

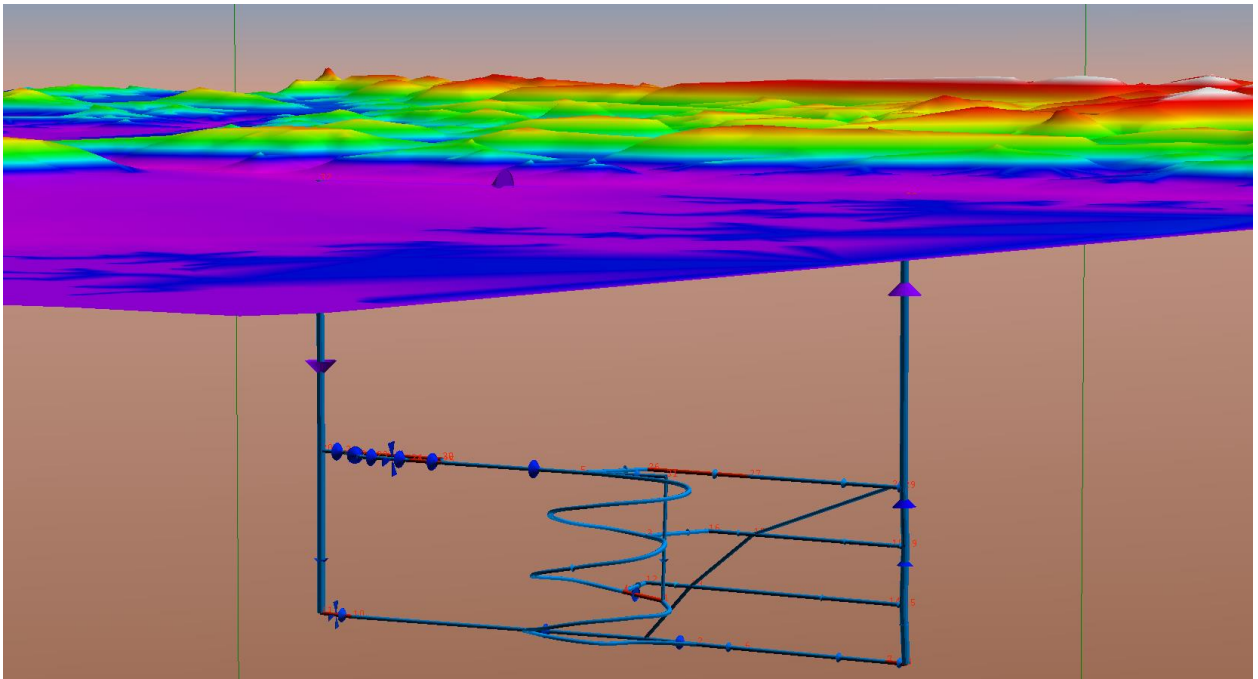


ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ & ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΕΩΝ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΕΞΙΚΗΣ
ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΔΡ. ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΑΠΑΓΕΡΙΔΗΣ

ΚΟΖΑΝΗ 2006

Περιεχόμενα

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ & ΕΞΟΜΟΙΩΣΗΣ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΕΩΝ	1
ΚΟΖΑΝΗ 2006.....	1
Περιεχόμενα	1
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Γενικά.....	1
1.2 Ιστορική Αναδρομή	2
1.3 Σύγχρονος αερισμός	5
1.4 Κοιτώντας το μέλλον.....	5
Βιβλιογραφία.....	6
2. Στοιχεία Υπόγειας Ατμόσφαιρας.....	8
2.1 Σύνθεση του Φυσικού Αέρα	8
2.2 Φυσικές ιδιότητες του αέρα	9
2.3 Συμπεριφορά του αέρα.....	15
2.4 Αέρας σε Υπόγεια έργα.....	18
Βιβλιογραφία.....	19
3. Αρχές Ροής Αέρα στα Υπόγεια Έργα	21
3.1 Ορισμός του Ρευστού.....	21
3.2 Τύποι Ροής	23
3.3 Εξίσωση του Bernoulli.....	25
3.4 Αρχές Ροής Αέρα	28
α. Θερμοδυναμική προσέγγιση.....	28
β. Εξισώσεις Ενέργειας.....	31
3.5 Απώλειες Πίεσης σε Υπόγεια Έργα	33
3.6 Εξίσωση Atkinson	36
Απώλειες Πίεσης στην Στρωτή Ροή Αέρα	36
Απώλειες Πίεσης στην Τυρβώδη Ροή.....	36
3.7 Συντελεστής Κ και οι Προσδιορισμός του.....	37
Προσδιορισμός του Συντελεστή Κ.....	40
Συντελεστής Κ για σωλήνες αερισμού.....	42
3.8 Βαθμίδα Πίεσης.....	43
4. Δίκτυα Υπόγειου Αερισμού	47
4.1 Πίεση και ποσότητα.....	47

4.2 Χαρακτηριστική Καμπύλη Υπόγειου Έργου	48
4.3 Νόμος του Kirchhoff	50
4.4 Απλά και Σύνθετα Δίκτυα Αερισμού	52
Απλά Δίκτυα Αερισμού	52
Σύνθετα Δίκτυα Αερισμού	55
4.5 Επίλυση Δικτύου Αερισμού	57
5. Συστήματα Υπόγειου Αερισμού	59
5.1 Ανεμιστήρες	59
5.2 Κύρια Συστήματα Αερισμού	65
5.3 Σχεδιασμός Συστήματος Αερισμού	78
6. Εξομοίωση με υπολογιστή	79
6.1 Ιστορικά.....	79
6.2 Αρχή Εξομοίωσης Δικτύου.....	81
6.3 Υπολογισμός Τιμών Αντίστασης	82
6.3 Χρήση Προγραμμάτων Εξομοίωσης Αερισμού	85
6.5 Προγράμματα Εξομοίωσης Αερισμού	86
7. Μελέτη Αερισμού με το VULCAN.....	89
7.1 Γενικά.....	89
7.2 Εισαγωγή Σχεδιαστικών Πληροφοριών.....	89
7.3 Εισαγωγή Δεδομένων	90
7.3.1 Δημιουργία Δικτύου	91
7.3.2 Δημιουργία Ανεμιστήρα	92
7.3.3 Εισαγωγή Διακλαδώσεων.....	93
7.4 Δημιουργία Υπομνήματος	98
7.5 Εκτέλεση Εξομοίωσης.....	101
7.6 Εμφάνιση των αποτελεσμάτων της εξομοίωσης	103
8. Συμπεράσματα	106
Παραρτήματα	107
1.....	107

1. Εισαγωγή

Κύριο θέμα αυτής της πτυχιακής εργασίας είναι η κατανόηση της σημασίας που έχει ο αερισμός σε μια υπόγεια εκμετάλλευση και ο σχεδιασμός του δικτύου αερισμού του ορυχείου με την χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Αντικείμενα μελέτης στο θεωρητικό τομέα είναι η χημική σύσταση του αέρα, η ροή του στα υπόγεια στρώματα της εκμετάλλευσης και η ανακύκλωσή του. Πρακτικό μέρος της πτυχιακής αυτής αποτελεί ο σχεδιασμός και η εξομοίωση του δικτύου αερισμού του ορυχείου καθώς και η οικονομική εκτίμησή του στο συνολικό προγραμματισμό της εκμετάλλευσης.

1.1 Γενικά

Αερισμός ορυχείων είναι η επιστήμη που εξετάζει τη μελέτη και τον σχεδιασμό ενός αποτελεσματικού και επαρκούς συστήματος κυκλοφορίας του αέρα. Η σημασία του επαρκούς αερισμού είχε αναγνωριστεί από τις πρώτες ημέρες λειτουργίας των ορυχείων. Με την αυξανόμενη παραγωγικότητα στα ορυχεία, την αυξανόμενη χρήση ντιζελοκίνητου εξοπλισμού και την εργασία σε βαθύτερα στρώματα, ο σχεδιασμός του αερισμού έχει γίνει πλέον αναπόσπαστο κομμάτι των συνολικών τεχνοοικονομικών μελετών τους. Χωρίς ένα αποτελεσματικό σύστημα αερισμού, καμία υπόγεια δραστηριότητα δεν μπορεί να γίνει με ασφάλεια.

Σύμφωνα με αναφορές που υπάρχουν σε εγχειρίδια μελετών και προγραμματισμού, ο αερισμός στο ορυχείο γίνεται:

1. για να παρέχεται αέρας επαρκούς ποσότητας και ποιότητας για ανθρώπινη κατανάλωση,
2. για να αραιώνονται και να γίνονται αβλαβή εύφλεκτα υλικά, εκρηκτικά και επιβλαβή αέρια μέσα στους χώρους εργασίας,
3. για να ψύχονται τα μέτωπα εργασίας εξασφαλίζοντας άνεση και μείωση της πίεσης,
4. για να διασκορπίζονται και να απομακρύνονται νέφη σκόνης από τις περιοχές εργασίας και
5. για να παρέχεται αέρας στις υπόγειες υπηρεσίες όπως χώρους μπαταριών, εργαστήρια, δωμάτια αντλιών και σταθμούς καυσίμων.

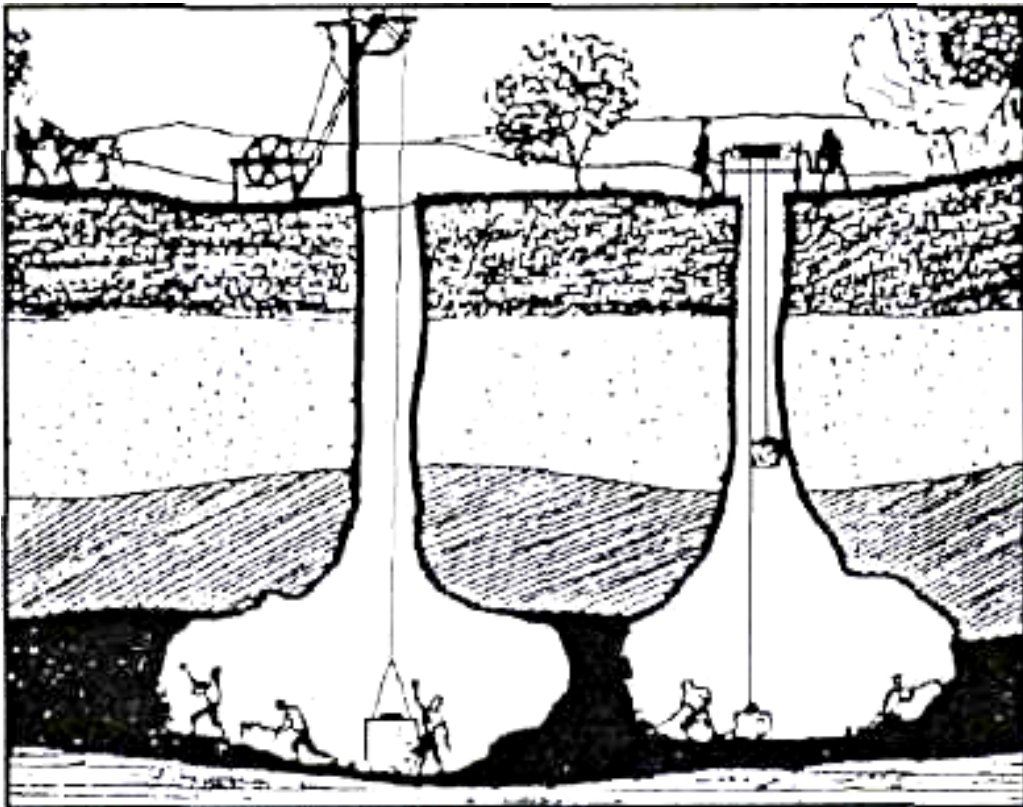
Η διαδικασία σχεδιασμού και μελέτης όλων των προαναφερθέντων στοιχείων είναι πολύ σημαντική για την εύρυθμη λειτουργία ανθρώπων και μηχανημάτων. Μπορεί να συγκριθεί με την μελέτη ενός πολιτικού μηχανικού για την κατασκευή δικτύου κλιματισμού σ' ένα συγκρότημα κατοικιών ή σε κτήρια εργασίας. Η μεγάλη

διαφορά είναι ότι στο υπόγειο ορυχείο η πολυπλοκότητα του δικτύου των αγωγών και της παροχής αέρα έχει μεγαλύτερη έκταση και ιδιαίτερες μεταβολές.

Ένα σύστημα αερισμού μπορεί να θεωρηθεί πηγή ενέργειας ενός ορυχείου, παρέχοντας το οξυγόνο μέσω διαδρόμων αέρα (αεραγωγοί) - όπως οι αρτηρίες σ' ένα ανθρώπινο σώμα - στις περιοχές εργασίας και η διαφυγή αυτού μέσω αεραγωγών επιστροφής επιτυγχάνοντας την αποβολή του ρυπασμένου αέρα στην εξωτερική ατμόσφαιρα.

1.2 Ιστορική Αναδρομή

Ιστορικές αναφορές για τα πρώτα γραπτά στοιχεία αερισμού ορυχείων αναφέρονται από τον 16^ο αιώνα. Μελέτες όμως συστημάτων αερισμού αναπτύχθηκαν πριν από τριακόσια χρόνια στην Ευρώπη. Ακόμη και παλαιότερα - από τα αρχαία χρόνια - ο άνθρωπος είχε την ανάγκη να βελτιώσει τον πλούτο, την δύναμη και την τεχνολογία και οδηγήθηκε στην αναζήτηση πρώτων υλών όπως το χρυσό, το ασήμι, το πυρόλιθο και τον άνθρακα. Τα πρώτα ορυχεία ήταν υπαίθρια και αερίζονταν από το φυσικό αέρα. Όταν οι εργασίες μεταφέρθηκαν υπόγεια (πρώτα ορυχεία άνθρακα) ο αερισμός γινόταν από σήραγγες που ανοίγονταν στην επιφάνεια του εδάφους και η εκσκαφή στη ρηχή φλέβα του κοιτάσματος γινόταν σε σχήμα καμπάνας (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1: Το σχήμα καμπάνας στα τοιχώματα χρησιμοποιήθηκε σε ρηχά κοιτάσματα.

Αργότερα, έπρεπε να επινοηθεί κάποια μέθοδος αερισμού επειδή ο αέρας δεν ήταν πλέον ικανός να παρέχει το αναγκαίο οξυγόνο για τους ανθρακωρύχους. Ο κίνδυνος από τα αέρια που δημιουργούνταν στα ορυχεία και τα μέσα για να τα εντοπίσουν ήταν γνωστή από τους ρωμαϊκούς χρόνους. Ο Πλίνιος (23-79 Μ.Χ.) έγραψε: "Στα βαθιά φρεάτια η εμφάνιση ατμού από το θείο ή το βωξίτη είναι μοιραία για τους εργάτες που σκάβουν". Αυτό υποδηλώνει ότι οι Ρωμαίοι γνώριζαν για το φυσικό αερισμό. Όσπου να γράψει ο Georgius Agricola το βιβλίο του για τα μεταλλεία και τη μεταλλουργία *de Re Metallica* το 1556, τα ορυχεία είχαν γίνει αρκετά βαθιά και σπουδαίας έκτασης ώστε τα αέρια που δημιουργούνταν να αποτελούν ένα σημαντικό πρόβλημα.

Ήταν γνωστό το γεγονός ότι ο αέρας όταν θερμαίνεται έχει ανοδική πορεία σε μια κλειστή ατμόσφαιρα. Η παρατήρηση αυτή ότι ο θερμαινόμενος αέρας ανέρχεται και προκαλεί κίνηση των αερίων οδήγησε στην εκπόνηση της πρώτης μελέτης αερισμού με την βοήθεια τεχνικών μέσων σύμφωνα με την οποία: για να δημιουργηθεί ο θερμαινόμενος αέρας στο κατώτατο σημείο του αεραγωγού τοποθετούμε σε ένα μεταλλικό καλάθι με κάρβουνο σε καύση. Έτσι η ατμόσφαιρα για να ρεύσει μέσα στον αεραγωγό και να αντικαταστήσει το θερμό αέρα που είχε ανέλθει σε αυτόν θα πρέπει να περάσει από το ορυχείο (Atkinson, 1892). Το πρώτο αρχείο μιας τέτοιας μεθόδου αερισμού αναφέρεται στα 1686 και αυτή η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε μέχρι τη δεκαετία του '20 σε πολλά μικρά ορυχεία σε όλες τις Ηνωμένες Πολιτείες και τον Καναδά (Robinson, 1922).

Κατά τον 17^ο αιώνα η εκμετάλλευση και η παραγωγή πρώτων υλών είχε αυξηθεί και σε συνδυασμό με την εργασία πολλών ανθρώπων στα ορυχεία οδήγησε στο να γίνουν η θεωρία και η τέχνη του αερισμού βασικό μέρος της μεταλλοολογίας. Παρακάτω δίνονται χρονολογικά τα σπουδαιότερα σημεία εξέλιξης στον τομέα αερισμού κατά τα προηγούμενα τριακόσια έτη:

- **17 αιώνας:** αντιμετώπιση του αέρα με σφραγίσματα.
- **1760, κυλιόμενα σύστημα** (J. Spedding): αναγκάζοντας τον αέρα να κυκλοφορήσει σ' ολόκληρο το ορυχείο και να αποτρέψει τη συγκέντρωση του μεθανίου στα ορυχεία Whitehaven.
- **1810, διαχωρισμός αέρα** (John Buddie): χρησιμοποίηση ενός σύνθετου συστήματος αερισμού. Αυτό αποτέλεσε την προϋπόθεση για την δημιουργία του συστήματος ελέγχου της μεταλλείας και οδήγησε, μαζί με τους βελτιωμένους φούρνους στα κατώτατα σημεία αεραγωγών, στη μεγαλύτερη ροή αέρα η οποία οδήγησε στα σημερινά συστήματα αερισμού.

- **19ος αιώνας – ανάλυση:** Χημικός προσδιορισμός συστατικών του αέρα στα ορυχεία άνθρακα. Η χρήση αυτής της γνώσης δεν βελτίωσε αμέσως την ασφάλεια των ορυχείων άνθρακα. Η παιρεταιίρω ζήτηση για τον άνθρακα απαίτησε από τα έργα να επεκταθούν βαθύτερα στα μέτωπα του κοιτάσματος αλλά οι δυνατότητες των αεραγωγών μειωθήκαν και αναφέρθηκαν πολλές εκρήξεις ορυχείων.
- **1813 – επιτροπές:** Ο Σύλλογος Sunderland και η Επιτροπή Νοτίων Πεδίων, δημιούργησαν δύο εξεταστικές επιτροπές λόγω της δημόσιας απαίτησης για να ερευνήσουν την ασφάλεια των ορυχείων.
- **1850 - νόμος ορυχείων άνθρακα:** Το Κοινοβούλιο ψήφισε τον πρώτο νόμο μεταλλείας, που απαιτεί την καθιέρωση μιας επιθεώρησης ορυχείων που μέλημα της ήταν η εκπαίδευση επιστημονικού προσωπικού για να βελτιωθεί η θέση των μηχανικών μεταλλείας, παρόμοια με αυτήν των τότε στρατιωτικών και πολιτικών μηχανικών.
- **1854 – το πρώτο εγχειρίδιο:** Θεωρία του αερισμού ορυχείου (J.J. Atkinson). Δεν έγινε κατανοητή από τους μηχανικούς μεταλλείων μέχρι σήμερα.
- **1862 - εποχή των ανεμιστήρων:** Ο Atkinson και ο Dickenson ταξίδεψαν στην ευρωπαϊκή ήπειρο, βλέποντας πολύ μεγάλες μηχανές αερισμού συμπεριλαμβανομένων των φυγοκεντρικών ανεμιστήρων. Οι υπόγειοι φούρνοι έπειτα αντικαταστάθηκαν.
- **1862 - το σύστημα διπλού αγωγού:** μετά από την καταστροφή Hartley. Αυτό το σύστημα, μαζί με τους μηχανικούς ανεμιστήρες, οδήγησε μεγαλύτερη ροή αέρος με αποτέλεσμα την αύξηση του βάθους εργασίας στο μεταλλείο.
- **1882 – δημοσιεύσεις:** μικρή, γρήγοροι ανεμιστήρες.
- **1918 - έρευνα:** Η επιτακτική έρευνα έθεσε τα θεμέλια της σύγχρονης τεχνολογίας αερισμού. Έλεγχος των ατμοσφαιρικών συνθηκών στα θερμά και βαθιά ορυχεία (Cadman, 1919) αερισμός ορυχείων (Hay, 1923) Επίσης, η αναθεώρηση ότι $H = RQ$ (Douglas Hay) και η ανάπτυξη της τεχνικής έρευνας της πίεσης.
- **1949 – αποξήρανση εύφλεκτων αερίων:** Μελέτη του J. Bromilow στη Γερμανία.
- **1951 - σύγχρονος αερισμός ορυχείων:** F. B. Hinsley "Πατέρας του σύγχρονου αερισμού ορυχείων", ανέπτυξε την θερμοδυναμική προσέγγιση και τις τεχνικές στους αναλογικούς υπολογιστές για να υπολογίσει ακριβέστερα το δίκτυο αερισμού των ορυχείων.

1.3 Σύγχρονος αερισμός

Από τη δεκαετία του '50 και έπειτα έχουν γίνει δραματικές αλλαγές στον εξοπλισμό και τις μεθοδολογίες που είναι διαθέσιμες για τον προγραμματισμό αερισμού ορυχείων.

1959: Ο "συστηματικός προγραμματισμός αερισμού" (Bryan) και "ο έλεγχος ορυχείου" αναπτύχθηκαν μετά από περιστατικά εκρήξεων και ατυχημάτων σε ανθρακωρυχεία

Δεκαετία του '60: μελέτες των Rudolf Greuer, Malcolm, McPherson, και Y.J. Wang ανέπτυξαν θεωρίες δικτύων για τους αεραγωγούς και εφαρμογές στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές.

Δεκαετία του '70: προγραμματισμός ελέγχου του αερισμού ορυχείου και εφαρμογές σε μικρό-υπολογιστές.

Δεκαετία του '80: εφαρμογές και μελέτες σε προσωπικούς υπολογιστές.

Δεκαετία του '90: αυτοματοποίηση του αερισμού ορυχείων.

Παρόμοιες και εξίσου σημαντικές είναι οι αλλαγές και οι εξελίξεις που επιτεύχθηκαν στο κομμάτι του εξοπλισμού συστημάτων περιβαλλοντικού ελέγχου. Σχεδιάστηκαν νέες συσκευές ενεργειακής ανάκτησης, νέος σχεδιασμός και έλεγχος κυκλοφορίας του αέρα καθώς και καινούριες τουρμπίνες αγωγών. Αυτό επηρέασε έμμεσα την εξέλιξη των ορυχείων στο τμήμα της τροφοδοσίας και της ανακύκλωσης του αέρα με αποτέλεσμα την αύξηση του βάθους εκσκαφής (καλύτερη τροφοδοσία οξυγόνου άρα και καλύτερη απόδοση ανθρώπων και μηχανών). Απόρροια της αύξησης του βάθους εκμετάλλευσης είναι και η αύξηση της παραγωγικότητας που είναι σημαντικός παράγοντας οικονομικού προγραμματισμού σ' ένα ορυχείο.

1.4 Κοιτώντας το μέλλον

Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες στις υπόγειες εκσκαφές συνδέονται όχι μόνο με το τοπικό γεωλογικό περιβάλλον, αλλά και με τη μέθοδο εξόρυξης, τον τύπο των μηχανημάτων, την γεωμετρία και τον σχεδιασμό εκσκαφής του ορυχείου και των υπαρχόντων προτύπων της περιβαλλοντικής μελέτης. Λόγω της έμφασης που θα δοθεί στις διαφορετικές πτυχές του περιβαλλοντικού ελέγχου και της ποιότητας εργασίας στα μεγάλα βάθη εκμετάλλευσης η εξέλιξη αυτού του τομέα θα είναι γρήγορη καθώς επηρεάζει πολλές «ζωτικές» λειτουργίες του ορυχείου. Πιθανές εξελίξεις τα επόμενα χρόνια της ανάπτυξης της περιβαλλοντικής μελέτης του ορυχείου θα είναι οι εξής :

1. Μηχανοργάνωση και αυτοματοποίηση στον αερισμό ορυχείου

Μερικές από τις επικείμενες επιδράσεις των υπολογιστών στον αερισμό των ορυχείων (Hartman, 1987):

- i) διαμόρφωση και συντονισμός συστημάτων αερισμού με το σύστημα εκμεταλλευσης κατά τη διάρκεια της φάσης προγραμματισμού,
- ii) κανονισμός και έλεγχος της πίεσης και της ποσότητας ανεμιστήρων, κατεύθυνση ροών αέρα ανταπόκριση των ρυθμίσεων ,χειρισμός στις πόρτες εισόδου αέρα των αεραγωγών από μακρινή απόσταση σε περίπτωση ανάγκης,
- iii) τηλεπισκόπηση και έλεγχος της ατμοσφαιρικής ποιότητας ορυχείων, που συνδέονται με τον έλεγχο ανεμιστήρων, για να αποφευχθούν τυχόν ατυχήματα,
- iv) αυτοματοποιημένη ολοκλήρωση των συστημάτων αερισμού που περιλαμβάνουν τις πολλαπλές ζώνες λειτουργίας και τους ανεμιστήρες,
- v) περίπλοκη επίλυση προβλημάτων στην ανάλυση των δικτύων ροής και την επιλογή ανεμιστήρων,
- vi) απλοποίηση των στοιχείων έρευνας αερισμού και ενσωμάτωση στα μαθηματικά πρότυπα για την ανάλυση και τον σχεδιασμό.

2. Περιπλοκότερος προγραμματισμός αερισμού,

3. Νέα συστήματα ροής αέρα,

4. Συμπληρωματικοί ανεμιστήρες Legalized στα ορυχεία άνθρακα στις Ε.Π.Α.,

5. Καλύτερη τεχνολογία ελέγχου σκόνης,

6. Διαδεδομένη υιοθέτηση Diesels στα ορυχεία άνθρακα στις Ε.Π.Α,

7. Έλεγχος θερμότητας,

8. Αποξήρανση μεθανίου,

9. Ένα περιβάλλον εκμετάλλευσης βασισμένο στην ποιότητα της ζωής.

Βιβλιογραφία

Agricola, G. (1556) *De Re Metallica*, μετάφραση από την πρώτη έκδοση στα Λατινικά, Dover Publications Inc., New York, 638 σελ.

Anon. (1998) "Diesel Particulate Matter Exposures of Underground Metal and Nonmetal Mines' a Proposed Rule," MSHA, Oct. 29, σελ. 168.

Atkinson, A.A. (1892) "The Laws of Friction," *A Key to Mine Ventilation*, The Colliery

- Engineer Co., Scranton, PA, σελ. 11-18. Beard, J.T. (1894) "Chap. 1: Conditions Existing in Mines," *The Vent, of Mines*, 1st ed., John Wiley & Sons, New York, σελ. 1-7.
- Gosier, A.M. and Ellis, M.G. (1993) "Certification and Regulation of Diesel Equipment Use in Underground Mines: An Industry Perspective," *Min. Engrg.*, Aug., σελ. 1040-1042.
- Harley, A. (1984) "Good Ventilation," Keynote lecture, *Proc. 3rd Int'l Mine Vent. Cong.*, Howes, M.J, and Jones, M.M., ed., Inst. of Min. Engrs., London, England; also IMM Trans., Vol. 93, Jul., σελ. A95-A104.
- Hartman, H.L. (1987) "Mine Ventilation... The Last Forty Years and the Next Fifteen,"
Symposium Banquet Speech, 3rd U.S. Mine Vent. Sympo., Mutmansky, J.M., ed., SME, Inc., Littleton, CO, σελ. 393-397.
- Hartman, H.L, *et al*, ed. (1997) "Chap. 1: Environmental Control of Mine Atmosphere," *Mine Ventilation and Air Conditioning*, 3rd ed., John Wiley and Sons, Inc., σελ. 3-11.
- Hinsley, F, B. (1967) "The Control of Atmospheric Conditions in Mines," 11th Cadman Memorial Lecture. *Min. Engrg.*, Feb., σελ. 289-297.
- Kennedy, W.R. (1996) "I: Mine Gases," *Practical Mine Ventilation*, Intertec Publishing, Chicago, Illinois, σελ. 3-6.
- McPherson, M.J. (1988) "Subsurface Environmental Engineering-A Look into the Future," *Proc. 4th Int'l Mine Vent. Cong.*, Gillies, A.D.S., ed., Australasian Inst. Min. and Metall., Melbourne, Australia, σελ. 19-27.
- McPherson, M.J. (1993) "Chap. 6: Ventilation Surveys," *Subsurface Ventilation and Environmental Engineering*, Chapman & Hall, New York, σελ. 175-208.
- Mousset-Jones, P. (1986) "A Survey of Mine Ventilation Practices," SME Annual Meeting, St. Louis, MO, *Preprint #86-382*, 19 σελ.
- Robinson, J.R. (1922) "Chapter VII: Early Methods of Mine Ventilation," *Practical Mine Ventilation*, J.R. Robinson, Publisher, Pittsburgh, PA, σελ. 72-79.
- Saxton, I. (1986) "Coalmine Ventilation-from Agricola to the 1980's; Parts 1&2" *The Min. Engr.* (London), Part I, May, σελ. 490-503 και Part II, June, σελ. 550-559.
- Tien, J.C. (1998) "Chap. 2: Ventilation - An Overview," *Practical Mine Ventilation Design and Control*, University of Missouri-Rolla Short Course Text, σελ. 5-15.
- Weeks, W.S. (1944) "Effect of Natural Ventilation Pressure on Mine Resistance with Fan Operating,"¹ *Min. Tech.*, T.P. 1661, Jan., 6 σελ.

2. Στοιχεία Υπόγειας Ατμόσφαιρας

Ο αέρας είναι ένα αεριώδες μίγμα, το οποίο αποτελεί τη φυσική ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης. Όταν ο αέρας εισαχθεί μέσα στο ορυχείο, η σύνθεσή του θα αλλάξει ανάλογα με τις διαδρομές που ακολουθεί. Στην υπόγεια εκμετάλλευση, η κρισιμότερη πτυχή στο περιβάλλον της υπόγειας ατμόσφαιρας είναι ο έλεγχος του αέρα στη θέση εργασίας.

Το βάρος του αέρα είναι περίπου 31 κόκκοι¹ ανά 254 cm² υπό κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Η μέση ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνεια της θάλασσας είναι περίπου 960.16 κιλά ανά τετραγωνικό μέτρο. Υπολογίζεται ότι σε ύψος περίπου 5,63 χλμ. επάνω από τη στάθμη θάλασσας, το βάρος ενός κυβικού μέτρου του αέρα είναι το μισό απ' ότι είναι στην επιφάνεια της γης. Δηλαδή ο αέρας είναι πιο αραιός σε μεγαλύτερα ύψη απ' ότι στην επιφάνεια (Fairley, 1894).

2.1 Σύσταση του Φυσικού Αέρα

Ο αέρας δεν είναι μια καθαρή ουσία, αλλά ένα μηχανικό μίγμα διάφορων αερίων, που έχει διαφορετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες. Είναι άχρωμος, άοσμος, άγευστος και υποστηρίζει την καύση και τη ύπαρξη ζωής. Η σύσταση του αέρα μπορεί να ποικίλει ελαφρώς από ένα σημείο σ' ένα άλλο, όπως για παράδειγμα στις στοές ροής και κυκλοφορίας του αέρα στα υπόγεια ορυχεία. Ο καθαρός, ξηρός αέρας κοντά στη στάθμη θάλασσας περιέχει τα αέρια όπως παρουσιάζονται παρακάτω :

Αέρια %	Όγκος %	Βάρος %
N ₂	78.084	75.55
O ₂	20.946	23.13
CO ₂	0.003	0.05
Άλλα αέρια	0.003	

Ο αέρας περιλαμβάνει και άλλα αέρια όπως το νέο (0,00182%), το ήλιο (0,00053%), το κρυπτό (0.00012 %), το ξένο (0,00009%), το υδρογόνο (0,00005%),

¹ Μια λίβρα είναι ίση με 7.000 κόκκους.

το μεθάνιο (0,00002%), και νιτρώδη οξείδια και όζον (0.00005%). Αυτά τα αέρια συνυπάρχουν με το άζωτο επειδή είναι χημικά και φυσιολογικά αδρανή, έτσι για πρακτικούς λόγους μπορούν να εξεταστούν ως τμήμα του ατμοσφαιρικού αζώτου (Forbes και Grove, 1954). Συνήθως υποθέτουμε ότι η σύσταση του ξηρού αέρα είναι περίπου :

Οξυγόνο : 21 %

Άζωτο : 79 %

Οι ποσότητες αέρα που αναπνέονται και το οξυγόνου που καταναλώνεται από ένα μέσο άνθρωπο εξαρτώνται από τις δραστηριότητες τις οποίες εκτελεί. Μετά από εργαστηριακές μελέτες είναι εμφανές ότι το ποσοστό και ο όγκος της αναπνοής και της κατανάλωσης οξυγόνου εξαρτάται και μεταβάλλεται από την δραστηριότητα του ατόμου, ανάλογα με την ένταση της άσκησης. (Forbes και Grove, 1954).

2.2 Φυσικές ιδιότητες του αέρα

Η ατμοσφαιρική πίεση στη γη προκαλείται από το βάρος της μάζας αέρα που περιβάλλει τη γη. Όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος τόσο λιγότερο ζυγίζει ο αέρας επειδή ο αριθμός των μορίων ανά μονάδα όγκου μειώνεται και φθάνει ίσο με μηδέν σε περίπου 72,42 χλμ. από τη γήινη επιφάνεια. Η ατμοσφαιρική πίεση ανάλογα με τη θέση που βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια επηρεάζεται από τον αέρα, τις τοπικές αλλαγές θερμοκρασίας, την πίεση του ατμού που προκαλείται από την περιεκτικότητα σε υγρασία, κ.λπ., συνήθως είναι 76 cm στήλης Hg στην επιφάνεια της θάλασσας. Στην βιβλιογραφία οι αναφορές της πίεσης εκφράζονται υπό κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες στην στάθμη της θάλασσας (21,11° C με πυκνότητα αέρα 0.075 kg/m³). Σε μονάδες S.I. είναι :

$$0.76 \text{ m} = 75.999,34 \text{ cm. Hg}$$

$$1 \text{ atm} = 101.324 \text{ kPa}$$

Από μακροσκοπικής απόψεως, η χημική σύνθεση του ξηρού αέρα παραμένει σταθερή και ομοιογενής πέρα από μια ιδιαίτερη διακύμανση των θερμοκρασιών και των πιέσεων, και μπορεί να αντιμετωπιστεί ως καθαρή ουσία μέσα σε αυτήν την διακύμανση.

Ο υγρός αέρας, μ' ένα ποικίλο ποσοστό υδρατμού (0,1% έως 4%), πρέπει να αντιμετωπιστεί ως διπλό συστατικό μίγμα, η ποσότητα του οποίου εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την πίεση.

Ακολουθούν μερικές από τις πιο σημαντικές ιδιότητες που επηρεάζουν την συμπεριφορά του αέρα στην υπόγεια εκμετάλλευση.

