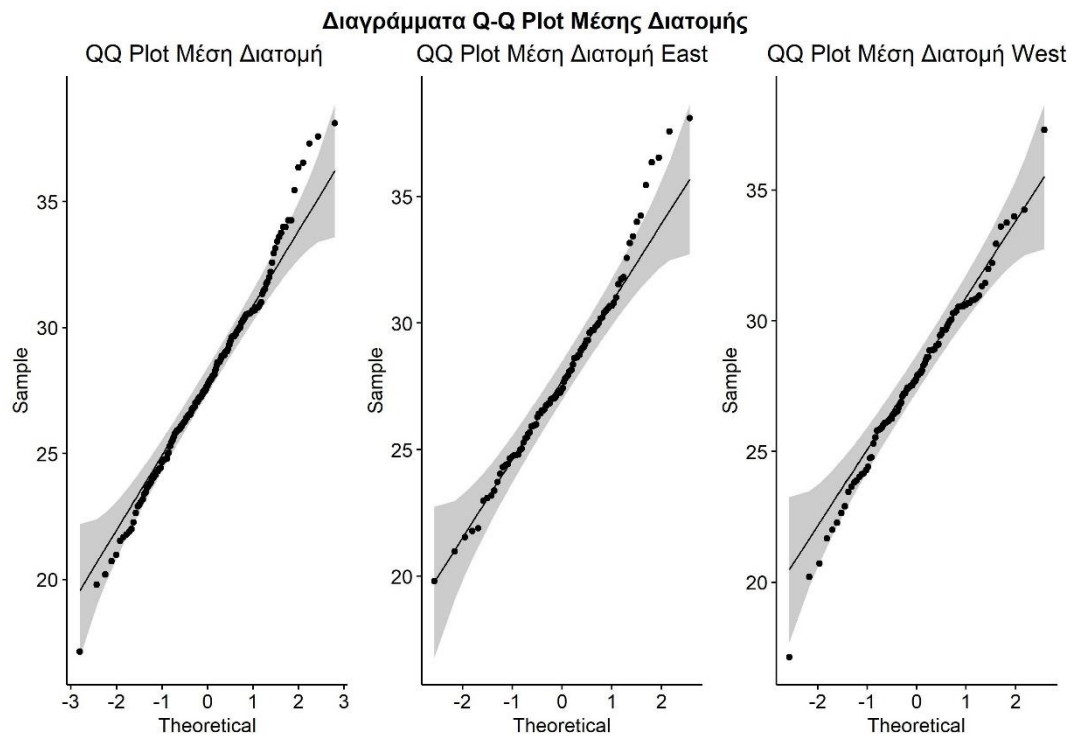


Σχήμα 5.2: Διάγραμμα ποσοστημορίων (Q-Q Plot) για τον έλεγχο της κανονικότητας της κατανομής των δεικτών παραγωγής.





Σχήμα 5.3: Διάγραμμα ποσοστημορίων (Q-Q Plot) για τον έλεγχο της κανονικότητας της κατανομής των δεικτών υποστήριξης.



Σχήμα 5.4: Διάγραμμα ποσοστημορίων (Q-Q Plot) για τον έλεγχο της κανονικότητας της κατανομής της διατομής του μετώπου.

Επίσης έγινε έλεγχος κανονικότητας της κατανομής των με στατιστικό κριτήριο Shapiro-Wilk. Με βάση το κριτήριο Shapiro-Wilk εξετάζονται οι παρακάτω στατιστικές υποθέσεις:

- Μηδενική υπόθεση  $H_0$  = Το δείγμα ανήκει σε κανονικό πληθυσμό (κανονική κατανομή).
- Εναλλακτική υπόθεση  $H_1$  = Το δείγμα δεν ανήκει σε κανονικό πληθυσμό (κανονική κατανομή).

Αν η υπολογιζόμενη τιμή του p-value είναι μεγαλύτερη από 0.05 δεν μπορούμε να απορρίψουμε την μηδενική υπόθεση οπότε το δείγμα θεωρείται ότι ακολουθεί την κανονική κατανομή. Αν το p-value είναι μικρότερο από 0.05 μπορούμε να απορρίψουμε την μηδενική υπόθεση και οπότε το δείγμα θεωρείται ότι δεν ακολουθεί κανονική κατανομή. Ακολουθεί πίνακας με τα αποτελέσματα του ελέγχου κανονικότητας Shapiro-Wilk.

Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα ελέγχου κανονικότητας Shapiro-Wilk

RQD%	Συνολικά	p-value = 0.2848
	Ανατολικά	p-value = 0.1704
	Δυτικά	p-value = 0.03536
RMR%	Συνολικά	p-value = 0.0002441
	Ανατολικά	p-value = 0.004333
	Δυτικά	p-value = 0.03694
Q	Συνολικά	p-value = 3.544e-11
	Ανατολικά	p-value = 7.356e-08
	Δυτικά	p-value = 2.751e-07
Ειδική Κατανάλωση Kg/m <sup>3</sup>	Συνολικά	p-value = 0.001057
	Ανατολικά	p-value = 0.04048
	Δυτικά	p-value = 0.05059
Προχώρηση%	Συνολικά	p-value = 0.04589
	Ανατολικά	p-value = 0.3777
	Δυτικά	p-value = 0.004147
Γόμωση Διατρήματος	Συνολικά	p-value = 3.682e-06
	Ανατολικά	p-value = 0.007232
	Δυτικά	p-value = 2.595e-05
Δείκτης Αγκυρίων	Συνολικά	p-value < 2.2e-16
	Ανατολικά	p-value = 3.932e-08
	Δυτικά	p-value = 1.62e-14
Δείκτης Gunitite	Συνολικά	p-value < 2.2e-16
	Ανατολικά	p-value < 2.2e-16
	Δυτικά	p-value = 1.982e-06
Διατομή μετώπων m <sup>2</sup>	Συνολικά	p-value = 0.09543
	Ανατολικά	p-value = 0.05612
	Δυτικά	p-value = 0.4909

Από πίνακα 5.1 και τα σχήματα 5.1 έως 5.4 τα δεδομένα που δείχνουν να ακολουθούν την κανονική κατανομή ή να την προσεγγίζουν είναι ο δείκτης ποιότητας RQD, η προχώρηση % και η διατομή. Όλοι άλλοι δείκτες αποκλίνουν της κανονικότητας. Στις ομάδες δεδομένων στις ζώνες εκμετάλλευσης την κανονικότητα την προσεγγίζουν ο δείκτης RQD ανατολικά, προχώρηση % ανατολικά, η ειδική κατανάλωση ανατολικά και δυτικά, διατομή ανατολικά και δυτικά ενώ οι υπόλοιπες ομάδες αποκλίνουν της κανονικότητας.

## 5.2 Έλεγχος διαφοράς μέσων τιμών με χρήση του t - test

Στην περίπτωση των δεδομένων μας έχουμε ανεξάρτητα δείγματα και θα γίνει έλεγχος αν η μέση τιμή των γεωτεχνικών, παραγωγικών, υποστηρικτικών δεικτών και της διατομής του μετώπου της ανατολικής και της δυτικής ζώνης εκμετάλλευσης διαφέρουν (αμφίπλευρος έλεγχος). Οι στατιστικές υποθέσεις που ελέγχθηκαν είναι:

- Μηδενική υπόθεση  $H_0$  = οι μέσοι όροι ανατολικής και δυτικής ζώνης εκμετάλλευσης είναι ίσοι.
- Εναλλακτική υπόθεση  $H_1$  = οι μέσοι όροι ανατολικής και δυτικής ζώνης εκμετάλλευσης διαφέρουν.

Αν το p-value είναι μεγαλύτερο από 0.05 δεν μπορούμε να απορρίψουμε την μηδενική υπόθεση ενώ αν το p-value είναι μικρότερο από 0.05 απορρίψουμε την μηδενική υπόθεση υπέρ της εναλλακτικής. Στον πίνακα 5.2 δίνονται τα αποτελέσματα του στατιστικού ελέγχου t - test.

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα ελέγχου t - test

RQD% Ανατολικά - Δυτικά	p-value = 0.0005077
RMR% Ανατολικά - Δυτικά	p-value = 0.00173
Q Ανατολικά - Δυτικά	p-value = 0.007043
Ειδική Κατανάλωση Kg/m <sup>3</sup> Ανατολικά – Δυτικά	p-value = 0.2375
Προχώρηση% Ανατολικά - Δυτικά	p-value = 0.01632
Γόμωση Διατρήματος Ανατολικά - Δυτικά	p-value = 0.7488
Δείκτης Αγκύρια Ανατολικά - Δυτικά	p-value = 0.4307
Δείκτης Gunite Ανατολικά - Δυτικά	p-value = 0.01539
Διατομή μετώπων m <sup>2</sup> Ανατολικά - Δυτικά	p-value = 0.7592

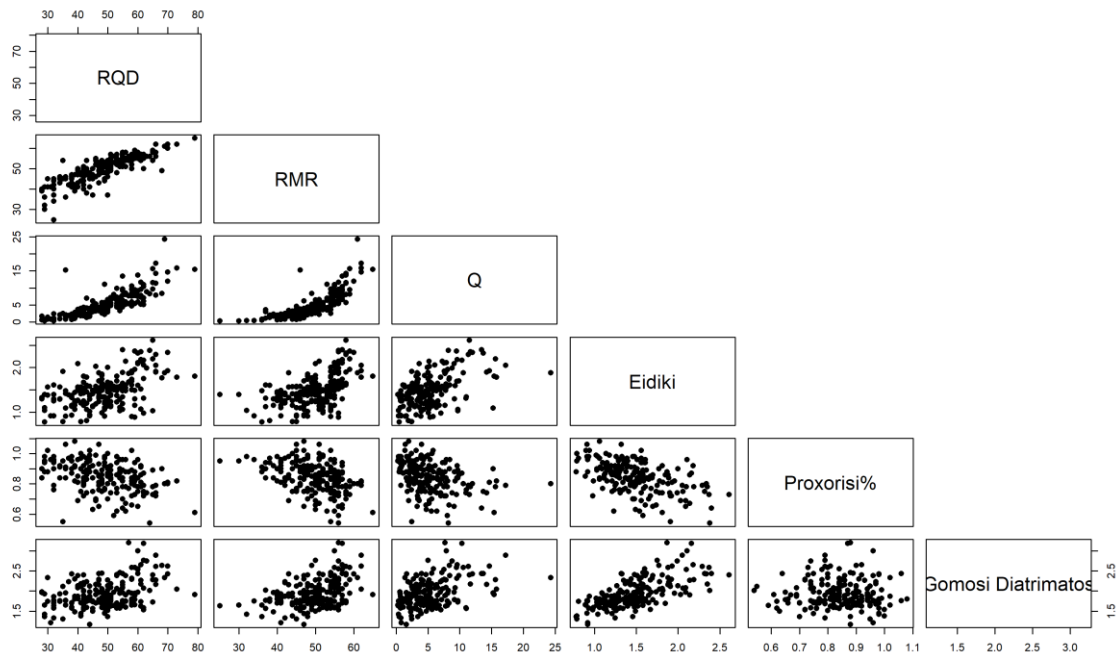
Από τα αποτελέσματα του πίνακα 5.2 προκύπτουν ότι όλοι οι μέσοι των γεωτεχνικών δεικτών ανατολικής και δυτικής ζώνης εκμετάλλευσης διαφέρουν μεταξύ τους γεγονός που επηρεάζει τους δείκτες παραγωγής, υποστήριξης και την διατομή του μετώπου. Από τον πίνακα 5.2 έχοντας τις τιμές p-value φαίνεται οι δείκτες παραγωγής όπως η ειδική κατανάλωση ( $\text{kg/m}^3$ ), γόμωση διατρήματος μεταξύ ανατολικής και δυτικής εκμετάλλευσης δεν φαίνεται να διαφέρουν, ενώ η προχώρηση % δείχνει ότι διαφέρει. Επίσης στους δείκτες υποστήριξης ο δείκτης αγκυρίων δεν διαφέρει μεταξύ των δυο ζωνών, όμως ο δείκτης Gunitite φαίνεται να διαφέρει. Τέλος η διατομή  $\text{m}^2$  των μετώπων μεταξύ ανατολικής και δυτικής εκμετάλλευσης δεν φαίνεται να διαφέρει.

