



Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων

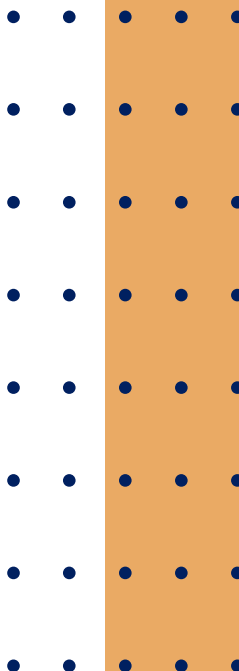
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σχεδιασμός και μελέτη κυκλώματος αερισμού σε
υπόγεια εκμετάλλευση

ΚΑΡΑΚΟΥΛΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΞΗΡΟΥΔΑΚΗΣ
ΕΠΙΚ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΧΑΝΙΑ
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ, 2024





Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ
ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΣΕ ΥΠΟΓΕΙΑ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΑΡΑΚΟΥΛΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Γ. ΞΗΡΟΥΔΑΚΗΣ, ΕΠ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Α. ΓΙΩΤΗΣ, ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Γ. ΣΑΡΑΤΣΗΣ, ΕΔΙΠ

ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ, 2024

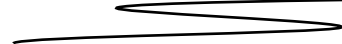
Copyright © ΚΑΡΑΚΟΥΛΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ, 2024

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Επίσης σημειώνεται ότι η παρούσα εργασία υποβάλλεται σε αξιολόγηση και οι απόψεις που περιέχονται δε σημαίνει αποδοχή των απόψεων της/του συγγραφέα (Νόμος 5343/1932, άρθρο 202).

Ακτή Κονδύλη, Πειραιάς
Σεπτέμβριος 2024, Πλοίο Ελ. Βενιζέλος



Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στη μελέτη των συστημάτων αερισμού, συνδυάζοντας τις κλασικές αρχές ρευστομηχανικής με σύγχρονες τεχνικές προσομοίωσης και ανάλυσης. Εστιάζει στον σχεδιασμό και τη μελέτη συστημάτων αερισμού σε υπόγεια εκμετάλλευση, με κύριο στόχο την αποτελεσματική διαχείριση της ροής και τη βελτιστοποίηση της ποιότητας του αέρα στους υπόγειους χώρους εργασίας. Η ανάγκη αυτή προκύπτει λόγω των προκλήσεων που αντιμετωπίζουν τα υπόγεια έργα, όπως η συσσώρευση ρύπων, οι απώλειες πίεσης και η θερμική φόρτιση, οι οποίες επηρεάζουν άμεσα την ασφάλεια και την απόδοση των εργαζομένων. Στο πλαίσιο αυτό, έγινε χρήση του λογισμικού προσομοίωσης κυκλωμάτων αερισμού VentSim. Μέσω των δυνατοτήτων προσομοίωσης του λογισμικού, εξετάστηκαν βασικά σενάρια λειτουργίας, όπως η βελτιστοποίηση της διανομής του αέρα, καθώς και οι επιπτώσεις μεταβολών στα σημεία εισόδου και εξόδου, καταλήγοντας σε κρίσιμα συμπεράσματα. Με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, παρατηρήθηκε η αύξηση της διαμέτρου της στοάς αερισμού θα οδηγούσε σε σημαντική βελτίωση της απόδοσης του συστήματος.

Επιπλέον, κρίθηκε ότι η προτεινόμενη αλλαγή όχι μόνο θα βελτίωνε τη διανομή του αέρα, αλλά θα συνεισέφερε και στη μείωση του λειτουργικού κόστους (-10.67%), επιτυγχάνοντας οικονομία πόρων και ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα το προτεινόμενο σύστημα (διάμετρος 3.5 m) παρουσιάζει σημαντική εξοικονόμηση κόστους (\$136,288), κυρίως λόγω της μείωσης του κόστους κεφαλαίου του ανεμιστήρα (-76.14%) και της κατανάλωσης ενέργειας (-56.66%). Παρότι το κόστος εξόρυξης αυξάνεται κατά \$157,967 αυτή η αύξηση αντισταθμίζεται πλήρως από τις μειώσεις στο κόστος ενέργειας και του κεφαλαιακού εξοπλισμού. Παράλληλα, χρησιμοποιήθηκαν προσομοιώσεις ακραίων φαινομένων, όπως η ανάπτυξη θερμικών πηγών και η διάδοση καπνού σε περίπτωση πυρκαγιάς ή έκρηξης. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ανέδειξαν τις περιοχές υψηλού κινδύνου και προσδιόρισαν τα κρίσιμα σημεία του κυκλώματος που απαιτούν ενίσχυση. Ειδικότερα, τα ευρήματα κατέδειξαν την ανάγκη ενσωμάτωσης ανεμιστήρων ενίσχυσης και τη βελτίωση της γεωμετρίας των διατομών για την ελαχιστοποίηση των απωλειών πίεσης.

Λέξεις Κλειδιά: Αερισμός υπογείων, κύκλωμα αερισμού, προσομοιώσεις του VentSim, βελτίωση συνθηκών εργασίας στα υπόγεια.

Abstract

Design and study of a ventilation circuit in underground mining

Περίληψη στα Αγγλικά: This thesis aims to study ventilation systems by combining classical fluid mechanics principles with modern simulation and analysis techniques. It focuses on the design and study of ventilation systems in underground operations, with the primary objective of efficiently managing airflow and optimizing air quality in underground workspaces. This need arises due to the challenges faced by underground projects, such as pollutant accumulation, pressure losses, and thermal loads, which directly impact worker safety and productivity. Addressing this issue is essential for safeguarding workers' health and safety while reducing operational costs. In this context, the VentSim ventilation circuit simulation software was utilized. Key operational scenarios were examined through the software's simulation capabilities, such as optimizing air distribution and evaluating the impact of changes in inlet and outlet points, leading to critical conclusions. Based on the simulation results, increasing the diameter of the ventilation tunnel under the current development plan would significantly enhance system performance.

Furthermore, it was found that the proposed modification would improve air distribution and reduce operational costs (-10.67%), achieving resource and energy savings. Specifically, the proposed system (with a diameter of 3.5 m) offers significant cost savings (\$136,288), primarily due to reductions in fan capital costs (-76.14%) and energy consumption (-56.66%). Although excavation costs increased by \$157,967, the energy and capital equipment cost reductions fully offset this increase. Additionally, simulations of extreme events, such as the development of heat sources and smoke propagation in the event of a fire or explosion, were conducted. The simulation results highlighted high-risk areas and identified critical points in the circuit requiring reinforcement. Expressly, the findings indicated the need to integrate booster fans and improve the geometry of cross-sections to minimize pressure losses.

Keywords: Underground ventilation, ventilation circuit, VentSim simulations, improving un-derground working conditions

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	iv
Abstract	
Κατάλογος Σχημάτων	iii
Κατάλογος Πινάκων	vi
Κεφάλαιο 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Αντικείμενο και Επιστημονικό Υπόβαθρο.....	1
1.2 Σκοπός	2
1.3 Διάρθρωση διπλωματικής.....	3
Κεφάλαιο 2: Υπόγεια Έργα Εκμετάλλευσης.....	5
2.1 Ιστορική Ανάδρομή	5
Κεφάλαιο 3: Αέρια Υπογείων και οι Τρόποι Εντοπισμού	10
3.1 Γενικά Στοιχεία για την Ατμόσφαιρα των Μεταλλείων	10
3.2 Τα αέρια των μεταλλείων.....	10
3.3 Πηγές Αερίων	17
3.4 Όργανα Μέτρησης	18
3.5 Νομοθεσία.....	21
3.6 Τρόποι Περιορισμού αερίων σε υπόγειες εκμεταλλεύσεις.....	22
Κεφάλαιο 4: Βασικές Αρχές Αερισμού	24
4.1 Βασικά Στοιχεία Ροής Αέρα.....	24
4.2 Απώλειες Πίεσης	25
4.2.1 Απώλειες Πίεσης Λόγω Τριβών.....	26
4.2.2 Απώλειες Πίεσης Λόγω Κρούσεων.....	28
4.3 Χαρακτηριστικά Μεγέθη Μεταλλείου	30
4.3.1 Αντίσταση	30
4.3.1 Χαρακτηριστική Καμπύλη Ανεμιστήρα	31
4.4 Βασικοί Νόμοι Ροής Αέρα	34
4.4.1 Ο Νόμος του Bernoulli.....	34
4.4.2 Οι Νόμοι του Kirchhoff.....	36
4.5 Επίλυση Δικτύων Αερισμού	38
4.5.1 Αγωγοί σε Παράλληλη Σύνδεση.....	39
Κεφάλαιο 5: Συστήματα Αερισμού Υπογείων Εκμεταλλεύσεων	41
5.1 Γενικά.....	41
5.2 Φυσικός Αερισμός.....	41
5.2.1 Πηγές φυσικού αερισμού.....	42

5.2.2	Πίεση και Παροχή φυσικού ελκυσμού.....	44
5.3	Διατάξεις Συστήματος Αερισμού και Έργα Προσπέλασης.....	48
5.3.1	Κύριος Αερισμός.....	49
5.3.2	Φυσητικός και Μυζητικός Αερισμός.....	50
5.3.3	Μηχανικός Αερισμός.....	52
5.3.4	Ανεμιστήρες.....	54
5.3.5	Φυγοκεντρικοί ανεμιστήρες	54
5.3.6	Αξονικοί Ανεμιστήρες.....	56
5.4	Σημείο Λειτουργίας Ανεμιστήρα.....	59
5.5	Συνδυασμός Ανεμιστήρων	60
5.5.1	Ανεμιστήρες σε Σειρά.....	61
5.5.2	Ανεμιστήρες σε Παράλληλη Διάταξη	63
5.5.3	Συνδυασμός Ανεμιστήρων και Φυσικού Ελκυσμού	64
5.6	Βοηθητικός Αερισμός.....	66
5.7	Εξοπλισμός	67
Κεφάλαιο 6:	Λογισμικό Προσομοίωσης Αερισμού	72
6.1	Δυνατότητες και Χαρακτηριστικά του VentSim.....	73
6.1.1	Δυνατότητες VentSim.....	76
6.1.2	Προσομοίωση Ροής Αέρα.....	76
6.1.3	Θερμική Ανάλυση.....	76
6.1.4	Ανάλυση Αερίων και Ρύπων	77
6.1.5	Διαχείριση Κινδύνων	77
6.1.6	Ανάλυση Συστήματος Αερισμού και Κατανάλωσης Ενέργειας.....	77
6.1.7	Προσομοίωση και Ανάλυση Στρατηγικών Αερισμού	77
6.2	Σημασία της Ακριβούς Προσομοίωσης για την Ασφάλεια και την Αποτελεσματικότητα Σήμερα	78
6.3	Προσομοιώσεις Έκτακτης Ανάγκης	79
6.4	Ενεργειακή Αποδοτικότητα και Συμμόρφωση με Περιβαλλοντικά Πρότυπα	80
6.5	VOD.....	82
6.5.1	Χαρακτηριστικό παράδειγμα από την εφαρμογή του VOD στο ορυχείο δοκιμών της LKAB (Gyamfi, 2020), Konsuln	84
6.5.2	Σενάριο Βασικής Περίπτωσης (Base Case)	85
6.5.3	Τι επιπτώσεις έχει το VOD στο περιβάλλον	87
6.5.4	Ορυχείο Malmberget, Σουηδία	88
6.5.5	Ορυχείο Coleman, Καναδάς	89
6.5.6	Ορυχείο Nickel Rim South, Καναδάς.....	89

6.5.7	Ορυχείο Creighton, Καναδάς	89
Κεφάλαιο 7:	Προσομοίωση Κυκλώματος Αερισμού Υπογείων	90
7.1	Το περιβάλλον του λογισμικού	90
7.2	Χαρακτηριστικά παραδείγματα από μερικές βασικές παραμέτρους πριν τον σχεδιασμό αεραγωγών	91
7.2.1	Τύποι προφίλ αεραγωγού	91
7.2.2	Χαρακτηριστικά αεραγωγού	92
7.2.3	Ρυθμίσεις ανεμιστήρα.....	92
7.3	Βασικό Μοντέλο Σχεδιασμού με Οχτώ Αεραγωγούς.....	96
7.4	Βασικό Μοντέλο με Ρυθμιστή Ροής.....	98
7.5	Βασικό μοντέλο με πρόσθετο ανεμιστήρα ενίσχυσης.....	100
7.6	Αερισμός Υπόγειας Εκμετάλλευσης με Φρέατα Εισόδου – Εξόδου	102
7.7	Αερισμός Μεταλλείου Panda	107
Κεφάλαιο 8:	Προσομοίωση Ακραίων Φαινομένων	113
8.1	Πυρκαγιές σε Υπόγεια Ορυχεία:	113
8.2	Διαρροή Τοξικών Αερίων ή Εκρηκτικών Φαινομένων	113
8.3	Σύγκριση Ντίζελ και Ηλεκτρικών Οχημάτων	114
8.3.1	Εκπομπές και Ποιότητα Αέρα.....	114
8.3.2	Θερμότητα και Ενεργειακή Κατανάλωση	114
8.4	Προσομοίωση Πηγής Θερμότητας και Θερμοδυναμικών Εισροών	114
8.5	Προσομοίωση Έκρηξης.....	117
Κεφάλαιο 9:	Συμπεράσματα – Προτάσεις	119
Βιβλιογραφία	121
Παράρτημα Α:	Οι Κανονισμοί για τον Αερισμό	125

Κατάλογος Σχημάτων

ΣΧΗΜΑ 2-1: DAI - LION CAVERN NGWENYA - ΤΟ ΠΑΛΑΙΟΤΕΡΟ ΟΡΥΧΕΙΟ ΩΧΡΑΣ ΣΤΟΝ ΚΟΣΜΟ (MACDONALD ET AL., 2024, WWW.DAINST.ORG)	6
ΣΧΗΜΑ 3-1:ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ (CO) ΣΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΧΡΟΝΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ ΕΚΘΕΣΗΣ (MCPHERSON, 1993).	12
ΣΧΗΜΑ 3-2: ΜΕΤΡΗΤΗΣ ΑΕΡΙΩΝ CO, CO ₂ ., (ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΓΙΕΙΝΗΣ & ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ, ΣΧΟΛΗΣ ΜΗΧΟΠ)	12
ΣΧΗΜΑ 3-3: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΝΑΜΙΞΗΣ ΤΟΥ ΜΕΘΑΝΙΟΥ ΜΕ ΤΟ ΟΞΥΓΟΝΟ, (MC PHERSON, 1993).	14
ΣΧΗΜΑ 3-4: ΨΗΦΙΑΚΟΣ ΠΟΛΥΜΕΤΡΗΤΗΣ ΑΕΡΙΩΝ CO, H ₂ S, O ₂ , (ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΓΙΕΙΝΗΣ & ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ, ΣΧΟΛΗΣ ΜΗΧΟΠ)	16
ΣΧΗΜΑ 3-5: ΜΕΤΡΗΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΕΡΑ, (ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΓΙΕΙΝΗΣ & ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ, ΣΧΟΛΗΣ ΜΗΧΟΠ).	17
ΣΧΗΜΑ 3-6: ΣΥΣΚΕΥΗ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (PEODETECTION.COM)	21
ΣΧΗΜΑ 4-1: ΤΥΠΟΙ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΟΥΝ ΠΤΩΣΕΙΣ ΠΙΕΣΗΣ ΛΟΓΩ ΚΡΟΥΣΕΩΝ ,(CHAN ET AL. (2010).	30
ΣΧΗΜΑ 4-2:ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ, R (DZWITI, 2017).	32
ΣΧΗΜΑ 4-3: ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΓΩΓΩΝ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΩΝ ΣΕ ΣΕΙΡΑ, (HALL, 1981).	38
ΣΧΗΜΑ 4-4: ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΓΩΓΩΝ ΣΕ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΣΥΝΔΕΣΗ (HALL, 1981).	40
ΣΧΗΜΑ 5-1: ΔΙΑΤΑΞΗ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΠΙΕΣΗΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΕΛΚΥΣΜΟΥ, ΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΕΙ ΔΥΟ ΦΡΕΑΤΑ ΚΑΙ ΜΙΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΣΤΟΑ.	45
ΣΧΗΜΑ 5-2: ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΥ ΕΞΥΠΗΡΕΤΟΥΜΕΝΟ ΑΠΟ ΔΥΟ ΦΡΕΑΤΑ, (ΟΙΚΟΝΟΜΟΠΟΥΛΟΣ, 2002).	46
ΣΧΗΜΑ 5-3: ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΑΕΡΙΣΜΟΥ (HARTMAN, ET AL., 1982).	48
ΣΧΗΜΑ 5-4: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΙΕΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΦΥΣΗΤΙΚΟ, ΜΥΖΗΤΙΚΟ ΚΑΙ ΠΡΟΩΘΗΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΕΡΙΣΜΟΥ, (ΟΙΚΟΝΟΜΟΠΟΥΛΟΣ, 1991).	52
ΣΧΗΜΑ 5-5: ΕΜΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΣΕ ΥΠΟΓΕΙΟ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟ (HTTPS://SUGERCANES.COM).	54
ΣΧΗΜΑ 5-6: Α) ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΝΟΣ ΚΕΝΤΡΟΦΥΓΟΥ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑ (HARTMAN, ET AL., 1982), Β) ΜΟΝΤΕΛΟ ΒΚ4-72 (WWW.YAOSENMARINE.COM).	54
ΣΧΗΜΑ 5-7: ΤΥΠΟΙ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΚΕΝΤΡΟΦΥΓΩΝ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΩΝ (HALL, 1981).	55
ΣΧΗΜΑ 5-8: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΚΕΝΤΡΟΦΥΓΟΥ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΑ ΠΤΕΡΥΓΙΑ (MC PHERSON, 1993).	56
ΣΧΗΜΑ 5-9: ΑΞΟΝΙΚΟΣ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑΣ , CC2400 (WWW.CLEMCORP.COM.AU).	57
ΣΧΗΜΑ 5-10: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΕΝΟΣ ΑΞΟΝΙΚΟΥ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑ ΜΕ ΠΤΕΡΥΓΙΑ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ (MC PHERSON, 1993).	58
ΣΧΗΜΑ 5-11: ΣΗΜΕΙΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑ, (ΟΙΚΟΝΟΜΟΠΟΥΛΟΣ, 2002).	60
ΣΧΗΜΑ 5-12: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΓΙΑ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΕΣ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥΣ ΣΕ ΣΕΙΡΑ (MC PHERSON, 1993).	62
ΣΧΗΜΑ 5-13: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΔΥΟ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΩΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ (MC PHERSON, 1993).	63
ΣΧΗΜΑ 5-14: ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑ ΜΕ ΦΥΣΙΚΟ ΕΛΚΥΣΜΟ (ΟΙΚΟΝΟΜΟΠΟΥΛΟΣ, 2002) Α) ΕΥΝΟΪΚΗ ΚΑΙ Β) ΜΗ ΕΥΝΟΪΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.	66
ΣΧΗΜΑ 5-15: ΒΟΗΘΗΤΙΚΟΣ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑΣ ΣΕ ΥΠΟΓΕΙΟ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟ (HTTPS://MINETEK.COM).	66
ΣΧΗΜΑ 5-16: ΑΓΩΓΟΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΟΥ ΑΕΡΙΣΜΟΥ, (HTTPS://PLASTICMINER.COM).	69
ΣΧΗΜΑ 6-1 ΘΕΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΟΥ ΟΡΥΧΕΙΟΥ KONSULN, (GYAMFI, 2020)	72
ΣΧΗΜΑ 6-2: ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ ΣΤΟΝ ΤΟΜΕΑ ΤΟΥ VENTILATION ΑΝΑ ΕΤΟΣ	78

ΣΧΗΜΑ 6-3: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ VOD, (ABB_MAGAZINE).	83
ΣΧΗΜΑ 6-4: ΣΥΣΤΗΜΑ ABB (HTTPS://IM-MINING.COM).	84
ΣΧΗΜΑ 6-5 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΥ, (GYAMFI, 2020)	85
ΣΧΗΜΑ 6-6: ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΣΕΝΑΡΙΩΝ.	87
ΣΧΗΜΑ 7-1: ΚΥΡΙΟ ΠΑΡΑΘΥΡΟ ΤΟΥ VENTSIM	90
ΣΧΗΜΑ 7-2: ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΣΤΟ VENTSIM ΑΠΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ Α) ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΥ ΚΑΙ Β) ΑΓΩΓΩΝ ΑΕΡΙΣΜΟΥ.	91
ΣΧΗΜΑ 7-3: Α) ΒΑΣΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΑΕΡΑΓΩΓΩΝ ΚΑΙ Β) ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΓΩΓΩΝ.	92
ΣΧΗΜΑ 7-4: ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ, ΤΡΙΒΗΣ ΚΑΙ ΚΡΟΥΣΗΣ	92
ΣΧΗΜΑ 7-5: Α) ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑ (INFO BOX), Β) ΚΑΡΤΕΛΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑ ΚΑΙ Γ) ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑ.	93
ΣΧΗΜΑ 7-6: Α) ΚΑΡΤΕΛΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΕΡΑΓΩΓΟΥ, Β) ΚΑΡΤΕΛΑ ΕΙΔΙΚΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ, Γ) ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ, Δ) ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ, Ε) ERRORS BOX	94
ΣΧΗΜΑ 7-7: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΑΡΧΕΙΟ DXF	95
ΣΧΗΜΑ 7-8 ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΟΝΑΔΩΝ	95
ΣΧΗΜΑ 7-9: ΣΧΕΔΙΑΣΗ 8 ΑΕΡΑΓΩΓΩΝ	96
ΣΧΗΜΑ 7-10: ΡΥΘΜΙΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	96
ΣΧΗΜΑ 7-11: ΠΑΡΟΧΗ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	97
ΣΧΗΜΑ 7-12: ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΩΝ, INFO BOX.	97
ΣΧΗΜΑ 7-13: ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΡΟΗΣ	97
ΣΧΗΜΑ 7-14: LUVRE REGULATOR, NINTH US MINE VENTILATION SYMPOSIUM, JUNE 2002, KINGSTON CANADA.	98
ΣΧΗΜΑ 7-15: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΔΕΥΤΕΡΗ ΦΑΣΗ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ	99
ΣΧΗΜΑ 7-16: ΡΥΘΜΙΣΗ REGULATOR	99
ΣΧΗΜΑ 7-17: ΠΑΡΟΧΕΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΡΥΘΜΙΣΤΗ	99
ΣΧΗΜΑ 7-18: ΜΕΛΕΤΗ ΤΡΙΤΗΣ ΦΑΣΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ	100
ΣΧΗΜΑ 7-19: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΝΕΟΥ ΑΓΩΓΟΥ	100
ΣΧΗΜΑ 7-20: ΝΕΟΣ ΑΓΩΓΟΣ, ΝΕΑ ΠΑΡΟΧΗ. (ΕΙΚΟΝΙΚΑ ΦΑΙΝΕΤΑΙ ΕΚΤΟΣ ΤΟΥ ΥΠΑΡΧΟΝ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΛΟΓΟΥΣ ΠΡΟΒΟΛΗΣ)	101
ΣΧΗΜΑ 7-21: ΚΥΚΛΩΜΑ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΜΕ ΠΑΡΟΧΗ $Q = 47.2 \text{ M}^3/\text{S}$	102
ΣΧΗΜΑ 7-22: Α, Β, Γ	103
ΣΧΗΜΑ 7-23: Α, Β	104
ΣΧΗΜΑ 7-24: Α, Β.	105
ΣΧΗΜΑ 7-25: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ.	105
ΣΧΗΜΑ 7-26: ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗ	106
ΣΧΗΜΑ 7-27: ΓΕΝΙΚΗ ΕΙΚΟΝΑ ΤΟΥ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΥ	107
ΣΧΗΜΑ 7-28: ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΑΕΡΙΣΜΟΥ, ΜΕ ΡΟΖ ΧΡΩΜΑ ΕΙΝΑΙ ΟΙ ΑΝΑΜΟΝΕΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΕΩΝ.	108
ΣΧΗΜΑ 7-29: ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ, ΛΕΥΚΟ ΧΡΩΜΑ.	108
ΣΧΗΜΑ 7-30: ΜΕ ΤΟ ΚΟΚΚΙΝΟ ΧΡΩΜΑ Η ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΠΟΥ ΥΠΑΡΧΕΙ ΤΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ, ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΩΠΙΚΟ.	109
ΣΧΗΜΑ 7-31: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.	109
ΣΧΗΜΑ 7-32: ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΚΟΣΤΟΥΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	110
ΣΧΗΜΑ 7-33: ΣΗΜΕΙΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	110
ΣΧΗΜΑ 7-34: ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΑΛΛΑΓΗ ΓΙΑ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ	111
ΣΧΗΜΑ 7-35: ΕΙΚΟΝΑ ΜΕΤΑ ΤΟ ΠΕΡΑΣ ΤΗΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ.	111
ΣΧΗΜΑ 7-36: ΣΗΜΕΙΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΙΣΧΥΣ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑ	112
ΣΧΗΜΑ 8-1: ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΧΩΡΙΣ ΚΑΠΟΙΑ ΠΗΓΗ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ	115
ΣΧΗΜΑ 8-2: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ	115

ΣΧΗΜΑ 8-3: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΠΗΓΗ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΣΤΟ ΤΜΗΜΑ 2.	116
ΣΧΗΜΑ 8-4: ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΠΗΓΕΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ	116
ΣΧΗΜΑ 8-5: ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΚΡΗΞΗΣ	117
ΣΧΗΜΑ 8-6: ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ	117
ΣΧΗΜΑ 8-7: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ CO – ΧΡΟΝΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΤΡΙΩΡΗΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ	118

Κατάλογος Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-1: ΤΙΜΕΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ K ($\text{KGFSEC}^2\text{M}^{-4}$ Η $\text{KGM}^{-3}\text{10}^{-1}$) ΓΙΑ ΚΑΝΟΝΙΚΟ ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ $\Delta_0 = 1,23 \text{ KGM}^{-3}$. (ΟΙΚΟΝΟΜΟΠΟΥΛΟΣ, 1991). Α. ΜΕΤΑΛΛΕΙΑ	27
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-2: ΙΣΟΔΥΝΑΜΑ ΜΗΚΗ ΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟΥΣ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΟΥΝ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΠΙΕΣΕΩΝ ΛΟΓΩ ΚΡΟΥΣΕΩΝ (ΟΙΚΟΝΟΜΟΠΟΥΛΟΣ, 1991).	29
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-1: ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΤΡΙΒΗΣ λ'	71

Κεφάλαιο 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο και Επιστημονικό Υπόβαθρο

Ο αερισμός σε υπόγειες εκμεταλλεύσεις εξασφαλίζει την ασφάλεια, την υγεία και την παραγωγικότητα όλων των εργαζομένων, παρέχοντας καθαρό αέρα και ελέγχοντας τις συγκεντρώσεις επιβλαβών αερίων. Καθώς οι υπόγειες εκμεταλλεύσεις επεκτείνονται σε βάθος και σε μεγαλύτερες περιοχές, η συγκέντρωση επικίνδυνων αερίων και η συσσώρευση θερμότητας αυξάνονται, δημιουργώντας σημαντικές προκλήσεις. Χωρίς κατάλληλο αερισμό, οι υπόγειοι χώροι μπορεί να καταστούν επικίνδυνοι, για τους ανθρώπους που εργάζονται σε αυτούς λόγω υψηλών επιπέδων τοξικών αερίων, σκόνης και θερμοκρασιών. Το πρόβλημα αυτό επιδεινώνεται από τις απώλειες πίεσης που παρατηρούνται καθώς ο αέρας διακινείται μέσω των κυκλωμάτων αερισμού, φαινόμενο που οφείλεται στη ιξώδη τριβή κατά μήκος των τοιχωμάτων των στοών ή σε απότομες στροφές και εμπόδια στο σύστημα.

Το βασικό επιστημονικό πρόβλημα επικεντρώνεται στην κατανόηση και εφαρμογή των αρχών ροής του αέρα στο περιορισμένο και σύνθετο περιβάλλον ενός μεταλλείου. Κρίσιμης σημασίας είναι οι νόμοι της ρευστομηχανικής, όπως η αρχή του Bernoulli, που συνδέει την πίεση, την ταχύτητα και το ύψος στη ροή ρευστών, καθώς και οι νόμοι απωλειών πίεσης λόγω τριβής και αναταραχής. Επιπλέον, η εφαρμογή των νόμων του Kirchhoff είναι απαραίτητη για τη διανομή της ροής αέρα σε δίκτυα, εξασφαλίζοντας ότι η τελευταία διατηρείται σταθερή σε διάφορα τμήματα του μεταλλείου. Ιστορικά, καθώς οι υπόγειες εκμεταλλεύσεις έχουν αναπτυχθεί σε βάθος και πολυπλοκότητα, ο αερισμός έχει εξελιχθεί από απλά συστήματα κυκλοφορίας αέρα σε πλήρως μελετημένα δίκτυα που στοχεύουν στη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας και της ασφάλειας.

Σήμερα, η τεχνολογία επιτρέπει να προχωρήσουμε πέρα από τις παραδοσιακές μεθόδους. Ιδιαίτερα με την αύξηση των αναγκών για τη μείωση των εκπομπών σε αέρια του θερμοκηπίου ο σχεδιασμός του αερισμού παίζει σημαντικό ρόλο στον στόχο αυτό. Ιδιαίτερα στις εκμεταλλεύσεις άνθρακα, όπου σύμφωνα με την έρευνα του Karacan (2023), στο 3^ο μεγαλύτερο ορυχείο άνθρακα στην Αμερική Pocahontas, εκτιμώνται ότι 19 MMscf (million standard cubic feet, 10^6ft^3) αερίων απομένουν να μετακινηθούν μέσω των αεραγωγών. Υπάρχουν διάφορες εργασίες που μελετούν τον ασφαλή

σχεδιασμό των συστημάτων (Brodny, et al., 2021; Chen, et al., 2023; Wang, et al., 2014) με στόχο την οικονομική και περιβαλλοντική βελτίωση του κυκλώματος αερισμού.

Με εργαλεία προσομοίωσης, όπως το VentSim (Howden, 2023), είναι δυνατόν να βελτιστοποιείται η ροή του αέρα και να γίνονται οι απαραίτητες προσαρμογές σε πραγματικό χρόνο. Διάφορες εργασίες χρησιμοποιούν αυτό το λογισμικό για τη μελέτη του αερισμού στα υπόγεια στον Ελλαδικό χώρο (Παπαδόπουλος, 2019; Καραγιάννη, 2021), καθώς το λογισμικό είναι εύκολο στη χρήση και παρέχονται ακαδημαϊκές άδειες για τον σκοπό αυτό (<https://ventsim.com>). Επιπλέον, έρευνες αξιοποιούν τεχνολογίες αιχμής, όπως συστήματα μηχανικής μάθησης και τεχνητής νοημοσύνης, για να καταστούν οι διαδικασίες αυτές ακόμα πιο αποδοτικές (Xu, et al., 2018; Ihsan, et al., 2024; Li, et al., 2023). Άλλες έρευνες, όπως αυτή των Gao et al. (2021), εξετάζουν πειραματικά ή εφαρμόζουν στο πεδίο τις εξισώσεις του αερισμού, προτείνοντας νέες τεχνολογίες μέτρησης της ποιότητας του αέρα (Santos, et al., 2022).

Η παρούσα εργασία εξετάζει τον αερισμό των υπόγειων μεταλλείων, αναλύοντας τα θεμελιώδη στοιχεία και σύγχρονες μεθόδους διασφάλισης της ομαλής λειτουργίας του συστήματος. Διερευνώντας διάφορα σενάρια και δυνατότητες του λογισμικού, παράλληλα με την παρουσίαση των βασικών αρχών του αερισμού, επιχειρείται η παρουσίαση των βασικών στοιχείων του αερισμού. Κύριος στόχος είναι η κατανόηση των θεμελιωδών κανόνων σχεδιασμού και η βελτίωση των συστημάτων ασφαλείας, ώστε να υποστηριχθεί ο νέος μηχανικός στην εφαρμογή τους. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζονται η υγιεινή και η ασφάλεια των εργαζομένων, μειώνονται οι εκπομπές, βελτιώνεται η ενεργειακή απόδοση, ενώ οι πόροι διαχειρίζονται αποτελεσματικά, ελαχιστοποιώντας κινδύνους όπως οι εκρήξεις ή η υπερθέρμανση.

1.2 Σκοπός

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη του θεωρητικού υπόβαθρου σχετικά με το σύστημα αερισμού των υπόγειων εκμεταλλεύσεων μέσα από την αξιοποίηση ενός σύγχρονου προγράμματος προσομοίωσης κυκλωμάτων αερισμού όπως το VentSim DESING. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού έγινε σχεδιασμός διαφόρων μοντέλων υπογείων όπου εισάγοντας εναλλακτικά σενάρια δικτύων αερισμού, μελετήθηκε πόσο αποτελεσματικά μπορεί να γίνει η διαχείριση της ροής του αέρα, ποιες είναι τις οι

απώλειες πίεσης και ποια η ποιότητα του αέρα στους υπόγειους χώρους εργασίας. Η ανάπτυξη αυτών των συστημάτων βασίζεται στην εφαρμογή βασικών αρχών της ρευστομηχανικής με στόχο τη δημιουργία ασφαλέστερων συνθηκών εργασίας και την αύξηση της παραγωγικότητας. Παράλληλα, η μελέτη επικεντρώνεται και στην προσομοίωση σεναρίων ακραίων φαινομένων, όπως πυρκαγιές ή εκρήξεις, με σκοπό την ενίσχυση της ανθεκτικότητας των συστημάτων και την καλύτερη προετοιμασία για περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης.

1.3 Διάρθρωση διπλωματικής

Στο 2^ο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας γίνεται ιστορική αναδρομή και αναφέρεται σε έργα που αφορούν τις υπόγειες εκμεταλλεύσεις, την χρήση των μεταλλείων και το κύκλωμα αερισμού, προσφέροντας μια σύνοψη των βασικών τεχνολογιών και μεθοδολογιών που είχαν αναπτυχθεί από την αρχαιότητα. Παρουσιάζονται επίσης τα κυριότερα πρότυπα που έχουν χρησιμοποιηθεί στον σχεδιασμό εκμεταλλεύσεων μέχρι σήμερα, δίνοντας μια βάση για την κατανόηση του αντικειμένου της παρούσας μελέτης.

Στο 3^ο κεφάλαιο γίνεται μια γενική αναφορά στην ποιότητα της ατμόσφαιρας των μεταλλείων, συνεχίζοντας με την ανάλυση των πηγών αερίων και των τρόπων μέτρησής τους. Παρουσιάζονται επίσης οι σχετικές με τον αερισμό μεταλλείων νομοθετικές διατάξεις, προσφέροντας τις βάσεις για την κατανόηση της ασφάλειας και της αποτελεσματικότητας αυτών των συστημάτων.

Το 4^ο κεφάλαιο έχει τίτλο Αρχές ροής αέρα. Αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζει τις αρχές που διέπουν τη ροή του αέρα στα υπόγεια μεταλλεία. Εξετάζει θέματα όπως η απώλεια πίεσης, τα χαρακτηριστικά μεγέθη και οι καμπύλες μεταλλείου. Παρουσιάζει, επίσης, τις λύσεις των δικτύων ροής, τις γενικές διατάξεις αερισμού των υπόγειων μεταλλείων, την αντίσταση και άλλες φυσικές αρχές που επηρεάζουν την αεροδυναμική των συστημάτων αερισμού και συμβάλουν στην σωστή λειτουργία του δικτύου. Επίσης γίνεται αναφορά στον μηχανικό αερισμό, στον φυσικό αερισμό και στο βοηθητικό εξοπλισμό.

Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται το λογισμικό προσομοίωσης, VentSim, το οποίο χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση του κυκλώματος αερισμού. Περιγράφονται οι δυνατότητες του προγράμματος και οι παράμετροι που μπορούν να προσαρμοστούν ώστε να επιτευχθεί ακριβής αναπαράσταση των συνθηκών αερισμού στα μεταλλεία.

Εδώ αναπτύσσεται επιπλέον και έννοια του Ventilation On Demand (VOD), δηλαδή Αερισμός Κατά Απαίτηση. Το VOD αποτελεί ένα αυτοματοποιημένο σύστημα αερισμού που αξιοποιεί τεχνητή νοημοσύνη (AI) για τη ρύθμιση και βελτιστοποίηση της ροής του αέρα σε υπόγεια ορυχεία. Μέσω αισθητήρων και δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, η AI αναλύει τις συνθήκες (π.χ. επίπεδα αερίων, παρουσία εργαζομένων, θερμοκρασία) και προσαρμόζει αυτόματα τη λειτουργία των ανεμιστήρων και των βαλβίδων αερισμού. Αυτή η τεχνολογία εξασφαλίζει την παροχή αέρα στις περιοχές που απαιτείται, βελτιώνοντας την ασφάλεια, μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας και αυξάνοντας την αποδοτικότητα των εργασιών.

Το 6^ο κεφάλαιο είναι αυτό που περιέχει τα μοντέλα προσομοίωσης και εστιάζει στην εφαρμογή του λογισμικού προσομοίωσης VentSim για την προσομοίωση αερισμού σε υπόγεια μεταλλεία. Εξετάζονται μοντέλα όχι μόνο με απλή ροή αλλά και με ενίσχυση της αεροδυναμικής ροής με ανεμιστήρες, καθώς και ειδικές εφαρμογές του λογισμικού σε περιπτώσεις εκμετάλλευσης μεταλλείων με αυξημένες ανάγκες σε αερισμό.

Στο 7^ο κεφάλαιο μελετώνται σενάρια ακραίων καταστάσεων που μπορεί να προκύψουν στα μεταλλεία, όπως πηγές θερμότητας και θερμοδυναμικές εισροές, καθώς και καταστάσεις έκρηξης. Η προσομοίωση αυτών των σεναρίων βοηθά στην κατανόηση και πρόληψη κινδύνων, με στόχο την βελτίωση της ασφάλειας και του σχεδιασμού των συστημάτων αερισμού.

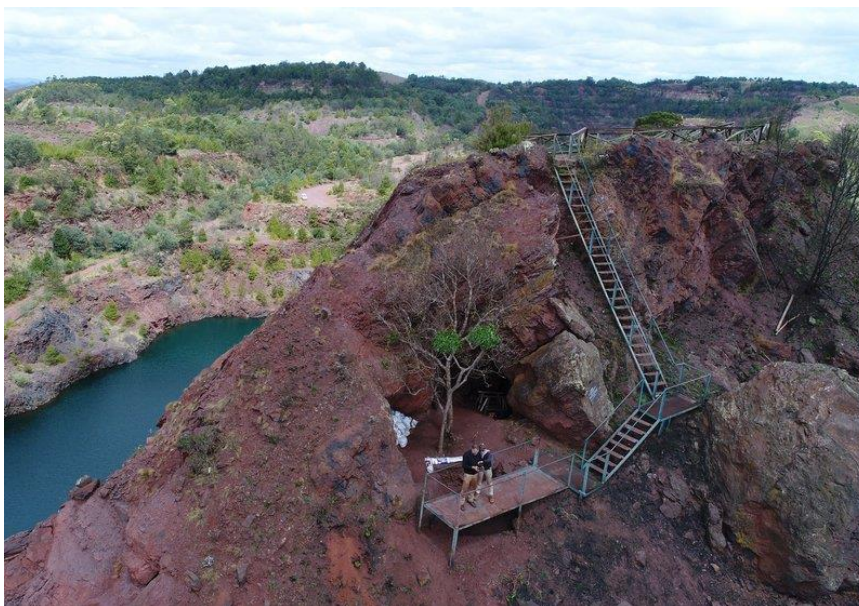
Τέλος στο 8^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την συγκεκριμένη εργασία καθώς και προτάσεις – συστάσεις.

Κεφάλαιο 2: Υπόγεια Έργα Εκμετάλλευσης

2.1 Ιστορική Ανάδρομή

Τα υπόγεια έργα περιλαμβάνουν όλες τις τεχνικές κατασκευές που εκτελούνται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Διανοίγονται σε διάφορα βάθη, από πολύ ρηχά έως πολύ βαθιά, πάνω ή κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, με το μέγεθός τους να ποικίλλει ανάλογα με τη χρήση τους. Μια κοινή κατηγοριοποίηση αυτών των έργων γίνεται σε μεταλλευτικά και μη μεταλλευτικά υπόγεια έργα. Στα μεταλλευτικά έργα, οι κατασκευές χρησιμοποιούνται ως το μέσο προσπέλασης και απόληψης ενός κοιτάσματος, ενώ στα μη μεταλλευτικά έργα η κατασκευή τους είναι αυτοσκοπός. Παρά το γεγονός ότι μέχρι τα μέσα του 20ού αιώνα οι τεχνικές εφαρμογές τέτοιων υποδομών χαρακτηρίζονταν ως σχετικά περιορισμένες, καθώς κυρίως εξυπηρετούσαν μεταλλευτικές δραστηριότητες, τα τελευταία χρόνια τα υπόγεια μη μεταλλευτικά έργα έχουν αναδείξει μια δυναμική και συνεχώς αναπτυσσόμενη πορεία. Σε πολλές περιπτώσεις, μάλιστα, έχουν καταστεί η καθιερωμένη πρακτική στην κατασκευαστική βιομηχανία. Σήμερα, αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της καθημερινότητας στις ανεπτυγμένες χώρες, με τις παρεχόμενες υπηρεσίες και το φάσμα εφαρμογών τους να διευρύνονται, καλύπτοντας τις σύγχρονες τεχνολογικές ανάγκες.

Σύμφωνα με τον [Sandstrom \(1963\)](#), η παρουσία υπόγειων κατασκευών σε μια κοινωνία είναι ενδεικτική της πολιτιστικής ανάπτυξής της, με έμφαση στην τεχνολογική πρόοδο και οικονομική ευημερία. Η αρχαιότερη καταγεγραμμένη υπόγεια εκμετάλλευση χρονολογείται στο 40.000 π.Χ. στη Bomvu Ridge ([Σχήμα 2-1](#)), όπου εξορυσσόταν διακοσμητικός αιματίτης κάτι που φανερώνει ότι τα υπόγεια έργα δεν αποτελούν σύγχρονη τεχνολογική εξέλιξη, αλλά απαντώνται ήδη από τις πρώτες περιόδους της ανθρώπινης ύπαρξης. Υπάρχουν αρκετά παραδείγματα που διατηρούνται ακέραια μέχρι σήμερα, αποδεικνύοντας το υψηλό τεχνικό επίπεδο των πολιτισμών που τα δημιούργησαν.



Σχήμα 2-1: DAI - Lion Cavern Ngwenya - Το παλαιότερο ορυχείο ώχρας στον κόσμο (MacDonald et al., 2024, www.dainst.org)

Η πρώτη τεκμηριωμένη χρήση τεχνικών εξόρυξης και αερισμού, σύμφωνα με τις ιστορικές πηγές, εμφανίζεται στην Ευρώπη μεταξύ 4000 και 1200 π.Χ., όταν οι πρώτοι μεταλλωρύχοι έσκαβαν σήραγγες σε κοιτάσματα κιμωλίας για την εξόρυξη πυρόλιθου. Ωστόσο, η ουσιαστική κατανόηση της ανάγκης για αερισμό στα ορυχεία εμφανίζεται αργότερα, περίπου το 600 π.Χ., στα μεταλλεία αργύρου του Λαυρίου στην Ελλάδα. Οι Έλληνες μεταλλωρύχοι είχαν κατανοήσει τη σημασία ενός κυκλώματος αερισμού που απομάκρυνε τον μολυσμένο αέρα και εισήγαγε καθαρό. Πολλές από τις στοές και τις υπόγειες κατασκευές της εποχής αυτής παραμένουν διατηρημένες μέχρι σήμερα και στον Ελλαδικό χώρο, όπου τα πιο διακεκριμένα υπόγεια έργα εντοπίζονται στα μεταλλεία του Λαυρίου, τα οποία χρονολογούνται από το 2.000 π.Χ., (Κονοφάγος, 1980), ενώ έχουν καταγραφεί περίπου 2.000 φρέατα, ορισμένα από τα οποία φτάνουν σε βάθος έως 120 μέτρα μάλιστα κατά τον 5ο αιώνα π.Χ., τα μεταλλεία αυτά πέτυχαν μέγιστη ετήσια παραγωγή αργύρου περίπου 20.000 κιλών (Κονοφάγος, 1980).

Κατά την Αναγέννηση σημειώθηκε μια ακόμα σημαντική πρόοδος στον αερισμό των ορυχείων. Το 1556, ο Georgius Agricola, (Hoover, et al., 1950) σε μεταλλευτική κοινότητα της Βοημίας, έγραψε το "De Re Metallica", το πρώτο εκτενές βιβλίο για τη μεταλλεία (Mathioudakis, et al., 2023). Ο Agricola συνέβαλε σημαντικά στις τεχνικές αερισμού των υπόγειων ορυχείων, περιγράφοντας με λεπτομέρεια μεθόδους που εξασφάλιζαν την ασφάλεια των εργατών και βελτίωναν την αποδοτικότητα της εξόρυξης. Ανέφερε τη χρήση αεραγωγών που επέτρεπαν τη φυσική κυκλοφορία του

αέρα, εκμεταλλευόμενοι τις διαφορές θερμοκρασίας και πίεσης μεταξύ της επιφάνειας και των υπόγειων χώρων.

Επίσης, περιέγραψε τη χρήση ενός συστήματος ανεμιστήρων και φυσούνων, το οποίο ενίσχυε τη ροή του αέρα στα βαθύτερα ορυχεία, με μηχανισμούς που λειτουργούσαν χειροκίνητα ή με ζώα, αποτελώντας πρόδρομο των σύγχρονων συστημάτων. Τέλος, ανέφερε τη χρήση κουρτινών αέρα για τον διαχωρισμό τμημάτων του ορυχείου, κατευθύνοντας τον αέρα σε περιοχές με ανάγκη για καλύτερη κυκλοφορία και αποτρέποντας τη συγκέντρωση επικίνδυνων αερίων.

Πέρα από την πρακτική εφαρμογή των τεχνικών αερισμού, ο Agricola συνέβαλε ουσιαστικά και στην κατανόηση της επιστήμης πίσω από τη ροή του αέρα και τη σημασία του καθαρού αέρα στα υπόγεια ορυχεία. Ανέδειξε τους κινδύνους που προκύπτουν από τη συγκέντρωση επιβλαβών αερίων, όπως το μεθάνιο και το διοξείδιο του άνθρακα, τα οποία μπορούσαν να οδηγήσουν σε ασφυξία ή ακόμα και εκρήξεις, καθιστώντας τον αερισμό κρίσιμο παράγοντα για την ασφάλεια των εργατών.

Επιπλέον, κατέγραψε την έννοια του "blackdamp" (μιας θανατηφόρας μίξης διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων), η οποία αποτελεί κίνδυνο σε κακώς αεριζόμενα ορυχεία. Αυτός ο όρος εξακολουθεί να χρησιμοποιείται στη σύγχρονη μεταλλευτική. Η μελέτη και η καταγραφή αυτών των φαινομένων από τον Agricola συνέβαλαν σημαντικά στη βελτίωση της ασφάλειας και της παραγωγικότητας στα ορυχεία.

Αργότερα η Βιομηχανική Επανάσταση έφερε μια ραγδαία αύξηση στη ζήτηση για κάρβουνο, γεγονός που είχε ως αποτέλεσμα να ενταθεί η ανάγκη για βελτιωμένο αερισμό στα ορυχεία. Οι συνθήκες για τους εργάτες στα ορυχεία κατά τον 18ο και 19ο αιώνα ήταν εξαιρετικά δύσκολες, με πολλούς να εργάζονται σε ανθυγιεινές και επικίνδυνες συνθήκες. Την εποχή εκείνη, η τεχνολογία αερισμού ήταν αρκετά πρωτόγονη, βασισμένη κυρίως σε φυσικά φαινόμενα. Η κίνηση του αέρα εξαρτιόταν από τις θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ της επιφάνειας και των υπόγειων χώρων (φυσική κυκλοφορία αέρα), ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις, χρησιμοποιούνταν φωτιές για να ενισχύσουν τον αερισμό.

Μια ιδιαίτερα διαδεδομένη αλλά επικίνδυνη μέθοδος απομάκρυνσης του μεθανίου ήταν η μέθοδος του "πυροσβέστη". Ένας εργάτης, ντυμένος με σακιά βουτηγμένα σε νερό και κρατώντας ένα κεριά σε ένα μακρύ ραβδί, εισερχόταν πρώτος στις σήραγγες για να κάψει το μεθάνιο, πριν οι υπόλοιποι μεταλλωρύχοι μπουν στον χώρο.

Ο John Buddle ([McPherson, 1993](#)), ένας εξορυκτικός μηχανικός από τη βόρεια Αγγλία, εισήγαγε δύο σημαντικές καινοτομίες στον αερισμό των ορυχείων. Πρώτον, ανέπτυξε τους "σιωπηλούς αγωγούς", οι οποίοι επέτρεπαν την εισαγωγή φρέσκου αέρα από το κάτω μέρος των φρεατίων. Δεύτερον, εισήγαγε το σύστημα "panel ventilation", το οποίο χώριζε το ορυχείο σε τμήματα, βελτιώνοντας τη ροή του αέρα και μειώνοντας τη συγκέντρωση μεθανίου.

Το 1812, μια τραγική έκρηξη στο Felling, Gateshead ([Fadli, 2024](#)) που στοίχισε τη ζωή σε 92 μεταλλωρύχους, αποτέλεσε σημείο καμπής για τη βελτίωση των τεχνικών αερισμού. Με τη βοήθεια τοπικών κληρικών, δημιουργήθηκε μια επιτροπή για την αναζήτηση λύσεων για την αποφυγή τέτοιων καταστροφών. Ο Sir Humphrey Davy, πρόεδρος της Βασιλικής Εταιρείας ανέπτυξε τη "λάμπα ασφαλείας", η οποία λειτουργούσε με φλόγα που δεν μπορούσε να περάσει μέσα από ένα πυκνό πλέγμα σύρματος και συνεπώς να προκαλέσει έκρηξη του μεθανίου.

Η κορυφαία θεωρητική εργασία της εποχής στον τομέα του αερισμού των ορυχείων ήταν αυτή του John Job Atkinson το 1854, η οποία παρουσίασε την "Θεωρία του Αερισμού των Ορυχείων". Κατά τη διάρκεια της περιόδου του Atkinson, άρχισαν να εμφανίζονται οι πρώτοι μηχανικοί ανεμιστήρες, όπως οι ατμοκίνητοι έμβολοι και κυλινδρικοί ανεμιστήρες, που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη αερισμού με μεγαλύτερη ακρίβεια και αποτελεσματικότητα.

Η τεχνολογική εξέλιξη στον αερισμό των ορυχείων συνεχίστηκε και κατά τον 20ό αιώνα. Στη δεκαετία του 1930, εισήχθησαν οι πρώτοι αξονικοί ανεμιστήρες με επιτυχία, φέρνοντας σημαντικές βελτιώσεις. Το 1943, ο καθηγητής F. Baden Hinsley προχώρησε σε ανάλυση της ροής του αέρα μέσω θερμοδυναμικών μεθόδων, ενισχύοντας την κατανόηση του αερισμού. Στη συνέχεια, το 1952, υπό την καθοδήγησή του στο Πανεπιστήμιο του Nottingham, αναπτύχθηκε η πρώτη πρακτική χρήση αναλογικών υπολογιστών για τον σχεδιασμό αερισμού, μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ευρέως για πάνω από δέκα χρόνια.