Πίεση (Ps)

Η ατμόσφαιρα που περιβάλλει τη γη έχει ειδικό βάρος το οποίο ασκεί πίεση στην επιφάνεια της γης. Αυτή η πίεση εκφράζεται ως το ισοδύναμο ύψος της στήλης υδραργύρου (βαρομετρική πίεση) και είναι συνήθως εκφρασμένη σε ίντσες ή σε χιλιοστά υδραργύρου.

$$1 \text{ atm} = 76 \text{ cm. Hg} = 101,325 \text{ Pa} = 101325 \text{ kPa} = 1,013.25 \text{ mbar}$$

$$1 \text{ Pascal (Pa)} = 0.01 \text{ cm. W.G.} \text{ ή } 2,54 \text{ cm. W.G.} = 249.089 \text{ Pa}$$

Η πίεση ενός ρευστού προέρχεται από τη δύναμη που ασκούν τα μόρια του στα τοιχώματα ενός δοχείου. Υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση, $P_s = f/s$ δηλ. η δύναμη είναι ανάλογη της επιφάνειας επάνω στην οποία εφαρμόζεται και εκφράζεται σε N/m^2 (ή σε bar με $1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa}$).

Πυκνότητα (ή ειδικό βάρος w) :

Η πυκνότητα είναι το ειδικό βάρος ανά μονάδα μάζας του αέρα. Ένα μέτρο της πυκνότητας της ύλης είναι το ποσό της ύλης ανά μονάδα όγκου :

$$\text{Πυκνότητα} = \frac{\text{βάρος}}{\text{όγκος}}, \text{ σε } \text{kg/m}^3$$

Η πυκνότητα συσχετίζεται με την βαρομετρική πίεση, την υγρασία, και τη θερμοκρασία. Παραδείγματος χάριν, η πυκνότητα για τον ξηρό αέρα υπό κανονικές συνθήκες (76,00 cm.Hg και 21,11°C) είναι 1.293 kg/m^3 .

$$w = \frac{1.327}{460 + t_d} (B - 0.378 p_c)$$

όπου w είναι η πυκνότητα του ξηρού αέρα σε kg/m^3 , t_d η θερμοκρασία σε ξηρό περιβάλλον σε $^{\circ}\text{C}$, B η βαρομετρική πίεση και p_c η πίεση ατμού σε θερμοκρασία δρόσου σε cm.Hg (Hartman, 1997). Επίσης η πίεση (p) μπορεί να υπολογιστεί διαφορετικά χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση,

$$p = w_1 H_1 = w_2 H_2$$

όπου H το πιεσομετρικό ύψος.

Πυκνότητα μάζας (ρ) :

Η πυκνότητα μάζας είναι η μάζα του αέρα ανά μονάδα όγκου. Αυτή υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση $\rho = w/g$

Μετριέται σε kg/m^3 όπου w είναι το βάρος σε kg/m^3 και g η επιτάχυνση της βαρύτητας σε m/sec^2 .

Ειδικός όγκος (v) :

Ο όγκος ανά μονάδα βάρους του ξηρού αέρα δεν είναι ίσος με τον αντίστοιχο όγκο της πυκνότητας ή της μαζικής πυκνότητας, ο οποίος είναι βασισμένος στις μονάδες όγκου του μίγματος. Ο συγκεκριμένος όγκος μετριέται σε m^3/kg .

Θερμοκρασία (t_b) :

Η εξοικείωση με την θερμοκρασία του ξηρού αέρα ως κλίμακα μέτρησης και η ευκολία που μας δίνει την καθιστούν πρότυπο στις μετρήσεις. Η θερμοκρασία μετριέται με τη βοήθεια ενός θερμομέτρου είτε σε μια κλίμακα Κελσίου ($^{\circ}\text{C}$) είτε σε μια Φαρενάιτ ($^{\circ}\text{F}$) και πρέπει να μετατραπεί στην απόλυτη κλίμακα με κάποιους υπολογισμούς :

$$^{\circ}\text{R} = ^{\circ}\text{F} + 459.67$$

$$^{\circ}\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273.15$$

$$1.0\text{K} = 1.8^{\circ}\text{R},$$

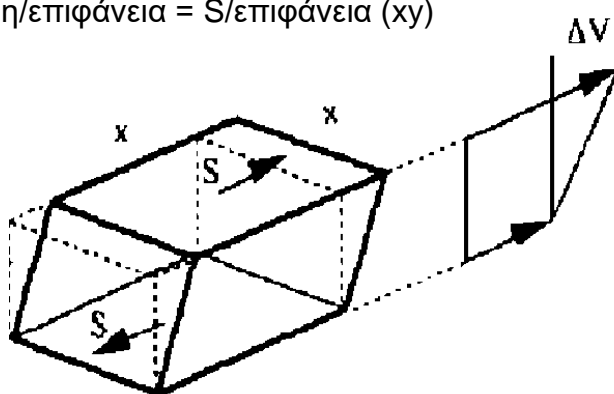
όπου $^{\circ}\text{R}$ είναι οι βαθμοί Ράνκιν (απόλυτοι βαθμοί Φαρενάιτ), $^{\circ}\text{F}$ είναι οι βαθμοί Φαρενάιτ, K είναι οι βαθμοί Κέλβιν (απόλυτοι βαθμοί Κελσίου), $^{\circ}\text{C}$ είναι οι βαθμοί Κελσίου.

Ιξώδες (μ) :

Το ιξώδες είναι μια ιδιότητα που εκφράζει το μέγεθος της διατμητικής τάσης που αναπτύσσεται όταν γλιστρά ένα ρευστό στρώμα πάνω σ' ένα άλλο. Είναι το μέτρο της δύναμης της εσωτερικής αντίστασης που αναπτύσσεται από τις συνεκτικές δυνάμεις μεταξύ των ρευστών μορίων (Rabia, 1986).

Σε ένα ρευστό όγκο ενός αντικείμενου xyz με μια διατμητική δύναμη τριβής S όπου ενεργεί επάνω σε δύο αντίθετες κατευθύνσεις και σε απόσταση y (Σχήμα 2.1). Η διατμητική τάση υπολογίζεται :

$\tau = \text{διατμητική δύναμη/επιφάνεια} = S/\text{επιφάνεια} (xy)$



Σχήμα 2.1 : Διάγραμμα που παρουσιάζει τις διατμητικές δυνάμεις τριβής που ενεργούν σε αντίθετες κατευθύνσεις σε ένα αντικείμενο.

Δεδομένου ότι οι διατμητικές τάσεις (τ) προκαλούν μια συνεχή μετακίνηση της μιας επιφάνειας σε σχέση με την άλλη και αν υποθέσουμε ότι η ταχύτητα του ενός στρώματος σχετικά με άλλο είναι ΔV , το ποσοστό της δύναμης γίνεται $\Delta V/y$ τότε οι διατμητικές τάσεις (τ) μπορούν να υπολογιστούν ως,

$$\tau = \mu \frac{\Delta V}{y}$$

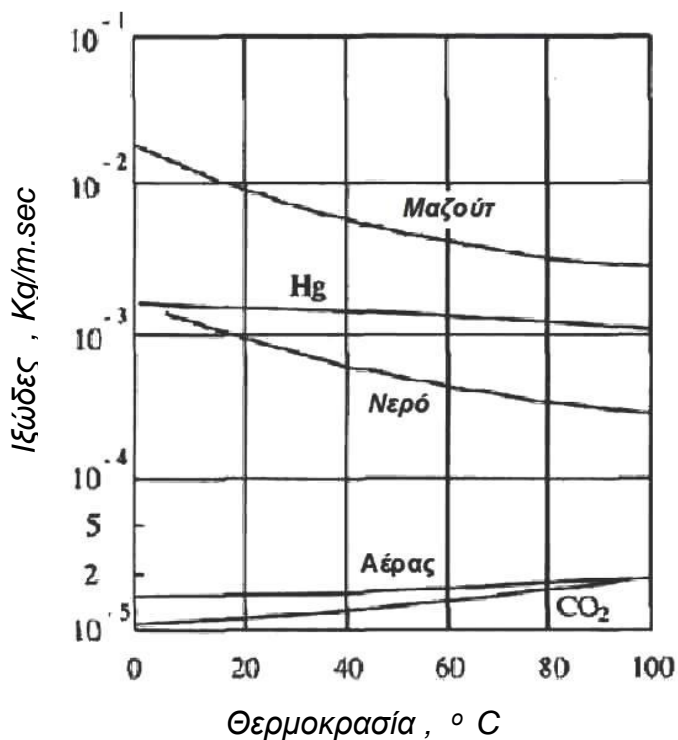
όπου μ είναι ο συντελεστής του δυναμικού ιξώδους και εκφράζεται σε N.sec/m ή kg/m.sec.

Υπάρχουν δύο τύποι ιξωδών: το απόλυτο ιξώδες και το κινηματικό ιξώδες (Πίνακας 2.1). Το απόλυτο ιξώδες είναι η έλξη ή αντίσταση της διάτμησης του αέρα στην κίνηση, που μετριέται σε kg.m/m.sec (ή Pa.sec) ενώ το κινηματικό ιξώδες είναι η αναλογία του απόλυτου ιξώδους στη πυκνότητα μάζας, που μετριέται σε m²/sec.

Πίνακας 2.1 : Δυναμικά και κινητικά ιξώδη για τα ευρείας χρήσεως ρευστά

Όνομα ρευστού	Δυναμικό ιξώδες	Κινηματικό ιξώδες
Αέρας	1.808×10^{-5}	1.501×10^{-5}
Αζωτο	1.760×10^{-5}	1.410×10^{-5}
Οξυγόνο	2.040×10^{-5}	1.430×10^{-5}
Μεθάνιο	1.080×10^{-5}	1520×10^{-5}
Νερό	1.005×10^{-3}	1007×10^{-6}

Επειδή η διατμητική αντίσταση προκύπτει από τη μοριακή κίνηση μέσα στο ρευστό, και η θερμοκρασία είναι ένα μέτρο του βαθμού μοριακής κίνησης, το ιξώδες εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Γενικά, αυξάνεται με τη θερμοκρασία για τα αέρια, ενώ για τα υγρά μειώνεται. (Σχήμα 2.2)

**Σχήμα 2.2** : Μεταβολή του ιξώδους με τη θερμοκρασία για τα διάφορα ρευστά

Υγρασία :

Όταν ένα μικρό ποσοστό ύδατος εισάγεται σε ένα κενό διάστημα, μερικά από τα σωματίδιά του θα εξατμιστούν και θα αναπτύξουν σταδιακά μια ορισμένη πίεση στο διάστημα αυτό. Αυτή η πίεση ονομάζεται πίεση ατμού. Το ποσό υγρασίας σε ένα δεδομένο διάστημα εξαρτάται από τη θερμοκρασία του: όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία, τόσο περισσότερη είναι η υγρασία που μπορεί να κρατήσει.

Όταν υπάρχει αρκετή ποσότητα νερού που να επιτρέπει την ανάπτυξη πίεσης ατμού στο μέγιστο ποσοστό που επιτρέπεται από την θερμοκρασία που επικρατεί, ο χώρος γίνεται κορεσμένος σε ατμό νερού. Εάν το νερό δεν επαρκεί, η πίεση δεν πιάνει την οριακή τιμή της. Ο λόγος της πραγματικής πίεσης ατμού προς την πίεση κορεσμού στην ίδια θερμοκρασία ονομάζεται *σχετική υγρασία (%)*,

$$\varphi = \frac{P_v}{P_{sat}} \text{ εκφρασμένο επι \%}$$

όπου φ είναι η σχετική υγρασία, P είναι η πίεση ατμού, P_{sat} είναι η πίεση κορεσμού και οι δύο πιέσεις σε θερμοκρασία ξηρού αέρα, ενώ η αναλογία της πραγματικής μάζας του υδρατμού που θα μπορούσε να περιληφθεί στον κορεσμό λέγεται υγρασία ποσοστού, ή συγκεκριμένη υγρασία W και μετριέται σε kg/kg,

$$W = 0.622 \frac{P_v}{P_b - P_v} \text{ σε kg/kg ξηρού αέρα}$$

Συνήθεις αλλαγές στην πυκνότητα του αέρα οφείλονται στην μεταβολή της σύνθεσής του, λόγω αύξησης της περιεκτικότητας σε υγρασία (από μηδέν σε 4% της μάζας του μίγματος.) που εμφανίζονται στις ροές αέρα μέσω των αεραγωγών των ορυχείων,

$$W_b = W_a + w_v$$

όπου W_b είναι η πυκνότητα του υγρού αέρα w_a είναι η πυκνότητα του ξηρού αέρα και w_v είναι η πυκνότητα των υδρατμών.

Ο αέρας και οι υδρατμοί έχουν ειδικό βάρος, ασκώντας μεμονωμένη πίεση στην επιφάνεια της γης και αποτελούν τη συνολική ατμοσφαιρική πίεση. Αυτή ποικίλλει με τις διαφορετικές ανυψώσεις επάνω ή κάτω από ένα σταθερό στοιχείο και επηρεάζεται από τις κλιματολογικές αλλαγές της θερμοκρασίας, της υγρασίας,

κ.λ.π. Η συμπεριφορά του μίγματος αέρα-υγρασίας μπορεί να εξηγηθεί καλύτερα από τον Νόμο του Ντάλτον² (Dalton's Law). Επίσης, όταν υπάρχει παρουσία υδρατμών στο περιβάλλον, η πυκνότητα του υγρού αέρα δεν θα είναι η ίδια με την πυκνότητα του ξηρού αέρα στις ίδιες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας.

2.3 Συμπεριφορά του αέρα

Οι νόμοι που ακολουθούν είναι βασισμένοι στο ιδανικό αέριο, είναι ακριβείς για τις περισσότερες συνθήκες και χρησιμοποιούνται για καθημερινούς υπολογισμούς στην μελέτη του δικτύου αερισμού στην υπόγεια εκμετάλλευση.

Διατήρηση της μάζας (ροή αέρα) :

Σε οποιοδήποτε συνεχή αγωγό ή στοά διέλευσης αέρα, οι μαζικές ροές που περνούν μέσω των διατομών κατά μήκος τους είναι ίσες, υπό τον όρο ότι το σύστημα είναι σε σταθερή κατάσταση και δεν υπάρχει καμία εισροή ή εκροή αέρα ή άλλων αερίων μεταξύ αυτών των δύο σημείων. Μια πιο απλουστευμένη έκφραση του νόμου είναι “όσος όγκος αέρα μπαίνει στο ορυχείο τόσοσ όγκος αέρα εξέρχεται από το από αυτό”. Δηλαδή :

Μάζα ροής αέρα στο σημείο 1 = Μάζα ροής αέρα στο σημείο 2 == σταθερό

$$W_1 A V_1 = w_2 A_2 V_2 = \dots = w_i A_i V_i = \text{σταθερό}$$

όπου i είναι τα σημεία 1,2,3 κ.τ.λ., w είναι η πυκνότητα του αέρα, V είναι η ταχύτητα του αέρα και A είναι η διατομή της στοάς που περνά ο αέρας.

Νόμος του Μπόιλ (Boyle's Law) :

Ο όγκος ενός αερίου B είναι αντιστρόφως ανάλογος προς την απόλυτη πίεση P σε σταθερή θερμοκρασία:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

όπου το V είναι ο όγκος σε m^3 και P είναι η πίεση σε $cm.Hg$

² Ο νόμος του Ντάλτον δηλώνει ότι η συνολική πίεση που ασκείται από ένα αεριώδες μίγμα είναι ίση με το ποσό των μερικών πιέσεων των μεμονωμένων αερίων (σελ. 23).

Νόμος του Τσάρλι (Charles' Law):

Σε σταθερή θερμοκρασία, ο όγκος ενός αερίου είναι ανάλογος με την απόλυτη θερμοκρασία:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

όπου V είναι ο όγκος σε m^3 και T η απόλυτη θερμοκρασία σε $^{\circ}R$ ή $^{\circ}K$

Γενικός νόμος των αερίων:

Όταν συνδυαστούν οι παραπάνω σχέσεις μεταξύ τους προκύπτει ο γενικός νόμος για τα αέρια:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad \text{or} \quad PV = RT$$

όπου το R είναι μια σταθερά του αερίου ή το μίγμα αερίων και V είναι ο όγκος που είναι ίσος με $1/w$. Ο νόμος του Αβογκάντρο (Avogadro's law) εκφράζει ότι οι ίσοι όγκοι των ιδανικών αερίων στην ίδια θερμοκρασία και πίεση περιέχουν τον ίδιο αριθμό μορίων. Κατά συνέπεια η σταθερά αερίου R για οποιοδήποτε ιδανικό αέριο μπορεί να υπολογιστεί αν το μοριακό βάρος του είναι γνωστό:

$$R = \frac{8314.36}{M} \frac{J}{kgK}$$

όπου $8314.36 J/K$ είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων. Για τον ξηρό αέρα, το μοριακό βάρος είναι 28.966 , άρα :

$$R = \frac{8314.36}{28.966} = 287.04 \frac{J}{kgK} \text{ σε μονάδες S.I}$$

Νόμος του Ντάλτον (Dalton's Law):

Η συνολική βαρομετρική πίεση P_b που ασκείται από ένα αεριώδες μίγμα είναι ίση με το ποσό των μερικών πιέσεων των μεμονωμένων αερίων (ξηρός αέρας, P_a και υγρασίας, P_v) :

$$P_b = P_a + P_v$$

Άρα η συνολική πίεση σε ένα δοχείο που περιέχει αέρα και υδρατμούς είναι ίση με το άθροισμα της πίεσης των υδρατμών και της πίεσης του αέρα. Δηλαδή :

$$w = \frac{1}{n} = \frac{P}{RT} = \frac{P_a}{R_a T} = \frac{P_a}{287 \times T} \qquad w = \frac{P_v}{R_a T} = \frac{P_{sat}}{461 \times T}$$

Όπου το $R_a=287$ J/Kg, σε βαθμούς °K και είναι η παγκόσμια σταθερά για τον ξηρό αέρα ενώ για τον υγρό αέρα είναι $R_v=461$ J/Kg, σε βαθμούς °K.

Νόμος του Γκράχαμ (Graham's Law) και διάταξη αερίων σε στρώματα :

Τα αέρια που εκπέμπονται στον στάσιμο αέρα χωρίς να υπάρχει ανάμειξη τους (σύμφωνα με την πυκνότητα και το ειδικό τους βάρος) τείνουν να στρωματοποιηθούν. Τα ελαφριά αέρια ή μίγματα δημιουργούν στρώσεις προς την οροφή ενώ τα βαριά προς το πάτωμα.

Το φαινόμενο της διάχυσης, σύμφωνα με τον Νόμο του Γκράχαμ (*Graham's Law*)³, είναι μια πολύ αργή διαδικασία. Ένα αέριο ελαφρύτερο από τον αέρα θα διασκορπιστεί γρηγορότερα από ένα βαρύτερο και όσο μικρότερη είναι η πυκνότητά του, τόσο γρηγορότερη θα είναι η διάχυση (Bakke και Leach, 1962, James και Purdy, 1962 και McPherson, 1993). Υπό αυτές τις συνθήκες το στρώμα αερίου θα έχει μια πολύ συγκεκριμένη κίνηση, η οποία έχει επιπτώσεις στο μίγμα του αέρα (Miclea, 1997, Mutmansky και Wang, 1997). Εντούτοις, τα ρεύματα αέρα του δικτύου αερισμού και τα ρεύματα μεταφοράς που παράγονται από μεταβολές στην θερμοκρασία, προκαλούν μια γρήγορη μηχανική μίξη των αερίων με τον αέρα με αποτέλεσμα να μην χωρίζονται από τον υπόλοιπο μίγμα και να μην στρωματοποιούνται. Όμως τα μίγματα χαμηλών συγκεντρώσεων σε οξυγόνο και τα αέρια υψηλών συγκεντρώσεων σε άζωτο που είναι ελαφρύτερα από τον αέρα συναντιούνται σε διάταξη στρωμάτων στην οροφή, εκεί όπου είναι θερμότερα απ' ό,τι σε χαμηλότερο ύψος που επικρατεί ψυχρότερη κυκλοφορία αέρα.

Αυτή η επικίνδυνη επίδραση της *διάταξης σε στρώματα* έχει παρατηρηθεί στα ορυχεία άνθρακα με το μεθάνιο, το οποίο είναι ένα ελαφρύ και εξαιρετικά εύφλεκτο αέριο. Εάν το ρεύμα αερισμού δεν παράγει τον απαιτούμενο στροβιλισμό, το μεθάνιο παραμένει μέσα στο ορυχείο χωρίς να γίνεται η απαγωγή του και διαμορφώνει ένα μόνιμο στρώμα που κινείται κατά μήκος της οροφής.

³ Ο Νόμος του Γκράχαμ λέει ότι "το ποσοστό διάχυσης ενός αερίου στον αέρα είναι αντιστρόφως ανάλογο προς την τετραγωνική ρίζα της αναλογίας των πυκνοτήτων του αερίου και του αέρα ή προς την τετραγωνική ρίζα της συγκεκριμένης πυκνότητάς του".

Μερικοί από τους παράγοντες που έχουν επιπτώσεις στη μετακίνηση των στρωμάτων είναι α) η κλίση και η τραχύτητα της οροφής, β) η ταχύτητα του ρεύματος αέρα, γ) η θερμοκρασία και δ) η γεωμετρία της στοάς κυκλοφορίας του αέρα. (Hartman, *et al*, 1997 και McPherson, 1993).

2.4 Αέρας σε Υπόγεια έργα

Ο αέρας κατά την κυκλοφορία του μέσα στο ορυχείο χάνει το οξυγόνο του. Αυτό συμβαίνει λόγω : της κατανάλωσης οξυγόνου από τους εργαζομένους, της λειτουργίας μηχανών εσωτερικής καύσεως, των αντιδράσεων οξειδωσης που συμβαίνουν στα ανθρακοφόρα κοιτάσματα αλλά και λόγω των μεταλλευμάτων που είναι επιρρεπή στην οξειδωση. Τα ξύλα τα οποία χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη των υπόγειων εκσκαφών απορροφούν και αυτά μια ορισμένη ποσότητα οξυγόνου .

Αυτό το οξυγόνο αντικαθίσταται κατά μεγάλο ποσοστό από διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) το οποίο προέρχεται από την εκπνοή των εργαζομένων, τα καυσαέρια των μηχανών, τα προϊόντα των αντιδράσεων οξειδωσης αλλά και από την σήψη των ξύλων. Επίσης σημαντικές ποσότητες μονοξειδίου (CO) και διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) δημιουργούνται από προϊόντα αποσυνθέσεως των εκρηκτικών υλών καθώς και από πυρκαγιές και εκρήξεις μέσα στο ορυχείο. Όλοι αυτοί οι ρυπογόνοι και μολυσματικοί παράγοντες “παρασύρονται” από τον αέρα κατά την κυκλοφορία του μέσα στην υπόγεια εκμετάλλευση. (Σχήμα 2.3)

Στα ορυχεία, η κύρια μέθοδος ελέγχου ρυπαντικών παραγόντων γίνεται από το σύστημα αερισμού.



Σχήμα 2.3 : Ο αέρας “παρασύρει” μολυσματικούς παράγοντες κατά την κυκλοφορία του υπόγεια.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν το εργασιακό περιβάλλον στις υπόγειες εκμεταλλεύσεις είναι : τα αέρια του ορυχείου, η σκόνη, τα καυσαέρια, η ακτινοβολία θερμότητας, οι θόρυβοι, η ομίχλη κ.τ.λ. (Vutukuri και Lama, 1986). Τα πιο επικίνδυνα αέρια είναι το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το μεθάνιο (?) και το ραδόνιο (?) επειδή ανιχνεύονται δύσκολα γιατί είναι άχρωμα, άγευστα και άοσμα. Το κλίμα του ορυχείου υπόγεια περιλαμβάνει κυρίως τον έλεγχο της θερμοκρασίας, της υγρασίας, και της ταχύτητας αέρα.

Πολλά ανεπιθύμητα αποτελέσματα εμφανίζονται άμεσα ή έμμεσα είτε στην υπερβολικά υψηλή θερμοκρασία και υγρασία ή σε κρύα περιβάλλοντα εργασίας εξαιτίας της αδυναμίας ενός εργάτη να παράγει στον κανονικό βαθμό του σε πολύ ζεστό, υγρό, ή κρύο περιβάλλον – η παραγωγικότητα μειώνεται. Επίσης οι εργαζόμενοι φέρουν ευθύνη για την αύξηση των ατυχημάτων στους χώρους εργασίας λόγω έλλειψης προσοχής και μη τήρησης των κανόνων ασφαλείας. Όλοι αυτοί οι παράγοντες είναι δαπανηροί για την επιχείρηση και επικίνδυνοι για την ζωή των εργαζομένων.

Βιβλιογραφία

Bakke,P. and Leach, S.J. (1962) "Principles of Formation and Dispersion of Methane Roof Layers

and Some Remedial Measures," *The Min. Engr.*, Jul., pp. 645-669. Chasteau, V.A.L. (1982) "Chap. 1: Fundamentals of Fluid Flow," *Environmental Engineering in South African Mines*, Burrows, J., et al., ed., The Mine Ventilation Soc. of South Africa, pp.1-27.

Fairley, W. (1894) *Mine Ventilation Made Easy*, The Colliery Engr. Co., Scranton, PA, 110 pp. Forbes, J.J. and Grove, G.W. (1954) "Mine Gases and Methods for Detecting Them," *Miners¹*

Circular 33, V\$BM, pp. 2-18. Hartman,H.L.,e/a/.,(1997) "Chap. 2: Properties and Behavior of Air, pp. 12-26; Chap 3: Control of Gases Underground, pp. 29-76," *Mine Ventilation and Air Conditioning*, 3rd, ed., John

Wiley and Sons, Inc. Hemp, R. (1982) "Chap. 18: Psychrometry," *Environmental Engineering in South African Mines*,

Burrows, J., et al., ed., The Mine Ventilation Soc. of South Africa, pp. 435-463.

James, T. E. and Purdy, J. L. (1962) "Experiments with Methane Layers in a Mine Roadway," *The Min, Engr.*, Jun., pp. 561-576.

Kennedy, W.R. (1996) "1: Mine Gases," *Practical Mine Ventilation*, Intertec Publishing, Chicago, Illinois, pp. 3-6.

LeRoiix, W.L. (1972) *Mine Ventilation Notes for Beginners*, The Mine Ventilation Soc. of South Africa, 196 pp.

McPherson, M.J. (1993) "§12.4.2: Methane Layering," *Subsurface Ventilation and Environmental Engineering*, Chapman & Hall, New York, pp. 428-431.

Miclea, P.C. (1997) "Current Issues, Alternative Concepts, And Design Criteria for Subway Ventilation Systems," *Proc. 6th Int'l Mine Vent. Cong.*, Ramani, R.V., ed., SME, Inc., Littleton, CO, pp. 63-69.

Mutmansky, J.M. and Wan, W.H. (1997) "Results of Field Studies on Stratification of Diesel Paniculate Matter in Mine Openings," *Proc. 6th Intl Mine Vent. Cong.*, Ramani, R.V., ed., SME, Inc., Littleton, CO, pp. 155-162.

Rabia, H. (1988) "Chap. 1: Air Flow in Ducts and Roadways," *Mine Environmental Engineering*, Entrac Software, New Castle upon Tyne, England, pp. 1-65.

van der Walt, N.T. (1982) "Chap. 17: Thermometry and Temperature Measurements," *Environmental Engineering in South African Mines*, Burrows, J., et al., ed., Mine Ventilation Soc. of South Africa, pp. 413-433.

VutukLiri, V.S. and Lama, R.D. (1986) "Chap. 3: Mine Gases and Their Control," *Environmental Engineering in Mines*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 87-111.

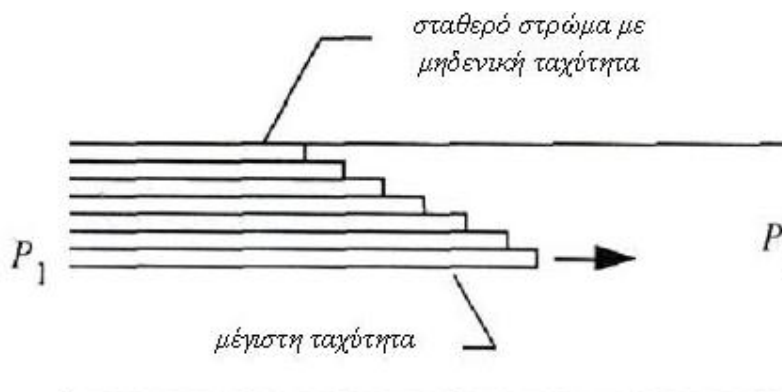
3. Αρχές Ροής Αέρα στα Υπόγεια Έργα

Στον αερισμό υπόγειων εκμεταλλεύσεων εφαρμόζονται οι αρχές που διέπουν τα ρευστά στοιχεία και της θερμοδυναμικής ροής του αέρα. Η μηχανική των ρευστών εξετάζει τη δράση των δυνάμεων ενώ η θερμοδυναμική την επίδραση της θερμότητας και τις ιδιότητες των ουσιών. Και οι δύο είναι απαραίτητες για να καταλάβουμε λεπτομερώς τη συμπεριφορά του αέρα. Ο σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η περιγραφή των θεμελιωδών νόμων της μηχανικής ρευστών και της θερμοδυναμικής και η επεξήγηση των εφαρμογών τους στον αερισμό των υπογείων έργων.

3.1 Ορισμός του Ρευστού

Ρευστό είναι μια ουσία στην οποία τα μόρια της μπορούν να κινηθούν ελεύθερα το ένα σχετικά με το άλλο και παραμορφώνεται συνεχώς όταν υπόκειται σε διάτμηση. Αυτό μπορεί να συμβεί και στη ροή του αέρα εάν ενεργεί επάνω από μια πηγή ενέργειας (παραδείγματος χάριν, πίεση ή θερμότητα) που χρησιμοποιείται από τα μόρια για να υπερνικήσουν τις ελκυστικές δυνάμεις που τα δεσμεύουν μεταξύ τους από κοινού. Αυτό μπορεί να καταστεί σαφές αν υποθέσουμε ότι το ρευστό αποτελείται από στρώματα παράλληλα το ένα με το άλλο και αφήνοντας μια δύναμη να ενεργήσει επάνω σε ένα από τα στρώματα με διεύθυνση παράλληλη στο επίπεδο (Σχήμα 3.1). Αυτή η δύναμη, που υποχρεώνει το στρώμα να διαιρεθεί από τα υπόλοιπα ονομάζεται διατμητική δύναμη και εφόσον εξακολουθεί να εφαρμόζεται και τα υπόλοιπα στρώματα θα κινηθούν ανάλογα με την κίνηση των γειτονικών τους.

Φανταστείτε μια κυκλική διατομή του σωλήνα που περιέχει ένα ρευστό όπως το νερό. Η ροή για να εμφανιστεί χωρίς ολίσθηση, θα πρέπει τα διάφορα στρώματα να κινηθούν με διαφορετικές ταχύτητες. Το ρευστό στρώμα δίπλα στον τοίχο του σωλήνα είναι ουσιαστικά στάσιμο, ενώ τα στρώματα προς τα έξω κινούνται όλο και με μεγαλύτερες ταχύτητες έως ότου να δημιουργηθεί μια μέγιστη ταχύτητα στο κέντρο (Σχήμα 3.1). Επιπλέον, ένα ρευστό είναι ένα συνεχές μέσο χωρίς κενά και οι ιδιότητες του (π.χ. η πυκνότητα) μπορούν να ποικίλουν από μέρος σε μέρος.



Σχήμα 3.1 Ρευστή ροή μέσα από ένα σωλήνα

Στον προαναφερθέντα σωλήνα, εάν τα γειτονικά στρώματα δεν προσφέρουν καμία αντίσταση στη μετακίνηση του ρευστού, τότε το ρευστό ονομάζεται *ρευστό χωρίς τριβή* ή *ιδανικό ρευστό* αν και από πρακτικής απόψεως τα ιδανικά ρευστά δεν υπάρχουν στη φύση. Σε πολλά πρακτικά προβλήματα, η αντίσταση που προκαλείται από τα στρώματα μορίων αέρα είναι είτε πολύ μικρή είτε αμελητέα και επομένως μπορεί να αγνοηθεί.

Εκτός από τη διατμητική δύναμη το ρευστό μπορεί επίσης να υποβληθεί σε *θλιπτικές δυνάμεις*. Αυτές οι δυνάμεις τείνουν να αλλάξουν τον όγκο του ρευστού και στη συνέχεια την πυκνότητά του. Σ' ένα στάσιμο, ασυμπίεστο ρευστό όπου καμία διατμητική δύναμη δεν εφαρμόζεται, η πίεση που ασκείται από μια στήλη ύψους H (m) και με πυκνότητα W (kg/m³) μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο :

$$P = wgH$$

όπου το g είναι η τοπική επιτάχυνση της βαρύτητας σε m/sec²

Εκτός από την πίεση, η ποσότητα αέρα είναι μια άλλη σημαντική μέτρηση που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της απόδοσης ενός συστήματος αερισμού. Οι περισσότερες μετρήσεις της ροής αέρος είναι βασισμένες στον *όγκο ροής*, ο οποίος εκφράζει το ποσό αέρα (m³) που περνά μέσω μιας δεδομένης διατομής ενός αεραγωγού σ' ένα δεδομένο χρονικό διάστημα (sec).

Η μάζα ροής M εκφράζει την μάζα αέρα (kg) που περνά μέσω μιας συγκεκριμένης διατομής σ' ένα λεπτό (kg/sec).

$$w = \frac{\text{μάζα}}{\text{όγκος}} = \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \frac{\text{μάζα ροής}}{\text{όγκος ροής}} = \frac{M}{Q} = \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \left(= \frac{\text{kg}}{\text{sec}} \frac{\text{sec}}{\text{m}^3} \right) \Rightarrow$$

$$M = Qw = \frac{\text{kg}}{\text{sec}} \quad \left(= \frac{\text{m}^3}{\text{sec}} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

για σταθερή πυκνότητα αέρα ισχύει ότι $Q = VA$, όπου V είναι η ταχύτητα του αέρα σε m/sec.

$$M = Qw = VAw \quad \frac{\text{kg}}{\text{sec}}$$

Σύμφωνα με την Αρχή Διατήρησης της Μάζας, η ροή μάζας (M) που περνά μέσα από όλες τις διατομές κατά μήκος πρέπει να παραμείνει σταθερή σε οποιοδήποτε συνεχή αεραγωγό εφόσον δεν υπάρχει καμία εισροή ή εκροή αέρα ή άλλων αέριων.

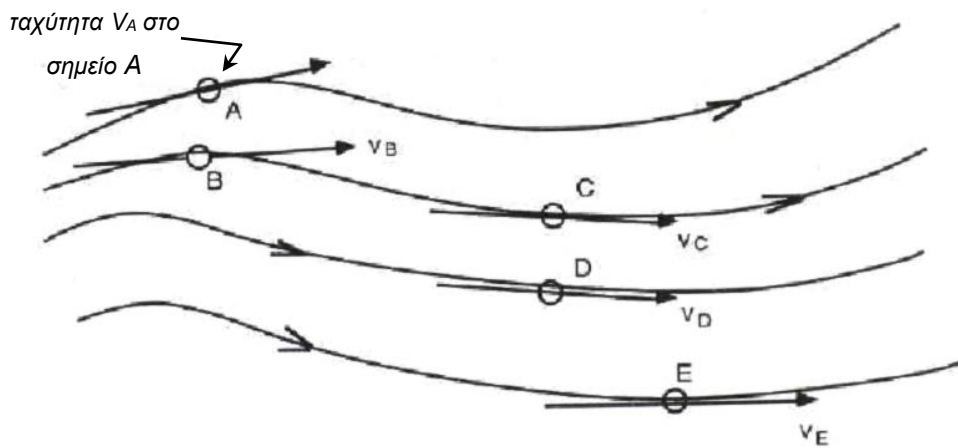
$$M = Q_1w_1 = Q_2w_2 = Q_3w_3 \dots = \text{σταθερό} \quad , \text{ σε kg/sec}$$

Όπου το Q_1, Q_2, Q_3 κ.λπ. είναι όγκος αέρα στις θέσεις 1, 2, 3 κ.λπ. αντίστοιχα και το w_1, w_2, w_3 κ.λπ. είναι οι πυκνότητες αέρα στις θέσεις 1, 2, 3.

