



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Δ.Π.Μ.Σ «ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ
ΕΡΓΩΝ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ
ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΥ
ΒΩΞΙΤΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΗ ΜΑΡΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΝΔΡΕΑΣ ΜΠΕΝΑΡΔΟΣ
ΑΝΑΠΛ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**Δ.Π.Μ.Σ «ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ
ΕΡΓΩΝ»**

**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ
ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΥ
ΒΩΞΙΤΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ**

ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΗ ΜΑΡΙΑ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επιβλέπων: Ανδρέας Μπενάρδος, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 13 / 07 / 2021

Μπενάρδος Ανδρέας, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Δαμίγος Δημήτριος, Καθηγητής Ε.Μ.Π

Μιχαλακόπουλος Θεόδωρος, Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2021

Copyright © ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΗ ΜΑΡΙΑ, 2021

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

Πίνακας περιεχομένων

Περιεχόμενα εικόνων.....	i
Περιεχόμενα διαγραμμάτων	iii
Περιεχόμενα πινάκων	iv
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	v
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	vii
Extended Abstract.....	1
Introduction	1
Ventilation Model Design and Validation	1
Artificial Neural Network Model Description	1
Model Results.....	3
Conclusions	6
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1.1 Γενικά Στοιχεία Της Ατμόσφαιρας Των Μεταλλείων.....	7
1.2 Τα Αέρια Των Μεταλλείων	7
1.3 Νομοθεσία.....	12
2. ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΕΡΙΣΜΟΥ	15
2.1 Βασικά Στοιχεία Ροής Αέρα	15
2.2 Απώλειες Πίεσης.....	15
2.2.1 Απώλειες πίεσης λόγω τριβών	15
2.2.2 Απώλειες πίεσης λόγω κρούσεων	17
2.3 Χαρακτηριστικά Μεγέθη Μεταλλείου	18
2.3.1 Αντίσταση αγωγού	18
2.3.2 Χαρακτηριστική καμπύλη μεταλλείου.....	18
2.3.3 Σχεδιαστικό πρόγραμμα Ventsim Design.....	20
2.4 Αερισμός Υπόγειων Μεταλλείων	22

2.4.1	Κύριος (Πρωτεύων) αερισμός.....	22
2.4.2	Φυσητικός και μυζητικός αερισμός-	23
2.5	Μηχανικός Αερισμός.....	24
2.5.1	Ανεμιστήρες.....	24
2.5.2	Σημείο λειτουργίας ανεμιστήρα.....	27
2.5.3	Συνδυασμός ανεμιστήρων.....	29
2.5.4	Διευθέτηση του ρεύματος αέρα.....	31
2.6	Βοηθητικός Αερισμός.....	32
2.6.1	Γενικά - σκοπός βοηθητικού αερισμού.....	32
2.6.2	Εξοπλισμός βοηθητικού αερισμού.....	36
3.	VOD (Ventilation On Demand).....	41
3.1	Χαρακτηριστικά του Ventilation on demand.....	42
3.2	Εφαρμογές.....	43
4.	ΤΕΧΝΗΤΗ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ (Artificial Intelligence).....	50
4.1	Machine Learning (Μηχανική Μάθηση).....	51
4.1.1	Τύποι Μηχανικής Μάθησης.....	52
4.2	Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ).....	53
4.2.1	Μοντέλο τεχνητού νευρώνα.....	53
4.2.2	Τύποι τεχνητών νευρωνικών δικτύων.....	59
4.2.3	Βασικοί στόχοι εκπαίδευσης δικτύου.....	64
4.3	Γλώσσα Προγραμματισμού Python.....	65
4.3.1	Βιβλιοθήκες Python.....	66
5.	Μοντελοποιημένο κύκλωμα αερισμού.....	68
5.1	Αξιολόγηση Μοντελοποιημένου Δικτύου.....	71
5.1.1	Σενάριο εφαρμογής.....	71
5.2	Ανάπτυξη Μοντέλου Νευρωνικού Δικτύου.....	75

5.2.1 Χωρισμός βάσης δεδομένων	76
5.2.2 Αρχιτεκτονική δικτύου.....	78
5.2.3 Αποτελέσματα εκπαίδευσης.....	79
6. Συμπεράσματα	86
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	88

Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 1.1: Επίδραση της συγκέντρωσης του CO στον αέρα στη λειτουργία του ανθρώπινου οργανισμού (ανακαλύφθηκαν από τον Strang and Wood,1985) [7].	10
Εικόνα 2.1 : Χαρακτηριστική καμπύλη μεταλλείου.	19
Εικόνα 2.2 : Περιβάλλον εργασίας σχεδιαστικού προγράμματος Ventsim Design.....	21
Εικόνα 2.3 : Διαγράμματα πιέσεων για το φυσητικό, μυζητικό και προωθητικό σύστημα αερισμού [5].	23
Εικόνα 2.4 : Εμπρόσθια άποψη μηχανικού αερισμού σε υπόγειο μεταλλείο	24
Εικόνα 2.5 : Φυγοκεντρικοί ανεμιστήρες σε μεταλλείο στο Μαντούδι Ευβοίας.....	25
Εικόνα 2.6 : Ελικοφόρος ανεμιστήρας της εταιρείας ΕΛΕΒΟΡ Α.Ε.Β.Ε.....	26
Εικόνα 2.7 : Συνόλου από χαρακτηριστικές καμπύλες για αξονικό ανεμιστήρα [7].	26
Εικόνα 2.8 : Χαρακτηριστικές καμπύλες ανεμιστήρα [5].	27
Εικόνα 2.9 : Σημείο λειτουργίας ανεμιστήρα [5].	28
Εικόνα 2.10 : Χαρακτηριστικές καμπύλες και σημείο λειτουργίας για ανεμιστήρες συνδεδεμένους σε σειρά [7].	30
Εικόνα 2.11 : Χαρακτηριστικές καμπύλες δύο ανεμιστήρων τοποθετημένων παράλληλα [7].	31
Εικόνα 2.12 : Βοηθητικός αερισμός σε υπόγειο μεταλλείο χρυσού	33
Εικόνα 2.13: Φυσητικός αερισμός [3].....	34
Εικόνα 2.14 : Μυζητικός αερισμός [3].....	35
Εικόνα 2.15 : Μεικτός αερισμός [3].....	36
Εικόνα 2.16 : Άποψη ανεμιστήρα βοηθητικού αερισμού	36
Εικόνα 2.17 : Αγωγός βοηθητικού αερισμού	37
Εικόνα 2.18 : Εύκαμπτος αγωγός με σπειροειδή ελατήριο	39
Εικόνα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση εφαρμογής συστήματος VoD [14].....	42
Εικόνα 3.2 : Σχηματική αναπαράσταση μετώπου εργασίας.....	44

Εικόνα 3.3: Αποτελέσματα σεναρίων	45
Εικόνα 3.4: Σχηματική αναπαράσταση των θέσεων των ρυθμιστών.....	46
Εικόνα 3.5: Approximated values of regulator#4 angles on test set (after three months)...	47
Εικόνα 3.6: Approximated values of regulator#4 angles on test set (after three months) calculated using a temporal parameter.	48
Εικόνα 4.1: Γενικό μοντέλο τεχνητού νευρώνα [9]	54
Εικόνα 4.2: Απεικόνιση απλού νευρωνικού δικτύου	55
Εικόνα 4.3: Μοντέλο Feed Forward Networks – FFN.....	60
Εικόνα 4.4: Ψευδοκώδικας του κανόνα οπισθοδιάδοσης σφάλματος.....	61
Εικόνα 4.5: Εκπαίδευση ΤΝΔ με οπισθοδιάδοση σφάλματος	62
Εικόνα 4.6: Σχηματική αναπαράσταση Επαναλαμβανόμενων νευρωνικών δικτύων σε σχέση με νευρωνικά δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης	63
Εικόνα 4.7: Εντολές της γλώσσας Python στο περιβάλλον του Jupyter Notebook.	65
Εικόνα 5.1: Δισδιάστατος χάρτης μεταλλείου Βάργιανης.	68
Εικόνα 5.2: (α) Θέσεις τοποθέτησης ανεμιστήρων, (β) σημείο λειτουργίας συστήματος..	70
Εικόνα 5.3: Επιλεγμένο τμήμα μεταλλείου.....	71
Εικόνα 5.4: Σχηματική αναπαράσταση σεναρίου.	76
Εικόνα 5.5: Μέρος του συνόλου δεδομένων εκπαίδευσης.....	77
Εικόνα 5.6: Μέρος του συνόλου δεδομένων ελέγχου.	77
Εικόνα 5.7: Οπτικοποίηση νευρωνικού δικτύου.	79
Εικόνα 5.8: MSE και τελική μέση τιμή σχετικών σφαλμάτων εκπαίδευσης.....	80
Εικόνα 5.9: MSE και τελική μέση τιμή σχετικών σφαλμάτων γενίκευσης	80