Σήμερα, η τεχνολογία αερισμού έχει εξελιχθεί περαιτέρω με την ανάπτυξη και χρήση λογισμικών προσομοίωσης, όπως το VentSim, που επιτρέπουν την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα σε πραγματικό χρόνο. Αυτά τα εργαλεία, σε συνδυασμό με κατάλληλους αισθητήρες, επιτρέπουν την ακριβή μέτρηση της συγκέντρωσης επιβλαβών αερίων και τη ρύθμιση της ροής του αέρα, καθιστώντας τον αερισμό πιο

αποδοτικό και ασφαλές, εξασφαλίζοντας την υγεία και την ασφάλεια των εργαζομένων και τη μέγιστη αποδοτικότητα των διαδικασιών εξόρυξης. Με αυτή την ιστορική εξέλιξη, ο αερισμός των ορυχείων έχει διανύσει έναν μακρύ δρόμο από τις πρωτόγονες τεχνικές της αρχαιότητας έως τις προηγμένες σύγχρονες μεθόδους που χρησιμοποιούνται σήμερα, προσφέροντας ασφαλέστερες και πιο αποδοτικές συνθήκες για τους εργαζόμενους.

Η αξιοσημείωτη πρόοδος στον τομέα των τεχνολογιών αερισμού έχουν αλλάξει σημαντικά τις μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται στις υπόγειες δραστηριότητες εξόρυξης, αυξάνοντας έτσι την ασφάλεια του προσωπικού και τη συνολική αποτελεσματικότητα των εργασιών.

Οι αρχές που καθόρισαν την εξέλιξη του αερισμού, όπως οι νόμοι του Bernoulli και του Kirchhoff, συνέβαλαν σημαντικά στη βελτίωση των συστημάτων αερισμού, καθώς βοήθησαν στην κατανόηση της σχέσης που συνδέει μεταξύ την πίεση και την ταχύτητα του αέρα. Αυτή η γνώση επέτρεψε στους μηχανικούς να βελτιώσουν τη ροή του αέρα, να μειώσουν τις απώλειες πίεσης και να εξασφαλίσουν σταθερή κυκλοφορία καθαρού αέρα. Η ενσωμάτωση εξελιγμένων ανεμιστήρων και συστημάτων φιλτραρίσματος αερίων, μαζί με τις επιστημονικές γνώσεις για τη ροή του αέρα, βελτίωσε σημαντικά τις συνθήκες ασφαλείας και την παραγωγικότητα στα ορυχεία.

Η έρευνα και η ανάπτυξη στον τομέα του αερισμού συνεχίζονται, με στόχο τη βελτίωση της απόδοσης και της ασφάλειας των συστημάτων αερισμού. Οι σύγχρονες τεχνολογίες συνδυάζουν φυσικά και μηχανικά μέσα για να εξασφαλίσουν τη βέλτιστη λειτουργία των ορυχείων, διατηρώντας τις συνθήκες αέρα ευνοϊκές για τους εργαζόμενους.

Κεφάλαιο 3: Αέρια Υπογείων και οι Τρόποι Εντοπισμού

3.1 Γενικά Στοιχεία για την Ατμόσφαιρα των Μεταλλείων

Ένα αποδοτικό σύστημα αερισμού διατηρεί την ατμόσφαιρα, τη θερμοκρασία και την υγρασία σε ασφαλή επίπεδα, διασφαλίζοντας την ασφάλεια του προσωπικού και την αποτελεσματική λειτουργία του εξοπλισμού. Ο σωστός σχεδιασμός του δικτύου αερισμού επιτρέπει την παροχή καθαρού αέρα στις θέσεις εργασίας και την απομάκρυνση των επικίνδυνων αερίων και σωματιδίων, δημιουργώντας κατάλληλες συνθήκες για άνετη εργασία. Για να επιτευχθεί αυτό, απαιτείται καλή γνώση της σύστασης των αερίων που υπάρχουν στα υπόγεια μεταλλεία και του τρόπου που επηρεάζουν την ποιότητα της εργασίας και την υγεία των εργαζομένων.

3.2 Τα αέρια των μεταλλείων

Ο καθαρός και ξηρός αέρας που εισέρχεται στα μεταλλεία ή σε άλλες υπόγειες δομές αποτελείται από 20.93% οξυγόνο (O_2), 78.10% άζωτο (N), 0.03% διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και 0.94% αργό (Ar) κατ'όγκο σε ΚΣ.

Ο όρος «ξηρός αέρας» χρησιμοποιείται κυρίως σε θεωρητικό επίπεδο για ποιοτικούς ελέγχους και ψυχομετρικούς υπολογισμούς. Στην πράξη, στα υπόγεια μεταλλεία επικρατεί συνήθως «κανονικός» ή υγρός αέρας, που αποτελείται από ξηρό αέρα και υδρατμούς, σε ποσοστό 0.1-0.4% κατ'όγκο ([Καραγιάννη, 2021](#)). Αυτή η «κανονική» ατμόσφαιρα αποτελεί τη βάση για τους υπολογισμούς που αφορούν την ποιότητα και την ποσότητα του αέρα που εισέρχεται στα ορυχεία. Σημαντικό είναι να σημειωθεί ότι:

- Ο αέρας που εκπνέει ο άνθρωπος αποτελείται από 16.3% οξυγόνο (O_2), 79.32% άζωτο (N) και 4.38% διοξείδιο του άνθρακα (CO_2).
- Ο μέσος άνθρωπος σε κατάσταση ανάπαυσης αναπνέει 15 έως 18 φορές ανά λεπτό, εισπνέοντας 400-700cm³ αέρα σε κάθε αναπνοή, δηλαδή περίπου 5-13 λίτρα αέρα το λεπτό ([Οικονομόπουλος, 2002](#)).

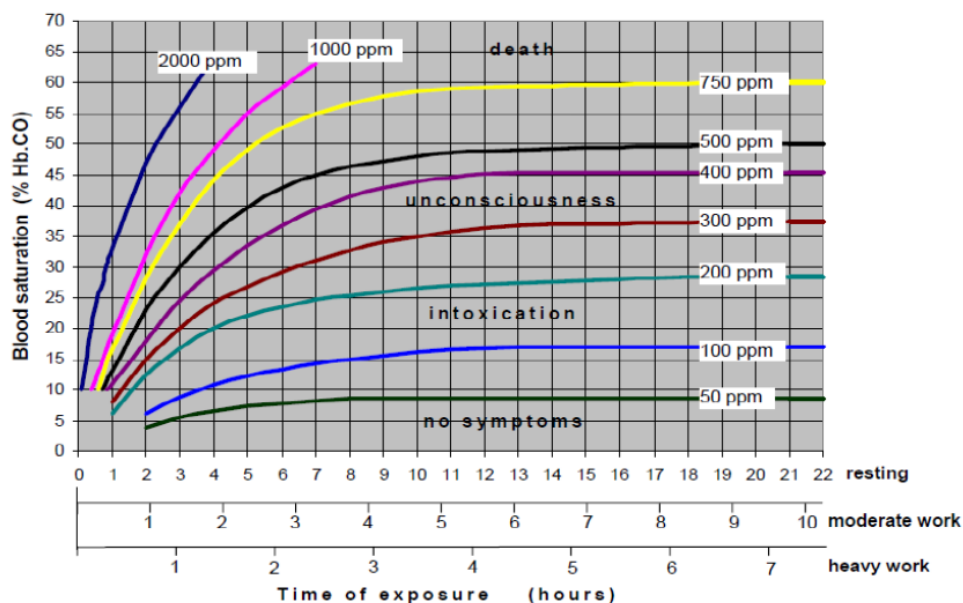
➤ Οξυγόνο (O_2)

Το οξυγόνο είναι το πιο σημαντικό, απ' όλα τα αέρια που υπάρχουν στα μεταλλεία. Η ποσότητα του οξυγόνου που χρειάζεται ο άνθρωπος είναι συνάρτηση της κινητικής του δραστηριότητας. Σε κανονικές συνθήκες, ο αέρας που αναπνέουμε περιέχει περίπου 21% οξυγόνο, το οποίο εξασφαλίζει άνετη αναπνοή και βέλτιστη αποδοτικότητα στην

εργασία. Όταν το ποσοστό οξυγόνου μειώνεται στο 17%, ο οργανισμός αντιδρά με ταχύτερη και βαθύτερη αναπνοή για να αντισταθμίσει τη μείωση. Αν το οξυγόνο πέσει στο 15%, οι περισσότεροι άνθρωποι αρχίζουν να νιώθουν συμπτώματα όπως ταχυπαλμία, ζάλη, βουητό στα αυτιά και πονοκέφαλο. Στο 13% οξυγόνου, η κατάσταση γίνεται πιο σοβαρή, με έντονη ταχυπαλμία, εμετό και πιθανή απώλεια αισθήσεων. Όταν το ποσοστό του οξυγόνου μειώνεται κάτω από 10%, εμφανίζονται σοβαρά προβλήματα όπως κυάνωση, κώμα και σπασμοί, καθώς το σώμα δεν λαμβάνει αρκετό οξυγόνο για να λειτουργήσει σωστά. Στο 7%, ο κίνδυνος απώλειας ζωής είναι άμεσος, ενώ στο 6% ο θάνατος επέρχεται γρήγορα, καθώς ο οργανισμός δεν μπορεί να αντέξει χωρίς επαρκή παροχή οξυγόνου.

➤ Μονοξείδιο του Άνθρακα (CO)

Το μονοξείδιο του άνθρακα είναι ένα άοσμο, άγευστο και άχρωμο αέριο με υψηλή τοξικότητα. Προέρχεται κυρίως από τα εκρηκτικά που χρησιμοποιούνται στις ανατινάξεις και από τις ντιζελοκίνητες μηχανές. Όταν εισπνέεται, μειώνει την ικανότητα του αίματος να μεταφέρει οξυγόνο στους ιστούς, και σε σοβαρές περιπτώσεις, το αίμα μπορεί να μην αποκατασταθεί πλήρως ακόμα και μετά από αρκετές ημέρες έκθεσης. Σε χαμηλές συγκεντρώσεις CO (50-100 ppm), τα συμπτώματα είναι ελάχιστα ή ανύπαρκτα, ακόμα και μετά από παρατεταμένη έκθεση. Σε μεσαίες συγκεντρώσεις (200-500 ppm), η αύξηση του CO στο αίμα προκαλεί δηλητηρίαση, ενώ σε επίπεδα άνω των 300 ppm, μπορεί να προκληθεί απώλεια συνείδησης μετά από μερικές ώρες. Σε υψηλότερες συγκεντρώσεις (750-2000 ppm), η αύξηση της συγκέντρωσης CO στο αίμα είναι ταχύτερη, με αποτέλεσμα τον θάνατο μέσα σε λίγες ώρες. Επιπλέον, η σωματική δραστηριότητα επιταχύνει την απορρόφηση CO, αυξάνοντας τους κινδύνους για τον οργανισμό (Σχήμα 3-1).



Σχήμα 3-1: Επίδραση του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) στον ανθρώπινο οργανισμό σε διάφορες συγκεντρώσεις και χρονικές περιόδους έκθεσης (McPherson, 1993).

Οι συγκεντρώσεις του μονοξειδίου του άνθρακα συνήθως μετρούνται με τον τύπο του οργάνου που φαίνεται στο Σχήμα 3-2. Το όργανο δεν είναι απόλυτα αξιόπιστο και μπορεί ορισμένες φορές να εμφανίζει ενδείξεις για την ατμόσφαιρα που φαίνονται να είναι σε ασφαλή επίπεδα, ενώ στην πραγματικότητα η ατμόσφαιρα μπορεί να είναι τοξική. Σε σοβαρές περιπτώσεις, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται εργαστήρια ανάλυσης δειγμάτων αέρα για να συμπληρώνουν τις ενδείξεις του οργάνου.



Σχήμα 3-2: Μετρητής αερίων CO, CO₂, (Εργαστήριο Υγιεινής & Ασφάλειας, σχολής Μηχόπ)

➤ **Διοξείδιο του Άνθρακα (CO₂)**

Το διοξείδιο του άνθρακα τείνει να συσσωρεύεται στο δάπεδο των στοών, καθώς είναι βαρύτερο από τον αέρα. Η αυξημένη συγκέντρωσή του μπορεί να αποτελέσει κίνδυνο για την υγεία του προσωπικού, επηρεάζοντας τόσο το αναπνευστικό όσο και το κεντρικό νευρικό σύστημα. Σε συγκεντρώσεις CO₂ μεταξύ 5% και 10%, αρχίζουν να εμφανίζονται σοβαρά συμπτώματα, όπως πονοκέφαλοι και έντονοι πόνοι. Σε συγκεντρώσεις μεταξύ 10% και 15%, οι επιπτώσεις είναι εξαιρετικά σοβαρές, με έντονους πονοκεφάλους, ανυπόφορους πόνους, γρήγορη αναπνοή και, σε ακραίες περιπτώσεις, θάνατο. Αυτά τα επίπεδα CO₂ καθιστούν την ατμόσφαιρα τοξική και επικίνδυνη για τη ζωή.

Οι παραπάνω επιπτώσεις εμφανίζονται με την προϋπόθεση ότι τα επίπεδα οξυγόνου παραμένουν εντός των φυσιολογικών ορίων και ότι ο εργαζόμενος δεν εκτελεί βαριές σωματικές εργασίες. Εάν οι συνθήκες αλλάξουν, τα συμπτώματα γίνονται πιο έντονα και πιο επικίνδυνα, ακόμη και σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις CO₂.

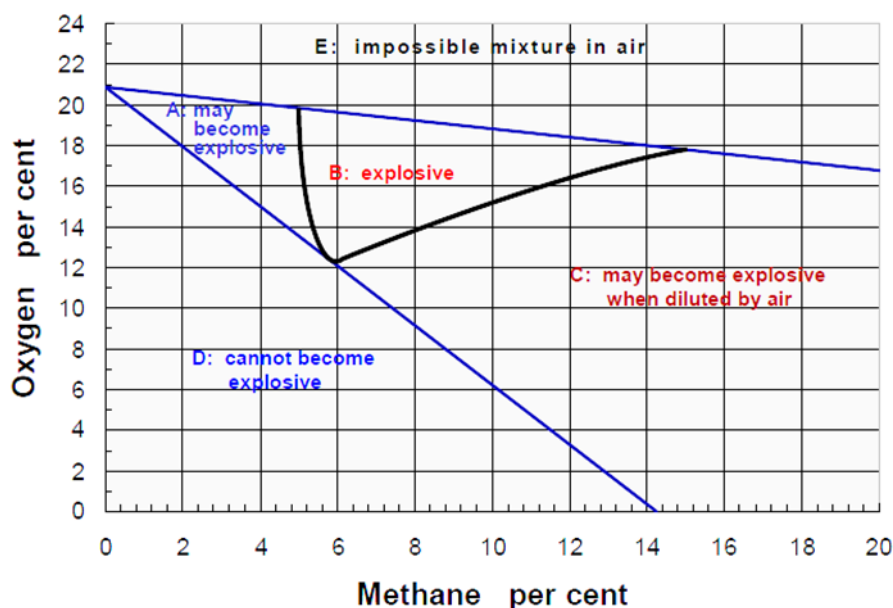
Η μέτρηση της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα σε υπόγεια μεταλλεία πραγματοποιείται λαμβάνοντας ένα μικρό δείγμα αέρα σε έναν γυάλινο σωλήνα, ο οποίος περιέχει μια χημική χρωστική ουσία. Η συγκεκριμένη ουσία αποχρωματίζεται όταν έρθει σε επαφή με το διοξείδιο του άνθρακα, και το επίπεδο του αποχρωματισμού υποδεικνύει τη συγκέντρωση του αερίου. Αυτός ο τύπος ανιχνευτή ([Σχήμα 3-2](#)) χρησιμοποιείται επίσης για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης άλλων αερίων, όπως το μονοξείδιο του άνθρακα, το υδρόθειο και τα οξείδια του αζώτου ([Hall 1981](#)).

➤ **Μεθάνιο (CH₄)**

Το μεθάνιο που είναι ένα αέριο άοσμο και η εισπνοή του σε υψηλές συγκεντρώσεις μπορεί να προκαλέσει ασφυξία, εντοπίζεται όχι μόνο σε ανθρακωρυχεία αλλά και σε άλλα μεταλλεία. Αποτελεί έναν από τους πιο κρίσιμους παράγοντες για την ασφάλεια στα υπόγεια μεταλλεία και γι' αυτό είναι απαραίτητο να υπάρχει ένα αποτελεσματικό σύστημα αερισμού που να διατηρεί τα επίπεδα του συγκεκριμένου αερίου κάτω από 0.5% v/v. Λόγω της επικινδυνότητάς του, είναι απαραίτητη η συνεχής ανίχνευση και παρακολούθηση του μεθανίου στις υπόγειες εργασίες, τόσο κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας όσο και μετά από περιστατικά όπως πυρκαγιές ή εκρήξεις.

Το [Σχήμα 3-3](#) δείχνει τη σχέση μεταξύ του ποσοστού μεθανίου και οξυγόνου στον αέρα και την πιθανότητα έκρηξης. Οι διάφορες περιοχές στο διάγραμμα υποδεικνύουν τις

συνθήκες κάτω από τις οποίες ένα μείγμα αέρα και μεθανίου μπορεί να γίνει εκρηκτικό ή να παραμείνει ασφαλές.



Σχήμα 3-3: Διάγραμμα ανάμιξης του μεθανίου με το οξυγόνο, (Mc Pherson, 1993).

Περιοχή Α: Αυτή η περιοχή δείχνει ότι το μείγμα μπορεί να γίνει εκρηκτικό όταν η συγκέντρωση του μεθανίου κυμαίνεται μεταξύ 5% v/v και 14% v/v, με το οξυγόνο να είναι πάνω από 12%.

Περιοχή Β: Αυτή είναι η πιο επικίνδυνη περιοχή όπου το μείγμα είναι εκρηκτικό. Το μείγμα μεθανίου και οξυγόνου μπορεί να προκαλέσει έκρηξη. Η έκρηξη μπορεί να συμβεί όταν η συγκέντρωση του μεθανίου είναι περίπου από 5% έως 15% και το οξυγόνο κυμαίνεται μεταξύ 13% και 20%.

Περιοχή C: Εδώ το μείγμα μπορεί να γίνει εκρηκτικό εάν αραιωθεί με αέρα, καθώς η συγκέντρωση του μεθανίου είναι υψηλή αλλά με σχετικά χαμηλό επίπεδο οξυγόνου.

Περιοχή D: Το μείγμα δεν μπορεί να γίνει εκρηκτικό, καθώς είτε το μεθάνιο είναι σε πολύ χαμηλή συγκέντρωση είτε το οξυγόνο είναι πολύ χαμηλό για να υποστηρίξει την έκρηξη.

Περιοχή E: Αυτή η περιοχή υποδεικνύει ένα μη ρεαλιστικό μείγμα για την ατμόσφαιρα, όπου δεν είναι δυνατή η ύπαρξη τέτοιων συγκεντρώσεων μεθανίου και οξυγόνου στον αέρα.

Συνολικά, το διάγραμμα δείχνει πώς η ισορροπία μεταξύ μεθανίου και οξυγόνου στον αέρα μπορεί να δημιουργήσει συνθήκες που να ευνοούν ή να αποτρέπουν μια έκρηξη.

➤ Υδρόθειο (H_2S)

Το υδρόθειο είναι ένα δύσοσμο και ιδιαίτερα τοξικό αέριο. Οι επιδράσεις του στον ανθρώπινο οργανισμό εξαρτώνται από τη συγκέντρωσή του στον αέρα και τη διάρκεια έκθεσης, συγκριμένα:

- Σε συγκέντρωση 0.005 – 0.010%, μετά από μια ώρα έκθεσης, προκαλεί ήπια συμπτώματα όπως ερεθισμό στα μάτια και τις αναπνευστικές οδούς.
- Σε συγκέντρωση 0.02% – 0.07%, τα συμπτώματα γίνονται πιο έντονα και περιλαμβάνουν σοβαρό ερεθισμό στα μάτια, πονοκέφαλο, ναυτία και πόνο στη μύτη, τον λάρυγγα και το στήθος.
- Σε συγκέντρωση 0.07% – 0.1%, υπάρχει κίνδυνος απώλειας αισθήσεων, διακοπής της αναπνοής και θανάτου.
- Σε συγκέντρωση 0.1% – 0.2%, ο θάνατος επέρχεται μέσα σε λίγα λεπτά.

Παρά την έντονη οσμή που μπορεί να αποκαλύψει την παρουσία του αερίου, πρέπει να σημειωθεί ότι η παρατεταμένη έκθεση, ακόμα και σε χαμηλές συγκεντρώσεις, μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια της αίσθησης της όσφρησης. Έκθεση σε ποσοστό 0.01% για 15 λεπτά προκαλεί αυτή την απώλεια, ενώ αυτό μπορεί να συμβεί και σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις αν η έκθεση παραταθεί. Επιπλέον, αέρας που περιέχει 4.3% έως 46% υδρόθειο (H_2S) μπορεί να εκραγεί αν εκτεθεί σε πηγή ανάφλεξης.

Το υδρόθειο που εντοπίζεται στα μεταλλεία προέρχεται κυρίως από την αποσύνθεση των πυριτών, την αποσύνθεση των ξύλων που χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη των υπόγειων εκσκαφών, και από την αποσύνθεση εκρηκτικών υλών που περιέχουν υψηλά επίπεδα θείου. Σπανιότερα, το υδρόθειο εκλύεται μαζί με το μεθάνιο από ανθρακοφόρα κοιτάσματα. Ωστόσο, συναντάται συχνότερα σε μεταλλικά μεταλλεία, όπως εκείνα με θειούχα μεταλλεύματα και γύψο, παρά σε ανθρακωρυχεία, (Οικονομόπουλος, 1991).

Για την επιτόπου ανίχνευση και μέτρηση του υδρόθειου, χρησιμοποιείται χρωματομετρική συσκευή όμοια με εκείνη που χρησιμοποιείται για το μονοξειδίο του άνθρακα (Σχήμα 3-4). Η διαφορά βρίσκεται στη φύσιγγα η οποία περιέχει κόκκους οξειδίου του αργιλίου που έχουν εμβαπτιστεί σε κυανιούχο άργυρο. Το ποσοστό του

υδρόθειου εκτιμάται από το μήκος του αντιδραστηρίου της φύσιγγας που άλλαξε χρωματισμό, λόγω του σχηματισμού θειούχου αργύρου.



Σχήμα 3-4: Ψηφιακός πολυμετρητής αερίων CO , H_2S , O_2 , (Εργαστήριο Υγιεινής & Ασφάλειας, σχολής Μηχόπ)

➤ Οξείδια του Αζώτου

Το άζωτο σχηματίζει διάφορα οξείδια, όπως τα N_2O , NO , NO_2 , N_2O_3 , N_2O_4 και N_2O_5 , με το N_2O να αποτελεί εξαίρεση, καθώς τα υπόλοιπα είναι τοξικά. Στα υπόγεια μεταλλεία συναντώνται κυρίως τα οξείδια NO και NO_2 , τα οποία προέρχονται από την αποσύνθεση των εκρηκτικών υλών και τα καυσαέρια των μηχανών εσωτερικής καύσης. Τοξικά αέρια εκρήξεων μπορεί να περιέχουν μεγάλες συγκεντρώσεις οξειδίων του αζώτου, ιδιαίτερα όταν το εκρηκτικό που χρησιμοποιείται είναι το ANFO.

Σε χαμηλές συγκεντρώσεις, αυτά τα οξείδια προκαλούν ήπια συμπτώματα όπως ερεθισμό του λάρυγγα και βήχα, ενώ σε υψηλότερα επίπεδα μπορούν να προκαλέσουν σοβαρό ερεθισμό στις αναπνευστικές οδούς, βρογχίτιδα ή πνευμονία. Η έκθεση σε NO_2 σε συγκέντρωση 0.01% για σύντομο χρονικό διάστημα μπορεί να είναι επικίνδυνη, ενώ σε επίπεδο 0.07% και με έκθεση περίπου μισής ώρας, μπορεί να είναι θανατηφόρα. Επομένως, ο αποτελεσματικός αερισμός είναι κρίσιμος για τη γρήγορη αραίωση και απομάκρυνση των καπνών που προέρχονται από τα εκρηκτικά και τα καυσαέρια.



Σχήμα 3-5: Μετρητής θερμοκρασίας και ταχύτητας αέρα, (Εργαστήριο Υγιεινής & Ασφάλειας, σχολής Μηχόπ).

3.3 Πηγές Αερίων

Ένας σημαντικός παράγοντας για τη μελέτη των αερίων ενός υπόγειου μεταλλείου είναι η κατανόηση της προέλευσής τους, η οποία συχνά συνδέεται με γεωλογικές δομές πλούσιες σε μεταλλεύματα ή συσσωρεύσεις ορυκτών. Αυτά τα αέρια συνήθως δημιουργούνται από τη διάσπαση οργανικών υλικών υπό συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα την εκπομπή πτητικών ενώσεων που περιέχουν στοιχεία όπως το θείο, το αρσενικό και άλλα. Επιπλέον, οι τεκτονικές δραστηριότητες μπορούν να συμβάλλουν στη μεταφορά αυτών των αερίων από μεγαλύτερα βάθη.

Φαινόμενα όπως η ηφαιστειακή και γεωθερμική δραστηριότητα οδηγούν στην απελευθέρωση διαφόρων αερίων, όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και το διοξείδιο του θείου (SO_2) από ορυκτά κοιτάσματα. Είναι αξιοσημείωτο ότι αυτές οι φυσικές εκπομπές αερίων συχνά συνδέονται με μεταλλικά στοιχεία που εντοπίζονται σε μεταλλοφόρα σώματα, γεγονός που οδηγεί στη δημιουργία υπόγειων αερίων που μπορούν να επηρεάσουν ουσιαστικά τις εξορυκτικές δραστηριότητες.

Οι ιζηματογενείς λεκάνες, που σχηματίζονται από τη συσσώρευση ιζημάτων σε εκατομμύρια χρόνια, λειτουργούν συχνά ως δεξαμενές φυσικού αερίου. Μέσα από γεωλογικές διεργασίες, τα οργανικά υλικά που θάβονται σε αυτά τα στρώματα υφίστανται θερμική επεξεργασία, μετασχηματιζόμενα σε υδρογονάνθρακες, οι οποίοι στη συνέχεια μεταναστεύουν διαμέσου πορωδών πετρωμάτων σε σχηματισμούς όπως ο σχιστόλιθος, ο ψαμμίτης και ο ασβεστόλιθος. Ο σχιστόλιθος, πλούσιος σε οργανικό

υλικό, λειτουργεί τόσο ως πετρώδες υπόστρωμα όσο και ως πιθανή δεξαμενή για αέριο, ενώ ο ψαμμίτης και ο ασβεστόλιθος, χάρη στη διαπερατότητά τους, επιτρέπουν την εύκολη ροή του αερίου. Συνολικά, η αλληλεπίδραση αυτών των γεωλογικών δομών επηρεάζει σημαντικά την αποδοτικότητα της παραγωγής αερίου, αναδεικνύοντας τη σημασία των γεωλογικών αξιολογήσεων στη διαχείριση ενεργειακών πόρων, (Sherburne, 2022).

Ένα σημαντικό ποσοστό προέλευσης των αερίων σε ένα υπόγειο μεταλλείο αφορά τις ανθρώπινες δραστηριότητες με τις βιομηχανικές διαδικασίες και τις εξορυκτικές δραστηριότητες να αποτελούν βασικές πηγές αυτών. Αυτές οι ανθρωπογενείς πηγές απελευθερώνουν διάφορα μέταλλα, τα οποία αλληλεπιδρούν με τα υπόγεια ύδατα και τους μικροοργανισμούς, οδηγώντας στην παραγωγή αερίων, όπως το μεθάνιο (CH_4) και το υδρόθειο (H_2S). Για παράδειγμα, οι εξορυκτικές και μεταλλουργικές διαδικασίες παράγουν απόβλητα με βαρέα μέταλλα, τα οποία μπορούν να διαρρεύσουν στα υπόγεια ύδατα και να υποστούν βιολογικές διεργασίες που τα μετατρέπουν σε αέρια.

Επιπλέον, οι χώροι υγειονομικής ταφής, που συχνά παραβλέπονται, συμβάλλουν στις εκπομπές αερίων, καθώς τα οργανικά απόβλητα αποσυντίθενται χωρίς την παρουσία οξυγόνου, απελευθερώνοντας έτσι μεταλλικά αέρια στο υπόγειο περιβάλλον. Αυτές οι διαδικασίες δημιουργούν σοβαρές ανησυχίες, καθώς τα παραγόμενα αέρια όχι μόνο απειλούν την ανθρώπινη υγεία αλλά ταυτόχρονα υποβαθμίζουν και το περιβάλλον. Η κατανόηση αυτών των ανθρωπογενών πηγών είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη στρατηγικών που θα μετριάσουν τις επιπτώσεις τους στα υπόγεια οικοσυστήματα.

Η πλήρης κατανόηση αυτών των περιβαλλοντικών επιπτώσεων είναι απαραίτητη για την ακριβή μέτρηση και τον έλεγχο αυτών των εκπομπών, καθώς είναι ζωτικής σημασίας τόσο για τη δημιουργία τεχνικών μετριασμού όσο και για την ανάπτυξη συσκευών παρακολούθησης (Academies, 2002).

3.4 Όργανα Μέτρησης

Η ασφάλεια των υπόγειων εκμεταλλεύσεων εξαρτάται άμεσα από την ακριβή μέτρηση των συγκεντρώσεων αερίων. Η ακριβής μέτρηση αερίων, όπως το μεθάνιο, το υδρόθειο και το διοξείδιο του άνθρακα, μπορεί να μειώσει σημαντικά τους κινδύνους εκρήξεων και τις αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία των εργαζομένων από τη μακροχρόνια έκθεση.

Καθώς η εξορυκτική βιομηχανία γίνεται όλο και πιο ευαισθητοποιημένη ως προς τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των δραστηριοτήτων της, η κατανόηση της δυναμικής των αερίων στα υπόγεια περιβάλλοντα έχει αναδειχθεί σε σημαντικό πεδίο μελέτης. Συνεπώς, η ενσωμάτωση ισχυρών συστημάτων μέτρησης αερίων δεν προστατεύει μόνο την υγεία των εργαζομένων στα ορυχεία, αλλά και ευθυγραμμίζεται με τις σύγχρονες ανάγκες της βιομηχανίας, προωθώντας την ασφάλεια και την αποδοτικότητα.

Οι αλλαγές στις συγκεντρώσεις αερίων μπορούν να υποδηλώνουν την ύπαρξη επικίνδυνων συνθηκών, γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη χρήση εξελιγμένων τεχνικών μέτρησης για την ανίχνευση και τον μετριασμό των πιθανών κινδύνων.

Διάφορες τεχνικές υπάρχουν για τη μέτρηση των συγκεντρώσεων αερίων, καθεμία με τα δικά της πλεονεκτήματα για συγκεκριμένα περιβάλλοντα. Φορητά όργανα, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται στην υπόγεια εξόρυξη, παρέχουν άμεσες και τοπικές μετρήσεις επικίνδυνων αερίων, όπως το ραδόνιο. Σε πρόσφατη μελέτη στα υπόγεια ορυχεία τανζανίτη στη Merelani, οι ερευνητές χρησιμοποίησαν δύο τύπους φορητών συσκευών για να αξιολογήσουν αποτελεσματικά τις συγκεντρώσεις ραδονίου και αναπνεύσιμης σκόνης μεταλλεύματος, (Kahuluda, et al., 2016). Η μελέτη αυτή αξιολόγησε τις συγκεντρώσεις ραδονίου και εισπνεύσιμης σκόνης μεταλλεύματος. Χρησιμοποιήθηκαν φορητοί ανιχνευτές AlphaGuardTM για το ραδόνιο και DustTruckTM για τη σκόνη. Η σκόνη προερχόταν κυρίως από τη διαδικασία γεώτρησης και ανατίναξης, με συγκεντρώσεις υψηλότερες από το όριο ασφαλείας για τα υπόγεια ορυχεία.

Οι σύγχρονες μέθοδοι μέτρησης των συγκεντρώσεων αερίων σε υπόγεια μεταλλεία έχουν εξελιχθεί σημαντικά, με τη χρήση τεχνολογιών αιχμής που επιτρέπουν ακριβείς και συνεχείς μετρήσεις. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικές από τις πιο προηγμένες συσκευές μέτρησης:

- I. Ανιχνευτές ραδονίου: Αυτές οι συσκευές χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση των συγκεντρώσεων ραδονίου στα υπόγεια ορυχεία. Το ραδόνιο είναι ραδιενεργό αέριο που μπορεί να εκπέμπεται από πετρώματα και μέταλλα, και η παρατεταμένη έκθεση σε αυτό μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα υγείας, όπως καρκίνο των πνευμόνων. Συσκευές όπως το AlphaGuard ,[Σχήμα 3-6](#), και παρόμοιοι ανιχνευτές επιτρέπουν τη

μέτρηση των επιπέδων αυτού του αερίου και βοηθούν στη λήψη μέτρων για τη μείωση της έκθεσης.

- II. Μετρητές ροής αέρα: Αυτά τα όργανα χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ταχύτητας και του όγκου του αέρα που κυκλοφορεί μέσα στις υπόγειες στοές. Ο έλεγχος της ροής αέρα είναι κρίσιμος για την εξασφάλιση επαρκούς αερισμού, απομακρύνοντας επικίνδυνα αέρια και διατηρώντας τα επίπεδα οξυγόνου ασφαλή για τους εργαζόμενους. Συσκευές όπως οι ανεμόμετρα και οι δείκτες καπνού χρησιμοποιούνται συχνά για τη μέτρηση της ροής και την ανίχνευση ανεπαρκειών στον αερισμό.
- III. Αναλυτές αερίων: Αυτές οι συσκευές είναι απαραίτητες για τη μέτρηση της συγκέντρωσης επικίνδυνων αερίων, όπως το μεθάνιο (CH_4), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), και το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Τα αέρια αυτά μπορούν να προκαλέσουν εκρήξεις ή ασφυξία, και η συνεχής παρακολούθησή τους είναι ζωτικής σημασίας. Οι αναλυτές αερίων λειτουργούν με τη συλλογή δείγματος αέρα και τη μέτρηση των συγκεντρώσεων αερίων σε πραγματικό χρόνο, βοηθώντας τους μηχανικούς να προβλέψουν και να αποτρέψουν κινδύνους.
- IV. Συσκευές παρακολούθησης θερμοκρασίας και υγρασίας, [Σχήμα 3-5](#): Παρόλο που αυτά τα όργανα δεν μετρούν άμεσα αέρια, η παρακολούθηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας είναι σημαντική για τη διασφάλιση άνετων και ασφαλών συνθηκών στο εσωτερικό των υπόγειων χώρων. Η υψηλή θερμοκρασία και η υγρασία μπορεί να προκαλέσουν δυσφορία ή και επικίνδυνες συνθήκες για τους εργαζόμενους.
- V. Φορητοί πολυανιχνευτές αερίων: Αυτές οι συσκευές χρησιμοποιούν μια ποικιλία τεχνολογιών για την ταυτόχρονη μέτρηση πολλών αερίων, όπως οξυγόνο (O_2), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), υδρόθειο (H_2S), μεθάνιο (CH_4) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Συνήθως διαθέτουν ενσωματωμένα ηλεκτροχημικά, υπέρυθρα ή καταλυτικά αισθητήρια, κατάλληλοι για χρήση σε πραγματικό χρόνο, επιτρέπουν την παρακολούθηση των συνθηκών αερισμού σε διάφορα σημεία του μεταλλείου.
- VI. Ανιχνευτές καταλυτικής καύσης: Οι ανιχνευτές αυτοί είναι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση εκρηκτικών αερίων, όπως το μεθάνιο (CH_4). Η λειτουργία τους βασίζεται στην καταλυτική καύση του αερίου πάνω σε μια θερμαινόμενη πλατίνη, η οποία προκαλεί αλλαγή στην

ηλεκτρική αντίσταση του αισθητήρα. Αυτή η αλλαγή αντιστοιχεί στη συγκέντρωση του αερίου στον αέρα. Οι ανιχνευτές αυτοί είναι ιδανικοί για την ανίχνευση εκρηκτικών αερίων, καθώς μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν σε συστήματα ασφαλείας, παρέχοντας αξιόπιστη προστασία σε επικίνδυνα περιβάλλοντα, όπως τα υπόγεια μεταλλεία.

Οι παραπάνω συσκευές αυτές είναι απαραίτητες για την αποτελεσματική διαχείριση του αερισμού στα ορυχεία, εξασφαλίζοντας ότι οι εργαζόμενοι δεν εκτίθενται σε επικίνδυνα αέρια ή συνθήκες που μπορούν να βλάψουν την υγεία τους.



Σχήμα 3-6: Συσκευή ανίχνευσης ραδονίου (peodetection.com)

3.5 Νομοθεσία

Ο αερισμός αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την ασφάλεια των εργαζομένων και την ομαλή λειτουργία των υπόγειων έργων, γι' αυτό και οι εταιρείες που δραστηριοποιούνται στην εξόρυξη υποχρεούνται να συμμορφώνονται με τους κανονισμούς που έχει θεσπίσει το κράτος.

Οι κανονισμοί που αφορούν τον αερισμό στα υπόγεια μεταλλεία και τεχνικά έργα καθορίζονται τόσο από τον Κανονισμό Μεταλλευτικών και Λατομικών Εργασιών (ΚΜΛΕ ΥΑ 2223 ΦΕΚ 1227 14/06/11) όσο και από το ΠΡΟΕΔΡΙΚΟ ΔΙΑΤΑΓΜΑ 225/1989 «Υγιεινή και ασφάλεια στα υπόγεια τεχνικά έργα» (Φ.Ε.Κ. 106/Α/2-5-1989). Παρακάτω παρατίθενται τα κύρια σημεία των κανονισμών αυτών που σχετίζονται με τον αερισμό (*ΚΜΛΕ, 2011*) τα βασικά όρια, παρατίθεται στο *Παράρτημα Α*.

Οι μετρήσεις πρέπει να πραγματοποιούνται σε τακτά χρονικά διαστήματα για να εξασφαλίζεται η συνεχής συμμόρφωση με τα παραπάνω όρια. Τα συγκεκριμένα όρια είναι κρίσιμα για την προστασία της ασφάλειας και της υγείας των εργαζομένων στα υπόγεια μεταλλεία και απαιτείται να τηρούνται αυστηρά για την αποτροπή κινδύνων.

3.6 Τρόποι Περιορισμού αερίων σε υπόγειες εκμεταλλεύσεις

Ο περιορισμός των αερίων σε ένα υπόγειο μεταλλείο είναι ζωτικής σημασίας για την ασφάλεια των εργαζομένων και τη διατήρηση της ομαλής λειτουργίας των εργασιών. Υπάρχουν διάφορες στρατηγικές που μπορούν να εφαρμοστούν για να μειωθεί η παρουσία επικίνδυνων αερίων και να διασφαλιστεί η σωστή κυκλοφορία καθαρού αέρα. Αυτές περιλαμβάνουν τη βελτιστοποίηση του συστήματος αερισμού, τη συνεχή παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα με χρήση αισθητήρων, καθώς και τη λήψη προληπτικών μέτρων για τον εντοπισμό και την απομάκρυνση των επιβλαβών αερίων πριν φτάσουν σε επικίνδυνα επίπεδα.

- I. Αποτελεσματικός Αερισμός: Ο βασικότερος τρόπος για τον περιορισμό των υπόγειων αερίων είναι η εγκατάσταση ενός αποδοτικού συστήματος αερισμού. Αυτά τα συστήματα εξασφαλίζουν τη συνεχή παροχή φρέσκου αέρα από την επιφάνεια στις σήραγγες του ορυχείου, ενώ ταυτόχρονα απομακρύνουν τον ρυπασμένο αέρα. Με αυτόν τον τρόπο, διασφαλίζεται η διαρκής παροχή καθαρού αέρα, η μείωση της συγκέντρωσης επιβλαβών αερίων και η διατήρηση κατάλληλων επιπέδων θερμοκρασίας και υγρασίας, συμβάλλοντας έτσι στη δημιουργία ασφαλέστερου περιβάλλοντος εργασίας.
- II. Εγκατάσταση Ανιχνευτών Αερίων: Η τοποθέτηση ανιχνευτών αερίων σε κρίσιμα σημεία του μεταλλείου επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση της συγκέντρωσης επικίνδυνων αερίων, όπως το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), το μεθάνιο (CH₄) και το υδρόθειο (H₂S). Σε περιπτώσεις που οι συγκεντρώσεις αυτών των αερίων αυξάνονται, το προσωπικό μπορεί να ειδοποιηθεί άμεσα. Η έγκαιρη ανίχνευση μειώνει δραστικά τον κίνδυνο εκρήξεων ή δηλητηρίασης, επιτρέποντας την άμεση λήψη κατάλληλων μέτρων ασφαλείας.
- III. Χρήση Φυσικών και Τεχνητών Φραγμάτων Αέρα: Φυσικά ή τεχνητά φράγματα αέρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποτροπή της διασποράς επικίνδυνων αερίων μέσα στο ορυχείο. Αυτά τα φράγματα (κουρτίνες) λειτουργούν ως εμπόδια, αποτρέποντας τη διαρροή αερίων σε ενεργές περιοχές και επιτρέποντας τον διαχωρισμό των διαφόρων τμημάτων του ορυχείου. Με αυτόν τον τρόπο, η συγκέντρωση των επικίνδυνων αερίων περιορίζεται σε συγκεκριμένες περιοχές, διευκολύνοντας τον έλεγχο της ποιότητας του αέρα και τη διατήρηση ασφαλών συνθηκών εργασίας.

- IV. Απομάκρυνση Πηγών Ανάφλεξης: Η απομάκρυνση ή ο περιορισμός πηγών ανάφλεξης, όπως ανοιχτές φλόγες, σπινθήρες και εκρηκτικά υλικά, είναι κρίσιμης σημασίας για τη μείωση του κινδύνου έκρηξης από εύφλεκτα αέρια, όπως το μεθάνιο. Αυτά τα μέτρα συμβάλλουν στη μείωση του κινδύνου εκρήξεων, ειδικά σε περιπτώσεις όπου οι συγκεντρώσεις εύφλεκτων αερίων είναι υψηλές, προστατεύοντας έτσι το προσωπικό και τις εγκαταστάσεις.
- V. Κατάλληλη Συντήρηση Μηχανημάτων: Τα μηχανήματα εσωτερικής καύσης σε υπόγεια μεταλλεία εκπέμπουν αέρια όπως μονοξείδιο του άνθρακα και οξείδια του αζώτου. Η τακτική συντήρηση των μηχανημάτων διασφαλίζει ότι οι εκπομπές αερίων είναι περιορισμένες και τα επίπεδα ασφαλή..
- VI. Σφράγιση Εγκαταλελειμμένων Χώρων: Οι εγκαταλελειμμένες περιοχές ενός ορυχείου μπορούν να αποτελέσουν επικίνδυνες πηγές αερίων. Η σφράγιση αυτών των περιοχών με κατάλληλα υλικά αποτρέπει τη διαρροή αερίων προς τις ενεργές ζώνες του ορυχείου. Αυτό το μέτρο μειώνει την πιθανότητα συγκέντρωσης επικίνδυνων αερίων στα εγκαταλελειμμένα τμήματα, διασφαλίζοντας την ασφάλεια του υπόλοιπου μεταλλείου και του προσωπικού.

Ο συνδυασμός αυτών των τεχνικών και μέτρων ασφάλειας μπορεί να συμβάλει αποφασιστικά στη μείωση των κινδύνων που προκύπτουν από τα υπόγεια αέρια. Με αυτόν τον τρόπο, διασφαλίζεται η υγεία των εργαζομένων και εξασφαλίζεται η ομαλή και ασφαλής λειτουργία του μεταλλείου.

Κεφάλαιο 4: Βασικές Αρχές Αερισμού

Η μελέτη της ροής του αέρα σε υπόγεια μεταλλεία στηρίζεται στις θεμελιώδεις αρχές της ρευστομηχανικής και σε εξειδικευμένα μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη τις ιδιαίτερες συνθήκες των υπόγειων εκμεταλλεύσεων καθώς ο αερισμός αποτελεί εφαρμογή αυτών των αρχών στο υπόγειο δίκτυο που λειτουργούν ως αγωγοί αέρα.

4.1 Βασικά Στοιχεία Ροής Αέρα

Η ανάλυση του αερισμού επικεντρώνεται σε δύο βασικούς τομείς: τις απώλειες πίεσης που οφείλονται στην ιξώδη τριβή, η οποία σχετίζεται άμεσα με τις βαθμίδες του πεδίου ταχύτητας της ροής αέρα στους διάφορους αγωγούς και διακλαδώσεις του συστήματος.

Σε έναν αγωγό κυκλικής διατομής, όταν η ταχύτητα ροής είναι χαμηλή, οι τροχιές των μορίων του αέρα είναι παράλληλες, σχηματίζοντας τη λεγόμενη στρωτή ροή. Ωστόσο, για να επιτευχθεί καλύτερη διασπορά και απομάκρυνση των επικίνδυνων αερίων και της σκόνης, η τυρβώδης ροή είναι απαραίτητη. Η τελευταία κυριαρχεί σε μεγαλύτερες τιμές της ταχύτητας ροής.

Η μετάβαση από τη στρωτή στην τυρβώδη ροή χαρακτηρίζεται με βάση τον αδιάστατο αριθμό Reynolds ο οποίος εκφράζεται με την [εξίσωση 4.1](#). Πρόκειται για μια θεμελιώδη παράμετρο που περιγράφει τον τύπο ροής σε ένα σύστημα και εξαρτάται από την ταχύτητα ροής, την πυκνότητα, το ιξώδες του αέρα και την υδραυλική διάμετρο του αγωγού.

$$Re = \frac{\rho ul}{n} = \frac{ul}{\nu} \quad [4.1]$$

όπου:

Re : Ο αριθμός του Reynolds

ρ : Η πυκνότητα του ρευστού

u : Η ταχύτητα της ροής

l : Η διάμετρος του αγωγού

n : Το ιξώδες του ρευστού

ν : Το κινηματικό ιξώδες του ρευστού

Στα μεταλλεία, είναι απαραίτητο να αναπτύσσεται τυρβώδης ροή, καθώς επιτρέπει την καλύτερη ανάμιξη του αέρα (υδροδυναμική διασπορά ρύπων) κάτι που εξασφαλίζει την απομάκρυνση των επικίνδυνων αερίων. Εάν ο αριθμός Reynolds είναι χαμηλός, το ρευστό κινείται στρωτά, ενώ σε υψηλές τιμές η ροή γίνεται τυρβώδης, συνοδευόμενη από αναταράξεις και αστάθεια. Επομένως, ο υπολογισμός του αριθμού αυτού είναι κρίσιμος για τον σωστό σχεδιασμό των διαστάσεων των αγωγών, της διάταξης των δικτύων και της επιλογής ανεμιστήρων που θα είναι ικανοί να αντισταθμίσουν τις απώλειες πίεσης.

Επίσης απαιτείται η μεταφορά μεγάλων όγκων αέρα για να διασφαλιστεί η ομαλή διεξαγωγή των εξορυκτικών εργασιών. Οι μετρήσεις της ογκομετρικής παροχής του αέρα Q συνήθως υπολογίζονται βάσει του όγκου του αέρα (m^3) που περνά μέσα από μια δεδομένη διατομή αγωγού ανά μονάδα χρόνου (s), κάτι που είναι απαραίτητο για την αποτελεσματικότητα του συστήματος αερισμού. Η μονάδα μέτρησης της ογκομετρικής παροχής είναι m^3/s στο σύστημα μονάδων SI και υπολογίζεται με βάση την [εξίσωση 4.2](#):

$$Q = v \times A \quad m^3/s \quad [4.2]$$

όπου:

v : ταχύτητα του αέρα (m/s)

A : επιφάνεια διατομής του αγωγού (m^2)

4.2 Απώλειες Πίεσης

Στον αερισμό των υπόγειων μεταλλείων, αυτό που έχει μεγαλύτερη σημασία είναι οι διαφορές πίεσης που εμφανίζονται μέσα στο σύστημα, παρά οι απόλυτες τιμές της πίεσης. Η ροή του αέρα στους αγωγούς προκύπτει μόνο όταν υπάρχει διαφορά πίεσης μεταξύ δύο σημείων του συστήματος. Αυτή η διαφορά πίεσης δημιουργείται είτε από φυσικές είτε από μηχανικές πηγές ενέργειας και η ενέργεια που καταναλώνεται χρησιμοποιείται για να υπερνικηθούν οι ιξώδεις τριβές κατά τη ροή.

Οι απώλειες πίεσης (h) χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: εκείνες που προκύπτουν από τριβές του αέρα με τα τοιχώματα των αγωγών και εκείνες που οφείλονται σε κρούσεις, όπως αλλαγές στην κατεύθυνση ή σε εμπόδια μέσα στο σύστημα. Αυτές οι απώλειες πρέπει να αντιμετωπιστούν για να διατηρηθεί η σωστή ροή του αέρα στο δίκτυο. Η εκτίμηση αυτών των απωλειών πραγματοποιείται με τη χρήση μαθηματικών

εξισώσεων, όπως η εξίσωση του Bernoulli (Εξίσωση Μηχανικής Ενέργειας), η οποία συσχετίζει την πίεση, την ταχύτητα και την υψομετρική ενέργεια του αέρα. Επιπλέον, οι νόμοι του Kirchhoff χρησιμοποιούνται για την ανάλυση σύνθετων δικτύων αερισμού, βοηθώντας στη διανομή της ροής του αέρα μέσω των διαφορετικών διαδρομών.

4.2.1 Απώλειες Πίεσης Λόγω Τριβών

Η τριβή των ρευμάτων αέρα με τα τοιχώματα των αγωγών είναι η κύρια αιτία απώλειας πίεσης, γνωστής ως απώλεια λόγω τριβών (h_T). Οι διαστάσεις των αγωγών, η κατάσταση των τοιχωμάτων τους, καθώς και η ταχύτητα του αέρα, επηρεάζουν άμεσα αυτές τις απώλειες. Σε ευθύγραμμα τμήματα αγωγών με ομοιόμορφη διατομή, οι απώλειες τριβής αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος των συνολικών απωλειών στα συστήματα αερισμού.

Στα μηχανικά αεριζόμενα μεταλλεία, οι απώλειες από τριβές στις κύριες στοές συνήθως κυμαίνονται από 70% έως 90% του συνόλου των απωλειών πίεσης, αν και αυτό το ποσοστό μπορεί να είναι χαμηλότερο σε ορισμένες περιπτώσεις. Γι' αυτόν τον λόγο, οι απώλειες αυτές απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή και ακρίβεια κατά τον σχεδιασμό και τους υπολογισμούς του αερισμού, καθώς είναι συνήθως πιο σημαντικές από τις απώλειες λόγω κρούσεων.