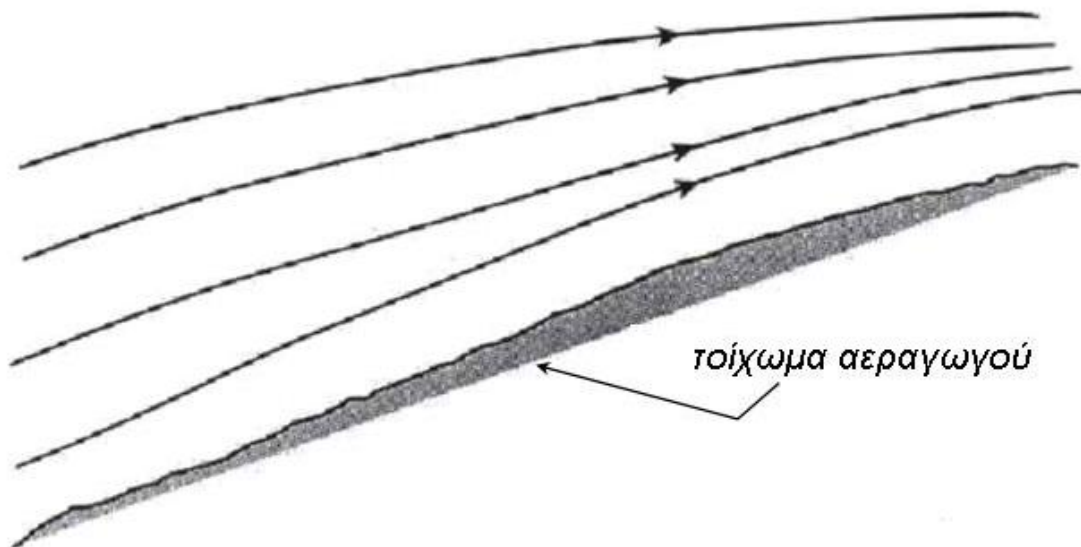
3.2 Τύποι Ροής

Σ' ένα ρευστό που βρίσκεται σε κίνηση κάθε μόριο αλλάζει τη θέση του με μια ορισμένη ταχύτητα. Τα μεγέθη και οι διευθύνσεις των ταχυτήτων όλων των μορίων μπορούν να ποικίλουν με τη θέση καθώς επίσης και με το χρόνο. Ο όρος *γραμμές ροής* χρησιμοποιείται για να περιγράψει αυτήν την ιδιότητα των ρευστών.

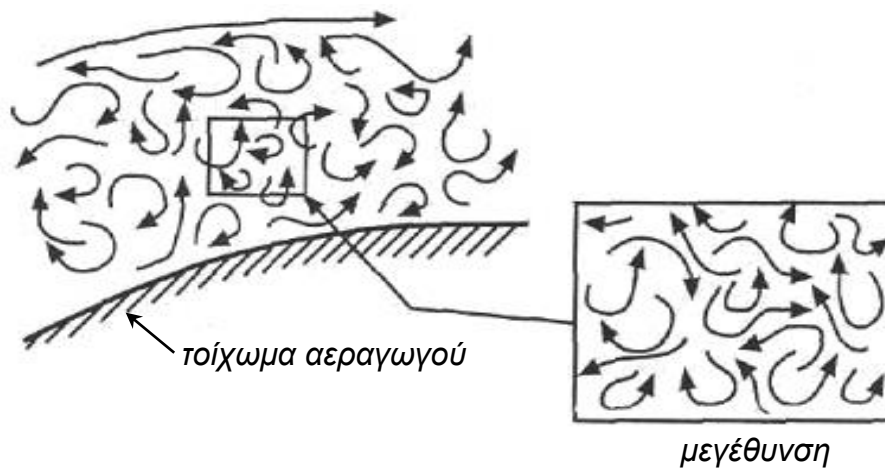
Οι γραμμές ροής είναι ιδεατές γραμμές σ' ένα ρευστό με την ιδιότητα ότι η ταχύτητα του ρευστού εφάπτεται σ' όλα τα σημεία των γραμμών (Σχήμα 3.2) και η απόσταση μεταξύ δύο γραμμών ροής είναι το αντίστροφο μέτρο του μεγέθους της ταχύτητας. Εάν οι γραμμές ροής είναι ομαλές και σχεδόν παράλληλες με τις γειτονικές τους (Σχήμα 3.3), η ροή αυτή είναι γνωστή ως *στρωτή ροή* ή *γραμμική νηματοειδής ροή*. Αν οι γραμμές ροής είναι τυχαίες τότε η ροή αυτή ονομάζεται *τυρβώδης ροή* (Σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.2 Η ταχύτητα του ρευστού εφάπτεται τις γραμμές ροής και μας δίνει την κατεύθυνση της ταχύτητας ροής σ' εκείνο το σημείο.



Σχήμα 3.3 Οι γραμμές ροής στην στρωτή ροή



Σχήμα 3.4 Στιγμαία εικόνα των γραμμών ροής στην τυρβώδη ροή

Το 1880 ο Όσμπορν Ρέινολντς (Osborn Reynolds) μετά από εργαστηριακές μελέτες ανακάλυψε ότι ο τύπος της ροής σ' ένα ρευστό εξαρτάται από την ταχύτητα και το ιξώδες του. Εκτελώντας πολλά πειράματα και αναλύσεις διαστάσεων κατάφερε να εκφράσει μαθηματικά αυτήν την σχέση :

$$N_{Re} = \frac{\rho DV}{\mu} = \frac{DV}{\nu}$$

όπου το ρ μαζική πυκνότητα του ρευστού (w/g) σε kg.sec/m⁴, $\nu = \rho/\mu$ που είναι το κινηματικό ιξώδες σε m²/sec, μ είναι το απόλυτο ιξώδες (ρν) σε kg.sec/m², D είναι η διάμετρος του αγωγού σε m και V είναι η ταχύτητα σε m/sec.

Ο αριθμός Ρέινολντς (Reynolds number) (N_{Re}) είναι ένας αδιάστατος αριθμός. Εάν αυτός ο αριθμός είναι μικρότερος από το 2000, οι ιξώδεις δυνάμεις επικρατούν και η ροή χαρακτηρίζεται στρωτή. Το είδος της ροής σ' ένα ρευστό καθορίζεται καλύτερα αν ο αριθμός Ρέινολντς ξεπεράσει το 2000 όπου αρχίζει να εμφανίζεται η τυρβώδης ροή. Επομένως για πρακτικούς λόγους μια ροή χαρακτηρίζεται τυρβώδης όταν ο αριθμός Ρέινολντς είναι μεγαλύτερος του 4000.

Στρωτή ροή – $N_{Re} < 2000$

Τυρβώδης ροή – $N_{Re} > 4000$

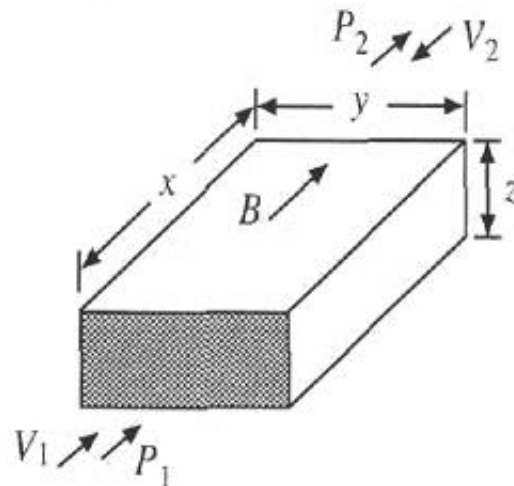
3.3 Εξίσωση του Bernoulli

Ο αερισμός ορυχείου είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα μιας διαδικασίας σταθερής ροής στην οποία καμία από τις μεταβλητές της ροής δεν επηρεάζεται από τον χρόνο. Οι μεταβολές και οι απώλειες στην ενέργεια περιλαμβάνονται σε μια τέτοια διαδικασία. Οι ενεργειακές αλλαγές και οι μαθηματικές εκφράσεις τους είναι βασικές στον υπολογισμό της ποσότητας και της πίεσης αέρα σε μια υπόγεια εκμετάλλευση.

Σύμφωνα με τον Δεύτερο Κανόνα του Νεύτωνα (Newton's Second Law), η δύναμη F που χρησιμοποιείται για να επιταχύνει ένα σώμα πρέπει να είναι ίση με το έργο της μάζας m του σώματος και της επιτάχυνσής της a . Εάν αυτός ο νόμος εφαρμόζεται σ' ένα ιδανικό (χωρίς τριβή) και ασυμπίεστο (σταθερής πυκνότητας)

ρευστό τότε ισχύει και ο Νόμος του Όιλερ (Euler's Law) για την Αρχή Διατήρησης της Ορμής.

Η εικόνα ενός ρευστού που κινείται σταθερά μέσω ενός φανταστικού σταθερού στοιχείου όγκου xyz , διεύθυνσης x (σε εγκάρσια τομή) φαίνεται στο Σχήμα 3.5. Αν οι πιέσεις p_1 και p_2 εφαρμόζονται σε δύο αντικριστές επιφάνειες η επακόλουθη δύναμη που ασκείται στο ρευστό είναι :



Σχήμα 3.5 Επεξήγηση του Νόμου του Euler

$$F = P_1 yz - P_2 yz + Bw xyz$$

όπου B είναι η μάζα του σώματος σε μονάδες βάρους, w είναι η σταθερή πυκνότητα του ρευστού και αν η απόσταση x είναι αμελητέα τότε η επιτάχυνση είναι σταθερή :

$$a = \frac{(V_1 - V_2)}{t}$$

όπου t είναι ο χρόνος που διανύει το ρευστό μέσω της απόστασης x

Δεδομένου ότι η μάζα του ρευστού στοιχείου είναι $M = w xyz$, χρησιμοποιώντας τον Νόμο του Newton $F = m a$ έχουμε :

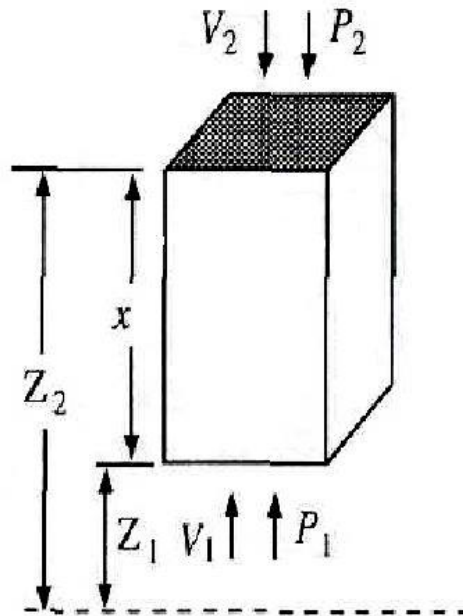
$$P_1 yz - P_2 yz + Bwxyz = wxyz \frac{(V_1 - V_2)}{t} \Rightarrow P_1 yz - P_2 yz + Bwx = wx \frac{(V_1 - V_2)}{t}$$

Η μέση ταχύτητα στην απόσταση x είναι : $\frac{(V_1 - V_2)}{2} = \frac{x}{t}$

Συνοψίζοντας :

$$P_1 - P_2 + Bw = w \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2}$$

Αυτή είναι η εξίσωση του Euler (Euler's Equation) γνωστή και ως Εξίσωση της Ορμής. Αν η διεύθυνση x είναι κάθετη προς τα πάνω όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6 έτσι ώστε τα P_1 & V_1 να βρίσκονται στο ύψος Z_1 και τα P_2 & V_2 στο Z_2 τότε η απόσταση $x = Z_2 - Z_1$.



Σχήμα 3.6 Επεξήγηση του Νόμου του Euler σε κάθετο σώμα

Η δύναμη B ανά μονάδα μάζας οφείλεται τώρα στην βαρύτητα και $B = -g$

$$p_1 - p_2 - gw(Z_1 - Z_2) = w \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} \Rightarrow p_1 + w \frac{V_1^2}{2} + gwZ_1 = p_2 + w \frac{V_2^2}{2} + gwZ_2 \Rightarrow$$

Η εξίσωση στην οποία καταλήγουμε είναι η Εξίσωση του Bernoulli (Bernoulli's Equation) για το ιδανικό ασυμπύεστο ρευστό (Αρχή Διατήρησης της Ορμής).

Εφαρμόζοντας τον Δεύτερο Νόμο της Θερμοδυναμικής⁴ η Εξήσωση του Bernoulli γίνεται :

$$\Rightarrow \frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2$$

Οι πιέσεις p_1 & p_2 είναι οι στατικές πιέσεις σε N/m^2 (Pa) που εφαρμόζονται σ' όλες τις κατευθύνσεις ανεξάρτητα από την κατεύθυνση της ροής. Τα $V_1^2/2g$ & $V_2^2/2g$ είναι η ταχύτητα (δυναμική πίεση H_v) σε m/sec, τα Z_1 & Z_2 είναι η δυναμική πίεση H_z σε m, ρ είναι η πυκνότητα σε kg/m^3 και g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας σε m/sec^2 .

3.4 Αρχές Ροής Αέρα

α. Θερμοδυναμική προσέγγιση

Η θερμοδυναμική εξετάζει την ενέργεια, το έργο, τη θερμότητα και τις αλλαγές στις ιδιότητες των ουσιών δεδομένου ότι είναι επιρρεασμένες από τις αλλαγές στην ενέργεια. Οι ουσίες για τις οποίες ο μηχανικός αερισμού ενδιαφέρεται ιδιαίτερα είναι ο ξηρός αέρας, οι υδρατμοί, το νερό και ο πάγος.

Οι πληροφορίες για αυτές τις ουσίες είναι ζωτικής σημασίας στην ανάλυση και την κατανόηση των φαινομένων ροής αέρα μέσα από φρεάτια με κατερχόμενο ρεύμα αέρος, μέσα από στοές διέλευσης, μέσα από αγωγούς επιστροφής αέρα στην ατμόσφαιρα καθώς επίσης και στη μεταφορά θερμότητας στην υπόγεια ψύξη και στην επίδραση του φυσικού αερισμού στην υπόγεια εκμετάλλευση.

Στην ροή αέρα μέσω των στοών διέλευσης και των φρεατίων εμφανίζονται αξιόλογες αλλαγές στην πυκνότητα, την θερμοκρασία και τη σύνθεση του αέρα. Ο αέρας είναι ένα συμπίεσιμο ρευστό και αρχίζει να εκδηλώνει αυτή του την ιδιότητα σε σχετικά χαμηλές πιέσεις. Δεδομένου ότι ο αέρας κυκλοφορεί προς τα κάτω στο ορυχείο, ο όγκος του θα μειωθεί λόγω της αυξανόμενης πίεσης, με συνέπεια την αύξηση της πυκνότητας και της θερμότητας. Επίσης οι μηχανές εσωτερικής καύσης και η γεωθερμότητα θα μπορούσαν να θερμάνουν τον αέρα.

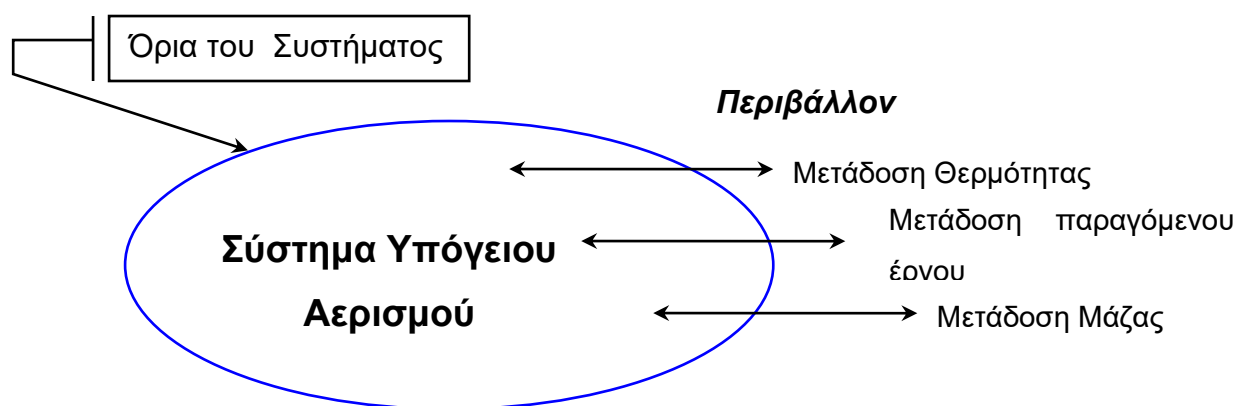
Οι αλλαγές στη σύνθεση του αέρα οφείλονται στις μεταβολή της περιεκτικότητας του σε υγρασία και στους ρύπους που παρασύρει καθώς ταξιδεύει κατά μήκος των στοών.

⁴ Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής εκφράζει την ιδιότητα της ενέργειας να μεταφέρεται από ένα ψυχρό περιβάλλον σ' ένα πιο θερμό.

Τρεις σημαντικές ιδιότητες καθορίζουν την κατάσταση του ρευστού: η πίεση, η θερμοκρασία και ο ειδικός όγκος (το αντίστροφο της πυκνότητας). Όταν οι ιδιότητες αυτές προσδιορίζονται, όλες οι άλλες που έχουν επιπτώσεις στη συμπεριφορά της ροής του αέρα όπως η θερμική ικανότητα, η λανθάνουσα θερμότητα, η εντροπία, το ιξώδες, η θερμική αγωγιμότητα, η εσωτερική ενέργεια και η ενθαλπία μπορούν να καθοριστούν.

Σύστημα Υπόγειου Αερισμού

Ένα υπόγειο σύστημα αερισμού μπορεί να αντιμετωπισθεί ως ένα κλειστό σύστημα όπου η μάζα (αέρας), η θερμότητα, και το παραγόμενο έργο μπορούν να μεταφερθούν μέσα και έξω από τα όρια του συστήματος. (Σχήμα 3.7).



Σχήμα 3.7 Απεικόνιση ενός υπόγειου συστήματος αερισμού

Η θερμότητα και το παραγόμενο έργο είναι οι δύο θεμελιώδεις μορφές από τις οποίες η ενέργεια μπορεί να προστεθεί ή να αφαιρεθεί από το σύστημα.

Η *θερμότητα* είναι η ροή της ενέργειας που πραγματοποιείται ως αποτέλεσμα της διαφοράς θερμοκρασίας και οδηγεί στην αύξηση της εσωτερικής ενέργειας της ουσίας ενώ το *έργο* είναι η μεταφερόμενη ενέργεια, χωρίς τη μετάδοση μάζας, πέρα από τα όρια του συστήματος και προστίθεται στις κατερχόμενες ροές αέρα μέσω των στοών εισαγωγής στο ορυχείο.

Τρεις Θεμελιώδης Νόμοι

Όλα τα φαινόμενα της εφαρμοσμένης μηχανικής μπορούν να περιγραφούν από τους δύο θεμελιώδεις νόμους της θερμοδυναμικής και τον νόμο για την Αρχή Διατήρησης της Μάζας.

1) Πρώτος νόμος της Θερμοδυναμικής

Ο πρώτος νόμος εκφράζει ουσιαστικά την Αρχής Διατήρησης της Ενέργειας και διατυπώνεται ως εξής :

Η ενέργεια μπορεί να μετασχηματιστεί από μια μορφή σε άλλη και μπορεί να αποθηκευτεί στις διάφορες ουσίες, αλλά δεν μπορεί να δημιουργηθεί ή να καταστραφεί.

2) Δεύτερος νόμος της Θερμοδυναμικής

Ο δεύτερος νόμος μπορεί να αναδιατυπωθεί με βάση την Αρχή Διατήρησης της Ορμής και η απλούστερη έκφρασή του είναι η ακόλουθη :

Η ενέργεια μπορεί να μεταφερθεί μόνο από ένα ψυχρό περιβάλλον σ' ένα πιο θερμό.

3) Αρχή Διατήρησης της Μάζας

Σε οποιοδήποτε συνεχή αγωγό ή στοά διέλευσης αέρα, οι μαζικές ροές που περνούν μέσω των διατομών κατά μήκος τους είναι ίσες, υπό τον όρο ότι το σύστημα είναι σε σταθερή κατάσταση και δεν υπάρχει καμία εισροή ή εκροή αέρα ή άλλων αερίων μεταξύ αυτών των δύο σημείων.

Μια πιο απλουστευμένη έκφραση του νόμου είναι “όσος όγκος αέρα μπαίνει στο ορυχείο τόσος όγκος αέρα εξέρχεται από αυτό”.

Δηλαδή :

Μάζα ροής αέρα στο σημείο 1 = Μάζα ροής αέρα στο σημείο 2 = ... = σταθερό

$$W_1 A V_1 = w_2 A_2 V_2 = \dots = w_i A_i V_i = \text{σταθερό}$$

όπου i είναι τα σημεία 1,2,3 κ.τ.λ., w είναι η πυκνότητα του αέρα, V είναι η ταχύτητα του αέρα και A είναι η διατομή της στοάς που περνά ο αέρας.

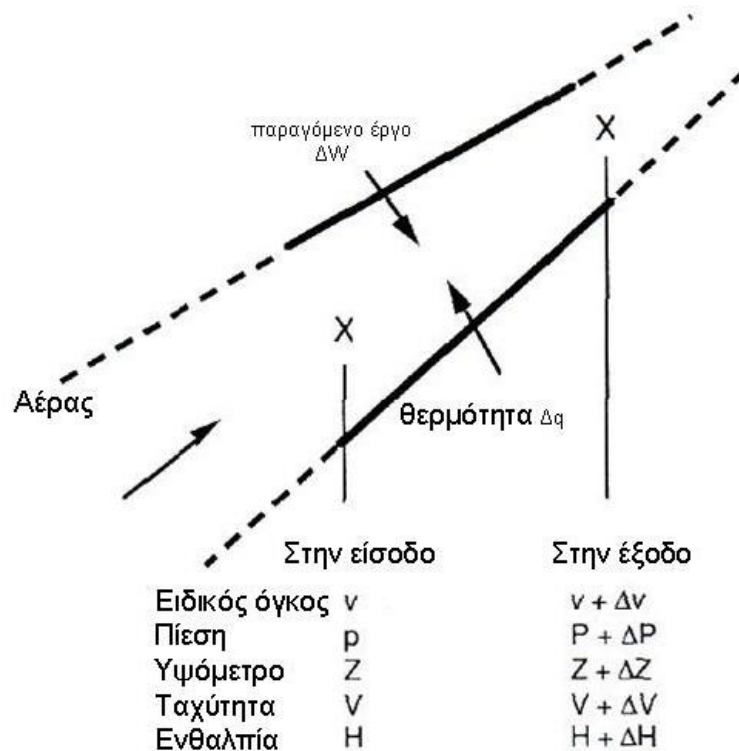
β. Εξισώσεις Ενέργειας

Το ενεργειακό περιεχόμενο οποιουδήποτε υγρού ή αερίου σε ροή περιλαμβάνει τρεις ποσότητες: την ενθαλπία, την κινητική ενέργεια και τη δυναμική ενέργεια. Αναλυτικότερα:

- α) Η *ενθαλπία* (ή συνολική θερμότητα), είναι η ενέργεια ανά μονάδα μάζας του ρευστού ως αποτέλεσμα της τυχαίας κίνησης των ρευστών μορίων και υπολογίζεται σε kg ξηρού αέρα. Δηλαδή περιλαμβάνει τη θερμική ενέργεια που αποθηκεύονται στο ρευστό ως εσωτερική ενέργεια και την ενέργεια λόγω της πίεσης του ρευστού.
- β) Η *κινητική ενέργεια* εκφράζεται σε μονάδες μάζας του ρευστού (J/kg) εξ αιτίας της ταχύτητας V του αέρα.
- γ) *Δυναμική* (βαρυτική) *ενέργεια*, gZ εκφράζεται σε μονάδες μάζας, λόγω του βαρυτικού πεδίου της γης.

Κατά συνέπεια οι τρεις τύποι ενεργειών πρέπει να υπολογιστούν κάθε φορά που καθιερώνεται μια ενεργειακή *ισορροπία* για οποιοδήποτε σύστημα (Σχήμα 3.8):

- 1) Η θερμότητα που εισάγεται μέσω της ανταλλαγής θερμότητας ή μέσω των τοιχωμάτων των σωλήνων
- 2) Το παραγόμενο έργο που εισάγεται μέσω των ανεμιστήρων ή των αντλιών
- 3) Το ενεργειακό περιεχόμενο όλων των ρευστών στην είσοδο του ορυχείου και στην έξοδο από αυτό.



Σχήμα 3.8 Ένας ιδεατός αγωγός που παρουσιάζει τις μεταβλητές H , V και Z .

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση της σταθερής ροής έχουμε:

Εισερχόμενες Ενεργειακές Ποσότητες = Εξερχόμενες Ενεργειακές Ποσότητες

$$dW + dq + (H + gZ + \frac{1}{2} * V^2) = (H + dZ) + g(Z + dZ) + \frac{1}{2} * (V + dV)^2$$

όπου :

dW είναι το παραγόμενο έργο στο σύστημα, dq είναι θερμική ροή, H είναι η εσωτερική ενέργεια και V είναι η ταχύτητα της ροής αέρα.

Χρησιμοποιώντας την Εξίσωση του Bernoulli,

$$p_1 + w \frac{V_1^2}{2} + gwZ_1 = p_2 + w \frac{V_2^2}{2} + gwZ_2$$

την εξωτερική θερμότητα dq και την ενέργεια της τριβής (απώλειες) dF καταλήγουμε στην *Εξίσωση της Ενέργειας* :

$$dW = vdP + dF + gdZ + VdV$$

Η *Εξίσωση Ενέργειας* εφαρμόζεται σ' όλη την υπόγεια εκμετάλλευση μεταξύ του *σημείου 1* που είναι η αρχή της στοάς διέλευσης του αέρα και του *σημείου 2* που είναι το τέλος της στοάς και όλοι οι όροι είναι εκφρασμένοι σε μονάδες μάζας αέρα.

Η *Εξίσωση της Πίεσης* εφαρμόζεται στα ίδια σημεία της υπόγειας εκμετάλλευσης με την *Εξίσωση της Ενέργειας* όπως φαίνεται παρακάτω:

$$p_f = (P_2 + P_1) + p \text{ (πίεση τριβής)} + g \int w dZ + \int w V dV$$

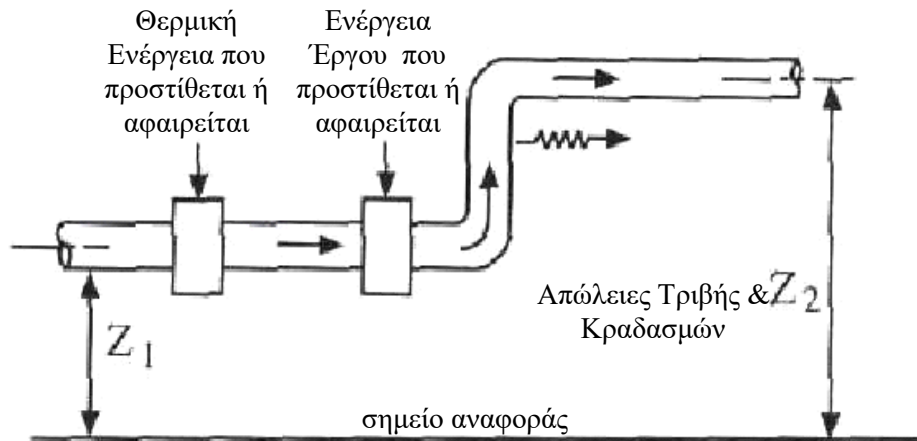
3.5 Απώλειες Πίεσης σε Υπόγεια Έργα

Ο αέρας σε οποιαδήποτε τομή του αεραγωγού διαθέτει ενέργεια λόγω της στατικής πίεσης υπό την οποία υπάρχει, το υψόμετρο του πάνω από κάποιο σημείο αναφοράς δυναμικής ενέργειας, και επιπρόσθετη κινητική ενέργεια εάν βρίσκεται σε κίνηση,

Ολική Ενέργεια = Στατική Ενέργεια + Ενέργεια της Ταχύτητας + Δυναμική Ενέργεια

Ο αέρας επίσης έχει και θερμική ενέργεια αλλά συνήθως αυτή αγνοείται επειδή είναι σχετικά μικρή σε σύγκριση με άλλες μορφές ενέργειας. Η προσθήκη της μηχανικής ενέργειας στον αέρα επίσης αντιμετωπίζεται ξεχωριστά. (Hartman, 1997).

Στις ροές αέρα κατά μήκος των υπόγειων στοών διέλευσης υπάρχουν σταθερές αλλαγές στις ενεργειακές μεταβολές που είτε προστίθενται (θερμότητα που μεταφέρεται στο σύστημα από τους βράχους) είτε εξάγονται από το σύστημα (απώλειες λόγω της τριβής και των κραδασμών) ανάλογα με την κατάσταση (Σχήμα 3.9), είτε αλλάζουν μορφή.



Σχήμα 3.9 Ρευστό σύστημα ροής που επεξηγεί τις ενεργειακές μεταβολές (Hartman, et al, 1997)

Σύμφωνα με τον Πρώτο Νόμο της Θερμοδυναμικής η ενέργεια δεν μπορεί να δημιουργηθεί ή να καταστραφεί, με αποτέλεσμα η συνολική ενέργεια στο σημείο 1 είναι ίση με τη συνολική ενέργεια στο σημείο 2 συν οποιεσδήποτε μεταβολές μεταξύ αυτών των δύο σημείων.

$$\text{Ολική Ενέργεια}_1 = \text{Ολική Ενέργεια}_2 + \text{Ενεργειακές Μεταβολές}_{1-2}$$

Όσον αφορά την πίεση και αγνοώντας τις θερμικές ενεργειακές τιμές η Εξίσωση του Bernoulli ξεκινά διαφορετικά, η συνολική ενέργεια είναι ίση με το ποσό της στατικής πίεσης (H_s), της πίεσης της ταχύτητας (H_v) και τις πιθανές πιέσεις (H_z).

$$\text{Ολική Πίεση} = \text{Στατική Πίεση} + \text{Πίεση της Ταχύτητας} + \text{Δυναμική Ενέργεια}$$

ή

$$H_T = H_s + H_v + H_z$$

Εντούτοις, σε οποιαδήποτε ρευστή ροή, η διαφορά πίεσης μεταξύ δύο σημείων (ΔH) είναι σημαντικότερη από την πίεση (H) δεδομένου ότι το ποσό "διαφοράς" και όχι η απόλυτη πίεση αναγκάζει τον αέρα να ρέει μεταξύ αυτών των σημείων. Με άλλα λόγια, η ροή του αέρα για να υπερνικήσει όλες τις υπόγειες ενεργειακές απώλειες χρειάζεται έναν συνεχής ανεφοδιασμό πίεσης, είτε από τους ανεμιστήρες ($H_{\text{ανεμ.}}$) είτε της πίεσης ως αποτέλεσμα του φυσικού αερισμού (H_N).

$$H_{\text{ανεμ.}} = \Delta H + H_t + H_s + H_v + H_z$$

Στην ροή αέρα μέσω του συστήματος αερισμού έχουμε αλλαγές στην ταχύτητα. Αυτό συμβαίνει από την αλλαγή των περιοχών καθώς ο αέρας κυκλοφορεί μέσα στο σύστημα και από τον αριθμό των στοών διέλευσης που χρησιμοποιεί, με συνέπεια τη μεταβολή της πίεσης της ταχύτητας.

Οι ενεργειακές απώλειες (H_L) στην υπόγεια εκμετάλλευση μπορεί να χωριστούν σε δύο τύπους: α) στις απώλειες τριβών (H_f), β) στις απώλειες λόγω των κραδασμών:

$$H_L = H_f + H_x$$

Απώλειες Τριβών

Οι δυνάμεις που προέρχονται από το ιξώδες προκαλούν την αντίσταση της τριβής στον αέρα και προκειμένου να διατηρηθεί μια ρευστή ροή απαιτείται ο συνεχής ανεφοδιασμός ενέργειας. Η μηχανική ενέργεια που απαιτείται για αυτόν τον σκοπό ονομάζεται *απώλεια τριβής*.

Απώλειες Κραδασμών

Όταν έχουμε μια επιβράδυνση του αέρα κοντά στα τοιχώματα λόγω της τριβής σε αυτά συνοδεύεται από μια επιβράδυνση του κύριου σώματος του αέρα και εμφανίζεται ο χωρισμός της ροής και των στροβιλισμών. Η επιβράδυνση της ροής αέρα κυρίως προκαλείται από:

1. στροφές και πτυχές,
2. διαστολή ή συστολή των στοών διέλευσης της ροής αέρα στις περιοχές των διατομών,
3. τοιχώματα παρακάμψεων,
4. εμπόδια,
5. στα σημεία εισόδου ή εξόδου από το σύστημα.

Αυτές οι επιπλέον αυξήσεις της τριβής, λόγω του πρόσθετου διαχωρισμού της ροής και των vortices καταναλώνουν ενέργεια και ονομάζονται *απώλειες κραδασμών*.

3.6 Εξίσωση Atkinson

Στην υπόγεια εκμετάλλευση, το μεγαλύτερο μέρος των ενεργειακών απωλειών προέρχεται από την απώλεια τριβής. Δεδομένου ότι η απώλεια τριβής είναι το αποτέλεσμα της επαφής του αέρα στα τοιχώματα των στοών διέλευσης τα χαρακτηριστικά αυτών έχουν σημαντικό ρόλο στο ποσοστό τριβής που υφίσταται. Η μορφή της ροής αέρος είτε είναι στρωτή, είτε τυρβώδης, θα επηρεάσει επίσης τέτοιες απώλειες.

Απώλειες Πίεσης στην Στρωτή Ροή Αέρα

Η απώλεια πίεσης στην στρωτή ροή προκαλείται από την αντίσταση λόγω του ιξώδους στον αέρα, καθώς δημιουργούνται οι διαμητικές τάσεις όταν περνούν τα παρακείμενα στρώματα του αέρα το ένα πέρα από το άλλο. Τέτοιες απώλειες σε κυκλικές στοές μπορούν να υπολογιστούν με τη χρήση του παρακάτω τύπου (Bunt 1960, Chasteau 1982, Hartman 1997, McPherson 1993) :

$$H = \frac{32\mu LV}{D^2}$$

όπου το H είναι το πιεσομετρικό ύψος σε m, το μ είναι το απόλυτο ιξώδες σε kg.sec/m², το L είναι το μήκος της στοάς διέλευσης του αέρα σε m, το V είναι η ταχύτητα του αέρα σε m/sec και το D είναι η διάμετρος της στοάς σε m.