Περιεχόμενα διαγραμμάτων

Διάγραμμα 5.1: Ποιοτική κατανομή αέρα στην θέση εργασίας 1.....	73
Διάγραμμα 5.2: Ποιοτική κατανομή αέρα στην θέση εργασίας 2.....	74
Διάγραμμα 5.3: Model loss και Model MSE του εκπαιδευμένου δικτύου.	81
Διάγραμμα 5.4: Συμπεριφορά μοντέλου γενίκευσης για το NOx της θέσης μέτρησης 1..	82
Διάγραμμα 5.5: Συμπεριφορά μοντέλου γενίκευσης για το NOx της θέσης μέτρησης 2..	83
Διάγραμμα 5.6: Σύγκριση πραγματικών τιμών και τιμών πρόβλεψης μοντέλου θέσης 1 ..	84
Διάγραμμα 5.7: Σύγκριση πραγματικών τιμών και τιμών πρόβλεψης μοντέλου θέσης 2 ..	84

Περιεχόμενα πινάκων

Πίνακας 1.1: Επιδράσεις της μείωσης του ποσοστού οξυγόνου στον άνθρωπο.	8
Πίνακας 1.2: Επιπτώσεις, λόγω αύξησης του διοξειδίου του άνθρακα, στον άνθρωπο	9
Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά κύριων στοών και βοηθητικών αγωγών αερισμού.....	69
Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικά επιλεγμένου συνδυασμού ανεμιστήρων.....	70
Πίνακας 5.3: Ανώτατη τιμή έκθεσης αερίων κατά Κ.Μ.Λ.Ε.....	71
Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα ποσοτικών μετρήσεων του προγράμματος στα μέτωπα εργασίας.....	72
Πίνακας 5.5: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές των δεδομένων.....	78
Πίνακας 5.6 : Αποτελέσματα ελέγχου πιστότητας.....	85

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια των μεταπτυχιακών μου σπουδών του Διατμηματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπόγειων Έργων» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Κύριος στόχος της είναι η ανάπτυξη και εκπαίδευση ενός μοντέλου μηχανικής μάθησης με χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων, ώστε να μπορούν να ρυθμιστούν οι παράμετροι λειτουργίας των συστημάτων αερισμού των υπόγειων μεταλλείων, με στόχο να δημιουργηθεί ένα σύστημα αυτόματου ελέγχου για την εφαρμογή του λεγόμενου ventilation on demand. Η γλώσσα προγραμματισμού που επιλέχθηκε για την συγγραφή του αλγορίθμου είναι η python.

Αναλυτικότερα η διπλωματική εργασία δομείται σε 8 κεφάλαια :

Στο 1^ο κεφάλαιο αναφέρονται κάποια γενικά στοιχεία για την ατμόσφαιρα των μεταλλείων και τους κανονισμούς που έχει θεσπίσει το κράτος όσον αφορά τον αερισμό.

Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται μια εκτενής αναφορά για τις γενικές διατάξεις αερισμού των υπόγειων μεταλλείων, τα χαρακτηριστικά μεγέθη που συμβάλουν στην σωστή λειτουργία του δικτύου καθώς και τα συστήματα αερισμού που χρησιμοποιούνται στις υπόγειες εκμεταλλεύσεις.