Η διαφορά στην ποιότητα βραχομάζας μεταξύ των δυο ζωνών επηρεάζει τον δείκτη προχώρησης %. Η μέση προχώρηση % στην ανατολική ζώνη εκμετάλλευσης (σχήμα 4.13) όπου η ποιότητα της βραχομάζας είναι καλύτερη, είναι μικρότερη της δυτικής και δείχνει ότι η προχώρηση εκμετάλλευσης μειώνεται σε πιο «υγρή» γεωτεχνικά πετρώματα. Στους δείκτες υποστήριξης ο δείκτης αγκυρίων δεν δείχνει να επηρεάζεται και ο λόγος είναι ότι σε χειρότερη ποιότητα βραχομάζας αλλάζουν οι παράμετροι των αγκυρίων όπως είναι ο τύπος τους και το μήκος τους και όχι ο αριθμός τους. Αντίθετα ο δείκτης Gunitite εμφανίζει διαφοροποίηση μεταξύ των δυο ζωνών δείχνοντας ότι η χρήση του είναι περισσότερη σε χειρότερης ποιότητας βραχομάζα (σχήμα 4.14).

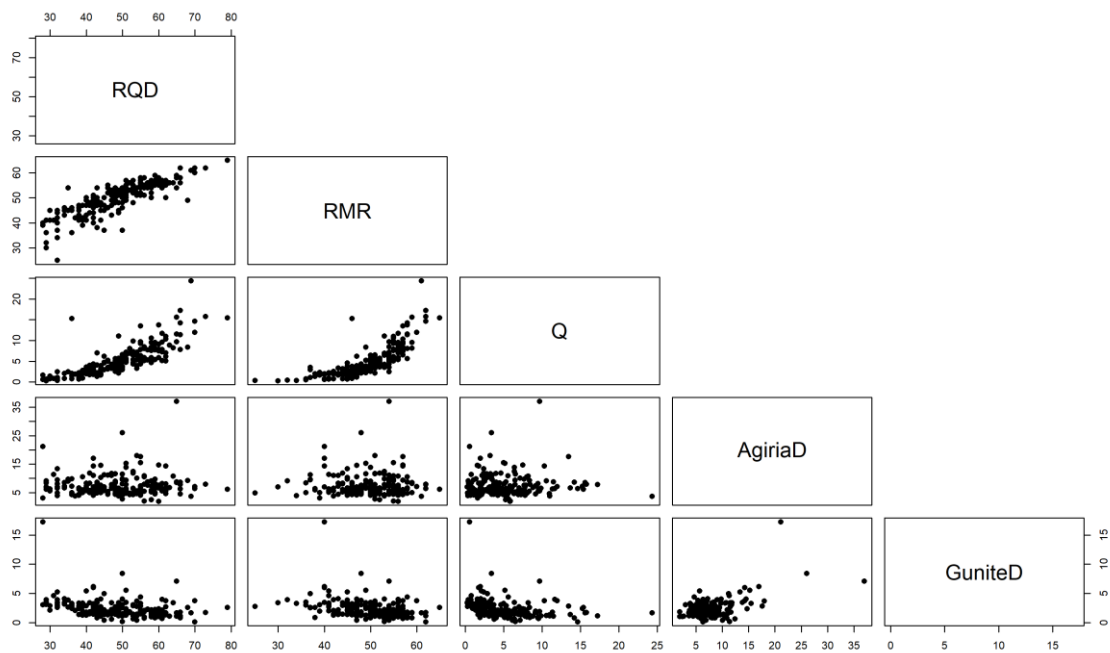
### 5.3 Συσχέτιση

Στην ενότητα αυτή γίνεται συσχέτιση των παραμέτρων με χρήση πολλαπλών διαγραμμάτων διασποράς σε μορφή πλέγματος και υπολογισμό του συντελεστή συσχέτισης για κάθε ζεύγος συσχετιζόμενων παραμέτρων. Το κάθε μεμονωμένο διάγραμμα δείχνει την απεικόνιση δυο μεταβλητών και είναι χρήσιμο για τον έλεγχο της πιθανής συσχέτισης και της κατεύθυνση (θετική ή αρνητική), στην ύπαρξη πιθανόν ακραίων τιμών καθώς και μη γραμμικών σχέσεων. Ο πίνακας συσχέτισης αναφέρεται στη στατιστική ως σχέση ή συσχέτιση μεταξύ δύο μεταβλητών καθώς μετρά την ισχύ και την κατεύθυνση της γραμμικής σχέσης μεταξύ τους. Για τον υπολογισμό των γραμμικών συσχετίσεων υπολογίστηκε ο συντελεστής συσχέτισης Pearson. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης των συσχετίσεων χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια για τη δημιουργία ενός μοντέλου πρόβλεψης με την μέθοδο της παλινδρόμησης. Οι δείκτες που συσχετίστηκαν και οι σχετικοί συμβολισμοί είναι:

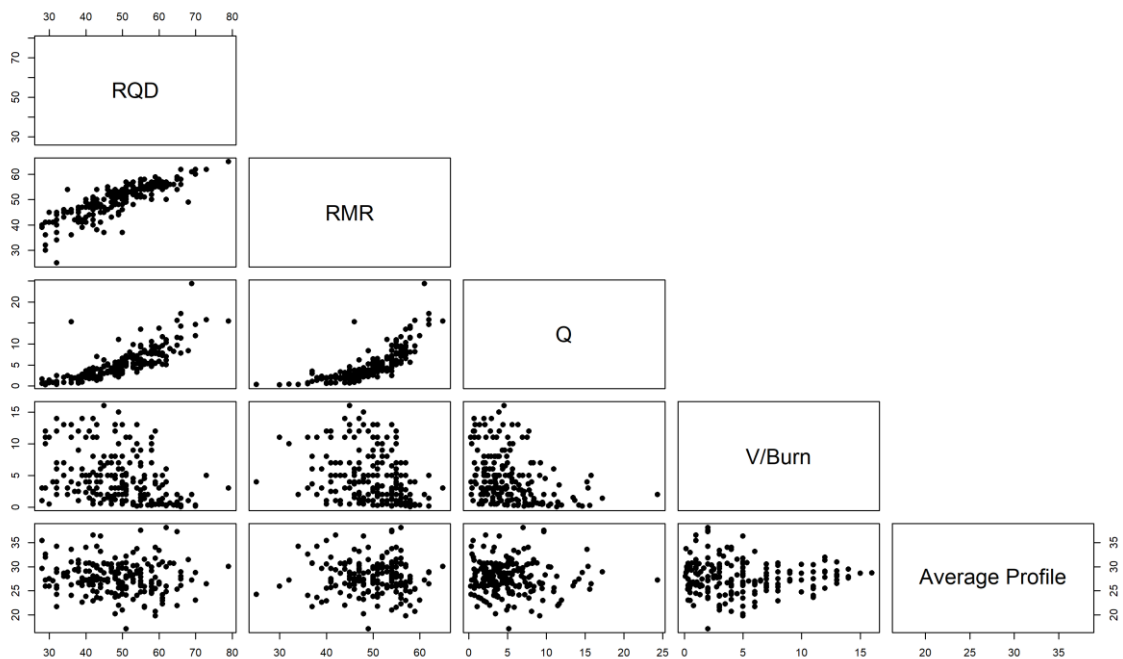
- Γεωτεχνικοί δείκτες RQD, RMR, Q.
- Δείκτες παραγωγής: Eidiki = Ειδική Κατανάλωση (σχέση 1.3),
- Proxorisi% = Προχώρηση % (σχέση 1.4),
- Gomosi Diatrimatos = Γόμωση Διατρήματος (σχέση 1.5),
- V/Burn - Cut = Αναλογία Ανατινάξεων V - Cut προς Burn – Cut. Σε περιπτώσεις μη ύπαρξης ανατίναξης μιας μεθόδου θεωρήθηκε συντελεστής μονάδα.
- Δείκτες υποστήριξης: AgiariaD = Δείκτης αγκυρίων (σχέση 1.6),
- GunitED = Δείκτης GunitE (σχέση 1.7).
- Διαστάσεις μετώπου: Average Profile = Μέση Διατομή Μετώπου m<sup>2</sup>.



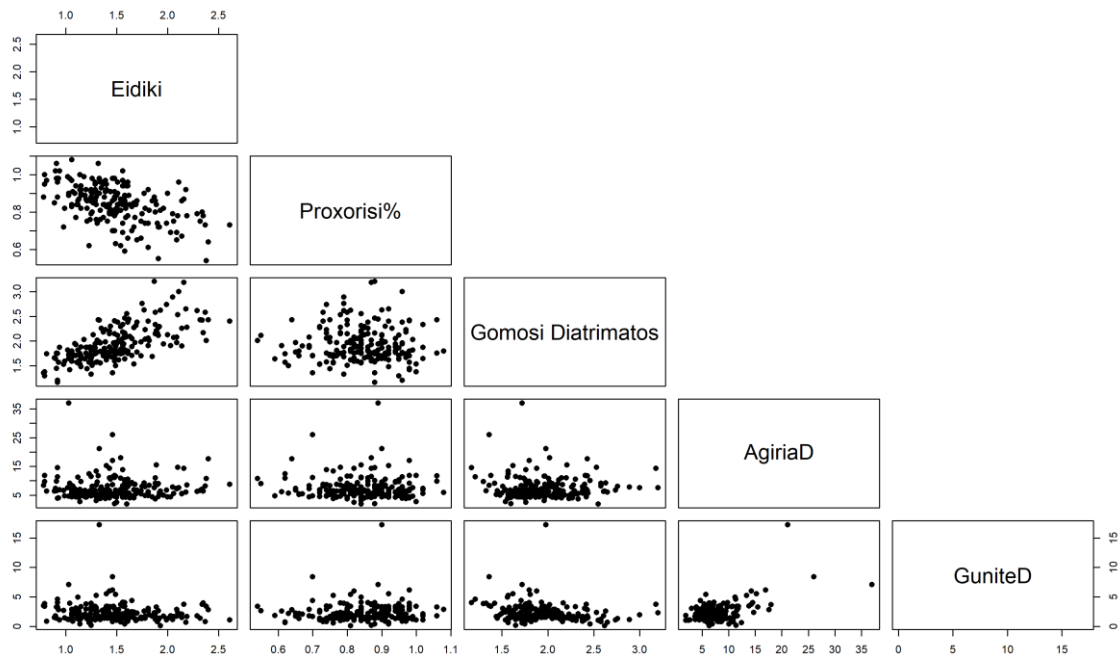
Σχήμα 5.5: Διάγραμμα συσχέτισης γεωτεχνικών δεικτών και δεικτών παραγωγής.



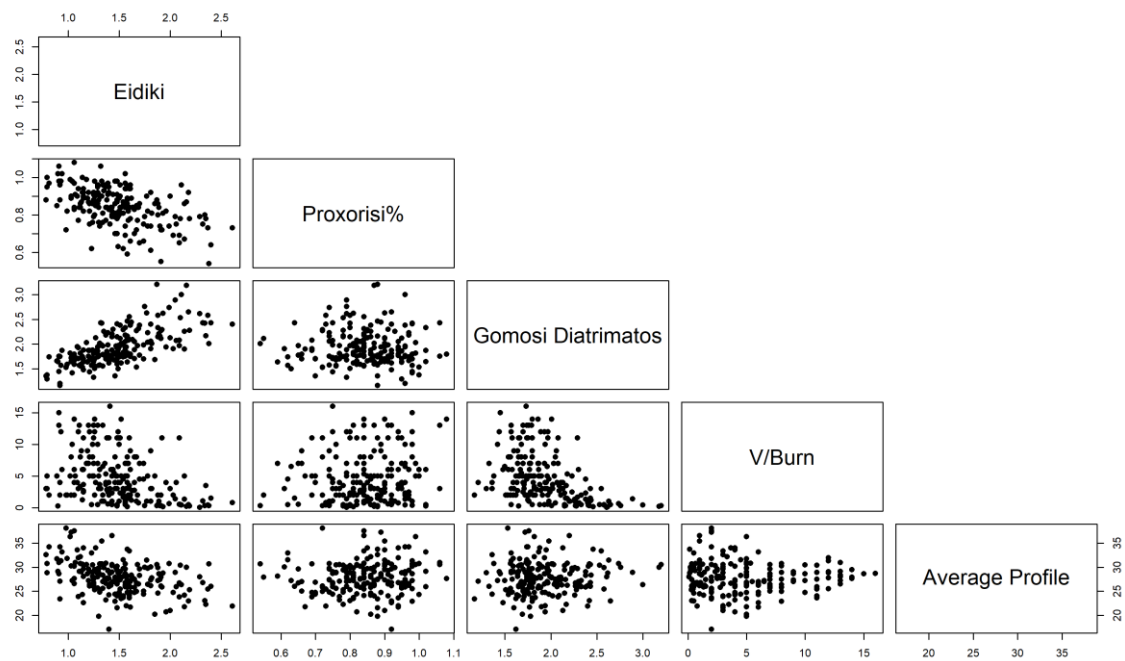
Σχήμα 5.6: Διάγραμμα συσχέτισης γεωτεχνικών δεικτών και δεικτών υποστήριξης.