Απώλειες Πίεσης στην Τυρβώδη Ροή

Δεδομένου ότι η υπόγεια ροή του αέρα παραμένει τυρβώδης σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις, οι απώλειες πίεσης καθορίζουν τις απώλειες στην ροή του αέρα. Τέτοιες απώλειες στην τυρβώδη ροή σε κυκλική στοά υπολογίζονται από την εξίσωση των Darcy – Weisbach:

$$H = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

όπου το f είναι συντελεστής τριβής ο οποίος καθορίζεται πειραματικά. Σε κάθε περίπτωση η εξίσωση Atkinson είναι η εξής:

$$R = \frac{KP(L+L_e)}{A^3}$$

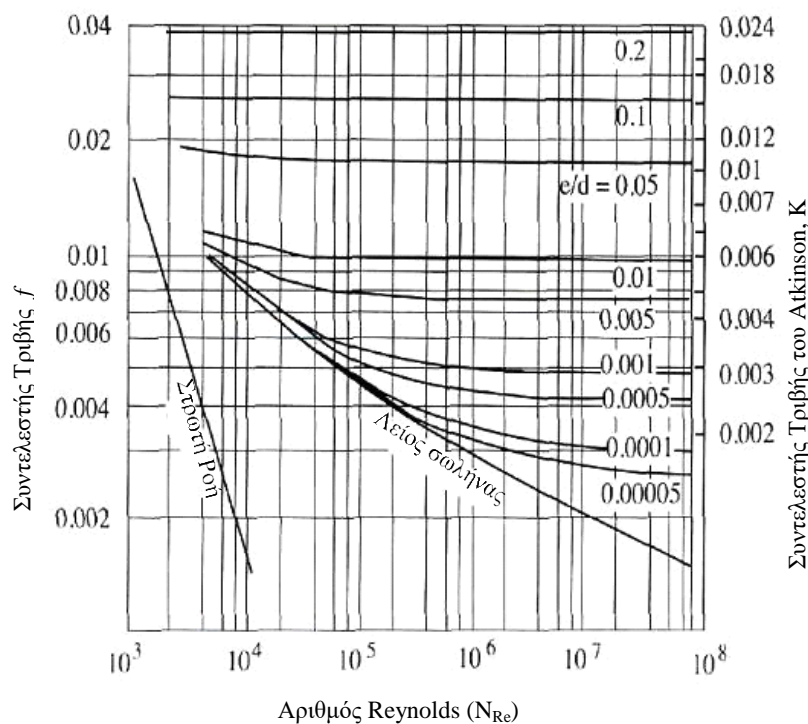
Όπου: R η αντίσταση ροής, K ο συντελεστής τριβής, L το μήκος του αγωγού, L_e το ισοδύναμο μήκος (υπολογίζεται εμπειρικά και αποδίδει τις απώλειες λόγω του σχήματος του αγωγού) και A είναι το εμβαδό της διατομής του αγωγού.

3.7 Συντελεστής K και οι Προσδιορισμός του

Ο συντελεστής K στην υπόγεια εκμετάλλευση αντιστοιχεί στο συντελεστή της τριβής για το γενικό ρευστό:

$$K = 8,094 \cdot 10^{-8}$$

και συνήθως μετριέται σε $\text{kg} \cdot \text{min}^2 / \text{m}^4$. Ο συντελεστής K είναι συνάρτηση του συντελεστή τριβής f η τιμή του οποίου εξαρτάται από την τραχύτητα των στοών διέλευσης ή των σωλήνων και του αριθμού Reynolds. Στο Σχήμα 3.10 παρουσιάζονται πειραματικά τα αποτελέσματα όπως τα διατύπωσε ο Nikuradse, ο οποίος χρησιμοποίησε σωλήνες που τραχύνθηκαν τεχνητά για να πραγματοποιήσει τις μετρήσεις του. Η γραφική παράσταση παρουσιάζει τη σχέση του συντελεστή τριβής f και του αριθμού Reynolds για διαφορετικές τιμές τραχύτητας των σωλήνων.



Σχήμα 3.10: Ο συντελεστής τριβής f είναι λειτουργία της τραχύτητας των στοών διέλευσης και είναι σταθερός όταν ο $N_{Re} > 10^5$.

Οι τιμές του K συνήθως εκφράζονται μέσα από πίνακες με βασικές τιμές για την πυκνότητα του αέρα. Οι συντελεστές τριβής στον *Πίνακα 3.1* βασίστηκαν στις εξαντλητικές δοκιμές από μια κλασσική μελέτη του Ειδικού Γραφείου Υπόγειων Εκμεταλλεύσεων (Bureau of Mines, McElroy 1935). Οι τιμές του K έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί ως δείκτες, για να κρίνουν την κατάσταση των στοών (όσο υψηλότερο είναι το K , τόσο υψηλότερη είναι η αντίσταση στις στοές) για τον προγραμματισμό του δικτύου αερισμού.

Πίνακας 3.1 Συντελεστές τριβής για αεραγωγούς και εισαγωγές αέρα.

Τιμές του $K \cdot 10^{10}$

		Κάθετος			Κυματοειδής ή Καμπυλοειδής								
		Καθαρός	Μικρής δυσκολίας	Μέτριας δυσκολίας	Μικρός			Μέτριος			Μεγάλης Βαθμίδας		
					Καθαρός	Μικρής δυσκολίας	Μέτριας δυσκολίας	Καθαρός	Μικρής δυσκολίας	Μέτριας δυσκολίας	Καθαρός	Μικρής δυσκολίας	Μέτριας δυσκολίας
Λείας γραμμής	Ελαχ	10	15	25	20	25	35	25	30	40	35	40	50
	Μεσ.	15	20	30	25	30	40	30	35	45	40	45	55
	Μέγ.	20	25	35	30	35	45	35	40	50	45	50	60
Ξύλινο (5m)	Ελαχ	30	35	45	40	45	55	45	50	60	55	60	70
	Ελαχ	55	60	70	65	70	80	70	75	85	80	85	95
	Μεσ.	70	75	85	80	85	95	85	95	100	95	100	110
Φλεβίτης	Μέγ.	80	85	95	90	95	105	95	100	110	105	110	120
	Ελαχ	95	100	110	105	110	120	110	115	125	120	125	135
	Ελαχ	105	110	120	115	120	130	120	125	135	130	135	145
	Μεσ.	90	95	105	100	105	115	105	110	120	115	120	130
	Μέγ.	145	150	160	155	160	165	160	165	175	170	175	195
	Ελαχ	195	200	210	205	210	220	210	215	225	220	225	235

Προσδιορισμός του Συντελεστή K

Ο μόνος ακριβής τρόπος προσδιορισμού του συντελεστή K για μια στοά διέλευσης, είναι να υπολογιστεί με την χρήση της εξίσωσης του Atkinson από την πραγματική πτώση πίεσης και την ποσότητα του αέρα που μετριέται υπόγεια. Οι *πίνακες 3.2* και *3.3* αναφέρονται σε παράγοντες τριβής οι οποίοι είναι βασισμένοι σε μελέτες που πραγματοποιήθηκαν στις Ηνωμένες Πολιτείες και στη Μεγάλη Βρετανία. Οι *πίνακες 3.4* και *3.5* είναι αποτελέσματα από ορυχεία άνθρακα στην Αυστραλία.

Ο McElroy δημιούργησε τον *πίνακα 3.1* σχεδόν πριν από σχεδόν 50 χρόνια, όμως εξακολουθεί να είναι ο πιο ευρύτατα χρησιμοποιημένος πίνακας για τον προσδιορισμό του συντελεστή K στον προγραμματισμό του δικτύου αερισμού.

Τύπος Στοάς	Κάθετος			Καμπυλοειδής		
	Καθαρός	Μικρής δυσκολίας	Μέτριας δυσκολίας	Καθαρός	Μικρής δυσκολίας	Μέτριας δυσκολίας
Smooth Lined	25	28	34	31	30	43
Unlined (Bolted)	43	49	61	62	68	74
Ξύλινη	67	75	82	85	87	90

Πίνακας 3.2 Συντελεστής τριβής $K \cdot 10^{10}$ για noncoal mine airways και εισαγωγές αέρα.

	<i>Τιμές του K</i>
ΦΡΕΑΡ	
Λείο, από σκυρόδεμα, χωρίς εμπόδια	16
Από τούβλο, χωρίς εμπόδια	20
Λείο, από σκυρόδεμα, με σχοινιά οδηγούς και χαλύβδινη ορθογώνια επένδυση από σωλήνες	34
Από τούβλο, με σχοινιά οδηγούς και χαλύβδινη ορθογώνια επένδυση από σωλήνες	39
Από υδατοστεγή χυτοσίδηρο, χωρίς πλαίσια στήριξης και οδηγούς	73
Από υδατοστεγή χυτοσίδηρο, χωρίς περτσίνια	88
Από τούβλο, με δυο σειρές περτσίνια, χωρίς δεσίματα	93
Brick-lined, με δυο σειρές περτσίνια, Ένα δέσιμο ανά σειρά	117
Από ξύλο, με μια σειρά περτσίνια στη μέση	117
ΣΙΔΕΡΕΝΙΑ ΤΟΞΟΕΙΔΗΣ ΣΤΟΑ ΠΡΟΣΠΕΛΑΣΗΣ	
Λεία και από μπετόν σε όλο το μήκος της	20
Στρώσεις μπετόν ή ξύλινη υποστήριξη	39
Στρώσεις μπετόν ή ξύλινη υποστήριξη	49
Lagged behind arches, good condition	64
Rough conditions with irregular roof, sides and floor	83
ΟΡΘΟΓΩΝΙΑ ΣΤΟΑ ΠΡΟΣΠΕΛΑΣΗΣ	
Λεία, από σκυρόδεμα	<i>Τιμές του K</i> 20
Στηρίζεις στα τούβλα ή στους τοίχους από μπετόν	49
Unlined airways with uniform sides	64
Unlined airways irregular conditions	83
<u>Girders or bars on timber props</u>	<u>98</u>

Πίνακας 3.3 Τιμές του K για κυκλικές στοές διέλευσης αέρα. (NCB, 1979)

Στοές Αερισμού και Εξοπλισμός	$*10^{-4} N_s^2/m^4$	$*10^{-4} Kg.min/m^4$
Μπετόν, unobstructed	30	16
Από τούβλο, unobstructed	35	19
Μπετόν, με σχοινιά οδηγούς	65 ~ 600	35 ~ 324
Από υδατοστεγή χυτοσίδηρο	140	76
Μπετόν, σιδερένιους οδηγούς και επένδυση	75 ~ 600	40 ~ 342
Από ξύλο, ορθογώνια	450 ~ 900	243 ~ 486
	180 ~ 200	97 ~ 108
	50	27

Πίνακας 3.4 Τιμές του K για στοές αερισμού (Australasian Inst. Min. & Metall. 1993)

Τύπος Μεταφοράς Υλικών και Υποστήριξης	$*10^{-4} N_s^2/m^4$	$*10^{-4} Kg.min/m^4$
Μεταφορά ακατέργαστων υλικών	80 ~ 120	43 ~ 65
Ιμάντας μεταφοράς	230	124
Gunnited μεταφορά	95	51
Raw stone combined belt & track	180	97
	150 ~ 220	81 ~ 119
	50	27

Πίνακας 3.5 Τιμές του K για στοές διέλευσης αέρα (Australasian Inst. Min. & Metall. 1993)

Συντελεστής K για σωλήνες αερισμού

Οι παράγοντες τριβής για διαφορετικούς τύπους σωλήνων ή σωληνώσεων του δικτύου αερισμού ποικίλλουν ανάλογα με το υλικό και την κατάσταση τους. Οι συντελεστές του πίνακα 3.6 βασίζονται στον τύπο $w = 0.075 \text{ Kg/m}^3$ και είναι αποδεκτοί για τους περισσότερους υπολογισμούς.

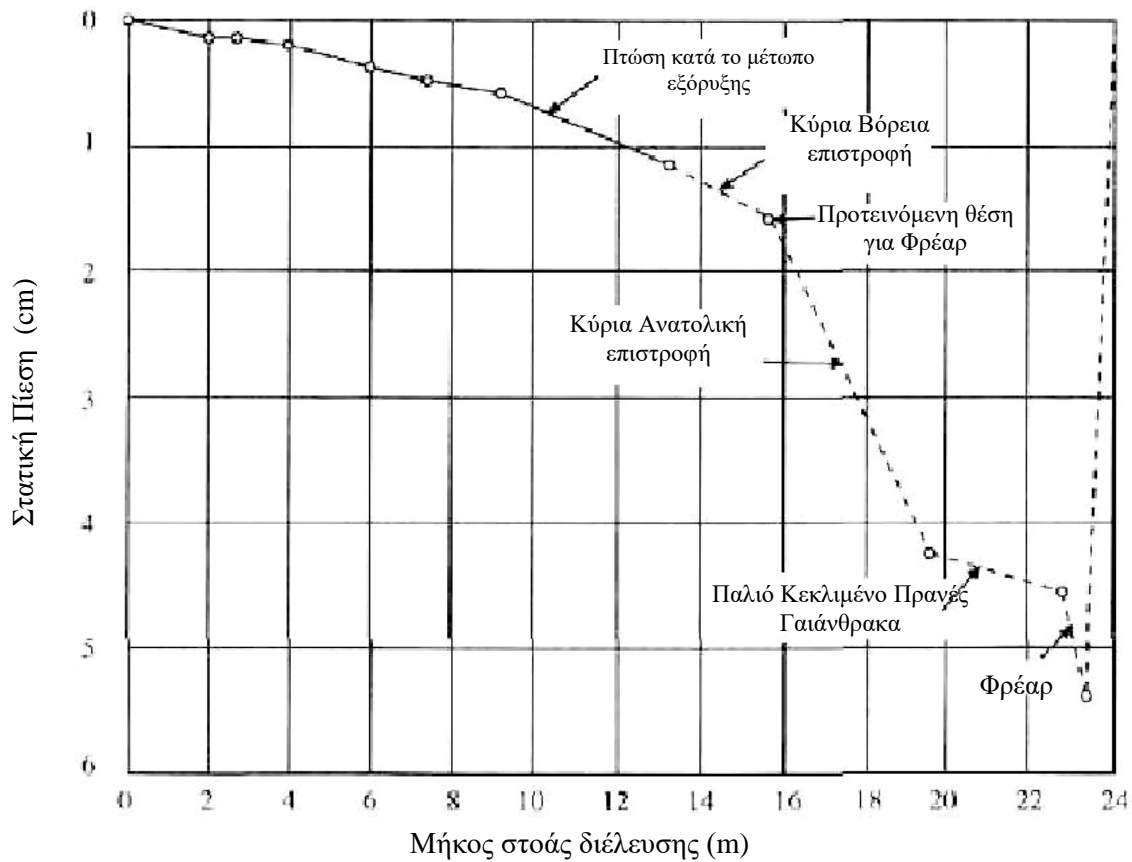
Σωλήνες ή σύστημα Σωληνώσεων	Συντελεστής Τριβής, $K \cdot 10^{10}$	
	Νέοι, Καλής Κατάστασης	Μέτριοι, Είδη σε χρήση
Σίδηρο, ξύλο, υαλοβάμβακα (άκαμπτος)	15	20
Jute, καμβά, πλαστικό (ελαστικός)	20	25
Σπειροειδή τύπου καμβάς	22.5	27.5

Πίνακας 3.6 Τιμές του K για διαφορετικούς τύπους σωληνώσεων του συστήματος αερισμού

3.8 Βαθμίδα Πίεσης

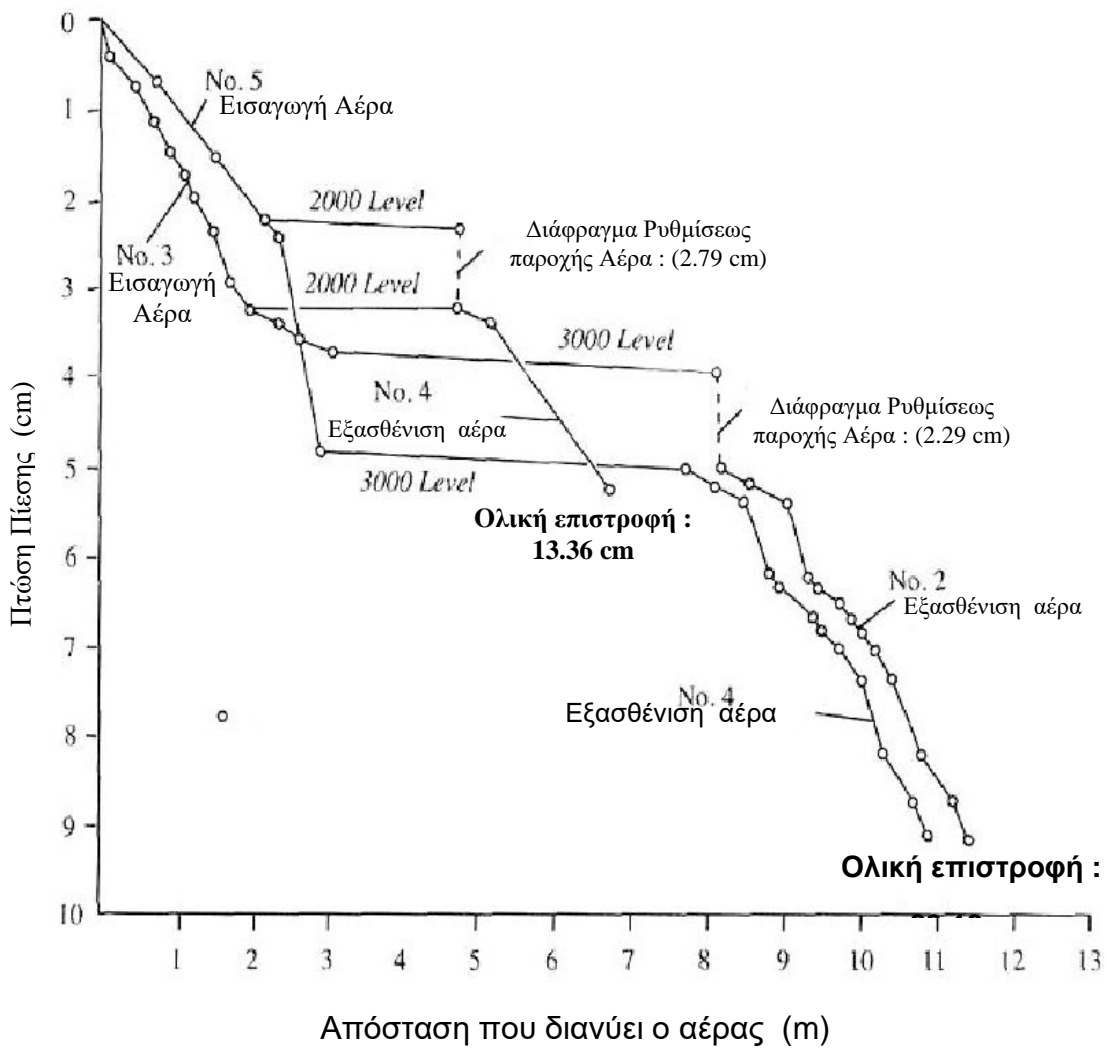
Σύμφωνα με την εξίσωση $H_T = H_s + H_v + H_z$ η συνολική πίεση σ' ένα ρευστό σύστημα είναι ίση με τις απώλειες στατικής πίεσης συν την πίεση της ταχύτητας στην απαλλαγή του αέρα όταν η δυναμική πίεση είναι αμεληταία. Στο Σχήμα 3.11 (Hartman, 1997) εκφράζεται η πίεση για μια ρευστή ροή μεταξύ δύο σημείων (για διαφορετικό υψόμετρο) με την μορφή βαθμίδας.

Στο σημείο 1, η ολική πίεση (H_{t_1}) αποτελείται από την στατική πίεση, την ταχύτητα (H_{v_1}) και το υψόμετρο (H_{z_1}). Καθώς το ρευστό μετακινείται στο σημείο 2 η συνολική πίεσή του αρχίζει να μειώνεται ως αποτέλεσμα της απώλειας H_L (τριβή και κραδασμοί). Δεδομένου ότι η ποσότητα του ρευστού στο σύστημα παραμένει σταθερή, η ταχύτητα της πίεσης απεικονίζει το ποσό της πραγματικής ταχύτητας του αέρα ως αποτέλεσμα της απόκλισης στην περιοχή: μικρότερη ταχύτητα στο σημείο 1 λόγω μιας μεγάλης περιοχής αγωγών, αλλά αύξησή της στο σημείο 2 καθώς η περιοχή γίνεται μεγαλύτερη.



Σχήμα 3.12 Βαθμίδα πίεσης για τη βασική ροή ρευστού (Kingery, 1960)

Το Σχήμα 3.12 μας δείχνει την βαθμίδα πίεσης για δύο αρχικά κυκλώματα αερισμού από το ορυχείο Margaret J. το οποίο χρησιμοποιεί στο δίκτυο αερισμού του πέντε στοές εισαγωγής αέρα και δυο στοές για την επιστροφή του (Bossard & Associates, 1982). Η βαθμίδα πίεσης (για τα επίπεδα 2000 και 3000 μόνο) προέρχεται από μια πραγματική υπόγεια έρευνα για την πίεση.



Σχήμα 3.12 Βαθμίδα πίεσης για το ορυχείο Margaret J. (Bossard & Associates, 1982)

4. Δίκτυα Υπόγειου Αερισμού

Ανάλογα με τον τύπο κοιτάσματος και τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για την εκμετάλλευσή του, ένα σύστημα υπόγειου αερισμού μπορεί να είναι είτε σε δισδιάστατη είτε σε τρισδιάστατη διαμόρφωση. Κατά τον σχεδιασμό ενός τέτοιου συστήματος θα πρέπει να γίνει η κατάλληλη εκτίμηση ώστε να ελεγχθούν όλοι οι μολυσματικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα του αέρα υπόγεια.

Τρεις είναι οι μεταβλητές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να χαρακτηρίσουν ένα σύστημα υπόγειου αερισμού: η απώλεια πίεσης (H), για ένα δεδομένο σύστημα στοών αερισμού ή σ' όλο το σύστημα, η ποσότητα του αέρα (Q), που ρέει στις στοές ή το σύστημα του αερισμού, και η αντίσταση (R) των στοών που χρησιμοποιεί ο αέρας για να κυκλοφορήσει στα διάφορα επίπεδα της εκμετάλλευσης.

4.1 Πίεση και ποσότητα

Η εξίσωση του Άτκινσον (Atkinson's equation) χρησιμοποιείται για να υπολογίσουμε την απώλεια πίεσης σε μια δεδομένη στοά διέλευσης αέρα (αν γνωρίζουμε τα φυσικά χαρακτηριστικά της στοάς K , P , L , και A) και το ποσό αέρα που ρέει μέσα σ' αυτήν. Η απώλεια της πίεσης στην στοά (από τις σταθερές K , P , L , και A) θα πρέπει να μεταβάλλεται ανάλογα με το τετράγωνο της ποσότητας αέρα (Q) που ρέει στην στοά:

H_L ανάλογο του Q^2

Δεδομένου ότι η στατική πίεση ενός συστήματος είναι το ποσό της σειράς των μεμονωμένων απωλειών πίεσης του συστήματος:

H_s ανάλογο του Q^2

Επίσης, για ένα δεδομένο σύστημα στοών διέλευσης ή για ένα σύστημα αερισμού $H_L = w \left(\frac{V}{1098} \right)^2$ και $Q = V \cdot A$:

H_v ανάλογο του Q^2

Η συνολική πίεση ενός συστήματος είναι το ποσό του ορίου της στατικής πίεσης και της ταχύτητας του, $H_t = H_s + H_v$ άρα :

H_t ανάλογο του Q^2

Επομένως, οποιαδήποτε πίεση στο ορυχείο ή η απώλεια πίεσης σε μια στοά διέλευσης ή σ' ένα σύστημα αερισμού μεταβάλλεται ανάλογα με το τετράγωνο της ποσότητας που ρέει στην στοά.

4.2 Χαρακτηριστική Καμπύλη Υπόγειου Έργου

Σύμφωνα με την σχέση H_t ανάλογο του Q^2 , η απώλεια πίεσης σε μία στοά ή ένα σύστημα αερισμού είναι ανάλογη με την ποσότητα του αέρα που κυκλοφόρησε στην στοά υψωμένη στο τετράγωνο. Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να διατυπωθεί διαφορετικά προσθέτοντας μια σταθερά αναλογικότητας (R).

$$H_t = R \cdot Q^2$$

Όπου R είναι η αντίσταση σε μια στοά διέλευσης αέρα ή στο σύστημα αερισμού και μετράτε σε $cm \cdot min^2/m^6$. Συγκρίνοντας με την εξίσωση

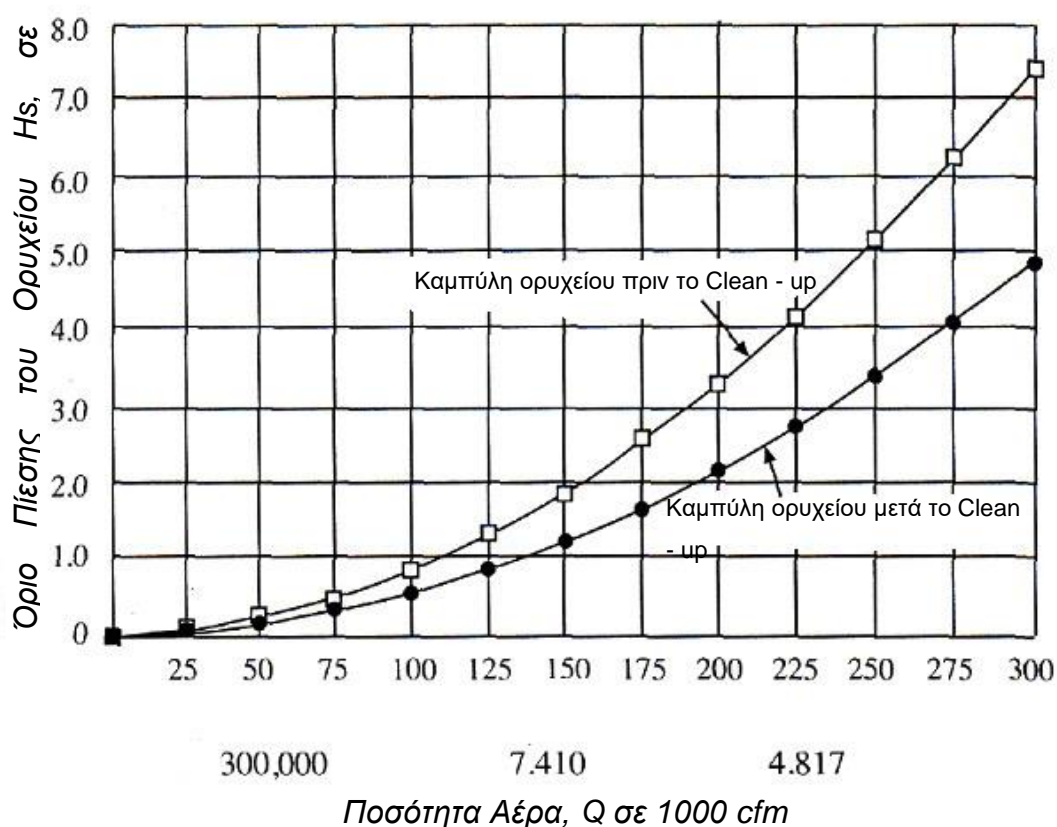
$H_L = \frac{K}{5.2} \frac{OLV^2}{A}$ από την εξίσωση του Άτκινσον η σταθερά R είναι ο συνδυασμός όλων των χαρακτηριστικών K, P, L, και A για μια δεδομένη στοά διέλευσης.

$$K = \frac{KO(L + L_e)}{5.2A^3} \text{ cm} \cdot \text{min}^2/m^6$$

Οι ανωτέρω εξισώσεις μπορούν να εφαρμοστούν σε μια ενιαία στοά, σ' ένα τμήμα του συστήματος είτε σ' ολόκληρο το σύστημα μια.

Εάν παραστήσουμε γραφικά το όριο πίεσης του ορυχείου και την ποσότητα του αέρα που κυκλοφόρησε στο ορυχείο, το αποτέλεσμα είναι μια καμπύλη η οποία είναι συγκεκριμένη για το σύστημα αερισμού και ονομάζεται *χαρακτηριστική καμπύλη ορυχείου* (σχήμα 4.1). Αυτό όμως ισχύει μόνο για ένα ενιαίο σύστημα ανεμιστήρων (Wang, 1988 - 1984 & 1992, Lin & Wang, 1993).

Η καμπύλη ορυχείου είναι μοναδική για κάθε ορυχείο και η κλίση της εξαρτάται από την κατάσταση του ορυχείου⁵, δηλαδή όσο πιο “καθαρό” είναι το ορυχείο τόσο λιγότερο απότομη είναι η καμπύλη. Το κρημνώδες (η απότομη κλίση) της καμπύλης του ορυχείου μπορεί να βελτιωθεί μέσα από τον καλύτερο σχεδιασμό του συστήματος αερισμού του και μέσω ενός καλού προγράμματος συντήρησης (σχήμα 4.1). Για το ίδιο ορυχείο, μια καμπύλη με λιγότερο απότομη κλίση μπορεί να ισχύει για το ίδιο ποσό αέρα με λιγότερο όριο πίεσης ή για ένα δεδομένο όριο θα επιτρέψει στο ορυχείο για να παρέχει περισσότερη ποσότητα αέρα.



Σχήμα 4.1 Χαρακτηριστικές καμπύλες ορυχείου

Υπάρχουν σημαντικές ομοιότητες μεταξύ της εξίσωσης του Ατκινσον ($H = R \cdot Q^2$) και του Νόμου του Ομ (Ohm's Law), ($E = I \cdot R$, όπου E είναι η τάση του ρεύματος σε βολτ, I είναι η ένταση σε αμπέρ και R είναι η αντίσταση σε W) όπου η απώλεια πίεσης στις στοές του ορυχείου είναι ανάλογη με την

⁵ Με την έννοια των εμποδίων στην ροή του αέρα

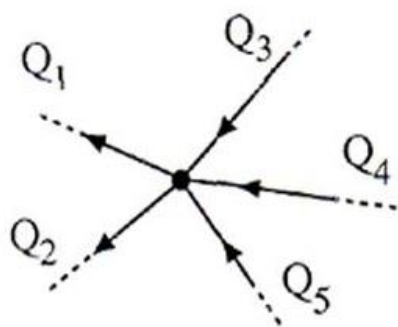
διαφορά δυναμικού, η ποσότητα αέρα με την ένταση του ρεύματος και η αντίσταση του αέρα με την ηλεκτρική αντίσταση. Η διαφορά μεταξύ των δύο εξισώσεων είναι ότι η μία ($H = R \cdot Q^2$) είναι τετραγωνική σχέση ενώ η άλλη ($E = I \cdot R$) είναι γραμμική.

4.3 Νόμος του Kirchhoff

Ο Gustav Kirchhoff (1824 – 1887) παρατήρησε τις θεμελιώδεις σχέσεις που διέπουν τη συμπεριφορά του ηλεκτρικού ρεύματος σ' ένα ηλεκτρικό δίκτυο και είναι γνωστές ως Νόμοι του Κίρχοφ (Kirchhoff's Laws).

Πρώτος Νόμος του Κίρχοφ

Ο πρώτος Νόμος του Κίρχοφ εκφράζει ότι: η ποσότητα αέρα που εξέρχεται από μια διακλάδωση πρέπει να είναι ίση με την ποσότητα αέρα που εισέρχεται στη διακλάδωση. Διακλάδωση ορίζεται το σημείο όπου συναντιούνται τρεις ή περισσότερες στοές διέλευσης αέρα. Η μαθηματική έκφραση του Νόμου διατυπώνεται ως εξής: το σύνολο των ποσοτήτων αέρα που εισέρχονται σε μια διακλάδωση πρέπει να είναι ίσο με μηδέν, όπου η ποσότητα του εισερχόμενου αέρα σε μια διακλάδωση θεωρείται ως αρνητική ποσότητα εξερχόμενου αέρα (Σχήμα 4.2)



$$Q_3 + Q_4 + Q_5 = Q_1 + Q_2$$

$$Q_3 + Q_4 + Q_5 - Q_1 + Q_2 = 0$$

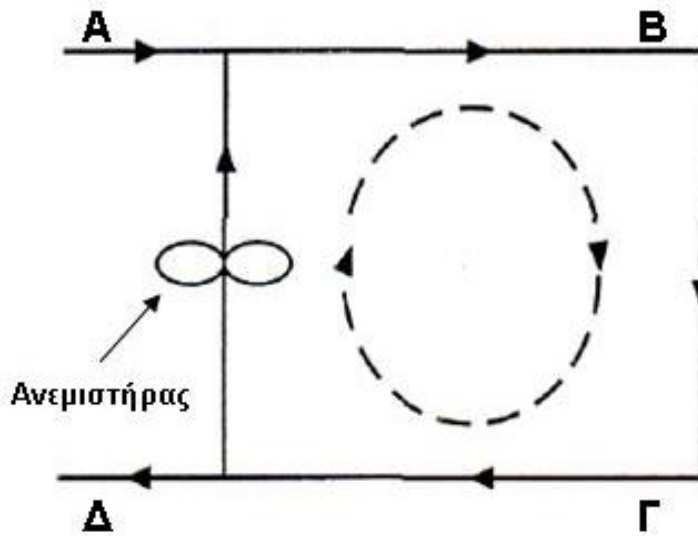
$$\sum Q = 0$$

Σχήμα 4.2 Μια διακλάδωση τεσσάρων στοών διέλευσης αέρα

Δεύτερος Νόμος του Κίρχοφ

Εξετάζοντας όλους τους ανεμιστήρες και άλλες πηγές πίεσης σε μια υπόγεια εκμετάλλευση, το σύνολο των απωλειών της πίεσης γύρω από οποιαδήποτε κλειστή διαδρομή ή βρόγχο σ' ένα σύστημα αερισμού πρέπει να είναι ίσο με μηδέν (Σχήμα 4.3).

$$\sum H_L = 0$$



Σχήμα 4.3 Κλειστός βρόχος με τέσσερις στοές διέλευσης αέρα και έναν ανεμιστήρα.

Εφαρμόζοντας τον Δεύτερο Νόμο του Κίρχοφ στο σχήμα 4.2 με δεξιόστροφη φορά η διέλευση του αέρα μέσα στον βρόγχο έχουμε:

$$\sum H_L = H_{AB} + H_{BG} + H_{GD} - H_{ανεμ.} = 0$$

Η πηγή πίεσης (ανεμιστήρας) θεωρούμε ότι έχει αρνητική τιμή δεδομένου ότι δημιουργεί αύξηση της πίεσης στο δίκτυο (Σχήμα 4.3). Κατά συνέπεια, μια πηγή πίεσης ορίζεται ως *αρνητική* όταν η κατεύθυνση της ροής της είναι ίδια με την κατεύθυνση του αθροίσματος και *θετική* εάν δημιουργεί μια ροή αέρος αντίθετη από την κατεύθυνση του αθροίσματος.