Στο 3^ο κεφάλαιο αναπτύσσεται η έννοια του ventilation on demand.

Στο 4^ο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων, επεξηγούνται ορισμοί, ο τρόπος λειτουργίας τους, η αρχιτεκτονική τους κ.α.

Το 5^ο κεφάλαιο αποτελεί την πειραματική διαδικασία όπου αρχικά γίνεται ανάλυση της ποιότητας αέρα του υπόγειου μεταλλείου μέσω του προγράμματος Ventsim Design, και στην συνέχεια πραγματοποιείται η ανάπτυξη και εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου και παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα.

Στο 6^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την συγκεκριμένη εργασία.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτέλεσε μια μοναδική εμπειρία για μένα και με γέμισε με γνώσεις που θα με βοηθήσουν στην εξέλιξη μου ως υποψήφια διδάκτορας του ΕΜΠ. Βεβαίως αυτό δεν θα συνέβαινε χωρίς την συμβολή των δικών μου ανθρώπων που με στηρίζουν σε κάθε επαγγελματικό μου βήμα.

Θα ήθελα όμως ιδιαίτερα να ευχαριστήσω τον κ. Ανδρέα Μπενάρδο, Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π, ο οποίος είναι επιβλέπων καθηγητής μου από τις προπτυχιακές μου σπουδές στην σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, για την γνώση και την βοήθεια που μου έχει προσφέρει αυτά τα χρόνια ώστε να καταφέρω να επιτύχω τους στόχους μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Κωνσταντίνο Σιούτα καθώς η βοήθειά του για την διεκπεραίωση της συγκεκριμένης εργασίας είναι ανεκτίμητη.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο αερισμός των μεταλλείων έχει κεφαλαιώδη σημασία στην εξορυκτική διαδικασία τόσο για την ασφαλή εργασία του προσωπικού όσο και για την αποδοτικότητα του έργου. Όσο όμως η εξορυκτική δραστηριότητα εξελίσσεται, άλλο τόσο γίνεται επιτακτική η ανάγκη δημιουργίας ενός ορθολογικού συστήματος αερισμού του μεταλλείου. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο αρχικός σχεδιασμός ενός κυκλώματος αερισμού το οποίο θα υποβοηθείται με την βοήθειά συστήματος μηχανικής μάθησης με στόχο την εξασφάλιση καλύτερων συνθηκών εργασίας αλλά και την δημιουργία ενός ασφαλέστερου και ελεγχόμενου περιβάλλοντος του υπόγειου χώρου.

Αρχικά, γίνεται ανάλυση της ποιότητας αέρα του μοντελοποιημένου, και πιστοποιημένου για την εγκυρότητά του, μεταλλείου της Βάργαινης, της εταιρείας Δελφοί Δίστομον Α.Μ.Ε. με χρήση του λογισμικού προγράμματος Ventsim Design. Πραγματοποιείται αξιολόγηση των συνθηκών του αερισμού και δημιουργείται μια βάση δεδομένων η οποία χρησιμοποιείται για την προσαρμογή των παραμέτρων λειτουργίας και χαρακτηριστικών του συστήματος αερισμού μέσω ενός μοντέλου μηχανικής μάθησης.

Για την εξαγωγή των δεδομένων της συγκεκριμένης βάσης, επιλέχθηκε ένα τμήμα του μεταλλείου, το οποίο αποτελείται από δύο παραγωγικές στοές, ο αερισμός των οποίων εξυπηρετείται από τον ίδιο ανεμιστήρα. Έγινε επίσης η υπόθεση πως υπάρχουν και ρυθμιστικές θύρες, οι οποίες ελέγχουν την παροχή αέρα στις στοές. Για την εξαγωγή των δεδομένων τοποθετήθηκαν αισθητήρες σε κατάλληλες θέσεις και οι οποίοι έδιναν δεδομένα μετρήσεων για την συνολική παροχή του ανεμιστήρα, το άνοιγμα των ρυθμιστών και την περιεκτικότητα του αερίου NOx στις θέσεις εργασίας. Επιπλέον, έγινε η παραδοχή πως υπάρχει πλήρης λειτουργία και στις δυο στοές, δηλαδή δουλεύει ταυτόχρονα μηχανολογικός εξοπλισμός και εργαζόμενοι και στα δυο μέτωπα εργασίας.