Σχήμα 5.7: Διάγραμμα συσχέτισης γεωτεχνικών δεικτών, διατομής μετώπου και αναλογίας ανατινάξεων V - Cut προς Burn - Cut.

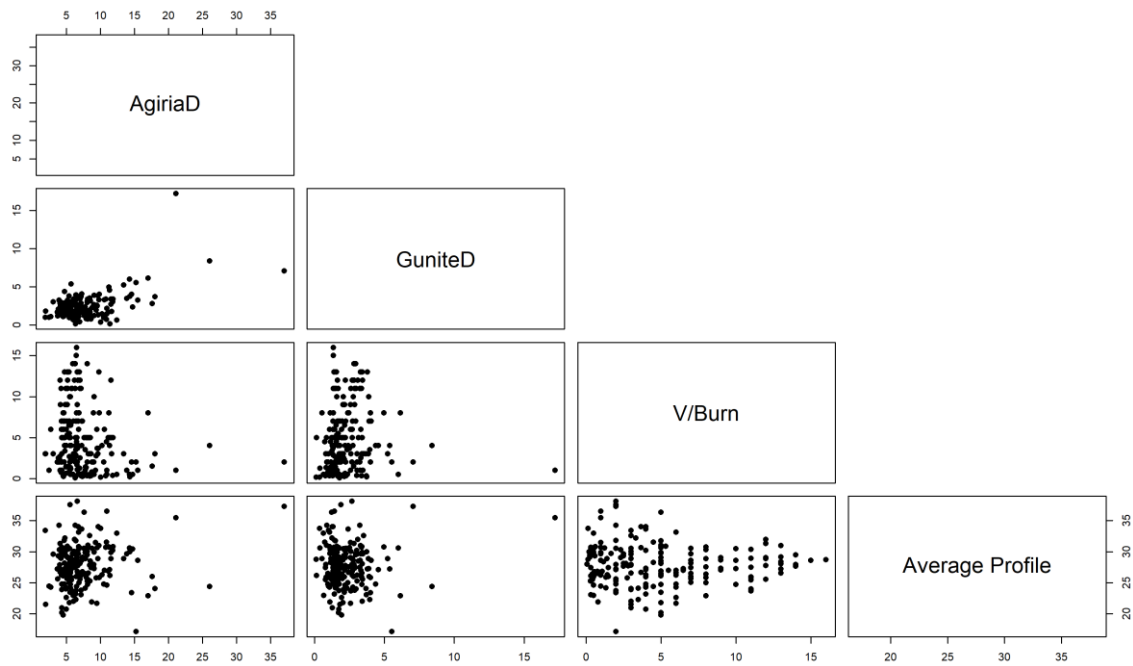


Σχήμα 5.8: Διάγραμμα συσχέτισης δεικτών παραγωγής και δεικτών υποστήριξης.

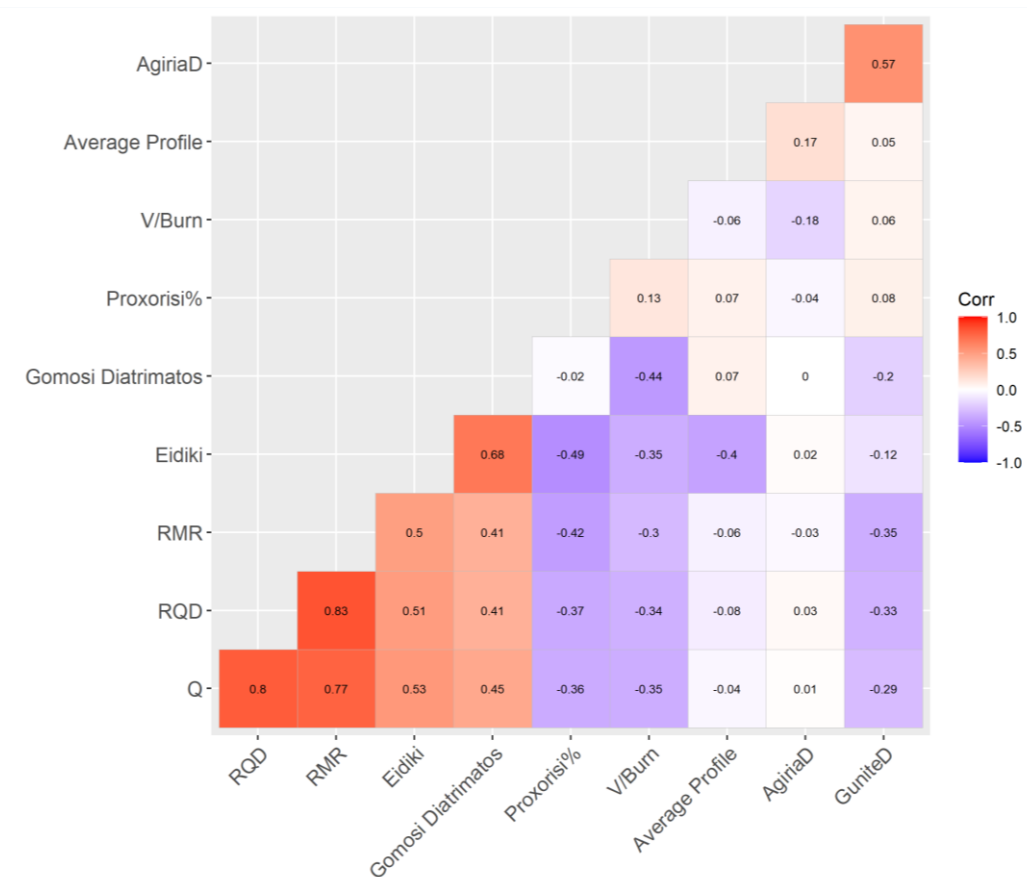


Σχήμα 5.9: Διάγραμμα συσχέτισης δεικτών παραγωγής, διατομής μετώπου και αναλογίας ανατινάξεων V - Cut προς Burn – Cut.





Σχήμα 5.10: Διάγραμμα συσχέτισης δεικτών υποστήριξης, διατομής μετώπου και αναλογίας ανατινάξεων V - Cut προς Burn - Cut



Σχήμα 5.11: Πίνακας απεικόνισης των συντελεστών συσχέτισης Pearson που υπολογίστηκαν για όλες τις παραμέτρους.

Με βάση τα διαγράμματα συσχέτισης και του συντελεστή Pearson που υπολογίστηκαν προκύπτουν τα εξής:

- Οι τρεις γεωτεχνικοί δείκτες έχουν πολύ ισχυρή συσχέτιση μεταξύ τους και αυτό σημαίνει ότι οι μετρήσεις που γίνονται συμβαδίζουν στον χαρακτηρισμό της ποιότητας της βραχώμαζας. Επιπλέον, οι γεωτεχνικοί δείκτες παρουσιάζουν μια μέτρια θετική συσχέτιση με την ειδική κατανάλωση και μια ασθενώς θετική με την γόμωση διατρήματος (όσο αυξάνεται η μια παράμετρος τείνει να αυξάνεται και η άλλη), δηλαδή, η αύξηση της ποιότητας της βραχώμαζας απαιτεί αύξηση στην εκρηκτική ύλη για την εξόρυξη. Ακόμη, υποδηλώνουν μια μέτρια αρνητική συσχέτιση (όσο αυξάνεται η μια παράμετρος τείνει να μειώνεται η άλλη) με την προχώρηση % υποδεικνύοντας ότι η αύξηση της ποιότητας της βραχώμαζας τείνει να επιφέρει μικρότερες προχωρήσεις. Με τον δείκτη αγκυρίων δεν εμφανίζουν κάποια συσχέτιση προφανώς για τον λόγο ότι σε χειρότερη ποιότητα βραχομάζας αλλάζει ο τύπος αγκυρίων και όχι ο αριθμός τους. Αντίθετα με τον δείκτη Gunite δείχνουν μια μέτρια αρνητική συσχέτιση δηλαδή η βελτίωση των γεωτεχνικών δεικτών επιφέρει μείωση της χρήσεως Gunite. Με την αναλογία ανατινάξεων V - Cut προς Burn - Cut εμφανίζουν μέτρια έως ασθενώς αρνητική συσχέτιση δείχνοντας ότι με την αύξηση της ποιότητας της βραχώμαζας γίνεται περισσότερο χρήση τύπου Burn - Cut. Τέλος με την διατομή των μετώπων δεν παρουσιάζουν συσχέτιση.
- Η ειδική κατανάλωση δείχνει μια ισχυρή θετική συσχέτιση με την γόμωση διατρήματος καθώς όσο αυξάνεται η χρήση εκρηκτικής ύλης επηρεάζονται και οι δυο δείκτες. Επιπλέον, εμφανίζει μια ασθενώς αρνητική συσχέτιση με την αναλογία τύπου ανατίναξης V - Cut προς Burn - Cut δείχνοντας έτσι ότι ο τύπος V - Cut επιφέρει μικρότερες ειδικές καταναλώσεις από τον τύπο Burn - Cut πράγμα λογικό διότι και από τα αποτελέσματα της περιγραφικής στατιστικής ανάλυσης φάνηκε ότι ο τύπος V - Cut παρουσιάζει μικρότερη κατανάλωση εκρηκτικής ύλης. Με την διατομή των μετώπων παρουσιάζεται μέτρια αρνητική συσχέτιση καθώς η αύξηση της διατομής επιφέρει μικρότερη ειδική κατανάλωση. Με την προχώρηση % παρουσιάζεται μέτρια αρνητική συσχέτιση προφανώς λόγω της σύνδεσης ότι σε καλύτερη ποιότητα βραχώμαζας υπάρχει αύξηση στην εκρηκτική ύλη για την εξόρυξη και μείωση στην προχώρηση %. Τέλος, δεν υπάρχει εμφανής συσχέτιση με του δείκτες υποστήριξης.

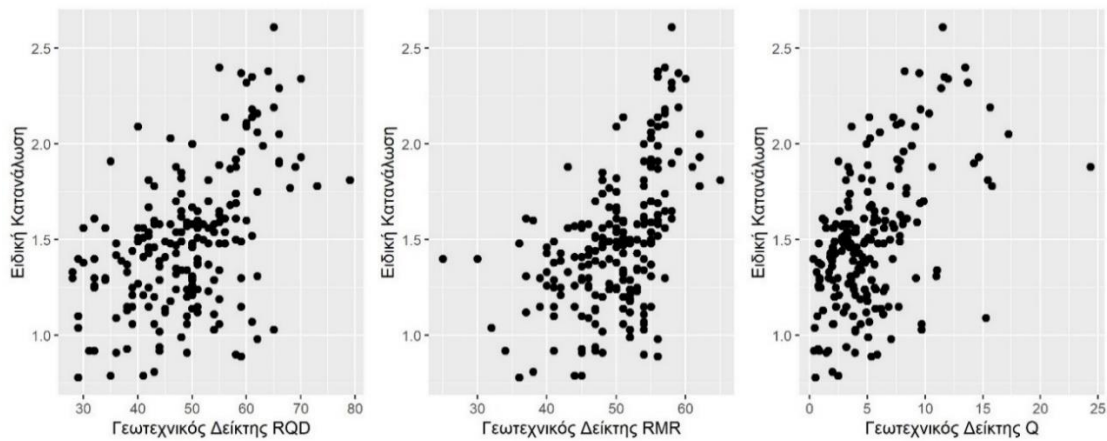
- Η γόμωση διατρήματος παρουσιάζει μια μέτρια αρνητική συσχέτιση με την αναλογία V - Cut προς Burn - Cut υποδεικνύοντας ότι ο τύπος V - Cut έχει μικρότερη χρήση εκρηκτικής ύλης και μικρότερο αριθμό διατρημάτων όπως προέκυψε και από τα αποτελέσματα της περιγραφικής στατιστικής ανάλυσης.
- Ο δείκτης αγκυρίων δεν εμφανίζει κάποια συσχέτιση πέραν μιας μέτριας θετικής συσχέτισης με τον δείκτη Gunitite.
- Ο δείκτης Gunitite δείχνει μια μέτρια αρνητική γραμμική συσχέτιση με τους γεωτεχνικούς δείκτες δηλαδή η αύξηση γεωτεχνικών επιφέρει μείωση στην χρήση Gunitite.