Επειδή η τετραγωνική συνάρτηση θα ισχύει για όλες τις διευθύνσεις τις ροής του αέρα, η εξίσωση του Άτκινσον πρέπει να εκφραστεί ως εξής: $H = R|Q|Q$ ώστε να διατηρήσουμε την ισχύ της σύμβασης του πρόσημου (Novak, 1991). Η παραπάνω εξίσωση για το σχήμα 4.3 μπορεί να γραφτεί διαφορετικά:

$$\sum H_L = R_{AB}|Q_{AB}|Q_{AB} + R_{BG}|Q_{BG}|Q_{BG} + R_{GD}|Q_{GD}|Q_{GD} + R_{DA}|Q_{DA}|Q_{DA} - H_{\text{Ανεμ.}} = 0$$

4.4 Απλά και Σύνθετα Δίκτυα Αερισμού

Απλά Δίκτυα Αερισμού

Ο συνδυασμός των στοών διέλευσης είτε σε σειρά είτε παράλληλα αποτελεί το δίκτυο αερισμού σε μια υπόγεια εκμετάλλευση. Οι στοές αυτές θα μπορούσαν να είναι μια πολλαπλή διάταξη των στοών εισαγωγής και εξαγωγής του αέρα, ενός μετώπου εκμετάλλευσης, μιας εξορυγμένης περιοχής, ενός υψώματος συν τις αμέτρητες στοές στις βαθμίδες του μεταλλεύματος. Ακόμη και το απλούστερο σύστημα αερισμού αποτελείται συνήθως από εκατοντάδες, αν όχι χιλιάδες αγωγούς και στοές διέλευσης αέρα. Επιπλέον, εκτός από τα ορυχεία άνθρακα, αυτές οι στοές βρίσκονται σπάνια σ' ένα απλό σχέδιο και αναφέρονται μόνο σε σύνθετες τρισδιάστατες διατάξεις.

Σε πολλές περιπτώσεις, οι στοές διέλευσης στα απλά δίκτυα μπορούν να συγκεντρωθούν σε ισοδύναμα κυκλώματα είτε σε σειρά είτε παράλληλα, τα οποία θα επιτρέψουν στους μηχανικούς για να υπολογίσουν γρήγορα τις απώλειες πίεσης και να καθορίσουν τον όγκο αέρα που ρέει στις μεμονωμένες στοές διέλευσης. Για τα σύνθετα δίκτυα, αυτοί οι υπολογισμοί πρέπει να γίνουν χρησιμοποιώντας έναν ψηφιακό υπολογιστή.

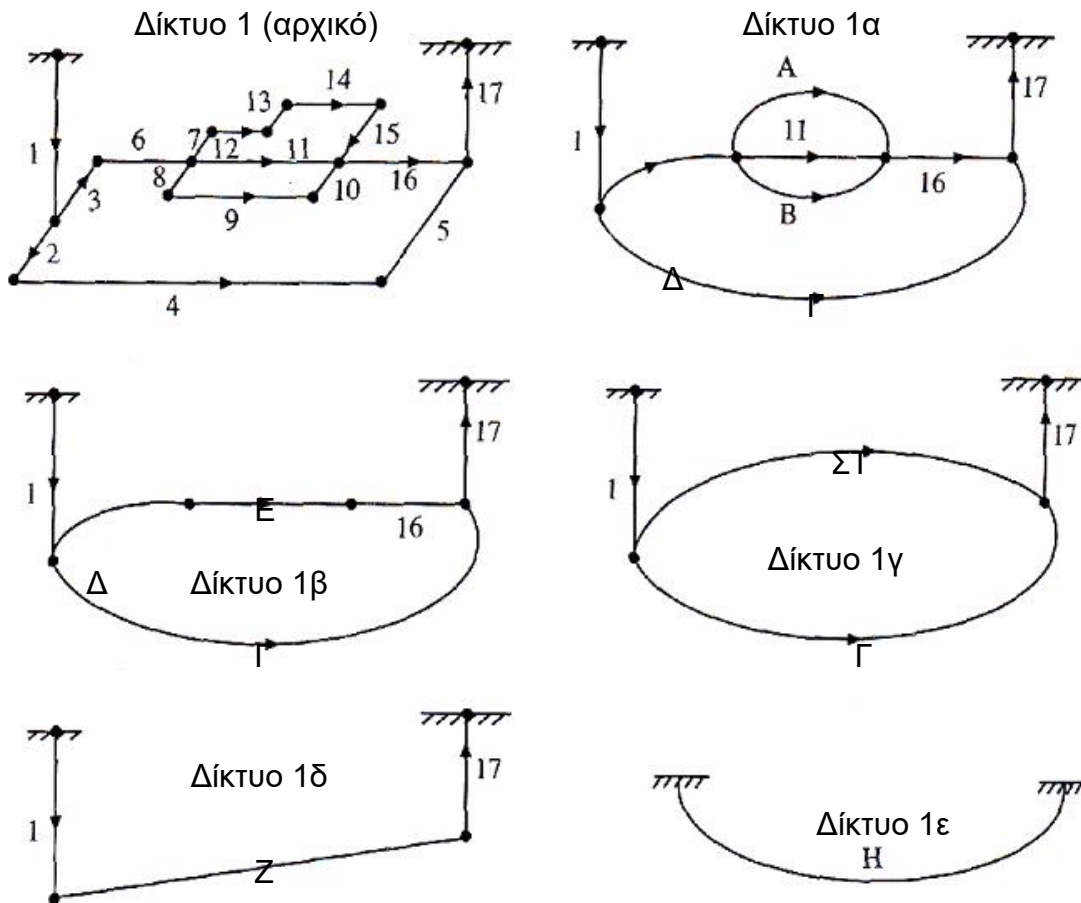
Παράδειγμα : Υπολογίστε την ισοδύναμη ολική αντίσταση του ορυχείου για το παρακάτω απλό δίκτυο αερισμού (Σχήμα 4.4), θέτοντας ότι ο ολικός όγκος αέρα περνά απ' ευθείας από την Στοά 1 και είναι 150000 cfm και κάθε στοά είναι ίση με την σχέση $R = 1000 * 10^{-10} \text{ cm} \cdot \text{min}^2 / \text{m}^6$.

Λύση : Είναι προφανές ότι οι στοές που ακολουθούν είναι σε σειρά:

- α) οι στοές 3 και 6,
- β) οι 7, 12, 13, 14, και 15,
- γ) 8, 9 και 10,
- δ) 2, 4 και 5.

Η συνδυασμένη αντίστασή τους, που αναφέρεται ως R_{Δ} , R_A , R_B και R_{Γ} (σχήμα 4 (δίκτυο 1 αρχικό)), μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο :

$$R_{ολ} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n.$$



Σχήμα 4.4 Τα απλά δίκτυα μπορούν να μετατραπούν με την βοήθεια της θεωρίας αντιστάσεων σε σειρά και παράλληλα.

Άρα :

$$R_{\Delta} = R_3 + R_6 = 1000 + 1000 = 2000$$

$$R_A = R_7 + R_{12} + R_{13} + R_{14} + R_{15} = 5000$$

$$R_B = R_8 + R_9 + R_{10} = 3000$$

$$R_\Gamma = R_2 + R_4 + R_5 = 3000$$

Οι στοές A, 11, και B είναι παράλληλες & και η ισοδύναμη αντίσταση (R_E στο σχήμα 4.4 δίκτυο 1α) μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$\frac{1}{\sqrt{R_E}} = \frac{1}{\sqrt{R_A}} + \frac{1}{\sqrt{R_{11}}} + \frac{1}{\sqrt{R_B}} \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{5000}} + \frac{1}{\sqrt{1000}} + \frac{1}{\sqrt{3000}}$$

Άρα: $R_E = 0.244$

Για τις στοές Δ, E και 16 που βρίσκονται σε σειρά μεταξύ τους ($R_{\Sigma T}$ στο σχήμα 4.4 δίκτυο 1β) μπορούμε να τις υπολογίσουμε από τον τύπο:

$$R_{\Sigma T} = R_\Delta + R_E + R_{16} = 2000 + 0.244 + 1000 = 3244$$

Για τις στοές ΣΤ και Γ που είναι σε σειρά (R_Z στο σχήμα 4.4 δίκτυο 1γ) η αντίσταση μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$\frac{1}{\sqrt{R_Z}} = \frac{1}{\sqrt{R_{\Sigma T}}} + \frac{1}{\sqrt{R_\Gamma}} = \frac{1}{\sqrt{3244}} + \frac{1}{\sqrt{3000}}$$

Άρα $R_Z = 0.780$

Για τις στοές 1, Z και 17 που είναι σε σειρά (R_H στο σχήμα 4.4 δίκτυο 1δ) η αντίσταση μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$R_H = R_1 + R_Z + R_{17} = 1000 + 0.780 + 1000 = 2780$$

Επομένως η ισοδύναμη ολική αντίσταση (δίκτυο 1ε) στο ορυχείο είναι:

$$H_s = R \cdot Q^2 = 27800 \cdot (1.5)^2 = 6255$$

Σύνθετα Δίκτυα Αερισμού

Ένα δίκτυο υπόγειου αερισμού χαρακτηρίζεται σύνθετο όταν δεν υπάρχουν χωριστά και ευδιάκριτα κυκλώματα ενώ τα παράλληλα κυκλώματα του δικτύου αλληλοσυνδέονται. (Hartman & Trafton, 1963, Novak 1991). Ένα τέτοιο δίκτυο δεν μπορεί να μετατραπεί σε μια ισοδύναμη στοά διέλευσης αέρα. Πριν από την εφεύρεση των ψηφιακών υπολογιστών, οι απαντήσεις για τέτοια δίκτυα είτε θα έπρεπε να ληφθούν μέσω της επίλυσης των ταυτόχρονων εξισώσεων που αναπτύσσονται από την εξίσωση του Άτκινσον και τους νόμους του Κίρχοφ, είτε μέσω της χρήσης ενός αναλογικού υπολογιστή. Και οι δύο τρόποι είναι χρονοβόροι και κουραστικοί.

Τρεις όροι χρησιμοποιούνται σε οποιαδήποτε ανάλυση δικτύων: η *σύνδεση* (κόμβος) και ορίζεται ως ένα σημείο όπου τρεις ή περισσότερες στοές διέλευσης αέρα συναντιούνται, η *διακλάδωση* (στοά διέλευσης) όπου είναι ένα τμήμα μιας στοάς διέλευσης αέρα μεταξύ δύο συνδέσεων και το *πλέγμα* όπου είναι ένας κλειστός βρόχος ή μια πορεία σ' ένα δίκτυο.

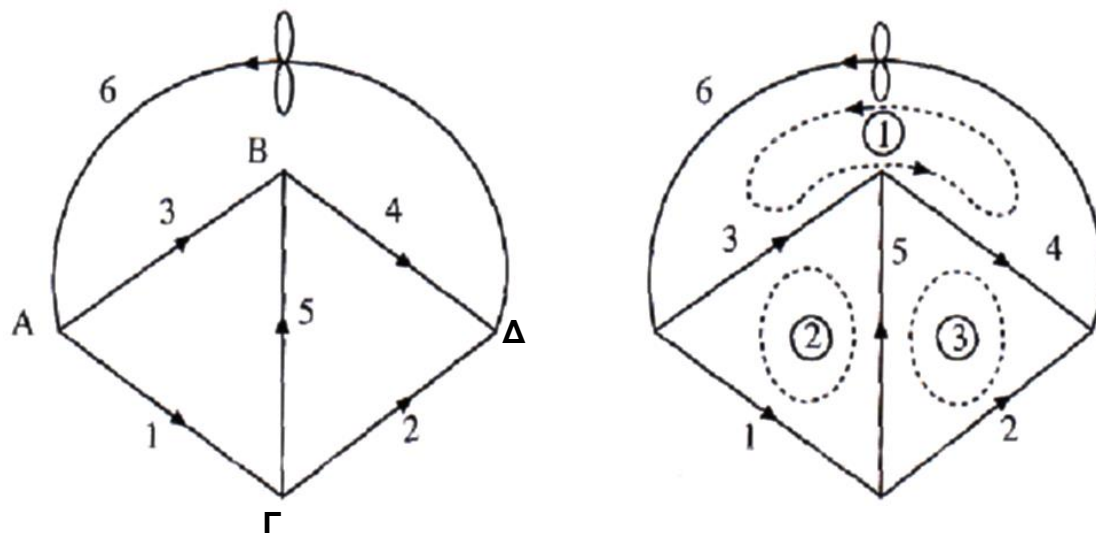
Στο Σχήμα 4.5 βλέπουμε ένα απλό σύνθετο δίκτυο αερισμού το οποίο αποτελείται από έξι (6) στοές διέλευσης αέρα, τέσσερις (4) συνδέσεις, μια πηγή πίεσης (ανεμιστήρας), τρία (3) πλέγματα και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$N = N_b - N_4 + 1 = 3$$

Δεδομένου ότι κάθε σύνδεση θα έχει δύο αγνώστους (Q και H), θα υπάρξουν συνολικά δώδεκα (12) άγνωστοι για έξι (6) διακλαδώσεις και κατά συνέπεια χρειάζονται δώδεκα (12) ανεξάρτητες εξισώσεις (Novak, 1991). Το πρώτο σύνολο εξισώσεων μπορούμε να το βρούμε με την εφαρμογή της εξίσωσης του Άτκινσον για κάθε κλάδο:

$$\begin{array}{lll} H_1 = R_1 | Q_1 | Q_1 & H_2 = R_2 | Q_2 | Q_2 & H_3 = R_3 | Q_3 | Q_3 \\ H_4 = R_4 | Q_4 | Q_4 & H_5 = R_5 | Q_5 | Q_5 & H_6 = R_6 | Q_6 | Q_6 \end{array}$$

όπου η απόλυτη τιμή χρησιμοποιείται για να εκφράσει την σωστή απώλεια πίεσης λόγω των διαφορετικών κατευθύνσεων της ροής του αέρα. Από τον νόμο του Κίρχοφ σε τρεις συνδέσεις:



Σχήμα 4.5 Σύνθετο δίκτυο αερισμού που αποτελείται από 6 στοές διέλευσης αέρα, 4 συνδέσεις, 1 ανεμιστήρα και 3 πλέγματα (Novak, 1991).

$$\text{Διακλάδωση A: } -Q_1 - Q_3 + Q_6 = 0$$

$$\text{Διακλάδωση B: } Q_3 - Q_4 + Q_5 = 0$$

$$\text{Διακλάδωση Γ: } Q_1 - Q_2 - Q_5 = 0$$

Η εξίσωση της Διακλάδωσης Δ δεν είναι ανεξάρτητη επειδή μπορεί να προέλθει από άλλες. Ο δεύτερος νόμος του Κίρχοφ για τα τρία πλέγματα (θεωρώντας ότι ο ανεμιστήρας στην διακλάδωση 6 είναι πηγή πίεσης ή ότι αυξάνει την αρνητική πίεση του ορυχείο) θα μας δώσει τις υπόλοιπες τρεις εξισώσεις:

$$\begin{aligned} \text{Πλέγμα 1: } & -H_m + H_3 + H_4 + H_6 = 0 \quad \text{ή} \\ & -H_m + R_3|Q_3|Q_3 + R_4|Q_4|Q_4 + R_6|Q_6|Q_6 = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Πλέγμα 2: } & -H_1 + H_3 - H_5 = 0 \quad \text{ή} \\ & R_1|Q_1|Q_1 + R_3|Q_3|Q_3 - R_5|Q_5|Q_5 = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Πλέγμα 3: } & -H_2 + H_4 + H_5 = 0 \quad \text{ή} \\ & -R_2|Q_2|Q_2 + R_4|Q_4|Q_4 + R_5|Q_5|Q_5 = 0 \end{aligned}$$

Από το Q_6 δίνονται :

$$Q_1 = Q_6 - Q_3$$

$$Q_2 = Q_1 - Q_5 = Q_6 - Q_3 - Q_5$$

$$Q_4 = Q_3 + Q_5$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση του πλέγματος 3 το αποτέλεσμα είναι τρεις εξισώσεις με τρεις αγνώστους. Τέτοιου είδους εξισώσεις λόγο της πολυπλοκότητας τους και της χρησιμοποίησής τους μόνο ως ακαδημαϊκές ασκήσεις δεν εφαρμόζονται στην μελέτη του δικτύου αερισμού και η εξέλιξη των υπολογιστών έχει βοηθήσει σημαντικά στην επίλυσή τους.

4.5 Επίλυση Δικτύου Αερισμού

Μια από τις προγενέστερες προσπάθειες να λυθούν τα προβλήματα των δικτύων αερισμού με μαθηματικές μεθόδους έγινε από τον J J. Atkinson το 1854 (Atkinson, 1854-55). Χρησιμοποιώντας μια μέθοδο διαδοχικής προσέγγισης, ο Atkinson επέλυσε τη κατανομή ροής αέρα για ένα απλό κύκλωμα που αποτελείτο από τρεις βρόχους.

Μετά την προσπάθεια του Atkinson, οι Miller (1936) και Statham (1943-44) μελέτησαν την αναλυτική επίλυση των απλών κυκλωμάτων με δύο βρόχους που περιέχουν στην επιφάνεια συμπληρωματικούς ανεμιστήρες και η ανάλυση εξελίχθηκε.

Το 1936, ο Hardy Cross δημοσίευσε μια μέθοδο επίλυσης προβλημάτων ροής στα δίκτυα των αγωγών από τη διαδοχική προσέγγιση και

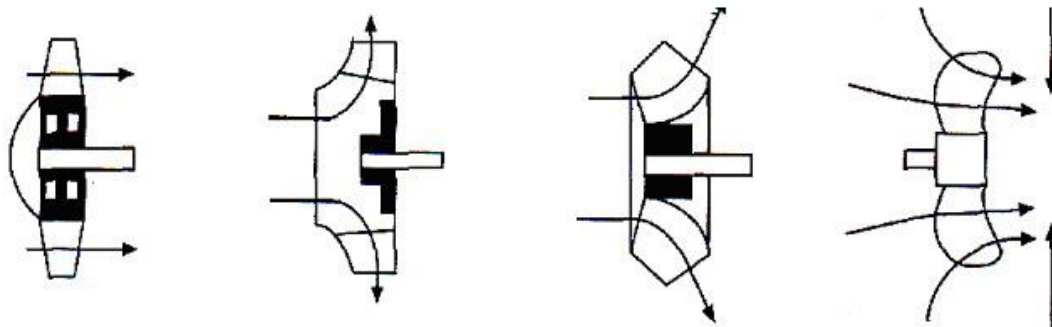
έγινε η βάση όλης της αριθμητικής ανάλυσης για τον καθορισμό των ρευστών προβλημάτων διανομής ροής (Scott και Hinsley, 1951-1952). Η λύση απαιτεί ότι η κατεύθυνση, το μέγεθος της ροής αέρος και η απώλειες πίεσης πρέπει να καθορίζονται. Δεδομένου ότι τα δίκτυα αερισμού υπόγειων εκμεταλλεύσεων είναι συνήθως σύνθετα και τέτοιες μαθηματικές προσεγγίσεις είναι πάρα πολύ κουραστικές για να είναι πρακτικές. Επίσης, τα λάθη που προέκυπταν από την εφαρμογή της μεθόδου αποδείχθηκαν συχνά δαπανηρά και μερικές φορές επικίνδυνα (McElroy, 1954).

5. Συστήματα Υπόγειου Αερισμού

5.1 Ανεμιστήρες

Ένας ανεμιστήρας είναι στην ουσία μια αντλία αέρος, μια μηχανή που λειτουργεί με βάση την αεροδυναμική και δημιουργεί διαφορά πίεσης η οποία προκαλεί τη ροή του αέρος. Είναι ένας μετατροπέας ενέργειας (από μηχανική σε ρευστή κατάσταση), παρέχοντας την απαραίτητη πίεση ώστε να καλυφθούν οι απώλειες πίεσης στη ροή αέρος.

Αν και όλοι οι ανεμιστήρες λειτουργούν με βάση την αεροδυναμική δράση, μπορούν να ταξινομηθούν ευρέως σύμφωνα με την πορεία που έχει ο αέρας μέσω του στροφείου και τον προκύπτοντα μηχανισμό για την παραγωγή της πίεσης. Μπορούν γενικά να ταξινομηθούν στους ακόλουθους τύπους (σχήμα 5.1 και 5.1α , Daly 1978) :



α. Αξονική Ροή β. Ακτινοειδής Ροή γ. Μεικτή Ροή δ. Ανοιχτή Ροή

Σχήμα 5.1 Τύποι ανεμιστήρων με βάση την κατασκευή τους.

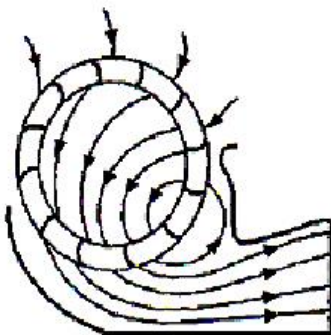
1. **Αξονική Ροή:** Ο αέρας ρέει κατευθείαν μέσω της φτερωτής σε σταθερή απόσταση από τον άξονα (σχήμα 5.1 - α.). Κύρια συνιστώσα της δύναμης πτερυγίου στον αέρα κατευθύνεται αξονικά από την είσοδο στην έξοδο και έτσι παρέχει την αύξησης πίεσης με άμεση κίνηση των πτερυγίων. Η δύναμη πτερυγίου έχει μια ακόμη συνιστώσα στην εφαπτομενική διεύθυνση, που παρέχει την αντίδραση στην ροπή περιστροφής. Αυτή θέτει τον αέρα σε περιστροφή γύρο από τον άξονα ανεξάρτητα από την πρόσθια κίνηση.

2. *Ακτινική Ροή* : Ο αέρας εισέρχεται στην φτερωτή αξονικά, γυρίζει 90° και συνεχίζει αξονικά από το φτέρωμα προς τα έξω (σχήμα 5.1 - β.). Η δύναμη πτερυγίου είναι κυρίως εφαπτομενική προκαλώντας τον αέρα να περιστρέφεται με τα πτερύγια. Η φυγόκεντρος δύναμη που προκαλείται από την περιστροφή είναι σε συνέχεια με την προ τα έξω κίνηση του αέρα και είναι η κύρια αιτία της αύξησης της πίεσης.

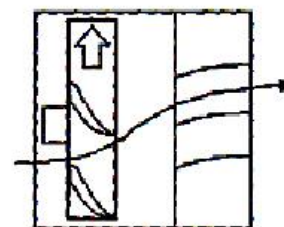
3. *Μεικτή Ροή* : Σε ένα μεικτού τύπου ροής ανεμιστήρα, οι αέρας εισέρχεται αξονικά και γυρίζει προς τα έξω με γωνία που μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 30° και 90° (σχήμα 5.1 - γ). Τα πτερύγια της φτερωτής εκκλίνονται σε όλο το καμπύλο τμήμα της ροής. Σε αυτή την περιοχή η δύναμη πτερυγίου έχει μια συνιστώσα στην διεύθυνση του βέλους στο διάγραμμα καθώς και μια εφαπτομενική συνιστώσα και η αύξηση πίεσης αναπτύσσεται μερικώς από την κίνηση από την κίνηση των πτερυγίων και μερικώς από την φυγόκεντρη κίνηση.

4. *Ροή Στομίου* : Αυτή είναι χαρακτηριστικό ενός ελικοφόρου ανεμιστήρα που λειτουργεί σε μηδενική ή χαμηλή στατική πίεση (σχήμα 5.1 - δ). Ο αέρας εισέρχεται στην φτερωτή προ τα μέσα από όλες τις διευθύνσεις της εισόδου και καμπυλώνεται προ ένα παράλληλο ρεύμα στο σημείο συμπύκνωσης στην έξοδο.

5. *Εγκάρσια Ροή* : Στην ροή αυτή μια δίνη διαμορφώνεται και διατηρείται από τις δυνάμεις των πτερυγίων που έχει τον άξονά της παράλληλο στην εξαγωγή αέρα και κοντά σε σημείο της περιφέρειας των στροφείων (σχήμα 5.1α - ε.).



ε. Εγκάρσια Ροή



στ. Ροή Εξαγωγής

Σχήμα 5.1α Τύποι ανεμιστήρων με βάση την κατασκευή τους.

6. *Ροή Εξαγωγής* : Ο αέρας βγαίνοντας από την φτερωτή φέρει κινητική ενέργεια ανάλογη της πίεσης ταχύτητας (σχήμα 5.1α – στ). Μια συνιστώσα αυτής είναι στην διεύθυνση περιστροφής και μπορεί να ανακτηθεί για χρήση, κατευθύνοντας την ταχύτητα προς την εξαγωγή του ανεμιστήρα. Ένα σπειροειδές περίβλημα το επιτυγχάνει για φυγόκεντρους ανεμιστήρες ενώ οδηγητικά πτερύγια το επιτυγχάνουν για τους αξονικούς ανεμιστήρες. Το περίβλημα μπορεί επίσης να πάρει σχήμα που να επιτρέπει μια σταδιακή διεύρυνση της διατομής καθώς πλησιάζουμε στην εξαγωγή. Η διάχυση δεν αυξάνει την συνολική πίεση του ανεμιστήρα αλλά μετατρέπει μέρος της πίεσης ταχύτητας σε στατική πίεση ανεμιστήρα.

Ο ακόλουθος πίνακας παρέχει τις χρήσιμες πληροφορίες και χαρακτηριστικά για την επιλογή του σωστού ανεμιστήρα σε μια ιδιαίτερη εφαρμογή.

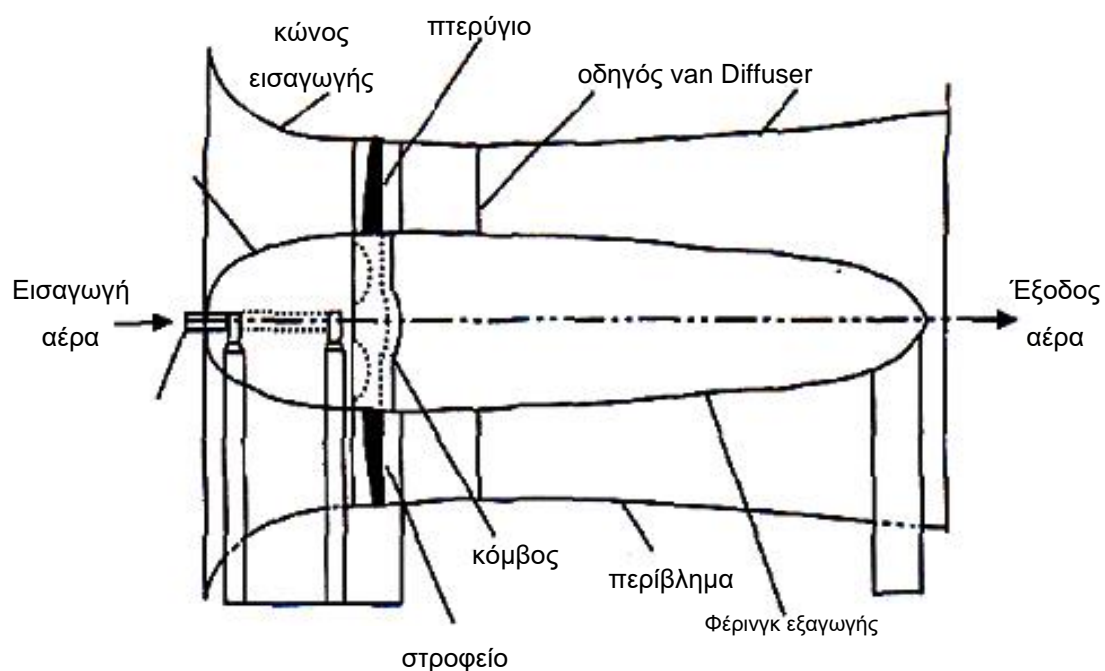
Τύπος Ανεμιστήρα	Κλίμακα Στατικής Πίεσης
κυκλικός ή ελικοειδής	0 – ½ cm
σωληνωτός	¾ - 1 ½ cm
ακτινωτός	¾ - 12 cm
φυγόκεντρικός	
Backwardly inclined blower	1 – 12 cm
αξονική φυσούνα	3 – 40 cm

Στην επιλογή ενός τύπου ανεμιστήρα από έναν άλλο για μια ιδιαίτερη εφαρμογή αερισμού υπόγειας εκμετάλλευσης μεγάλο ρόλο έχουν οι απαιτήσεις για κάθε περίπτωση. Οι παράγοντες που πρέπει να εξεταστούν είναι οι εξής: *η πίεση, η ποσότητα, η δύναμη, η ταχύτητα, το κόστος, η ευελιξία, το μέγεθος, ο θόρυβος και η αξιοπιστία των ανεμιστήρων.*

Δύο σημαντικοί τύποι ανεμιστήρων στις υπόγειες εκμεταλλεύσεις:

α) Αξονικής Ροής Ανεμιστήρες

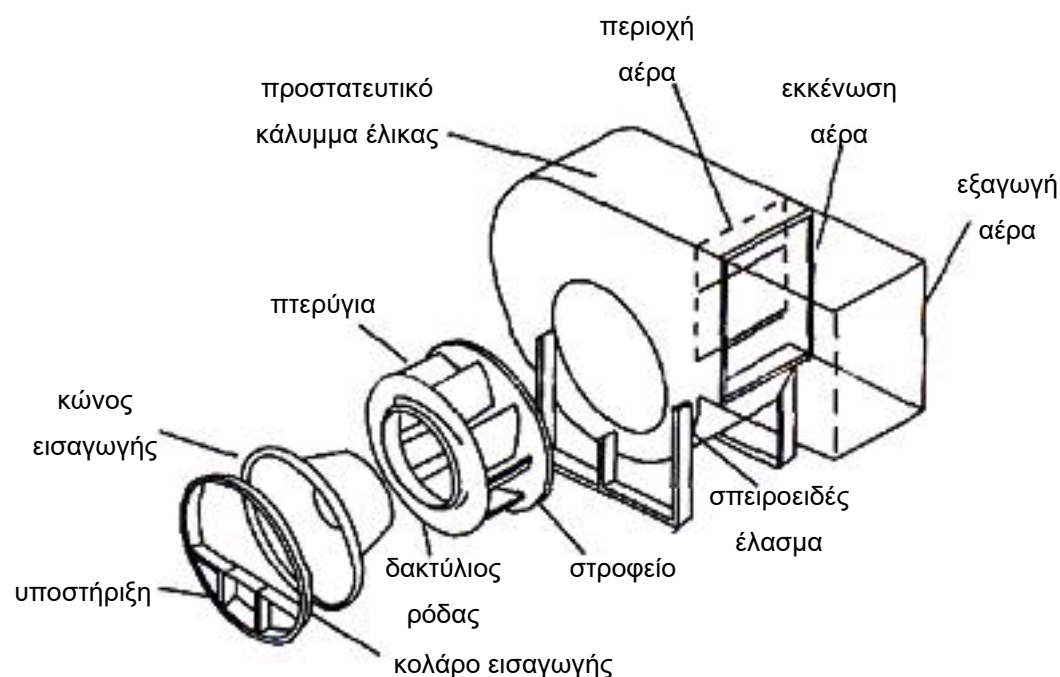
Ο ανεμιστήρας αξονικού πτερυγίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.2, είναι αυτός που χρησιμοποιείται περισσότερο στη Βόρεια Αμερική και την ηπειρωτική Ευρώπη (Hoddinott, 1984).



Σχήμα 5.2 Η κατασκευή ενός ανεμιστήρα αξονικής ροής.

β) Φυγοκεντρικοί ανεμιστήρες

Οι φυγοκεντρικοί ανεμιστήρες, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.3 είναι ο τύπος "κλουβί σκίουρου" ανεμιστήρα και αποτελείται από μια μεγάλη ρόδα ή ένα στροφέιο μέσα σ' ένα κυρτό περίβλημα.



Σχήμα 5.3: Η κατασκευή ενός ανεμιστήρα φυγοκεντρικής ροής.

Για να γίνουν κατανοητά τα θετικά και τα αρνητικά στοιχεία των ανεμιστήρων φυγοκεντρικής και αξονικής ροής σε μια υπόγεια εκμετάλλευση ακολουθεί ο συγκριτικός πίνακας (πίνακας 5.1) μεταξύ των δύο ανεμιστήρων :

Χαρακτηριστικό Γνώρισμα	Αξονική Ροή Ανεμιστήρα	Φυγοκεντρική Ροή Ανεμιστήρα
Κύριο Κόστος	Ο ανεμιστήρας είναι πολύ συμπαγής για έναν κανονικό φόρτο εργασίας και επομένως είναι σχετικά φτηνός.	Ο ανεμιστήρας είναι μεγαλύτερος με υψηλότερο κόστος δαπάνης
Χημική Διάβρωση	Απαραίτητο το βάψιμο	Το βάψιμο είναι περιορισμένο λόγω της χρήσης μπετόν.
Διάβρωση	Μερικές λεπίδες αεροτομών που γίνονται από κράμα αργιλίου είναι ευαίσθητες	Γενικά χρησιμοποιούνται λεπίδες χάλυβα αλλά όταν οι λεπίδες γίνουν διάτρητες τότε υπάρχει πρόβλημα
Περιγραφικότητα και ταχύτητες άκρων	Υψηλή	Χαμηλή, με μεγάλο χρόνο ζωής των εξαρτημάτων
Απόδοση	Απότομη καμπύλη πίεσης/ροής στην εμβέλεια λειτουργίας, αλλά η μεταβολή	Απότομη καμπύλη πίεσης/ροής μέσα στην εμβέλεια λειτουργίας. Καμία

	του βήματος της έλικας ισορροπεί αυτή την ανωμαλία. Καμία υπερφόρτωση.	υπερφόρτωση. Οι περισσότεροι υψηλοί ανεμιστήρες πίεσης είναι φυγοκεντρικοί
<i>Μπλοκάρισμα</i>	Υπάρχει περίπτωση μπλοκαρίσματος	Δεν υπάρχει περίπτωση μπλοκαρίσματος του ανεμιστήρα.
<i>Έλεγχος Ροής</i>	Μεταβολή του βήματος της έλικας είτε με χειροκίνητα είτε με αυτόματα μέσα. Σύνθετες, αλλά μεγάλες μεταβολές στο στόμιο με ευκολία.	Ακτινωτά στο σημείο εισαγωγής υπάρχουν βάνες που επιτρέπουν τον έλεγχο. Εκτεταμένα ή μεταβάλλοντας της άκρες.
<i>Αντιστρεπτότητα</i>	Εύκολα πραγματοποιείται αλλά μπορεί να χαθεί μέχρι και το 60% της ροής.	Απαιτεί ένα σύστημα από πόρτες και αγωγούς. Καμία απώλεια ροής.
<i>Θόρυβος</i>	Υψηλά επίπεδα θορύβου σε υψηλή συχνότητα. Μπορούν να εξασθενίσουν	Χαμηλά επίπεδα θορύβου σε χαμηλότερες συχνότητες.
<i>Αποδοτικότητα</i>	Συνολική αποδοτικότητα μέχρι 85-90% πέρα από το ενδεικτικό, εάν δεν υπάρξει μεταβολή στο βήμα της έλικας	Συνολική αποδοτικότητα 90% πέρα από το ευρύ φάσμα του ενδεικτικού.