Στην συνέχεια, αναπτύχθηκε το μοντέλο μηχανικής μάθησης με χρήση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων και ο αλγόριθμος εκπαίδευσης γράφτηκε με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού python. Έπειτα, έγινε εξαγωγή των αποτελεσμάτων εκπαίδευσης, τα οποία αναλύθηκαν και πραγματοποιήθηκε έλεγχος πιστότητας ώστε να επιβεβαιωθεί πως το μοντέλο του τεχνητού νευρωνικού δικτύου που αναπτύχθηκε εκπαιδεύτηκε σωστά και είναι ικανό να δώσει ορθολογικές προβλέψεις.

Extended Abstract

Introduction

Mine ventilation systems is one of the most critical modules of an underground mining project, being responsible for the wellbeing and health of all personnel. Its main goal is to constantly supply fresh air to the mine and successfully disperse gaseous pollutants and control the concentration of airborne particulates. However, as the mining activity progresses, the need for a rational mine ventilation system becomes even more urgent. The aim of this thesis is the design of a ventilation system which will be assisted by an artificial neural network model in order to ensure better working conditions and to create a safer and controlled underground environment. The ANN model is aimed to predict the concentration of NO_x gas in two working areas through the corresponding model, having as input the airflow data and regulators opening data.

Ventilation Model Design and Validation

The ventilation network of Bargiani's mine of Delphi Distomon S.A. was initially identified and mapped in detail so as to accurately depict the underground working and recognize the tunnels and adits that are used of the ventilation. Then the network is imported to the Ventsim Design software and developed into a 3d working model, including the positioning of all main fans, as well as the exact layering of all auxiliary booster fans and flexible ducts. The airway profiles of the main network and their characteristics were also imported. The model was validated through its comparison using real data measurements that have been carried out at the mine both in terms of airflow quantity and quality.

Artificial Neural Network Model Description

A section of the mine was chosen in which there are two productive tunnels (tunnel 1 and tunnel 2), the ventilation of which is provided by the same fan that supplies them with the requirement airflow. The aim of the model is to optimise the ventilation system in order to achieve the minimum flow requirements based on the number of workers and diesel equipment that working in this section (ventilation on demand).

In both tunnels working mechanical equipment with a corresponding number of personnel (tunnel 1: one jumbo and 2 workers and tunnel 2: one LHD and one worker)

and the maximum flow rate is required. The model for the prediction of NO_x concentration implemented through the use of a feed forward artificial neural network (FFN) and the algorithm was written using the Python programming language.

The dataset consists of 229 records, 80% (183) used for the training set and 20% (46) for the test set. The input data were normalized based on the maximum value of each because the different measurements units. Also, the accuracy of the generalization of the NNs is evaluated based on the relative error between the predicted and in the actual value of the NO_x concentration.

The best model architecture is 3x45x30x20x10x2 and is structured as follows:

- Initially there are 3 input neurons (Airflow, Open1, Open2)
- Then there is the first hidden layer with 45 neurons
- Also, there is a 20% dropout
- Following 3 hidden layers with 35, 20 and 10 neurons each and
- Finally, there are 2 output neurons (NO_{x_1}, NO_{x_2}).

Also, the interruption criterion of each training was either the completion of 2000 epochs, or achieving the minimum mean squared error in training (MSE) in 50 consecutive seasons.

The figure 1 shows the visualization of the developed neural network and the Table 1 present the MSE and average error for both training and test sets and the model predictive accuracy.