Τα παραπάνω αποτέλεσμα είναι σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της περιγραφικής στατιστικής ανάλυσης στην ενότητα 4.2 και 4.7.

#### **5.4 Μοντέλα πρόβλεψης δεικτών παραγωγής με βάση την πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση**

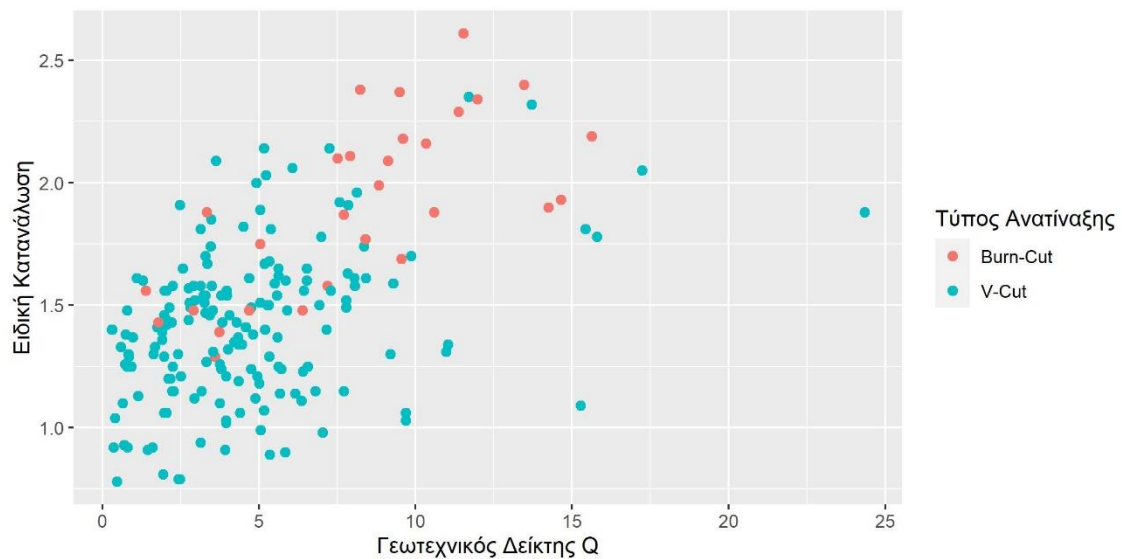
Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα μοντέλα πρόβλεψης των δεικτών παραγωγής σε σχέση με τις παραμέτρους της εκμετάλλευσης και του μετώπου και βασίζονται στην απλή και στην πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση. Η ανάλυση και ο υπολογισμός των μοντέλων έγινε με τη χρήση της γλώσσας προγραμματισμού R.

Το πρώτο μοντέλο που δημιουργήθηκε αφορά τον δείκτη ειδική κατανάλωση και πως αυτός μπορεί να εκτιμηθεί από τους γεωτεχνικούς δείκτες και την μέθοδο εξόρυξης (δηλαδή V-Cut ή Burn-Cut). Αρχικά εξετάστηκε το διάγραμμα συσχέτισης μεταξύ της ειδικής κατανάλωσης και των γεωτεχνικών δεικτών και έπειτα η επίδραση της μεθόδου εξόρυξης. Από το σχήμα 5.12 φαίνεται να υπάρχει μια θετική γραμμική συσχέτιση μεταξύ ειδικής κατανάλωσης και γεωτεχνικών δεικτών (RQD, RMR και Q). Οι συντελεστές συσχέτισης των γεωτεχνικών δεικτών με την ειδική κατανάλωση, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα 5.3, είναι πλησίον του 0.5 και χαρακτηρίζεται ως μετρίως ισχυρή συσχέτιση. Από τους τρεις γεωτεχνικούς δείκτες εκείνος που επιλέχθηκε ως εξηγηματική μεταβλητή για το μοντέλο πρόβλεψης είναι ο Q επειδή η εταιρεία τον χρησιμοποιεί για την λήψη αποφάσεων εκμετάλλευσης και υποστήριξης.



Σχήμα 5.12: Διάγραμμα διασποράς ειδικής κατανάλωσης ( $\text{kg/m}^3$ ) και γεωτεχνικών δεικτών RQD, RMR και Q.

Επίσης, το γραμμικό μοντέλο ειδικής κατανάλωσης με γεωτεχνικό δείκτη Q είναι ελαφρά καλύτερο από τα άλλα δυο ειδικής κατανάλωσης με γεωτεχνικό δείκτη RQD ή RMR. Μια επιπλέον επεξηγηματική μεταβλητή για την βελτίωση του μοντέλου πρόβλεψη της ειδικής κατανάλωσης θεωρήθηκε η μέθοδος εξόρυξης (τύπος ανατίναξης), όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.13.



Σχήμα 5.13: Διάγραμμα διασποράς ειδικής κατανάλωσης ( $\text{kg/m}^3$ ) με γεωτεχνικό δείκτη Q και τύπο ανατίναξης.

Έτσι δημιουργήθηκε το παρακάτω μοντέλο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (σχήμα 5.14, σχήμα 5.16):

$$\text{Ειδική κατανάλωση } (\text{kg/m}^3) = 1.59 + 0.04 \cdot Q - 0.36 \cdot \text{V-Cut}. \quad (1.10)$$

Η ερμηνεία του μοντέλου αυτού είναι πως για κάθε μονάδα αύξησης του γεωτεχνικού δείκτη Q η αύξηση στην ειδική κατανάλωση θα είναι της τάξης 0.04 ενώ τώρα αν ακολουθήσει μέθοδος ανατίναξης τύπου V-Cut το αποτέλεσμα θα είναι μείωση της ειδικής κατανάλωσης κατά 0.36, ενώ σε περίπτωση ανατίναξης Burn-Cut ο συντελεστής  $0.36 \cdot V\text{-Cut}$  γίνεται μηδέν και η σχέση διαμορφώνεται ως εξής: Ειδική κατανάλωση =  $1.590068 + 0.039397 \cdot Q$ . Έτσι έχουμε τον εξής πίνακα 5.3 για κάθε τύπο ανατίναξης και με την ίδια λογική υπολογίστηκαν και οι επόμενοι.

Πίνακας 5.3: Πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση ειδικής κατανάλωσης με γεωτεχνικό δείκτη Q και τύπο ανατίναξης.

Ειδική Κατανάλωση	V - Cut	$1.23 + 0.04 \cdot Q$
	Burn - Cut	$1.59 + 0.04 \cdot Q$

Η εξίσωση 1.10 εμφανίζει ένα  $R^2$  της τάξης 38% που σημαίνει ότι το μόνο το 38% της μεταβολής της ειδικής κατανάλωσης μπορεί να εξηγηθεί από τις επεξηγηματικές μεταβλητές του μοντέλου μας.

Στη συνέχεια έγινε για το μοντέλο πρόβλεψης που υπολογίστηκε έλεγχος της εγκυρότητας του και της στατιστικής σημαντικότητας των συντελεστών του. Στο σχήμα 5.14 στην στήλη  $Pr(>|t|)$  τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι συντελεστές της πολλαπλής παλινδρόμησης διαφέρουν από το μηδέν και είναι στατιστικά σημαντικοί για στάθμη ελέγχου  $\alpha = 0.05$ . Στο σχήμα 5.15 που γίνεται έλεγχος της εγκυρότητας του μοντέλου. Από διάγραμμα Q - Q Plot φαίνεται πως τα υπόλοιπα προσεγγίζουν την κανονική κατανομή αφού τα σημεία βρίσκονται πλησίον της ευθείας γραμμής και δεν παρουσιάζουν συσχέτιση με τις εκτιμώμενες τιμές (διαγράμματα residual-fitted values και standardized residual-fitted values). Το τελευταίο διάγραμμα residuals - leverage βοηθά κυρίως στον εντοπισμό σημαντικών παρατηρήσεων (ακραίων τιμών) που μπορεί να έχουν σημαντικό αντίκτυπο στα αποτελέσματα του μοντέλου παλινδρόμησης. Στο σχήμα 5.15 φαίνεται να υπάρχουν κάποιες ακραίες τιμές που έχουν επίδραση στο μοντέλο παλινδρόμησης.

#### Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	1.590068	0.071522	22.232	< 2e-16 ***
ArxeioT2\$Q	0.039397	0.005787	6.808	1.17e-10 ***
ArxeioT2\$VCUT	-0.357257	0.061173	-5.840	2.12e-08 ***

---

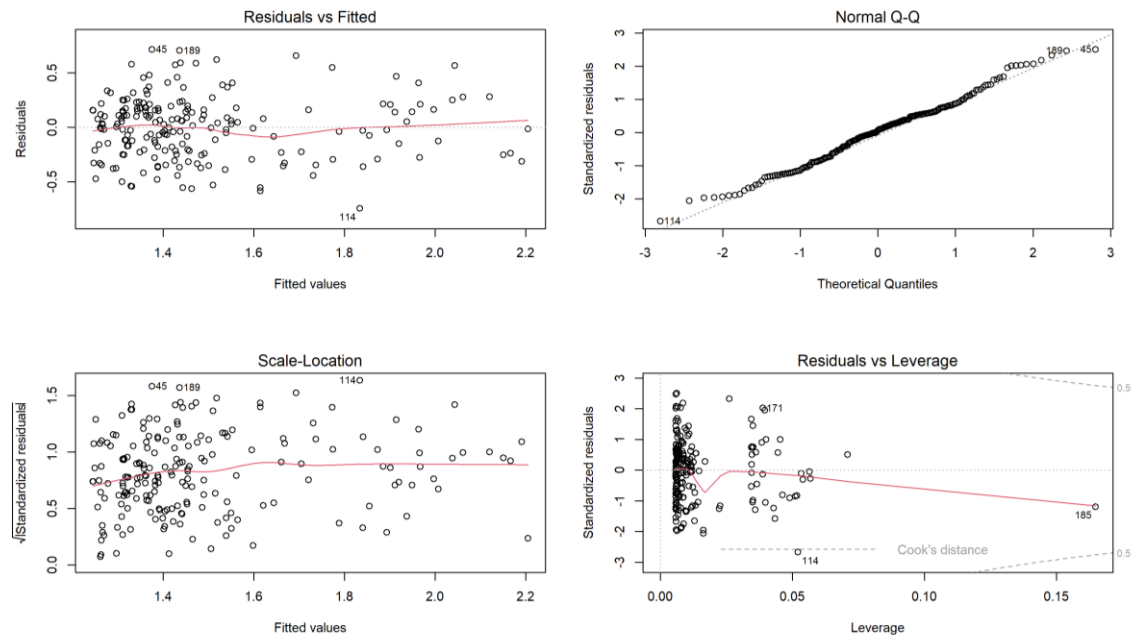
Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.286 on 197 degrees of freedom

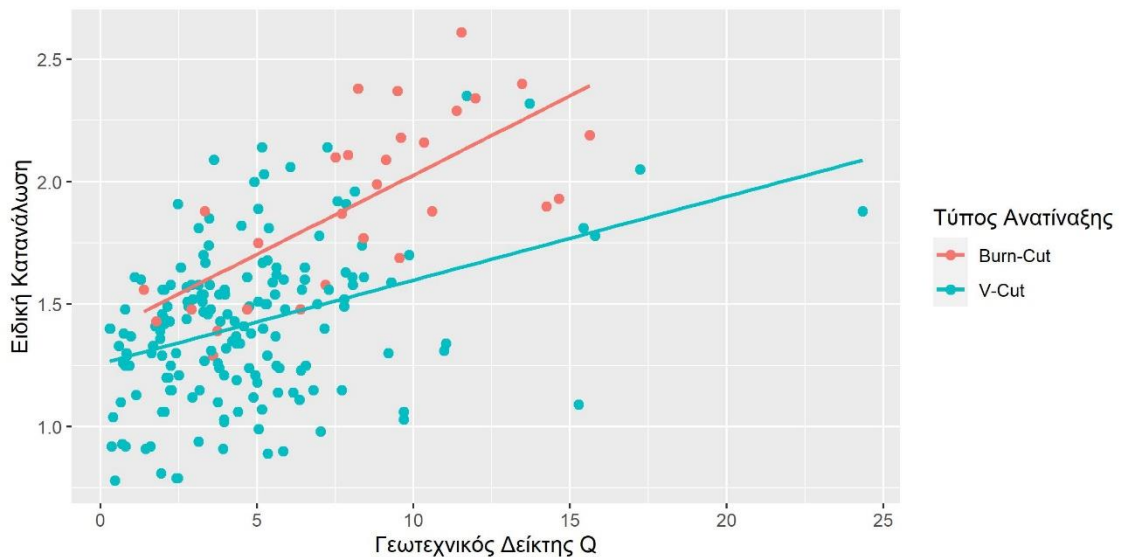
Multiple R-squared: 0.3831, Adjusted R-squared: 0.3768

F-statistic: 61.17 on 2 and 197 DF, p-value: < 2.2e-16

Σχήμα 5.14: Αποτελέσματα από το περιβάλλον της R της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για την ειδική κατανάλωση με βάση τον γεωτεχνικό δείκτη Q και τον τύπο ανατίναξης.