Οι απώλειες πίεσης λόγω τριβών υπολογίζονται με τη χρήση του τύπου Murgue ή Atkinson, [εξίσωση 4.3](#), ο οποίος προκύπτει από τον κατάλληλο μετασχηματισμό της εξίσωσης Darcy. Η εξίσωση Darcy – Weisbach χρησιμοποιείται στη ρευστομηχανική για τον υπολογισμό της ροής σε αγωγούς κυκλικής διατομής και αποτελεί θεμελιώδη εργαλείο για την κατανόηση της συμπεριφοράς των ρευστών μέσα σε αγωγούς, ([Οικονομόπουλος, 1991](#)).

$$h_T = \left(\frac{K \times L \times \Pi}{S} \right) \times v^2 \quad [4.3]$$

όπου:

h_T : απώλειες πίεσης από τριβές (mmH₂O ή kp/m²)

L : μήκος του αγωγού (m)

Π : περίμετρος του αγωγού (m)

S : διατομή του αγωγού (m²)

v : ταχύτητα του ρεύματος του αέρα (m/s)

K : εμπειρικός συντελεστής τριβής (kps²m⁻⁴)

Δεδομένου ότι η παροχή Q (m^3/s) συνδέεται με τα μεγέθη S και v με την [εξίσωση 4.4](#) εύκολα προκύπτει ότι:

$$h_T = \left(\frac{K \times L \times \Pi}{S^3} \right) \times Q^2 \quad [4.4]$$

Ο συντελεστής τριβής K θεωρείται ως ανεξάρτητος της παροχής και εξαρτάται από το σχήμα της διατομής των αγωγών, το είδος υποστήριξης αυτών ως και την κατάσταση των τοιχωμάτων τους (παρειές, οροφή και δάπεδο). Ενδεικτικές τιμές του συντελεστή για διάφορες μορφές διατάξεων δίνονται στον [Πίνακα 4-1](#), για τοιχώματα με μέτρια κατάσταση ανωμαλιών:

Πίνακας 4-1: Τιμές συντελεστή $K(\text{kgfsec}^2\text{m}^{-4}$ ή $\text{kgm}^{-3}\text{10}^{-1}$) για κανονικό ειδικό βάρος του αέρα $\delta_o = 1,23 \text{ kgm}^{-3}$. (Οικονομόπουλος, 1991). A. Μεταλλεία			
Στοές ευθύγραμμες			
	Χωρίς εμπόδια	Με λίγα εμπόδια	Με αρκετά εμπόδια
Με επένδυση	0,00028	0,00038	0,00057
Με υποστήριξη (πλαίσια ανά 1,5 m)	0,00180	0,00190	0,00208
Σε ιζηματογενή πετρώματα	0,00100	0,00113	0,00132
Σε πυριγενή πετρώματα	0,00270	0,00283	0,00300
Στοές μέτρια καμπυλωτές			
Με επένδυση	0,00057	0,00066	0,00085
Με υποστήριξη (πλαίσια ανά 1,5 m)	0,00200	0,00217	0,00237
Σε ιζηματογενή πετρώματα	0,00132	0,00142	0,00161
Σε πυριγενή πετρώματα	0,00303	0,00312	0,00331
B. Ανθρακορυχεία			
Στοές ευθύγραμμες			
	Χωρίς εμπόδια	Με λίγα εμπόδια	Με αρκετά εμπόδια
Διάνοιξη με μηχανήματα συνεχούς ορύξεως	0,00047	0,00053	0,00064
Κοχλίωση οροφής	0,00081	0,00093	0,00155
Με πλαίσια υποστηρίξεως	0,00127	0,00142	0,00064

Στοές καμπυλωτές			
Διάνοιξη με μηχανήματα συνεχούς ορύξεως	0,00047	0,00053	0,00064
Κοχλίωση οροφής	0,00081	0,00093	0,00115
Με πλαίσια υποστηρίξεως	0,00127	0,00142	0,00155

Αξιοσημείωτο είναι ότι η εξίσωση υπολογισμού των απωλειών λόγω τριβών δεν περιλαμβάνει όρο σχετικά με την πυκνότητα του αέρα, για αυτό τον λόγο ο συντελεστής K που δίνεται στους πίνακες αναφέρεται στην κανονική πυκνότητα αέρα ($\delta_0 = 1,23 \text{ kgf/m}^3$), (Οικονομόπουλος, 1991).

4.2.2 Απώλειες Πίεσης Λόγω Κρούσεων

Οι απώλειες πίεσης λόγω κρούσεων (h_k) ή αλλιώς τοπικές απώλειες μηχανικής ενέργειας οφείλονται στις μεταβολές της διατομής των αγωγών ή στην αλλαγή της κατεύθυνσης της ροής του αέρα. Σε υπόγεια μεταλλεία, τέτοιες αλλαγές διατομής ή διεύθυνσης δημιουργούν κρούσεις, οι οποίες εντείνονται όταν υπάρχουν εμπόδια όπως βαγόνια, μηχανήματα ή υλικά μέσα στους αγωγούς. Αν και οι απώλειες αυτές αποτελούν το 10-30% των συνολικών απωλειών πίεσης, ο ακριβής υπολογισμός τους είναι δύσκολος λόγω της ποικιλίας των συνθηκών.

Οι απώλειες λόγω κρούσεων εξαρτώνται από τη δυναμική πίεση της ροής (P_d), η οποία σχετίζεται με τη μέση ταχύτητα του αέρα, και από έναν συντελεστή K' , που ονομάζεται συντελεστής κρούσης και υπολογίζεται μέσω πειραματικών μεθόδων. Δεδομένου ότι τα μεγέθη των h_k (απώλειες πίεσης λόγω κρούσεων) και P_d (δυναμική πίεση) εκφράζονται με τις ίδιες μονάδες και επηρεάζονται από τις μεταβολές της πυκνότητας του αέρα, είναι σαφές ότι ο συντελεστής K' είναι αδιάστατο μέγεθος. Αυτή η ιδιότητα τον διαφοροποιεί από τον συντελεστή τριβής K , αν και υπάρχει μια γενική αναλογία μεταξύ τους. Υπολογίζεται σύμφωνα με την [εξίσωση 4.5](#) και διαφοροποιείται ανάλογα με τις συνθήκες ροής και τα εμπόδια που υπάρχουν, καθιστώντας την πρόβλεψη και τον ακριβή υπολογισμό των απωλειών πιο περίπλοκη υπόθεση, ειδικά σε περιβάλλοντα όπως τα υπόγεια μεταλλεία.

$$h_k = K' \times P_d = K' \times \left(\frac{\delta \times v^2}{2g} \right) \quad [4.5]$$

Για την απλοποίηση των υπολογισμών των απωλειών πίεσης λόγω κρούσεων, εισάγεται η έννοια του ισοδύναμου μήκους (L_e). Το ισοδύναμο μήκος αναφέρεται στο ευθύγραμμο μήκος του αγωγού στο οποίο η πτώση πίεσης είναι ίση με την πτώση που προκαλείται από την παρουσία ενός εμποδίου στη ροή του αέρα. Αυτή η προσέγγιση προσφέρει έναν ευρέως αποδεκτό τρόπο για τον υπολογισμό των απωλειών πίεσης λόγω κρούσεων.

Με τη χρήση του ισοδύναμου μήκους, οι ολικές απώλειες πίεσης, δηλαδή οι απώλειες που οφείλονται τόσο στις τριβές όσο και στις κρούσεις, μπορούν να υπολογιστούν συνδυαστικά με τη βοήθεια κατάλληλων μαθηματικών τύπων, όπως η [εξίσωση 4.6](#). Αυτή η μέθοδος επιτρέπει τη συνεκτίμηση των επιπτώσεων των εμποδίων και των μεταβολών στη ροή αέρα χωρίς να χρειάζεται να υπολογιστούν ξεχωριστά οι απώλειες κρούσεων σε κάθε περίπτωση, κάτι που καθιστά τον υπολογισμό πιο ευέλικτο και πρακτικό για συστήματα αερισμού υπόγειων μεταλλείων.

$$h = h_T + h_K = \frac{K \times \Pi \times (L + L_e) \times Q^2}{S^3} \quad [4.6]$$

Στον [Πίνακα 4-2](#) παρουσιάζονται οι τιμές των ισοδύναμων μηκών για διάφορες χαρακτηριστικές περιπτώσεις, οι οποίες χρησιμοποιούνται για να επιτευχθεί ικανοποιητική ακρίβεια στους υπολογισμούς που απαιτούνται στη συνηθισμένη μεταλλευτική πρακτική. Οι τιμές αυτές βασίζονται στην επιλογή ενός συντελεστή απωλειών λόγω τριβών K ίσου με $0.00180 \text{ kgf} \cdot \text{sec}^2/\text{m}^4$. Αυτός ο συντελεστής αντιστοιχεί σε στοές χωρίς εμπόδια, οι οποίες υποστηρίζονται με ξύλινα πλαίσια που τοποθετούνται σε αποστάσεις 1.5 μέτρων, και με τοιχώματα που παρουσιάζουν μέτρια ανωμαλία, (Οικονομόπουλος, 1991).

Πίνακας 4-2: Ισοδύναμα μήκη για διατάξεις σε αγωγούς που προκαλούν απώλειες πίεσεων λόγω κρούσεων (Οικονομόπουλος, 1991).

ΔΙΑΤΑΞΗ	ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΜΗΚΟΣ (M)
ΑΛΛΑΓΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ – ΟΡΘΗ ΓΩΝΙΑ	20
ΑΛΛΑΓΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ – ΟΞΕΙΑ ΓΩΝΙΑ	45
ΑΛΛΑΓΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ – ΑΜΒΛΕΙΑ ΓΩΝΙΑ	5
ΑΠΟΤΟΜΗ ΑΥΞΗΣΗ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	6
ΑΠΟΤΟΜΗ ΜΕΙΩΣΗ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	3
ΠΡΟΟΔΕΥΤΙΚΗ ΑΥΞΗΣΗ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	1
ΔΙΑΚΛΑΔΩΣΗ	10

ΕΙΣΟΔΟΣ ΑΕΡΑ ΧΩΡΙΣ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑ	6
ΈΞΟΔΟΣ ΑΕΡΑ ΧΩΡΙΣ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑ	20
ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ ΟΧΗΜΑΤΟΣ (40% ΔΙΑΤΟΜΗΣ)	150

Σχήμα 4-1: Τύποι διατάξεων που προκαλούν πτώσεις πίεσης λόγω κρούσεων , (Chan et al. (2010).

Σε περιπτώσεις όπου συμβαίνει μεταβολή του μεγέθους της διατομής του αγωγού ή κατά την είσοδο του αέρα σε αυτόν, οι απώλειες πίεσης λόγω κρούσεων πρέπει να υπολογίζονται βάσει της διατομής του αγωγού που ακολουθεί τη μεταβολή. Η μόνη εξαίρεση αφορά την έξοδο του αέρα, όπου οι απώλειες κρούσεων υπολογίζονται με βάση τη διατομή του αγωγού που προηγείται της εξόδου, καθώς η μεταβολή ροής συμβαίνει πριν από το τέλος του αγωγού.

Επιπλέον, αν υπάρχει τοποθετημένος ανεμιστήρας στην είσοδο ή την έξοδο του αέρα, δεν θα πρέπει να υπολογίζονται απώλειες λόγω κρούσεων σε αυτές τις θέσεις, καθώς ο ανεμιστήρας επηρεάζει τη ροή του αέρα με τρόπο που παρακάμπτει τις συγκεκριμένες απώλειες. Αυτό είναι κρίσιμο στον σχεδιασμό συστημάτων αερισμού, όπου πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ακριβής επίδραση των ανεμιστήρων και η θέση τους στο σύστημα, ώστε να μην γίνεται λανθασμένος υπολογισμός των απωλειών.

4.3 Χαρακτηριστικά Μεγέθη Μεταλλείου

4.3.1 Αντίσταση

Η αντίσταση ενός αγωγού αναφέρεται στην αντίσταση που συναντά ο αέρας κατά τη ροή του μέσα από τον αγωγό, λόγω της τριβής στα τοιχώματα και των κρούσεων σε αλλαγές κατεύθυνσης ή εμπόδια. Είναι φανερό ότι στην [εξίσωση 4.6](#) το μέγεθος $K \cdot \Pi \cdot (L + L_e)$ είναι σταθερό. Αυτό καλείται αντίσταση του αγωγού, R , η οποία εκφράζεται

σε $\text{kp}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}^{-8}$ ή $\text{Ns}^2\cdot\text{m}^{-8}$ και υπολογίζεται από την θεμελιώδη [εξίσωση 4.7](#) του αερισμού των μεταλλείων:

$$h = R \times Q^2 \quad [4.7]$$

Στην γαλλική κυρίως βιβλιογραφία η μονάδα αντίστασης καλείται Murgue και στις εφαρμογές χρησιμοποιείται συχνότερα το kiloMurgue. Η μονάδα αυτή προκύπτει από την [εξίσωση 4.7](#) εφ' όσον τα h και Q εκφράζονται σε kgf/m^2 (ή mmH_2O) και m^3/sec αντίστοιχα στο SI.

Η μονάδα kiloMurgue αναφέρεται στην αντίσταση του αγωγού, και ισούται με 1 kiloMurgue όταν για παροχή $1 \text{ m}^3/\text{sec}$ οι απώλειες πίεσης είναι $1 \text{ mmH}_2\text{O}$. Αυτός ο υπολογισμός είναι βασικός για τη μελέτη των δικτύων αερισμού.

Επιπλέον, το ανάλογο μέγεθος της αγωγιμότητας έχει μονάδα μέτρησης το Guibal και δίνεται από την [εξίσωση 4.8](#):

$$T = \frac{1}{\sqrt{R}} = \frac{Q}{\sqrt{h}} \quad [4.8]$$

Το μέγεθος είναι χρήσιμο για τη μελέτη της δομής των δικτύων αερισμού, καθώς παρέχει πληροφορίες για την ικανότητα ροής του αέρα μέσω των αγωγών, (Οικονομόπουλος, 1991).

Η αντίσταση των αγωγών στις διαρροές R_I ($\text{Nsec}^2\cdot\text{m}^{-8}$) εξαρτάται από τη διάμετρο του αγωγού D (m), και η αντίσταση υπολογίζεται με βάση την ποιότητα του αγωγού (καλός, μέτριος, κακός) σύμφωνα με τις εξής σχέσεις, (Duckworth, et al., 2003; Menéndez, et al., 2023):

- Για καλό αγωγό, η αντίσταση είναι $R_I = 40000 / D^2$
- Για αρκετά καλό αγωγό, η αντίσταση είναι $R_I = 10000 / D^2$
- Για μέτριο αγωγό, η αντίσταση είναι $R_I = 4444 / D^2$
- Για κακό αγωγό, η αντίσταση είναι $R_I = 2500 / D^2$

Αυτές οι σχέσεις βοηθούν στον υπολογισμό της αντίστασης και στη βελτιστοποίηση των συστημάτων αερισμού, λαμβάνοντας υπόψη την κατάσταση και τη διάμετρο των αγωγών.

4.3.1 Χαρακτηριστική Καμπύλη Ανεμιστήρα

Η στατική πίεση ενός συστήματος μπορεί να παρασταθεί γραφικά ως μια λύση των προβλημάτων αερισμού μεταλλείου. Διευκρινίζεται ότι ο όρος σύστημα μπορεί να

υποδηλώνει ένα μέρος του μεταλλείου ή και ολόκληρο το μεταλλείο. Η χαρακτηριστική καμπύλη μεταλλείου είναι ένα διάγραμμα που απεικονίζει τη σχέση μεταξύ της παροχής αέρα (Q) και της συνολικής απώλειας πίεσης (h) σε ένα δίκτυο αερισμού ενός υπόγειου μεταλλείου. Αυτή η καμπύλη προκύπτει από την εφαρμογή βασικών νόμων της ρευστομηχανικής, όπως ο νόμος του Bernoulli και οι νόμοι του Kirchhoff, σε συνδυασμό με τη γεωμετρία και τις αντιστάσεις του δικτύου αεραγωγών.

Από την θεμελιώδη εξίσωση του αερισμού, [εξίσωση 4.7](#), οι απώλειες πίεσης μεταβάλλονται ανάλογα με το τετράγωνο της παροχής. Συνεπώς όταν το μέγεθος h καθορισθεί για συγκεκριμένη παροχή Q , είναι εύκολο να προκύψουν οι τιμές οποιουδήποτε ζεύγους Q, h αφού ουσιαστικά η αντίσταση ($R = h \cdot Q^{-2}$) αποτελεί ένα συντελεστή αναλογίας.

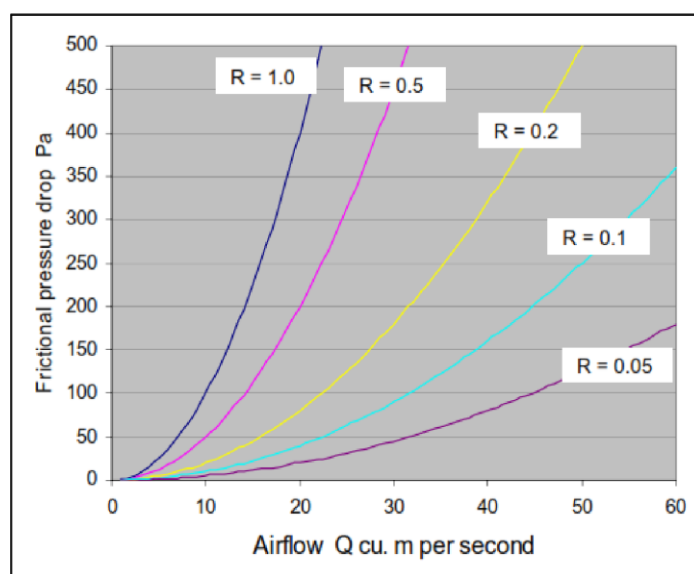
όπου:

h , είναι η συνολική απώλεια πίεσης (συνήθως σε μονάδες mmH₂O)

R , είναι η αντίσταση του δικτύου

Q , είναι η παροχή αέρα (σε m³/s)

Στη χαρακτηριστική καμπύλη, η παροχή αέρα συνήθως απεικονίζεται στον οριζόντιο άξονα ($x'x$), ενώ η απώλεια πίεσης ή το ύψος (h) στον κατακόρυφο άξονα ($y'y$) ([Σχήμα 4-2](#)). Η καμπύλη έχει γενικά αύξουσα μορφή, καθώς οι μεγαλύτερες παροχές αέρα απαιτούν μεγαλύτερες τιμές ενέργειας για να ξεπεραστούν οι αντιστάσεις του συστήματος, που εκφράζονται ως απώλειες πίεσης.



Σχήμα 4-2: Χαρακτηριστική καμπύλη μεταλλείου για διάφορες τιμές της αντίστασης, R (Dzwiti, 2017).

Η χαρακτηριστική καμπύλη χρησιμοποιείται επίσης για την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος αερισμού και την επιλογή κατάλληλων ανεμιστήρων, καθώς ο συνδυασμός της καμπύλης του δικτύου με την καμπύλη ανεμιστήρα καθορίζει την τελική παροχή και την απώλεια πίεσης που θα επιτευχθεί στο σύστημα.

Επιπλέον, η ανάλυση της καμπύλης μπορεί να δείξει σημεία αστάθειας του συστήματος ή ανάγκες για βελτιστοποίηση του σχεδιασμού, όπως η μείωση των απωλειών πίεσης μέσω της αναβάθμισης του εξοπλισμού ή της βελτίωσης της γεωμετρίας των αεραγωγών.

Συνήθως, η γραφική απεικόνιση της ροής αέρα σε σχέση με το μεταλλείο πραγματοποιείται βάσει της στατικής πίεσης, αν και σε ορισμένες περιπτώσεις είναι χρήσιμο να λαμβάνεται υπόψη και η ολική πίεση. Η ενέργεια E που απαιτείται για να ξεπεραστούν οι απώλειες πίεσης και να διοχετευτεί η ποσότητα αέρα Q μέσα στο σύστημα αερισμού, υπολογίζεται με την [εξίσωση 4.9](#):

$$E = Q \cdot h \quad [4.9]$$

Από αυτόν τον τύπο μπορεί επίσης να υπολογιστεί η απαιτούμενη ισχύς N σε ίππους HP χρησιμοποιώντας την [εξίσωση 4.10](#):

$$N = \frac{1}{75} \cdot Q \cdot h \quad [4.10]$$

Αυτοί οι τύποι διευκολύνουν τον προσδιορισμό της ισχύος που απαιτείται για τη σωστή λειτουργία ενός συστήματος αερισμού, λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες πίεσης στο δίκτυο, ώστε να διατηρείται επαρκής και σταθερή ροή αέρα μέσα στο μεταλλείο.

Ο παραπάνω τύπος αναφέρεται στη θεωρητική ισχύ, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η απόδοση των ανεμιστήρων, οι οποίοι αποτελούν τις κύριες πηγές παροχής ενέργειας στον μηχανικό αερισμό. Για τον υπολογισμό της συνολικής ισχύος του συστήματος, θα πρέπει να συμπεριληφθεί η δυναμική πίεση, κάτι που σημαίνει ότι στην [εξίσωση 4.10](#) θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η ολική πίεση του μεταλλείου αντί μόνο της στατικής πίεσης.

Αυτό σημαίνει ότι η συνολική ισχύς θα υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις απώλειες πίεσης που προκαλούνται από τη ροή αέρα, όσο και την πραγματική απόδοση των ανεμιστήρων, ώστε να υπάρχει μια πιο ακριβή εκτίμηση της ενέργειας που απαιτείται για την ομαλή λειτουργία του συστήματος αερισμού.

4.4 Βασικοί Νόμοι Ροής Αέρα

Η ροή του αέρα στα συστήματα αερισμού των υπόγειων μεταλλείων είναι ένα σύνθετο φαινόμενο που ακολουθεί βασικές αρχές της ρευστομηχανικής. Δύο από τους πιο σημαντικούς νόμους που χρησιμοποιούνται για την κατανόηση και την ανάλυση της ροής του αέρα σε αυτά τα περιβάλλοντα είναι ο νόμος του Bernoulli και οι νόμοι του Kirchhoff.

4.4.1 Ο Νόμος του Bernoulli

Ο νόμος του Bernoulli εξετάζει τη σύνδεση ανάμεσα στην πίεση, την ταχύτητα και τη διαφορά ύψους σε ένα ρεύμα ρευστού, δείχνοντας πώς η ενέργεια κατανέμεται μέσα στη ροή του αέρα. Στα υπόγεια μεταλλεία, όπου η σωστή κατανομή του αέρα είναι κρίσιμη τόσο για την ασφάλεια όσο και για την αποδοτικότητα, ο νόμος αυτός βοηθά στον υπολογισμό της ταχύτητας του αέρα και της μεταβολής της πίεσης καθώς ο αέρας περνάει μέσα από αγωγούς, περιορισμένα σημεία, διευρύνσεις και αλλαγές στη διατομή.

Η εφαρμογή του νόμου του Bernoulli επιτρέπει τον προσδιορισμό της ταχύτητας και της πίεσης του αέρα σε διαφορετικά τμήματα του συστήματος αερισμού, κάτι που είναι απαραίτητο για τη σωστή σχεδίαση και λειτουργία του αερισμού στα μεταλλεία, εξασφαλίζοντας την ασφαλή και αποδοτική απομάκρυνση των επιβλαβών αερίων και τη διατήρηση κατάλληλων συνθηκών εργασίας.

Ο κύριος νόμος του Bernoulli δηλώνει ότι για ένα ρευστό σε συνεχή ροή, το άθροισμα της κινητικής ενέργειας, της δυναμικής ενέργειας και της ενέργειας πίεσης παραμένει σταθερό κατά μήκος μιας γραμμής ροής, αν δεν υπάρχουν ενεργειακές απώλειες.

Συγκεκριμένα, ο νόμος διατυπώνεται με την [εξίσωση 4.11](#) και αποτελείται από τρεις όρους την στατική πίεση του ρευστού, την δυναμική πίεση που αντιστοιχεί στην κινητική ενέργεια ανά μονάδα όγκου του ρευστού και την υψομετρική πίεση που αντιστοιχεί στη δυναμική ενέργεια λόγω της βαρύτητας:

$$P + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot h = \text{σταθερό} \quad [4.11]$$

όπου:

P , στατική πίεση του ρευστού, Pa, ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$)

ρ , πυκνότητα του ρευστού, kg/m^3

v , ταχύτητα του ρευστού, m/s

g , επιτάχυνση της βαρύτητας, (m/s^2). Η τιμή του g στη Γη είναι περίπου 9.81 m/s^2 .

h , ύψος του ρευστού από κάποιο σημείο αναφοράς.

Συνοπτικά, οι τρεις όροι της εξίσωσης Bernoulli (στατική πίεση, δυναμική πίεση και υψομετρική πίεση) εκφράζονται όλοι σε μονάδες Pa στο διεθνές σύστημα. Έτσι, το συνολικό άθροισμα των ενεργειών ανά μονάδα όγκου (ή πίεσης) παραμένει σταθερό κατά μήκος της ροής ενός ρευστού, αν δεν υπάρχουν απώλειες.

Εφαρμογές στα συστήματα αερισμού υπόγειων μεταλλείων

Κατανομή της ροής αέρα: Ο νόμος του Bernoulli χρησιμοποιείται για να κατανοηθεί πώς η ταχύτητα του αέρα μεταβάλλεται μέσα στους αεραγωγούς ενός υπόγειου μεταλλείου. Όταν η διατομή ενός αγωγού μικραίνει, η ταχύτητα του αέρα αυξάνεται, ενώ η πίεση στο ίδιο σημείο μειώνεται, σύμφωνα με τον νόμο αυτό.

Απώλειες πίεσης: Σε συστήματα αερισμού, οι απώλειες πίεσης που προκύπτουν λόγω τριβών και διακλαδώσεων μπορούν να αναλυθούν με την εξίσωση του Bernoulli. Προσαρμόζοντας την εξίσωση, λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες ενέργειας που επηρεάζουν την πίεση σε διάφορα σημεία του δικτύου αερισμού.

Μεταβολές της ταχύτητας ροής: Η εξίσωση του Bernoulli δείχνει πώς αλλάζει η ταχύτητα του αέρα όταν μεταβάλλεται η πίεση ή η διατομή του αγωγού. Αυτό είναι σημαντικό για τη σωστή διανομή της ροής αέρα σε παράλληλους ή σειριακούς αγωγούς.

Σχεδιασμός και βελτιστοποίηση: Ο νόμος του Bernoulli βοηθά στον προσδιορισμό των κατάλληλων διαστάσεων για τους αγωγούς και τις προδιαγραφές των ανεμιστήρων, λαμβάνοντας υπόψη τις μεταβολές της πίεσης και της ροής του αέρα, ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη απόδοση του συστήματος.

Σε πραγματικά συστήματα αερισμού, οι απώλειες από τριβές και άλλες αντιστάσεις, όπως οι αλλαγές γεωμετρίας και οι κρούσεις, επιβάλλουν διορθώσεις στον νόμο του Bernoulli για τον ακριβέστερο υπολογισμό των ενεργειακών απωλειών και την αποδοτικότητα του συστήματος.

Ενώ ο Bernoulli επικεντρώνεται στη ροή κατά μήκος μιας γραμμής, οι νόμοι του Kirchhoff επιτρέπουν την ανάλυση ροής αέρα σε πολύπλοκα δίκτυα, όπως αυτά των υπόγειων μεταλλείων, όπου πολλαπλές διαδρομές και διακλαδώσεις καθορίζουν την

κατανομή της ροής και τις απώλειες πίεσης, επίσης χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση των αεραγωγών σε σύνθετα δίκτυα, ιδιαίτερα για την ισορροπία των πιέσεων και την κατανομή της ροής σε κόμβους και αγωγούς.

Η ανάλυση και επίλυση των δικτύων αερισμού στα υπόγεια μεταλλεία βασίζεται σε σχέσεις που συνδέουν βασικά χαρακτηριστικά του μεταλλείου και στην εφαρμογή των νόμων (κανόνων) του Kirchhoff, οι οποίοι, αν και αρχικά αναπτύχθηκαν για ηλεκτρικά κυκλώματα, εφαρμόζονται επίσης στα δίκτυα αερισμού μέσω αναλογίας. Οι κανόνες αυτοί επιτρέπουν την εξισορρόπηση των ροών αέρα σε πολύπλοκα δίκτυα αεραγωγών.

4.4.2 Οι Νόμοι του Kirchhoff

Ο *πρώτος νόμος του Kirchhoff* δηλώνει ότι το άθροισμα των ροών που εισέρχονται σε έναν κόμβο πρέπει να ισούται με το άθροισμα των ροών που εξέρχονται από αυτόν, γεγονός που βοηθά στην κατανομή της ροής αέρα σε ένα δίκτυο αερισμού με πολλαπλές διακλαδώσεις. Ο *δεύτερος νόμος του Kirchhoff* επιβεβαιώνει ότι το άθροισμα των πτώσεων πίεσης σε κάθε βρόχο του δικτύου πρέπει να είναι μηδενικό, παρέχοντας τα εργαλεία για τον προσδιορισμό των απωλειών πίεσης λόγω τριβών ή αλλαγών στην κατεύθυνση του αέρα.

Η επίλυση των εξισώσεων των δικτύων αερισμού στηρίζεται στην παραδοχή ότι το ειδικό βάρος του αέρα παραμένει σταθερό σε όλο το μήκος του δικτύου, μια υπόθεση που διευκολύνει τους υπολογισμούς, παρότι δεν είναι απολύτως ακριβής. Αν και η παραδοχή αυτή εισάγει μια μικρή απόκλιση από την πραγματικότητα, η επίδρασή της στους υπολογισμούς είναι ελάχιστη και οι αποκλίσεις θεωρούνται αμελητέες σε σχέση με άλλους παράγοντες που επηρεάζουν το σύστημα και χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη αβεβαιότητα.

Ο **πρώτος νόμος του Kirchhoff** (ο κανόνας των ρευμάτων), αφορά την ισορροπία των ροών αέρα σε σημεία διακλάδωσης του δικτύου αεραγωγών (ισοζύγιο μάζας). Σε ένα υπόγειο σύστημα αερισμού, ο αέρας μεταφέρεται μέσω αγωγών σε διάφορα τμήματα του μεταλλείου. Σε σημεία όπου ο αγωγός διακλαδίζεται ή ενώνονται πολλαπλές διαδρομές αεραγωγών, το άθροισμα των ροών αέρα που εισέρχονται πρέπει να είναι ίσο με το άθροισμα των ροών που εξέρχονται από τον κόμβο. Αυτό διασφαλίζει ότι δεν υπάρχει απώλεια ή αύξηση του αέρα, αλλά μια ισορροπημένη ροή που κατανέμεται με βάση τις ανάγκες κάθε περιοχής.

$$\sum Q_{\text{εισόδου}} = \sum Q_{\text{εξόδου}} \quad [4.12]$$

Ο **δεύτερος νόμος του Kirchhoff** (ο κανόνας των τάσεων) δηλώνει ότι το άθροισμα των απωλειών πίεσης (ή της διαφοράς πίεσης) κατά μήκος οποιουδήποτε κλειστού βρόχου του δικτύου είναι μηδέν. Δηλαδή, σε κάθε βρόχο του δικτύου, η διαφορά πίεσης που προκύπτει από τις αντιστάσεις των αεραγωγών και των στοιχείων του δικτύου πρέπει να αντισταθμίζεται.

Στα συστήματα αερισμού, οι πτώσεις πίεσης προκύπτουν λόγω τριβών μεταξύ του αέρα και των τοιχωμάτων του αεραγωγού, καθώς και λόγω κρούσεων στις αλλαγές κατεύθυνσης ή διατομής του αγωγού. Επομένως, σε κάθε βρόχο του δικτύου αερισμού, η συνολική πτώση πίεσης πρέπει να εξισορροπείται, ώστε η ροή του αέρα να είναι συνεχής και σταθερή.

$$\sum \Delta P_{\text{βρόχου}} = 0 \quad [4.13]$$

όπου ΔP είναι η πτώση πίεσης σε κάθε τμήμα του βρόχου.

Αυτός ο νόμος βοηθά στον υπολογισμό των πιέσεων και των απωλειών ενέργειας σε πολύπλοκα δίκτυα με πολλαπλούς βρόχους. Στα υπόγεια μεταλλεία, τα δίκτυα αερισμού είναι συχνά κυκλικά, όπου ο αέρας μπορεί να ακολουθήσει περισσότερες από μία διαδρομές για να φτάσει στον προορισμό του. Χρησιμοποιώντας τον δεύτερο νόμο του Kirchhoff, οι μηχανικοί μπορούν να εξασφαλίσουν ότι η πίεση εξισορροπείται σε όλα τα τμήματα του βρόχου, ώστε η ροή του αέρα να μην μειώνεται από υπερβολικές απώλειες πίεσης σε κάποιο σημείο.

Συσχετισμός με την πρακτική στα συστήματα αερισμού

Οι νόμοι του Kirchhoff είναι αναπόσπαστο κομμάτι του σχεδιασμού και της λειτουργίας των συστημάτων αερισμού σε υπόγεια μεταλλεία. Ο σωστός αερισμός είναι κρίσιμος για την απομάκρυνση των επιβλαβών αερίων (όπως CO₂, CH₄, σκόνη και άλλοι ρύποι) και για τη διατήρηση επαρκούς οξυγόνου στους εργαζόμενους. Ωστόσο, τα συστήματα αυτά είναι συχνά πολύπλοκα, με μακριούς αεραγωγούς, πολλαπλές διακλαδώσεις και βρόχους, και οι απώλειες πίεσης είναι ένα συνεχές ζήτημα.

Στην πράξη, η συνδυασμένη εφαρμογή των νόμων του Bernoulli και του Kirchhoff επιτρέπει στους μηχανικούς να σχεδιάζουν συστήματα αερισμού που βελτιστοποιούν την κατανομή του αέρα, περιορίζουν τις απώλειες πίεσης και εξασφαλίζουν ασφαλείς συνθήκες εργασίας για τους εργαζόμενους στα υπόγεια μεταλλεία.

4.5 Επίλυση Δικτύων Αερισμού

Τα συστήματα αερισμού συχνά περιλαμβάνουν αγωγούς σε σειρά ή σε παράλληλη σύνδεση και κάθε περίπτωση απαιτεί διαφορετική προσέγγιση για να εξασφαλιστεί η βέλτιστη κατανομή του αέρα και οι ελάχιστες απώλειες πίεσης.

Αγωγοί σε Σειρά

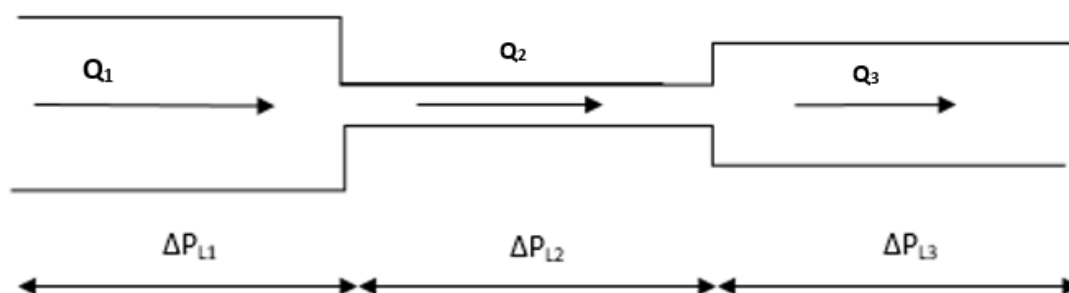
Όταν οι αγωγοί συνδέονται σε σειρά, η ροή του αέρα παραμένει σταθερή σε κάθε τμήμα, ενώ η πίεση μειώνεται καθώς ο αέρας ρέει μέσα από το δίκτυο λόγω των απωλειών τριβής και κρούσεων. Σε αυτήν την περίπτωση, οι συνολικές απώλειες πίεσης κατά μήκος των αγωγών είναι το άθροισμα των επιμέρους απωλειών σε κάθε τμήμα.

Θεωρώντας ασυμπίεστο ρευστό με τους αγωγούς σε σειρά όπως φαίνεται στο [Σχήμα 4-3](#), ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις που απορρέουν από την εφαρμογή του 1^{ου} νόμου του Kirchhoff:

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3 = \dots = Q_N \quad [4.14]$$

και η συνολική πτώση πίεσης είναι το άθροισμα των επιμέρους πτώσεων πίεσης:

$$\Delta P = \Delta P_{L1} + \Delta P_{L2} + \Delta P_{L3} + \dots + \Delta P_{LN} \quad [4.15]$$



Σχήμα 4-3: Διάταξη αγωγών συνδεδεμένων σε σειρά, (Hall, 1981).

Από την θεμελιώδη εξίσωση του αερισμού, με βάση τις παραπάνω εξισώσεις ισχύει (Hall, 1981):

$$R_{ti} \cdot Q^2 \cdot \rho = R_{t1} \cdot Q^2 \cdot \rho + R_{t2} \cdot Q^2 \cdot \rho + \dots + R_{tN} \cdot Q^2 \cdot \rho \quad [4.16]$$

όπου $R = R_t \cdot \rho$ η αντίσταση του κάθε τμήματος, όταν το ειδικό βάρος ρ είναι σταθερό, συνεπάγεται:

$$R_i = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_N \quad [4.17]$$

Οι αγωγοί σε σειρά συναντώνται συνήθως σε διατάξεις όπου ο αέρας ρέει διαδοχικά από έναν χώρο εξόρυξης σε άλλο μέσω πολλών τμημάτων του αεραγωγού. Σε αυτή την περίπτωση, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες σε κάθε τμήμα για να εξασφαλίζεται ότι υπάρχει επαρκής πίεση στο τέλος της διαδρομής ώστε ο αέρας να φτάσει σε όλες τις περιοχές του μεταλλείου. Οι απώλειες πίεσης σε κάθε τμήμα υπολογίζονται με βάση τον νόμο του Darcy-Weisbach, που λαμβάνει υπόψη την τριβή στον αεραγωγό, το μήκος του αγωγού και τη διάμετρό του.

4.5.1 Αγωγοί σε Παράλληλη Σύνδεση

Όταν οι αγωγοί συνδέονται σε παράλληλη διάταξη, η ροή του αέρα διαχωρίζεται σε δύο ή περισσότερους αγωγούς. Σε αυτή την περίπτωση, η συνολική ροή του αέρα είναι το άθροισμα των ροών σε κάθε παράλληλο κλάδο, ενώ η πτώση πίεσης είναι ίδια σε όλους τους παράλληλους αγωγούς.

$$\Delta P = \Delta P_{L1} = \Delta P_{L2} = \Delta P_{L3} = \dots = \Delta P_{LN} \quad [4.18]$$

Με βάση το [Σχήμα 4-4](#) ισχύουν τα παρακάτω:

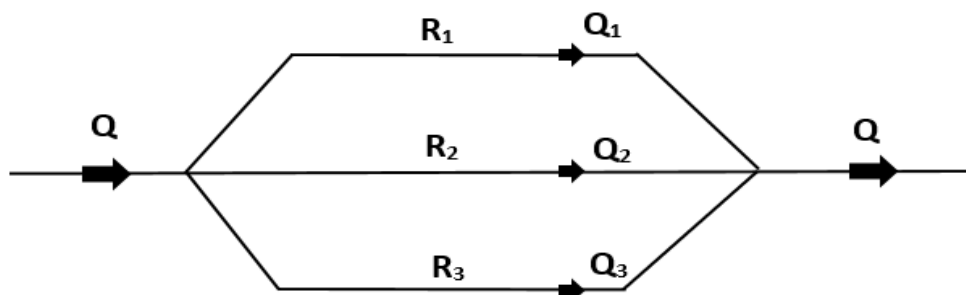
Η συνολική ροή αέρα (παροχή) είναι το άθροισμα των επιμέρους ροών αέρα σε κάθε αγωγό:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_N \quad [4.19]$$

Η κατανομή της παροχής στους παράλληλους αγωγούς εξαρτάται από την αντίσταση του κάθε αγωγού. Η αντίσταση κάθε αγωγού σχετίζεται με το μήκος, τη διάμετρο και το συντελεστή τριβής.

Συνδυάζοντας τις [εξισώσεις 4.18-4.19](#) προκύπτει η ισοδύναμη αντίσταση των αγωγών σε παράλληλη σύνδεση:

$$\frac{1}{\sqrt{R}} = \frac{1}{\sqrt{R_1}} + \frac{1}{\sqrt{R_2}} + \frac{1}{\sqrt{R_3}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{R_N}} \quad [4.20]$$



Σχήμα 4-4: Διάταξη αγωγών σε παράλληλη σύνδεση (Hall, 1981).

Οι παράλληλοι αγωγοί χρησιμοποιούνται συνήθως σε συστήματα αερισμού όπου ο αέρας πρέπει να φτάσει σε διαφορετικά τμήματα του μεταλλείου μέσω πολλαπλών διαδρομών. Αυτή η διάταξη είναι χρήσιμη όταν υπάρχουν ανάγκες για διαφοροποίηση στη ροή του αέρα σε διάφορες περιοχές ή όταν είναι απαραίτητη η εξισορρόπηση της ροής σε περιοχές με διαφορετικές απαιτήσεις αερισμού. Σε ένα τέτοιο σύστημα, οι παράλληλοι αγωγοί βοηθούν στην αποφυγή υπερβολικής πτώσης πίεσης, επιτρέποντας στον αέρα να ρέει μέσα από διαδρομές με μικρότερη αντίσταση. Η επίλυση ενός τέτοιου συστήματος απαιτεί την εξισορρόπηση της πίεσης και τη σωστή κατανομή της ροής, με βάση την αντίσταση κάθε κλάδου.

Κεφάλαιο 5: Συστήματα Αερισμού Υπογείων Εκμεταλλεύσεων

5.1 Γενικά

Το σύστημα αερισμού στα υπόγεια ορυχεία είναι μια οργανωμένη διαδικασία που αποσκοπεί στην παροχή καθαρού αέρα και την απομάκρυνση του μολυσμένου αέρα από τους χώρους εξόρυξης. Αυτή η διαδικασία είναι καθοριστική για τη διατήρηση της ποιότητας του αέρα που αναπνέουν οι εργαζόμενοι, συμβάλλοντας έτσι στην ασφάλεια και την υγεία τους. Η ανάγκη για σωστό σύστημα αερισμού είναι ιδιαίτερα σημαντική λόγω των κινδύνων που παρουσιάζουν τα επιβλαβή αέρια, οι υψηλές θερμοκρασίες, καθώς και τα αιωρούμενα σωματίδια που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια των εξορυκτικών εργασιών.

Η διαχείριση της ποιότητας του αέρα στις υπόγειες εξορυκτικές εργασίες επιτυγχάνεται αποτελεσματικά μέσω ενός συνόλου συστημάτων εξαερισμού, τα οποία έχουν σχεδιαστεί ειδικά για να αντιμετωπίσουν τις μοναδικές περιβαλλοντικές προκλήσεις που εμφανίζονται σε τέτοια περιβάλλοντα. Τα δύο βασικά συστήματα εξαερισμού είναι ο φυσικός αερισμός και ο μηχανικός αερισμός. Ο φυσικός αερισμός αξιοποιεί τις διαφορές πίεσης που δημιουργούνται στα ανοίγματα του ορυχείου, διευκολύνοντας έτσι τη φυσική ροή του αέρα, ενώ ο μηχανικός αερισμός βασίζεται στη χρήση ανεμιστήρων για τη διανομή του αέρα στο χώρο εξόρυξης.

Ανεξάρτητα από τη μέθοδο αερισμού, υπάρχουν ορισμένα βασικά ερωτήματα που πρέπει να απαντηθούν σχετικά με τη ροή του αέρα, όπως η διεύθυνση της ροής και αν αυτή είναι φυσητική ή μυζητική. Η απάντηση σε αυτά τα ερωτήματα εξαρτάται από το είδος του μεταλλείου και τις συνθήκες εκμετάλλευσης, καθιστώντας απαραίτητη τη λεπτομερή ανάλυση των συνθηκών αερισμού για την επιλογή της βέλτιστης λύσης.

5.2 Φυσικός Αερισμός

Η ροή του αέρα σε ένα υπόγειο μεταλλευτικό σύστημα απαιτεί ενεργειακή υποστήριξη, συνήθως με τη μορφή πίεσης, για να μπορέσει να υπερνικήσει τις απώλειες που προκαλούνται κατά τη διαδρομή του. Χωρίς την κατάλληλη παροχή ενέργειας, η αποτελεσματική ροή δεν είναι δυνατή. Ένα σημαντικό φυσικό φαινόμενο που επηρεάζει τη ροή είναι οι διαφορές θερμοκρασίας. Οι μεταβολές στη θερμοκρασία προκαλούν μεταβολές στην πυκνότητα του αέρα μεταξύ των στοών ή γειτονικών περιοχών, οδηγώντας στη δημιουργία ροής. Αυτή η φυσική διαδικασία εκμεταλλεύεται

τις θερμικές ανισορροπίες, οι οποίες παράγουν φυσικό αερισμό μέσω της διαφοράς πίεσης μεταξύ θερμών και ψυχρών χώρων. Η θερμική ενέργεια που εισάγεται στο σύστημα μετατρέπεται σε πίεση, η οποία επαρκεί για την πρόκληση ροής αέρα. Παρόλα αυτά, η πίεση που προκύπτει από φυσικές δυνάμεις μπορεί να μην είναι επαρκής για να καλύψει πλήρως τις ανάγκες αερισμού του μεταλλείου, χωρίς τη χρήση μηχανικών μέσων. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο αερισμός χαρακτηρίζεται ως "φυσικός αερισμός", ενώ η πίεση που δημιουργείται αναφέρεται ως πίεση φυσικού αερισμού" ή "ελκυσμού".

Σε αρκετά μικρά μεταλλεία, αλλά και σε ορισμένα μεγαλύτερα, ο φυσικός αερισμός μπορεί να είναι επαρκής για την εξασφάλιση του απαιτούμενου αερισμού. Ωστόσο, ακόμα και σε μεταλλεία που χρησιμοποιούν μηχανικό αερισμό, οι φυσικές διακυμάνσεις της πίεσης που προκαλούνται από το βάθος του μεταλλείου και τη θερμοκρασία των πετρωμάτων επηρεάζουν σημαντικά τη συνολική λειτουργία του συστήματος αερισμού.

Όταν συνυπάρχουν φυσικός και μηχανικός αερισμός, η πίεση του φυσικού αερισμού μπορεί να λειτουργήσει είτε υποστηρικτικά είτε αντίθετα προς το μηχανικό σύστημα. Γι' αυτόν τον λόγο, είναι απαραίτητο να κατανοηθούν πλήρως οι συνθήκες που προκαλούν το φυσικό αερισμό σε κάθε μεταλλείο, καθώς και τα γεωλογικά χαρακτηριστικά του χώρου. Μόνο τότε μπορεί να σχεδιαστεί σωστά το συνολικό δίκτυο αερισμού, ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη απόδοση και να αποφευχθούν προβλήματα που μπορεί να προκύψουν από συγκρουόμενες πιέσεις.

Επιπλέον, οι διαφορές θερμοκρασίας και η υψομετρική τοποθέτηση των στοών μπορούν να δημιουργήσουν φυσικά ρεύματα αέρα που, σε κάποιες περιπτώσεις, ενισχύουν τη συνολική ροή, ενώ σε άλλες μπορεί να μειώνουν την αποτελεσματικότητα του μηχανικού αερισμού. Η αξιολόγηση αυτών των φαινομένων είναι κρίσιμη για την ασφαλή και αποδοτική λειτουργία του μεταλλείου.

5.2.1 Πηγές φυσικού αερισμού

Ο φυσικός αερισμός στα υπόγεια μεταλλεία βασίζεται σε παράγοντες όπως η διαφορά υψομέτρου μεταξύ της επιφάνειας και των υπόγειων εργασιών, καθώς και η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα που εισέρχεται και αυτού που κυκλοφορεί εντός του μεταλλείου. Η θερμοκρασία της επιφάνειας είναι ιδιαίτερα σημαντική, κυρίως σε περιοχές όπου οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι

έντονες, διότι επηρεάζει άμεσα τη θερμοκρασία του αέρα που εισέρχεται στο μεταλλείο, (Οικονομόπουλος, 1991).

Καθώς ο αέρας κινείται εντός του υπόγειου δικτύου, η θερμοκρασία του αλλάζει γρήγορα ανάλογα με τον χρόνο επαφής του με τα πετρώματα και τα μέταλλα. Η επίδραση της επιφανειακής θερμοκρασίας εξαρτάται από την ταχύτητα της ροής του αέρα. Σε περιπτώσεις υψηλής ταχύτητας εισόδου, οι θερμοκρασιακές αλλαγές δεν γίνονται τόσο αισθητές στα μικρά βάθη, ενώ σε μεγαλύτερα βάθη, όπου η ταχύτητα ροής μειώνεται, οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις επηρεάζουν περισσότερο τον αερισμό. Κλασικό παράδειγμα φυσικού ελκυσμού που παρατηρείται στην φύση αποτελούν τα παραδείγματα των φωλιών των μυρμηγκιών και των τερμιτών όπου η δημιουργία πολλαπλών στομιών κατάλληλα προσανατολισμένων εξασφαλίζει την ροή αέρα στο υπόγειο μέρος της φωλιάς (Xiroudakis, et al., 2024). Τα φυσικά παραδείγματα αυτά έχουν βοηθήσει στη διαμόρφωση των έργων προσπέλασης στα υπόγεια ώστε να εξασφαλίζεται ο φυσικός αερισμός, ιδιαίτερα σε υπόγειες εξορύξεις μικρού βάθους.

Τα μεγαλύτερα και βαθύτερα μεταλλεία επηρεάζονται σημαντικά από τις θερμικές διαφορές, καθώς αυτές καθορίζουν το επίπεδο της πίεσης που απαιτείται για τη δημιουργία του φυσικού αερισμού. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα της επιφάνειας και του υπόγειου χώρου σε συνδυασμό με το υψόμετρο ενισχύει τον φυσικό ελκυσμό. Μεταλλεία σε ορεινές περιοχές συχνά επωφελούνται από αυτές τις συνθήκες, που διευκολύνουν τη ροή του αέρα.

Επιπλέον, είναι γενικά αποδεκτό ότι τα μεταλλεία με φυσικό αερισμό λειτουργούν καλύτερα κατά τους χειμερινούς μήνες, καθώς οι χαμηλότερες θερμοκρασίες στην επιφάνεια ενισχύουν τη διαφορά πίεσης και τη ροή αέρα, (Οικονομόπουλος, 1991). Η διαφορά πίεσης που προκαλεί τον φυσικό ελκυσμό, εξαιτίας των θερμοκρασιακών διαφορών μεταξύ του αέρα στο εσωτερικό και στο εξωτερικό του μεταλλείου, συνήθως δεν ξεπερνά τα 746 Pa, (Hartman, et al., 1982) .

Τέλος, η διαδρομή του αέρα μέσω του φυσικού αερισμού μπορεί να επηρεαστεί από διάφορους γεωλογικούς και κλιματικούς παράγοντες. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η ροή μπορεί ακόμη και να αντιστραφεί, εξαιτίας των γεωλογικών χαρακτηριστικών ή των κλιματικών συνθηκών που επικρατούν.

5.2.2 Πίεση και Παροχή φυσικού ελκυσμού

Η μέτρηση του φυσικού ελκυσμού μπορεί να πραγματοποιηθεί με την προσωρινή διακοπή της ροής του αέρα, τοποθετώντας ένα εμπόδιο στην είσοδο του συστήματος. Με την πτώση της πίεσης στο εμπόδιο, είναι δυνατός ο υπολογισμός του φυσικού ελκυσμού, λαμβάνοντας υπόψη ότι η θερμοκρασία στον υπόγειο χώρο αλλάζει με αργούς ρυθμούς. Παρά το γεγονός ότι η πλήρης διακοπή της ροής είναι δύσκολη, η ίδια μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί και σε κυκλώματα αερισμού, αρκεί μετά τις μετρήσεις να γίνει προσεκτική ανάλυση των αποτελεσμάτων για να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα.