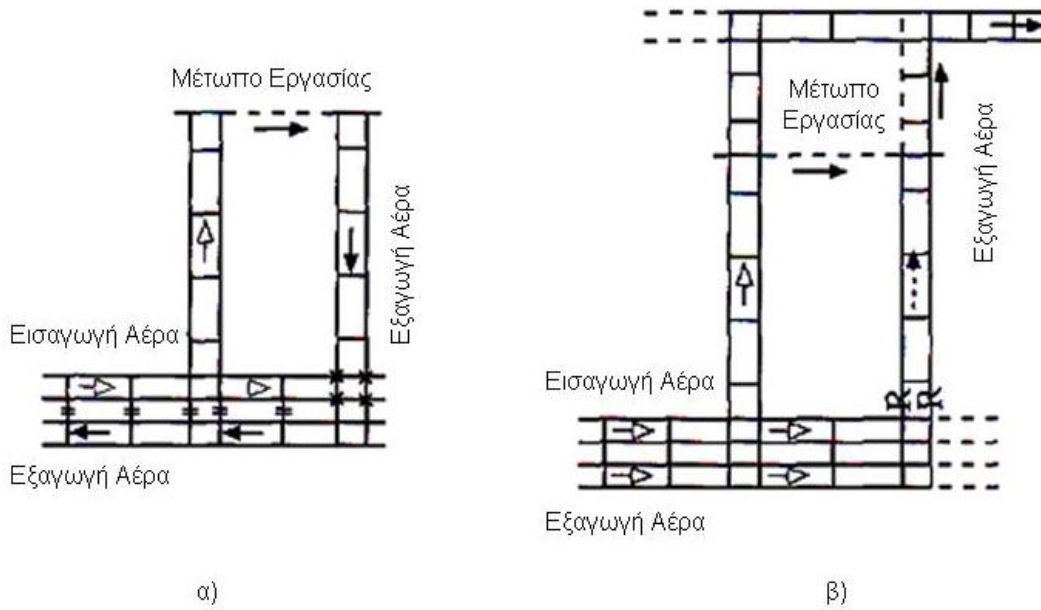
5.2 Κύρια Συστήματα Αερισμού

Ο στόχος για οποιοδήποτε σύστημα αερισμού είναι διπλός.

Ο πρώτος είναι το αρχικό σύστημα αερισμού να εισάγει τον αέρα μέσω των κύριων στοών διέλευσης στην περιοχή εργασίας για τον επαρκή αερισμό των εργαζομένων και την απαγωγή του μολυσμένου αέρα στην επιφάνεια μέσω εξαγωγής της στοάς.

Δεύτερον, το σύστημα αερισμού πρέπει να έχει σχεδιαστεί κατάλληλα ώστε να χρησιμοποιήσει αποτελεσματικά το διαθέσιμο αέρα στην περιοχή εργασίας για να καθαρίσει το μέτωπο, να συλλάβει και να αφαιρέσει τη σκόνη, να αραιώσει και να μεταφέρει τα αέρια που εκπέμπονται ενδεχομένως κατά τη διάρκεια των δραστηριοτήτων μεταλλείας. Χωρίς ένα κατάλληλα σχεδιασμένο σύστημα αερισμού, ένας αποδοτικός κύκλος παραγωγής δεν θα ήταν δυνατός. Το σύστημα θα πρέπει να παρέχει τους απαραίτητους όγκους αέρα για την υπόγεια εκμετάλλευση και την ποιότητα αέρα με λογικές απώλειες πίεσης, να αποδώσει τα μέγιστα στην παραγωγή και να έχει μικρό κόστος.

Ανάλογα με τον τύπο του ορυχείου και τη διάταξη της τοπικής γεωλογίας τα σχέδια αερισμού μπορούν να χωριστούν σε δύο ευρείες κατηγορίες: σύστημα U – Tube και διάταξη through – flow. Στο σχήμα 5.4α παρουσιάζεται η βασική U – Tube διάταξη των τμημάτων όπου οι ροές αέρα προς και μέσω της περιοχής εργασίας, επιστρέφουν έπειτα κατά μήκος των παρακείμενων στοών διέλευσης αέρα, που χωρίζονται συχνά από τις εισαγωγές με μακριές κολόνες και σφραγίσματα. Η άλλη διάταξη φαίνεται στο σχήμα 5.4β όπου οι εισαγωγές και οι επιστροφές του αέρα είναι συνήθως χωρισμένες γεωγραφικά από τις παρακείμενες στοές διέλευσης οι οποίες είναι είτε όλες οι εισαγωγές είτε όλες οι επιστροφές.



Σχήμα 5.4 Βασικά συστήματα αερισμού α) U – tube και β) through – flow (McPherso 1993).

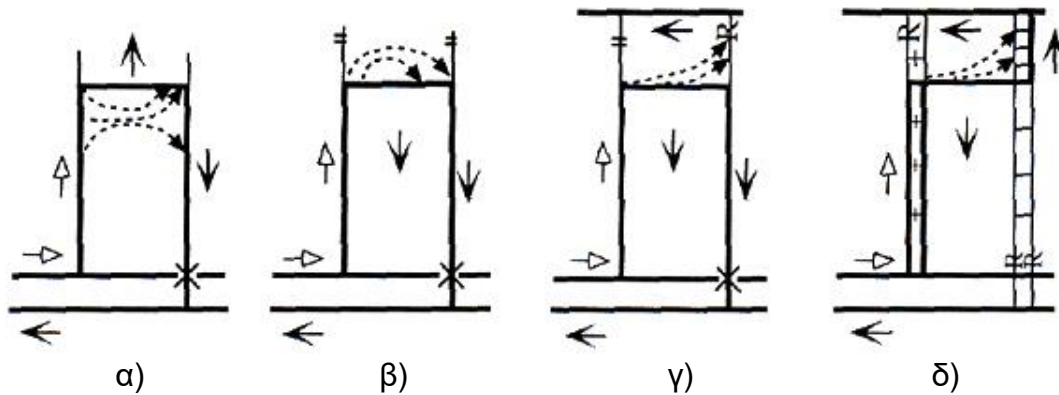
Για στρωματοποιημένες αποθέσεις

Η μεγάλη πλειοψηφία των υπόγειων ορυχείων που εξάγουν επίπεδες μορφές σωμάτων μεταλλοφορίας (κάρβουνο, ποτάσα, αλάτι, ασβεστόλιθο κ.τ.λ.) χρησιμοποιούν μια από τις δύο μεθόδους, την longwall ή την room and pillar. Ενώ τα πραγματικά σχέδια μπορούν να ποικίλουν σημαντικά από εκμετάλλευση σε εκμετάλλευση και από περιοχή σε περιοχή σύμφωνα με τις τοπικές γεωλογικές συνθήκες, το βασικό σχέδιο για αυτές τις δύο μεθόδους παραμένει το ίδιο. Τα παρακάτω είδη περιγράφουν το σύστημα διανομής ροών αέρος που χρησιμοποιείται συνήθως.

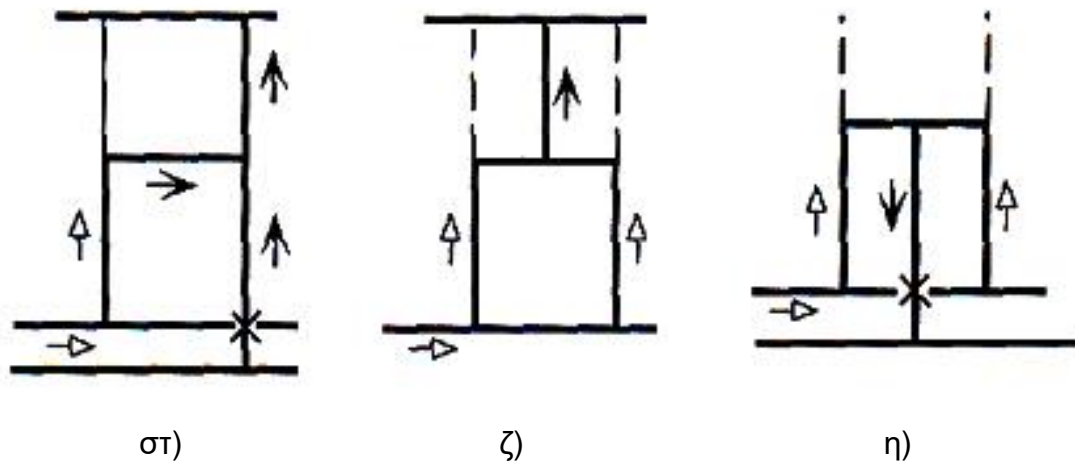
α) Longwall μέθοδος

Δύο παράγοντες που έχουν επηρεάσει σημαντικά το σχέδιο των longwall συστημάτων αερισμού είναι ο έλεγχος του μεθανίου ή των άλλων αερίων που συσσωρεύονται στην περιοχή gob και το αυξανόμενο ποσοστό θραύσης των βράχων που επιδεινώνει την παραγωγή σκόνης, αερίων, υψηλής θερμότητας και υγρασίας. (Haake 1985, Highton 1980, McPherson 1993, Den Drijver 1997, Diamond 1997, Dziurzynski & Nawrat 1997, Uchino & Hirago 1984, Battino & Mitchell 1985, Organiscak & Jankowski 1996, Colinet 1997, Stokes & Tuck 1997). Στο σχήμα 5.5 περιγράφονται μερικά από τα συνήθως

χρησιμοποιημένα σχέδια αερισμού που χρησιμοποιούνται σε longwall τμήματα.



Σχήμα 5.5 Κατηγοριοποίηση των συστημάτων αερισμού longwall α) single-entry advancing β) single-entry retreating γ) single-entry retreating with back bleeder δ) double-entry retreating with back bleeder (McPherson, 1993)

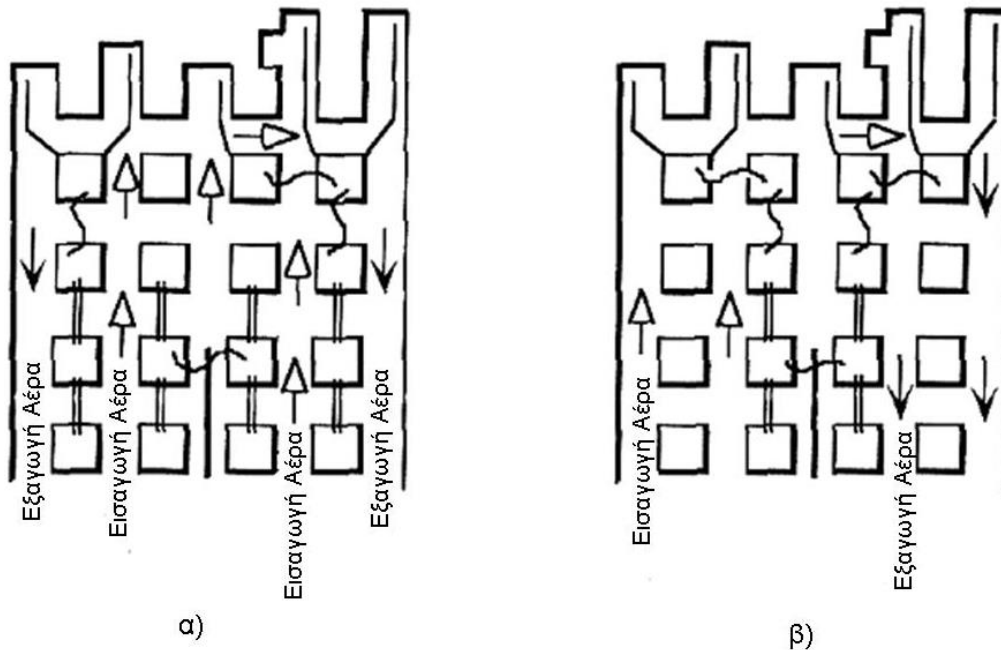


Σχήμα 5.5 Κατηγοριοποίηση των longwall συστημάτων αερισμού στ) Y-system ζ) double-Z system η) W-system (McPherson, 1993)

β) Room and pillar μέθοδος

Το σχήμα 5.6 παρουσιάζει δύο μεθόδους αερισμού Room and pillar σε ένα ορυχείο άνθρακα όπου ανοίγονται πολλαπλές εισοδοί. **Figure 9-4a is the directional, or W-system, in which intake air courses are airways in the central**

portion of the panel, with return airways on both sides, often referred to as the fish-tail method. The method in Figure 9-4b is the unidirectional system in which intake and return are located on both sides of neutral airway (belt and track). Και στις δύο περιπτώσεις, η ταινία μεταφοράς και η διαδρομή βρίσκονται στη μέση, με μια brattice curtain για να ρυθμίσουν στο τέλος τη ροή αέρος.



Σχήμα 5.6 Room and pillar development with line brattices to regulate airflow in conveyor belt entry: (a) bi-directional system; (b) uni-directional system.

γ) Εκμετάλλευση με μεγάλου μεγέθους μέτωπα εξόρυξης

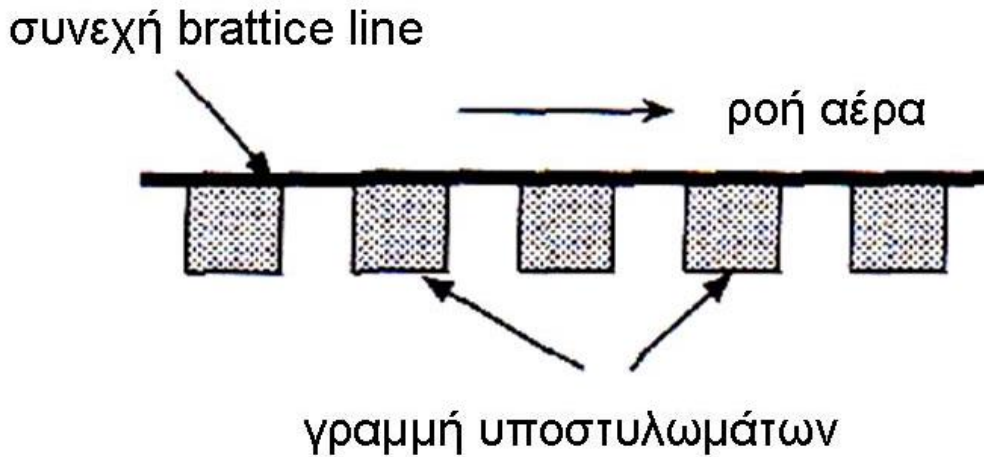
Τα μεγάλα μεγέθους μέτωπα εξόρυξης (π.χ. ασβεστόλιθος, αλάτι, κλπ) απαιτούν μεγάλους όγκους αέρα από το σύστημα αερισμού (μεταξύ 300.000 έως 500.000 cfm) για να αεριστεί επαρκώς όλη η υπόγεια εκμετάλλευση. Για να καλυφθεί αυτή η απαίτηση, αντιμετωπίζονται δύο σημαντικά προβλήματα: (1) η υπερβολική διαρροή αέρα μέσω των μετώπων και (2) η τοπική επανακυκλοφορία του αέρα η οποία προκαλείται από την λάθος κατασκευή των μετώπων ή την έλλειψη μετώπων σε πολλές περιπτώσεις.

Ο αέρας ουσιαστικά χρησιμοποιείται στο ορυχείο για να αραιώσει τα καυσαέρια των μηχανών εσωτερικής καύσης και να διατηρήσει ελάχιστη την

ταχύτητα του αέρα μέσα στις στοές διέλευσης ώστε να αποφευχθεί η στρωματοποίηση του.

Η κατασκευή αεροστεγών stoppings σε μεγάλες εισαγωγές αέρα είναι μια χρονοβόρα και πανάκριβη διαδικασία που πολύ δύσκολα είναι 100% αποτελεσματική. Η brattice curtains είναι το μόνο πρακτικό υλικό που το κόστος του είναι πιο φτηνό από των stoppings.

Μερικά ορυχεία έχουν κρεμάσει μια συνεχή brattice line κατά μήκος των στηριγμάτων, η οποία σταματά περισσότερο την διαρροή αέρα γύρω από τις περιφερειακές μονάδες (σχήμα 5.7).

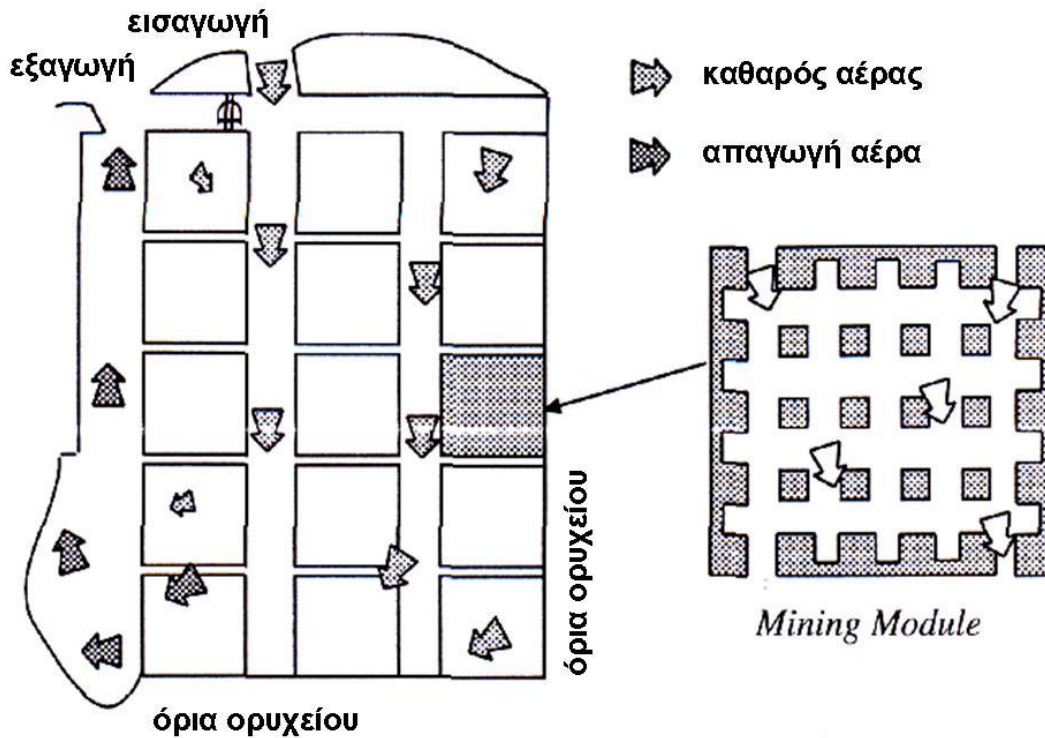


Σχήμα 5.7 Η συνεχής brattice line θα μειώσει την τραχύτητα αέρα και θα εξομαλύνει την ροή του.

Δεδομένου ότι σε οποιαδήποτε διαρροή θα πρέπει να αντισταθμιστεί η απώλεια αέρα με την "άντληση" περισσότερης ποσότητας ώστε να καλυφθούν οι απαιτήσεις αέρα για την ασφάλεια των εργαζομένων, θα αυξηθούν όμως εντυπωσιακά και οι ανάγκες για περισσότερη ενέργεια στον ανεμιστήρα. Αυτό συμβαίνει γιατί η δύναμη ανεμιστήρα και η ποσότητα αέρα έχουν μια κυβική σχέση. Για παράδειγμα, μια αύξηση 26% στη ροή του αέρα θα διπλασίαζε το κόστος παραγωγής του και κατά συνέπεια τις ενεργειακές απαιτήσεις του ανεμιστήρα.

Μια τμηματική διαμόρφωση παρέχει μια εναλλακτική λύση. **In this layout, long barrier pillars are intentionally left at four sides of a pre-planned**

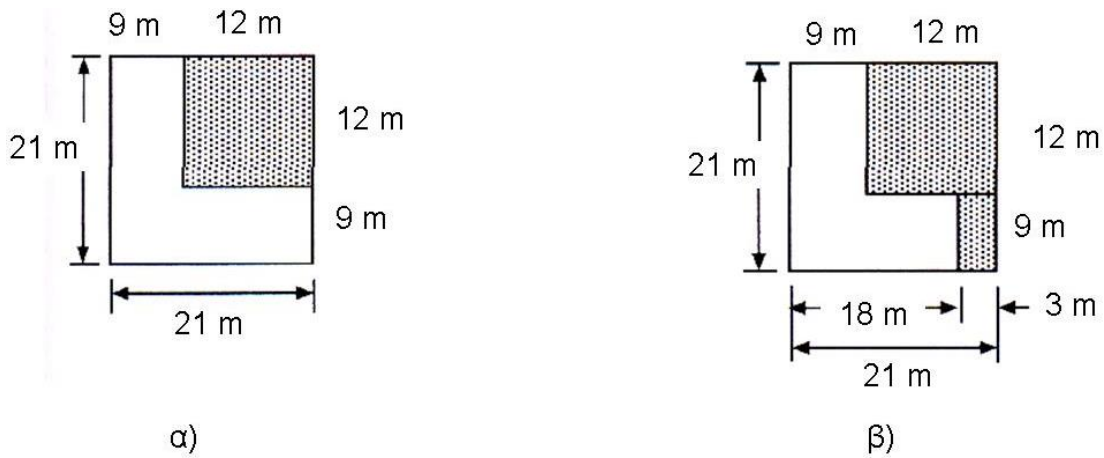
mining block so air can be effectively coursed over longer distances. Το ακόλουθο διάγραμμα (σχήμα 5.8) παρουσιάζει ένα υποθετικό ορυχείο που λειτουργεί με μια τμηματική διαμόρφωση.



Σχήμα 5.8 Ένα υποτιθέμενο ορυχείο ασβεστόλιθου όπου ένα module σύστημα χρησιμοποιείται στη θέση των stoppings στον αεραγωγό τις περιοχές εργασίας.

Η απώλεια αέρα μπορεί να μειωθεί στο ελάχιστο αφήνοντας μόνο την τελευταία σειρά εξόρυξης στη στοά εξόρυξης (σχήμα 5.8). Η μείωση της διαρροής του αέρα και η αποταμίευση που δημιουργείται με την αντικατάσταση brattice και την παροχή του αποτελεσματικού αερισμού, θα αντισταθμίσουν το κόστος που συνδέεται με μια χαμηλότερη αναλογία εξαγωγής. Τα ακόλουθα διαγράμματα παρουσιάζουν τους υπολογισμούς για τον ρυθμό εξαγωγής. Τα σχήματα 5.9α και 5.9β περιγράφονται 40-ft by 40-ft pillars mined on 70-ft centers. Οι υπολογισμοί δείχνουν ότι η διαφορά στην παραγωγή είναι περίπου 6%. Όμως το 3% είναι ένας πιο ρεαλιστικός αριθμός επειδή μόνο ένα μέρος των μερικών υποστυλωμάτων αφήνεται σε τέσσερις πλευρές μέσα σε αυτό το μπλοκ. Τα σχήματα 5.9γ και 5.9δ παρουσιάζουν

similar 70-ft center pillar pattern, however, 35-ft by 35-ft pillars are left. Η διαφορά που προκύπτει αν αφαιρεθεί ένα υποστώλωμα είναι περίπου 3,5%.



Ολική Εξαγωγή

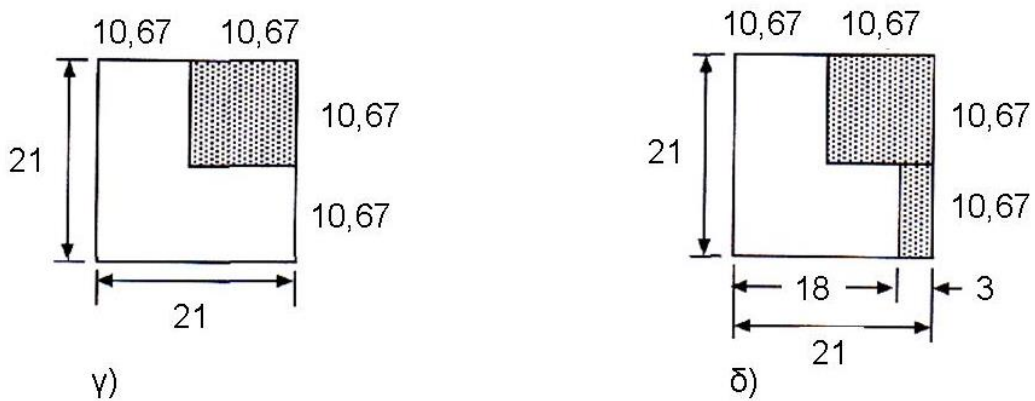
$$1 - \frac{12 * 12}{21 * 21} = 67,3\%$$

Αφαίρεση υποστυλώματος

$$1 - \frac{10,67 * 10,67 + 10,67 * 3}{21 * 21} = 67,9\%$$

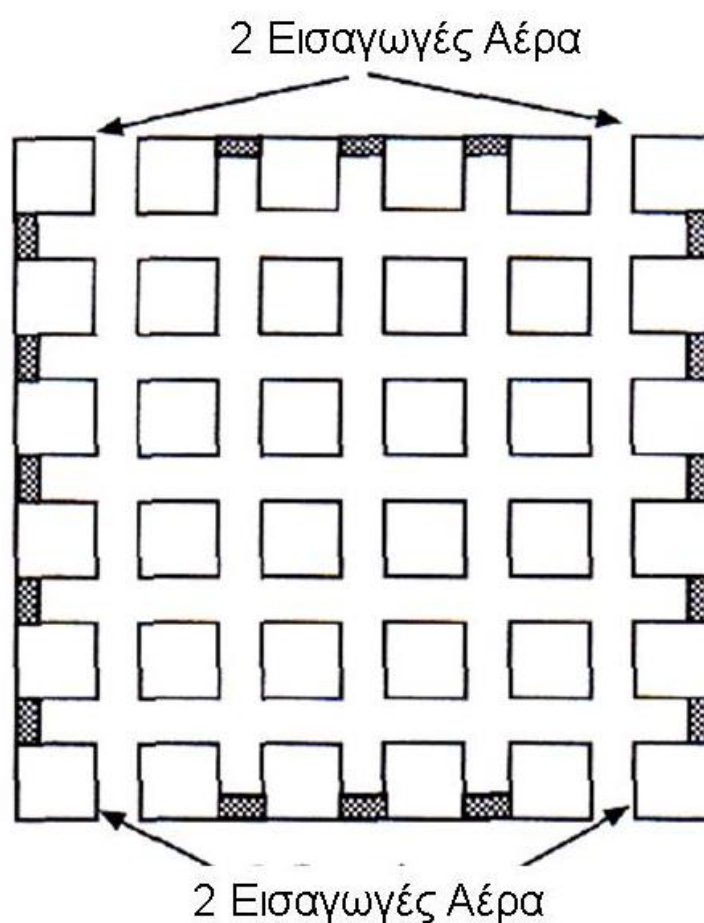
Σχήμα 5.9 Υπολογισμοί ρυθμού εξαγωγής

For demonstration purposes, in a 6-pillar by 6-pillar block with 20-ft room height by 35-ft entry widths, partial pillars will be left in 16 places (σχήμα 5.10). Assume the stone has a density of 165 lb/ft³, total unmined rock in this system amounts to:



Ολική Εξαγωγή	Αφαίρεση υποστυλώματος
$1 - \frac{10,67 * 10,67}{21 * 21} = 75,0\%$	$1 - \frac{10,67 * 10,67 + 10,67 * 3}{21 * 21} = 67,9\%$

Σχήμα 5.9 Υπολογισμοί ρυθμού εξαγωγής



Σχήμα 5.10 Partial pillars will be left in 16 places in a 6 x 6 block

$$10,67 * 10,67 * 3 \text{ (ύψος)} = 2.133,60 \text{ m}^3 \text{ ανά περιοχή εργασίας}$$

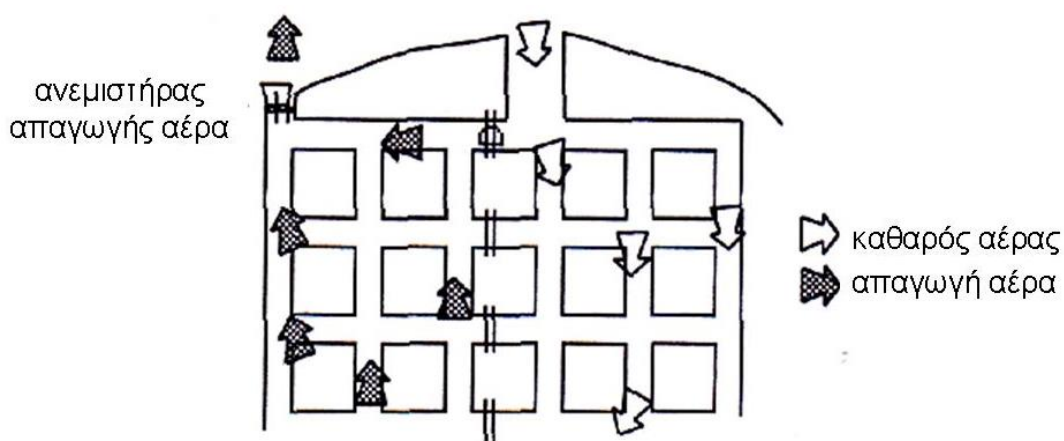
$$\begin{array}{l} \text{Ολική απώλεια σε τόνους} \\ \text{ανά περιοχή εργασίας} \end{array} = \frac{(2.133,60 \text{ m}^3 * 165 \text{ kg/m}^3)}{2000 \text{ kg/τόνοι}} = 578 \text{ τόνοι/ περιοχή}$$

Ολική απώλεια σε τόνους λόγω

$$\text{των υποστυλωμάτων} = 578 \text{ τόννοι/περιοχή} * 16 \text{ περιοχές} = 9,248 \text{ t}$$

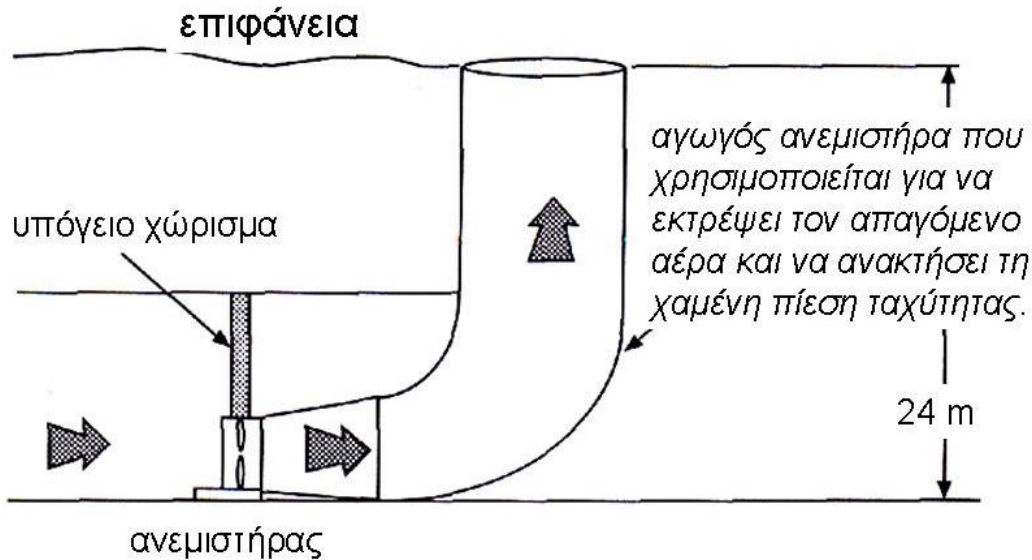
δ) Επανακυκλοφορία του αέρα στην υπόγεια εκμετάλλευση:

Εκτός από την λάθος κατασκευή και την κακή διατήρηση των stoppings ένα επίσης σημαντικό πρόβλημα είναι και η επανακυκλοφορία του αέρα που προκαλείται από τον εσφαλμένο σχεδιασμό του ορυχείου και την έλλειψη stoppings. Ένα από τα λάθη που συνήθως αντιμετωπίζονται σε υπόγειες εκμεταλλεύσεις ασβεστόλιθων είναι ότι οι κύριες στοές εισαγωγής και επιστροφής του αέρα βρίσκονται η μια κοντά στην άλλη με αποτέλεσμα ο απαγόμενος αέρας να επανακυκλοφορήσει εκ νέου από την στοά εισαγωγής. Στο αρχικό στάδιο ανάπτυξης της εκμετάλλευσης οι κύριες στοές εισαγωγής και επιστροφής του αέρα βρίσκονται συνήθως κοντά μεταξύ τους και παραμένουν έτσι για αρκετά χρόνια (σχήμα 5.11).



Σχήμα 5.11 Ο αγωγός ανεμιστήρων χρησιμοποιείται για να εκτρέψει τον απαγόμενο αέρα και να ανακτήσει τη χαμένη πίεση ταχύτητας.

Εάν αυτό δεν είναι εφικτό και η εισαγωγή και η επιστροφή του αέρα πρέπει να βρεθούν η μια δίπλα στην άλλη στο κατώτατο σημείο, το σχήμα 5.12 παρουσιάζει μια εναλλακτική μέθοδο εισαγωγής και επιστροφής του αέρα με την χρήση ενός κάθετου αγωγού ανεμιστήρων στο τέλος εκκένωσης του ανεμιστήρα απαγωγής.



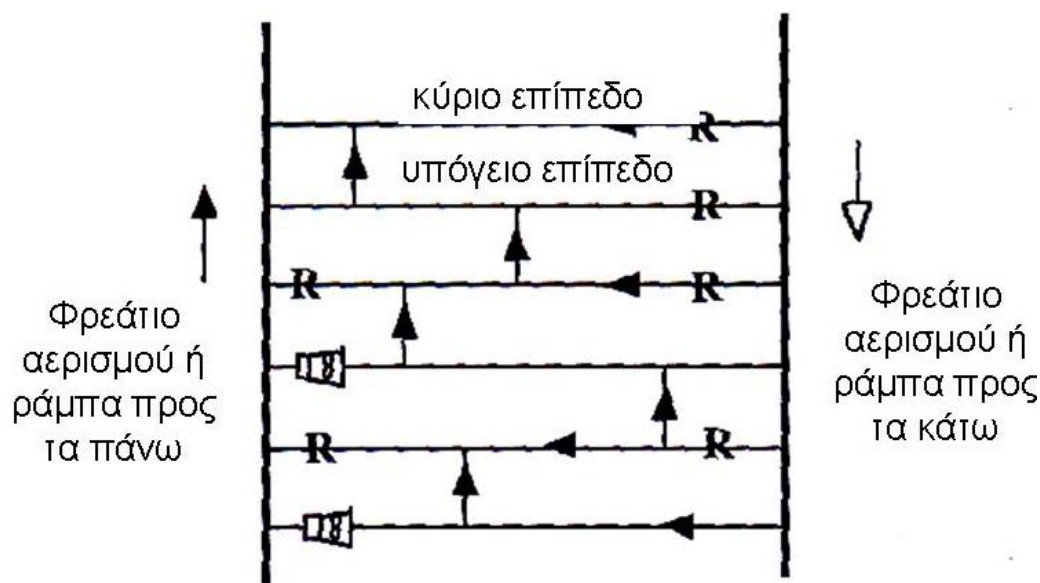
Σχήμα 5.12 Ο αγωγός ανεμιστήρων χρησιμοποιείται για να εκτρέψει τον απαγόμενο αέρα και να ανακτήσει τη χαμένη πίεση ταχύτητας.

Κοίτασμα μεταλλοφορίας

Metalliferous orebodies often occur in deposits of irregular geometry, varying from tortuous veins to massive irregularly shaped deposits of finely disseminated metal and highly variable concentrations. This causes mining layout necessarily less ordered than those for stratified deposits. In addition, η μεταβολή της κλίσης του ορυχείου και οι συνεχώς μεταβαλλόμενες τιμές των μετάλλων απαιτούν την ανάπτυξη περισσότερων μετώπων εξόρυξης ή θέσεων εργασίας, με την λειτουργία ενός μόνο μέρος τους σε οποιαδήποτε αλλαγή. Κατά συνέπεια, η μετατροπές στο δικτύου γίνονται σε καθημερινή βάση και γιαυτό πρέπει οι αλλαγές στο δίκτυο να είναι αρκετά ευέλικτες ώστε η ροή του αέρος να κατευθυνθεί οπουδήποτε.