Σχήμα 5.15: Αποτελέσματα ελέγχου της εγκυρότητας του μοντέλου της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για την ειδική κατανάλωση με βάση τον γεωτεχνικό δείκτη Q και τον τύπο ανατίναξης.



Σχήμα 5.16 Διάγραμμα συσχέτισης μοντέλου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για την ειδική κατανάλωση ( $\text{Kg/m}^3$ ) με βάση τον γεωτεχνικό δείκτη Q και τον τύπο ανατίναξης.

Εν συνεχεία έγινε έλεγχος αν βελτιώνεται το μοντέλο με κάποιο μετασχηματισμό ή απαλοιφή των ακραίων τιμών που υποδεικνύει το τελευταίο διάγραμμα στο σχήμα 5.15. Στην περίπτωση της απαλοιφής των ακραίων τιμών τα αποτελέσματα δεν δείχνουν κάποια ουσιαστική διαφορά επιπλέον, καθώς και στο νέο μοντέλο πάλι φαίνεται ότι απαιτείται απαλοιφή νέων ακραίων τιμών. Στην συνέχεια έγιναν δοκιμές μετασχηματισμών τετραγωνικής και λογαριθμικής κλίμακας στην εξαρτημένη μεταβλητή και στις ανεξάρτητες μεταβλητές και ο μόνος μετασχηματισμός που δείχνει να βελτιώνει ελάχιστα το φαινόμενο των ακραίων τιμών και της διακύμανσης είναι η τετραγωνική ρίζα στον γεωτεχνικό δείκτη Q. Τα αποτελέσματα των μετασχηματισμών αυτών δίνονται αναλυτικά στο σχήμα Ι έως σχήμα V στα παραρτήματα.

Στη συνέχεια αναπτύχθηκαν μοντέλα παλινδρόμησης με βάση την ταξινόμηση της ποιότητας της βραχομάζας θεωρώντας την ως κατηγορική μεταβλητή. Το μοντέλο δίνεται από εξίσωση 1.11 και τα αποτελέσματα της ανάλυσης από το περιβάλλον της R στο σχήμα 5.17.

$$\text{Ειδική κατανάλωση (kg/m}^3\text{)} = 1.57 + 0.15 \cdot \text{Poor} + 0.28 \cdot \text{Fair} + 0.59 \cdot \text{Good} - 0.36 \cdot \text{V-Cut} \quad (1.11)$$

```

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)    1.56777    0.09214   17.016 < 2e-16 ***
ArxeioT2$QPoor  0.14778    0.07611    1.942 0.053613 .
ArxeioT2$QFair  0.27664    0.07541    3.668 0.000315 ***
ArxeioT2$QGood  0.59389    0.10130    5.863 1.92e-08 ***
ArxeioT2$VCUT  -0.36444    0.06195   -5.883 1.73e-08 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.2894 on 195 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.3749,    Adjusted R-squared:  0.362
F-statistic: 29.23 on 4 and 195 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

Σχήμα 5.17: Αποτελέσματα από το περιβάλλον της R της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για την ειδική κατανάλωση ως συνάρτηση της κατηγορίας ταξινόμησης ποιότητας βραχομάζας και τον τύπο ανατίναξης.

Η σχέση 1.11 είναι παρόμοια με την σχέση 1.10 με μόνη διαφορά την μετατροπή του γεωτεχνικού δείκτη Q σε κατηγορική μορφή με αποτέλεσμα να αντιπροσωπεύει η εξίσωση αυτή την εναλλαγή της ειδικής κατανάλωσης ανά κατηγορία βραχομάζας με βάση την κατηγορία Very Poor. Το  $R^2$  της εξίσωσης αυτής είναι 36%. Έτσι προκύπτει ειδική κατανάλωση για κάθε περίπτωση κατηγορίας γεωτεχνικού δείκτη και τύπου ανατίναξης στον πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4: Πίνακας εκτίμησης της ειδικής κατανάλωσης με βάση την κατηγορία ποιότητας βραχομάζας και τον τύπο ανατίναξης

Ποιότητα βραχομάζας κατά Q	Τύπος ανατίναξης	Ειδική Κατανάλωση εκρηκτικών (kg/m <sup>3</sup> )
Very Poor	V - Cut	$1.56777 - 0.36444 = 1.20333 \rightarrow 1.20$
	Burn - Cut	$1.56777 \rightarrow 1.57$
Poor	V - Cut	$1.56777 + 0.14778 - 0.36444 = 1.35111 \rightarrow 1.35$
	Burn - Cut	$1.56777 + 0.14778 = 1.71555 \rightarrow 1.72$
Fair	V - Cut	$1.56777 + 0.27664 - 0.36444 = 1.47997 \rightarrow 1.48$
	Burn - Cut	$1.56777 + 0.27664 = 1.84441 \rightarrow 1.84$
Good	V - Cut	$1.56777 + 0.59389 - 0.36444 = 1.79722 \rightarrow 1.80$
	Burn - Cut	$1.56777 + 0.59389 = 2.16166 \rightarrow 2.16$



Παρατηρείται σημαντική αύξηση της ειδικής κατανάλωσης με την αύξηση την ποιότητας βραχομάζας, ενώ η χρήση της V-Cut ανατίναξης οδηγεί σε μείωση της.

Σε περίπτωση προσθήκης στην εξίσωση 1.10 της επεξηγηματικής μεταβλητής μέση διατομή μετώπου φαίνεται να βελτιώνεται το νέο μοντέλο παλινδρόμησης (1.12).

$$\text{Ειδική Κατανάλωση} = 2.78 + 0.04*Q - 0.37*V\text{-Cut} - 0.04*\text{Average Profile} \quad (1.12)$$

Η προσθήκη της επεξηγηματικής μεταβλητής διατομή (average profile) αυξάνει το  $R^2$  σε 53%, μια αύξηση σημαντική που δείχνει ότι βελτιωθεί το μοντέλο παλινδρόμησης. Η εξίσωση 1.12 διαμορφώνεται ανά τύπο ανατίναξης όπως φαίνεται στον πίνακα 5.5.

Πίνακας 5.5: Μοντέλο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για εκτίμηση της ειδικής κατανάλωσης με βάση το δείκτη Q, τον τύπο ανατίναξης και τη διατομή.

Ειδική Κατανάλωση (kg/m <sup>3</sup> )	V - Cut	$2.41 + 0.04*Q - 0.04*\text{Average Profile (m}^2\text{)}$
	Burn - Cut	$2.78 + 0.04*Q - 0.04*\text{Average Profile (m}^2\text{)}$

Αντίστοιχα της εξίσωσης 1.12 παρουσιάζεται σε κατηγορική μορφή ο δείκτης Q με μόνη διαφορά από την εξίσωση 1.13 να είναι εδώ ότι η κατηγορίες Very Poor και Poor να παρουσιάζονται σαν μια ομάδα δηλαδή δεν δείχνεται να παρουσιάζεται διαφορά μεταξύ τους. Το  $R^2$  αυτής της εξίσωσης είναι 50%.

$$\text{Ειδική Κατανάλωση} = 2.87 + 0.15*\text{Fair} + 0.42*\text{Good} - 0.39*V\text{-Cut} - 0.04*\text{Average Profile} \quad (1.13)$$

Η εξίσωση 1.13 διαμορφώνεται ανά κατηγορία ταξινόμησης ποιότητας βραχομάζας και τύπου ανατίναξης όπως στον πίνακα 5.6.

Πίνακας 5.6: Μοντέλο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για εκτίμηση της ειδικής κατανάλωσης ανά κατηγορία ταξινόμησης ποιότητας βραχομάζας, τύπο ανατίναξης και διατομή (average profile).

Ποιότητα βραχομάζας κατά Q	Τύπος ανατίναξης	Ειδική Κατανάλωση εκρηκτικών (kg/m <sup>3</sup> )
Very Poor & Poor	V - Cut	$2.48 - 0.04*\text{Average Profile (m}^2\text{)}$
	Burn - Cut	$2.87 - 0.04*\text{Average Profile (m}^2\text{)}$
Fair	V - Cut	$2.63 - 0.04*\text{Average Profile (m}^2\text{)}$

	Burn - Cut	3.03 – 0.04*Average Profile (m <sup>2</sup> )
Good	V - Cut	2.90 – 0.04*Average Profile (m <sup>2</sup> )
	Burn - Cut	3.29 – 0.04*Average Profile (m <sup>2</sup> )

Παρόμοια αποτελέσματα προκύπτουν και στην δημιουργία ίδιου τύπου μοντέλου παλινδρόμησης με εξαρτημένη μεταβλητή την γόμωση διατρήματος. Το μοντέλο που προέκυψε δίνεται στη σχέση 1.15 και σχήματα 5.18 - 5.19.

$$\text{Γόμωση Διατρήματος} = 2.19 + 0.03*Q - 0.46*V\text{-Cut.} \quad (1.15)$$

Το μοντέλο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για την γόμωση διατρήματος έδωσε  $R^2 = 39\%$ . Από τη σχέση 1.15 προκύπτει ο πίνακας 5.7 για τον υπολογισμό της γόμωσης διατρήματος για κάθε τύπο ανατίναξης. Επίσης από το σχήμα 5.19 φαίνεται να πληρούνται οι έλεγχοι εγκυρότητας του μοντέλου παλινδρόμησης εκτός από την σταθερότητα της διακύμανσης των υπολοίπων (ομοσκεδαστικότητα).

Πίνακας 5.7: Πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση γόμωση διατρήματος με γεωτεχνικό δείκτη Q και τύπο ανατίναξης

Γόμωση	V - Cut	1.73 + 0.03*Q
Διατρήματος	Burn - Cut	2.20 + 0.03*Q

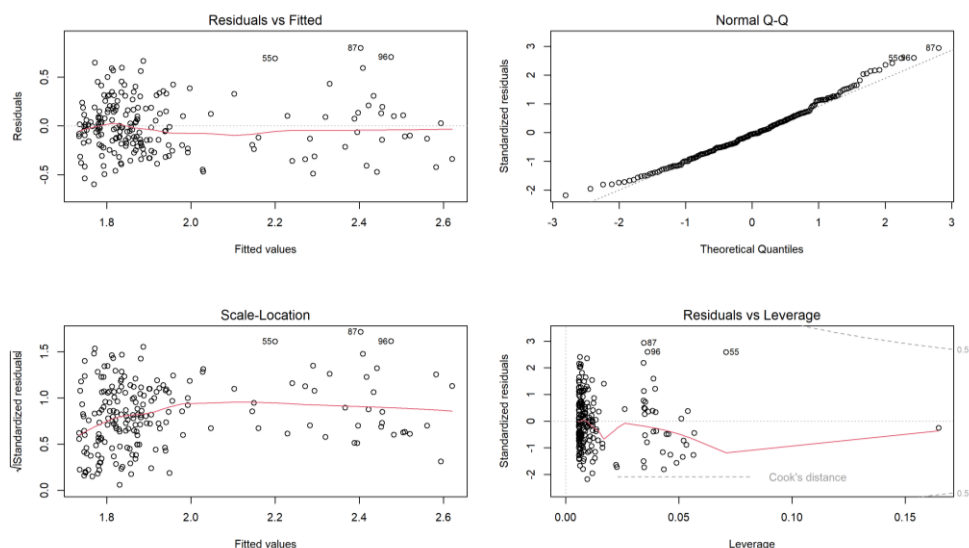
```

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  2.191478   0.069063  31.731 < 2e-16 ***
ArxeioT2$Q    0.027480   0.005588   4.917 1.84e-06 ***
ArxeioT2$VCUT -0.464969   0.059070  -7.871 2.29e-13 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.2762 on 197 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.3938,    Adjusted R-squared:  0.3876
F-statistic: 63.98 on 2 and 197 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

Σχήμα 5.18: Αποτελέσματα από το περιβάλλον της R της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για την γόμωση διατρήματος με βάση το γεωτεχνικό δείκτη Q και τύπο ανατίναξης.