Επιπλέον, η πίεση του φυσικού αερισμού μπορεί να υπολογιστεί και με τη χρήση κλασικών φυσικών εξισώσεων. Αυτές οι εξισώσεις λαμβάνουν υπόψη τις διαφορές στην πυκνότητα του αέρα που υπάρχουν μεταξύ των στηλών αέρα εντός και εκτός του μεταλλείου, κάτι που επιτρέπει τον ακριβή υπολογισμό της πίεσης που προκαλεί τον φυσικό ελκυσμό. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στις θεμελιώδεις αρχές της θερμοδυναμικής και της ρευστομηχανικής, που περιγράφουν την αλληλεπίδραση της θερμοκρασίας και της πυκνότητας του αέρα και τον τρόπο με τον οποίο αυτές επηρεάζουν τη ροή του αέρα σε υπόγεια περιβάλλοντα. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει στους μηχανικούς να κατανοούν και να ελέγχουν καλύτερα τις συνθήκες αερισμού, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα και την ασφάλεια στις υπόγειες εκμεταλλεύσεις.

Οι κυριότεροι τρόποι υπολογισμού της πίεσης περιλαμβάνουν τους εξής, (Οικονομόπουλος, 1991):

1. Αν P_1 και P_2 είναι οι απόλυτες πιέσεις στην κορυφή και στη βάση μιας στήλης αέρα (Σχήμα 5-1) και με δεδομένο ότι η πυκνότητα του αέρα μεταβάλλεται όχι γραμμικά, ισχύει η *εξίσωση 5.1*:

$$\int_1^2 \frac{dP}{P} = \int_0^L \frac{dL}{RT} \quad [5.1]$$

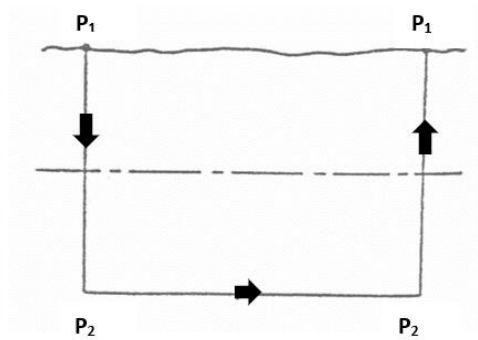
όπου R η σταθερά των ιδανικών αερίων ($R = 8,3 \text{ Jmole}^{-1} \text{ grad}^{-1}$) και T η θερμοκρασία. Από αυτήν με ολοκλήρωση προκύπτει η *εξίσωση 5.2*:

$$\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = \frac{L}{RT} \quad [5.2]$$

συνεπώς η πίεση P_2 εκφράζεται σε συνάρτηση με την P_1 η οποία μετράται βαρομετρικώς στην επιφάνεια. Ομοίως η πίεση P_3 σε συνάρτηση με την P_1 και συνεπώς η πίεση φυσικού ελκυσμού $P_{εφ}$ αποτελεί τη διαφορά των πιέσεων αυτών, [εξίσωση 5.3](#):

$$P_{εφ} = P_2 - P_3 \quad [5.3]$$

Η διαφορά θερμοκρασίας στις στήλες αέρα θα πρέπει να υπολογίζεται ή να εκτιμάται σωστά. Παρά ταύτα, η μέση θερμοκρασία σε φρέατα αέρα εισόδου δεν μπορεί να υπολογιστεί επαρκώς με την απλή μέθοδο του μέσου όρου λόγω χαμηλών ταχυτήτων ροής. Αντίθετα, στα φρέατα εξόδου, η θερμοκρασία είναι πιο σταθερή και μεταβάλλεται με αργό και ομοιόμορφο τρόπο, ([Οικονομόπουλος, 1991](#)).



Σχήμα 5-1: Διάταξη για τον υπολογισμό πίεσης φυσικού ελκυσμού, περιλαμβάνει δύο φρέατα και μια οριζόντια στοά.

2. Η διαφορά πυκνότητας του αέρα ανάμεσα σε δύο στήλες μπορεί να αξιοποιηθεί για να υπολογιστεί η διαφορά πίεσης. Για παράδειγμα, η σχέση για τη διαφορά πίεσης σε στήλη νερού δίνεται στην [εξίσωση 5.4](#) –σε in νερού-, ([Hartman, et al., 1982](#)):

$$h_{E\phi in} = \frac{L}{5,2} (\overline{w_d} - \overline{w_u}) \quad [5.4]$$

όπου $\overline{w_d}$ και $\overline{w_u}$ οι μέσες πυκνότητες του αέρα στα δύο φρέατα αντίστοιχα. Ενώ εάν η πίεση δίνεται σε Pa, τότε ο υπολογισμός θα γίνεται με βάση την [εξίσωση 5.5](#):

$$P_{εφn} = gL(\overline{w_d} - \overline{w_u}) \quad [5.5]$$

3. Σε ένα σύστημα με ένα φρέαρ εισόδου και ένα εξόδου ([Σχήμα 5-2](#)), οι εξισώσεις για τις πιέσεις είναι οι εξής, ([Οικονομόπουλος, 1991](#)):

$$P_1 = P_a + \gamma_1 L_1 - R_1 Q^2 \quad [5.6]$$

και

$$P_2 = P_a + \gamma_2 L_2 - R_2 Q^2 \quad [5.7]$$

όπου:

P_a : Η ατμοσφαιρική πίεση

P_1 : Η πίεση στον πυθμένα του φρέατος εισόδου

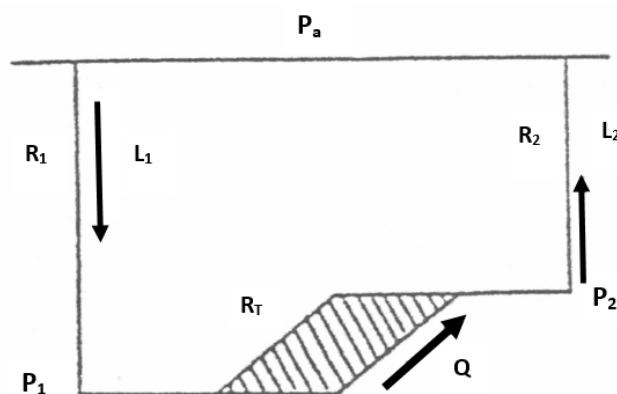
P_2 : Η πίεση στον πυθμένα του φρέατος εξόδου

L_1, L_2 : Τα βάθη των φρεάτων

γ_1, γ_2 : Τα μέσα ειδικά βάρη του αέρα στις στήλες των δύο φρεάτων αντίστοιχα

R_1, R_2 : Οι αντιστάσεις των φρεάτων εισόδου και εξόδου αντίστοιχα.

Q : Η παροχή αέρα



Σχήμα 5-2: Παράσταση μεταλλείου εξυπηρετούμενο από δύο φρέατα, (Οικονομόπουλος, 2002).

Στα τμήματα εκμεταλλεύσεως, λαμβάνοντας μέση πυκνότητα του αέρα ίση με $\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2}$, ισχύει η [εξίσωση 5.8](#):

$$P_1 = P_2 + (L_1 - L_2) \cdot \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{2} - R_T \cdot Q^2 \quad [5.8]$$

όπου:

R_T, R_T : Η αντίσταση στα τμήματα εκμετάλλευσης.

Με τις κατάλληλες μετατροπές προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$RQ^2 = (L_1 - L_2) \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} \quad [5.9]$$

με:

$$R = R_1 + R_2 + R_T \quad [5.10]$$

Συνεπώς η πίεση φυσικού ελκυσμού ορίζεται από την [εξίσωση 5.11](#):

$$P_{\varepsilon\varphi} = RQ^2 = \frac{1}{2} (L_1 + L_2) \times (\gamma_1 - \gamma_2) \quad [5.11]$$

Για αμελητέα υγρασία ισχύει:

$$\gamma_1 T_1 = \gamma_2 T_2 \quad [5.12]$$

και:

$$P_{\varepsilon\varphi} = \frac{\gamma_1}{T_2} \times (T_2 - T_1) \times \frac{(L_1 - L_2)}{2} \quad [5.13]$$

Η παροχή του αέρα που παρέχεται σε ένα μεταλλείο λόγω της πίεσης του φυσικού ελκυσμού μπορεί να υπολογιστεί είτε αναλυτικά είτε με τη βοήθεια γραφικών μεθόδων. Η στατική πίεση που αντιστοιχεί στις απώλειες πίεσης μέσα στο δίκτυο αερισμού είναι ίση με την πίεση που παράγεται από τον φυσικό ελκυσμό. Αυτή η πίεση σχετίζεται άμεσα με την παροχή αέρα και μπορεί να υπολογιστεί λαμβάνοντας υπόψη τη ταχύτητα ροής του αέρα στο δίκτυο με βάση την [εξίσωση 5.14](#), (Hartman, et al., 1982).

Ουσιαστικά, οι απώλειες πίεσης που παρατηρούνται στο σύστημα αερισμού λόγω τριβής ή αλλαγών στην κατεύθυνση της ροής πρέπει να ισορροπούνται από την πίεση του φυσικού ελκυσμού, η οποία δημιουργείται από διαφορές πυκνότητας και θερμοκρασίας του αέρα. Με αυτόν τον τρόπο, η στατική πίεση στο δίκτυο μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της παροχής αέρα, διευκολύνοντας την εκτίμηση της απόδοσης του φυσικού αερισμού. Αυτό επιτρέπει στους μηχανικούς να εκτιμήσουν την απαιτούμενη παροχή και να σχεδιάσουν κατάλληλα το σύστημα αερισμού του μεταλλείου, λαμβάνοντας υπόψη τις περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες.

$$Q = \sqrt{\frac{P_{\varepsilon\varphi n} \times A^3}{K P (L + L_e)}} \quad [5.14]$$

όπου:

$P_{\varepsilon\varphi n}$: Η πίεση του φυσικού ελκυσμού σε Pa

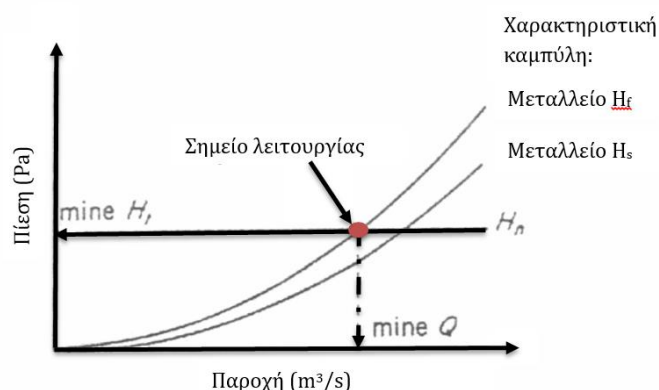
A : Η διατομή του αγωγού

K : Συντελεστής που εξαρτάται από την κατάσταση των τοιχωμάτων των αγωγών

L : Το μήκος του αγωγού

L_e : Το ισοδύναμο μήκος του αγωγού

Ο φυσικός αερισμός χαρακτηρίζεται από μια σταθερή πίεση, γεγονός που κάνει την αντίστοιχη χαρακτηριστική καμπύλη να είναι ευθεία. Αν και η πίεση που παράγεται από τον φυσικό ελκυσμό μπορεί να επηρεαστεί από αλλαγές στη διάταξη του μεταλλείου, παραμένει ανεξάρτητη από τις αντιστάσεις του δικτύου αερισμού και την παροχή του ανεμιστήρα.



Σχήμα 5-3: Γραφική απεικόνιση υπολογισμού της φυσικής πίεσης αερισμού (Hartman, et al., 1982).

Η γραφική λύση όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-3 προκύπτει εύκολα όταν η ευθεία καμπύλη που αντιπροσωπεύει τον φυσικό ελκυσμό τέμνεται με τη χαρακτηριστική καμπύλη του μεταλλείου, (Hartman, et al., 1982).

5.3 Διατάξεις Συστήματος Αερισμού και Έργα Προσπέλασης

Σε κάθε μεταλλείο απαιτούνται τουλάχιστον δύο ανοίγματα, όπως φρέατα, κεκλιμένα ή στοές, τα οποία εξασφαλίζουν την επικοινωνία με την επιφάνεια. Ένα από αυτά τα ανοίγματα χρησιμοποιείται για την είσοδο του αέρα στο μεταλλείο, ενώ το άλλο χρησιμεύει για την επιστροφή του αέρα στην επιφάνεια, γνωστό και ως φρέαρ επιστροφής του αέρα.

Σε περίπτωση που ένα μεταλλείο εξυπηρετείται μόνο από δύο ανοίγματα, δηλαδή από δύο φρέατα, η τοποθέτηση αυτών κοντά το ένα στο άλλο παρέχει ορισμένα πλεονεκτήματα. Ένα από τα σημαντικότερα είναι η συγκέντρωση των εγκαταστάσεων σε μια περιορισμένη περιοχή, κάτι που απλοποιεί τη διαχείριση και επιτρέπει τη χρήση και των δύο φρεάτων για την ανέλκυση του μεταλλεύματος.

Ωστόσο, υπάρχουν και σημαντικά μειονεκτήματα αυτής της διάταξης. Για παράδειγμα, αν τα φρέατα βρίσκονται πολύ κοντά το ένα στο άλλο, υπάρχει αυξημένος κίνδυνος βραχυκυκλώματος του αέρα, που σημαίνει ότι ο αέρας μπορεί να μην κυκλοφορεί σωστά στο μεταλλείο. Επίσης, η αύξηση της διαδρομής του αέρα προκαλεί μεγαλύτερη αντίσταση στο δίκτυο, κάτι που αυξάνει τις απώλειες πίεσης και την απαιτούμενη ενέργεια για τη ροή του αέρα. Ένα επιπλέον μειονέκτημα είναι η μειωμένη ασφάλεια, καθώς και τα δύο φρέατα είναι εκτεθειμένα σε κοινούς κινδύνους, όπως εκρήξεις ή πυρκαγιές.

Αυτή η διάταξη αερισμού είναι κατάλληλη για μεταλλεία μέτριας έκτασης. Σε μεγαλύτερα μεταλλεία, η απόσταση μεταξύ των φρεάτων πρέπει να είναι μεγαλύτερη, παρόλο που αυτό μπορεί να απαιτεί περισσότερες επιφανειακές βοηθητικές εγκαταστάσεις σε διαφορετικά σημεία. Ωστόσο, αυτή η διάταξη μειώνει τη συνολική αντίσταση του μεταλλείου και κάνει πιο αποδοτική τη ροή του αέρα στο υπόγειο δίκτυο (Οικονομόπουλος, 1991).

Η τοποθέτηση των φρεάτων και η διάταξη του συστήματος αερισμού πρέπει να είναι προσεκτικά σχεδιασμένη για να διασφαλίζεται η αποτελεσματικότητα και η ασφάλεια του αερισμού, καθώς η απόσταση και η θέση των ανοιγμάτων επηρεάζουν άμεσα τη ροή του αέρα και τις συνολικές επιδόσεις του συστήματος.

5.3.1 Κύριος Αερισμός

Ο κύριος ή πρωτεύων αερισμός στα υπόγεια μεταλλεία αποτελεί το κεντρικό σύστημα που διασφαλίζει την παροχή καθαρού αέρα στους κύριους διαδρόμους και τους εργασιακούς χώρους. Ο στόχος αυτού του συστήματος είναι η απομάκρυνση των επικίνδυνων αερίων, η μείωση της θερμοκρασίας και της υγρασίας, καθώς και η εξασφάλιση επαρκούς οξυγόνου για τους εργαζόμενους. Το σύστημα λειτουργεί με ανεμιστήρες και κύριους αλλά και δευτερεύοντες αγωγούς αερισμού, τοποθετημένους στρατηγικά για την ομαλή κυκλοφορία του αέρα. Καλύπτει μεγάλες αποστάσεις και περιλαμβάνει συνήθως έναν κεντρικό αεραγωγό που συνδέει την είσοδο με τα κύρια εξορυκτικά τμήματα.

Ο σωστός σχεδιασμός των αεραγωγών παίζει επίσης καθοριστικό ρόλο, καθώς ελαχιστοποιεί τις απώλειες πίεσης και εξασφαλίζει την απαραίτητη παροχή αέρα στους εργασιακούς χώρους. Είναι το πιο κρίσιμο κομμάτι του συνολικού συστήματος αερισμού, καθώς η αποτελεσματικότητά του επηρεάζει άμεσα την υγεία και την ασφάλεια των εργαζομένων. Η απόδοσή του εξαρτάται από παράγοντες όπως το μέγεθος των αεραγωγών, η ταχύτητα ροής του αέρα και οι απώλειες πίεσης που προκαλούνται από τριβές ή κρούσεις στους αγωγούς και τις διακλαδώσεις.

Ο κύριος ή πρωτεύων αερισμός των μεταλλείων μπορεί να επιτευχθεί είτε με φυσικό αερισμό είτε με μηχανικό αερισμό. Στην περίπτωση του μηχανικού αερισμού, είναι προφανές ότι απαιτείται η χρήση ενός ή περισσότερων ανεμιστήρων για την εξασφάλιση της ροής του αέρα. Από την άλλη πλευρά, ο βοηθητικός ή δευτερεύων αερισμός αφορά τον αερισμό των στοών ή τμημάτων του μεταλλείου που δεν

διαρρέονται από το κύριο ρεύμα αέρα και χρειάζονται επιπλέον πηγή πίεσης για τη σωστή ροή του αέρα.

Ο φυσικός ελκυσμός μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις να συνεισφέρει σημαντικά στον αερισμό των μεταλλείων, ωστόσο με την αύξηση του βάθους των εκμεταλλεύσεων, τις υψηλές απαιτήσεις παραγωγικότητας και την επιτακτική ανάγκη για βελτίωση της ασφάλειας, ο μηχανικός αερισμός έχει καταστεί απαραίτητος. Η εκτεταμένη χρήση ανεμιστήρων σε σύγχρονα μεταλλεία σημαίνει ότι οι μηχανικοί πρέπει όχι μόνο να γνωρίζουν τις δυνατότητες του εξοπλισμού, αλλά και τα βασικά στοιχεία της κατασκευής και λειτουργίας των ανεμιστήρων. Πρέπει επίσης να εξετάζουν τους παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή του κατάλληλου τύπου και μεγέθους ανεμιστήρα, τη σωστή θέση τοποθέτησής του, καθώς και τους κανόνες ασφαλούς και οικονομικής λειτουργίας του, καθώς η ασφάλεια του προσωπικού και η ομαλή λειτουργία του έργου εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την καλή απόδοση του συστήματος αερισμού.

Ένα κρίσιμο στοιχείο που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό του συστήματος αερισμού είναι η διεύθυνση της ροής του αέρα – αν αυτή είναι φυσική ή μηχανική. Η απάντηση σε αυτό εξαρτάται κυρίως από τον τύπο του μεταλλείου και τις συνθήκες που επικρατούν κατά τη διάρκεια της εκμετάλλευσης, καθώς και από τις απαιτήσεις του συγκεκριμένου έργου.

Ο συνδυασμός σωστού σχεδιασμού και κατανόησης των ιδιαίτερων αναγκών κάθε μεταλλείου είναι απαραίτητος για τη διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας και της ασφάλειας του συστήματος αερισμού, κάτι που αντανακλάται και στη σύγχρονη βιβλιογραφία για τα υπόγεια ορυχεία.

5.3.2 Φυσητικός και Μυζητικός Αερισμός

Ο πρωτεύων αερισμός στα μεταλλεία, είτε πρόκειται για φυσικό είτε για μηχανικό σύστημα, όπως αναφέρονται στην βιβλιογραφία των υπογείων εκμεταλλεύσεων, αποτελεί βασικό στοιχείο για την ομαλή λειτουργία του συστήματος αερισμού. Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος φυσικού ή μηχανικού εξαρτάται κυρίως από την τοποθεσία του κύριου ανεμιστήρα αλλά και από την διάταξη των στοών και τις ειδικές απαιτήσεις του μεταλλείου, όπως η παροχή του αέρα που απαιτείται. Κάθε σύστημα έχει τις δικές του ιδιαιτερότητες και επηρεάζει διαφορετικά τη ροή του αέρα, τις απώλειες πίεσης και την απόδοση του αερισμού

Το φυσητικό σύστημα τοποθετεί τον ανεμιστήρα στην είσοδο δηλαδή στο στόμιο του αέρα, αυξάνοντας την πίεση του αέρα πάνω από την ατμοσφαιρική, και είναι ιδανικό για τη γρήγορη παροχή καθαρού αέρα στους εργασιακούς χώρους. Το σύστημα αυτό είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό για τη διανομή αέρα σε εκτεταμένα δίκτυα στοών, καθώς η υψηλή πίεση επιτρέπει την ώθηση του αέρα σε μεγάλα μήκη του δικτύου.

Ωστόσο, στο σημείο εισόδου του αέρα, δημιουργείται μια μικρή πτώση πίεσης λόγω της αναρρόφησης, γεγονός που σημαίνει ότι η δυναμική πίεση είναι χαμηλότερη από την ατμοσφαιρική. Αυτή η πτώση μπορεί να προκαλέσει μικρές απώλειες ενέργειας. Στην έξοδο του αέρα, η πίεση είναι υψηλότερη, καθώς ο αέρας εξέρχεται με την κινητική του ενέργεια, γεγονός που αυξάνει τη συνολική απώλεια πίεσης του συστήματος. Αυτές οι απώλειες ενέργειας επηρεάζουν τη συνολική αποδοτικότητα του συστήματος.

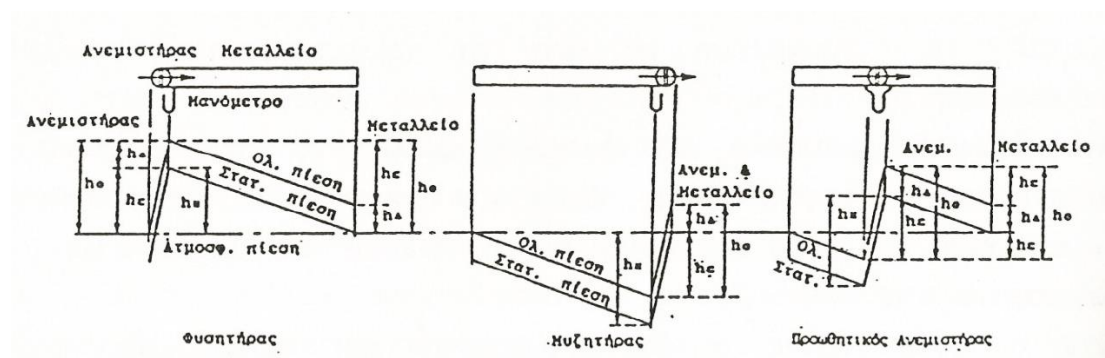
Στο μυζητικό σύστημα, ο ανεμιστήρας τοποθετείται στην έξοδο του αέρα και μειώνει την πίεση του αέρα εντός του μεταλλείου κάτω από την ατμοσφαιρική, δημιουργώντας μια κατάσταση αναρρόφησης που έλκει τον αέρα μέσα από το σύστημα. Το σύστημα αυτό είναι αποτελεσματικό όταν το δίκτυο του μεταλλείου έχει πολλαπλά σημεία εξαγωγής αέρα, καθώς η αρνητική πίεση «τραβά» τον αέρα από τις στοές προς την έξοδο.

Η μείωση της πίεσης δημιουργεί μια συνολική αναρρόφηση, που είναι χρήσιμη σε μεταλλεία όπου απαιτείται η απομάκρυνση μολυσμένου αέρα ή σε περιπτώσεις που ο φυσικός αερισμός δεν επαρκεί. Ωστόσο, το μειονέκτημα του μυζητικού συστήματος είναι ότι σε πολύ εκτεταμένα δίκτυα μπορεί να χρειαστεί μεγαλύτερη ισχύς ανεμιστήρα για να ξεπεραστούν οι μεγάλες απώλειες πίεσης που προκαλούνται από τις τριβές και τις διακλαδώσεις στο σύστημα.

Τέλος υπάρχει και το προωθητικό σύστημα, σε αυτό ο ανεμιστήρας τοποθετείται σε κάποιο σημείο εντός του δικτύου. Σε αυτή την περίπτωση, το τμήμα του δικτύου πριν από τον ανεμιστήρα λειτουργεί ως μυζητικό, ενώ το τμήμα μετά τον ανεμιστήρα λειτουργεί ως φυσητικό. Ο αέρας παραλαμβάνεται με πίεση χαμηλότερη της ατμοσφαιρικής και προωθείται με πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής. Αυτό το σύστημα είναι κατάλληλο για μεγάλα και περίπλοκα μεταλλεία, όπου χρειάζεται διαχωρισμός της πίεσης σε διαφορετικές ζώνες του δικτύου αερισμού. Το προωθητικό σύστημα παρέχει ευελιξία και επιτρέπει την καλύτερη κατανομή του αέρα σε

μεταλλεία με πολλαπλά τμήματα που απαιτούν διαφορετικές πιέσεις για τη σωστή λειτουργία τους. Παρόλα αυτά, απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό, ώστε να αποφευχθούν περιπτώσεις αλληλεπίδρασης των πιέσεων μεταξύ των δύο ζωνών που μπορεί να οδηγήσουν σε αναποτελεσματική λειτουργία.

Σε κάθε ένα από αυτά τα συστήματα, η ολική πίεση, η στατική πίεση και η δυναμική πίεση έχουν την δική τους σημασία για την ομαλή λειτουργία. Οι απώλειες πίεσης λόγω τριβών στους αγωγούς, τις καμπύλες και τις διακλαδώσεις, καθώς και οι απώλειες λόγω κρούσεων στις αλλαγές κατεύθυνσης, επηρεάζουν τη συνολική ενεργειακή απόδοση του συστήματος. Οι διαφορές στη στατική, δυναμική και ολική πίεση εξηγούνται από τα αντίστοιχα διαγράμματα πίεσης που παρουσιάζονται στο [Σχήμα 5-4](#). Οι απώλειες και τα κέρδη πίεσης σε κάθε σημείο του αγωγού, δίνουν μια σαφή εικόνα για την ενεργειακή απόδοση και τη συνολική λειτουργικότητα των συστημάτων αυτών.



Σχήμα 5-4: Διαγράμματα πιέσεων για το φυσικό, μυζικό και προωθητικό σύστημα αερισμού, (Οικονομόπουλος, 1991).

5.3.3 Μηχανικός Αερισμός

Ο μηχανικός αερισμός χρησιμοποιεί ανεμιστήρες για να κινήσει τον αέρα μέσα στις στοές του μεταλλείου, είτε δημιουργώντας θετική πίεση (ώθηση αέρα προς το εσωτερικό), είτε αρνητική πίεση (αναρρόφηση αέρα από το εσωτερικό).

Τα συστήματα μηχανικού αερισμού μπορούν να χωριστούν σε δύο κύριους τύπους ανεμιστήρων: τους αξονικούς ανεμιστήρες και τους φυγοκεντρικούς ανεμιστήρες. Οι αξονικοί ανεμιστήρες χρησιμοποιούνται συνήθως για γενικές εφαρμογές αερισμού, καθώς επιτρέπουν τη ροή μεγάλου όγκου αέρα με σχετικά χαμηλή πίεση. Από την άλλη πλευρά, οι φυγοκεντρικοί ανεμιστήρες είναι πιο κατάλληλοι για περιπτώσεις όπου απαιτούνται υψηλότερες πιέσεις, όπως σε πιο περίπλοκα ή εκτεταμένα δίκτυα εξαερισμού, (Mc Pherson, 1993).

Επιπλέον, συμπληρωματικά στοιχεία όπως αεροκουρτίνες και αγωγοί παίζουν σημαντικό ρόλο στη σωστή καθοδήγηση και κατανομή του αέρα μέσα στις στοές, διασφαλίζοντας ότι ο καθαρός αέρας φτάνει στα σωστά σημεία και ότι ο μολυσμένος αέρας απομακρύνεται αποτελεσματικά. Αυτές οι διατάξεις βοηθούν στη βελτίωση της συνολικής αποδοτικότητας του συστήματος εξαερισμού, ενώ εξασφαλίζουν την ασφάλεια και την άνεση των εργαζομένων στο μεταλλείο. Με την ολοένα αυξανόμενη έμφαση στην υγεία και την ασφάλεια στα υπόγεια ορυχεία, η αποτελεσματική διαχείριση του αέρα μέσω αυτών των συστημάτων αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την επιτυχημένη λειτουργία των εξορυκτικών δραστηριοτήτων.

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μηχανικού αερισμού

Ο μηχανικός αερισμός παρέχει τη δυνατότητα πλήρους ελέγχου της ροής του αέρα, επιτρέποντας τη διατήρηση ασφαλών επιπέδων οξυγόνου στους εργασιακούς χώρους των υπόγειων μεταλλείων.

Επιπλέον, εξασφαλίζει την αδιάλειπτη απομάκρυνση επιβλαβών αερίων, όπως το διοξείδιο του άνθρακα, το μεθάνιο και άλλες τοξικές ουσίες, που μπορεί να προκύψουν από τις διαδικασίες εξόρυξης ή τη χρήση μηχανημάτων εσωτερικής καύσης.

Σε μεταλλεία μεγάλου βάθους, όπου ο φυσικός αερισμός δεν επαρκεί, ο μηχανικός αερισμός είναι η μοναδική αποτελεσματική λύση. Εξασφαλίζει σταθερή ροή αέρα ακόμα και σε εκτεταμένα δίκτυα στοών.

Το σύστημα μπορεί να ρυθμιστεί για να καλύπτει διαφορετικές ανάγκες, όπως η ένταση της εργασίας ή οι κλιματολογικές συνθήκες.

Από την άλλη, συνοδεύεται από ορισμένες προκλήσεις που σχετίζονται με το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας. Η ανάγκη για εξοπλισμό, όπως οι ανεμιστήρες και οι σωληνώσεις, αυξάνει τις κεφαλαιουχικές δαπάνες, ενώ η συντήρηση αυτών των συστημάτων απαιτεί τακτικούς ελέγχους για τη διατήρηση της αποδοτικότητάς τους. Σε μεγάλα και πολύπλοκα δίκτυα αερισμού, η συντήρηση μπορεί να είναι χρονοβόρα και να απαιτεί σημαντικούς πόρους.

Επιπλέον, η συνεχής κατανάλωση ενέργειας από τους ανεμιστήρες προσθέτει ένα ακόμα στοιχείο κόστους στη λειτουργία του μεταλλείου. Σε περιπτώσεις διακοπής ρεύματος, το σύστημα αερισμού μπορεί να σταματήσει, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει σοβαρούς κινδύνους για την ασφάλεια των εργαζομένων, καθώς η

απομάκρυνση των επιβλαβών αερίων σταματά και τα επίπεδα οξυγόνου μπορεί να μειωθούν επικίνδυνα. Αυτό καθιστά αναγκαία την ύπαρξη εφεδρικών συστημάτων ή μέτρων αντιμετώπισης έκτακτων καταστάσεων.

5.3.4 Ανεμιστήρες

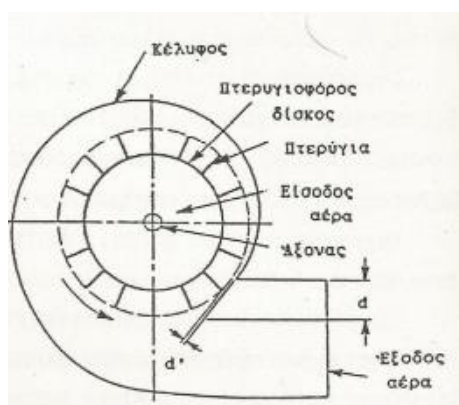
Οι ανεμιστήρες είναι το κύριο στοιχείο ενός μηχανικού συστήματος αερισμού, και βασίζονται συνήθως σε ηλεκτρική τροφοδοσία, αν και σε ορισμένες περιπτώσεις οι μικρότερες εκδοχές τους μπορεί να λειτουργούν με πεπιεσμένο αέρα ή πετρέλαιο.



Σχήμα 5-5: Εμπρόσθια όψη μηχανικού αερισμού σε υπόγειο μεταλλείο (<https://sugercanes.com>).

5.3.5 Φυγοκεντρικοί ανεμιστήρες

Οι φυγοκεντρικοί ανεμιστήρες, Σχήμα 5-6, γνωστοί και ως κεντρόφυγες ανεμιστήρες, αξιοποιούν τη δημιουργία διαφορικής πίεσης μέσω της περιστροφικής κίνησης για να εξασφαλίσουν την κυκλοφορία του αέρα. Κατά τη λειτουργία τους, ο αέρας εισάγεται κεντρικά μέσα από τον τροχό του ανεμιστήρα, ο οποίος είναι εξοπλισμένος με πτερύγια.



α



β

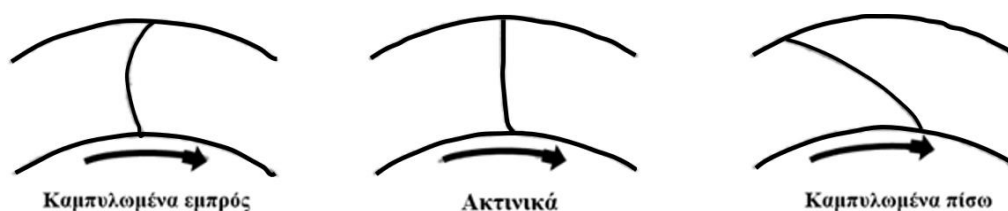
Σχήμα 5-6: α) Αρχή λειτουργίας ενός κεντρόφυγου ανεμιστήρα (Hartman, et al., 1982), β) μοντέλο BK4-72 (www.yaosenmarine.com).

Καθώς ο τροχός περιστρέφεται, η φυγόκεντρη δύναμη αναγκάζει τον αέρα να κινηθεί προς τα έξω εισέρχοντας σε ένα κέλυφος σε σχήμα κοχλίας, [Σχήμα 5-7](#), όπου η διατομή αυξάνεται σταδιακά μέχρι την έξοδο του αέρα, επιταχύνοντας και αποκτώντας κινητική ενέργεια. Αυτή η ενέργεια επιτρέπει στον αέρα να απομακρυνθεί από την περιφέρεια του ανεμιστήρα, δημιουργώντας τη διαφορά πίεσης που είναι απαραίτητη για τη διανομή του αέρα σε ένα σύστημα αερισμού.

Η διαφορά πίεσης που αναπτύσσεται στον ανεμιστήρα οφείλεται τόσο στη φυγοκεντρική δύναμη που προκύπτει από την περιστροφή, όσο και στην κινητική ενέργεια που παράγεται όταν ο αέρας εξέρχεται από τα πτερύγια. Η απόδοση του ανεμιστήρα εξαρτάται από την ταχύτητα των πτερυγίων του τροχού και από την στατική ενέργεια του αέρα, η οποία προκύπτει από την ταχύτητα του αέρα τόσο κατά την είσοδο όσο και κατά την έξοδό του από τον τροχό.

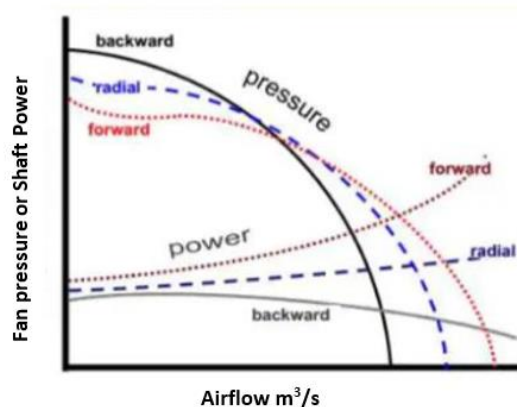
Αυτοί οι ανεμιστήρες είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικοί σε συστήματα όπου απαιτείται υψηλή πίεση για τη διανομή του αέρα, όπως στα υπόγεια συστήματα αερισμού. Η δυνατότητα προσαρμογής των χαρακτηριστικών τους, όπως η διάταξη των πτερυγίων, επιτρέπει τη βέλτιστη απόδοση, με βάση τις απαιτήσεις του δικτύου αερισμού. Η απόδοση ενός κεντρόφυγα ανεμιστήρα εξαρτάται κυρίως από το πόσο καλά ρυθμίζεται η σχέση μεταξύ της κινητικής και της στατικής ενέργειας.

Η σχεδίαση των πτερυγίων τους, τόσο ως προς την καμπυλότητα των, την κλίση όσο και τον αριθμό, επιτρέπει την προσαρμογή τους στις απαιτήσεις του κάθε μεταλλείου. Τα πτερύγια μπορούν να είναι είτε ακτινικά (ευθυγραμμισμένα με την ακτίνα του δίσκου) είτε να κλίνουν προς ή αντίθετα στη διεύθυνση περιστροφής του δίσκου, [Σχήμα 5-7](#). Ανάλογα με την κλίση των πτερυγίων, οι χαρακτηριστικές πιέσεις του ανεμιστήρα μπορεί να διαφέρουν, με τα πτερύγια που κλίνουν προς τη φορά κίνησης να αυξάνουν την πίεση του ανεμιστήρα καθώς αυξάνεται η παροχή αέρα, [Σχήμα 5-8](#).



Σχήμα 5-7: Τύποι πτερυγίων κεντρόφυγων ανεμιστήρων ([Hall, 1981](#)).

Επιπλέον, η αύξηση του αριθμού των πτερυγίων μπορεί να αυξήσει τόσο την πίεση όσο και τον όγκο του αέρα που παράγεται από τον ανεμιστήρα. Ωστόσο, αν τοποθετηθούν πάρα πολλά πτερύγια, οι απώλειες λόγω τριβών θα αυξηθούν και θα μειωθεί ο χώρος για τη ροή του αέρα. Για αυτόν τον λόγο, ο αριθμός των πτερυγίων πρέπει να ρυθμιστεί ανάλογα με το είδος της εφαρμογής.

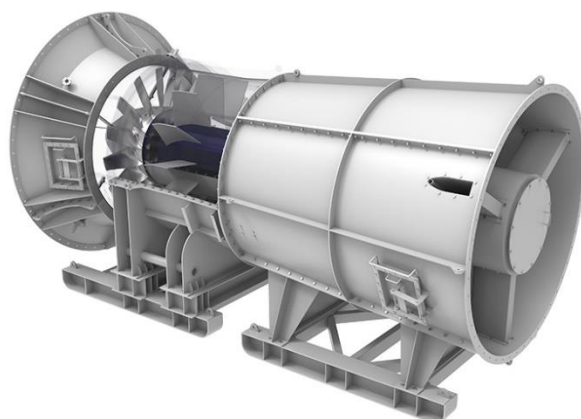


Σχήμα 5-8: Χαρακτηριστικές Καμπύλες Κεντρόφυγου ανάλογα με τα πτερύγια (Mc Pherson, 1993).

Αξίζει να σημειωθεί ότι η συντήρηση τέτοιων ανεμιστήρων είναι εξίσου σημαντική με τη σωστή τους επιλογή, καθώς οι απώλειες πίεσης λόγω τριβών μπορούν να αυξηθούν σημαντικά αν οι ανεμιστήρες δεν συντηρούνται σωστά. Η αποδοτικότητα αυτών των ανεμιστήρων εξαρτάται απόλυτα από την καλή τους λειτουργία, τη σωστή διαρρύθμιση των πτερυγίων και τη διατήρηση της διατομής τους καθαρή από εμπόδια και ρύπους.

5.3.6 Αξονικοί Ανεμιστήρες

Οι αξονικοί ανεμιστήρες ή αλλιώς ελικοφόροι ανεμιστήρες, Σχήμα 5-9, αποτελούν μια εξέλιξη στην τεχνολογία ανεμιστήρων, είναι σχεδιασμένοι για να προσφέρουν καλύτερη κατεύθυνση της ροής αέρα παράλληλα με τον άξονα περιστροφής του κινητήρα. Ο σχεδιασμός τους μοιάζει με αυτόν μιας τουρμπίνας αεροπλάνου, κάτι που εξασφαλίζει βέλτιστη απόδοση στον έλεγχο της ταχύτητας και της ροής του αέρα. Τα πτερύγια είναι τοποθετημένα σε μια πλήμνη που επιτρέπει τη ρύθμιση της γωνίας τους, προσφέροντας ευελιξία στη ρύθμιση παροχής του αέρα. Η κύρια λειτουργία των ανεμιστήρων αυτών έγκειται στην εφαπτομενική επιτάχυνση του αέρα, η οποία παράγεται καθώς ο αέρας περνάει μέσα από την έλικα.



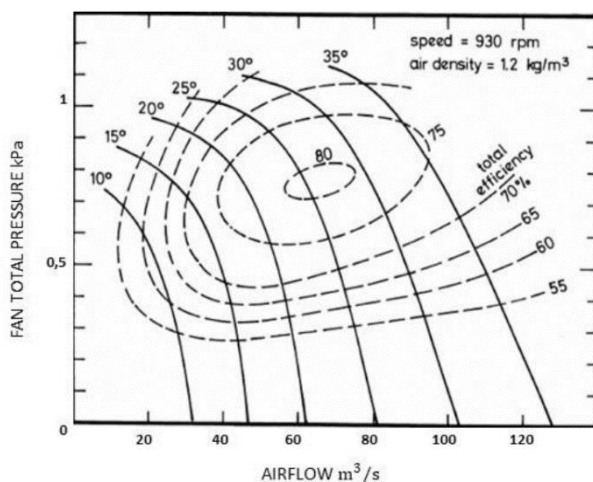
Σχήμα 5-9: Αξονικός ανεμιστήρας , CC2400 (www.clemcorp.com.au).

Η ενέργεια που αναπτύσσεται κατά την περιστροφή της έλικας πρέπει στη συνέχεια να μετατραπεί σε γραμμική ροή και στατική πίεση. Αυτό δεν είναι πάντοτε εύκολο, αλλά αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την αποτελεσματικότητα του ανεμιστήρα. Για να διευκολυνθεί αυτή η διαδικασία, οι κατασκευαστές συχνά προσθέτουν διευθυντικά πτερύγια αμέσως μετά την έλικα, τα οποία βοηθούν στη μείωση των στροβιλισμών και στην καλύτερη κατεύθυνση του αέρα.

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση των ανεμιστήρων είναι η γωνία κλίσης των πτερυγίων. Η ρυθμιζόμενη κλίση των πτερυγίων παρέχει ευελιξία στη λειτουργία του ανεμιστήρα, καθώς επιτρέπει τον προσαρμοσμένο έλεγχο της ροής του αέρα. Αυτό σημαίνει ότι ο ανεμιστήρας μπορεί να προσαρμοστεί στις εκάστοτε ανάγκες του αερισμού, κάτι που είναι κρίσιμο σε περιβάλλοντα όπως τα μεταλλεία, όπου οι συνθήκες μπορεί να αλλάζουν συχνά. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η αύξηση της γωνίας κλίσης (προσβολής) συνεπάγεται αύξηση δύναμης η οποία προκαλεί την ώθηση του αέρα στον ανεμιστήρα. Ωστόσο, υπάρχει ένα κρίσιμο σημείο πέραν του οποίου η απόδοση του ανεμιστήρα μειώνεται και το σύστημα καθίσταται ασταθές.

Στο [Σχήμα 5-10](#), απεικονίζεται διάγραμμα ενός συνόλου από χαρακτηριστικές καμπύλες για αξονικό ανεμιστήρα με πτερύγια μεταβλητής γωνίας. Οι ανεμιστήρες με μεταβλητή γωνία πτερυγίων είναι ιδιαίτερα ευέλικτοι και μπορούν να προσαρμόζονται εύκολα σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, προσφέροντας υψηλή απόδοση. Η ευελιξία αυτών των ανεμιστήρων, τους δίνει σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με τους κεντρόφυγες ανεμιστήρες.

Η απόδοση περιστροφής των αξονικών ανεμιστήρων φτάνει το 70-90%, γεγονός που δείχνει την υψηλή αποτελεσματικότητα αυτής της τεχνολογίας στον έλεγχο της ροής αέρα. Αυτοί οι ανεμιστήρες είναι ιδανικοί για εφαρμογές όπου απαιτείται μεγάλος όγκος αέρα να κινηθεί γρήγορα μέσω ενός αγωγού, όπως σε συστήματα αερισμού υπόγειων χώρων και μεταλλείων.



Σχήμα 5-10: Χαρακτηριστικές καμπύλες ενός αξονικού ανεμιστήρα με πτερύγια μεταβλητής γωνίας (Mc Pherson, 1993).

Τέλος, οι διαφορετικοί τύποι των αξονικών ανεμιστήρων εξυπηρετούν συγκεκριμένες ανάγκες αερισμού και η αρχή λειτουργίας τους, που βασίζεται στην αξονική κατεύθυνση της ροής αέρα, τους καθιστά απαραίτητους σε εφαρμογές όπου η απόδοση και ο έλεγχος του αέρα είναι κρίσιμοι παράγοντες.

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε κάθε συγκεκριμένο τύπο ανεμιστήρα που στρέφεται με δεδομένη ταχύτητα και λειτουργεί σε αέρα κανονικής πυκνότητας, αντιστοιχούν χαρακτηριστικές καμπύλες οι οποίες συνδέουν τις κύριες μεταβλητές παραμέτρους και συγκεκριμένα την πίεση, την παροχή, την ισχύ και την απόδοση.

Η λειτουργία ενός ανεμιστήρα χαρακτηρίζεται από μια σειρά καμπυλών απόδοσης ανεμιστήρα που συνδέουν τις βασικές μεταβλητές, όπως η πίεση, η παροχή, η ισχύς και η συνολική απόδοση του συστήματος. Αυτές οι καμπύλες είναι μοναδικές για κάθε ανεμιστήρα και εξαρτώνται από τη ταχύτητα περιστροφής και τις συνθήκες πυκνότητας του αέρα στον οποίο λειτουργεί.

Η καμπύλη πίεσης-παροχής είναι η πιο σημαντική, καθώς δείχνει πώς η πίεση που παράγεται από τον ανεμιστήρα μεταβάλλεται ανάλογα με την παροχή αέρα. Ωστόσο, η χάραξη αυτής της καμπύλης δεν είναι εύκολη, καθώς ένα μέρος της παραγόμενης

πίεσης χάνεται λόγω των απωλειών που προκύπτουν κατά τη ροή του αέρα μέσω του ανεμιστήρα, κυρίως εξαιτίας της τριβής και άλλων μηχανικών παραγόντων. Για τον λόγο αυτό, τόσο η χαρακτηριστική καμπύλη πίεσεως – παροχής, όσο και οι υπόλοιπες χαρακτηριστικές καμπύλες, όπως ισχύος – παροχής, αποδόσεως – παροχής δίνονται από τον κατασκευαστή.

5.4 Σημείο Λειτουργίας Ανεμιστήρα

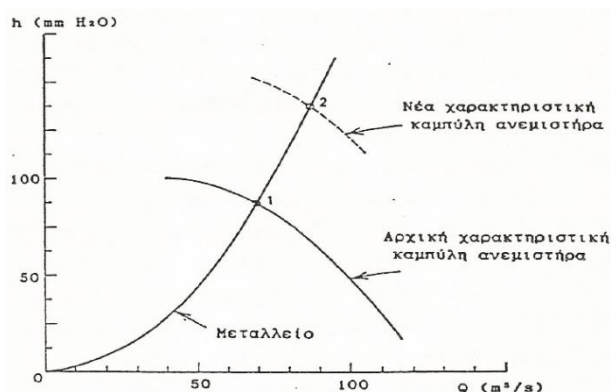
Οι καμπύλες λειτουργίας των ανεμιστήρων που αναφέρθηκαν παραπάνω χρησιμοποιούνται για να γίνει σύγκριση στα διάφορα μοντέλα πριν την αγορά ενός ανεμιστήρα με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσής του, όταν αυτός λειτουργεί υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Ένα σύστημα αερισμού περιλαμβάνει συνήθως έναν ή περισσότερους ανεμιστήρες, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι με ένα δίκτυο αγωγών αερισμού. Η απόδοση του αερισμού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αντίσταση του δικτύου αεραγωγών, η οποία καθορίζεται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους, όπως η διάμετρος και το μήκος, αλλά και από την κατάσταση των τοιχωμάτων, που μπορεί να προκαλούν απώλειες λόγω τριβών. Κάθε ανεμιστήρας που λειτουργεί με σταθερή ταχύτητα περιστροφής μπορεί να παράγει διάφορους συνδυασμούς πίεσης και παροχής, οι οποίοι προσδιορίζονται από τη χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας του ανεμιστήρα. Αυτή η καμπύλη δείχνει πώς η πίεση που αναπτύσσεται από τον ανεμιστήρα σχετίζεται με την ποσότητα του αέρα που μπορεί να παρέχει.

Από την άλλη, το ίδιο το δίκτυο αερισμού, που αποτελείται από υπόγειους αγωγούς και στοές, παρουσιάζει μια παραβολική καμπύλη αντίστασης, η οποία περιγράφεται από τον τύπο $h = R \times Q^2$, όπου h είναι η απώλεια πίεσης και Q είναι η παροχή αέρα. Η αντίσταση του δικτύου καθορίζει πόσο δύσκολο είναι για τον αέρα να ρέει μέσα από το δίκτυο και πώς η απώλεια πίεσης αυξάνεται με την αύξηση της παροχής.

Το σημείο όπου η καμπύλη του ανεμιστήρα τέμνει την παραβολική καμπύλη του δικτύου καθορίζει το σημείο λειτουργίας του συστήματος αερισμού. Σε αυτό το σημείο, η πίεση που παράγεται από τον ανεμιστήρα αντισταθμίζει ακριβώς τις απώλειες πίεσης του δικτύου, επιτρέποντας τη ροή του αέρα στο μεταλλείο.

Το σημείο λειτουργίας, [Σχήμα 5-11](#), παραμένει σταθερό όσο οι παράμετροι του δικτύου, όπως η αντίσταση και ο φυσικός ελκυσμός, παραμένουν αμετάβλητοι. Αν

αλλάζουν αυτές οι παράμετροι, για παράδειγμα λόγω μεταβολών στη διάταξη των αεραγωγών ή των συνθηκών λειτουργίας του μεταλλείου, τότε το σημείο λειτουργίας μπορεί να μεταβληθεί, κάτι που απαιτεί αναπροσαρμογές στο σύστημα αερισμού. Είναι σημαντικό οι ανεμιστήρες να λειτουργούν εντός του ασφαλούς και αποδοτικού τμήματος της χαρακτηριστικής τους καμπύλης, προκειμένου να διασφαλίζεται η αποτελεσματικότητα και η οικονομία στη λειτουργία του συστήματος.



Σχήμα 5-11: Σημείο λειτουργίας ανεμιστήρα, (Οικονομόπουλος, 2002).

Συνολικά, η κατανόηση και η σωστή ανάλυση των καμπυλών απόδοσης των ανεμιστήρων είναι κρίσιμη για τη βελτίωση της αποδοτικότητας των συστημάτων αερισμού στα μεταλλεία, διασφαλίζοντας την επαρκή παροχή αέρα και την ασφάλεια των εργαζομένων.

5.5 Συνδυασμός Ανεμιστήρων

Ο συνδυασμός ανεμιστήρων σε συστήματα αερισμού μεταλλείων μπορεί να συμβάλλει στην πιο αποδοτική και αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος αερισμού, ιδιαίτερα όταν οι απαιτήσεις για την υπέρβαση των αντιστάσεων του δικτύου είναι υψηλές. Παρόλο που η εφαρμογή της συνολικής πίεσης σε ένα μόνο σημείο του δικτύου είναι συνήθως η πιο οικονομική επιλογή, η κατανομή της πίεσης σε περισσότερα σημεία μπορεί να οδηγήσει σε πιο αποτελεσματική κυκλοφορία του αέρα και καλύτερη λειτουργία του συστήματος.