Τα δίκτυα αερισμού για τα ορυχεία μετάλλων να είναι πιο σύνθετα απ' ότι για τα στρωματοποιημένα κοιτάσματα και είναι συνήθως τριών

διαστάσεων. Το σχήμα 5.13 επεξηγεί το σχέδιο αερισμού για πολλά ορυχεία μετάλλων, αν και η πραγματική τους γεωμετρία ποικίλει.



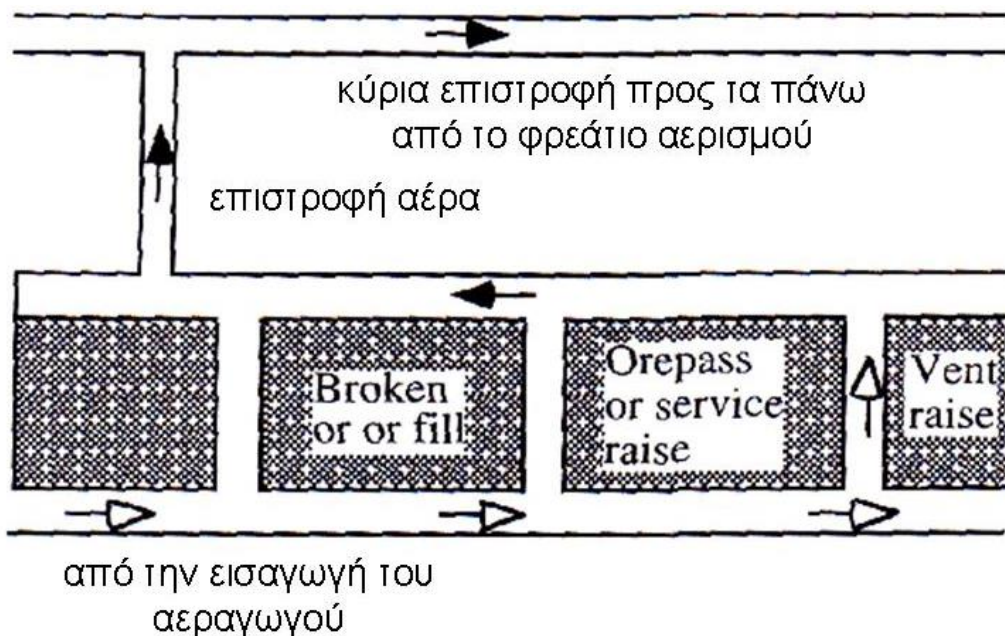
Σχήμα 5.13 Τμήμα που παρουσιάζει σύστημα αερισμού για ένα ορυχείο μετάλλων

Τα συστήματα διανομής ροών αέρος για μεμονωμένα μέτωπα εξόρυξης υπόκεινται μετατροπή, ανάλογα με τις μεταβολές της γεωμετρίας και βαθμό μεταλλοφορίας του κοιτάσματος. Στις περισσότερες από τις περιπτώσεις, όπου η κάθετη ελεγχόμενη μετακίνηση του αέρα απαιτείται, τα συστήματα ροών αέρος στα μέτωπα εξόρυξης υιοθετούν τον ανοδικό αερισμό. Αν και οι βοηθητικοί ανεμιστήρες και οι αγωγοί είναι απαραίτητοι στα μεμονωμένα drawpoints πρέπει να καταβληθεί κάθε προσπάθεια για να αξιοποιηθεί το σύστημα αερισμού της εκμετάλλευσης ώστε να διατηρηθεί η συνεχής ροή αέρος μέσω της κύριας υποδομής των μετώπων εξόρυξης. Η σειρά αερισμού πρέπει να διατηρηθεί μεταξύ των μετώπων έτσι ώστε οι καπνοί που δημιουργούνται από τις ανατινάξεις να μπορούν να καθαριστούν γρήγορα και αποτελεσματικά (σχήμα 5.14).

Ο τελευταίος στόχος για τον προγραμματισμό του αερισμού είναι να σχεδιαστεί ένα σύστημα που θα είναι σε θέση να τροφοδοτήσει επαρκώς τις στοές διέλευσης, όλο το εργαζόμενο προσωπικό και τις περιοχές εργασίας με

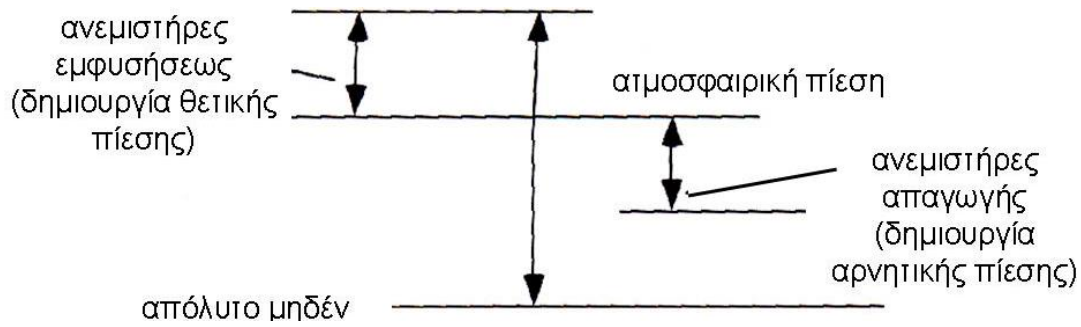
ελάχιστες δαπάνες. Ένα καλό σύστημα αερισμού υπόγειας εκμετάλλευσης αρχίζει πάντα με την αρχική ανάπτυξη του σχεδίου μεταλλείας, το οποίο πρέπει να έχει εναλλακτικές λύσεις.

Οι απαιτήσεις του όγκου αέρα μπορούν να είναι ουσιαστικές σε μερικές εκμεταλλεύσεις. Η παρουσία του μηχανών εσωτερικής καύσης, η παραγωγή αερίων και στρωματοποίηση αυτών, η θερμότητα, η υγρασία και οι μεγάλες εισαγωγές αέρα απαιτούν αύξηση στην ελάχιστη ταχύτητα αέρα που απαιτείται και ως εκ τούτου την αύξηση των απαιτήσεων σε όγκο αέρα. Στο σχήμα 5.14 παρουσιάζεται το βασικό μοντέλο σχεδιασμού μιας υπόγειας εκμετάλλευσης (Viljoen, 1990).



Σχήμα 5.14 Παράδειγμα ενός απλού συστήματος αερισμού για εξόρυξη δια συμπτυσσόμενου μετώπου ή για εξόρυξη εναλλασσομένων κοπών και γομώσεων κενών μετώπων.

Ανάλογα με το σύστημα, η πίεση ορυχείου θα μπορούσε να είναι είτε αρνητική (σύστημα απαγωγής μολυσμένου αέρα, δεδομένου ότι ο ανεμιστήρας δημιουργεί αναρρόφηση στο σύστημα αερισμού, ασκώντας πίεση στο ορυχείο κάτω από το ατμοσφαιρικό όριο) είτε θετικό (σύστημα εμφύσησης). Αυτό γίνεται επειδή η πίεση ορυχείου μετριέται κατά της ατμοσφαιρικής πίεσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.15



Σχήμα 5.15 σχέδιο που παρουσιάζει την θετική πίεση του ορυχείου από το σύστημα εμφύσησης και την αρνητική πίεση από το σύστημα απαγωγής.

Διεύθυνση ροών αέρα

Η διεύθυνση των ροών αέρα επηρεάζεται από τη θέση του κύριου ανεμιστήρα. Το αντιπροπικό είναι ένα σύστημα στο οποίο η ροή αέρος μεταφέρει την μετατόπιση βράχων σε αντίθετες κατευθύνσεις και αυτό υποδηλώνει ότι η μεταφορά της ορυκτής ύλης πραγματοποιείται στις στοές εισαγωγής. Αποτέλεσμα αυτής της μεταφοράς είναι η δημιουργία αντίστασης στην ταχύτητα του αέρα στοές έτσι ώστε οι ποσότητες σκόνης και άλλων αερίων να μην είναι υπερβολικές. Αντιθέτως υπάρχει το ομοτροπικό σύστημα στο οποίο η ροή αέρα και η εξορυγμένη rock move είναι στην ίδια κατεύθυνση ή η μεταφορά πραγματοποιείται στις στοές επιστροφής του αέρα. Αυτό το σύστημα εξασφαλίζει ότι η σκόνη, η θερμότητα, και άλλοι ρύποι από το σπασμένο πέτρωμα θα αεριστούν άμεσα προ τα έξω. Επιπλέον, το σύστημα αυτό έχει το πλεονέκτημα ότι σε περίπτωση πυρκαγιάς υπάρχει η οδός μεταφοράς η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ασφαλή έξοδο των εργαζομένων.

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει την κατεύθυνση ροών αέρος είναι η κλίση της στοάς διέλευσης αέρα. Ένα σύστημα αερισμού χαρακτηρίζεται *ανιών* όταν η ροή αέρος κινείται προς τα πάνω μέσω των κεκλιμένων μετώπων εργασίας. Το σύστημα αυτό εκμεταλλεύεται τα φυσικά αποτελέσματα του αερισμού που προκαλούνται από την προστιθέμενη θερμότητα στον αέρα. Ο *κατιών* αερισμός υιοθετείται σ' ένα συμπαγέστερο

σύστημα όπου ο αέρας και τα μεταφερόμενα υλικά που κινούνται προς τα κάτω.

5.3 Σχεδιασμός Συστήματος Αερισμού

Ο τελευταίος στόχος για τον προγραμματισμό του αερισμού είναι να σχεδιαστεί ένα σύστημα που θα είναι σε θέση να τροφοδοτήσει επαρκώς τις στοές διέλευσης, όλο το εργαζόμενο προσωπικό και τις περιοχές εργασίας με ελάχιστες δαπάνες. Ένα καλό σύστημα αερισμού υπόγειας εκμετάλλευσης αρχίζει πάντα με την αρχική ανάπτυξη του σχεδίου μεταλλείας, το οποίο πρέπει να έχει εναλλακτικές λύσεις.

Οι απαιτήσεις του όγκου αέρα μπορούν να είναι ουσιαστικές σε μερικές εκμεταλλεύσεις. Η παρουσία του μηχανών εσωτερικής καύσης, η παραγωγή αερίων και στρωματοποίηση αυτών, η θερμότητα, η υγρασία και οι μεγάλες εισαγωγές αέρα απαιτούν αύξηση στην ελάχιστη ταχύτητα αέρα που απαιτείται και ως εκ τούτου την αύξηση των απαιτήσεων σε όγκο αέρα. Στο σχήμα 5.13 παρουσιάζεται το βασικό μοντέλο σχεδιασμού μιας υπόγειας εκμετάλλευσης (Viljoen, 1990).

6. Εξομοίωση με υπολογιστή

6.1 Ιστορικά

Αρκετοί υπολογισμοί δικτύων αερισμού έχουν πραγματοποιηθεί εδώ και αιώνες. Η επικρατέστερη μέθοδος (λόγω των μαθηματικών δυσκολιών που δημιουργήθηκαν από τις διαγώνιες στοές διέλευσης αέρα) ήταν μια προσέγγιση δοκιμής και σφάλματος στην οποία οι εξισώσεις των πλεγμάτων και των συνδέσεων έγιναν συμβατές. Κατόπιν αναπτύχθηκε ένας μεγάλος αριθμός μεθόδων διαδοχικής προσέγγισης. Αυτές οι μέθοδοι, ενώ σε μερικές περιπτώσεις ήταν αρκετά αποδοτικές σε άλλες περιπτώσεις ήταν ανεπαρκείς. Η λύση του Atkinson το 1854 για μια απλή διαγώνια στοά διέλευσης αέρα και η εγκάρσια μέθοδος (1936) οι οποίες είχαν γενικές δυνατότητες εφαρμογής και ήταν σχετικά απλές είναι τα δύο ευρύτατα γνωστά παραδείγματα. Μερικές από τις μεθόδους βασίστηκαν γραφική μορφή της τετραγωνικής εξίσωσης της αντίστασης και χρησιμοποιήθηκαν στους αναλογικούς ηλεκτρικούς υπολογιστές. Σχεδόν όλες οι μέθοδοι εξετάστηκαν για τη λειτουργικότητά τους με τους ψηφιακούς υπολογιστές (Laage , 1995).

Η χρήση των υπολογιστών για την εξομοίωση του συστήματος αερισμού της εκμετάλλευσης χρονολογείται στις πρώτες μέρες του ηλεκτρικού αναλόγου, το οποίο απορρέει από τις εργασίες χρησιμοποιώντας τα ρευστά πρότυπα ροής. Το ηλεκτρικό ανάλογο είναι βασισμένο στην ομοιότητα μεταξύ των εξισώσεων των κόμβων και του πλέγματος στα δίκτυα αερισμού με τους νόμους του Kirchhoff των ηλεκτρικών δικτύων. Το ηλεκτρικό ανάλογο αποτελείται από διάφορες αντιστάσεις, ροοστάτες, πηγές τάσης, και radio valves τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για να μιμηθούν την απόδοση ενός δικτύου αερισμού. Αυτή η αναλογική μέθοδος χρησιμοποιήθηκε από τον Pavlovsky το 1918 για να μελετήσει την διαρροή του νερού.

Το 1951-52 το Πανεπιστήμιο του Nottingham καινοτόμησε την ιδέα να συνδυάσει την προσομοίωση ενός ηλεκτρικού δικτύου, τους κόμβους και τις εξισώσεις πλεγμάτων ενός δικτύου αερισμού με μια χειροκίνητη μέθοδο για την εξίσωση της αντίστασης. Αυτό οδήγησε στο σχεδιασμό του εμπορικά διαθέσιμου "National Coal Board Network Analyzer," που έγινε ευρέως αποδεκτό.

Ένας υπολογιστής ηλεκτρομηχανικού ανάλογου, στον οποίο η προσέγγιση της εξίσωσης της αντίστασης εκτελέσθηκε αυτόματα, αρχικά αναπτύχθηκε το 1950 σε ένα γερμανικό ορυχείο άνθρακα και η εμπορική διανομή του έγινε το 1952. Το 1959, οι ηλεκτρονικές γεννήτριες λειτουργίας για την προσομίωση της εξίσωσης της αντίστασης εισήχθησαν στην Ιαπωνία. Το 1964 το βρετανικό μοντέλο διατέθηκε εμπορικά και μπορεί να είναι το μοναδικό ακόμα στην αγορά. Το 1962, οι Γάλλοι κατασκεύασαν ένα ηλεκτρονικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για αρκετές δεκαετίες στα γαλλικά ορυχεία άνθρακα (Laage, 1995).

Στο τέλος της δεκαετίας του 50 διατέθηκαν στην αγορά όλοι οι ψηφιακοί υπολογιστές και αντικατέστησαν την πλειοψηφία των αναλογικών υπολογιστών. Οι πρώτοι υπολογισμοί δικτύων αερισμού με την χρήση ψηφιακών υπολογιστών αναφέρθηκαν στο Βέλγιο το 1958 και στη Γερμανία σε 1959.

Ένα προηγμένο πρόγραμμα ικανό για υπολογισμούς με υψηλή ταχύτητα για τα μεγάλα δίκτυα χρησιμοποιήθηκε στην Γαλλία το 1961. Την ίδια χρονιά άρχισαν στην Ιαπωνία οι πρώτοι υπολογισμοί δικτύων με την χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών. Οι πρώτοι υπολογισμοί δικτύων με χειρόγραφη συναρμολόγηση των πλεγμάτων έγιναν το 1964. Το πρώτο πρόγραμμα που επιτρέπει το συνυπολογισμό των χαρακτηριστικών των ανεμιστήρων αναφέρεται το 1964. Η παρουσίαση προγράμματος με αυτόματη συναρμολόγηση πλεγμάτων έγινε το 1965. Το 1966 παρουσιάστηκε ένα πρόγραμμα αποθήκευσης και αρχειοθέτησης βασισμένο στην εγκάρσια μέθοδο για την ομαλή ροή αέρα. Την ίδια χρονιά δημιουργήθηκε ένα πρόγραμμα από την IBM σε γλώσσα FORTRAN το οποίο έγινε αποδεκτό το 1967 από το British National Coal Board για την μελέτη των δικτύων αερισμού.

Προσπάθειες να συνδυαστούν οι υπολογισμοί δικτύων αερισμού με τους προαπαιτούμενους υπολογισμούς της θερμοκρασίας και της υγρασίας ξεκίνησαν στην Ιαπωνία το 1969. Ένα πρόωρο πρόγραμμα που περιέλαβε τις θερμοκρασίες, την υγρασία, το μεθάνιο και τις συγκεντρώσεις σκόνης, συν έναν εξομοιωτή μεθανίου παροδικής κατάστασης, δημιουργήθηκε το 1972 στο Πανεπιστήμιο του Pittsburgh. Το 1975 στο Πρώτο Διεθνές Συνέδριο Αερισμού Ορυχείων παρουσιάστηκαν τέσσερα προγράμματα από την Μ. Βρετανία και

τις Ηνωμένες Πολιτείες για τον συνδυασμό δικτύων και τους υπολογισμούς θερμοκρασίας και υγρασίας. Στο Τρίτο Διεθνές Συνέδριο Αερισμού Ορυχείων παρουσιάστηκε ένα πρόγραμμα από την Αυστραλία για τον υπολογισμό θερμοκρασίας, υγρασίας και των συγκεντρώσεων ραδονίου.

6.2 Αρχή Εξομοίωσης Δικτύου

Στην σημερινή εποχή, υπάρχουν καθιερωμένα μοντέλα για την εξομοίωση δικτύων αερισμού, καθώς επίσης και για τη μελέτη άλλων παραμέτρων στον αερισμό υπόγειων εκμεταλλεύσεων. Επιτρέπουν στο μηχανικό αερισμού την εξομοίωση εναλλακτικών λύσεων για τα συστήματα και την επιλογή του αποδοτικότερου και οικονομικά αποδεκτού συστήματος αερισμού.

Όλα αυτά τα προγράμματα είναι βασισμένα στην Hardy Cross μέθοδο η οποία είναι μια σειρά διαδοχικών προσεγγίσεων που βασίζονται στους δύο Νόμους του Kirchhoff για τα ηλεκτρικά κυκλώματα και την Εξίσωση του Atkinson. Αυτοί οι νόμοι δηλώνουν ότι: η συνεχόμενη ροή αέρα πρέπει να διατηρηθεί στις συνδέσεις (διατήρηση της μάζας), η ολική αλλαγή της πίεσης σ' ένα κλειστό κύκλωμα πρέπει να είναι μηδέν (συνέχεια δυναμικού), η ροή αέρα ακολουθεί την σχέση : $H = R * Q^2$, δηλαδή η απώλεια πίεσης είναι ίση με την αντίσταση επί το τετράγωνο της ποσότητας αέρα (Εξίσωση του Atkinson).

Τα προβλήματα αερισμού που μπορούν να λυθούν από προγράμματα υπολογιστών περιλαμβάνουν:

- επίλυση πολύπλοκων συστημάτων αερισμού με πολλές εισαγωγές, φρεάτια, ανεμιστήρες και μέτωπα εργασίας.
- επιλογή είδος ανεμιστήρα.
- καθορισμό ευνοϊκότερων παραμέτρων στον ανεμιστήρα για αποδοτικότερη λειτουργία του.
- καθορισμό του ποσού ρύθμισης που απαιτείται για να ελέγξει τη ροή αέρος.
- καθορισμό επίδρασης της διαρροής αέρα στο γενικό σύστημα αερισμού.
- επιλογή καταλληλότερων θέσεων για τους ανεμιστήρες και

- προσδιορισμός των πιθανών αποτελεσμάτων από τις βελτιώσεις στις στοές διέλευσης αέρα, όπως ο καθαρισμός των συντριμμιών από πτώσεις βράχων, η λείανση των στοών διέλευσης και άλλα μέσα για την ελάττωση της αντίστασης του αέρα στις στοές.

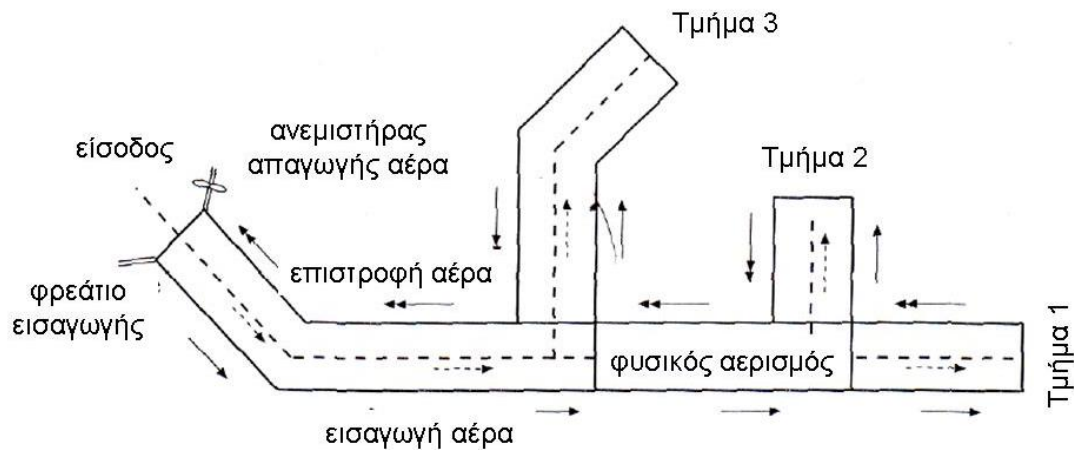
6.3 Υπολογισμός Τιμών Αντίστασης

Η ανάλυση μέσω υπολογιστή ενός υπάρχοντος συστήματος αερισμού απαιτεί ακρίβεια στην εισαγωγή δεδομένων τα οποία προέρχονται από λεπτομερείς έρευνες για την ποσότητα και την πίεση του αέρα. Οι παρακάτω παράμετροι αποτελούν το σύνολο των δεδομένων που χρειάζεται ο υπολογιστής για την ανάλυση του δικτύου:

1) *Ποσότητα Αέρα*: υπολογίζεται από το γινόμενο της διορθωμένης ταχύτητας του αέρα επί την διατομή της συγκεκριμένης περιοχής.

2) *Πίεση Αέρα* : υπολογίζεται από τον τύπο $H_T = H_S + H_V + H_Z$, δηλαδή από το σύνολο της κινητικής, της δυναμικής και της μηχανικής ενέργειας του αέρα.

3) *Δημιουργία σχεδιαγράμματος*: ένα σχεδιάγραμμα είναι μια σχηματική αναπαράσταση του ορυχείου (σχήμα 6.1). Ένα δίκτυο αερισμού μπορεί να αντιμετωπισθεί ως μεγάλο σύστημα υδραυλικών εγκαταστάσεων. Πρώτα σχεδιάζονται οι κύριες εισαγωγές και οι στοές απαγωγής του αέρα, στην συνέχεια οι συνδέσεις εισαγωγών – στοών απαγωγής και τέλος η αύξηση ύψους και οι ράμπες μεταξύ των οριζόντιων επιπέδων. Σύνδεση χαρακτηρίζεται η ένωση δύο ή περισσότερων διακλαδώσεων. Όλες οι διακλαδώσεις πρέπει να έχουν συνδέσεις μέσα και έξω και κάθε σύνδεση πρέπει να έχει τουλάχιστον δύο συνδεόμενες διακλαδώσεις. Αφού ολοκληρωθεί η συνδεσμολογία του δικτύου τοποθετούνται οι ανεμιστήρες και οι ρυθμιστές στις αντίστοιχες θέσεις τους.



Σχήμα 6.1 Σχεδιάγραμμα εκμετάλλευσης άνθρακα τεσσάρων τμημάτων.

4) **Υπολογισμός Αντιστάσεων:** Μεταφέροντας τους υπολογισμούς της ποσότητας και της πίεσης στο χάρτη του σχεδιαγράμματος, η αντίσταση για κάθε διακλάδωση της στοάς διέλευσης αέρα στο σχέδιο μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τον τύπο $R = H / Q^2$ (πίνακας 6.1), όπου H είναι η πίεση και Q η ποσότητα αέρα.

Σύνδεση	Μήκος (m)	Αριθμός εισόδων	Έναρξη Q	Τέλος Q	Ave Q	Αύξηση /Απώλεια	R	Σταθερά K

Πίνακας 6.1 πίνακας που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της αντίστασης στο ορυχείο και της σταθεράς K .

5) **Εισαγωγή δεδομένων προσομοίωσης:** τα οποία αφορούν τις διακλαδώσεις, τους ανεμιστήρες και τις συνδέσεις.

- Δεδομένα διακλαδώσεων:

Ανάλογα με το πρόγραμμα που χρησιμοποιείται και τις επιλογές που έχει, τα στοιχεία των διακλαδώσεων περιλαμβάνουν: τον τύπο, τις συνδεσμολογίες των συνδέσεων μέσα και έξω (στην έναρξη και στο τέλος), την υπολογισμένη αντίσταση (απώλειες τριβών / απώλειες κραδασμών) και τις τιμές που υπολόγισε το πρόγραμμα και βασίστηκε στα φυσικά χαρακτηριστικά των στοών διέλευσης αέρα (μήκος, μορφή, παράγοντας K). Από όλες τις παραπάνω παραμέτρους η σημαντικότερη είναι αυτή της αντίστασης.

Ο ακριβής υπολογισμός της αντίστασης μπορεί να γίνει λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές που έχει η αντίσταση στην σταθερή πυκνότητα αέρα:

$$R = R_s \frac{w}{0.075}$$

όπου w = μέση πυκνότητα, $\frac{w_i + w_e}{2}$, kg/m^3 και R_s η αντίσταση στην σταθερή πυκνότητα αέρα.

- Δεδομένα συνδέσεων:

Τα δεδομένα συνδέσεων περιλαμβάνουν τα υψόμετρα και σε μερικά προγράμματα τα air state point data (θερμοκρασίες και πυκνότητες).

- Δεδομένα ανεμιστήρων:

Για κάθε ανεμιστήρα τα δεδομένα περιλαμβάνουν ένα αριθμό αναγνώρισης του ανεμιστήρα, μια θέση διακλάδωσης (όπου εκεί βρίσκεται ο ανεμιστήρας), οι πληροφορίες για την καμπύλη του ανεμιστήρα (αριθμός σημείων, μέθοδος καμπύλης, και η σχέση της ποσότητας με την πίεσης αέρα). Όλες οι καμπύλες ανεμιστήρων σχεδιάζονται βασιζόμενες στην σταθερή πυκνότητα αέρα $0,075 \text{ kg/m}^3$.

6.3 Χρήση Προγραμμάτων Εξομοίωσης Αερισμού

Η εξομοίωση των δικτύων στους υπολογιστές παρέχει δύο πράγματα: πώς οι ροές αέρα διανέμονται σε όλο το δίκτυο και πόση πίεση χρειάζεται για να εκτελεστεί η εργασία αυτή. Τα αποτελέσματα από την πραγματοποίηση («τρέξιμο») της εξομοίωσης μπορούν να αποκαλύψουν που ενεργεί η αντίσταση και σε ποιες διακλαδώσεις υπάρχουν υψηλές ταχύτητες αέρα. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα αυτά μέσω του προγράμματος εξομοίωσης μπορούμε να δούμε που μπορούν να τοποθετηθούν οι ανεμιστήρες, που οι ρυθμιστές, οι παράλληλες στοές διέλευσης ή οι ενισχυτές ροής.

Η ερμηνεία της λέξης εξομοίωση χαρακτηρίζει την πραγματική λειτουργία που κάνει ο υπολογιστής. Το πρόγραμμα «μιμείται», βασιζόμενο στα δεδομένα που του έχει εισάγει ο χρήστης, τι πόσο διανομής αέρα θα έχουμε στην εκμετάλλευση και ποιιά θα είναι η πιθανή πίεση στο δίκτυο και τίποτα παραπάνω. Ο άνθρωπος είναι αρμόδιος για την δημιουργία και την λειτουργία του προγραμματισμού στον αερισμό του ορυχείου

Υποθέτοντας ότι όλα τα προβλήματα έχουν ξεπεραστεί, η ροή αέρος που προβάλλεται από τον υπολογιστή ισορροπεί με τις πραγματικές μετρήσεις και τα σημεία λειτουργίας όλων των ανεμιστήρων προσεγγίζουν κατά πολύ την πραγματικότητα, το δίκτυο είναι έτοιμο για τον προγραμματισμό του αερισμού. Ο παρακάτω κατάλογος περιλαμβάνει πιθανές εργασίες διαμόρφωσης:

- Νέες εκμεταλλεύσεις.
- Νέες στοές διέλευσης ροών αέρα στο υπάρχον ορυχείο.
- Μεγαλώνοντας τη διατομή παλαιών ορυγμάτων.
- Κλείσιμο παλαιών στοών διέλευσης ροών αέρα.
- Παραλληλισμός σε στοές στο υπάρχον ορυχείο.
- Νέοι ανεμιστήρες ή νέες θέσεις τοποθέτησης αυτών.
- Αλλαγή λεπίδων ή αλλαγή ταχύτητας των ανεμιστήρων.
- Μετακίνηση ανεμιστήρων.
- Επέκταση πρωτευόντων κυκλωμάτων.

- Μειώνοντας το μέγεθος πρωτευόντων κυκλωμάτων.
- Σύνδεση με άλλες εκμεταλλεύσεις ή κυκλώματα.
- Τεστ των αποτελεσμάτων για αύξηση πίεσης ή συνέχιση του αέρα από την πίεση λόγω του φυσικού αερισμού.
- Προβολή της διάδοσης των μολυσματικών παραγόντων.
- Διεξαγωγή των ασκήσεων για πυρκαγιά.
- Καθορισμός καλύτερων θέσεων για αισθητήρες πυρανίχνευσης.
- Εξετάζοντας πιθανά σενάρια (κατολισθήσεις, πυρκαγιές, κλπ) και
- Εκτελώντας μελέτες ευαισθησίας.

6.5 Προγράμματα Εξομοίωσης Αερισμού

1) Michigan Tech, Ventilation Program

Αυτό το πρόγραμμα χρησιμοποιεί την Hardy Cross μέθοδο για την ισορροπία του δικτύου. Οι τροποποιήσεις που γίνονται περιλαμβάνουν: την αναγνώριση των στοών διέλευσης αέρα, τους υπολογισμούς της φυσικής πίεσης του αερισμού, την αποτελεσματική προσέγγιση της καμπύλης των ανεμιστήρων και την αεροδυναμική τους.

2) MFIRE 2 .2 - Bureau of Mines

Το πρόγραμμα αυτό δημιουργήθηκε στο Πανεπιστήμιο του Michigan και προέρχεται από προηγούμενες εκδόσεις του Michigan Tech. Εξομοιώνει καθημερινά προβλήματα στο δίκτυο αερισμού της εκμετάλλευσης και διαμορφώνει την ανταπόκριση που θα έχει το δίκτυο κάτω από την επιρροή θερμικών διαταραχών, όπως οι πυρκαγιές. Επιπλέον, το πρόγραμμα υπολογίζει την συγκέντρωση, τη διανομή και τη διάδοση των μολυσματικών παραγόντων σε ένα σύστημα αερισμού.

3) Mine Ventilation Services, VNETPC 3.1, CLIMSIM

Το VNETPC είναι ένα πρόγραμμα ανάλυσης δικτύων μεγάλης έκτασης με γραφική παραγωγή που παρέχεται από έναν σχεδιαστή plotter.

Το πρόγραμμα CLIMSIM εξομοιώνει τους παράγοντες εκείνους που έχουν επιπτώσεις στις κλιματολογικές συνθήκες τις εκμετάλλευσης.

4) *Floyd C. Bossard and Associates, MIVENDES*

Το πρόγραμμα αυτό εκτός από τον υπολογισμό των τιμών των αντιστάσεων και της απαιτούμενης ιπποδύναμης μας παρέχει:

- Θέρμανση του αέρα λόγο του ηλεκτρομηχανικού εξοπλισμού, των εκρήξεων και της φυσικής οξειδωσης και τρόπους για την ψύξη αυτού.
- Ψυχομετρία αέρα, θερμοκρασία, υγρασία, σταθερά αερίου, πίεση ατμού ύδατος, και πίεση ξηρού αέρα.
- Αέρια λόγο του πετρελαίου, συγκεντρώσεις από νιτρικά και ανθρακικά οξείδια.
- Εκπομπές μεθανίου και ραδονίου, ροή αέρα, τοποθεσίες ανεμιστήρων.

5) *Geomin, Ventilation Design*

Αυτό το σχεδιαστικό πακέτο παρέχει την κατασκευή τρισδιάστατων δικτύων με τεχνητό αερισμό, φυσικό εξαερισμό ή και τα δύο. Ο χρήστης μπορεί να καθορίσει τις ελάχιστες απαιτήσεις ροών αέρα για κάθε διακλάδωση όπως και στα μέτωπα εργασίας. Οι ανεμιστήρες μπορούν να είναι εσωτερικοί ή εξωτερικοί και μπορούν να αντιμετωπιστούν είτε ως σταθερές είτε ως μεταβλητές πηγές πίεσης.

6) *Hall, MINVENT, VENTDAT*

Το *MINVENT* είναι ένα πρόγραμμα ανάλυσης του δικτύου αερισμού το οποίο χρησιμοποιεί το πρόγραμμα *VENTDAT* για να δημιουργήσει τα αρχεία δεδομένων. Το *MINVENT* χρησιμοποιεί την Hardy Cross μέθοδο και ασυμπιέστη ροή στο δίκτυο.

7) *HTME (Cerchar), P.C. Vent, VENDIS*

Το πρόγραμμα αυτό παρέχει στον χρήστη τους υπολογισμούς του δικτύου και την προβολή αυτών μέσω του γραφικού περιβάλλοντος της οθόνης. Τα δεδομένα του δικτύου μπορούν να εισαχθούν με την χρήση του πληκτρολόγιου ή ενός ψηφιοποιητή. Η εισαγωγή των δεδομένων

περιλαμβάνει την αντίσταση βάρους, τη θερμοκρασία και τη θέση των συνδέσεων σε τρεις διαστάσεις. Τα αποτελέσματα προβάλλονται στη οθόνη και ο χρήστης μπορεί να τροποποιήσει την αντίσταση και θερμοκρασία και να δει τα νέα αποτελέσματα. Η κλίμακα και η όψη του δικτύου μπορούν να αλλάξουν. Όταν το δίκτυο προβάλλεται σε ορισμένες γωνίες, το αποτέλεσμα εμφανίζεται τρισδιάστατο. Η εργασία μπορεί επίσης να εκτυπωθεί σε plotter ή απλό εκτυπωτή.

8) *MINE FIRE SIMULATOR - Strata Mechanics Research Inst., Polish Academy of Science Cracow, Poland*

Το πρόγραμμα ενσωματώνει τρία μέρη: ένα συμβατικό πρόγραμμα υπολογισμού δικτύων, ένα πρόγραμμα εξομοίωσης της πηγής πυρκαγιάς (σε πραγματικό χρόνο εξομοίωση των προϊόντων θερμότητας και καύσης) και ένα πρόγραμμα για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του αέρα και την αλλαγή του λόγω της πυρκαγιάς.