Σχήμα 5.19 Αποτελέσματα έλεγχου υποθέσεων πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για γόμωση διατρήματος με γεωτεχνικό δείκτη Q και τύπο ανατίναξης.

Αντίστοιχα αν χρησιμοποιηθεί με κατηγορική μορφή ο δείκτης Q (ταξινόμηση ποιότητας βραχομάζας) τότε προκύπτει η εξίσωση 1.16 με  $R^2 = 39\%$  ενώ τα αναλυτικά αποτελέσματα εμφανίζονται στο σχήμα 5.20. Η εξίσωση 1.16 οδηγεί στην κατασκευή του πίνακα 5.8 που δίνει τη γόμωση διατρήματος με βάση την κατηγορία ταξινόμησης ποιότητας βραχομάζας και τον τύπο ανατίναξης. Τέλος στο σχήμα 5.21 δίνεται το διάγραμμα συσχέτισης της γόμωσης διατρήματος με το δείκτη Q ανά τύπο ανατίναξης (Burn-Cut, V-Cut).

$$\text{Γόμωση Διατρήματος} = 2.13 + 0.16\text{Poor} + 0.26*\text{Fair} + 0.41*\text{Good} - 0.48*\text{V-Cut}. \quad (1.16)$$

Πίνακας 5.8: Υπολογισμός γόμωσης διατρήματος με βάση την κατηγορία ταξινόμησης ποιότητας βραχομάζας και τον τύπο ανατίναξης.

Ποιότητα βραχομάζας κατά Q	Τύπος ανατίναξης	Ειδική Κατανάλωση εκρηκτικών ( $\text{kg/m}^3$ )
Very Poor	V - Cut	$2.13312 - 0.47756 = 1.65556 \rightarrow 1.66$
	Burn - Cut	$2.13312 \rightarrow 2.13$
Poor	V - Cut	$2.13312 + 0.15557 - 0.47756 = 1.81113 \rightarrow 1.81$
	Burn - Cut	$2.13312 + 0.15557 = 2.28869 \rightarrow 2.29$
Fair	V - Cut	$2.13312 + 0.25966 - 0.47756 = 1.91522 \rightarrow 1.91$

	Burn - Cut	$2.13312 + 0.25966 = 2.39278 \rightarrow 2.39$
Good	V - Cut	$2.13312 + 0.41344 - 0.47756 = 2.069 \rightarrow 2.07$
	Burn - Cut	$2.13312 + 0.41344 = 2.54656 \rightarrow 2.55$

Coefficients:

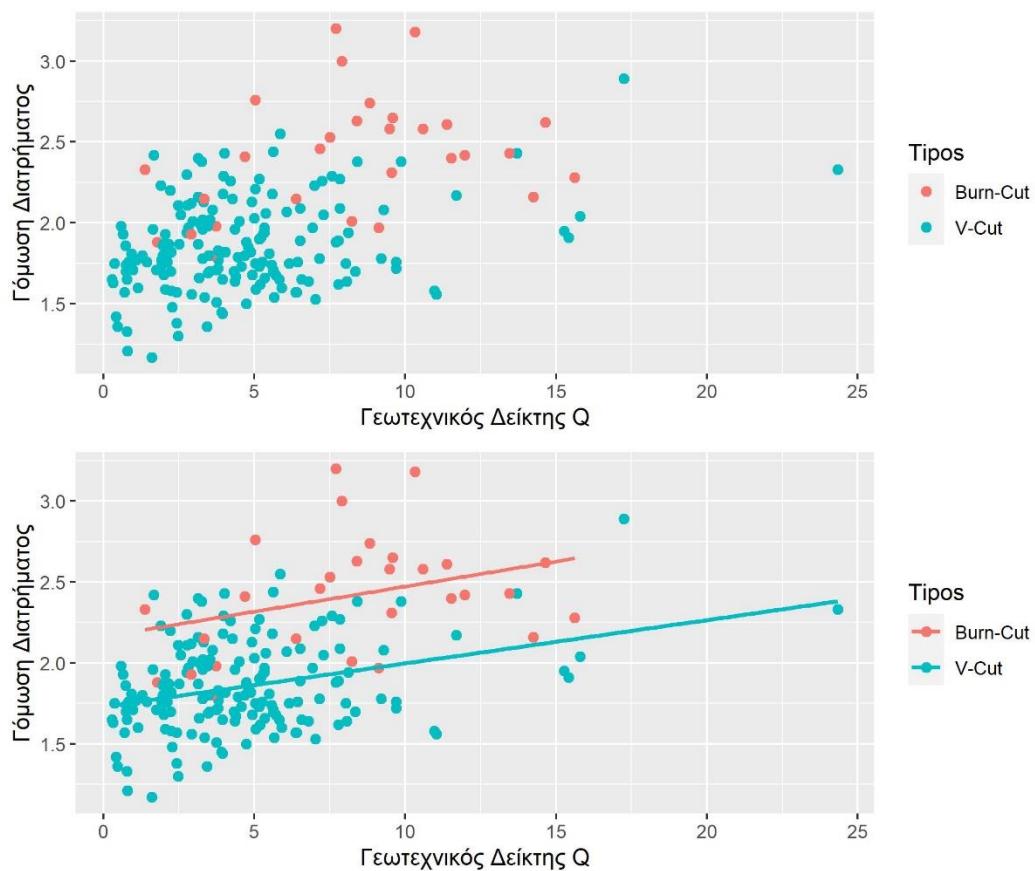
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	2.13312	0.08854	24.093	< 2e-16 ***
ArxeioT2\$QPoor	0.15557	0.07314	2.127	0.034662 *
ArxeioT2\$QFair	0.25966	0.07247	3.583	0.000429 ***
ArxeioT2\$QGood	0.41344	0.09735	4.247	3.35e-05 ***
ArxeioT2\$VCUT	-0.47756	0.05953	-8.022	9.46e-14 ***

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.2781 on 195 degrees of freedom  
Multiple R-squared: 0.3916, Adjusted R-squared: 0.3792  
F-statistic: 31.38 on 4 and 195 DF, p-value: < 2.2e-16

Σχήμα 5.20 Αποτελέσματα από το περιβάλλον της R της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για τη γόμωση διατρήματος με βάση την κατηγορία ταξινόμησης ποιότητας βραχομάζας και τον τύπο ανατίναξης.



Σχήμα 5.21 Διάγραμμα συσχέτισης της γόμωσης διατρήματος με το δείκτη Q ανά τύπο ανατίναξης (Burn-Cut, V-Cut).

Τέλος για τον δείκτη προχώρηση δημιουργήθηκε μοντέλο απλής γραμμικής παλινδρόμησης με βάση την ειδική κατανάλωση (σχέση 1.17). Η προχώρηση % δείχνει να παρουσιάζει μια μικρή αρνητική συσχέτιση με την ειδική κατανάλωση ( $R^2 = 24\%$ ).

$$\text{Προχώρηση \%} = 1.05 - 0.14 \cdot \text{Ειδική Κατανάλωση} \quad (1.17)$$

Υπάρχει μια μείωση της τάξης του 0.14 για κάθε μονάδα αύξησης της ειδικής κατανάλωσης (σχήμα 5.22 και 5.24). Τέλος από το σχήμα 5.23 φαίνεται να πληρούνται οι έλεγχοι εγκυρότητας για το μοντέλο αυτό.

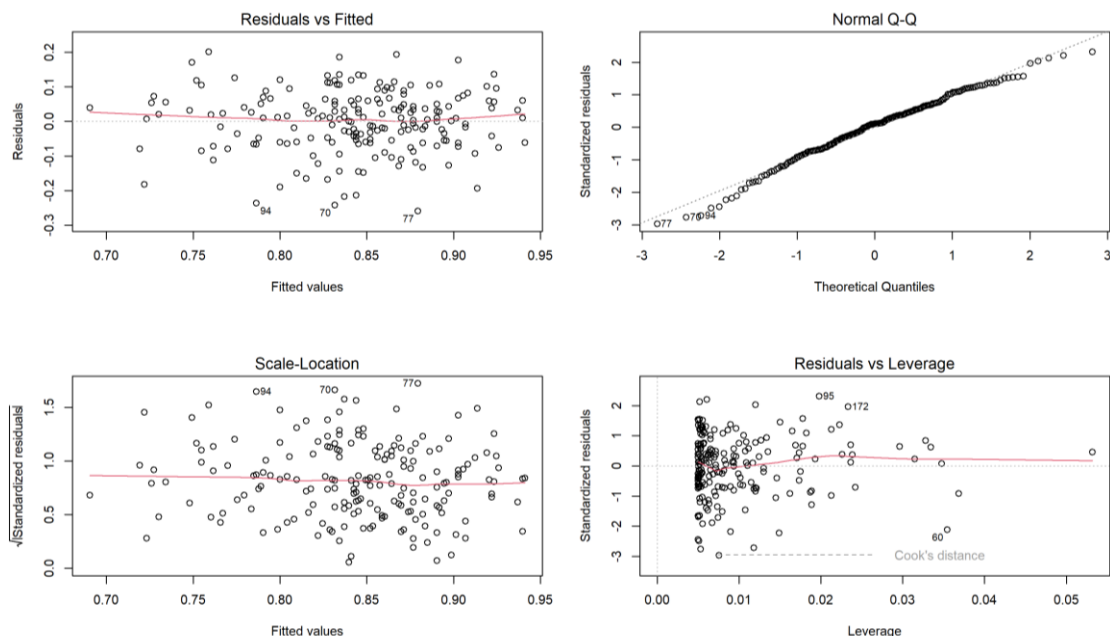
```

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)    1.04803    0.02628  39.883 < 2e-16 ***
ArxeioT2$Eidiki -0.13703    0.01716  -7.986 1.12e-13 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

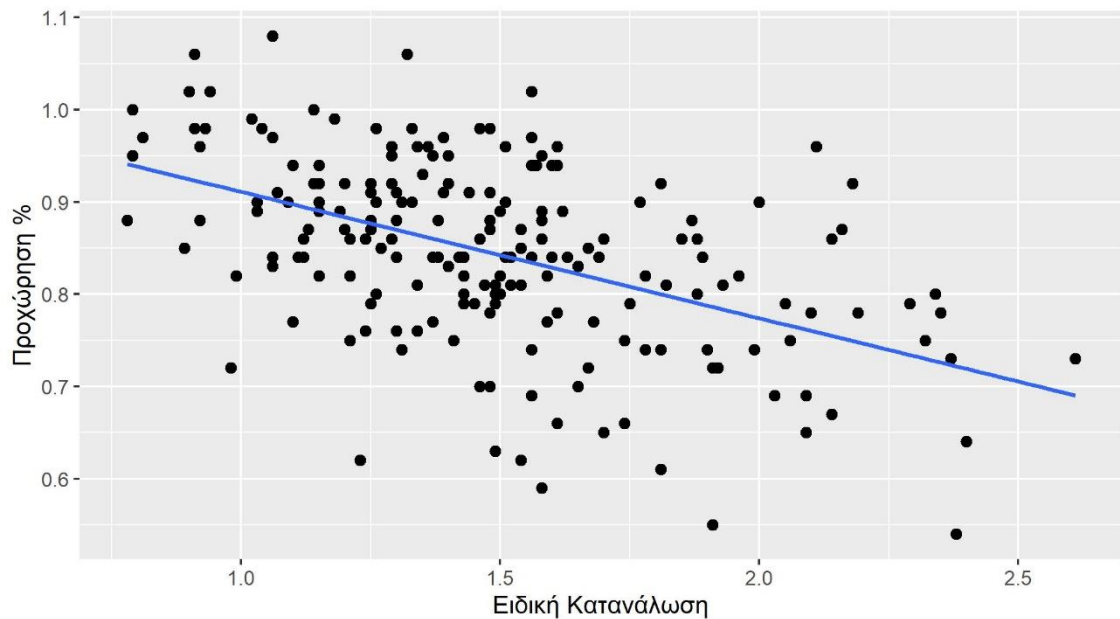
Residual standard error: 0.08769 on 198 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.2436,    Adjusted R-squared:  0.2398
F-statistic: 63.77 on 1 and 198 DF,  p-value: 1.118e-13

```

Σχήμα 5.22 Αποτελέσματα από το περιβάλλον της R (απλή γραμμική παλινδρόμηση) για το μοντέλο πρόβλεψης της προχώρησης % με βάση την ειδική κατανάλωση.