Η χρήση δύο ή περισσότερων ανεμιστήρων μπορεί να γίνει είτε σε σειρά, είτε σε παράλληλη διάταξη, ανάλογα με τις ανάγκες του συστήματος

Σε πιο σύνθετες περιπτώσεις, μπορεί να εφαρμοστεί συνδυασμός των δύο αυτών διατάξεων, ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη λειτουργία του συστήματος. Ωστόσο, κατά την ανάλυση της λειτουργίας αυτών των συστημάτων, συχνά οι δυναμικές πιέσεις

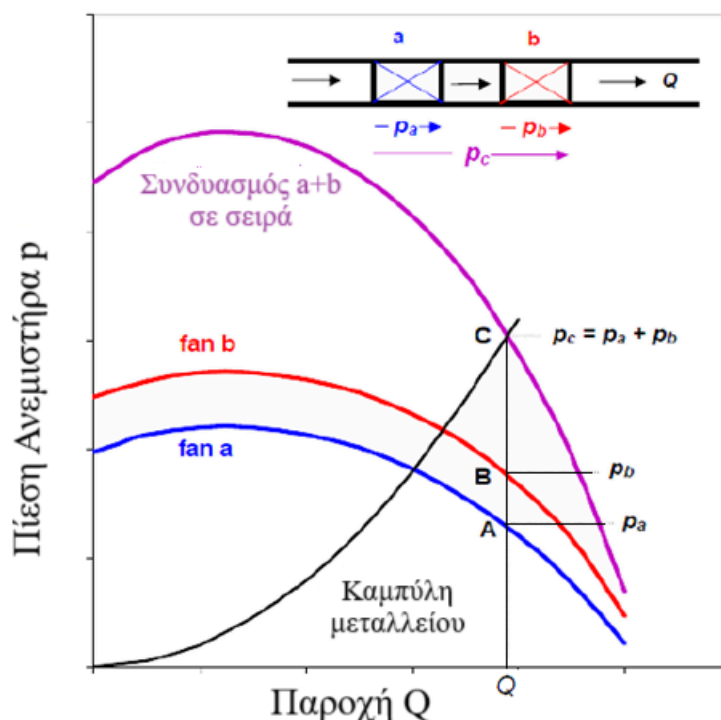
θεωρούνται αμελητέες, και συνεπώς λαμβάνονται υπόψη μόνο οι στατικές πιέσεις, οι οποίες αντιστοιχούν στην ολική πίεση που εφαρμόζεται από τους ανεμιστήρες.

5.5.1 Ανεμιστήρες σε Σειρά

Η διάταξη ανεμιστήρων σε σειρά αποτελεί μια τεχνική που εφαρμόζεται όταν απαιτείται αύξηση της συνολικής πίεσης που παράγεται στο δίκτυο αερισμού ενός μεταλλείου. Στην διάταξη αυτή οι ανεμιστήρες τοποθετούνται στη σειρά στο ίδιο κύκλωμα, κάθε ανεμιστήρας λειτουργεί με το συνολικό της παροχής του αέρα του δικτύου αλλά προσθέτει το μερίδιο της απαιτούμενης πίεσης που χρειάζεται για να επιτευχθεί η ζητούμενη ροή. Η συνολική πίεση που αναπτύσσεται από το σύστημα ισούται με το άθροισμα των πιέσεων που αναπτύσσει ο κάθε ανεμιστήρας, ενώ η παροχή αέρα παραμένει σταθερή σε όλους τους ανεμιστήρες.

Η τοποθέτηση ανεμιστήρων σε σειρά προσφέρει μία αποτελεσματική λύση για την αύξηση της πίεσης στο σύστημα αερισμού, ειδικά όταν οι ανάγκες αερισμού απαιτούν μεγαλύτερη απόδοση από ό,τι μπορεί να προσφέρει ένας μόνο ανεμιστήρας. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι, εάν οι ανεμιστήρες δεν είναι σωστά συντονισμένοι μεταξύ τους ή αν οι τεχνικές προδιαγραφές τους δεν είναι συμβατές, μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη απόδοση ή ακόμα και ζημιές στο σύστημα.

Το σημείο λειτουργίας ενός συστήματος αερισμού εντοπίζεται εκεί όπου η καμπύλη του μεταλλείου συναντά την καμπύλη απόδοσης των ανεμιστήρων σε σειρά. Η λειτουργία με ανεμιστήρες σε σειρά προσθέτει την πίεση που απαιτείται για την επιθυμητή ροή αέρα στο μεταλλείο. Στο [Σχήμα 5-12](#) απεικονίζεται η διάταξη με δύο ανεμιστήρες (a και b) τοποθετημένους σε σειρά, και παρουσιάζονται οι αντίστοιχες χαρακτηριστικές καμπύλες πίεσης και παροχής για κάθε ανεμιστήρα, καθώς και για το σύστημα συνολικά. Στην χαρακτηριστική καμπύλη του μεταλλείου επίσης παρουσιάζεται και το σημείο λειτουργίας του συστήματος (σημείο C) όπου βρίσκεται εκεί που η καμπύλη του μεταλλείου τέμνεται με την καμπύλη του συνδυασμένου αποτελέσματος των ανεμιστήρων.



Σχήμα 5-12: Χαρακτηριστικές καμπύλες και σημείο λειτουργίας για ανεμιστήρες συνδεδεμένους σε σειρά (Mc Pherson, 1993).

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, οι δύο ανεμιστήρες αναπτύσσουν την ίδια παροχή αέρα Q , αλλά διαφορετικές πιέσεις p_a και p_b . Το σημείο λειτουργίας κάθε ανεμιστήρα ξεχωριστά αντιστοιχεί στα σημεία A και B αντίστοιχα, όπου οι ανεμιστήρες a και b λειτουργούν μεμονωμένα, αλλά η συνολική πίεση του συστήματος είναι το άθροισμα των πιέσεων που παράγουν. Επομένως, για να υπολογιστεί η συνολική πίεση που αναπτύσσεται από το σύστημα, προστίθενται οι πιέσεις των ανεμιστήρων για κάθε τιμή της παροχής.

Η καμπύλη απόδοσης δείχνει πόσο αποτελεσματικά λειτουργεί ένας ανεμιστήρας σε διαφορετικές συνθήκες ροής και πίεσης. Είναι σημαντικό να εξασφαλίζεται ότι οι ανεμιστήρες που τοποθετούνται σε σειρά έχουν συντονιστεί σωστά και ότι το σύστημα έχει σχεδιαστεί κατάλληλα για να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις του αερισμού. Αυτό ελαχιστοποιεί τις απώλειες ενέργειας και βελτιώνει τη συνολική απόδοση του συστήματος.

Σημαντικό είναι να επιλεγούν οι ανεμιστήρες κατάλληλα, ώστε η συνολική λειτουργία να είναι επιτυχής. Αν δεν γίνει σωστή επιλογή, το τελικό αποτέλεσμα μπορεί να μην είναι ικανοποιητικό και η συνδυασμένη λειτουργία να μην επιτυγχάνει τη μέγιστη απόδοση. Επιπλέον, η τοποθέτηση πρόσθετων ανεμιστήρων μπορεί να αυξήσει τα κόστη λόγω της ανάγκης για μεγαλύτερη εγκατάσταση και αυξημένη συντήρησης.

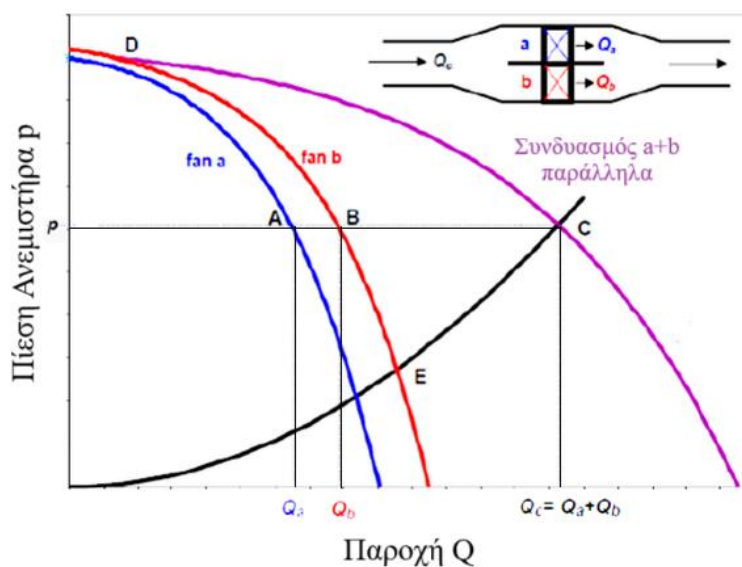
5.5.2 Ανεμιστήρες σε Παράλληλη Διάταξη

Αντίθετα σε περιπτώσεις όπου απαιτείται αυξημένη παροχή αέρα λόγω των συνθηκών που επικρατούν στο μεταλλείο, μπορεί να τοποθετηθούν δύο ή περισσότεροι ανεμιστήρες σε παράλληλη διάταξη. Αυτός ο τρόπος εγκατάστασης αυξάνει την ποσότητα του αέρα που παρέχεται, εφόσον η αντίσταση του δικτύου το επιτρέπει.

Οι ανεμιστήρες σε παράλληλη διάταξη είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι όταν απαιτείται να αυξηθεί η συνολική παροχή του αέρα σε ένα δίκτυο, χωρίς να αυξηθούν οι απώλειες πίεσης. Κάθε ανεμιστήρας, λοιπόν, προσφέρει μια διαφορετική παροχή αέρα Q , αλλά λειτουργεί υπό την ίδια πίεση P , η οποία καθορίζεται από τη χαρακτηριστική καμπύλη του δικτύου.

Εάν οι ανεμιστήρες τοποθετηθούν σε διαφορετικές θέσεις (στοές ή αγωγούς), τότε η πίεση του κάθε ανεμιστήρα λειτουργεί για το τμήμα του δικτύου που εξυπηρετεί. Στην περίπτωση όπου τοποθετηθούν στην ίδια στοά, η συνολική παροχή θα αυξηθεί, ενώ η πίεση θα παραμείνει αμετάβλητη.

Το σημείο λειτουργίας του συστήματος, [Σχήμα 5-13](#), όπου η συνδυαστική καμπύλη των ανεμιστήρων τέμνει τη χαρακτηριστική καμπύλη του δικτύου, καθορίζει την κατανομή της παροχής αέρα. Στο σχήμα που περιγράφεται, οι ανεμιστήρες a και b λειτουργούν σε σημεία λειτουργίας A και B , αντίστοιχα, με τις παροχές τους να προστίθενται στο σημείο C , που αντιστοιχεί στη συνολική παροχή του συστήματος.



Σχήμα 5-13: Χαρακτηριστικές καμπύλες δύο ανεμιστήρων τοποθετημένων παράλληλα (Mc Pherson, 1993).

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της παράλληλης διάταξης είναι ότι, σε περίπτωση που ένας ανεμιστήρας σταματήσει να λειτουργεί, ο άλλος ανεμιστήρας συνεχίζει να προμηθεύει με αέρα το σύστημα. Για παράδειγμα, αν ο ανεμιστήρας α σταματήσει να λειτουργεί, ο ανεμιστήρας b θα μετακινηθεί στο σημείο E της χαρακτηριστικής καμπύλης του, διατηρώντας περίπου το 70% της αρχικής παροχής αέρα. Αυτό το χαρακτηριστικό της παράλληλης σύνδεσης βελτιώνει την αξιοπιστία του συστήματος αερισμού, αφού διασφαλίζει τη συνεχή λειτουργία ακόμα και σε περίπτωση αποτυχίας ενός ανεμιστήρα.

Ωστόσο, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στο να μην υπερβούν οι ανεμιστήρες τα σημεία μέγιστης απόδοσης των χαρακτηριστικών καμπυλών τους, ιδίως όταν πρόκειται για αξονικούς ανεμιστήρες. Οι αξονικοί ανεμιστήρες έχουν συγκεκριμένα όρια, πέρα από τα οποία η λειτουργία τους μπορεί να γίνει ασταθής και να οδηγήσει σε μείωση της απόδοσης ή ακόμα και βλάβη. Για τον λόγο αυτό, είναι σημαντικό να γίνεται προσεκτικός σχεδιασμός και υπολογισμός της διακύμανσης της αντίστασης του δικτύου, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι οι ανεμιστήρες παραμένουν εντός των βέλτιστων ορίων λειτουργίας τους.

5.5.3 Συνδυασμός Ανεμιστήρων και Φυσικού Ελκυσμού

Η διατήρηση της ισορροπίας μεταξύ της πίεσης και της παροχής αέρα είναι κρίσιμη για την αποδοτικότητα του δικτύου αερισμού, ιδιαίτερα σε σύνθετα δίκτυα αερισμού. Οι ανεμιστήρες που λειτουργούν σε σειρά μπορούν επίσης να βοηθήσουν στην απομάκρυνση του αέρα από δύσκολα σημεία και να ενισχύσουν την κυκλοφορία του σε εκτεταμένα υπόγεια συστήματα. Επομένως, ο σωστός συνδυασμός των ανεμιστήρων μπορεί να αυξήσει σημαντικά την απόδοση του συνολικού συστήματος αερισμού, μειώνοντας ταυτόχρονα το κόστος συντήρησης και λειτουργίας.

Σε πολλές περιπτώσεις, οι ανεμιστήρες δεν είναι η μοναδική πηγή πίεσης στο σύστημα αερισμού. Ο φυσικός ελκυσμός μπορεί επίσης να συνεισφέρει στη διαμόρφωση της ροής, ανάλογα με τη διάταξη του μεταλλείου. Η φυσική αυτή πίεση μπορεί είτε να βοηθήσει είτε να μειώσει την αποτελεσματικότητα των ανεμιστήρων.

Σε περιπτώσεις όπου οι μεταλλευτικές εργασίες εκτελούνται σε ένα οριζόντιο επίπεδο, η πίεση του φυσικού ελκυσμού λειτουργεί σε σειρά με τον ανεμιστήρα, υποβοηθώντας ή ανταγωνιζόμενη τη ροή του αέρα που δημιουργεί ο ανεμιστήρας, ανάλογα με τη διεύθυνση της ροής. Αντίθετα, σε μεταλλεία με πολλαπλά πατώματα, οι πιέσεις του

φυσικού ελκυσμού λειτουργούν σαν μια ομάδα ανεμιστήρων σε παράλληλη διάταξη, με την τελική πίεση να λειτουργεί και πάλι σε σειρά με τους ανεμιστήρες του κύριου ρεύματος αέρα.

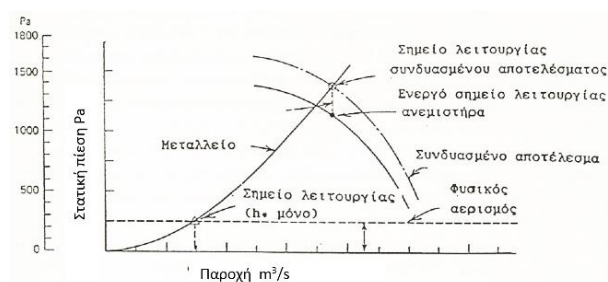
Όταν ένα μεταλλείο χρησιμοποιεί φυσικό ελκυσμό παράλληλα με τους ανεμιστήρες, η πίεση αυτή μπορεί είτε να υποβοηθά τη λειτουργία των ανεμιστήρων, εφόσον η ροή του αέρα συνάδει με αυτή που προκαλείται από τον ανεμιστήρα, είτε να λειτουργεί ως αντίθετη δύναμη, προκαλώντας αντίστροφη ροή και μειώνοντας την αποτελεσματικότητα του συστήματος.

Αν η πίεση του φυσικού ελκυσμού λειτουργεί ως εμπόδιο στη ροή, τότε το αποτέλεσμα είναι να μειώνεται η ποσότητα αέρα που κινείται στο σύστημα. Αντίθετα, αν η πίεση αυτή λειτουργεί ενισχυτικά, βοηθά στην αύξηση της ροής. Στην περίπτωση που η φυσική πίεση εμποδίζει τη ροή, η λειτουργία του ανεμιστήρα θα πρέπει να επαναπροσαρμοστεί ώστε να υπερκεράσει αυτή την αντίσταση.

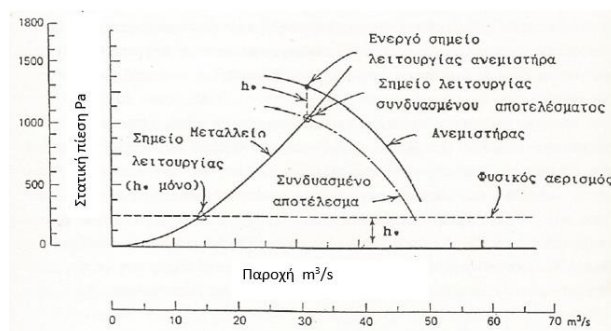
Είναι απαραίτητο, λοιπόν, να υπολογίζεται η πίεση του φυσικού ελκυσμού σε συνδυασμό με την κατεύθυνση της ροής που αυτή προκαλεί, ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή λειτουργία του δικτύου.

Αν η πίεση του φυσικού ελκυσμού είναι αρκετά υψηλή και η συνολική καμπύλη του συστήματος αερισμού ενισχύεται, το σημείο λειτουργίας του ανεμιστήρα μετατοπίζεται, προσδιορίζοντας το σημείο στο οποίο ο ανεμιστήρας λειτουργεί με ασφάλεια και αποδοτικότητα, ευνοϊκή περίπτωση, [Σχήμα 5-14α](#).

Αν η καμπύλη του συνολικού συστήματος που περιλαμβάνει τον φυσικό ελκυσμό και τους ανεμιστήρες είναι φθίνουσα, τότε η ρύθμιση πρέπει να προσαρμοστεί για να αποφευχθούν απώλειες, μη ευνοϊκή περίπτωση, [Σχήμα 5-14β](#).



α



β

Σχήμα 5-14: Συνδυασμός ανεμιστήρα με φυσικό ελκυσμό (Οικονομόπουλος, 2002) α) ευνοϊκή και β) μη ευνοϊκή διάταξη.

5.6 Βοηθητικός Αερισμός

Ο βοηθητικός ή δευτερεύων αερισμός έχει ως στόχο την εξασφάλιση της απαιτούμενης παροχής αέρα σε τμήματα του μεταλλείου που δεν εξυπηρετούνται επαρκώς από το κύριο σύστημα αερισμού. Αυτά τα τμήματα περιλαμβάνουν συνήθως στοές υπό προχώρηση, μέτωπα εκμετάλλευσης που δεν έχουν άμεση σύνδεση με το ρεύμα επιστροφής του αέρα και άλλες υπόγειες εκσκαφές που λόγω της θέσης ή του είδους τους δεν μπορούν να αεριστούν αποτελεσματικά από το πρωτεύον σύστημα αερισμού.

Η επίτευξη του βοηθητικού αερισμού γίνεται με τη χρήση πρόσθετου εξοπλισμού, κυρίως ανεμιστήρων (Σχήμα 5-15) και αεραγωγών, που προσθέτουν πρόσθετες πηγές πίεσης στο ήδη υπάρχον καθώς και με κουρτίνες για την καθοδήγησή της παροχής αέρα σε συγκεκριμένα σημεία. Ο εξοπλισμός αυτός ενισχύει τον κύριο αερισμό και κατευθύνει τη ροή σε δυσπρόσιτες περιοχές του δικτύου, εξασφαλίζοντας την απομάκρυνση αερίων και καπνών, όπως αυτά που προκύπτουν από την αποσύνθεση εκρηκτικών υλών και τις εκπομπές των μηχανών εσωτερικής καύσης.



Σχήμα 5-15: Βοηθητικός ανεμιστήρας σε υπόγειο μεταλλείο (<https://minetek.com>).

Σε περιπτώσεις όπου οι ανάγκες παροχής αέρα είναι αυξημένες, η χρήση πρόσθετων ανεμιστήρων μεγάλης ισχύος μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τις συνθήκες αερισμού, παρέχοντας περισσότερο αέρα σε συγκεκριμένα τμήματα του μεταλλείου. Αυτή η πρακτική, έστω και σε ευρεία έννοια, εντάσσεται στο πλαίσιο του βοηθητικού αερισμού. Παρά το γεγονός ότι το δίκτυο αερισμού ενός μεταλλείου προσφέρει πολλά θεωρητικά σημεία για την εγκατάσταση βοηθητικού εξοπλισμού, η πραγματικότητα συχνά αποκλείει αρκετές από αυτές τις επιλογές για πρακτικούς λόγους. Η επιλογή της σωστής θέσης για την εγκατάσταση ενός βοηθητικού ανεμιστήρα πρέπει να λαμβάνει υπόψη όχι μόνο τις τεχνικές απαιτήσεις αλλά και την οικονομική βιωσιμότητα της τοποθέτησης.

Σε περιοχές του δικτύου όπου η παροχή αέρα είναι ήδη καλά ελεγχόμενη, θα πρέπει να αποφεύγεται η τοποθέτηση βοηθητικών ανεμιστήρων, καθώς ενδέχεται να δημιουργηθούν δυσλειτουργίες στην υπάρχουσα ροή. Επίσης, το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας του ανεμιστήρα σε ένα συγκεκριμένο σημείο αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα που πρέπει να αξιολογηθεί, καθώς η διατήρηση της αποδοτικότητας του συστήματος σε σχέση με το κόστος είναι κρίσιμη για τη βιωσιμότητα της λειτουργίας του μεταλλείου.

Κατά την εγκατάσταση ενός βοηθητικού ανεμιστήρα, μπορεί να προκύψουν ανεπιθύμητες συνέπειες, όπως η μείωση της παροχής ή ακόμη και η επανακυκλοφορία αέρα σε άλλα τμήματα του δικτύου. Αυτές οι επιπτώσεις μπορεί να οδηγήσουν σε υποβάθμιση της συνολικής απόδοσης του συστήματος και σε ορισμένες περιπτώσεις, να θέσουν σε κίνδυνο την ασφάλεια των εργαζομένων.

Για το λόγο αυτό, κατά τη σχεδίαση και προσομοίωση ενός συστήματος αερισμού, είναι απαραίτητο να μην εστιάζεται η ανάλυση μόνο στο τμήμα επιρροής του βοηθητικού ανεμιστήρα. Θα πρέπει να ελέγχεται ολόκληρο το κύκλωμα, έτσι ώστε να προβλεφθούν πιθανές μεταβολές της ροής και να αποφευχθεί επανακυκλοφορία ή ανεπαρκής παροχή αέρα σε κρίσιμες περιοχές.

5.7 Εξοπλισμός

Οι ανεμιστήρες, που χρησιμοποιούνται για τον βοηθητικό αερισμό έχουν έναν πολύ συγκεκριμένο ρόλο: να μεταφέρουν μικρή ποσότητα αέρα από το σύστημα του πρωτεύοντος αερισμού και να την διοχετεύουν σε περιοχές του μεταλλείου όπου ο αερισμός δεν είναι επαρκής. Παρά το ότι είναι παρόμοιοι με τους ανεμιστήρες του

κύριου αερισμού, έχουν μικρότερη ισχύ και δυνατότητες. Συνήθως χρησιμοποιούνται δύο βασικοί τύποι ανεμιστήρων, οι ελικοφόροι και οι κεντρόφυγες, όπως αναλύθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια.

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του βοηθητικού αερισμού είναι ότι δεν είναι μόνιμος. Καθώς οι εργασίες στο μεταλλείο προχωρούν και αλλάζουν οι ανάγκες, τόσο οι ανεμιστήρες όσο και οι αγωγοί που χρησιμοποιούνται για τον βοηθητικό αερισμό μεταφέρονται από θέση σε θέση. Αυτό σημαίνει ότι οι ανεμιστήρες πρέπει να είναι ανθεκτικοί, με αεροδυναμικό σχεδιασμό, και να καταλαμβάνουν ελάχιστο χώρο για να διευκολύνουν την εγκατάσταση και τη μεταφορά τους.

Οι ελικοφόροι ανεμιστήρες αποδεικνύονται εξαιρετικά κατάλληλοι για αυτή τη χρήση, καθώς συνδυάζουν υψηλή απόδοση με μικρό βάρος και εύκολη κινητικότητα. Χάρη στην ευελιξία τους, μπορούν να καλύψουν αποτελεσματικά τις μεταβαλλόμενες ανάγκες αερισμού σε διάφορες περιοχές του μεταλλείου, προσφέροντας σταθερή και αξιόπιστη λειτουργία σε περιοχές όπου ο κύριος αερισμός δεν επαρκεί.

Για να διοχετευθεί καθαρός αέρας σε σημεία του μεταλλείου που δεν επαρκεί το σύστημα πρωτεύοντος αερισμού χρησιμοποιούνται αγωγοί, οι οποίοι είναι σχεδιασμένοι για να μεταφέρουν τον αέρα με τη μικρότερη δυνατή αντίσταση στο σημείο που χρειάζεται.

Στο [Σχήμα 5-16](#), παρουσιάζεται μια διάταξη διακλάδωσης αγωγών, που επιτρέπει την αποτελεσματική διανομή του αέρα σε διαφορετικές περιοχές. Η διακλάδωση αυτή εξασφαλίζει ότι ο αέρας μπορεί να φτάσει σε πολλά σημεία του δικτύου χωρίς ή με ελάχιστες απώλειες, κάτι το οποίο είναι ιδιαίτερα κρίσιμο σε μεγάλες υπόγειες εκμεταλλεύσεις όπου οι αποστάσεις και κατ' επέκταση οι αντιστάσεις είναι σημαντικές.



Σχήμα 5-16: Αγωγός βοηθητικού αερισμού, (<https://plasticminer.com>).

Για να είναι αποτελεσματικοί οι αγωγοί, πρέπει να πληρούν κριτήρια όπως:

1. Ελάχιστη αντίσταση στη ροή: πρέπει να επιτρέπουν τη διόδο του αέρα με όσο το δυνατόν μικρότερη αντίσταση, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες πίεσης και η ενέργεια που απαιτείται για την κυκλοφορία.
2. Προσαρμοστικότητα: πρέπει να είναι εύκολοι στη μεταφορά και την προσαρμογή ανάλογα με τις διαρκώς μεταβαλλόμενες ανάγκες του μεταλλείου.
3. Αντοχή: πρέπει να είναι ανθεκτικοί στις μηχανικές φθορές και τη διάβρωση, καθώς οι σκληρές υπόγειες συνθήκες μπορεί να προκαλέσουν φθορές.
4. Εύκολη μεταφορά και αποθήκευση: καθώς οι ανάγκες αερισμού μεταβάλλονται συχνά, οι αγωγοί πρέπει να είναι σχεδιασμένοι ώστε να μπορούν να μεταφέρονται και να αποθηκεύονται εύκολα.
5. Κατασκευή από άφλεκτες ύλες: πρέπει να είναι κατασκευασμένοι από υλικά που δεν καίγονται, για να αποφεύγεται ο κίνδυνος πυρκαγιάς.
6. Ηλεκτρική αγωγιμότητα: Για να αποφεύγεται η συγκέντρωση ηλεκτροστατικών φορτίων που μπορεί να προκληθούν λόγω της τριβής σωματιδίων στην επιφάνεια των αγωγών, είναι σημαντικό οι τελευταίοι να έχουν κάποια ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Οι αγωγοί χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

1. Ακαμπτοι: κατασκευάζονται συνήθως από λαμαρίνα, ξύλο (κόντρα πλακέ) ή πλαστική ύλη. Έχουν το πλεονέκτημα της υψηλής αντοχής και παρέχουν μικρή αντίσταση στη ροή του αέρα, κάτι που τους καθιστά κατάλληλους για κύρια

συστήματα αερισμού. Ωστόσο, είναι βαρύτεροι και πιο δύσκολοι στη μεταφορά και την εγκατάσταση.

2. Εύκαμπτοι: κατασκευάζονται από αδιάβροχα υφάσματα ή πλαστικές ύλες, όπως νεοπρένιο ή πολυαιθυλένιο. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι το πολύ μικρό βάρος (10-20 φορές ελαφρύτεροι από τους άκαμπτους), γεγονός που διευκολύνει τη μεταφορά και την εγκατάστασή τους. Παρόλα αυτά, έχουν μειονεκτήματα, όπως η μεγαλύτερη αντίσταση στη ροή του αέρα, σημαντικές διαφυγές και μειωμένη αντοχή σε κακώσεις και φλόγα. Επίσης, δεν είναι κατάλληλοι για μυζητικό αερισμό, εκτός εάν διαθέτουν εσωτερικό σπειροειδές ελατήριο για τη διατήρηση της διατομής τους.

Σε έναν αγωγό κυκλικής διατομής, η αντίσταση ανά μονάδα μήκους υπολογίζεται με βάση τη διάμετρο του αγωγού (D) και άλλους παράγοντες που επηρεάζουν τη ροή του αέρα. Η [εξίσωση 5.15](#) που αναφέρεται στην συνέχεια, χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της αντίστασης σε μονάδες kMu, όπου το kMu είναι μια μονάδα μέτρησης της αντίστασης του αγωγού σε σχέση με τις απώλειες πίεσης και την παροχή αέρα.

$$r = 0.0156 \times \lambda' \times \frac{\pi}{S^3} \quad [5.15]$$

όπου:

λ' : ο συντελεστής τριβής χωρίς διαστάσεις

Η αντίσταση ενός αγωγού εξαρτάται από:

1. το μήκος του αγωγού (L),
2. τη διάμετρο του αγωγού (D),
3. τη τραχύτητα των τοιχωμάτων,
4. την ταχύτητα της ροής του αέρα.

Αυτή η σχέση μπορεί να αναπαρασταθεί με τύπους της ρευστομηχανικής, όπως η εξίσωση του Darcy-Weisbach, η οποία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των

απωλειών πίεσης σε σωληνώσεις λόγω της τριβής. Συνεπώς, οι απώλειες πίεσης h σε αγωγό μήκους l και με παροχή Q είναι:

$$h = r \times l \times Q^2 \quad [5.16]$$

Σε ιδανικές συνθήκες, οι αγωγοί θα ήταν απόλυτα στεγανοί, δηλαδή χωρίς καμία διαρροή. Ωστόσο, στην πράξη, διαρροές είναι αναπόφευκτες και επηρεάζουν την απόδοση του αερισμού, αυξάνοντας τις απώλειες πίεσης. Γι' αυτό είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη οι πραγματικές συνθήκες του μεταλλείου κατά τη μελέτη των αντιστάσεων και των απωλειών πίεσης στους αγωγούς.

Πίνακας 5-1: Τιμές του συντελεστή τριβής λ'

Είδος αγωγού
Τιμές του συντελεστή τριβής λ'

Αγωγός από άκαμπτη πλαστική ύλη	0.018
Καινούριος μεταλλικός αγωγός	0.0205
Αγωγός από ξύλα	0.0220
Μεταλλικός αγωγός με σχετική παραμόρφωση και οξείδωση	0.0260

Η [εξίσωση 5.16](#) δεν έχει εφαρμογή σε εύκαμπτους αγωγούς για πολλούς λόγους, κυρίως διότι η διάμετρος αυτών αυξάνεται με την πίεση. Στην πράξη, για τους εύκαμπτους αγωγούς χρησιμοποιείται η [εξίσωση 5.17](#):

$$h = 0.1 \times \frac{\lambda'}{D^5} \times l \times Q^a \quad [5.17]$$

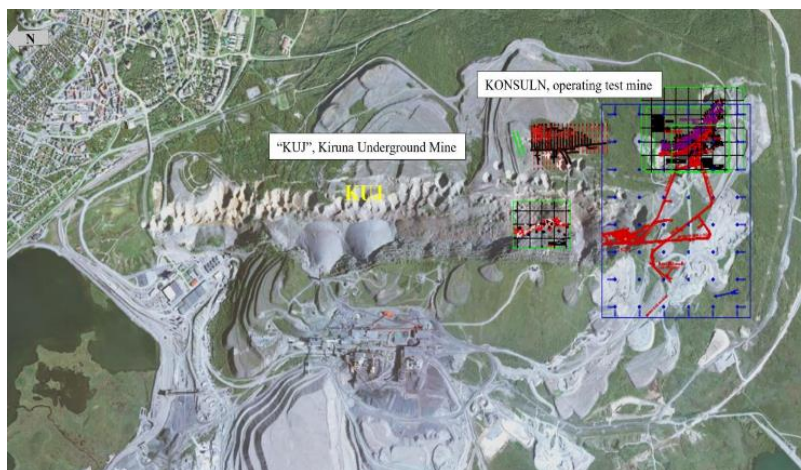
όπου:

Ο εκθέτης a λαμβάνει την τιμή 1.7, ενώ ως διάμετρος θεωρείται η ονομαστική διάμετρος του αγωγού και ο συντελεστής λ' κυμαίνεται από 0.021-0.026 ανάλογα με την κατάσταση στήριξης του αγωγού ([Πίνακας 5-1](#)).

Ο υπολογισμός των αντιστάσεων είναι σημαντικός για να καθοριστεί το σωστό μέγεθος των ανεμιστήρων και των αγωγών, προκειμένου να εξασφαλιστεί η βέλτιστη παροχή αέρα και η ασφάλεια στον χώρο του μεταλλείου.

Κεφάλαιο 6: Λογισμικό Προσομοίωσης Αερισμού

Στα σύγχρονα υπόγεια συστήματα αερισμού, η βελτιστοποίηση της ροής του αέρα είναι κρίσιμη για τη διατήρηση της ασφάλειας και της αποδοτικότητας. Το **VentSim DESIGN** είναι ένα εξελιγμένο εργαλείο σχεδιασμένο για να διευκολύνει τη δυναμική προσομοίωση δικτύων αερισμού. Επιτρέπει στους μηχανικούς υπογείων να προσομοιάζουν πολύπλοκα σενάρια με ακρίβεια, αντιμετωπίζοντας τις απαιτήσεις ροής αέρα των διαφόρων εξορυκτικών λειτουργιών, όπως φαίνεται στην εφαρμογή του στο δίκτυο αερισμού του ορυχείου Lonea, [Σχήμα 6-1](#), (Gyamfi, 2020). Πρόκειται για ένα λογισμικό που έχει την δυνατότητα να μοντελοποιήσει το σύστημα αερισμού ενός ορυχείου, είτε πριν ξεκινήσει η λειτουργία του, είτε αν πρόκειται για ένα ήδη υπάρχον ορυχείο.



Σχήμα 6-1 Θέση λειτουργίας δοκιμαστικού ορυχείου Konsuln, (Gyamfi, 2020)

Διαθέτει έναν εξαιρετικά περίπλοκο δυναμικό αλγόριθμο ελέγχου που βελτιστοποιεί τον τρόπο λειτουργίας των ανεμιστήρων καθώς το ορυχείο εξελίσσεται με την πάροδο του χρόνου ενσωματώνοντας προηγμένες θερμοδυναμικές αρχές. Έτσι, μπορεί να προσομοιάσει όλες αυτές τις αλλαγές και να τις παρακολουθεί δυναμικά καθώς το περιβάλλον του ορυχείου αλλάζει. Ένα από τα πλεονεκτήματα του λογισμικού είναι ότι μετατρέπει το σχεδιαστικό μοντέλο σε ένα σύστημα διαχείρισης όπου δίνει στον χρήστη την δυνατότητα να επεξεργαστεί, να διαχειριστεί και να βελτιστοποιεί το σύστημα αερισμού. Ελέγχει πόσα άτομα βρίσκονται υπόγεια, πόσα οχήματα υπάρχουν, πόσοι ανεμιστήρες, πόσες διέξοδοι. Για παράδειγμα, αν αλλάξει ο αριθμός των ατόμων στο ορυχείο, μπορεί να αυξήσει την ταχύτητα των ανεμιστήρων ή να κατευθύνει τον αέρα σε συγκεκριμένες περιοχές του ορυχείου, ανάλογα με τις ανάγκες. Το σύστημα

λαμβάνει δεδομένα από αισθητήρες που βρίσκονται υπόγεια, και βελτιστοποιεί τη ροή του αέρα στο ορυχείο, ώστε είτε να εξοικονομούνται χρήματα, είτε να αυξάνεται η παραγωγικότητα, είτε να βελτιώνεται η ασφάλεια των εργαζομένων, η μέθοδος Ventilation on Demand [VOD] όπου αναλύεται στην συνέχεια (Παράγραφος 6.5).

Μέσω της ανάλυσης κρίσιμων παραμέτρων, όπως οι εκπομπές ντίζελ και η θερμότητα που παράγεται στην ατμόσφαιρα των ορυχείων, οι χρήστες έχουν τη δυνατότητα να προσαρμόζουν το σχεδιασμό των συστημάτων αερισμού για τη δημιουργία υγιεινών και ασφαλών συνθηκών εργασίας, (Howden, 2023). Τα εργαλεία παρακολούθησης διάχυσης ρύπων, όπως οι ανεμιστήρες υποβοήθησης και οι αγωγοί, προσφέρουν δυνατότητα αποτελεσματικής διαχείρισης του αέρα και βελτίωσης της ροής, (Burgess, et al., 2004). Καθώς η ανάγκη για αποδοτική διαχείριση του κλίματος σε περιβάλλοντα εξόρυξης και κατασκευών συνεχώς αυξάνεται, η αξία ενός εξελιγμένου εργαλείου προσομοίωσης, όπως το VentSim, γίνεται όλο και πιο καθοριστική στον σύγχρονο σχεδιασμό αερισμού, εξασφαλίζοντας και τη βιωσιμότητα και την ασφάλεια των εξορύξεων.

6.1 Δυνατότητες και Χαρακτηριστικά του VentSim

Η διαδικασία σχεδιασμού και ανάλυσης δικτύων αερισμού καθίσταται ολοένα και πιο κρίσιμη με την πρόοδο και την ενσωμάτωση προηγμένων προγραμμάτων προσομοίωσης αερισμού, όπως το VentSim. Τα δεδομένα που παράγονται από τις προσομοιώσεις επιτρέπουν την εις βάθος κατανόηση της δυναμικής της ροής και της κατανομής του αέρα στους υπόγειους εξορυκτικούς χώρους, με απώτερο στόχο την εξασφάλιση βέλτιστων μικροκλιματικών συνθηκών και την προστασία των εργαζομένων. Η ικανότητα του VentSim να μοντελοποιεί και να αναλύει σύνθετες καταστάσεις είναι καθοριστική, όπως δείχνει η περίπτωση του ορυχείου Lonea, όπου η πολυπλοκότητα του δικτύου ενισχύεται από τη μεγάλη ποικιλία εγκαταστάσεων αερισμού, (Boanta, 2020). Αξιοποιώντας το VentSim, πραγματοποιείται διαρκής αξιολόγηση της συμπεριφοράς του συστήματος αερισμού σε βάθος χρόνου, παρέχοντας έτσι πολύτιμες προγνώσεις για την ικανοποίηση των απαιτούμενων ροών αέρα, (Ponce Estrada, et al., 2023). Ενόψει των διαπιστωμένων θετικών επιδράσεών τους, η χρησιμότητα αυτών των εργαλείων καθιστά επιτακτική την ανάγκη για συνεχή εκπαίδευση και ενημέρωση των επαγγελματιών του χώρου.

Η επιτυχία ενός συστήματος αερισμού εξαρτάται άμεσα από τη βαθιά κατανόηση των θεμελιωδών αρχών αερισμού. Η αποδοτικότητα των συστημάτων αερισμού είναι κάτι που εξαρτάται από την αλληλεπίδραση μεταξύ ανεμιστήρων, αγωγών και θερμικών ανταλλαγών. Οι ανεμιστήρες, ως βασικά εξαρτήματα, παρέχουν την αναγκαία ροή αέρα και την απομάκρυνση των ρύπων και των θερμικών φορτίων από τους χώρους εργασίας. Παράλληλα, οι αγωγοί κατευθύνουν και διανέμουν τον αέρα, συμβάλλοντας στη διατήρηση των θερμοκρασιών εντός αποδεκτών ορίων. Η σχεδίαση των δικτύων αερισμού, τα οποία αποτελούνται από ένα σύμπλεγμα κόμβων και κλάδων, πραγματοποιείται με ακρίβεια για να εξασφαλιστεί η αδιάλειπτη ροή καθαρού αέρα προς τις περιοχές εργασίας και η αποδοτική απομάκρυνση των μολυσμένων αερίων γι' αυτό η πολυπλοκότητα των δικτύων αερισμού απαιτεί ακριβή μοντέλα, τα οποία πρέπει να λαμβάνουν υπόψη πηγές ρύπανσης, όπως οι εκπομπές από κινητήρες ντίζελ, προκειμένου να εξασφαλιστεί αποτελεσματική κυκλοφορία και διανομή του αέρα, (Boanta, 2020). Η εφαρμογή θεμελιωδών αρχών στον τομέα του αερισμού, συμπεριλαμβανομένων της ισορροπίας των ροών αέρα, της ελαχιστοποίησης των αναταράξεων και της λογικής κατανομής πίεσης, συμβάλλει στην επιτυχία αυτού του συστήματος. Η σωστή εφαρμογή αυτών των αρχών όχι μόνον προάγει την ευημερία των εργαζομένων αλλά και συμβάλλει στην αποδοτικότητα της παραγωγής στον υπόγειο χώρο του ορυχείου, (Grozdanovic, et al., 2024). Με την χρήση προηγμένων μεθόδων προσομοίωσης, όπως η δυναμική και θερμοδυναμική προσομοίωση της ροής αέρα, γίνεται δυνατή η ακριβής ανάλυση των αεροδυναμικών παραμέτρων και η βελτιστοποίηση της διάταξης των αεραγωγών. Η σωστή ρύθμιση της ροής αέρα επιτρέπει την απομάκρυνση επιβλαβών αερίων, όπως οι εκπομπές από κινητήρες ντίζελ, ενώ διασφαλίζει την επαρκή οξυγόνωση των χώρων εργασίας. Η αποτελεσματική διαχείριση της ροής αέρα είναι ζωτικής σημασίας τόσο για την ασφάλεια όσο και για την αποδοτικότητα στις εξορυκτικές διαδικασίες και άλλες βιομηχανικές εφαρμογές.

Η ενσωμάτωση σύγχρονων δεδομένων, όπως εκείνα που παρέχονται από πλατφόρμες όπως το Thingspeak, ενισχύει περαιτέρω τη λειτουργικότητά της, προσφέροντας ακριβή παρακολούθηση και ανάλυση σε πραγματικό χρόνο. Αυτό την καθιστά εξαιρετικά προσαρμοστική στις αυξημένες βιομηχανικές απαιτήσεις της εποχής.

Η προχωρημένη τεχνική μοντελοποίησης εντός του VentSim δίνει την δυνατότητα , όπως συνδυασμένης χρήσης του λογισμικού με μοντέλα όπως το BiGRU και το CNN-

BiGRU ώστε να παρέχει μετρήσιμες βελτιώσεις στην ακριβή ανίχνευση ανωμαλιών, προσφέροντας άριστα αποτελέσματα σε ό,τι αφορά την ασφάλεια και την αποδοτικότητα των συστημάτων αερισμού.

Το μοντέλο CNN-BiGRU συνδυάζει τις δυνατότητες των Συνελικτικών Νευρωνικών Δικτύων (ΣΝΔ/CNN) και των Διπλών Κατευθύνσεων Γενικών Επαναλαμβανόμενων Μοντέλων (BiGRU), επιτυγχάνοντας υψηλή ακρίβεια σε εφαρμογές που απαιτούν ανάλυση και πρόβλεψη χρονοσειρών, όπως αυτή των δεδομένων αερισμού σε μεταλλεία. Κάθε συνιστώσα του μοντέλου προσφέρει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα, τα οποία βελτιστοποιούν τη λειτουργία του συστήματος.

Το ΣΝΔ/CNN (Συνελικτικό Νευρωνικό Δίκτυο) χρησιμοποιεί φίλτρα που "σκανάρουν" τα δεδομένα, ανιχνεύοντας σημαντικά μοτίβα ή τοπικές συσχετίσεις. Στα μεταλλεία, οι αισθητήρες έχουν κρίσιμο ρόλο στην παρακολούθηση ζωτικών παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η ποιότητα του αέρα και οι συγκεντρώσεις επικίνδυνων αερίων (π.χ. μεθάνιο, CO₂). Το ΣΝΔ/CNN, λόγω της ικανότητάς του να αναλύει μεγάλα σύνολα δεδομένων και να ανιχνεύει μοτίβα, μπορεί να επεξεργαστεί τα δεδομένα που προέρχονται από αυτούς τους αισθητήρες με υψηλή ακρίβεια. Η ανάλυση περιλαμβάνει την αναγνώριση θερμικών εικόνων, γραφημάτων ροής αέρα, ή δεδομένων αερίων, επιτρέποντας την ανίχνευση ανωμαλιών, όπως ανεπαρκής αερισμός ή επικίνδυνες συγκεντρώσεις αερίων. Αυτό δίνει τη δυνατότητα για ταχύτερη αντίδραση σε απρόβλεπτες συνθήκες και συμβάλλει στην ασφάλεια των εργαζομένων σε υπόγειους χώρους, καθώς και στη διατήρηση βέλτιστων περιβαλλοντικών συνθηκών.

Το BiGRU (Διπλής Κατεύθυνσης GRU) βασίζεται σε αρχιτεκτονική επαναλαμβανόμενων νευρωνικών δικτύων, αλλά με λιγότερες παραμέτρους), καθιστώντας το πιο αποδοτικό. Η δυνατότητα διπλής κατεύθυνσης επιτρέπει στο μοντέλο να λαμβάνει υπόψη τόσο τα προηγούμενα όσο και τα μελλοντικά δεδομένα κατά την ανάλυση, παρέχοντας πληρέστερη κατανόηση της χρονολογικής αλληλουχίας των γεγονότων (από που αυτό?). Έχει τη δυνατότητα να επεξεργάζεται χρονολογικά δεδομένα που συλλέγονται από αισθητήρες αερισμού, επιτρέποντας την ανάλυση της δυναμικής εξέλιξης των συνθηκών αερισμού με την πάροδο του χρόνου. Μέσω αυτής της προσέγγισης, το μοντέλο είναι ικανό να προβλέπει μελλοντικές καταστάσεις αερισμού, λαμβάνοντας υπόψη ποικίλους παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν το

σύστημα, όπως οι μεταβολές στη ροή του αέρα, οι αλλαγές στην ποιότητα του αέρα ή οι αυξήσεις στις συγκεντρώσεις αερίων.

Συνολικά, το CNN-BiGRU μοντέλο ενισχύει την αποτελεσματικότητα και την ασφάλεια των συστημάτων αερισμού στα μεταλλεία μέσω της ακριβούς ανάλυσης και πρόβλεψης των συνθηκών αέρα, της διαχείρισης σφαλμάτων και την ενεργειακή αποδοτικότητα, (Li, et al., 2023).

6.1.1 Δυνατότητες VentSim

Σύμφωνα με τα εν λόγω δεδομένα που προκύπτουν από την διεξαγωγή ερευνών, το VentSim έχει αποδειχθεί ένα κρίσιμο εργαλείο προσομοίωσης που αφορά πολύπλοκα δίκτυα αερισμού σε υπόγειες μεταλλευτικές εργασίες, όπως περιγράφεται και στη σχετική μελέτη για τα ορυχεία Λουπενί και Ουρικάνης, (Suvar, et al., 2012). Η δυνατότητα τρισδιάστατης απεικόνισης που προσφέρει το συγκεκριμένο λογισμικό παρέχει τη δυνατότητα στους χρήστες να σχεδιάζουν και να προγραμματίζουν τα δίκτυα αερισμού με υψηλή ακρίβεια, γεγονός που περιορίζει την ανάγκη για χειροκίνητους υπολογισμούς και ελαχιστοποιεί τα σφάλματα. Επιπλέον, οι εφαρμογές του VentSim δεν περιορίζονται μόνο στον αερισμό, αλλά επεκτείνονται και στη διαχείριση των κινδύνων από φωτιές στα ορυχεία, όπου τα τεχνικά δεδομένα είναι δυνατόν να αναλυθούν μέσω προσομοιώσεων πυρκαγιών, όπως αναφέρεται στο Ventgraph, με σκοπό το σχεδιασμό στρατηγικών διαχείρισης κινδύνων κατά την εκδήλωση εκτάκτων αναγκών, (Wu, et al., 2004) άλλες δυνατότητες είναι οι εξής:

6.1.2 Προσομοίωση Ροής Αέρα

Το λογισμικό έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει τη ροή του αέρα μέσα από τις στοές και τους αγωγούς αερισμού, λαμβάνοντας υπόψη τις αντιστάσεις που προκαλούνται από τις διάφορες κατασκευές και εμπόδια. Αυτή η δυνατότητα επιτρέπει την ακριβέστερη ανάλυση των συνθηκών αερισμού και προσδιορίζει πού πρέπει να τοποθετηθούν ανεμιστήρες και αγωγοί για τη βελτιστοποίηση της κυκλοφορίας του αέρα και την καλύτερη προσαρμογή των συστημάτων εξασφαλίζοντας τη βέλτιστη απόδοση και τη διατήρηση των επιθυμητών περιβαλλοντικών συνθηκών στους υπόγειους χώρους.

6.1.3 Θερμική Ανάλυση

Παρέχει δυνατότητες υπολογισμού θερμοκρασιών και μεταφοράς θερμότητας μέσω των αεραγωγών, επιτρέποντας την ακριβή εκτίμηση των θερμικών συνθηκών στους

υπόγειους χώρους. Αυτή η λειτουργία βοηθά τους μηχανικούς να αναλύουν τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις και να αξιολογούν την επίδραση της θερμότητας στο περιβάλλον εργασίας, διασφαλίζοντας την εφαρμογή κατάλληλων μέτρων για τη διατήρηση ασφαλών και άνετων συνθηκών για τους εργαζομένους.

6.1.4 Ανάλυση Αερίων και Ρύπων

Το VentSim μπορεί να παρακολουθεί και να προσομοιώσει την συγκέντρωση και την εξάπλωση ρύπων και αερίων, όπως το CO₂, το μεθάνιο και άλλα τοξικά αέρια, καθώς και τη διασπορά της σκόνης, διασφαλίζοντας την ασφάλεια των εργαζομένων. Επίσης παρέχει τις δυνατότητες ανάλυσης της διασποράς σωματιδίων σκόνης στο σύνολο του δικτύου αερισμού του ορυχείου. Μέσω της προσομοίωσης, οι μηχανικοί μπορούν να αξιολογήσουν και να βελτιστοποιήσουν τη θέση των φίλτρων αέρα και των συστημάτων απορρόφησης, με στόχο τη μείωση των επιπέδων σκόνης και τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα στους υπόγειους χώρους.

6.1.5 Διαχείριση Κινδύνων

Περιλαμβάνει μοντέλα για την προσομοίωση πυρκαγιών και άλλων καταστάσεων εκτάκτου ανάγκης, παρέχοντας εργαλεία για την προετοιμασία σχεδίων εκκένωσης.

6.1.6 Ανάλυση Συστήματος Αερισμού και Κατανάλωσης Ενέργειας

Προσφέρει αναλυτικά εργαλεία για την παρακολούθηση της κατανάλωσης ενέργειας από τους ανεμιστήρες και τα συστήματα αερισμού. Οι χρήστες μπορούν να εντοπίσουν ενεργειακά σπατάλες και να βελτιστοποιήσουν τη λειτουργία του συστήματος για τη μείωση του κόστους. Δίνει τη δυνατότητα να εκτιμηθεί το κόστος λειτουργίας του συστήματος αερισμού και οι πιθανές οικονομικές βελτιστοποιήσεις.

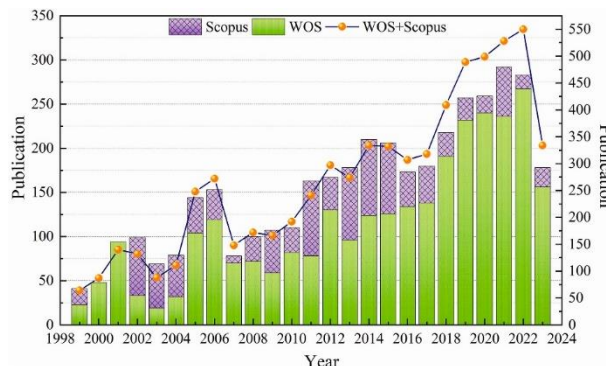
6.1.7 Προσομοίωση και Ανάλυση Στρατηγικών Αερισμού

Μπορούν να δημιουργηθούν και να δοκιμαστούν διαφορετικά σενάρια αερισμού, εξετάζοντας διάφορες στρατηγικές, όπως τη χρήση ανεμιστήρων μεταβλητής ταχύτητας (Variable Air Volume - VAV) ή ελεγχόμενου αερισμού (Ventilation on Demand - VOD). Αυτές οι στρατηγικές βοηθούν στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας ενώ διατηρούνται ασφαλείς συνθήκες αερισμού.