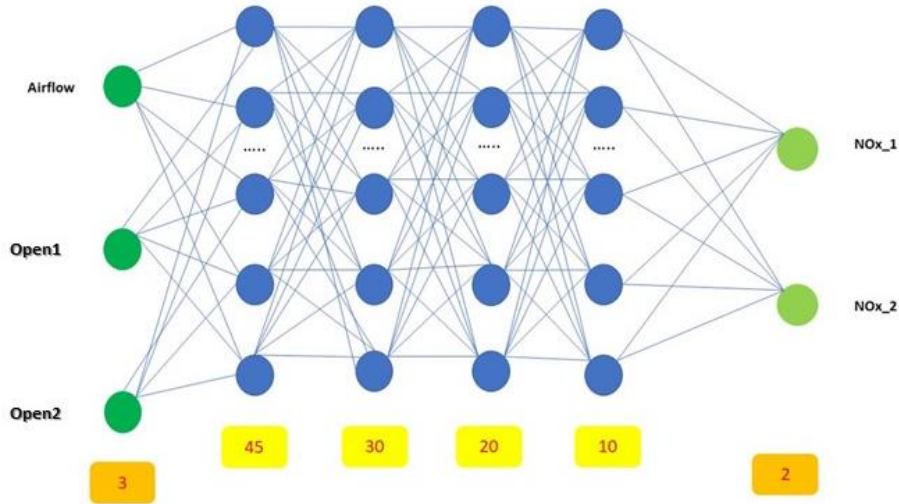


Figure 1: Visualization of neural network model.

Table 1: MSE and average error for both training and test sets and total model accuracy.

	MODEL
Train (MSE)	1.6
Test (MSE)	1.7
AVG train error (%)	1.09
AVG test error (%)	0.97
AVG predicting accuracy (%)	96.36

Although the MSE error is targeted to be under zero, in this case the calculated error is the total MSE for both outputs.

Model Results

It is observed that the model values for scenario 1 show consistent behavior across almost the entire range of the test set and follow the trend of the true values satisfactory. Also, the model has an average forecast accuracy of more than 90% for each of working areas [tunnel 1 (NO_{x_1}): 94.75 %, tunnel 2(NO_{x_2}): 97.96%]. The operation of the trained model is successful with its ability to lead to reliable predictions for the gas concentration.

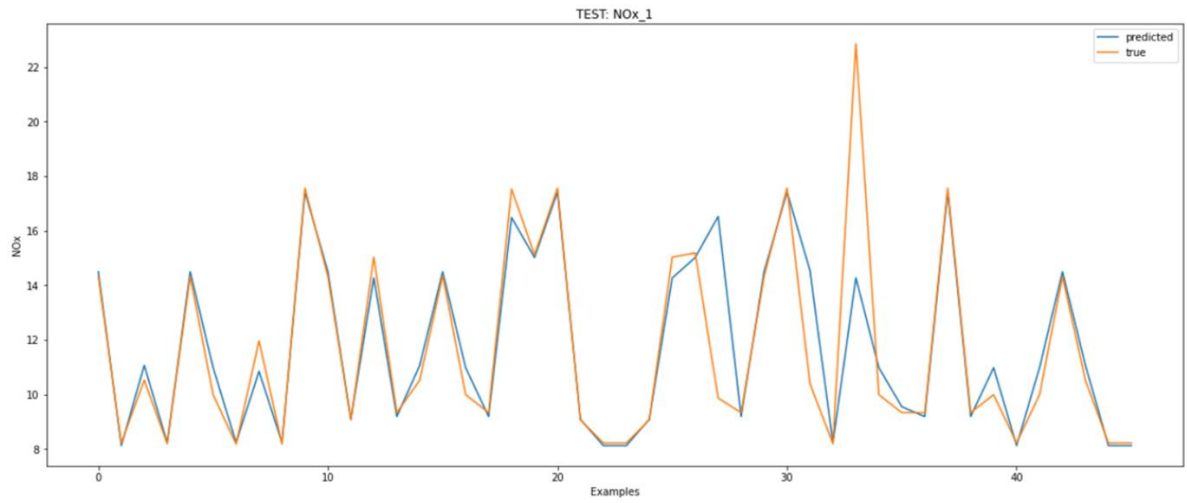


Figure 2: Model generalization behaviour for NOx measurement at working area 1 (Blue: Predicted values, Orange: True values).