Σχήμα 5.23 Αποτελέσματα ελέγχου εγκυρότητας για το μοντέλο απλής γραμμικής παλινδρόμησης της προχώρησης % σε σχέση με την ειδική κατανάλωση.



Σχήμα 5.24 Διάγραμμα συσχέτισης της προχώρησης % με την ειδική κατανάλωση και το μοντέλο παλινδρόμησης με βάση τη σχέση 1.17.

## 5.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων αντίστοιχες εργασίες από τη διεθνή βιβλιογραφία

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν εργασίες που αναφέρονται κυρίως στη συσχέτιση της ειδικής κατανάλωσης εκρηκτικών με παραμέτρους εκμετάλλευσης, όπως τα χαρακτηριστικά των εκρηκτικών, τα χαρακτηριστικά της βραχομάζας, το σχέδιο διάτρησης κ.α. και καταλήγουν σε αποτελέσματα παραπλήσια με τα αποτελέσματα της ανάλυσης που προηγήθηκε. Πιο συγκεκριμένα:

Οι Alipour et al., (2021) χρησιμοποίησαν προχωρημένες τεχνικές ανάλυσης δεδομένων (support vector machines - SVM) από υπόγειες εκμεταλλεύσεις για τη συσχέτιση της ειδικής κατανάλωσης εκρηκτικών με παραμέτρους εκμετάλλευσης. Η ανάλυση έδειξε ότι οι κατάλληλες επεξηγηματικές μεταβλητές για τον προσδιορισμό της ειδικής κατανάλωσης είναι οι γεωτεχνικοί δείκτες RQD, UCS, μήκος διατρήματος, διατομή στοάς και την αναλογία όγκος εκρηκτικών προς τον όγκο του διατρήματος. Τέλος, συμπληρωματικοί παράμετροι όπως είναι τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών της βραχομάζας και τα χαρακτηριστικά της ανατίναξης (τύπος, διάταξη διατρημάτων) βελτιώνουν το μοντέλο πρόβλεψης.

Οι Alipour και Mokhtarian (2021) χρησιμοποίησαν την μέθοδο επιφανειών απόκρισης (response surface methodology - RSM) για τον προσδιορισμό της ειδικής κατανάλωσης με βάση τις παραμέτρους εκμετάλλευσης. Το αποτέλεσμα που προέκυψε ήταν η δημιουργία ενός πολωνύμου δευτέρου βαθμού με επεξηγηματικές μεταβλητές τον γεωτεχνικό δείκτη RQD, την διαμήκη ταχύτητα του σεισμικού κύματος (P-wave), τη διατομή της στοάς, το μήκος διάτρησης, την αναλογία της απόστασης των διατρημάτων της προεκσκαφής (S ή spacing) προς το φορτίο (B ή Burden) και την αναλογία όγκος εκρηκτικών προς τον όγκο του διατρήματος.

Οι Hayat και Abroshan (2017) εφάρμοσαν την μέθοδο της ανάλυσης κύριων συνιστωσών (principle component analysis - PCA) σε υπόγεια εκμετάλλευση για τον προσδιορισμό της ειδικής κατανάλωσης με χρήση επεξηγηματικών μεταβλητών τις γεωμηχανικές παραμέτρους της βραχομάζας.

Οι Hossaini και Alipour (2009) χρησιμοποίησαν τα νευρωνικά δίκτυα για τον προσδιορισμό της ειδικής κατανάλωσης σε υπόγειες εκμεταλλεύσεις. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της ειδικής κατανάλωσης ήταν ο γεωτεχνικός δείκτης RQD, η ταχύτητα σεισμικού κύματος (P-wave), η διατομή της στοάς, το μήκος διάτρησης και η αναλογία όγκος εκρηκτικών προς τον όγκο του διατρήματος.

Οι Silwal et al., (2021) πραγματοποίησαν ανάλυση για την εκτίμηση της ειδικής κατανάλωσης με επεξηγηματική μεταβλητή των γεωτεχνικό δείκτη Q. Το συμπέρασμα που προέκυψε είναι ότι με την αύξηση του γεωτεχνικού δείκτη Q αυξάνεται και η ειδική κατανάλωση με βάση τη σχέση: Ειδική κατανάλωση =  $0.9637\ln(Q) + 4.4697$ .

Τέλος οι He et al., (2022) σε μελέτη τους καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι στοές με μικρότερες διαστάσεις έχουν σχετικά υψηλούς δείκτες ειδικής κατανάλωσης ενώ στοές με μεγάλες διαστάσεις έχουν χαμηλές ειδικές καταναλώσεις.

## Συμπεράσματα – προτάσεις.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση των δεδομένων του κύκλου εργασιών που εκτελούνται σε υπόγειες εκμεταλλεύσεις. Μελετήθηκαν επιλεγμένοι δείκτες απόδοσης με στόχο την κατανόηση και παρακολούθηση της συμπεριφοράς των δεικτών αυτών ανά ζώνη εκμετάλλευσης, ανά ποιότητα βραχόμαζας καθώς και την συσχέτιση που παρουσιάζουν. Η ανάλυση βασίστηκε σε δεδομένα της Εταιρείας Ελληνικός Χρυσός μεταλλείο Ολυμπιάδας του έτους 2020. Επιλέχθηκαν δεδομένα που σχετίζονται με την εκμετάλλευση, την υποστήριξη, την γεωτεχνική ταξινόμηση βραχόμαζας.

Από την περιγραφική στατιστική ανάλυση προέκυψε ότι οι γεωτεχνικοί δείκτες στην ανατολική και δυτική ζώνη εκμετάλλευσης εμφανίζονται περίπου ίδιοι (ίδια ομάδα ταξινόμησης ποιότητας της βραχομάζας) με μια ελαφρώς υψηλότερη τιμή των δεικτών RMR και Q στα ανατολικά.

Για τις παραμέτρους εκμετάλλευσής προέκυψε ότι σε σχέση με τους εφαρμοζόμενους τύπους ανατίναξης η χρήση του τύπου V - Cut υπερτερεί έναντι Burn - Cut καθώς επίσης η ποσότητα εκρηκτικής ύλης, ο αριθμός των διατρημάτων και το μήκος διάτρησης για τον τύπο V - Cut είναι μικρότερη από τον τύπο Burn - Cut. Επιπλέον παρατηρήθηκε σημαντικός αριθμός διαμορφωτικών ανατινάξεων που επιφέρουν καθυστερήσεις στην παραγωγή. Η μέση προχώρηση(m) ανά ανατίναξη μεταξύ ανατολικής και δυτικής ζώνης δεν δείχνει να διαφέρει. Επίσης δεν υπάρχει διαφορά στην μέση τιμή του αριθμού των δρομολογίων μεταφοράς μεταλλεύματος και αγόνων μεταξύ ανατολικής και δυτικής ζώνης.

Από την ανάλυση των στοιχείων για την υποστήριξη προκύπτει ότι ο αριθμός των αγκυρίων, η ποσότητα εκτοξευόμενου σκυροδέματος Gunitite και ραβδοχάλυβων Rrs ανά ανατίναξη, είναι ελαφρά υψηλότερα στην δυτική ζώνη εκμετάλλευσης σε σχέση με την ανατολική και αυτό σχετίζεται και με τη διαφορά στην ποιότητα βραχομάζας στις δυο ζώνες. Ακόμη, στα ομαδοποιημένα στοιχεία σε μηνιαία βάση ως προς την ταξινόμηση ποιότητας της βραχόμαζας, ο δείκτης αγκύρια δεν δείχνει να διαφέρει ανά κατηγορία βραχόμαζας για τον λόγο ότι σε χειρότερη ποιότητα βραχομάζας αλλάζει ο τύπος και το μήκος των αγκυρίων και όχι ο αριθμός τους ενώ ο δείκτης Gunitite έχει μια αρνητική



συσχέτιση με την ποιότητα της βραχομάζας, αφού σε καλύτερης ποιότητα βραχομάζας χρησιμοποιείται λιγότερο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα Gunit.

Από την στατιστική ανάλυση των ομαδοποιημένων στοιχείων σε μηνιαία βάση προέκυψε ότι οι δείκτες εκμετάλλευσης όπως, η ειδική κατανάλωση εκρηκτικών, η γόμωση διατρήματος και η προχώρηση % δεν δείχνουν να διαφέρουν στατιστικά σημαντικά στις δυο ζώνες εκμετάλλευσης. Η ειδική κατανάλωση και η γόμωση διατρήματος συσχετίζονται θετικά με την ποιότητα της βραχομάζας που εξορύσσεται, ενώ η προχώρηση % αρνητικά. Από τις συσχετίσεις προέκυψε επίσης ότι ειδική κατανάλωση εκρηκτικών ( $\text{kg/m}^3$ ) αυξάνεται με την αύξηση της ποιότητας βραχομάζας, ενώ η αύξηση της διατομής ή η χρήση του τύπου ανατίναξης V - Cut επιφέρει μείωση της ειδικής κατανάλωσης εκρηκτικών. Η προχώρηση % εμφανίζει μείωση με την αύξηση της ποιότητας βραχομάζας.

Από την γραμμική παλινδρόμηση απλή και πολλαπλή δημιουργήθηκαν μοντέλα για την κατανόηση της συμπεριφοράς των δεικτών με την χρήση επεξηγηματικών μεταβλητών και την πρόβλεψη των τιμών τους.

Από το μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης που συσχετίζει την ειδική κατανάλωση εκρηκτικών ( $\text{kg/m}^3$ ) με τον γεωτεχνικό δείκτη Q προέκυψε μια σχέση η οποία εκτιμά την μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης με την μεταβολή της ποιότητας της βραχομάζας (θετική συσχέτιση). Επιπλέον χρησιμοποιήθηκαν ως επεξηγηματικές μεταβλητές ο τύπος ανατίναξης και η διατομή του μετώπου δείχνοντας μια μείωση της ειδικής κατανάλωσης με την χρήση ανατινάξεων V - Cut έναντι των Burn – Cut και μικρή μείωση στην ειδική κατανάλωση με την αύξηση της διατομής.

Όμοια μοντέλα δημιουργήθηκαν και για τον δείκτη γόμωση διατρήματος τα οποία είχαν παρόμοια συμπεριφορά εκείνο της ειδικής κατανάλωσης.

Τέλος δημιουργήθηκε μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης για τη συσχέτιση του δείκτη της προχώρησης % με τον δείκτη της ειδικής κατανάλωσης και προέκυψε ότι συσχετίζονται αρνητικά. Αυτή η συσχέτιση η προφανώς οφείλεται στο γεγονός ότι με την αύξηση της ποιότητας της βραχομάζας αυξάνει την ειδική κατανάλωση ενώ μειώνεται η προχώρηση.

Η στατιστική ανάλυση που έγινε στην παρούσα εργασία μπορεί να επεκταθεί και να περιλαμβάνει και άλλες παραμέτρους για την εξήγηση της συμπεριφοράς των δεικτών

παραγωγής και την πρόβλεψη των τιμών τους. Τέτοιες μεταβλητές θα μπορούσαν να αποτελούν τα χαρακτηριστικά του παραγόμενου ανατιναχθέντος υλικού στείρου ή μεταλλεύματος ( τύπος, κοκκομετρία κ.α.) και των παραμέτρων της εξόρυξης όπως είναι τύπος εκρηκτικής ύλης, τύπος γόμωσης (χύδην ή γαλακτώματα), διάμετρος διατρημάτων, απόσταση διατρημάτων (S ή spacing) μεταξύ τους, το φορτίο (B ή Burden) της προεκσκαφής κ.α). Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πιο προχωρημένες τεχνικές μοντέλων πρόβλεψης, όπως η τεχνητή νοημοσύνη με δυνατότητα ενσωμάτωσης πολλών παραμέτρων εισόδου.