6.2 Σημασία της Ακριβούς Προσομοίωσης για την Ασφάλεια και την Αποτελεσματικότητα Σήμερα

Η ακριβής προσομοίωση είναι κρίσιμη για την εξασφάλιση τόσο της ασφάλειας όσο και της λειτουργικής αποδοτικότητας των συστημάτων αερισμού στον τομέα της εξόρυξης, ιδιαιτέρως τα τελευταία χρόνια. Χαρακτηριστικό παράδειγμα η έρευνα των στατιστικών στοιχείων που προέρχονται από τη βιβλιογραφία κατά την περίοδο 2010 έως 2023 αποκάλυψε ότι η προσομοίωση των αερισμών στις υπόγειες εκμεταλλεύσεις έχει αυξηθεί ραγδαία καθώς δεν είναι απλώς θεματική τεχνολογική καινοτομία, αλλά ενσωματώνει κι στρατηγικές που οδηγούν σε πιο αποτελεσματική διαχείριση των πόρων και βελτιστοποίηση της παραγωγικότητας, (Tang, et al., 2024; Xue, et al., 2024)

Η έρευνα αναλύει δεδομένα σχετικά με την έρευνα στον αερισμό των ορυχείων από το 1999 έως το 2024 (Σχήμα 6-2), αξιοποιώντας τις βάσεις δεδομένων Web of Science και Scopus. Διαπιστώθηκε ότι η επιστημονική δραστηριότητα στον τομέα αυτό παρέμεινε σε χαμηλά επίπεδα μέχρι το 2010, ενώ έκτοτε παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση. Συγκεκριμένα, από τις 5.226 εγγραφές που ανακτήθηκαν για την περίοδο 2010-2023, οι 3.915 ήταν μοναδικές και χρησιμοποιήθηκαν για περαιτέρω ανάλυση.



Σχήμα 6-2: Επιστημονική δραστηριότητα στον τομέα του ventilation ανά έτος

Το Scopus, ως η μεγαλύτερη βάση δεδομένων περιλήψεων και αναφορών με κριτική, και το Web of Science (WOS), που αποτελεί αναγνωρισμένο εργαλείο ανάκτησης βιβλιογραφικών αναφορών διεθνώς, διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην πρόσβαση και διάδοση της σχετικής επιστημονικής γνώσης.

Οι εν λόγω προσομοιώσεις αναδεικνύουν την ανάγκη αναβάθμισης των συστημάτων αερισμού, προκειμένου να ανταποκριθούν στις αυξανόμενες απαιτήσεις και προκλήσεις της βιομηχανίας. Η εφαρμογή προχωρημένων τεχνικών, όπως η ανάκτηση αεροδυναμικών παραμέτρων μέσω τεχνητής νοημοσύνης, επιτρέπει την πρόβλεψη των ροών αέρα σε περιοχές όπου τα δεδομένα είναι ελλιπή. Αυτό αποτελεί προαπαιτούμενο

για τη διασφάλιση ενός ασφαλούς εργασιακού περιβάλλοντος και την ορθολογική κατανομή πόρων.

6.3 Προσομοιώσεις Έκτακτης Ανάγκης

Οι σύγχρονες τεχνικές προσομοίωσης αερισμού, όπως αυτές που προσφέρει το VentSim DESIGN, επιτρέπουν την απεικόνιση πολύπλοκων δικτύων αερισμού. Μέσω αυτών, οι μηχανικοί έχουν τη δυνατότητα να μελετήσουν τις ροές αέρα, την θερμική αγωγιμότητα και τη διάδοση ρύπων, ενσωματώνοντας κρίσιμα δεδομένα στις προσομοιώσεις τους.

Οι ακριβείς αυτές προσομοιώσεις δεν ανταποκρίνονται μόνο στις νομικές απαιτήσεις, αλλά διερευνούν και σενάρια έκτακτης ανάγκης, όπως σε περιπτώσεις πυρκαγιάς, για να εξασφαλίσουν την ασφάλεια του ορυχείου (Machado, 2011). Η δυναμική προσομοίωση του VentSim επικεντρώνεται στην ολοκληρωμένη ανάλυση ροής αέρα και θερμότητας, συμβάλλοντας στην αποδοτικότητα του αερισμού μέσα από την εξέταση παραγόντων όπως η ατμοσφαιρική πίεση και οι εκπομπές ρύπων από πετρελαιοκίνητα μηχανήματα, (Krawczyk, 2012).

Το VentSim παρέχει τη δυνατότητα μοντελοποίησης και προσομοίωσης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης, όπως πυρκαγιές, λαμβάνοντας υπόψη τη διάδοση του καπνού και της θερμότητας στο υπόγειο δίκτυο. Μέσω αυτών των προσομοιώσεων, είναι εφικτό να αξιολογηθούν και να δοκιμαστούν διαφορετικές στρατηγικές εκκένωσης σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, παρέχοντας μια οπτική αναπαράσταση της ροής του αέρα και των περιβαλλοντικών συνθηκών που επικρατούν κατά τη διάρκεια της εκκένωσης. Αυτή η λειτουργία επιτρέπει την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των προτεινόμενων στρατηγικών εκκένωσης και βοηθά στη βελτιστοποίηση των διαδρομών διαφυγής, εξασφαλίζοντας την ασφάλεια των εργαζομένων και τη γρήγορη ανταπόκριση σε κρίσιμες καταστάσεις. Με αυτή την προσέγγιση, οι μηχανικοί μπορούν να σχεδιάσουν συστήματα που συνδυάζουν την ασφάλεια και την αποδοτικότητα, προωθώντας βιώσιμες λύσεις για τις προκλήσεις που αντιμετωπίζει η εξορυκτική βιομηχανία.

6.4 Ενεργειακή Αποδοτικότητα και Συμμόρφωση με

Περιβαλλοντικά Πρότυπα

Μέσω της προηγμένης προσομοίωσης αερισμού, το VentSim επιτρέπει την ανάλυση και βελτιστοποίηση των ροών αέρα, με στόχο τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και την εξασφάλιση της συμμόρφωσης με τους κανονισμούς ασφαλείας και τις περιβαλλοντικές απαιτήσεις. Η ενσωμάτωση του VentSim στις διαδικασίες σχεδιασμού προάγει πιο βιώσιμες πρακτικές, που στοχεύουν στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και στον περιορισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Ως εκ τούτου, δεν περιορίζεται μόνο σε τεχνικές βελτιστοποίησης, αλλά λειτουργεί και ως εργαλείο προώθησης της περιβαλλοντικής ευαισθητοποίησης στον βιομηχανικό τομέα. Ακολουθούν οι βασικοί τρόποι με τους οποίους συμβάλλει στην περιβαλλοντική συμμόρφωση:

Μείωση Εκπομπών Ρύπων: επιτρέπει την παρακολούθηση και προσομοίωση της διάχυσης τοξικών αερίων όπως το μεθάνιο, το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και το διοξείδιο του αζώτου (NO₂), που προέρχονται από τη χρήση οχημάτων ντίζελ ή άλλες δραστηριότητες εξόρυξης. Αυτό βοηθά τους διαχειριστές να ελέγχουν τις εκπομπές και να εξασφαλίζουν ότι οι συγκεντρώσεις ρύπων παραμένουν εντός των νόμιμων ορίων.

Μπορεί επίσης να προσομοιώσει την επίδραση της χρήσης ηλεκτρικών οχημάτων, τα οποία μειώνουν δραματικά τις εκπομπές ρύπων σε υπόγειο περιβάλλον, συμβάλλοντας στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα και τη συμμόρφωση με αυστηρότερους κανονισμούς εκπομπών. Σε επόμενο κεφάλαιο ακολουθεί ανάλυση για την διαφορά μεταξύ των Diesel οχημάτων με των ηλεκτρικών.

Ενεργειακή Αποδοτικότητα: η ενεργειακή κατανάλωση που απαιτείται για τη λειτουργία των συστημάτων αερισμού μπορεί να βελτιστοποιηθεί, μειώνοντας τις συνολικές εκπομπές άνθρακα του ορυχείου. Οι χρήστες μπορούν να αναλύσουν την κατανάλωση ενέργειας των ανεμιστήρων και άλλων συστημάτων και να κάνουν αλλαγές ώστε να μειωθεί η χρήση ενέργειας, συμβάλλοντας στη συμμόρφωση με τα πρότυπα βιωσιμότητας.

Διαχείριση Θερμικών Επιπτώσεων: μπορεί να προσομοιώσει την παραγωγή θερμότητας σε υπόγειες εγκαταστάσεις και να βοηθήσει στην ανάπτυξη στρατηγικών ψύξης που μειώνουν την ενεργειακή κατανάλωση. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε

βαθιά ορυχεία, όπου οι θερμοκρασίες μπορεί να αυξηθούν υπερβολικά, επιβαρύνοντας το περιβάλλον και αυξάνοντας τις ενεργειακές ανάγκες. Επιπλέον, η ενσωμάτωση του μοντέλου θερμικής ανταλλαγής και η παρακολούθηση εκπομπών από κινητήρες ντίζελ δίνει τη δυνατότητα διαχείρισης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Βελτιστοποίηση Αερισμού για Καταστολή Σκόνης: Η διαχείριση της σκόνης είναι σημαντική για την περιβαλλοντική συμμόρφωση, καθώς η σκόνη από τις δραστηριότητες εξόρυξης μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα του αέρα. Το λογισμικό μπορεί να βοηθήσει στον σχεδιασμό και την τοποθέτηση φίλτρων και απορροφητήρων, μειώνοντας την ποσότητα αιωρούμενων σωματιδίων και εξασφαλίζοντας ότι το ορυχείο συμμορφώνεται με τα πρότυπα σκόνης.

Μέσω της ολοκληρωμένης ανάλυσης των συστημάτων αερισμού και των περιβαλλοντικών συνθηκών, το VentSim συμβάλλει σημαντικά στη συμμόρφωση με τους αυστηρούς περιβαλλοντικούς κανονισμούς, βοηθώντας τα ορυχεία να μειώσουν το αποτύπωμα άνθρακα και να βελτιώσουν την ασφάλεια των εργαζομένων.

Εφαρμογές

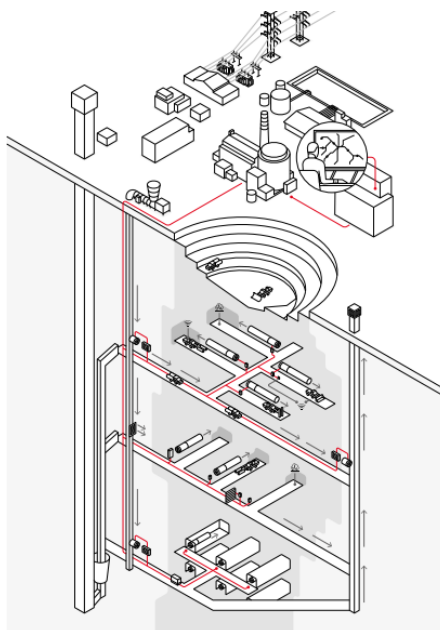
Στον ταχέως αναπτυσσόμενο τομέα του σχεδιασμού συστημάτων αερισμού, η ενσωμάτωση εξελιγμένων τεχνικών προσομοίωσης διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας και στη διασφάλιση της ασφάλειας των εγκαταστάσεων. Μέσω της χρήσης δυναμικών προσομοιώσεων, οι μηχανικοί έχουν τη δυνατότητα να αναπαριστούν πολύπλοκα μοντέλα ροής και διαδικασιών θερμικής μεταφοράς σε περιβάλλοντα εξόρυξης και βιομηχανίας, λαμβάνοντας υπόψη κρίσιμους παράγοντες όπως οι εκπομπές ρύπων από κινητήρες ντίζελ και η ανάγκη για βοηθητικό αερισμό. Οι προσομοιώσεις επιτρέπουν στους σχεδιαστές να δοκιμάζουν διάφορα επιχειρησιακά σενάρια και να εντοπίζουν τις αποδοτικότερες διαμορφώσεις ροής, παρέχοντας λεπτομερή ανάλυση σε παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και η αποτελεσματικότητα στη διάχυση των ρύπων. Για παράδειγμα, τα συστήματα αερισμού διάχυσης επωφελούνται σημαντικά από αυτές τις προσομοιώσεις, καθώς μελέτες δείχνουν τη βελτίωση της απόδοσης ανταλλαγής αέρα σε διάφορες διατάξεις και γωνίες των περσίδων. Επιπλέον, οι δυναμικές προσομοιώσεις επιτρέπουν την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και τη συνεχή προσαρμογή των στρατηγικών αερισμού σε μεταβαλλόμενες συνθήκες εργασίας, προσφέροντας μεγαλύτερη ευελιξία και αποτελεσματικότητα.

Τα βοηθητικά συστήματα αερισμού έχουν κεντρικό ρόλο στη βελτίωση της κατανομής του αέρα, ιδίως σε τμήματα του ορυχείου όπου ο κύριος(πρωτεύων) αερισμός είναι ανεπαρκής. Αυτά τα συστήματα, που βασίζονται σε ανεμιστήρες υποβοήθησης και αγωγούς αερισμού, στοχεύουν στη βελτιστοποίηση της ροής του αέρα και την αποτελεσματική απομάκρυνση επιβλαβών ατμών και αερίων. Η χρήση δυναμικών προσομοιώσεων, όπως αυτές που παρέχονται από λογισμικό, επιτρέπει τον λεπτομερή υπολογισμό της ροής αέρα και των θερμοδυναμικών παραμέτρων, διευκολύνοντας τον σχεδιασμό αποδοτικότερων και ασφαλέστερων στρατηγικών αερισμού. Αυτές οι προσομοιώσεις είναι απαραίτητες για την αξιολόγηση της απόδοσης των βοηθητικών συστημάτων υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας, συμβάλλοντας στη μείωση των κινδύνων συσσώρευσης αερίων και ενισχύοντας τη συνολική ασφάλεια του ορυχείου.

6.5 VOD

Η τεχνολογία Ventilation on Demand (VOD) αποτελεί μια σύγχρονη προσέγγιση στη διαχείριση του αερισμού υπόγειων ορυχείων, η οποία επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της παροχής αέρα με βάση τις εκάστοτε πραγματικές ανάγκες κάθε τμήματος του ορυχείου. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά συστήματα αερισμού, τα οποία λειτουργούν σε προκαθορισμένα σταθερά επίπεδα, το VOD προσφέρει αυξημένη ενεργειακή αποδοτικότητα μέσω της δυναμικής ρύθμισης του αέρα. Η προσαρμοστική αυτή στρατηγική διασφαλίζει τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, προσαρμόζοντας τη ροή αέρα στις τρέχουσες συνθήκες και στις δραστηριότητες που εκτελούνται σε κάθε περιοχή του ορυχείου.

Ο συνεχής αερισμός για την απομάκρυνση επικίνδυνων αερίων, σωματιδίων, CO₂ και καυσαερίων αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη διασφάλιση της ασφάλειας στα ορυχεία. Ωστόσο, τα συστήματα αερισμού καταναλώνουν σημαντική ποσότητα ενέργειας, η οποία μπορεί να αντιστοιχεί έως και στο 50% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης ενός ορυχείου. Το VOD αξιοποιεί αισθητήρες τοποθετημένους σε διάφορα σημεία του ορυχείου, οι οποίοι μεταδίδουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, όπως πληροφορίες για τη χρήση οχημάτων, την παρουσία προσωπικού, και παραμέτρους όπως τα επίπεδα αερίων, τη ροή και τη θερμοκρασία. Με βάση αυτές τις πληροφορίες, ο αερισμός προσαρμόζεται αυτόματα, εξασφαλίζοντας ότι ανταποκρίνεται στις πραγματικές ανάγκες κάθε περιοχής.



Σχήμα 6-3: Σχηματική αναπαράσταση εφαρμογής συστήματος VOD, (ABB_MAGAZINE).

Η έννοια του Ventilation on Demand (VOD) έχει κερδίσει σημαντική παγκόσμια προσοχή από αρκετές εταιρείες εξόρυξης τα τελευταία χρόνια. Πρόκειται για μια προσέγγιση όπου η ροή του αέρα παρέχεται μόνο στις περιοχές που απαιτείται αερισμός, κόκκινη διαδρομή, (Σχήμα 6-3). Η εφαρμογή αυτής της έννοιας έχει οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας και κόστους για πολλές εταιρείες παγκοσμίως.

Το σύστημα αυτό έχει ως στόχο την ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης των ανεμιστήρων που χρησιμοποιούνται σε υπόγεια ορυχεία, επιτρέποντας τη μείωση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Παράλληλα, η ασφάλεια του ορυχείου παραμένει αδιαπραγμάτευτη, καθώς η ισχύς των ανεμιστήρων προσαρμόζεται δυναμικά, με βάση τα πραγματικά δεδομένα που συλλέγονται από το περιβάλλον και τη λειτουργία του ορυχείου.

Εργαστηριακά πειράματα έδειξαν ότι το σύστημα VOD είναι ικανό να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας των ανεμιστήρων έως και 43%, διασφαλίζοντας παράλληλα ότι πληρούνται οι προδιαγραφές ποιότητας αέρα. Ο συντελεστής προσδιορισμού για την πρόβλεψη της ισχύος του ανεμιστήρα έφτασε στο 0.84, ενώ για τον χρόνο αραιώσης των αερίων έφτασε στο 0.96, υποδεικνύοντας την υψηλή ακρίβεια των αναπτυγμένων μοντέλων (Ihsan, et al., 2024).

Το σύστημα ABB Ability Ventilation Optimizer (**Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**) αποτελεί ένα χαρακτηριστικό πρότυπο παράδειγμα του τρόπου λειτουργίας του VoD. Χρησιμοποιεί τεχνολογία παρακολούθησης θέσης για να εντοπίζει την παρουσία ατόμων και οχημάτων σε πραγματικό χρόνο, προσαρμόζοντας αναλόγως τον αερισμό στις διάφορες περιοχές του ορυχείου. Το σύστημα αυτό μπορεί να επανυπολογίζει τη ροή αέρα κάθε 15 δευτερόλεπτα, εξασφαλίζοντας ότι οι ανεμιστήρες παρέχουν την κατάλληλη ποσότητα αέρα, ανάλογα με τις ανάγκες. Αυτή η δυναμική ρύθμιση αέρα μπορεί να εξοικονομήσει έως και 3 εκατομμύρια δολάρια ετησίως για μεγάλα ορυχεία, ενώ παράλληλα μειώνει την ενεργειακή κατανάλωση κατά 50%.



Σχήμα 6-4: Σύστημα ABB (<https://im-mining.com>).

6.5.1 Χαρακτηριστικό παράδειγμα από την εφαρμογή του VOD στο ορυχείο δοκιμών της LKAB (Gyamfi, 2020), Konsuln

Οι στόχοι των σεναρίων αυτών ήταν:

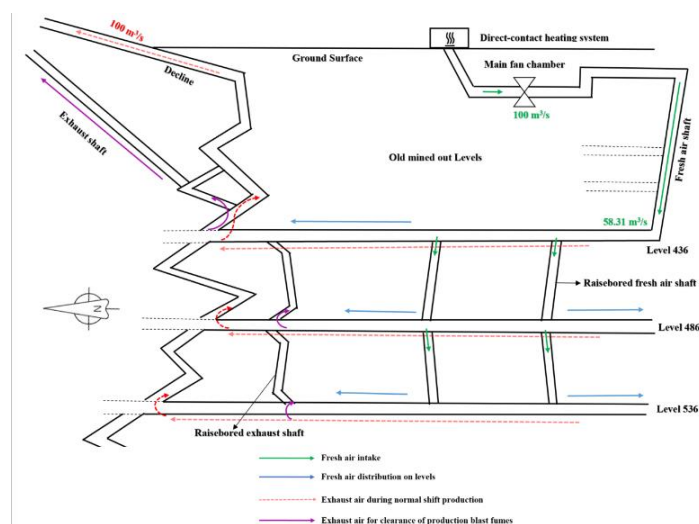
Μείωση του Κόστους Ενέργειας: Ο πρώτος στόχος ήταν να διερευνηθεί κατά πόσο η προσαρμογή της ταχύτητας των ανεμιστήρων θα μπορούσε να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας και το σχετικό κόστος. Τα σενάρια σχεδιάστηκαν για να αξιολογήσουν την εξοικονόμηση ενέργειας που προκύπτει από τη ρύθμιση των ανεμιστήρων σε χαμηλότερες ταχύτητες όταν δεν απαιτείται πλήρης αερισμός.

Βελτίωση της Απόδοσης Αερισμού: Τα σενάρια ήθελαν να δείξουν πώς το σύστημα VOD μπορεί να προσαρμόσει τη ροή του αέρα ανάλογα με τις πραγματικές ανάγκες του ορυχείου. Αυτό περιλάμβανε τη ρύθμιση της ροής του αέρα σε διαφορετικά επίπεδα του ορυχείου ανάλογα με τη δραστηριότητα και τον αριθμό των μηχανημάτων

που λειτουργούν εκεί, ώστε να αποφεύγεται η περιττή χρήση αέρα σε περιοχές που δεν χρειάζονται αερισμό.

Διατήρηση Ασφαλών Συνθηκών Εργασίας: Ένας βασικός στόχος ήταν η διασφάλιση ότι, παρά τη μείωση της ενέργειας, οι συνθήκες αερισμού παραμένουν ασφαλείς για τους εργαζόμενους. Τα σενάρια εξέτασαν αν η χρήση του VOD μπορεί να διατηρήσει τις συγκεντρώσεις ρύπων (π.χ. CO, NO₂) κάτω από τα όρια ασφαλείας (TLV-TWA) και ταυτόχρονα να οδηγήσει σε μείωση την κατανάλωση ενέργειας.

Περιγράφονται τέσσερα σενάρια (Βασικό, I, II, III) προσομοίωσης με διάφορες ταχύτητες ανεμιστήρων στο ορυχείο Konsuln βασισμένα στο προτεινόμενο σχέδιο παραγωγής, το χρονοδιάγραμμα και τη διαδικασία εξόρυξης, που απεικονίζουν τις συνθήκες εργασίας στα τρία κύρια επίπεδα του ορυχείου (436, 486 και 536), [Σχήμα 6-5](#). Τα σενάρια αυτά συνδέονται με τη λειτουργία κύριων και βοηθητικών ανεμιστήρων που είναι εξοπλισμένοι με μετατροπείς συχνότητας για να ρυθμίζουν την ταχύτητά τους. Το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε επίσης για την εκτίμηση του ετήσιου κόστους αερισμού για τα σενάρια VOD, αναδεικνύοντας τα οφέλη και τα πλεονεκτήματα εξοικονόμησης κόστους του σχεδιασμού VOD σε σύγκριση με το παραδοσιακό σύστημα αερισμού.



Σχήμα 6-5 Παράδειγμα απεικόνισης του συστήματος πρωτεύοντος συστήματος αερισμού, (Gyamfi, 2020)

6.5.2 Σενάριο Βασικής Περίπτωσης (Base Case)

Ταχύτητα ανεμιστήρων: Όλοι οι κύριοι και βοηθητικοί ανεμιστήρες λειτουργούν στο 100% της χωρητικότητάς τους.

Ετήσιο κόστος ενέργειας: Υπολογίζεται στις 701.559 Σουηδικές κορώνες (SEK).

Κατανάλωση αέρα: Παρέχεται πλήρης ροή αέρα χωρίς διακοπές, με αποτέλεσμα να υπάρχουν μη βέλτιστες συνθήκες χρήσης ενέργειας.

Σενάριο I

Ταχύτητα κύριου ανεμιστήρα: Μειωμένη στο 80%.

Ταχύτητα βοηθητικών ανεμιστήρων: Ρυθμίστηκαν μεταξύ 40-100%, ανάλογα με τις απαιτήσεις του κάθε επιπέδου.

Ετήσιο κόστος ενέργειας: Μειώθηκε στις 357.182 SEK, οδηγώντας σε εξοικονόμηση κόστους 49.1%.

Κατανάλωση αέρα: Το σύστημα ρύθμισε τη ροή αέρα ώστε να καλύπτει τις ανάγκες του ορυχείου, διατηρώντας τους ρύπους κάτω από τα όρια ασφαλείας.

Σενάριο II

Ταχύτητα κύριου ανεμιστήρα: Αύξηση στο 90%.

Ταχύτητα βοηθητικών ανεμιστήρων: Παραμένει ρυθμισμένη ανάλογα με τις ανάγκες του κάθε επιπέδου, με παραλλαγές από 40-100%.

Ετήσιο κόστος ενέργειας: Υπολογίστηκε στις 506.922 SEK, με εξοικονόμηση 27.7%.

Κατανάλωση αέρα: Βελτιωμένη ροή αέρα για να εξασφαλιστούν επαρκείς συνθήκες αερισμού και ασφάλειας.

Σενάριο III

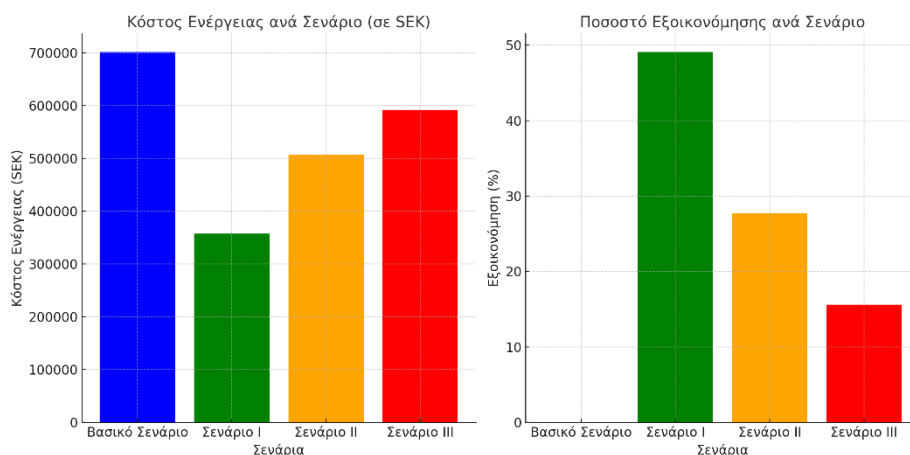
Ταχύτητα κύριου ανεμιστήρα: Ρυθμίζεται στο 95%.

Ταχύτητα βοηθητικών ανεμιστήρων: Ρυθμίζεται μεταξύ 40-100%.

Ετήσιο κόστος ενέργειας: 592.268 SEK, με εξοικονόμηση 15.6%.

Κατανάλωση αέρα: Η ροή αέρα παραμένει επαρκής για τη διατήρηση των επιπέδων ρύπων κάτω από τα όρια ασφαλείας.

Το VOD σύστημα βοήθησε στην αυτοματοποίηση αυτών των ρυθμίσεων, μειώνοντας την περιττή χρήση ενέργειας, αυξάνοντας την απόδοση του αερισμού και διασφαλίζοντας ασφαλείς συνθήκες εργασίας.



Σχήμα 6-6: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων των σεναρίων.

Αρχική Ροή Αέρα: Οι προσομοιώσεις ανέδειξαν ότι η αρχική ροή αέρα από τον κύριο ανεμιστήρα χωρίς ρυθμιστή ανήλθε στα $99,3 \text{ m}^3/\text{s}$, κάτι που χρησιμοποιήθηκε για όλες τις προσομοιώσεις.

Συνθήκες λειτουργίας Ρυθμιστών: Στις διάφορες εισόδους αέρα ρυθμίστηκαν ανάλογα με τις ανάγκες των επιπέδων, και στις περιπτώσεις που δεν απαιτούνταν υψηλή ροή αέρα, οι ανεμιστήρες λειτουργούσαν με μειωμένη ταχύτητα.

Πίεση και Ροή Αέρα: Σε όλα τα σεναρία έγινε προσαρμογή της ροής αέρα ώστε να καλύπτονται οι ανάγκες των μηχανημάτων σε κάθε επίπεδο, διατηρώντας την ποιότητα αέρα και τη θερμοκρασία κάτω από τα επιτρεπόμενα όρια.

Αυτή η ανάλυση δείχνει ότι η ρύθμιση των ταχυτήτων των ανεμιστήρων μέσω του συστήματος VOD προσφέρει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας χωρίς να θυσιάζεται η ποιότητα του αέρα.

6.5.3 Τι επιπτώσεις έχει το VOD στο περιβάλλον

Το σύστημα Ventilation on Demand (VOD) έχει σημαντική θετική συμβολή στη βελτίωση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας, καθώς επιτρέπει την πιο αποτελεσματική διαχείριση των ενεργειακών πόρων και τη μείωση των εκπομπών ρύπων. Ακολουθούν οι κύριες περιβαλλοντικές επιπτώσεις του VOD:

- ✓ **Μείωση κατανάλωσης ενέργειας:** Το σύστημα VOD επιτρέπει τη λειτουργία των ανεμιστήρων μόνο όταν και όπου είναι απαραίτητο, κάτι που μειώνει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με τα παραδοσιακά συστήματα αερισμού που λειτουργούν συνεχώς. Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας οδηγεί άμεσα σε:

-Λιγότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) που συνδέονται με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου η ενέργεια παράγεται από ορυκτά καύσιμα.

-Μείωση της εξάρτησης από μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

- ✓ **Μείωση ρύπων στον αέρα του ορυχείου:** Η σωστή λειτουργία των ανεμιστήρων μέσω του VOD εξασφαλίζει καλύτερη ποιότητα αέρα εντός των ορυχείων, καθώς η ροή αέρα ρυθμίζεται για να αφαιρεί ρύπους όπως:
 - Διοξείδιο του άνθρακα (CO₂).Οξείδια του αζώτου (NO_x).Σωματίδια αιθάλης από μηχανήματα ντίζελ.

Αυτή η μείωση των εκπομπών ρύπων βοηθά στη διατήρηση ενός καθαρότερου περιβάλλοντος εργασίας και στην προστασία της υγείας των εργαζομένων.

- ✓ **Μείωση εκπομπών θερμότητας:** Το VOD βελτιστοποιεί τη χρήση ενέργειας, και έτσι μειώνεται η υπερβολική παραγωγή θερμότητας από τα μηχανήματα και τους ανεμιστήρες που λειτουργούν σε πλήρη ισχύ χωρίς λόγο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της θερμοκρασίας που «μεταφέρεται στο περιβάλλον από το ορυχείο, κάτι που επιδρά θετικά στη μείωση της ανάγκης για επιπλέον αερισμό και ψύξη.
- ✓ **Συνεισφορά στη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα:** Η εξοικονόμηση ενέργειας και η μείωση των εκπομπών ρύπων μέσω της εφαρμογής του συστήματος Ventilation on Demand (VOD) συνεισφέρουν ουσιαστικά στη μείωση του συνολικού ανθρακικού αποτυπώματος των ορυχείων, έχει ιδιαίτερη σημασία για εταιρείες που επιδιώκουν να ευθυγραμμιστούν με τους σύγχρονους περιβαλλοντικούς κανονισμούς και πρότυπα, καθώς και για όσες στοχεύουν στην ενίσχυση της περιβαλλοντικής τους υπευθυνότητας.

Υπάρχουν αρκετά ακόμη ορυχεία παγκοσμίως που έχουν υιοθετήσει το σύστημα Ventilation on Demand (VOD) για να βελτιώσουν την αποδοτικότητα του αερισμού τους και να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας. Εδώ είναι μερικά παραδείγματα ορυχείων που χρησιμοποιούν το VOD:

6.5.4 Ορυχείο Malmberget, Σουηδία

Το ορυχείο Malmberget, που ανήκει στην εταιρεία LKAB, ήταν από τα πρώτα ορυχεία που εφάρμοσαν το σύστημα VOD. Το ορυχείο παράγει πάνω από 1 εκατομμύριο τόνους σιδηρομεταλλεύματος ετησίως. Με την εγκατάσταση του VOD, το ορυχείο

κατάφερε να μειώσει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας. Σύμφωνα με αναφορές, το ορυχείο κατάφερε να μειώσει την ετήσια κατανάλωση ενέργειας από 167 GWhr σε 72 GWhr, κάτι που οδήγησε σε μεγάλη εξοικονόμηση κόστους.

6.5.5 Ορυχείο Coleman, Καναδάς

Το ορυχείο Coleman, που ανήκει στην εταιρεία Vale, έχει εγκαταστήσει ένα προηγμένο σύστημα VOD. Στο πλαίσιο της εφαρμογής του συστήματος, οι ανεμιστήρες και τα συστήματα αερισμού προσαρμόζονται αυτόματα στις ανάγκες του ορυχείου, παρέχοντας αέρα μόνο στις περιοχές όπου χρειάζεται και περιορίζοντας την ενέργεια που καταναλώνεται για την λειτουργία αερισμού. Η εφαρμογή του VOD συνέβαλε στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά περίπου 40%.

6.5.6 Ορυχείο Nickel Rim South, Καναδάς

Το ορυχείο Nickel Rim South, που ανήκει στη Glencore, έχει επίσης εφαρμόσει το σύστημα VOD. Χρησιμοποιώντας το VOD, το ορυχείο έχει καταφέρει να προσαρμόζει τον αερισμό βάσει της δραστηριότητας, περιορίζοντας τη χρήση ενέργειας και βελτιώνοντας την ασφάλεια των εργαζομένων. Το ορυχείο αξιοποιεί αισθητήρες για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα και την αυτόματη ρύθμιση της ροής αέρα.

6.5.7 Ορυχείο Creighton, Καναδάς

Το ορυχείο Creighton, που ανήκει στη Vale, έχει υιοθετήσει ένα σύστημα VOD που βελτιστοποιεί τη ροή αέρα, προσαρμόζοντας τον αερισμό στις δραστηριότητες στο ορυχείο. Αυτό έχει οδηγήσει σε βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και μείωση των εκπομπών ρύπων.

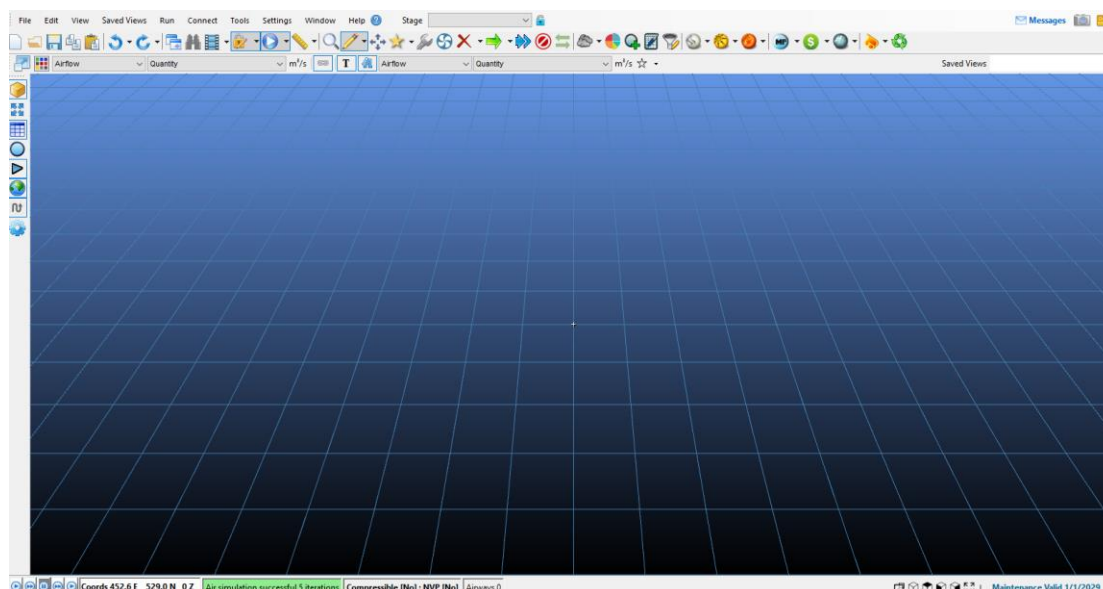
Κεφάλαιο 7: Προσομοίωση Κυκλώματος Αερισμού Υπογείων

Ο σχεδιασμός ενός ολόκληρου συστήματος αερισμού σε ένα υπόγειο μεταλλείο είναι μια πρόκληση για τους μηχανικούς καθώς από αυτό εξαρτάται η παραγωγή της εκμετάλλευσης καθώς και η ασφάλεια των εργαζομένων μέσα σε αυτό. Χρειάζεται χρόνια εκμάθηση ενός προγράμματος προσομοίωσης, όπως το VentSim, τόσο σε εκπαιδευτικό επίπεδο όσο και σε πραγματικές συνθήκες εργασίες καθώς οι δυνατότητες που παρέχει εκπαιδεύουν το χρήστη σε θέματα σχετικά με το δίκτυο αερισμού και επιπλέον δημιουργούν περεταίρω ερωτήματα για έρευνα.

Παρουσιάζεται μια πρώτη εικόνα κάποιων βασικών μοντέλων προσομοίωσης, μερικές από τις πιο κυρίες ρυθμίσεις και δυνατότητες του VentSim καθώς και μια πιο ειδική περίπτωση για ένα υπόγειο μεταλλείο.

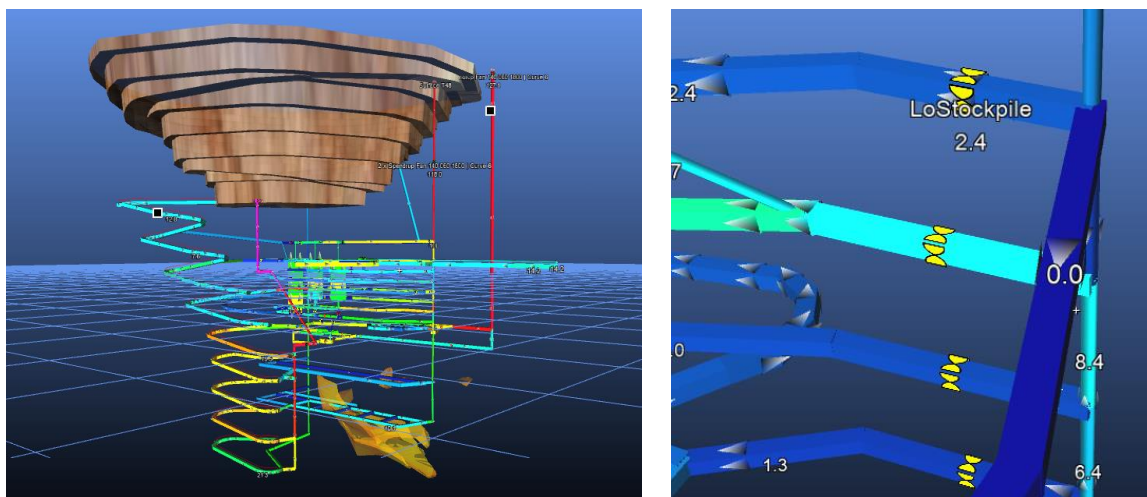
7.1 Το περιβάλλον του λογισμικού

Το VentSim Design λειτουργεί σε ένα πλήρως τρισδιάστατο γραφικό περιβάλλον. Το κύριο παράθυρο (Σχήμα 7-1) περιέχει όλες τις λειτουργίες που χρειάζεται για την δημιουργία, την επεξεργασία, την προβολή και την προσομοίωση μοντέλων αεραγωγών.



Σχήμα 7-1: Κύριο παράθυρο του VentSim

Αποτελείται από το κύριο μενού, τις γραμμές εργαλείων δράσης, δεδομένων, προβολής, τον διαχειριστή οθόνης και την κατάσταση προσομοίωσης.



Σχήμα 7-2: Αναπαράσταση στο VentSim από παραδείγματα του λογισμικού α) υπόγειου μεταλλείου και β) αγωγών αερισμού.

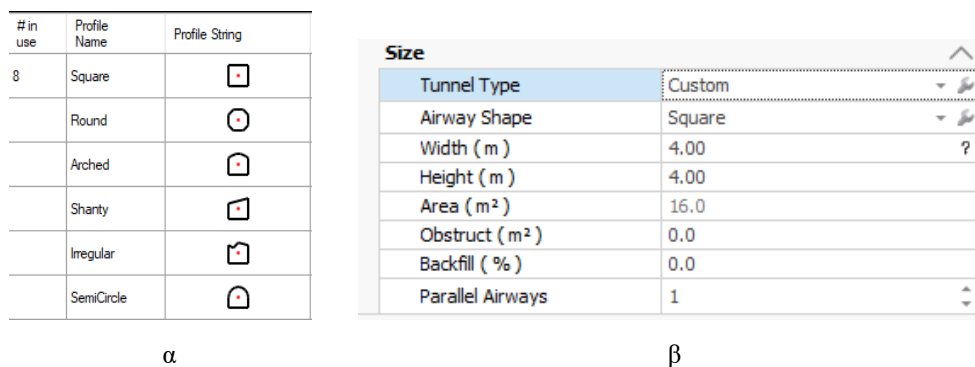
Μερικές βασικές ρυθμίσεις έχουν να κάνουν με τις αντιστάσεις, τους παράγοντες τριβής, τις απώλειες πίεσης λόγω κρούσης, τον τύπο αέρα αλλά και τον τύπο των ρύπων, τα στρώματα είτε πρωτεύοντα είτε όχι. Το πρόγραμμα περιέχει μια τεράστια βιβλιοθήκη με πραγματικούς ανεμιστήρες της αγοράς με ότι λεπτομέρεια συνεπάγεται από τον κατασκευαστή, τον τύπο και το προφίλ που έχει το φρέαρ, τον τύπο του περιβάλλον πετρώματος, τα οχήματα και όλες τις ιδιαιτερότητες αυτών όπως καυσάερια και θερμοκρασία, δυνατότητα ρύθμισης διαρροής αγωγού, αισθητήρες, εκρηκτικά, ρυθμιστικές αρχές, φίλτρα και τέλος σενάρια έκτακτης ανάγκης.

Αυτές οι ρυθμίσεις αποτελούν τις βασικές παραμέτρους που παρέχει το λογισμικό στον μηχανικό, επιτρέποντάς του να προσομοιώσει το υπόγειο μεταλλείο με τον πληρέστερο δυνατό τρόπο, προσεγγίζοντας ρεαλιστικές συνθήκες. Με αυτόν τον τρόπο, εξασφαλίζεται η ακρίβεια στις μελέτες και τις μετρήσεις που θα προκύψουν, καθιστώντας τα αποτελέσματα όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστα.

7.2 Χαρακτηριστικά παραδείγματα από μερικές βασικές παραμέτρους πριν τον σχεδιασμό αεραγωγών

7.2.1 Τύποι προφίλ αεραγωγού

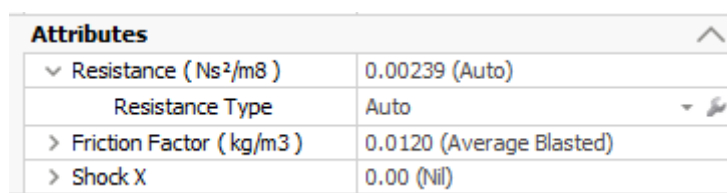
Επιτρέπει επιλογή ενός προκαθορισμένου τύπου αεραγωγού, συγκεκριμένου το προφίλ, διαστάσεων και τριβής. Επίσης εκτός από τη δυνατότητα εισαγωγής προκαθορισμένων τύπων (Σχήμα 7-3α) μπορούν να εισαχθούν και τροποποιημένοι που να προσομοιάζουν καλύτερα τις πραγματικές συνθήκες (Σχήμα 7-3β).



Σχήμα 7-3: α) Βασικοί τύποι αεραγωγών και β) διαστασιολόγηση και χαρακτηριστικά αγωγών.

7.2.2 Χαρακτηριστικά αεραγωγού

Σε αυτή την φόρμα επεξεργασίας ο μηχανικός ορίζει την αντίσταση, τους συντελεστές τριβής και τους συντελεστές απώλειας κρούσης για όλο το σύστημα ή για ένα μέρος του ή ακόμα και για έναν αεραγωγό [Σχήμα 7-4](#).



Σχήμα 7-4: Παράγοντες αντίστασης, τριβής και κρούσης

7.2.3 Ρυθμίσεις ανεμιστήρα

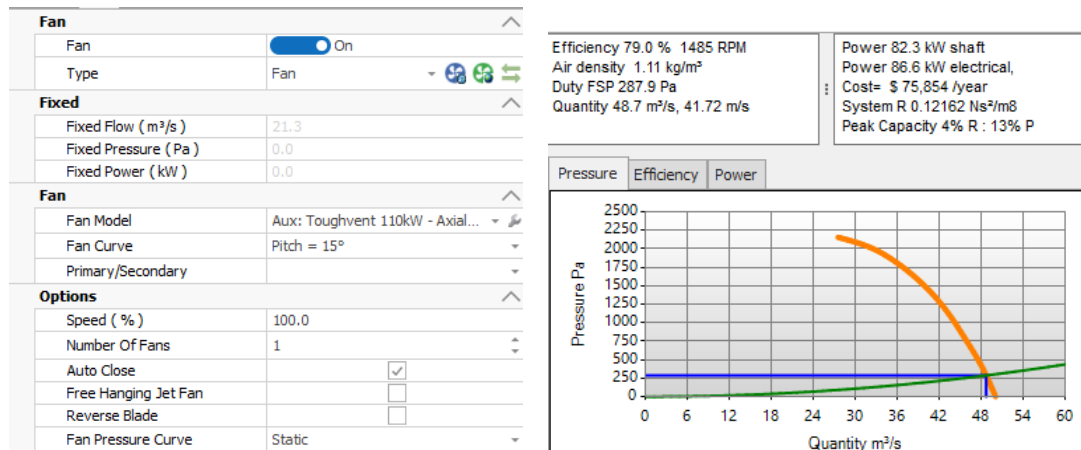
Εξίσου σημαντική παράμετρος για ένα σωστό κύκλωμα είναι ο ανεμιστήρας καθώς είναι το βασικό όργανο του μηχανικού αερισμού όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η φόρμα ρύθμισης ([Σχήμα 7-5β](#)) επιτρέπει την εφαρμογή ανεμιστήρων, σταθερών ροών αέρα και πιέσεων σε έναν αεραγωγό. Εάν όλα λειτουργούν σωστά, μετά την προσομοίωση θα εμφανιστεί ένα γράφημα της χαρακτηριστικής καμπύλης ανεμιστήρα και απόδοσης που δείχνει την απόδοση του ανεμιστήρα σε έναν προσομοιωμένο πρότυπο αεραγωγό. Υπάρχει δυνατότητα να εμφανίσει τα διαγράμματα καμπύλης πίεσης ανεμιστήρα, καμπύλης ισχύος ανεμιστήρα καθώς και το σημείο λειτουργίας με την καμπύλη αντίστασης του συστήματος.

Πολύ καίριο σημείο το info box στο οποίο παρέχονται τα δεδομένα ανεμιστήρα που περιγράφουν τη λειτουργία και την απόδοση του ανεμιστήρα. Τα περισσότερα στοιχεία είναι αυτονόητα όπως φαίνονται στο [Σχήμα 7-5α](#). Διευκρινίζεται ότι η ισχύς του άξονα είναι η ισχύς που απορροφάται από την φτερωτή του ανεμιστήρα και δεν περιλαμβάνει τις απώλειες των ηλεκτρικών κινητήρων ή των κιβωτίων ταχυτήτων. Ισχύς αιχμής είναι το κλάσμα του σημείου λειτουργίας μακριά από την πίεση αιχμής του ανεμιστήρα. Η

μέγιστη ισχύς που πλησιάζει το 100% είτε για την αντίσταση είτε για τη ροή υποδεικνύει ότι ο ανεμιστήρας μπορεί να είναι επιρρεπής σε ακινητοποίηση.

Efficiency 79.0 % 1485 RPM Air density 1.11 kg/m ³ Duty FSP 287.9 Pa Quantity 48.7 m ³ /s, 41.72 m/s	Power 82.3 kW shaft Power 86.6 kW electrical, Cost= \$ 75,854 /year System R 0.12162 Ns ² /m8 Peak Capacity 4% R : 13% P
---	---

α



β

γ

Σχήμα 7-5: α) Δεδομένα ανεμιστήρα (info box), β) καρτέλα προσδιορισμού ανεμιστήρα και γ) χαρακτηριστικά λειτουργίας ανεμιστήρα.

EDIT - 1 Airways, 39.9 m

Tools Select

Airway

Name

Entry Name

Exit Name

Index Number 26

Unique Number 46

Data Box

Stage Stage 1

Type

Airway Size & Shape Custom

Airway Shape Square

Width (m) 4.0

Height (m) 4.0

Area (m²) 16.0

Obstruct (m²) 0.0

Backfill (%) 0.0

Layers

Air Type Not Set

Primary Layer Default

Secondary Layer RAMP

Options

Surface ☐

Close End ☐

Show Data ☐

Exclude ☐

Fix Direction ☐

Group ☐

Fix Length ☐

Length 39.9

Gradient -1736.4

Diffuser ☐

Attributes

Resistance (Ns²/m⁸) (Auto)

Friction Factor (kg/m³) 0.0190 (Raise Timber Set)

Shock 0.00 (Auto High)

Simulation

Q (m³/s) 31.0

V (m/s) 1.9

P Loss (Pa/m) 65.8

R (Ns²/m⁸) 0.00255

Simulate Apply OK Cancel

α

Name	# In Use	Rock Thermal Conductivity W/mC	Rock Specific Heat J/kgC	Thermal Diffusivity m ² /s 10-6	Rock Density kg/m ³
coal	0.33	1300	0.2000364	1269	
dunite	4.3	820	1.639744	3198	
gabbro	2.1	800	0.9700665	2706	
gneiss	2.9	800	1.290036	2810	
granite	3	790	1.410126	2693	
limestone	1.3	840	0.6400409	2418	
magnetite	4.41	600	2.1	3500	
marble	2.6	880	1.17993	2504	
potash	3.5	690	2.550258	1989	
quartzite	3	800	1.389918	2698	
rock salt	4.48	880	2.039627	2496	
sandstone	1.7	920	0.7098833	2603	
shale	1.23	850	0.5500033	2631	

β

VentSim™ Settings

Costing

Currency \$

Mining

[RESET] No

CALCULATOR No

Cost Horizontal Fixed \$ 800 / m

Cost Horizontal Variable \$ 130 / m³

Cost Shaft Fixed \$ 1600 / m

Cost Shaft Variable \$ 250 / m³

Cost Vertical Other Fixed \$ -1 / m

Cost Vertical Other Variable \$ -1 / m³

Power

Fan Purchase Cost \$ 1,000 /kW

Mine Life 5

NPV Rate 10

Power Cost \$ 0.100 /kWh

General

γ

Simulation

Airflow

Contaminant

Diesel

Dust

Dynamic

Environment

Escape Route Defaults

Fire

Gas

Heat

Radon

Recirculation

Scripting

Sensitivity Resistance

Thermal Flywheel - Annual

Thermal Flywheel - Daily

System Settings

Video

δ

Error

Options ☒ Show All

☐ Error : fix being over-restricted Airway 2:

☐ Error : fix stopped, check connections are joined/open Airway

☐ Warning : no entry connection Airway 2:

☐ Warning : no entry connection Airway 5:

☐ Warning : no exit connection Airway 4:

Select All Select Edit Exit

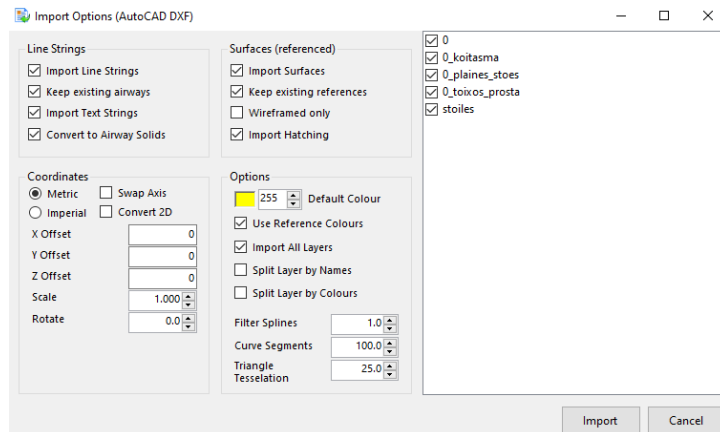
ε

Σχήμα 7-6: α) Καρτέλα επεξεργασίας αεραγωγού, β) Καρτέλα ειδικοί συντελεστές πετρωμάτων, γ) Εισαγωγή παραμέτρων για το κόστος, δ) Παράμετροι για την προσομοίωση, ε) Errors box

Αυτές είναι μερικές από τις πιο βασικές παραμέτρους για την δημιουργία ενός συστήματος αερισμού. Τονίζεται ότι για κάθε μια από αυτές υπάρχουν προκαθορισμένες τιμές με σκοπό να παρέχουν έναν γρήγορο και βολικό τρόπο για την συνέχεια του σχεδιασμού. Το λογισμικό εκπέμπει errors alarms, Σχήμα 7-6ε, κάθε φορά που για οποιοδήποτε λόγο δεν είναι φυσιολογικά τα αποτελέσματα ή δεν υπάρχει

ικανοποιητική ροή και με αυτόν τον τρόπο καθοδηγεί τον μηχανικό σε όσο τον δυνατό ορθότερο αποτέλεσμα.