7. Μελέτη Αερισμού με το VULCAN

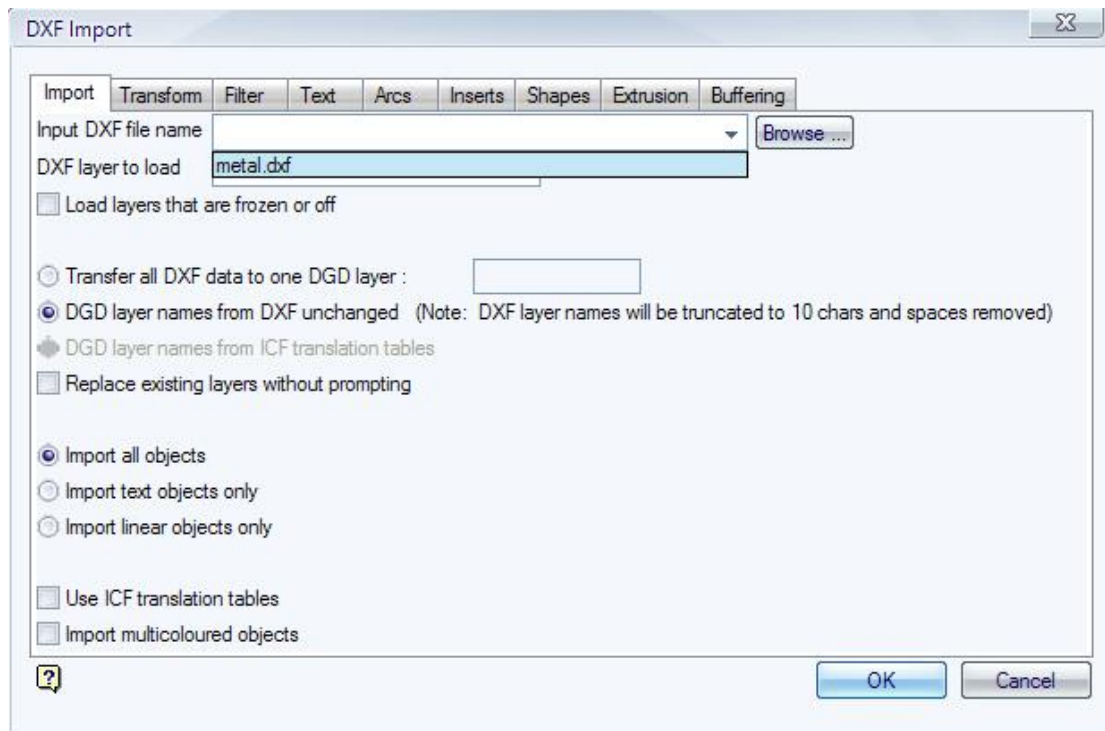
7.1 Γενικά

Για την εξομοίωση της ροής του αέρα στο δικτύου χρησιμοποιήθηκε το σχεδιαστικό πακέτο VULCAN 3D στο οποίο έγινε η εισαγωγή των σχετικών παραμέτρων (διακλαδώσεις, ανεμιστήρες, ποσότητες εισαγωγής και εξαγωγής αέρα, αντιστάσεις) του δικτύου αερισμού. Οι σχεδιαστικές πληροφορίες της γεωμετρίας της εκμετάλλευσης έγιναν με την εισαγωγή υπάρχοντος αρχείου DXF.

Το VULCAN 3D για την εξισορρόπηση του δικτύου χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο Hardy – Cross.

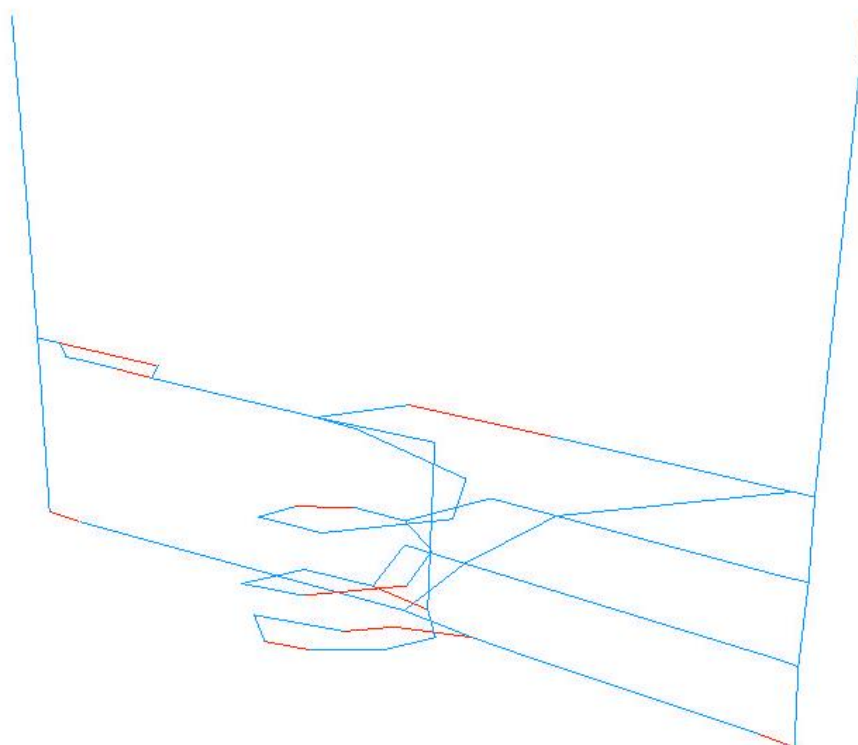
7.2 Εισαγωγή Σχεδιαστικών Πληροφοριών

Για την εισαγωγή του αρχείου σχεδιαστικών πληροφοριών της εκμετάλλευσης χρησιμοποιούμε την λειτουργία **File > Import Export > Import DXF** (Σχήμα 7.1).



Σχήμα 7.1: Εισαγωγή αρχείου σχεδιαστικών πληροφοριών.

Η σχεδιαστική μορφή που παρουσιάζει αρχικά η υπόγεια εκμετάλλευση απεικονίζεται στο σχήμα 7.2.

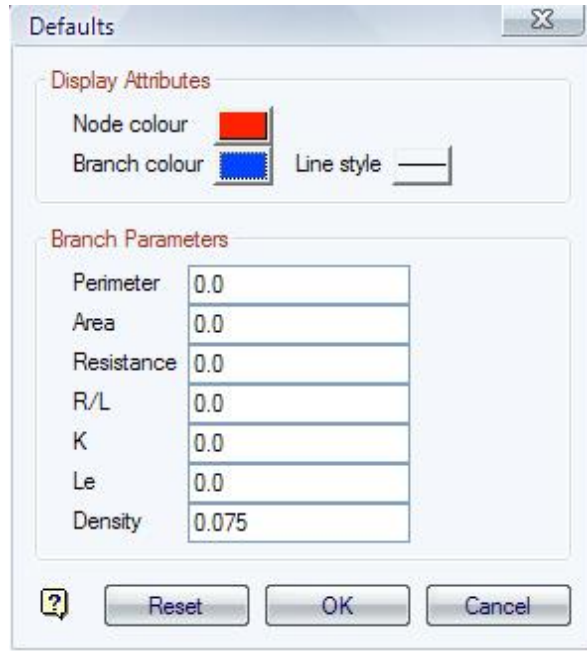


Σχήμα 7.2: Αρχική απεικόνιση του σχεδιαγράμματος του ορυχείου μετά την εισαγωγή των σχεδιαστικών δεδομένων.

7.3 Εισαγωγή Δεδομένων

Για να εμφανίσουμε την περιγραφή οποιουδήποτε αντικειμένου στο σχήμα 7.2 χρησιμοποιούμε την λειτουργία: **Analyze > Label > Object Name** και επιλέγουμε το **Layer** που μας ενδιαφέρει (το Layer του δικτύου). Η μορφή που θα έχει το σχήμα του δικτύου παρουσιάζεται στο σχήμα 7.3.

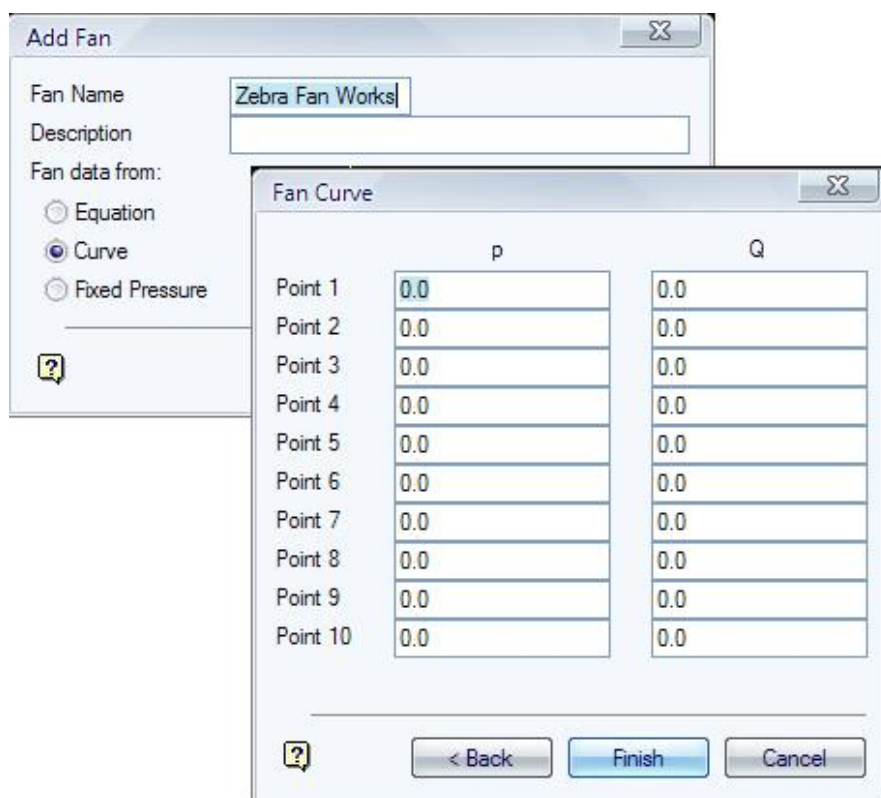
περιοχή, την αντίσταση, την ποσότητα, τον συντελεστή Κ, το L_e και αντίσταση ανά μονάδα μήκους του δικτύου.



Σχήμα 7.4: Παράθυρο εισαγωγής των δεδομένων του δικτύου

7.3.2 Δημιουργία Ανεμιστήρα

Για να δημιουργήσουμε έναν ανεμιστήρα χρησιμοποιούμε την λειτουργία **Underground > Ventilation > Open Fan File** και δίνουμε όνομα και περιγραφή του ανεμιστήρα. Στην συνέχεια για να εισάγουμε τα δεδομένα του ανεμιστήρα χρησιμοποιούμε την λειτουργία **Underground > Ventilation > Add Fan**. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.5α στο μενού έχουμε τρεις επιλογές εισαγωγής δεδομένων: ανάλογα με την εξίσωση, την καμπύλη και την ποσότητα αέρα του ανεμιστήρα. Τα δεδομένα που είχαμε αφορούσαν την ποσότητα και την πίεση σε διάφορα σημεία της καμπύλης (σχήμα 7.5β) του ανεμιστήρα και γιαυτό επιλέχθηκε η ανάλογη λειτουργία.



Σχήμα 7.5: Εισαγωγή των δεδομένων του ανεμιστήρα ανάλογα με την καμπύλη.

Ακολουθεί ο πίνακας των δεδομένων για κάθε σημείο της καμπύλης του ανεμιστήρα:

Πίνακας 1

	Ποσότητα (Q)	Πίεση (P)
Σημείο 1	180	9
Σημείο 2	190	7.5
Σημείο 3	200	7
Σημείο 4	220	6.5
Σημείο 5	240	6
Σημείο 6	260	5

7.3.3 Εισαγωγή Διακλαδώσεων

Κάθε διακλάδωση στο δίκτυο αερισμού ορίζεται από δύο κόμβους (αρχικός και τελικός) και από αριθμητικά δεδομένα τα οποία δίνουν τα χαρακτηριστικά του αεραγωγού. Το δίκτυο αποτελείται από 61 διακλαδώσεις και 52 κόμβους που σχηματίζουν γραμμές σε μια ενότητα. Τα δεδομένα των διακλαδώσεων που χρησιμοποιήθηκαν βρίσκονται στο παράρτημα 1.

Για να εισάγουμε τα δεδομένα των διακλαδώσεων χρησιμοποιούμε την λειτουργία **Underground > Ventilation > Create Branch**. Στο αναδυόμενο

μενού (σχήμα 7.6) εμφανίζονται τα στοιχεία της διακλάδωσης (κόμβοι και ονομασία), η αντίσταση που παρουσιάζει, η πυκνότητα, η στατική πίεση και ο τύπος ροής.

Σχήμα 7.6 Εισαγωγή των δεδομένων της διακλάδωσης με γνωστή αντίσταση.

Ο προσδιορισμός της αντίστασης μπορεί να γίνει με τέσσερις τρόπους:

- α) **Known (γνωστή)**: σταθερή αντίσταση. (σχήμα 7.6)
- β) **R/L**: αντίσταση ανά μονάδα μήκους.
- γ) **Atkinson Equation** (εξίσωση του Atkinson): αντίσταση από την εξίσωση του Atkinson. (σχήμα 7.7)
- δ) **$R=p/Q^2$** : αντίσταση βασισμένη στο Νόμο Τετραγώνων.

Branch Data

Branch: 21 Start Node: 24 End Node: 25

Description: 3120 Level

Length: 418.04306 Auto

Get perimeter and area from: Primitive

Perimeter: 60.0 Area: 225.0

Type: Normal

Resistance:

Known 0.03176

R/L 0.0

Atkinson Equation K: 75.0 Le: 0.0

$R=p/Q^2$ p: 0.0 Q: 0.0

Density:

Known 0.075

Branch Static Pressure:

Known 0.0

$XNVP=R_o \cdot \Delta E \cdot g$

Flow Type:

Unregulated

Fixed Quantity 0.0

Fan File: Name:

Inflow 0.0

Contaminant 0.0

OK Cancel

Σχήμα 7.7 Προσδιορισμός της αντίστασης με την χρήση της εξίσωση του Atkinson.

Ο προσδιορισμός του τύπου ροής του αέρα (flow type) μπορεί να γίνει επίσης με τέσσερις τρόπους :

- α) **Unregulated** (απροσδιόριστη).
- β) **Fixed Quantity** (επιθυμητή ποσότητα ροής) (σχήμα 7.8).
- γ) **Fan** (ανεμιστήρας) : εισαγωγή ανεμιστήρα (σχήμα 7.9).
- δ) **Inflow**: εισαγωγή αέρα.
- ε) **Contaminant** (ρυπαντής) : εισαγωγή ρυπαντή.

Branch Data

Branch: 21 Start Node: 24 End Node: 25

Description: 3120 Level

Length: 418.04306 Auto

Get perimeter and area from: Primitive

Perimeter: 60.0 Area: 225.0

Type: Normal

Resistance:

Known 0.03176

R/L 0.0

Atkinson Equation K: 75.0 Le: 0.0

$R=\rho/Q^2$ ρ : 0.0 Q: 0.0

Density:

Known 0.075

Branch Static Pressure:

Known 0.0

$XNVP=R_0 \cdot \Delta E \cdot g$

Flow Type:

Unregulated

Fixed Quantity 0.0

Fan File: Name:

Inflow 0.0

Contaminant 0.0

OK Cancel

Σχήμα 7.8 Προσδιορισμός της ροής του αέρα με εισαγωγή της επιθυμητής ροής στο δίκτυο.

Branch Data

Branch: 21 Start Node: 24 End Node: 25

Description: 3120 Level

Length: 418.04306 Auto

Get perimeter and area from: Primitive

Perimeter: 60.0 Area: 225.0

Type: Normal

Resistance:

Known 0.03176

R/L 0.0

Atkinson Equation K: 75.0 Le: 0.0

$R=p/Q^2$ pi: 0.0 Q: 0.0

Density:

Known 0.075

Branch Static Pressure:

Known 0.0

$XNVP=R_o \cdot \Delta E \cdot g$

Flow Type:

Unregulated

Fixed Quantity 0.0

Fan File: Name:

Inflow 0.0

Contaminant 0.0

OK Cancel

Σχήμα 7.9 Προσδιορισμός της ροής του αέρα στο δίκτυο με την εισαγωγή ανεμιστήρα.

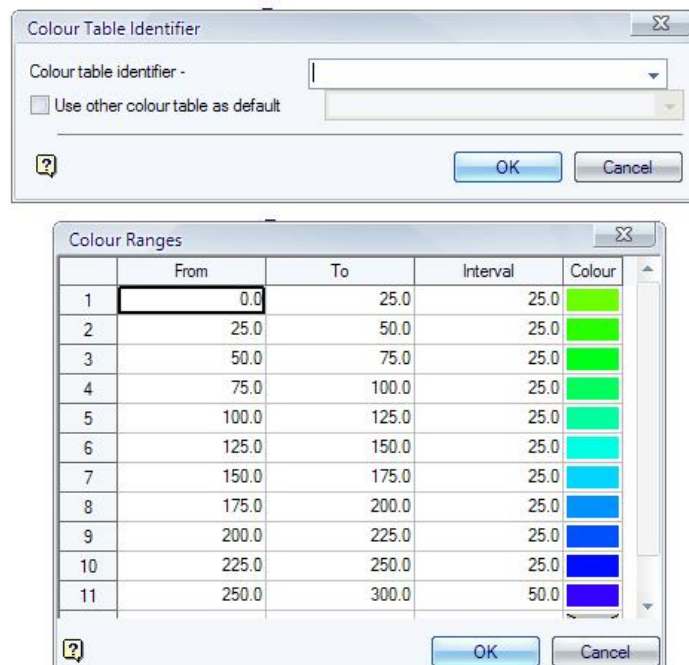
Το VULCAN επιτρέπει στον χρήστη να προβάλει στην οθόνη την συνολική λίστα με της διακλαδώσεις και τα αντίστοιχα δεδομένα αυτών, δίνοντας του τη δυνατότητα να ελέγξει και να τροποποιήσει τις καταχωρήσεις των δεδομένων. Για την λειτουργία αυτή χρησιμοποιούμε την εντολή **Underground > Ventilation > Edit All Branch** η οποία μας εμφανίζει την λίστα όλων των διακλαδώσεων που έχουν καταχωρηθεί στο δίκτυο (σχήμα 7.10).

Branch ID	Description	From Node	To Node	Auto Length	Length	Get Perimeter and Area from Primitive	Primitive	Perimeter	Area
1	Ramp	2	1	<input checked="" type="checkbox"/>	150.784615	<input type="checkbox"/>		60.0	22Ε
2	2700 Level	2	3	<input checked="" type="checkbox"/>	139.0	<input type="checkbox"/>		60.0	22Ε
3	2700 Level	3	4	<input checked="" type="checkbox"/>	402.124359	<input type="checkbox"/>		60.0	22Ε
4	2700 Level	4	5	<input checked="" type="checkbox"/>	56.0803	<input type="checkbox"/>		60.0	22Ε
5	2700 Level	6	2	<input checked="" type="checkbox"/>	163.30646	<input type="checkbox"/>		60.0	22Ε
6	2700 Level	7	6	<input checked="" type="checkbox"/>	851.429386	<input type="checkbox"/>		60.0	22Ε
7	2700 Level Fan	8	7	<input checked="" type="checkbox"/>	97.29851	<input type="checkbox"/>		60.0	22Ε
8	2840 level - R	9	10	<input checked="" type="checkbox"/>	185.0	<input type="checkbox"/>		60.0	22Ε
9	2840 Level	10	11	<input checked="" type="checkbox"/>	136.0	<input type="checkbox"/>		60.0	22Ε
10	2840 Level	11	12	<input checked="" type="checkbox"/>	571.007881	<input type="checkbox"/>		60.0	22Ε
11	2840 Level	12	13	<input checked="" type="checkbox"/>	43.104524	<input type="checkbox"/>		60.0	22Ε
12	Level Ra	14	15	<input checked="" type="checkbox"/>	185.994624	<input type="checkbox"/>		60.0	22Ε

Σχήμα 7.10 Προβολή όλων των διακλαδώσεων και των δεδομένων τους.

7.4 Δημιουργία Υπομνήματος

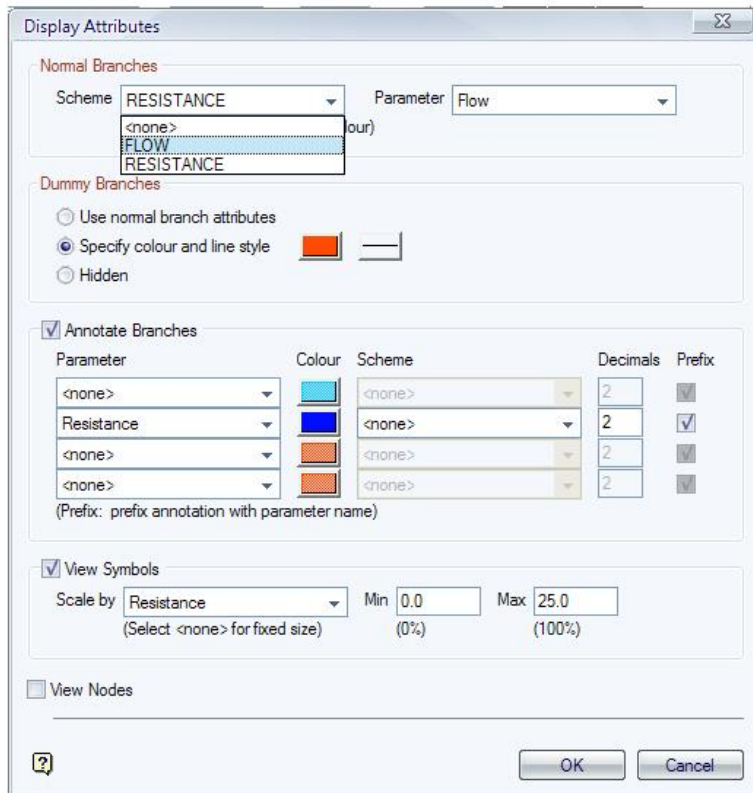
Για την δημιουργία του υπομνήματος του δικτύου χρησιμοποιούμε την λειτουργία **Analyse > Legend Edit > Create >** επιλέγουμε την εντολή **CONTOUR**. Στην συνέχεια γράφουμε την ονομασία του υπομνήματος και επιλέγουμε τους διαφορετικούς χρωματισμούς για κάθε τιμή (σχήμα 7. 11).



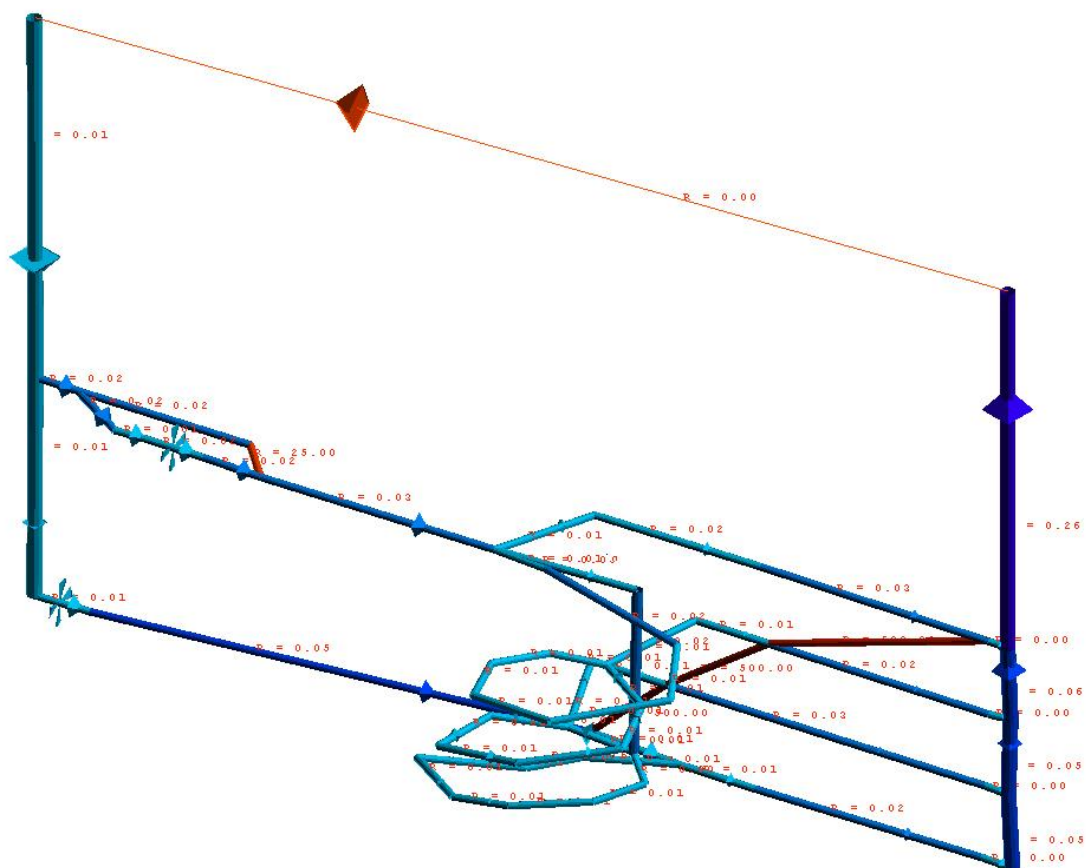
Σχήμα 7.11 Δημιουργία του υπομνήματος του δικτύου.

Για τις ανάγκες της εξομοίωσης του δικτύου δημιουργήθηκαν δύο υπομνήματα, ένα για την ροή του αέρα και ένα για την αντίσταση αέρα αντίστοιχα.

Για να εμφανιστούν οι πληροφορίες των διακλαδώσεων καθώς και του υπομνήματος χρησιμοποιούμε την λειτουργία **Underground > Ventilation > Display Attributes**. Στον πίνακα που εμφανίζεται μπορούμε να επιλέξουμε (σχήμα 7.12): στο πρώτο πλαίσιο (**Normal Branches**) το όνομα του υπομνήματος που μας ενδιαφέρει και την παράμετρο στην οποία αναφερόμαστε, στο δεύτερο πλαίσιο (**Dummy Branches**) μπορούμε να ορίσουμε το χρώμα με το οποίο θα εμφανίζεται η «εικονική» διακλάδωση, στο τρίτο πλαίσιο (**Annotate Branches**) καθορίζουμε ποιες πληροφορίες θα αναγράφονται δίπλα σε κάθε διακλάδωση (π.χ. ροή αέρα, αντίσταση), στο τέταρτο πλαίσιο (**View Symbols**) μπορούμε να ρυθμίσουμε το μέγεθος του βέλους που απεικονίζει την ροή του αέρα στην διακλάδωση και στο πέμπτο και τελευταίο πλαίσιο (**View Notes**) επιλέγουμε αν θέλουμε να εμφανίζονται οι αριθμοί των συνδέσεων που προσδιορίζουν την κάθε διακλάδωση.



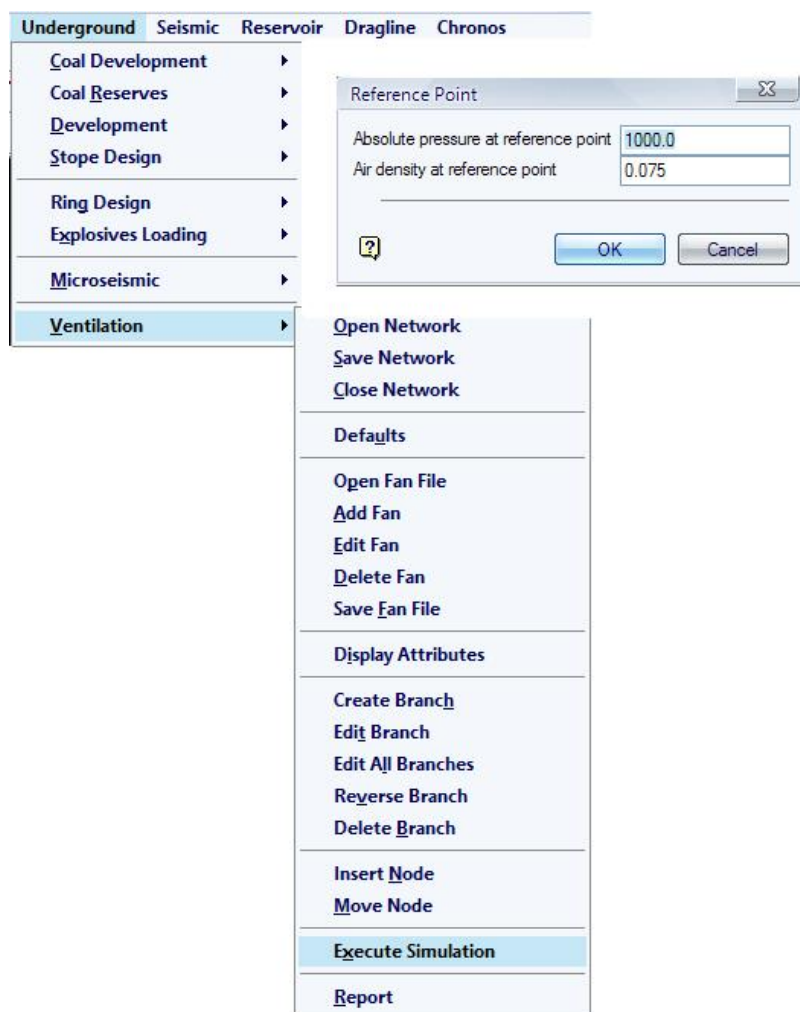
Σχήμα 7.12 Επιλογή του τρόπου εμφάνισης των πληροφοριών κάθε διακλάδωσης.



Σχήμα 7.14 Απεικόνιση του δικτύου με υπόμνημα για την αντίσταση του αέρα.

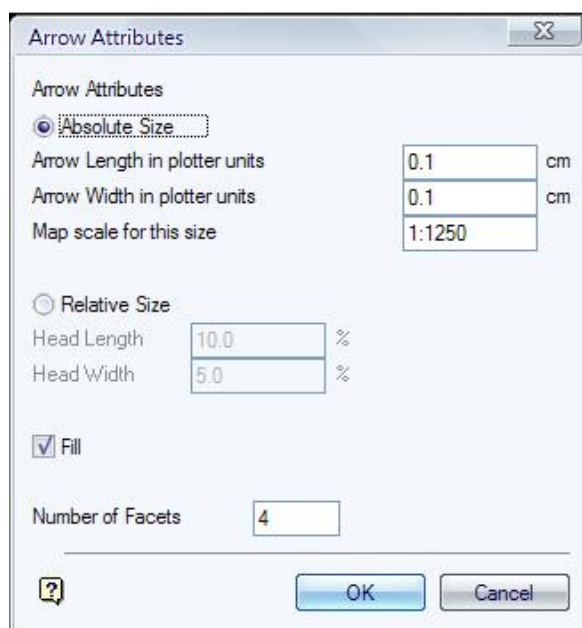
7.5 Εκτέλεση Εξομοίωσης

Για την εξομοίωση του δικτύου αερισμού χρησιμοποιούμε την λειτουργία **Underground > Ventilation > Execute Simulation**. Το VULCAN ζητά από τον χρήστη να του προσδιορίσει την απόλυτη πίεση και πυκνότητα που υπάρχει στην στοά εισαγωγής αέρα από την επιφάνεια (σχήμα 7.15).



Σχήμα 7.15 Εκτέλεση της εξομίωσης του δικτύου αερισμού

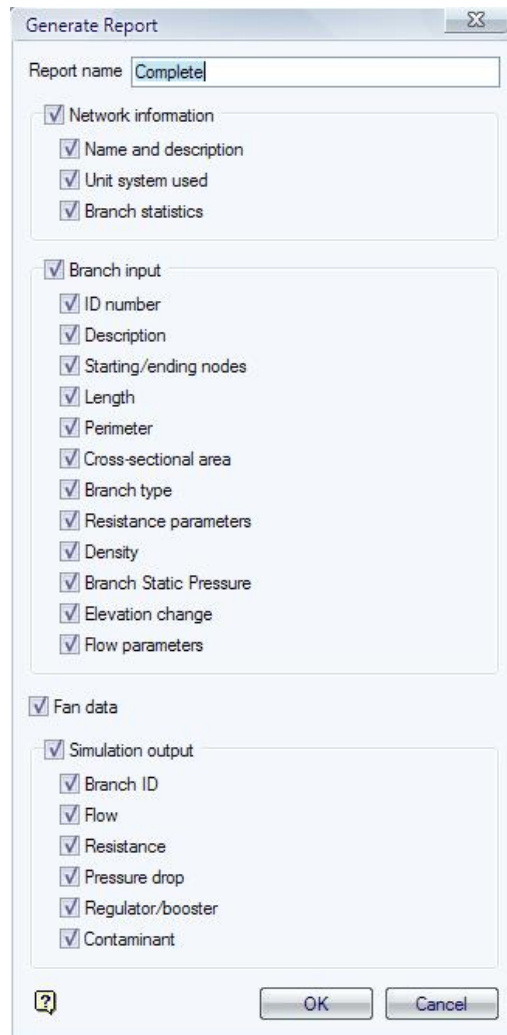
Για κάθε διακλάδωση ξεχωριστά το πρόγραμμα μας ζητά να ρυθμίσουμε την εμφάνιση των βελών ροής (σχήμα 7.16).



Σχήμα 7.16 Τροποποίηση εμφάνισης των βελών ροής των διακλαδώσεων.

7.6 Εμφάνιση των αποτελεσμάτων της εξομοίωσης

Για να εμφανίσουμε τα αποτελέσματα από την εκτέλεση της εξομοίωσης χρησιμοποιούμε την λειτουργία **Underground > Ventilation > Report** (σχήμα 7.17). Ο πίνακας με τις πληροφορίες της εξομοίωσης βρίσκεται στο παράρτημα 2.



Σχήμα 7.17: Επιλογή των πληροφοριών που περιλαμβάνονται στα αποτελέσματα της εξομοίωσης.

Η εκτέλεση της εξομοίωσης της ροής του αέρα στο δίκτυο ήταν ομαλή δεν παρουσίασε κανένα ελάττωμα στην λεπτομερή αναφορά καθώς επίσης και στα αποτελέσματα τα οποία προβλήθηκαν από το πρόγραμμα (βλ. παράρτημα 2).

Οι σημαντικότεροι παράγοντες που απαιτούν μεγαλύτερη προσοχή είναι η αντίσταση του αέρα, η οποία επηρεάζει την ροή του αέρα στο δίκτυο και η ποσότητα ροής του αέρα η οποία έχει άμεση σχέση με την επάρκεια αέρα στα διάφορα μέτωπα εξόρυξης.

Στα αποτελέσματα της εξομοίωσης δεν παρουσιάστηκε καμία αρνητική τιμή για την αντίσταση R του αέρα ενώ η επιθυμητή ποσότητα (Fixed

Quantity) στα πέντε επιλεγμένα μέτωπα εκμετάλλευσης επιτεύχθηκε χωρίς να καταστεί αναγκαία η προσθήκη επιπλέον ανεμιστήρα.

8. Συμπεράσματα

Παραρτήματα

1.