## 6. Βιβλιογραφία

### *Διεθνής Βιβλιογραφία*

- Alipour, A., & Mokhtarian, M. (2021). RSM-based model to estimate the V-Cut drill and blast pattern specific charge in rock tunneling. *International Journal of Geomechanics*, 21(11), 06021030.
- Aspin, A. (2020). *Data Mashup with Microsoft Excel Using Power Query and M*, Springer.
- Barker, T., & Canning, M. (2013). *Pro data visualization using R and JavaScript* (No. s 207). New York, NY: Apress.
- Hayati, M., & Abroshan, M. R. (2017). Providing a model to determine of powder factor using principal component analysis technique. *Indian Journal of Science and Technology*, 10(24), 1-7.
- He, B., Armaghani, D. J., Bhatawdekar, R. M., & Lai, S. H. (2021). A review of soft computing techniques in predicting overbreak induced by tunnel blasting. In *International Conference on Geotechnical Challenges in Mining, Tunneling and Underground Infrastructures* (pp. 3-13). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Heumann C., Schomaker M., Shalabh (2022). ‘Introduction to Statistics and Data Analysis’, Springer.
- Hodeghatta, U.R., Nayak, U. (2023). Introduction to Natural Language Processing. In: *Practical Business Analytics Using R and Python*. Apress, Berkeley, CA. [https://doi.org/10.1007/978-1-4842-8754-5\\_15](https://doi.org/10.1007/978-1-4842-8754-5_15).
- Jafari, A., Hossaini, M. F., & Alipour, A. (2009). PREDICTION OF SPECIFIC CHARGE IN TUNNEL BLASTING USING ANNS Paper No. 376. In *Proceedings of the ISRM-Sponsored International Symposium on Rock Mechanics:" Rock Characterisation, Modelling and Engineering Design Methods"(SINOROCK2009)*.
- Janczyk, M., & Pfister, R. (2023). *Understanding Inferential Statistics: From A for Significance Test to Z for Confidence Interval*. Springer Nature.
- Lee, H. (2014). *Foundations of applied statistical methods*. Heidelberg: Springer.
- Mailund, T. R. (2019). *Data science quick reference*. Mailund TR. Data science quick reference. Aarhus, Denmark: Springer.
- McGibney, D. P. (2023). *Applied Linear Regression for Business Analytics with R*. International Series in Operations Research and Management Science.
- Silwal, R., Panthee, S., & Kainthola, A. (2021). Analysis of Joint Parameters to Understand it's Effect on Rock Blasting. In *International Conference on Geotechnical Challenges in Mining, Tunneling and Underground Infrastructures* (pp. 709-720). Singapore: Springer Nature Singapore.

### *Ελληνική Βιβλιογραφία*

Αγιουτάντης Ζ. (2019). Στοιχεία διάτρησης - ανατίναξης

Αγιουτάντης Ζ. (2019). Στοιχεία γεωμηχανικής - μηχανικής πετρωμάτων.

Enveco A.E. ‘Μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων μεταλλευτικών–μεταλλουργικών εγκαταστάσεων της εταιρείας Ελληνικός χρυσός στη Χαλκιδική’

Douglas M. (2017). Εφαρμοσμένη στατιστική και πιθανότητες για μηχανικούς

Εξαδάκτυλος Γ. (2005). Σχεδιασμός συστημάτων υπόγειων έργων για την εκμετάλλευση μεταλλευτικών κοιτασμάτων.

Καζάκος Λ. (2014). Η χρήση των εκρηκτικών στα τεχνικά έργα.

Καραγρηγορίου Α., Καλλιγέρης Ε. Γραμμικά μοντέλα και σχεδιασμός & ανάλυση πειραμάτων με εφαρμογές σε R και Minitab.

Τσουτρέλης Χ. (2001). Εκρηκτικές ύλες και τεχνικές ανατινάξεων.

### *Διαδικτυακές πηγές*

Ορυκτά, <http://www.orykta.gr/>

Ελληνικός Χρυσός, <https://www.hellas-gold.com/>

R bloggers, <https://www.r-bloggers.com/>

Dplyr, <https://dplyr.tidyverse.org/>

Statology, <https://www.statology.org/>

Geeksforgeeks, <https://www.geeksforgeeks.org/>

Statisticsglobe, <https://statisticsglobe.com/>

<https://statslectures.com/>

## Παράρτημα

Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης (πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση) μέσω της γλώσσα R.

Coefficients:

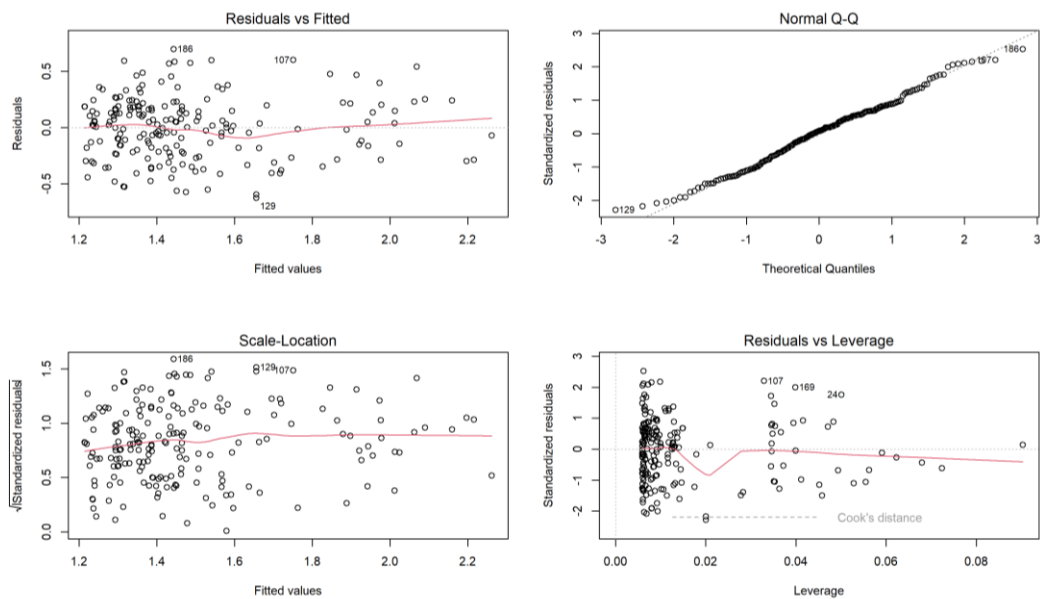
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	1.526554	0.073115	20.879	< 2e-16 ***
ArxeioT3\$Q	0.047069	0.006287	7.487	2.42e-12 ***
ArxeioT3\$VCUT	-0.325960	0.060557	-5.383	2.10e-07 ***

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.2765 on 194 degrees of freedom  
Multiple R-squared: 0.4169, Adjusted R-squared: 0.4109  
F-statistic: 69.34 on 2 and 194 DF, p-value: < 2.2e-16

Σχήμα I: Αποτελέσματα από περιβάλλον R πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης μετά από απαλοιφή ακραίων τιμών



Σχήμα II: Αποτελέσματα από R έλεγχοι υποθέσεων πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης μετά από απαλοιφή ακραίων τιμών

Coefficients:

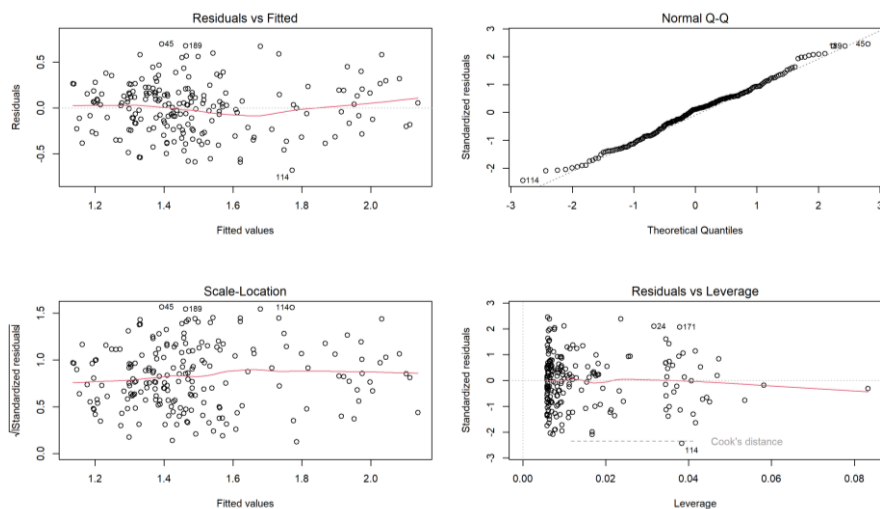
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	1.39042	0.09248	15.035	< 2e-16 ***
sqrt(ArxeioT2\$Q)	0.18883	0.02724	6.933	5.76e-11 ***
ArxeioT2\$VCUT	-0.35663	0.06088	-5.858	1.94e-08 ***

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.285 on 197 degrees of freedom  
 Multiple R-squared: 0.3874, Adjusted R-squared: 0.3812  
 F-statistic: 62.3 on 2 and 197 DF, p-value: < 2.2e-16

Σχήμα III: Αποτελέσματα από περιβάλλον R πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης με μετασχηματισμό τετραγωνική ρίζας



Σχήμα IV: Αποτελέσματα από R έλεγχοι πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης μετά από μετασχηματισμό τετραγωνική ρίζας

Coefficients:

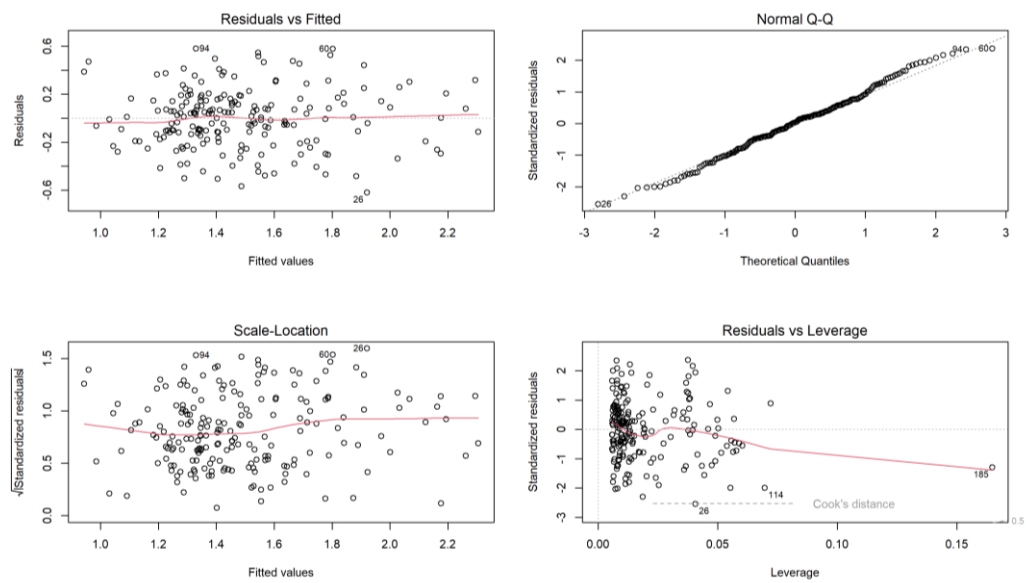
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	2.781777	0.160196	17.365	< 2e-16 ***
ArxeioT2\$Q	0.037305	0.005033	7.412	3.65e-12 ***
ArxeioT2\$`Average Profile`	-0.041916	0.005194	-8.071	6.90e-14 ***
ArxeioT2\$VCUT	-0.374267	0.053175	-7.038	3.19e-11 ***

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.2484 on 196 degrees of freedom  
 Multiple R-squared: 0.537, Adjusted R-squared: 0.5299  
 F-statistic: 75.76 on 3 and 196 DF, p-value: < 2.2e-16

Σχήμα V: Αποτελέσματα από περιβάλλον R πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης με γεωτεχνικό δείκτη Q, τύπο ανατίναξης και διατομή  $m^2$



Σχήμα VI: Αποτελέσματα από R έλεγχοι υποθέσεων πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης ειδικής κατανάλωσης με γεωτεχνικό δείκτη Q, τύπο ανατίναξης και διατομή  $m^2$