Το VentSim σχεδιάστηκε πρωτίστως, ως εργαλείο εξαερισμού, το οποίο μπορεί να λειτουργεί ανεξάρτητα από άλλα πακέτα σχεδιασμού ορυχείων, αλλά διατηρεί ένα επίπεδο συμβατότητας που να διασφαλίζει την επικοινωνία μεταξύ των διαφορετικών λογισμικών που κυκλοφορούν, [Σχήμα 7-7](#).



Σχήμα 7-7: Παράδειγμα εισαγωγής δεδομένων από αρχείο DXF

Διαθέτει επίσης βιβλιοθήκη με μονάδες μέτρησης και μετατροπές αυτών για όλα τα μετρήσιμα μεγέθη από τα οποία μπορεί να εξαρτηθεί μια παράμετρος [Σχήμα 7-8](#).

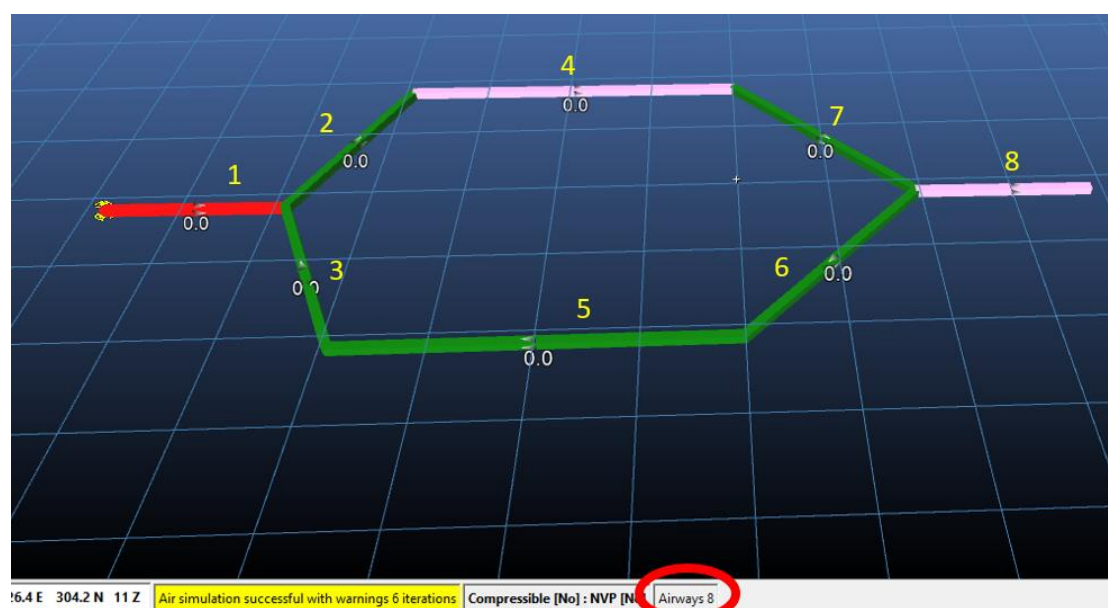
Name	Unit (Setting)	Name	Unit (Setting)	Name	Unit (Setting)
Age	Metric year	HeatOutput	Metric kW	Radon Emanation	Metric Bq/m ³ s
Air Density	Metric kg/m ³	Lapse Rate	Metric C/1000m	Radon Flow	Metric Bq/s
Area	Metric m ²	Length	Metric m	Refrigeration	Metric kW/R
Contaminants	Metric	Length Per Month	Metric m/mth	Resistance	Metric Na ² /m ⁸
Contaminants %	Metric %	Linear Emission	Metric l/s/100m	Resistance linear	Metric R/100m
Contaminants ppm	Metric ppm	Mass	Metric kg	Rock Density	Metric kg/m ³
Cooling Kata	Metric mcal/cm ² s	Mass Flow (dry air)	Metric kg/s	Shock Factor	Metric
Cost	Metric \$	Moisture Content	Metric kg/kg	Small Airflow	Metric m ³ /s
Diesel Linear Heat	Metric kW/m	Moisture Flow	Metric ml/sec	TWL Cooling	Metric w/m ²
Diesel particulate concentration	Metric ug/m ³	Moisture/unt/Length	Metric g/s/m	Temperature Difference	Metric °C
Diesel particulate emission	Metric g/kW.hr	Particle Size	Metric μm	Temperatures	Metric °C
Diffusion Coefficient	Metric m ² /s	Percentage	Metric %	Thermal Diffusivity	Metric m ² /s 10-6
Dust	Metric mg/m ³	Power Cost (Hourly)	Metric \$ /kWh	ThermalConductivity	Metric W/mC
EnergyFlow	Metric kJ/s	Power Cost (Yearly)	Metric \$ /yr	Thrust	Metric N
Engine Power	Metric kW	Power Output	Metric kW	Time	Metric Seconds
Fan cost per kW	Metric \$ /kW	Power/unt/Length	Metric kW/m	UnitLengthCost	Metric \$ /m/year
Friction Factor	Metric kg/m ³	Pressure	Metric Pa	UnitStrataHeat	Metric W/m
Fuel Flow	Metric l/hour	Pressure Atmos	Metric kPa	Velocity	Metric m/s
Fuel Flow per 100	Metric l/h/100m	Pressure Blast	Metric kPa	Volume	Metric m ³
Gas Flow	Metric litres/sec	Pressure/unt/Length	Metric Pa/m	Water Flow	Metric l/sec
Gas Yield	Metric L/kg	Production (Hourly)	Metric kg/hour	Wetness Fraction	Metric
Geothermal Gradient	Metric C/100m	Production (Monthly)	Metric tonnes/month	Working Level	Metric μl/m ³
Heat Capacity	Metric J/kgC	Quantity	Metric m ³ /s		
Heat Content	Metric kJ/kg	Radon Concentration	Metric Bq/l		
Heat of Combustion	Metric MJ/kg	Radon Dosage/yr	Metric mSv		

Σχήμα 7-8 Πίνακας μονάδων

7.3 Βασικό Μοντέλο Σχεδιασμού με Οχτώ Αεραγωγούς

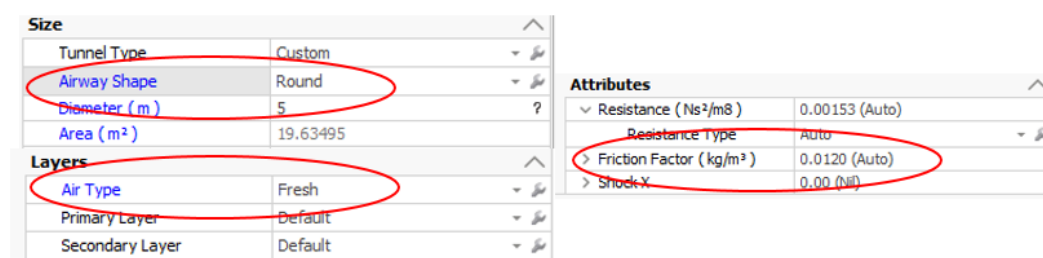
Η σχεδίαση ενός αγωγού πραγματοποιείται μέσω της επιλογής, μολύβι σχεδίασης, το οποίο επιτρέπει την δημιουργία του επιθυμητού είδους αγωγού. Στην προκειμένη περίπτωση καθώς πρόκειται για ένα απλό μοντέλο οι αγωγοί σχεδίασης είναι συνεχής κάτι που επιτρέπει την αλλαγή κατεύθυνσης ροής εύκολα.

Στη συνέχεια γίνεται η σχεδίαση ενός απλού μοντέλου αποτελούμενου από 8 αεραγωγούς όπως φαίνεται στο [Σχήμα 7-9](#), χωρίς ωστόσο εισαγωγή παροχής αέρα.



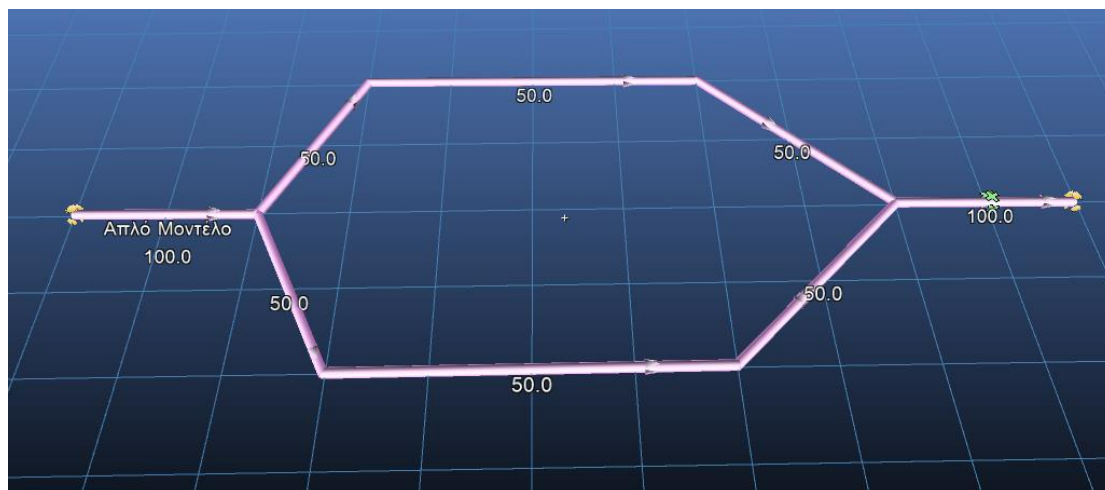
Σχήμα 7-9: Σχεδίαση 8 αεραγωγών

Επόμενο βήμα είναι να οριστούν βασικοί παράμετροι όπως ο τύπος της στοάς και του αεραγωγού. Στη συγκεκριμένη περίπτωση όλοι οι αεραγωγοί θα είναι κυκλικοί, το είδος του αέρα παροχής θα είναι ατμοσφαιρικός (Fresh) και την παράμετρο του Atkinson για τις συγκεκριμένες επιφάνειες των τοιχωμάτων των στοών όπου θα είναι $K = 0.012 \text{ kg/m}^3$, [Σχήμα 7-10](#).



Σχήμα 7-10: Ρύθμιση βασικών παραμέτρων

Δίνοντας παροχή αέρα $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ όπως φαίνεται στο [Σχήμα 7-11](#) και όπως αναμένεται σύμφωνα με τους κανόνες του Kirchhoff, η παροχή εισόδου ισούται με την παροχή εξόδου και το άθροισμα των παροχών στους κλάδους ισούται με την παροχή αέρα του συνολικού δικτύου, μιας και οι παράμετροι είναι ίδιοι για όλο το δίκτυο, στο συγκεκριμένο παράδειγμα.



Σχήμα 7-11: Παροχή ροής στο σύστημα

Μερικές επιπλέον πληροφορίες που δίνει το λογισμικό για το σύστημα αυτό μετά το πέρας της προσομοίωσης έχουν να κάνουν με δεδομένα ανεμιστήρα, όπως την στατική πίεση η οποία θα προκύψει από τη διάμετρο του τελευταίου ή το μέγεθος του αεραγωγού, την ισχύ και το κόστος λειτουργίας του συστήματος, [Σχήμα 7-12](#).

Pressure Collar TP	46.5 Pa	Power	7.8 kW shaft
Pressure FTP	62.1 Pa	Power	8.2 kW electrical,
Flow	100.0 m ³ /s	Cost=	\$ 7,157 /year
Air density	1.20 kg/m ³		

Σχήμα 7-12: Πληροφορίες ανεμιστήρων, info box.

Επιπλέον επιστρέφει δεδομένα ροής όπως οι απώλειες πίεσης που εμφανίζονται λόγω τριβής κατά μήκος ενός αεραγωγού, καθώς και οι προσθήκες πίεσης λόγω ανεμιστήρων ή άλλων πηγών και τέλος την ταχύτητα ροής αέρα, [Σχήμα 7-13](#).

Simulation	
Q (m ³ /s)	100.0
V (m/s)	5.1
P Loss (Pa)	24.4
R (Ns ² /m ⁸)	0.00244

Σχήμα 7-13: Πληροφορίες ροής

7.4 Βασικό Μοντέλο με Ρυθμιστή Ροής

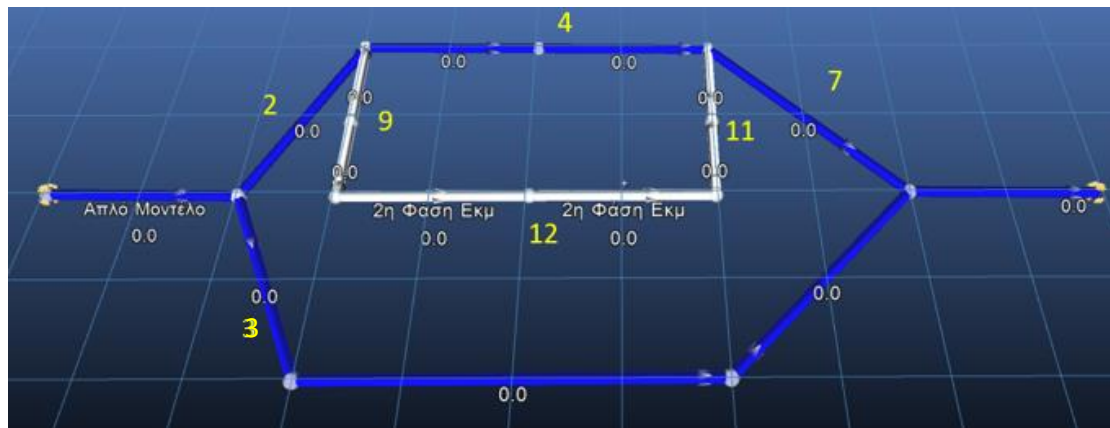
Ένα από τα πολλά πλεονεκτήματα του βοηθητικού αερισμού είναι η δυνατότητα να ρυθμίζει τις ροές ανάλογα με τις ανάγκες του εκάστοτε χώρου, δηλαδή να διοχετεύει περισσότερο αέρα σε χώρους του υπογείου στους οποίους εργάζονται παραπάνω οχήματα και προσωπικό και να μειώνει σε άλλους την παροχή η οποία είναι αχρείαστη για εκείνη την χρονική περίοδο. Αυτό επιτυγχάνεται με την λειτουργία του ρυθμιστή ροής. Η συγκεκριμένη επιλογή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση ενός ρυθμιστή ή μιας ανοιχτής πόρτας ή οποιουδήποτε άλλου σεναρίου απόφραξης αεραγωγού με ρυθμιζόμενη ανοιχτή παροχή.

Υπάρχουν δύο βασικά μοντέλα ρυθμιστών, οι ρυθμιστές τύπου Louvre Regulator, [Σχήμα 7-14](#), οι οποίοι είναι με περσίδες και οι ρυθμιστές τύπου Orifice οι οποίοι είναι με στόμια σε πόρτες.



Σχήμα 7-14: Louvre Regulator, Ninth US Mine Ventilation Symposium, June 2002, Kingston Canada.

Στο βασικό μοντέλο που σχεδιάστηκε προηγούμενος προστεθεί μία νέα φάση εκμετάλλευσης όπως συμβαίνουν στα πραγματικά υπόγεια μεταλλεία. Η εικόνα η οποία θα υπάρχει αφού προχωρήσει η εκμετάλλευση στην δεύτερη φάση θα είναι αυτή, [Σχήμα 7-15](#). Κάτι που οδηγεί τον μηχανικό να εστιάσει στη ροή εντός των κλάδων 2,4,9,11,12 και να δώσει μεγαλύτερη παροχή αέρα από ότι στον άλλο κλάδο, χωρίς να αλλάξει την συνολική παροχή του δικτύου.

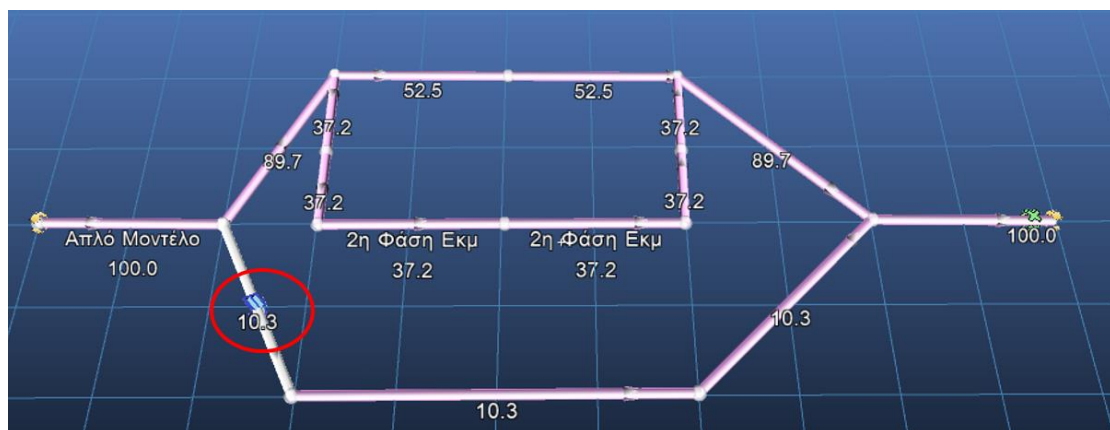


Σχήμα 7-15: Απεικόνιση με την δεύτερη φάση εκμετάλλευσης

Την ενίσχυση της ροής προς αυτή την κατεύθυνση την πετυχαίνει με την τοποθέτηση ενός ρυθμιστή τύπου Louvre στην αντίθετη κατεύθυνση. Η ρύθμιση έγινε στο 20% επί του ανοίγματος [Σχήμα 7-16](#) κάτι που ενίσχυσε την παροχή στον κλάδο της φάσης εκμετάλλευσης στο $89.7 \text{ m}^3/\text{s}$ και το υπόλοιπο $10.3 \text{ m}^3/\text{s}$ στον κλάδο 3, [Σχήμα 7-17](#).

Attributes	
Resistance (Ns ² /m ⁸)	0.25000 (Regulator)
Resistance Type	Regulator
Regulator	Louvred Regulator
Opening (%)	20.0
Adjusted to local density	<input checked="" type="checkbox"/>
Friction Factor (kg/m ³)	0.0050 (Auto)

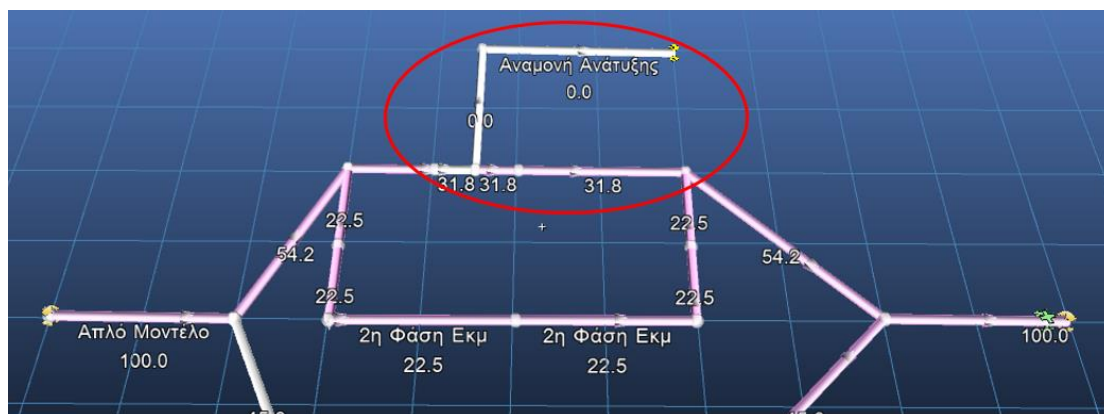
Σχήμα 7-16: Ρύθμιση Regulator



Σχήμα 7-17: Παροχές μετά την εισαγωγή ρυθμιστή

7.5 Βασικό μοντέλο με πρόσθετο ανεμιστήρα ενίσχυσης

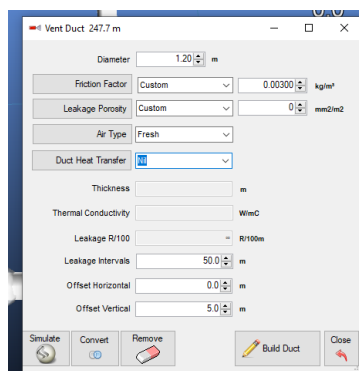
Στην τρίτη φάση της εκμετάλλευσης (Σχήμα 7-18) εκτελείται διάνοιξη νέων στοών στο βόρειο τμήμα του υπογείου που απαιτεί μεγαλύτερο όγκο παροχής αέρα στο σύστημα από το αρχικό.



Σχήμα 7-18: Μελή Τρίτης φάσης ανάπτυξης

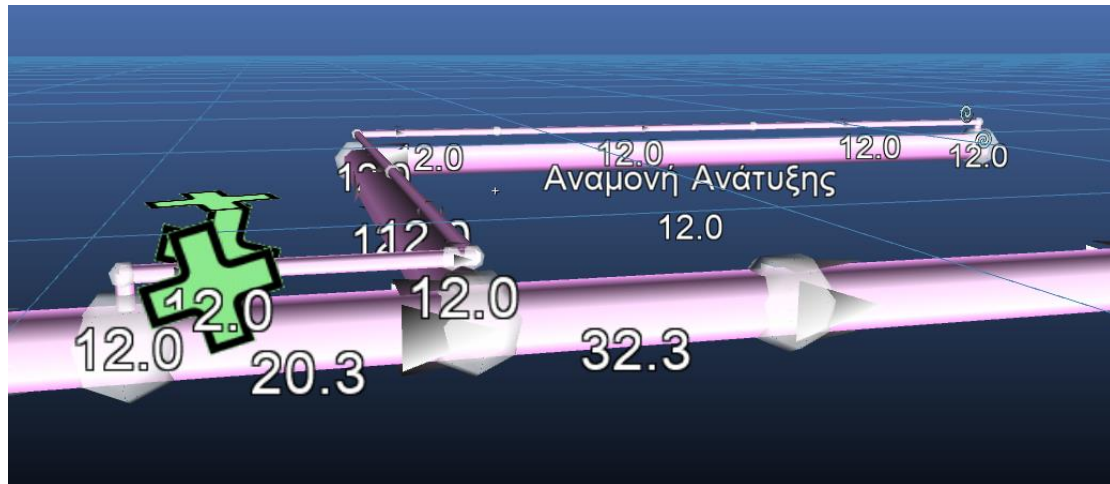
Θεωρείται ότι δεν υπάρχει δυνατότητα στο αρχικό σύστημα από τον κύριο αερισμό να δώσει μεγαλύτερη παροχή για να καλυφθεί η ανάγκη της επιπλέον φάσης εκμετάλλευσης. Για τον παραπάνω λόγο εισάγεται στο σύστημα ένας ανεμιστήρας ενίσχυσης και δημιουργείται με τον τρόπο αυτό μια νέα πηγή στο δίκτυο με επιπλέον αγωγούς η οποία μπορεί να καλύψει τις ανάγκες του νέου κλάδου.

Συνεπώς με την εισαγωγή ενός νέου δικτύου αγωγών, επιλέγοντας μόνο τους αγωγούς όπου θα περνάει η νέα παροχή, τονίζεται ότι το σύστημα ενίσχυσής πάντα εγκαθίσταται πριν από το σημείο ενδιαφέροντος και θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 30% λιγότερο από το πρωτεύον σύστημα αερισμού για λόγους τυχών διαρροής και απώλειες πίεσης. Η επιλογή του νέου δικτύου έγινε με τους προκαθορισμένους παραμέτρους, Σχήμα 7-19.



Σχήμα 7-19: Εισαγωγή παραμέτρων νέου αγωγού

Στο νέο δίκτυο αερισμού τοποθετήθηκε ανεμιστήρας (πράσινη έλικα), Σχήμα 7-20, ενίσχυσης με παροχή $12 \text{ m}^3/\text{s}$. Λαμβάνοντας υπόψιν σύμφωνα με τα παγκόσμια πρότυπα υγιεινής αερισμού υπογείων ότι για όχημα με κινητήρα diesel απαιτείται παροχή ίση με $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ για κάθε 1 kilowatt ισχύος. Κατ' ακολουθίαν το συγκεκριμένο σύστημα δυναμικότητας 200 kilowatt απαιτεί παροχή ίση με $12 \text{ m}^3/\text{s}$.



Σχήμα 7-20: Νέος αγωγός, νέα παροχή. (Εικονικά φαίνεται εκτός του υπάρχον δικτύου για λόγους προβολής)

7.6 Αερισμός Υπόγειας Εκμετάλλευσης με Φρέατα Εισόδου – Εξόδου

Στο κύκλωμα αερισμού του παρακάτω σχεδίου, [Σχήμα 7-21](#), προσδιορίστηκαν οι παροχές για κάθε αντίσταση του κυκλώματος καθώς και η στατική πίεση που απαιτείται για μια παροχή $Q = 47.2 \text{ m}^3/\text{s}$. Τα ζητούμενα προσδιορίστηκαν με βάση τους κανόνες του Kirchhoff και τις κατάλληλες παραμέτρους και στη συνέχεια το κύκλωμα σχεδιάστηκε σε σχεδιαστικό πρόγραμμα και με την χρήση του προγράμματος προσομοίωσης έγινε η επαλήθευση των αποτελεσμάτων, καθώς και μια εκτίμηση για το κόστος.

Αντιστάσεις (σε Ns^2m^{-8}):

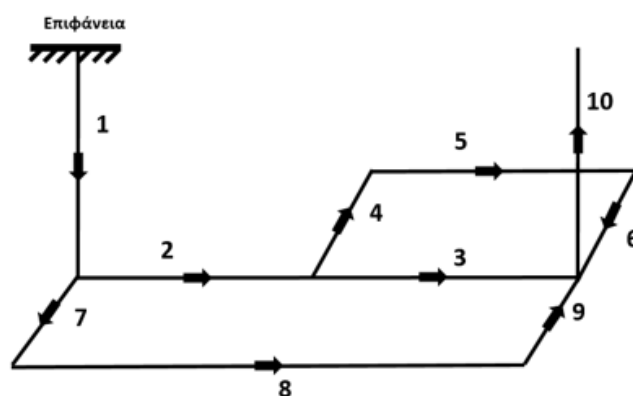
$$R_1 = 0.0559 \quad R_6 = 0.1453$$

$$R_2 = 0.1342 \quad R_7 = 0.1062$$

$$R_3 = 0.1118 \quad R_8 = 0.1677$$

$$R_4 = 0.0838 \quad R_9 = 0.1509$$

$$R_5 = 0.1399 \quad R_{10} = 0.0447$$



Σχήμα 7-21: Κύκλωμα αερισμού με παροχή $Q = 47.2 \text{ m}^3/\text{s}$

Οι αντιστάσεις για κάθε τμήμα του δικτύου είναι δοσμένες σε μονάδες Ns^2m^{-8} , που αντιπροσωπεύουν τις τριβές και τις απώλειες πίεσης λόγω της κίνησης του αέρα στο σύστημα.

Πρώτο βήμα είναι να υπολογιστούν οι αντιστάσεις συνολικά για κάθε τμήμα:

Η συνολική αντίσταση για το τμήμα a (R_a) προκύπτει ως άθροισμα των αντιστάσεων των κλάδων R_4, R_5, R_6 :

$$R_a = R_4 + R_5 + R_6 = 0.3686 \text{ Ns}^2\text{m}^{-8}$$

Ομοίως, για το τμήμα b (R_b), το οποίο περιλαμβάνει τις αντιστάσεις R_7, R_8, R_9 , ([Σχήμα 7-22α](#)):

$$R_b = R_7 + R_8 + R_9 = 0.4248 \text{ Ns}^2\text{m}^{-8}$$

Για το c (R_c), ([Σχήμα 7-22β](#)) χρησιμοποιείται ο τύπος για αντιστάσεις σε παράλληλη σύνδεση:

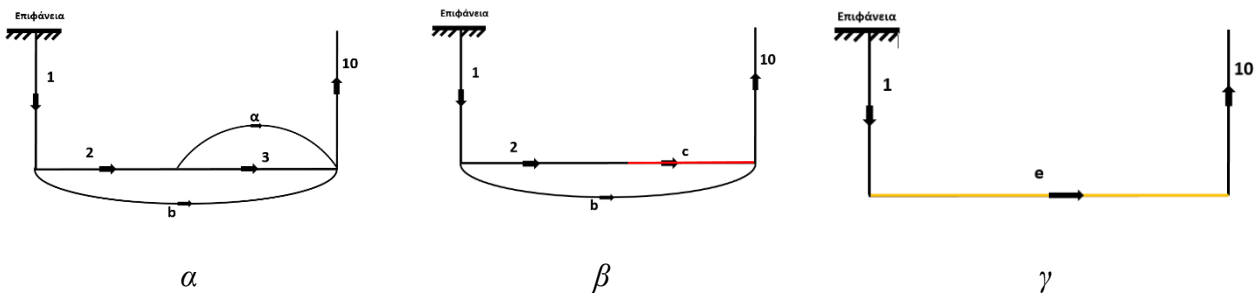
$$R_c = \frac{R_a \times R_3}{R_a + R_3} = 0.047 \text{ } Ns^2m^{-8}$$

Για το τμήμα d (R_d), το οποίο αποτελεί το άθροισμα της αντίστασης R_2 και R_c ισχύει:

$$R_d = R_2 + R_c = 0.1811 \text{ } Ns^2m^{-8}$$

Τέλος, η αντίσταση R_e (Σχήμα 7-22γ) από τη σύνδεση των R_b και R_d σε παράλληλη διάταξη υπολογίζεται ως εξής:

$$R_e = \frac{R_b \times R_d}{R_b + R_d} = 0.066 \text{ } Ns^2m^{-8}$$



Σχήμα 7-22: α, β, γ

Στη συνέχεια γίνεται ο υπολογισμός της συνολικής αντίστασης (R_f) του δικτύου γίνεται με το άθροισμα των αντιστάσεων R_1 , R_e και R_{10} :

$$R_f = R_1 + R_e + R_{10} = 0.1666 \text{ } Ns^2m^{-8}$$

Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της στατικής πίεσης που απαιτείται για τη ροή του αέρα υπολογίζεται με τον τύπο:

$$H = R_f \times Q^2 = 0.1666 \text{ } Ns^2m^{-8} \times (47.2)^2 \text{ } m^3/s = 371 \text{ } Pa$$

όπου $Q = 47.2 \text{ } m^3/s$ είναι η ροή αέρα στο δίκτυο.

Για τον υπολογισμό των επιμέρους παροχών σε κάθε τμήμα ακολουθείται η αντιστροφή σειρά σε σχέση με τον υπολογισμό των αντιστάσεων, σύμφωνα με τους κανόνες του Kickoff.

Στην συνολική αντίσταση R_f αντιστοιχεί η παροχή του κυκλώματος οπότε:

$$Q_1 = Q_f = Q_{10} = 47.2 \text{ } m^3/s$$

Για την αντίσταση R_e λήφθηκαν υπόψιν οι παράλληλες αντιστάσεις R_d και R_b συνεπώς ισχύει για τις αντίστοιχες παροχές, (Σχήμα 7-23α):

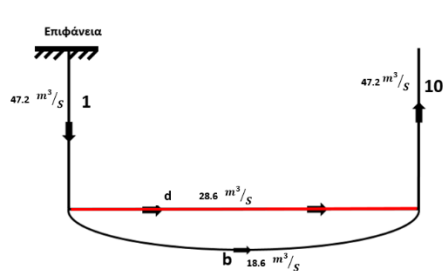
$$Q_b = Q_e \times \sqrt{\frac{R_e}{R_b}} = 47.2 \text{ m}^3/\text{s} \times \sqrt{\frac{0.066 \text{ N s}^2 \text{ m}^{-8}}{0.424 \text{ N s}^2 \text{ m}^{-8}}} = 18.6 \text{ m}^3/\text{s}$$

Ομοίως:

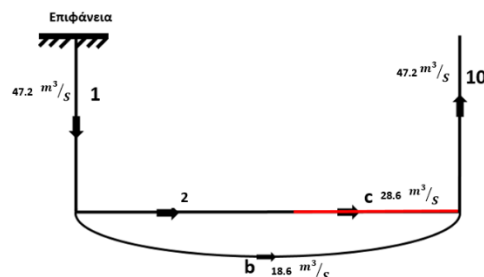
$$Q_d = Q_e \times \sqrt{\frac{R_e}{R_d}} = 47.2 \text{ m}^3/\text{s} \times \sqrt{\frac{0.066 \text{ N s}^2 \text{ m}^{-8}}{0.181 \text{ N s}^2 \text{ m}^{-8}}} = 28.6 \text{ m}^3/\text{s}$$

Κάτι που επαληθεύεται από τον πρώτο νόμο του Kirchhoff καθώς ισχύει:

$$Q_1 - Q_d - Q_b = 0 \text{ ή } 47.2 - Q_d - 18.6 = 0 \text{ ή } Q_d = 28.6 \text{ m}^3/\text{s}$$



α



β

Σχήμα 7-23: α, β

Λόγω σύνδεση σε σειρά, (Σχήμα 7-23β), ισχύουν ότι:

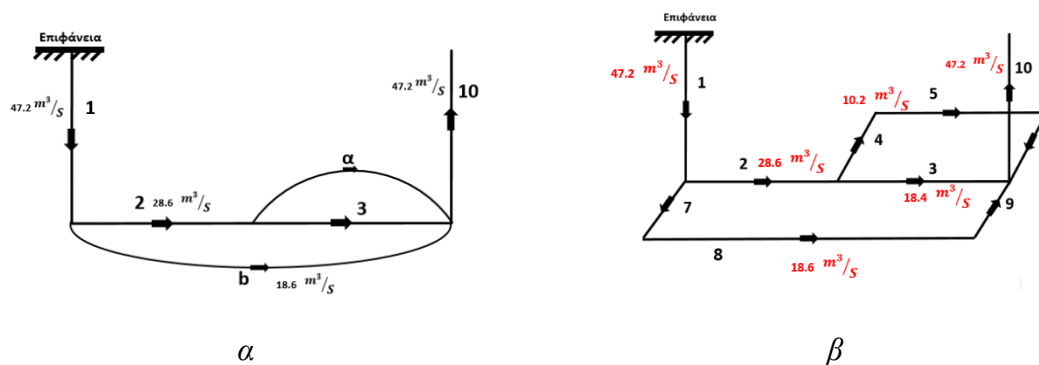
$$Q_2 = Q_c = Q_d = 28.6 \text{ m}^3/\text{s}$$

Το τμήμα c αποτελείται από τους παράλληλα σε σύνδεση τμήματα α και 3, Σχήμα 7-24α, οπότε ισχύει:

$$Q_\alpha = Q_c \times \sqrt{\frac{R_c}{R_\alpha}} = 28.6 \text{ m}^3/\text{s} \times \sqrt{\frac{0.047 \text{ N s}^2 \text{ m}^{-8}}{0.368 \text{ N s}^2 \text{ m}^{-8}}} = 10.2 \text{ m}^3/\text{s}$$

και:

$$Q_3 = Q_2 - Q_\alpha = \text{ ή } Q_3 = 28.6 - 10.2 \text{ ή } Q_3 = 18.4 \text{ m}^3/\text{s}$$



Σχήμα 7-24: α, β.

Το επόμενο βήμα είναι οι παροχές των σε σειρά συνδεδεμένων τμημάτων, [Σχήμα 7-24β](#):

$$Q_4 = Q_5 = Q_6 = Q_\alpha = 10.2 \text{ m}^3/\text{s}$$

και

$$Q_7 = Q_8 = Q_9 = Q_b = 18.6 \text{ m}^3/\text{s}$$

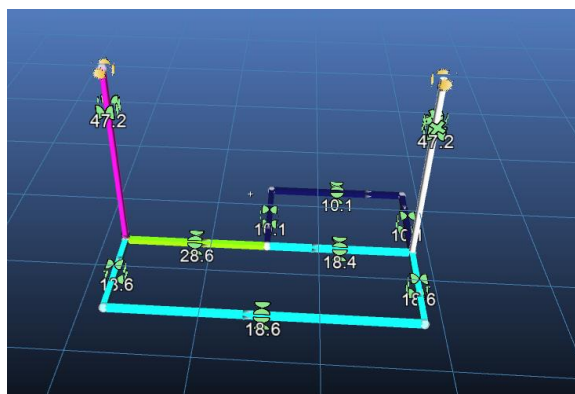
Οι απώλειες του κάθε τμήματος εύκολα μπορούν να υπολογιστούν ως εξής:

$$H_5 = R_5 \times Q_5^2 = 0.1399 \text{ N s}^2 \text{ m}^{-8} \times 104.04 \text{ m}^3/\text{s} = 14.55 \text{ Pa}$$

όπου είναι οι απώλειες στο τμήμα 5 του κυκλώματος, ομοίως για οποιοδήποτε άλλο τμήμα.

Με αυτόν τον τρόπο υπολογίστηκαν οι αντιστάσεις και οι παροχές σε κάθε τμήμα καθώς και η στατική πίεση του κυκλώματος.

Σύμφωνα με το πρόγραμμα προσομοίωσης, [Σχήμα 7-25](#), επιβεβαιώνονται οι υπολογισμοί μας.



Σχήμα 7-25: Απεικόνιση του κυκλώματος αερισμού στο λογισμικό.

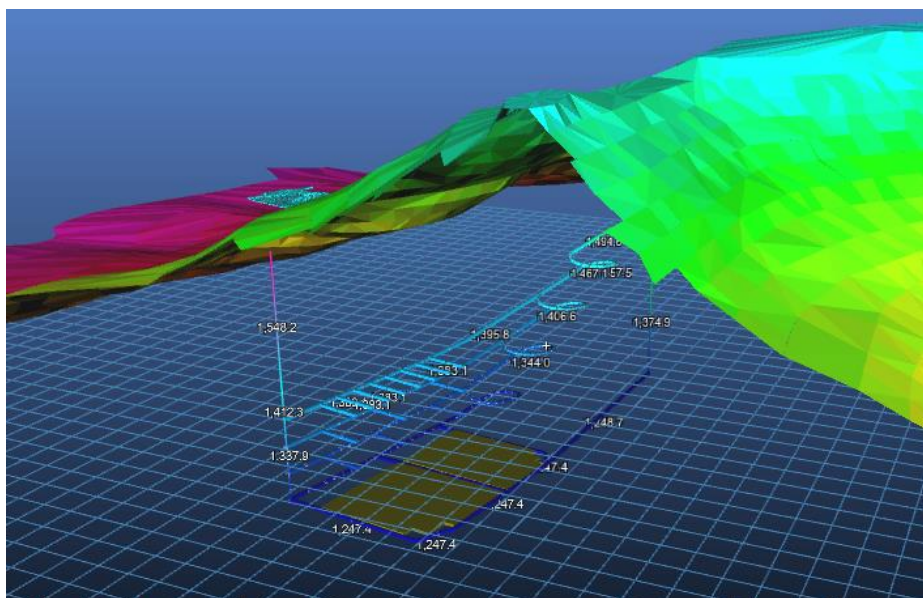
Και με βάση τα δεδομένα του συστήματος προτείνεται ένας ανεμιστήρας που θα ξεπερνάει τα 24.7 kW ώστε να καλύψει της ανάγκες του συγκεκριμένου δικτύου, καθώς και το αναμενόμενο ετήσιο κόστος αερισμού θα είναι περίπου 21,672 \$/έτος, [Σχήμα 7-26](#).

Air flow	47.2 m ³ /s @ 1.20 kg/m ³
Fix Flow Pressure	371.6 Pa Collar Total Pressure
Fix Flow Power	23.5 kW shaft, 24.7 kW electrical,
Fix Flow Cost	\$ 21,672 /yr

Σχήμα 7-26: Πληροφορίες προσομοιωτή

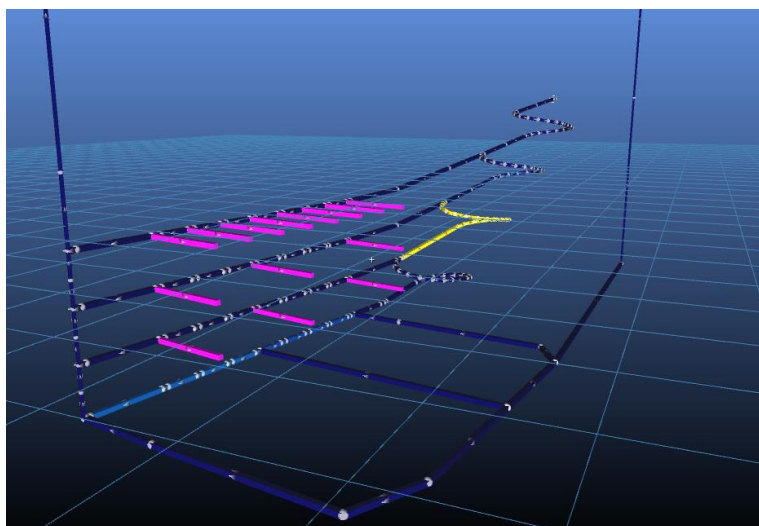
7.7 Αερισμός Μεταλλείου Panda

Για τη μοντελοποίηση του δικτύου αερισμού χρησιμοποιήθηκαν τα απαραίτητα στοιχεία, όπως τα χαρακτηριστικά των στοών, των εύκαμπτων αγωγών, τα συστήματα αερισμού, καθώς και ο μηχανολογικός εξοπλισμός του μεταλλείου. Η υποθετική εξόρυξη που λαμβάνει χώρα στην περιοχή αφορά βωξίτη, και τα κοιτάσματα θεωρούνται εξαιρετικής ποιότητας. Το δίκτυο αερισμού του μεταλλείου χαρακτηρίζεται ως ιδιαίτερα δύσκολο κάτι που οφείλεται και στο βάθος του μεταλλείου, γεγονός που είναι συχνό στα κυκλώματα αερισμού των εκμεταλλεύσεων βωξίτη. Στην ακόλουθη εικόνα, [Σχήμα 7-27](#), παρουσιάζεται ο τοπογραφικός χάρτης του μεταλλείου, ο οποίος απεικονίζει και το κύκλωμα αερισμού.



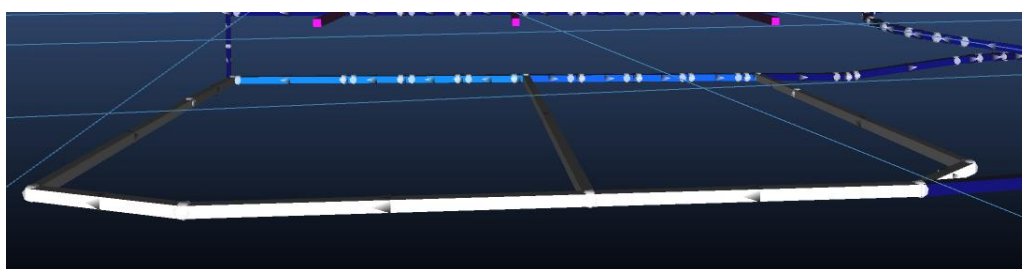
Σχήμα 7-27: Γενική εικόνα του μεταλλείου

Το μεταλλείο περιλαμβάνει αναμονές για στοές που αφορούν μελλοντικές εκμεταλλεύσεις και τη περιοχή στο τελευταίο επίπεδο όπου βρίσκεται τώρα η εκμετάλλευση. Αποτελείται από 3 φρέατα αερισμού εκ τω οποίου το ένα είναι η κύρια ράμπα φόρτωσης η οποία είναι κοινή και για τα προηγούμενα επίπεδα ([Σχήμα 7-28](#)). Στα επίπεδα των παλιών εκμεταλλεύσεων έχουν τοποθετηθεί ρυθμιστές ροής περιορίζοντας έτσι την ροή στους χώρους μη εκμετάλλευσης. Το συγκεκριμένο δίκτυο εισήχθη στο λογισμικό VentSim Design για την ανάπτυξη του τρισδιάστατου μοντέλου, συμπεριλαμβανομένης της ακριβούς τοποθέτησης των κύριων και βοηθητικών ανεμιστήρων και των ευκάμπτων αγωγών, όπως και της εισαγωγής των διαστάσεων και χαρακτηριστικών του κύριου και βοηθητικού δικτύου αέρα.



Σχήμα 7-28: Το δίκτυο αερισμού, με ροζ χρώμα είναι οι αναμονές μελλοντικών εκμεταλλεύσεων.

Ο αέρας διοχετεύεται μέσω της νέας εισόδου στοάς και, ακολουθώντας διαδρομή 697 μέτρων, φτάνει στο κεντρικό σημείο της περιοχής εξόρυξης, όπου και διανέμεται στις διάφορες θέσεις εργασίας. Στη συνέχεια, εξέρχεται από το μεταλλείο μέσω της κοινής στοάς και της ράμπας φόρτωσης, η οποία υποστηρίζεται από βοηθητικό σύστημα αερισμού. Συνολικά, το σύστημα αερισμού σε αυτή την φάση του μεταλλείου περιλαμβάνει κύριο δίκτυο στοών αερισμού μήκους 7.409,3 χιλιομέτρων και 1.151 χιλιόμετρα εύκαμπτων αγωγών. Ο μηχανολογικός εξοπλισμός του μεταλλείου περιλαμβάνει ένα Load Haul & Dump με ισχύ 401 hp, δύο μηχανήματα Jumbo για διάτρηση και υποστήριξη με ισχύ 260 hp, δύο φορτηγά μεταφοράς μεταλλεύματος με ισχύ 185 hp, καθώς και 14 άτομα εργατικό δυναμικό.



Σχήμα 7-29: Περιοχή εκμετάλλευσης, λευκό χρώμα.

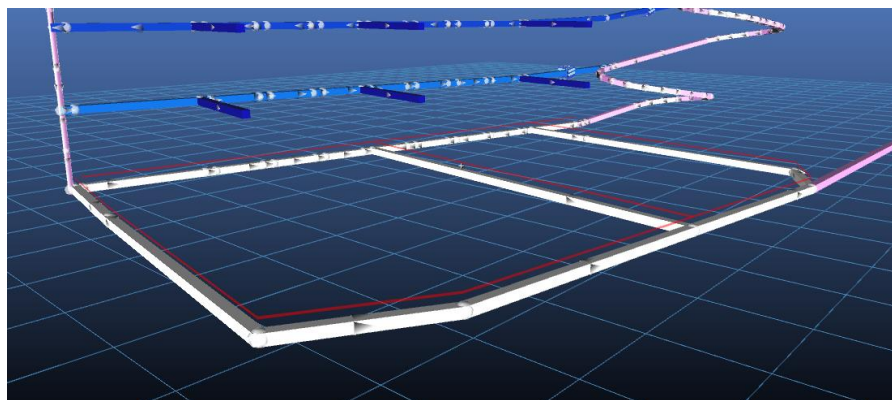
Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενα κεφάλαια για τις απαιτήσεις σε αέρα, για τον κάθε άνθρωπο απαιτείται $2 \text{ m}^3/\text{min}$ αέρας, ενώ για τις μηχανές με θερμικούς κινητήρες ντίζελ οι απαιτήσεις αέρα είναι σε $2,3 \text{ m}^3/\text{min}$ ανά έναν ίππο μηχανής.

Συνεπώς για το παραπάνω δυναμικό του μεταλλείου απαιτούνται

- $14 \text{ άτομα προσωπικό} = 14 \times 2 \text{ m}^3/\text{min} \approx 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$

- 1 LHD = $401 \times 2.3 \text{ m}^3/\text{min} \approx 15.4 \text{ m}^3/\text{s}$
- 2 Jumbo = $260 \times 2.3 \text{ m}^3/\text{min} \approx 9.7 \text{ m}^3/\text{s}$
- 2 φορτηγά = $185 \times 2.3 \text{ m}^3/\text{min} \approx 7.1 \text{ m}^3/\text{s}$

Το δυναμικό του μεταλλείου φαίνεται με το κόκκινο χρώμα στη περιοχή εκμετάλλευσης, [Σχήμα 7-29](#), βρίσκεται πάνω από το κύκλωμα για λόγους προβολής, [Σχήμα 7-30](#).



Σχήμα 7-30: Με το κόκκινο χρώμα η περιοχές που υπάρχει το δυναμικό, μηχανικός εξοπλισμός και προσωπικό.

Στην νέα στοά είναι τοποθετημένοι δυο κύριοι ανεμιστήρες, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι σε παράλληλη διάταξη μεταξύ τους, τροφοδοτώντας το σύστημα με συνολική παροχή αέρα ίση με $147.1 \text{ m}^3/\text{s}$ για την εξασφάλιση των λειτουργικών απαιτήσεων λαμβάνοντας υπόψη τους παραμέτρους από το δυναμικό του μεταλλείου. Επίσης, η αντίσταση του μεταλλείου, η οποία προκύπτει από την απώλεια αέρα για τη δεδομένη παροχή, υπολογίστηκε σε $0.07654 \text{ N s}^2/\text{m}^8$, [Σχήμα 7-31](#).

NETWORK SYSTEM SUMMARY	
Compressible Airflows	Yes
Natural Ventilation Pressure	Yes
Fan Pressure Simulation Type	Static Pressure Method
Stage	0:
Airways	200
Current Stage Segments	47
Total length	7,409.3 m
Total airflow intake	143.9 m ³ /s
Total airflow exhaust	147.1 m ³ /s
Total massflow	168.30 kg/s
Mine resistance (excluding duct)	0.07654 N s ² /m ⁸
Mine resistance (Including duct)	0.07654 N s ² /m ⁸

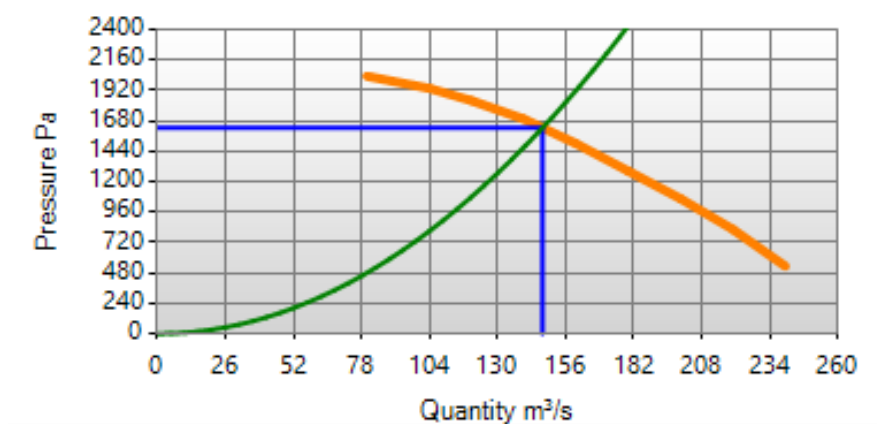
Σχήμα 7-31: Δεδομένα συστήματος.

Εκτός των παραπάνω, προσδιορίστηκε και το κόστος του συστήματος αερισμού, λαμβάνοντας υπόψιν μια προκαθορισμένη τιμή της κιλοβατώρας ίση με 0.10 \$/Kw, με το ετήσιο κόστος να ανέρχεται στα 334,217 \$/yr. εξαρτώμενο μόνο από την ενέργεια των δυο ανεμιστήρων των 381kW, Σχήμα 7-32.

POWER SUMMARY	
AIR (friction loss) Power	235.9 kW Total
	197.8 kW Shaft
	38.1 kW Drive
	0.0 kW Vent Duct
Refrigeration Power Input	0.0 kW
INPUT Power Electrical	381.5 kW
Network Annual Power Cost	\$ 334,217
Network Efficiency	61.8 %
Consisting of ..	
2 Fans	381.5 kW

Σχήμα 7-32: Πληροφορίες κόστους ενέργειας

Με βάση το συγκεκριμένο μοντέλο και σχεδιασμό του δικτύου, το σημείο λειτουργίας του συστήματος εκτιμάται στα 144,07 m³/s, Σχήμα 7-33



Σχήμα 7-33: Σημείο λειτουργίας του συστήματος

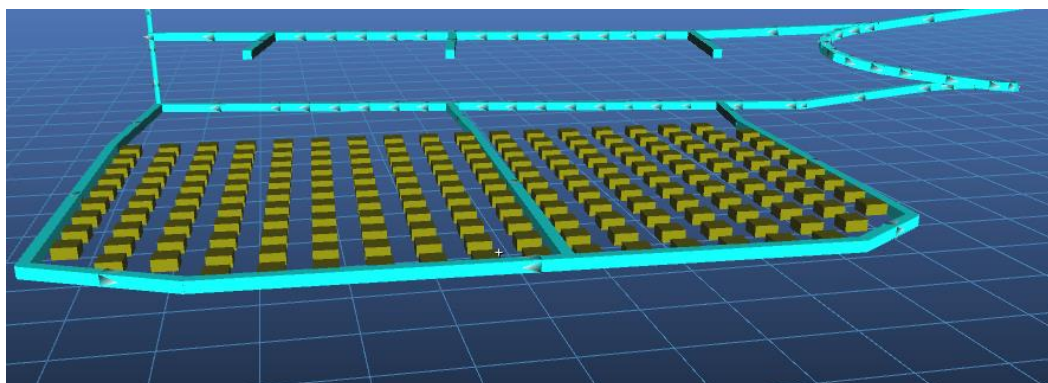
Τέλος έχοντας σχεδιάσει και μελετήσει το δίκτυο αερισμού με την βοήθεια του λογισμικού θα δοθεί μια προτεινόμενη αλλαγή στην εταιρία με μοναδικό σκοπό την μείωση του κόστους. Η πρόταση για την μείωση του κόστους που αναφέρει το λογισμικό έχει να κάνει με την κατασκευή της νέας στοάς αερισμού και πιο συγκεκριμένα με τις διαστάσεις της στοάς. Όπως φαίνεται στις εικόνες που ακολουθούν οι προτεινόμενες διαστάσεις της στοάς θα ήταν καλύτερο να είναι

διαμέτρου 3.5 m από ότι 3 m όπου έχει γίνει η μελέτη. Οι διαφορές έχουν να κάνουν με το συνολικό κόστος όπου για την υφιστάμενη διάμετρο ανέρχεται σε \$1,277,081, ενώ το προτεινόμενο σύστημα μειώνει αυτό το ποσό σε \$1,140,793, εξοικονομώντας \$136,288 (-10.67%). Η εξοικονόμηση αυτή προκύπτει κυρίως από τη μείωση του κεφαλαιακού κόστους του ανεμιστήρα κατά \$166,079 (-76.14%) και του κόστους ενέργειας κατά \$128,176 (-56.66%), παρότι το κόστος εξόρυξης αυξάνεται κατά \$157,967 λόγω της μεγαλύτερης διαμέτρου. Επιπλέον, το προτεινόμενο σύστημα μειώνει την κατανάλωση ενέργειας από 120.2 kW σε 52.1 kW, εξοικονομώντας 68.1 kW (-56.66%), ενώ η ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας φτάνει τα \$59,644, [Σχήμα 7-34](#).

Number Unique 11247 : , Length 225.1 m
3.0 m Diameter Current Size Dimensions
3.5 m Diameter Recommended Size Dimensions
Number Unique 11247 : , Length 225.1 m
Current life time cost for size: 3.0 m Diameter = 7.1 m ²
\$ 1,277,081 Total Cost which consists of
\$ 757,780 Mining Capital Cost = \$ 3,367 / m
\$ 120,188 Fan Capital Component
\$ 399,113 Power Cost (5 year) discounted : 120.2 kW
Recommended life time cost size: 3.5 m Diameter = 9.8 m ²
\$ 1,140,793 Total Cost which consists of
\$ 915,676 Mining Capital Cost = \$ 4,069 / m
\$ 52,101 Fan Capital Component
\$ 173,015 Power Cost (5 year) discounted : 52.1 kW
Potential Savings: \$ 136,288
\$ -157,897 Mining Capital Cost
\$ 68,087 Fan Capital Component
\$ 226,098 Power Cost (68.1 kW, 5 year) discounted
\$ 59,644 Annual Power Savings

Σχήμα 7-34: Προτεινόμενη αλλαγή για εξοικονόμηση

Με αυτό τον τρόπο οι μηχανικοί σχεδίασης των κυκλωμάτων αερισμού έχουν την δυνατότητα προσομοίωσης και βελτίωση του δικτύου έως ότου καταλήξουν στην μελέτη τους. Το [Σχήμα 7-35](#) που ακολουθεί δείχνει την εικόνα του μεταλλείου μετά την ολοκλήρωση όλης της εκμετάλλευσης.

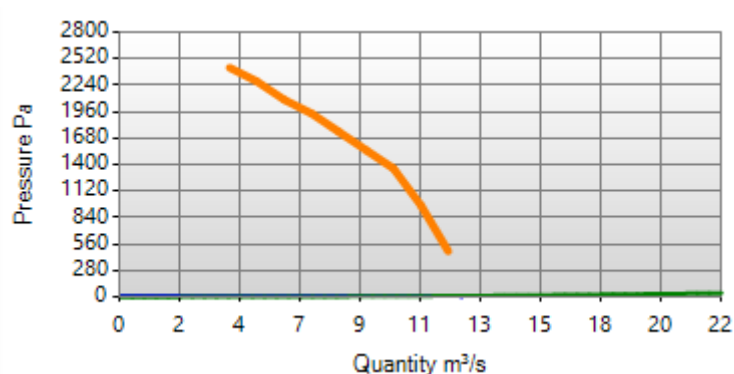


Σχήμα 7-35: Εικόνα μετά το πέρας της εκμετάλλευσης.

Όπως έχει προαναφερθεί η εφαρμογή του VentSim σε ένα μεταλλείο έχει ως σκοπό την μείωση του λειτουργικού κόστους του αερισμού του μεταλλείου αλλά και την εξασφάλιση κατάλληλων κλιματολογικών συνθηκών για την ασφαλή εργασία του προσωπικού.

Τα σενάρια που ακολουθούν είναι μια αξιολόγηση της ποσοτικής και ποιοτικής κατάστασης του αέρα σε περίπτωση πρώτων μειωμένης παροχής αέρα, η οποία θα προέρχεται από χαμηλότερης ισχύ ανεμιστήρα από ότι μελετήθηκε και δεύτερων ισχυρότερη παροχή αέρα από ότι χρειάζεται το δίκτυο με αντίστοιχο ανεμιστήρα.

Χρησιμοποιήθηκε εξαιρετικά χαμηλής ισχύς ανεμιστήρα τα αποτελέσματα είναι τα αναμενόμενα καθώς δεν ανταπεξέλθετε στις ανάγκες τους συστήματος παρόλο που το κόστος είναι ιδιαίτερα χαμηλό οι πιέσεις είναι εξαιρετικά χαμηλές και το δίκτυο δεν ανταπεξέρχεται, χαρακτηριστικό παράδειγμα δεν υπάρχει σημείο λειτουργίας του συστήματος με βάση αυτά τις ανάγκες και παροχές, [Σχήμα 7-36](#). Η παροχή θα είναι ίση με $12.5 \text{ m}^3/\text{s}$ και η απώλεια πίεσης 14 Pa με αντίσταση συστήματος στα $0.08980 \text{ N s}^2/\text{m}^8$.



Σχήμα 7-36: Σημείο λειτουργίας συστήματος χαμηλής ισχύς ανεμιστήρα

Με την διοχέτευση παραπάνω παροχής στο δίκτυο από ότι χρειάζεται, τοποθετώντας μεγαλύτερη ισχύς ανεμιστήρων και επιπλέον σύστημα βοηθητικού αερισμού το αποτέλεσμα από την προσομοίωση είχε να κάνει με την διαφορά κόστους η οποία παρατηρήθηκε μια αύξηση της τάξης 70% σε σχέση με την αρχική μελέτη, όσον αφορά το σημείο λειτουργίας θα υπάρχει σε αυτή την περίπτωση ένα σχετικά καλό σημείο για το λόγο ότι δεν υπερφορτώνεται το σύστημα.

Κεφάλαιο 8: Προσομοίωση Ακραίων Φαινομένων

Το VentSim προσφέρει τη δυνατότητα ανάπτυξης ακραίων σεναρίων προσομοίωσης για ποικίλα φαινόμενα, όπως οι πυρκαγιές και οι διαρροές τοξικών αερίων, καθώς και σενάρια για τη σύγκριση της απόδοσης και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μεταξύ οχημάτων ντίζελ και ηλεκτρικών οχημάτων σε υπόγεια ορυχεία τα οποία είναι κρίσιμα για την αποτελεσματική διαχείριση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης σε υπόγειες εξορύξεις. Αυτές οι προσομοιώσεις επιτρέπουν στους μηχανικούς αερισμού να αξιολογήσουν την απόδοση του συστήματος αερισμού σε εξαιρετικές ή απρόβλεπτες συνθήκες και να λάβουν κατάλληλα προληπτικά και διορθωτικά μέτρα.

8.1 Πυρκαγιές σε Υπόγεια Ορυχεία:

Σενάρια διάδοσης πυρκαγιάς: Το VentSim έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει την εξάπλωση της φωτιάς σε υπόγεια περιβάλλοντα, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η διασπορά του καπνού, οι θερμοκρασίες και οι επιπτώσεις στην ποιότητα του αέρα. Μπορεί να απεικονίσει την εξάπλωση της φωτιάς από το σημείο ανάφλεξης, όπως σε περίπτωση πυρκαγιάς οχήματος ή ηλεκτρικού εξοπλισμού, και να αξιολογήσει τις επιπτώσεις στις ροές αέρα και τη διαδικασία εκκένωσης των εργαζομένων.

Ανάλυση καπνού και τοξικών αερίων: Κατά την πυρκαγιά, το λογισμικό μπορεί να προσομοιώσει την εξάπλωση τοξικών αερίων, όπως μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), επιτρέποντας την ανάπτυξη στρατηγικών καταπολέμησης και εκκένωσης. Το σενάριο αυτό είναι κρίσιμο για την προετοιμασία σχεδίων εκτάκτου ανάγκης.

8.2 Διαρροή Τοξικών Αερίων ή Εκρηκτικών Φαινομένων

Διαρροή μεθανίου: Μπορεί να προσομοιώσει τη διαρροή μεθανίου από ένα σημείο και να αναλύσει τη συγκέντρωση του αερίου σε διάφορα σημεία του ορυχείου. Αυτά τα σενάρια είναι σημαντικά για την πρόληψη εκρήξεων που σχετίζονται με το μεθάνιο.

Έκρηξη μεθανίου: Το λογισμικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσομοιώσει τις επιπτώσεις μιας έκρηξης που προκύπτει από υψηλή συγκέντρωση μεθανίου, εξετάζοντας τη διάδοση των ωστικών κυμάτων, τη μεταβολή των συνθηκών αερισμού, και τις επιπτώσεις στην υποδομή του ορυχείου.

8.3 Σύγκριση Ντίζελ και Ηλεκτρικών Οχημάτων

8.3.1 Εκπομπές και Ποιότητα Αέρα

Συγκρίνοντας τα σενάρια αερισμού σε υπόγεια ορυχεία όταν χρησιμοποιούνται οχήματα ντίζελ έναντι ηλεκτρικών οχημάτων, καταλαβαίνουμε ότι τα οχήματα ντίζελ παράγουν μεγάλες ποσότητες σωματιδίων αιθάλης και τοξικών αερίων, όπως μονοξείδιο του άνθρακα (CO), διοξείδιο του αζώτου (NO₂), και διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Το λογισμικό μπορεί να προσομοιώσει τη συγκέντρωση αυτών των αερίων και να εξετάσει πόσο γρήγορα τα συστήματα αερισμού μπορούν να απομακρύνουν τα αέρια αυτά από το ορυχείο.

Αντίθετα, τα ηλεκτρικά οχήματα δεν παράγουν άμεσα τοξικά αέρια. Το VentSim μπορεί να δείξει πώς η χρήση ηλεκτρικών οχημάτων μειώνει τις απαιτήσεις αερισμού και κατ' επέκταση την κατανάλωση ενέργειας, καθώς δεν χρειάζεται να απομακρυνθούν οι ρύποι που παράγονται από τα οχήματα ντίζελ.

8.3.2 Θερμότητα και Ενεργειακή Κατανάλωση

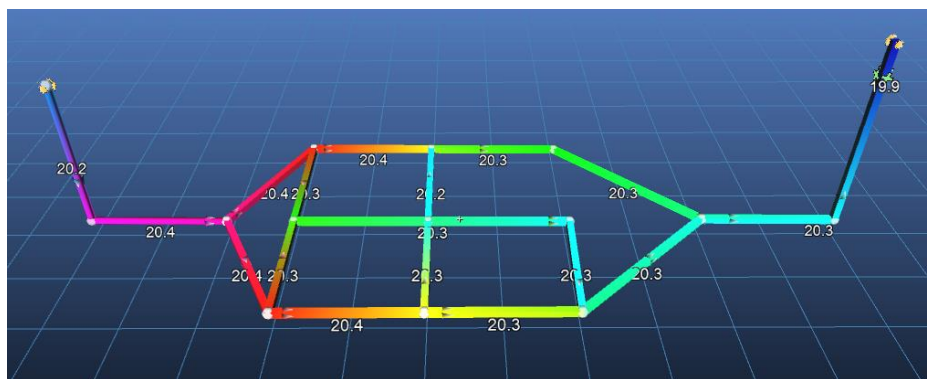
Τα οχήματα ντίζελ παράγουν σημαντική ποσότητα θερμότητας κατά τη λειτουργία τους, γεγονός που μπορεί να αυξήσει τις θερμοκρασίες σε ένα ορυχείο. Η προσομοίωση μπορεί να δείξει πώς τα ηλεκτρικά οχήματα μειώνουν τη θερμότητα που παράγεται, μειώνοντας τις ανάγκες ψύξης και αερισμού.

Η ενεργειακή κατανάλωση μπορεί επίσης να συγκριθεί. Τα ηλεκτρικά οχήματα ενδέχεται να έχουν χαμηλότερο κόστος λειτουργίας και να απαιτούν λιγότερη ενέργεια για την ψύξη και τον αερισμό, σε σύγκριση με την ενέργεια που καταναλώνεται για την απομάκρυνση της θερμότητας και των ρύπων που παράγονται από τα οχήματα ντίζελ.

8.4 Προσομοίωση Πηγής Θερμότητας και Θερμοδυναμικών

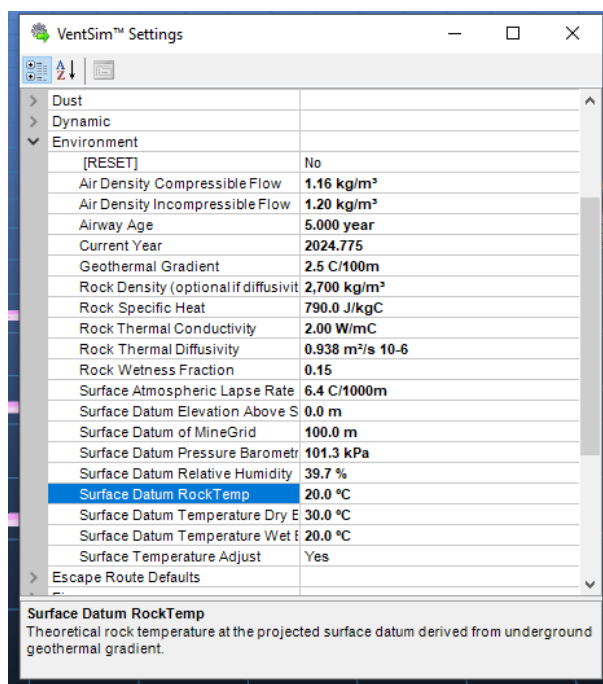
Εισροών

Σε ένα μοντέλο ενός υπογείου ([Σχήμα 8-1](#)) θα γίνει προσομοίωση πρόσθεσης μιας θερμικής πηγής και επιπλέον αύξηση θερμοκρασίας από την λειτουργία ενός οχήματος ντίζελ με σκοπό την παρατήρηση στην αλλαγή της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Το λογισμικό μπορεί να καθορίσει τα απαιτούμενα θερμικά φορτία για τον κλιματισμό του αέρα από τη μία κατάσταση στην άλλη.



Σχήμα 8-1: Θερμοκρασίες χωρίς κάποια πηγή θέρμανσης

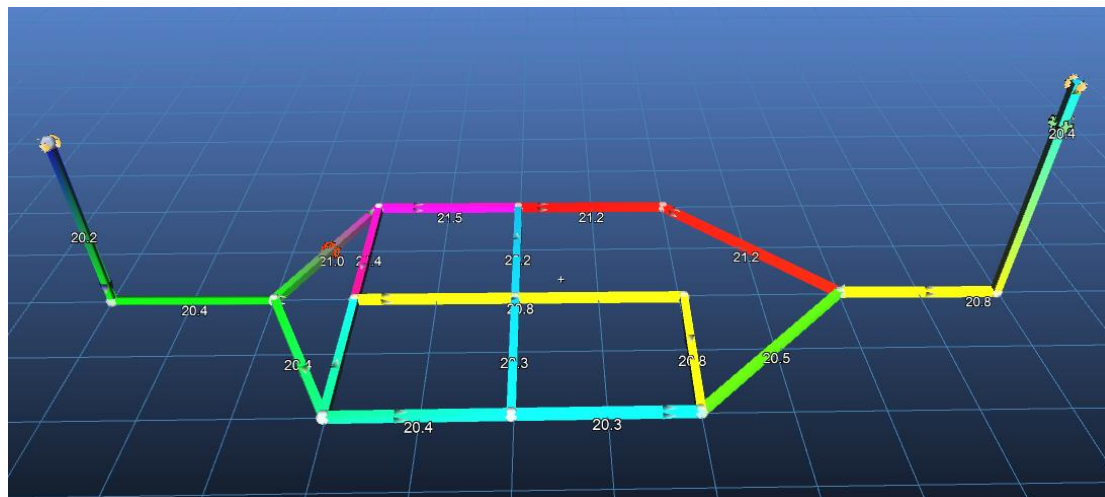
Πριν από την εισαγωγή μιας πηγής θερμότητας, απαιτείται ο έλεγχος και η επεξεργασία των παραμέτρων που σχετίζονται με το περιβάλλον του υπογείου. Τα πιο σημαντικά από αυτά είναι η θερμοκρασία του τοιχώματος, όπου είναι στους 20°C, καθώς και η συγκέντρωση αέρα της ασυμπίεστης ροής όπου είναι 1.20 kg/m³, (Σχήμα 8-2).



Σχήμα 8-2: Παράμετροι περιβάλλοντος

Λαμβάνοντας υπόψιν ότι η θερμότητα κατανέμεται ανά μονάδα μήκους, κατά μήκους του αγωγού δηλαδή, το τμήμα που επιλέχτηκε να τοποθετηθεί η μονάδα θέρμανσης

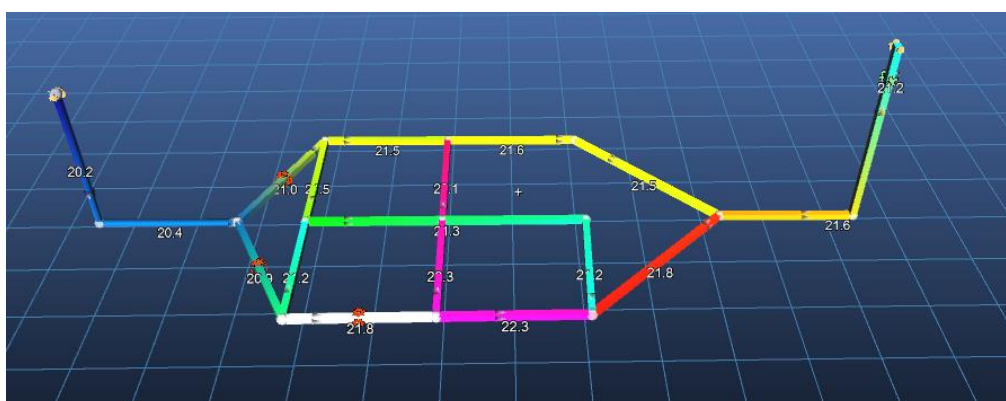
βρίσκεται στα 113.9 m μακριά από την είσοδο του υπογείου, κάτι που σημαίνει ότι για 500 kW που υπάρχουν στο δίκτυο αντιστοιχούν 2278 W/m, [Σχήμα 8-3](#).



Σχήμα 8-3: Εισαγωγή πηγή θέρμανσης στο τμήμα 2.

Λόγω του μικρού μοντέλου τόσο σε διαστάσεις όσο και σε βάθος στο οποίο γίνεται η προσομοίωση δεν παρατηρούνται τόσο ακραίες χαμηλές θερμοκρασίες και συνεπώς οι μεταβολές μετά την τοποθέτηση πηγών θέρμανσης δεν θα είναι μεγάλες, όμως σε μεγαλύτερα υπόγεια όπου το βάθος τους είναι αρκετά μεγάλο και επικρατούν πολύ ψυχρές θερμοκρασίες οι μεταβολές στην θερμοκρασία είναι αισθητές.

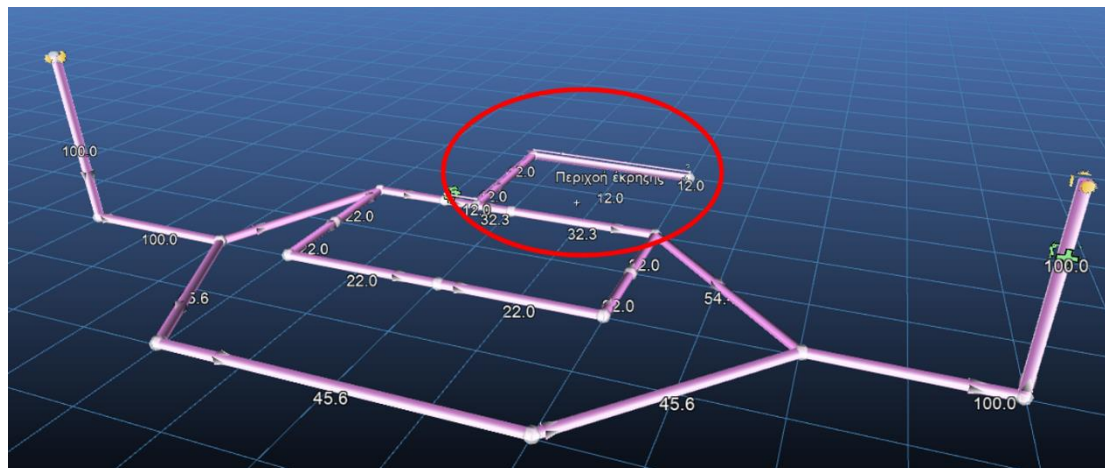
Αντίστοιχος τρόπος υπολογισμού αλλαγή θερμοκρασίας μπορεί να προέλθει και από τους ντίζελ κινητήρες των οχημάτων, για όχημα με 200kW το οποίο κινείται στον απέναντι κλάδο 110.9 m από την αρχή του υπογείου υπολογίζεται 1,804 W/m με αποτέλεσμα να αλλάζει η θερμοκρασία στην συνέχεια του υπογείου, [Σχήμα 8-4](#).




Σχήμα 8-4: Επιπλέον πηγές θέρμανσης

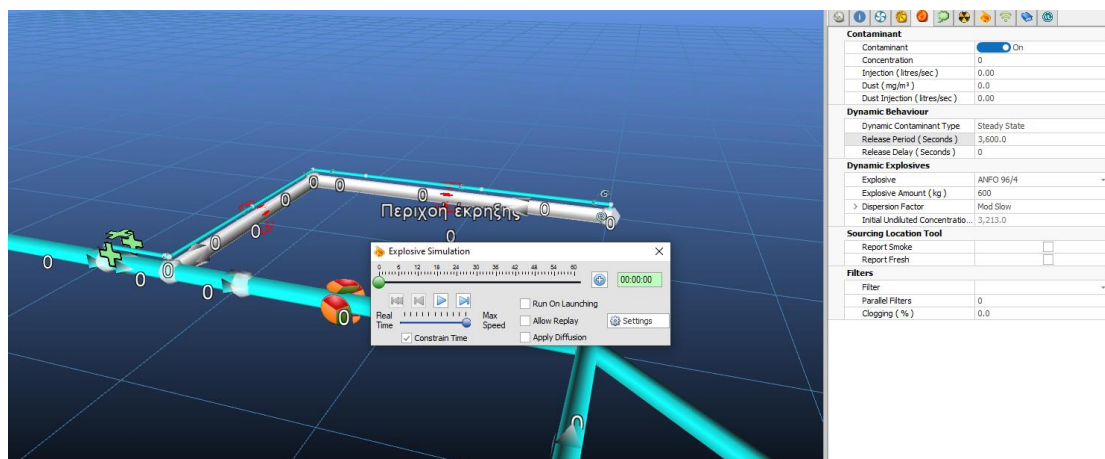
8.5 Προσομοίωση Έκρηξης

Σε ένα υπόγειο μεταλλείο για την προχώρηση της παραγωγής απαιτείται η διάνοιξη νέων στοών, επιλέχθηκε η περιοχή έκρηξης όπως φαίνεται στο παρακάτω, [Σχήμα 8-5](#).



Σχήμα 8-5: Περιοχή έκρηξης

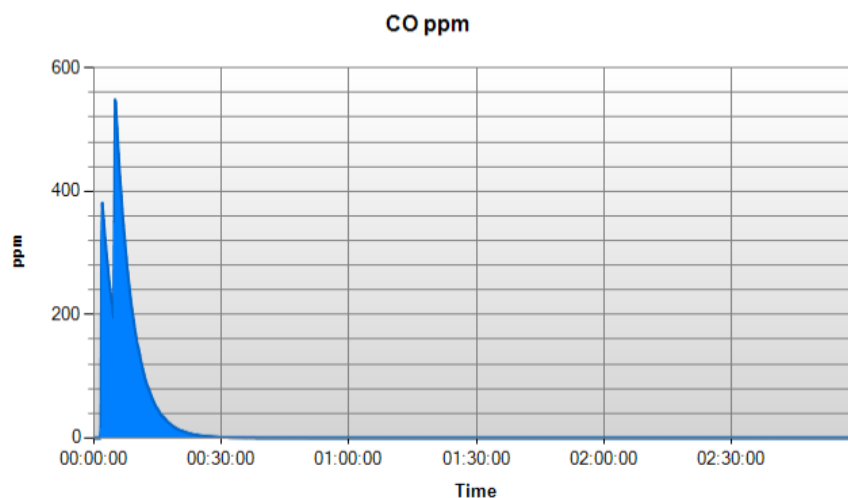
Σκοπός της προσομοίωσής είναι να μετρηθεί η συγκέντρωση CO που θα παραχθεί από την έκρηξη, για τον λόγο αυτό τοποθετείται ένας αισθητήρας μέτρησης ρύπων (monitor contaminate ) , ο αισθητήρας αυτός τοποθετείται στην απέναντι στοά για να καταγράψει όλη την διάρκεια της έκρηξης και ορίζεται να καταγράφει τις συγκεντρώσεις για 3 ώρες μετά της έκρηξης, [Σχήμα 8-6](#).



Σχήμα 8-6: Περιοχή αισθητήρα

Επιλέχθηκε να γίνει χρήση ANFO 96/4 με συνολική ποσότητα 600 kg, μετά την προσομοίωση θέλουμε να ξέρουμε εάν εντοπίζεται ακόμα συγκέντρωση CO. Η τρίωρη

προσομοίωση θα δώσει ένα διάγραμμα [Σχήμα 8-7](#), συγκέντρωσης σε συνάρτηση με το χρόνο μετά την έκρηξη με ακρίβεια δευτερόλεπτου.



Σχήμα 8-7: Διάγραμμα Συγκέντρωση CO – Χρόνου κατά την διάρκεια της τρίωρης καταγραφής

Το διάγραμμα καταγράφει τη συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) μετά την έκρηξη. Αρχικά, παρατηρείται απότομη αύξηση της συγκέντρωσης, η οποία φτάνει σε υψηλά επίπεδα. Στη συνέχεια, η συγκέντρωση μειώνεται σταθερά, υποδεικνύοντας ότι το σύστημα αερισμού λειτούργησε αποτελεσματικά, μειώνοντας τους ρύπους μέσα στα πρώτα 30 λεπτά.

Κεφάλαιο 9: Συμπεράσματα – Προτάσεις

Η σημασία της κατάλληλης σχεδίασης ενός συστήματος αερισμού αποκτά σημαντικό χαρακτήρα στην εξόρυξη μεταλλευμάτων, καθότι η ποιότητα του υπογείου μικροκλίματος επηρεάζει άμεσα την ασφάλεια καθώς και την αποτελεσματικότητα της εργασίας.

Η μελέτη που αφορά τη χρήση του VentSim για την ανάλυση του αερισμού σε υπόγειες στοές έχει αποκαλύψει σημαντικά ευρήματα σχετικά με την αποτελεσματικότητα των υπολογιστικών μοντέλων. Στην εν λόγω ανάλυση, τα πορίσματα έδειξαν ότι η εφαρμογή του VentSim μπορεί να περιορίσει δραστικά το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την εκτίμηση των απαιτήσεων αερισμού, προσφέροντας ταυτόχρονα ακριβέστερα αποτελέσματα. Ιδιαίτερα εντυπωσιακό είναι το γεγονός ότι οι προσομοιώσεις της ροής αέρα, υπό διαφορετικές συνθήκες και παράγοντες, ανέδειξαν την ευελιξία του λογισμικού στη διαμόρφωση συστημάτων αερισμού προσαρμοσμένων σε ποικίλες περιβαλλοντικές καταστάσεις.

Συμπερασματικά, όσον αφορά την εκμετάλλευση στο 7^ο κεφάλαιο η σύγκριση μεταξύ του υφιστάμενου συστήματος αερισμού (διάμετρος 3.0 m) και του προτεινόμενου (διάμετρος 3.5 m) υποδεικνύει σημαντικές δυνατότητες βελτιστοποίησης, τόσο οικονομικά όσο και περιβαλλοντικά. Η συνολική μείωση του κόστους λειτουργίας του μεταλλείου κατά \$136,288 (-10.67%) αναδεικνύει τη δυνατότητα μείωσης των λειτουργικών εξόδων, ιδιαίτερα μέσω της μείωσης του κεφαλαιακού κόστους του ανεμιστήρα (-76.14%) και της κατανάλωσης ενέργειας (-56.66%). Από περιβαλλοντικής πλευράς, η χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας (52.1 kW έναντι 120.2 kW) συνεπάγεται μικρότερο ανθρακικό αποτύπωμα, καθώς οι απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια είναι μειωμένες. Επιπλέον, η μείωση του κόστους ενέργειας κατά \$128,176 πενταετίας και η ετήσια εξοικονόμηση \$59,644 αποδεικνύουν ότι η συγκεκριμένη αλλαγή μπορεί να συμβάλει στη βιωσιμότητα του συστήματος, ενώ περιορίζει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την κατανάλωση ενέργειας σε υπόγειες εγκαταστάσεις.

Για τη συνέχεια αυτής της έρευνας, θα μπορούσε να δοθεί έμφαση στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης μέσω περαιτέρω ανάλυσης των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών του δικτύου, με στόχο τη μείωση των απωλειών πίεσης και την επιλογή ακόμα πιο αποδοτικών ανεμιστήρων. Επιπλέον, η διερεύνηση της δυνατότητας

ενσωμάτωσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως ηλιακής ή αιολικής, θα μπορούσε να μειώσει περαιτέρω το ανθρακικό αποτύπωμα του συστήματος. Παράλληλα, είναι σημαντικό να γίνει μια περιβαλλοντική εκτίμηση, η οποία θα αξιολογεί τη συνολική μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα λόγω της εξοικονόμησης ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της επέκτασης της στοάς. Μια άλλη ενδιαφέρουσα προοπτική θα ήταν η ανάπτυξη προσαρμοσμένων μοντέλων μηχανικής μάθησης, τα οποία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τη δυναμική παρακολούθηση και βελτιστοποίηση της λειτουργίας του αερισμού, λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους όπως η ποιότητα του αέρα, οι απαιτήσεις σε ενέργεια και οι οικονομικοί στόχοι.

Η εργασία αυτή προσφέρει μια ολοκληρωμένη μελέτη στις βασικές αρχές και τεχνικές του αερισμού μεταλλείων, αναλύοντας από τη θεωρία της ροής αέρα και τη σημασία των πηγών αερίων, έως τις εφαρμογές κυκλωμάτων αερισμού σε περιβάλλον προσομοίωσης. Μέσα από την ιστορική αναδρομή και την εξέταση των υπαρχόντων συστημάτων, διαφαίνεται η εξέλιξη των μεθόδων αερισμού και οι αυξανόμενες απαιτήσεις ασφάλειας και αποδοτικότητας. Η χρήση σύγχρονων λογισμικών, όπως το VentSim, επιτρέπει την ακριβή αναπαράσταση και βελτιστοποίηση των κυκλωμάτων αερισμού, ειδικά σε περιπτώσεις ακραίων συνθηκών ή ανάγκης για ενισχυμένο αερισμό. Τα σενάρια προσομοίωσης ακραίων φαινομένων υπογραμμίζουν τη σημασία της προετοιμασίας για επικίνδυνες καταστάσεις, διασφαλίζοντας ότι τα μεταλλεία μπορούν να λειτουργούν με μέγιστη ασφάλεια. Επομένως, η εργασία αυτή συμβάλλει ουσιαστικά στη γνώση και κατανόηση του αερισμού στα μεταλλεία, παρέχοντας θεωρητικές βάσεις και πρακτικές εφαρμογές που μπορούν να υποστηρίξουν τη βιώσιμη και ασφαλή εκμετάλλευση των μεταλλευτικών πόρων.

Βιβλιογραφία

https://www.researchgate.net/figure/Figure1-3-Illustration-of-various-riser-exit-geometries-1-L-elbow-2-T-elbow-3_fig2_294735888 [accessed 6 Dec 2024]. [Ηλεκτρονικό]

“ABB Smart Ventilation - International Mining Engineer August 2024.” Abb.com, 2024, search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK108469A9485&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch. . **MAGAZINE, ABB. 2024.** 2024.

“ABB Smart Ventilation - International Mining Engineer August 2024.” Abb.com, 2024, search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK108469A9485&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch. Accessed 6 Dec. 2024.

“ABB Smart Ventilation - International Mining Engineer August 2024.” Abb.com, 2024, search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK108469A9485&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch. Accessed 6 Dec. 2024.

Academies. 2002. *Evolutionary and Revolutionary Technologies for Mining.* s.l. : National Research Council, Committee on Earth Resources, Board on Earth Sciences and Resources, National Materials Advisory Board, Committee on Technologies for the Mining Industries, 2002. Academies Press.

Boanta, C. 2020. *Analysis of the ventilation network specific to the Lonea Mining,*. Romania : INSEMEX Publishing House, Petrosani, 2020. pp. 24-179.

Brodny, J. and Tutak, M. 2021. Applying computational fluid dynamics in research on ventilation safety during underground hard coal mining: A systematic literature review. *Process Safety and Environmental Protection.* 2021, Vol. 151, pp. 373-400.

Burgess, William A., Ellenbecker, Michael J. and Treitman, Robert D. 2004. *Ventilation for Control of the Work Environment.* s.l. : John Wiley & Sons, 2004.

Chen, X., et al. 2023. Ventilation and cooling of coal mining face based on CFD model optimization. *Process Safety and Environmental Protection.* 2023, Vol. 172, pp. 764-777.

Duckworth, I. J and S, Lowndes. I. 2003. Modelling of Auxiliary Ventilation Systems. *Mining Technology.* 2003, Vol. 112, 2, pp. 105–113.

Dzwiti, Kudakwashe. 2017. *Modelling of the ventilation system using ventsim considering the full mine mechanization drive at Konkola copper mines.* s.l. : University of Zambia, 2017. Thesis.

Fadli, Ashri. 2024. “Chapter 1: Mine Ventilation – an Overview a BRIEF HISTORY of MINE VENTILATION.” Wwww.academia.edu, www.academia.edu/33055359/Chapter_1_Mine_Ventilation_An_Overview_A_BRIEF_HISTORY_OF_MINE_VENTILATION. 2024.

Feng, Zhanjie, et al. 2023. Integrated Mining and Reclamation Practices Enhance Sustainable Land Use: A Case Study in Huainan Coalfield, China. *Land.* 2023, Vol. 12, 11.

Gao, R., et al. 2021. Truncation method for calculating the resistance of ventilation air-conditioning duct systems under nonfully developed flow boundary conditions. *Building Simulation.* 2021, Vol. 14, 4.

- Goodfellow, Howard D. and Yi, Wang. 2021.** Industrial Ventilation Design Guidebook. *Academic Press*. 2021.
- Grozdanic, M., Marjanovic, D. and Ilic, M. 2024.** Framework for ergonomic design of control centres in underground coal mines - A Serbian experience. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2024, Vol. 124, pp. 279-284.
- Gyamfi, Seth. 2020.** *Considerations and Development of a Ventilation on Demand System in Konsuln Mine*. 2020.
- Hall. 1981.** *Mine Ventilation Engineering*. New York : Society of Mining Engineers of The American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc., 1981.
- Hall, C. 1981.** *Mine Ventilation Engineering*. New York : Society of Mining Engineers of The American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc., 1981.
- Hartman, H. L., Mutmanský, J. M. and Wang, Y. J. 1982.** *Mine Ventilation and Air Conditioning*. 2nd Edition,. s.l. : John Wiley and sons, 1982.
- Hartman, Howard L., Ramani, R. V. and Mutmanský, Jan M. . 1997.** *Mine ventilation and air conditioning*. third edition . s.l. : Wiley Interscience, 1997.
- Hoover, H.C and Hoover, L.H. 1950.** *Georgius Agricola, De Re Metallica; Translated from 1556*. New York, USA, : Dover Publications Inc., 1950.
- Howden. 2023.** Howden, "VentSim DESIGN™ User Guide", Howden. 2023.
- Ihsan, Ahmad, et al. 2024.** Ventilation on demand in underground mines using neuro-fuzzy models: Modeling and laboratory-scale experimental validation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2024, Vol. 133.
- Kahuluda, Evarist M and Makundi, Ismael N. 2016.** Determination of radon gas and respirable ore dust concentrations in the underground merelani Tanzanite mines. *African Journals Online*. 2016.
- Karacan, C.Ö. 2023.** Predicting methane emissions and developing reduction strategies for a Central Appalachian Basin, USA, longwall mine through analysis and modeling of geology and degasification system performance. *International Journal of Coal Geology*. 2023, Vol. 270.
- Krawczyk, Jerzy. 2012.** Profile as a tool used in the process of recruitment and selection of mine workforce of Mining Geoengineering Measures Reducing the Risk Arising from Dust in. 2012.
- Li, Xinfang and Huo, Hua. 2023.** Prediction of PM2.5 Concentration Based on CNN-BiGRU Model. *Academic Journal of Science and Technology*. 2023, Vol. 5, 3, pp. 1-8.
- Machado, H.G. 2011.** *Gestão de riscos em minas subterrâneas : avaliação da ventilação em minas profundas*. Ouro Preto : Universidade Federal de Ouro Preto, 2011. Thesis.
- MAGAZINE, ABB.** "ABB Smart Ventilation - International Mining Engineer August 2024." Abb.com, 2024, search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK108469A9485&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch. .

Matambo, Farai. 2024. P-287 Occupational Safety and Health in Small Scale Mining: A Case of Informal Artisanal Miners in Mount Darwin, Zimbabwe. *Occupational Medicine*. 2024, Vol. 74, 1.

Mathioudakis, S., et al. 2023. Alluvial Gold Mining Technologies from Ancient Times to the Present. *Mining*. 2023, Vol. 3, 4, pp. 618-644.

Mc Pherson, M. 1993. *Subsurface Ventilation and Environmental Engineering*. s.l. : Chapman and Hall, 1993.

McPherson. 1993. *McPherson, Malcolm J. Subsurface Ventilation and Environmental Engineering*. Dordrecht, Springer Netherlands. 1993.

Menéndez, J., et al. 2023. Auxiliary Ventilation Systems in Mining and Tunnelling: Air Leakage Prediction and System Design to Optimize the Energy Efficiency and Operation Costs. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2023, Vol. 140, p. 1052.

peodetection.com. <https://peodetection.com/fr/flux-et-controle-environnemental/alphaguard-radon-monitor-bertin-peo-medical/>.

Ponce Estrada, Víctor A. and Huaraya Manzano, Elvis J. 2023. Planificación del sistema de ventilación y diseño 3D a largo plazo con el software 3D ventsim, caso Mina Santander – Glencore. *Memoria Investigaciones en Ingeniería*. 2023.

Sandström, Gösta. 1963. *The History of Tunnelling: Underground Workings Through the Ages*. London : Barrie and Rockliff, 1963.

Santos, R.C.P, et al. 2022. Development of a Low-Cost Device for Monitoring Ventilation Parameters (Temperature, Humidity and Pressure) in Underground Environments to Increase Operational Safety Using IoT. *Mining*. 2022, Vol. 2, 4.

Sherburne, Rogers Gaillard. 2022. *Helium-bearing Natural Gas*. s.l. : Legare Street Press, 2022.

Suvar, M., et al. 2012. Advanced Software for Mine Ventilation Networks Solving. *Environmental Engineering and Management Journal*. 2012, Vol. 11, 7, pp. 1235-1239.

Tang, Wenxuan, et al. 2024. An intelligent airflow perception model for metal mines based on CNN-LSTM architecture. *Process Safety and Environmental Protection*. 2024, Vol. 187, pp. 1234-1247.

Wang, P., et al. 2014. Research and application of controlled circulating ventilation in deep mining. *Procedia Engineering*. 2014, Vol. 84, pp. 758-766.

Wu, Hsin Wei, Gillies, A. and Wala, A. 2004. Case studies from application of numerical simulation software to examining the effects of fires on mine ventilation systems. *Engineering, Environmental Science*. 2004, pp. 445-456.

Xiroudakis, G. and Saratsis, G. Manoutsoglou, E. 2024. The Smallest “Miner” of the Animal Kingdom and Its Importance for Raw Materials Exploitation. *Mining*. 2024, Vol. 4, 2, pp. 260–283.

Xu, G., et al. 2018. Calibration of mine ventilation network models using the non-linear optimization algorithm. *Energies*. 2018, Vol. 11, 31.

Xue, Yan, Wang, Jinmiao and Xiao, Jun. 2024. Bibliometric analysis and review of mine ventilation literature published between 2010 and 2023. *Heliyon*. 2024, Vol. 10, 4.

Καραγιάννη, Μαρία. 2021. Σχεδιασμός και Μοντελοποίηση Κυκλώματος Αερισμού Υπόγειας Βωξιτικής Εκμετάλλευσης. Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, ΕΜΠ. Αθήνα : s.n., 2021. Διπλωματική Εργασία.

Κονοφάγος, Κ. 1980. Το Αρχαίο Λαύριο. Αθήνα : Εκδοτική Ελλάδος, 1980.

Οικονομόπουλος. 2002. Εκμετάλλευση Μεταλλείων II - Ο αερισμός των μεταλλείων. Αθήνα : Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, 2002.

—. **1991.** Ο Αερισμός των Μεταλλείων. ΑΘΗΝΑ : Σ. Αθανασόπουλος - Σ. Παπαδήμας και Σια Ε.Ε., 1991.

Παπαδόπουλος, Θ. 2019. Ανάλυση Κυκλώματος Αερισμού Μεταλλείου Ολυμπιάδας. Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης. Χανιά : s.n., 2019. Διπλωματική Εργασία.

Παράρτημα Α: Οι Κανονισμοί για τον Αερισμό

Σύμφωνα με το άρθρο 75 του Κ.Μ.Α.Ε (ΥΑ 2223 ΦΕΚ 1227 14/06/11) και το άρθρο 16 του Π.Δ. (Φ.Ε.Κ. 106/Α/2-5-1989), σημειώνονται τα εξής:

Όλες οι υπόγειες εκμεταλλεύσεις πρέπει να διαθέτουν επαρκή κυκλοφορία καθαρού αέρα, εξασφαλίζοντας κατάλληλες συνθήκες αναπνοής για τους εργαζόμενους σε κάθε σημείο εργασίας. Ο αερισμός είναι επίσης απαραίτητος για τη μείωση και την απομάκρυνση επικίνδυνων αερίων, καπνών και σκόνης από το περιβάλλον εργασίας, προστατεύοντας την υγεία των εργαζομένων.

1. Στα υπόγεια έργα πρέπει να εξασφαλίζεται επαρκής αερισμός για την προστασία της υγείας και της ασφάλειας των εργαζομένων. Ο εισερχόμενος αερισμός πρέπει να διοχετεύεται σε όλες τις θέσεις εργασίας και να παρέχει καθαρό αέρα, απαλλαγμένο από επικίνδυνα αέρια και σκόνη καθώς και να διατηρεί το επίπεδο οξυγόνου στο ελάχιστο επιτρεπτό όριο.
2. Ο κανονισμός καθορίζει τις ελάχιστες τιμές αερισμού που πρέπει να τηρούνται ανάλογα με τη φύση των εργασιών και την παραγωγή ρύπων οι τιμές αυτές αναφέρους ότι ο όγκος του καθαρού αέρα στα μέτωπα εργασίας, πρέπει να είναι το λιγότερο 5,66 m³ για κάθε πρώτο λεπτό και εργαζόμενο και 2,3 m³ για κάθε πρώτο λεπτό και ίππο μηχανών εσωτερικής καύσης.
3. Η ταχύτητα του εισερχόμενου ρεύματος αέρα, πρέπει να ρυθμίζεται κατάλληλα, ώστε να συντελεί στην αποτελεσματική ανανέωση του αέρα στις θέσεις εργασίας. Η ταχύτητα αυτή δεν πρέπει να είναι μικρότερη του 0,1 m/sec και ούτε να ξεπερνάει, σε κάθε θέση εργασίας, τα 6 m/sec.
4. Η συγκέντρωση οξυγόνου δεν πρέπει να πέφτει κάτω από το 19% και οι συγκεντρώσεις τοξικών αερίων πρέπει να παραμένουν εντός ασφαλών ορίων, εάν η συγκέντρωση του οξυγόνου πέσει κάτω από το 19%, θεωρείται επικίνδυνο για την υγεία των εργαζομένων, καθώς μπορεί να προκαλέσει αναπνευστικά προβλήματα, κόπωση και άλλες επιπλοκές.

Για τις περιεκτικότητες των υπόλοιπων αερίων έχουμε:

- Για το διοξείδιο του άνθρακα η οριακή και η ανώτατη οριακή τιμή έκθεσης καθορίζεται στα 5000ppm (0,5%).

- Για το μονοξείδιο του άνθρακα η οριακή τιμή έκθεσης καθορίζεται στα 50ppm και η ανώτατη οριακή στα 300ppm. Το μονοξείδιο του άνθρακα είναι εξαιρετικά τοξικό και μπορεί να προκαλέσει σοβαρά αναπνευστικά προβλήματα ακόμα και σε χαμηλές συγκεντρώσεις. Η ανίχνευσή του πρέπει να γίνεται με συστήματα παρακολούθησης σε όλο το υπόγειο δίκτυο.
- Για το μονοξειδίου του αζώτου η οριακή τιμή έκθεσης είναι 25ppm. Τα οξείδια του αζώτου (κυρίως το διοξείδιο του αζώτου, NO₂) αποτελούν υποπροϊόν της καύσης σε μηχανές ντίζελ και άλλες πηγές. Αυτά τα αέρια μπορούν να προκαλέσουν σοβαρά αναπνευστικά προβλήματα σε υψηλές συγκεντρώσεις
- Για το υδρόθειο η οριακή τιμή έκθεσης είναι στα 10ppm και η ανώτατη οριακή στα 15ppm.
- Για το διοξείδιο του θείου η οριακή τιμή έκθεσης καθορίζεται στα 2ppm και η ανώτατη οριακή στα 5ppm. Το διοξείδιο του θείου είναι επίσης επικίνδυνο για την υγεία και μπορεί να προκαλέσει αναπνευστικές δυσκολίες. Η παρουσία του είναι συχνή σε μεταλλεία όπου υπάρχει καύση ορυκτών υλών ή πυροδοτήσεις εκρηκτικών υλών.
- Για το μεθάνιο, η συγκέντρωση του δεν πρέπει να υπερβαίνει το 10.000ppm.
- Μέγιστο επιτρεπτό όριο αιωρούμενων σωματιδίων(σκόνη): Η συγκέντρωση σκόνης στον αέρα πρέπει να είναι κάτω από τα 10 mg/m³ για μεγάλες εκθέσεις. Για αναπνεύσιμη σκόνη(η οποία μπορεί να εισχωρήσει βαθιά στους πνεύμονες), το όριο μειώνεται στα 5 mg/m³.

Όλα τα άρθρα του ΚΜΛΕ που αφορούν τον αερισμό είναι:

Άρθρο 22: Προστασία των εργαζόμενων από αιωρούμενες σκόνες, αέρια, ατμούς και καπνούς.

Άρθρο 23: Προστασία των εργαζόμενων από θερμική καταπόνηση

Άρθρο 24: Καταχώρηση μετρήσεων

Άρθρο 25: Προστασία των εργαζόμενων από ραδιενεργές σκόνες και ιοντίζουσες ακτινοβολίες

Άρθρο 71: Απαιτήσεις σε αερισμό

Άρθρο 72: Κυκλώματα, εγκαταστάσεις και δίκτυα αερισμού

Άρθρο 73: Έλεγχοι αερισμού.

Άρθρο 74: Προστασία εργαζόμενων