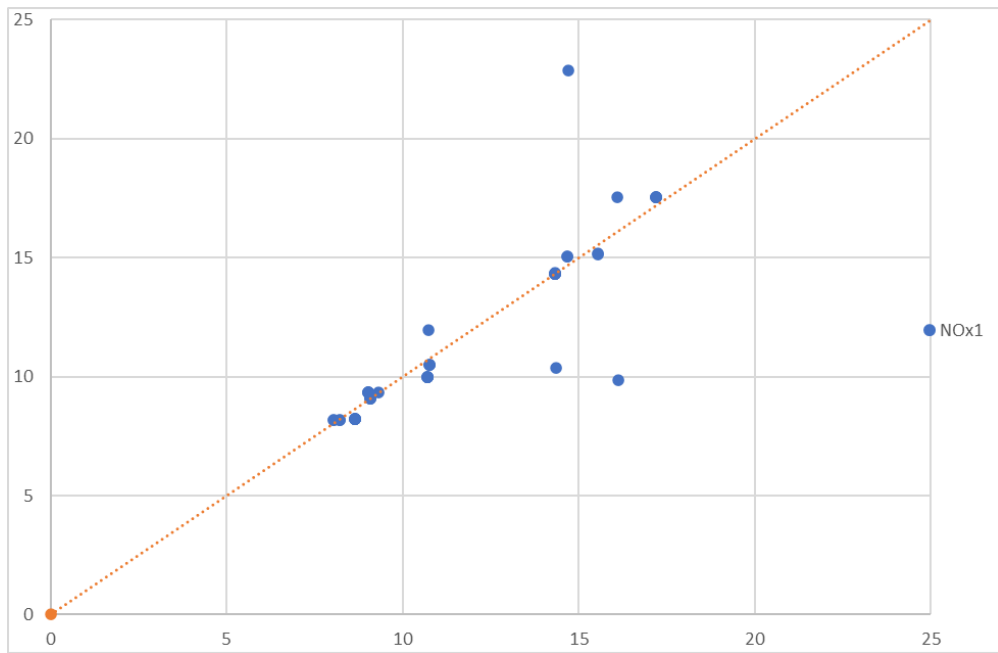


Figure 3: Cross-plot of the measured NOx_1 value in comparison with the model predictions.

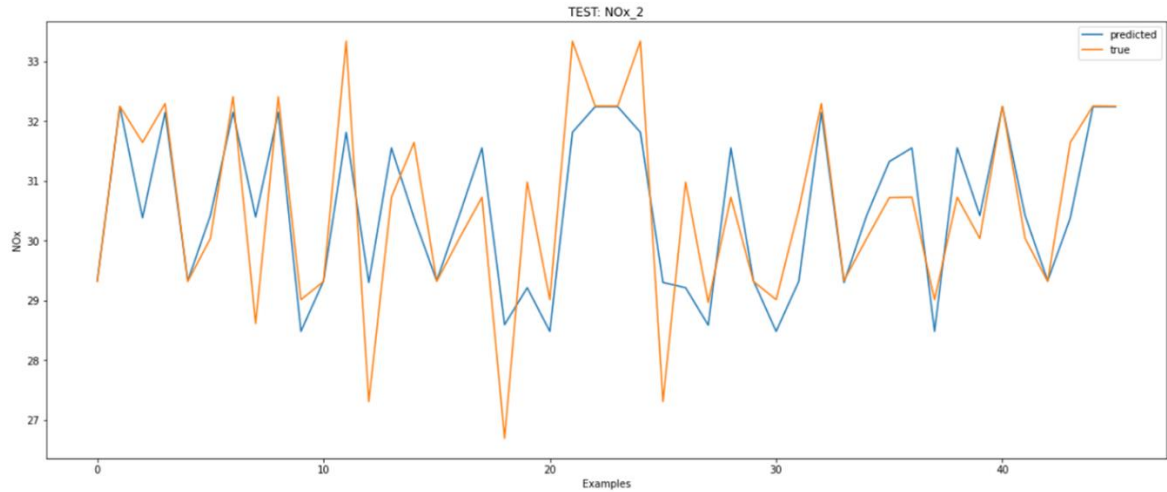


Figure 4: Model generalization behaviour for NOx measurement at working area 2 (Blue: Predicted values, Orange: True values).

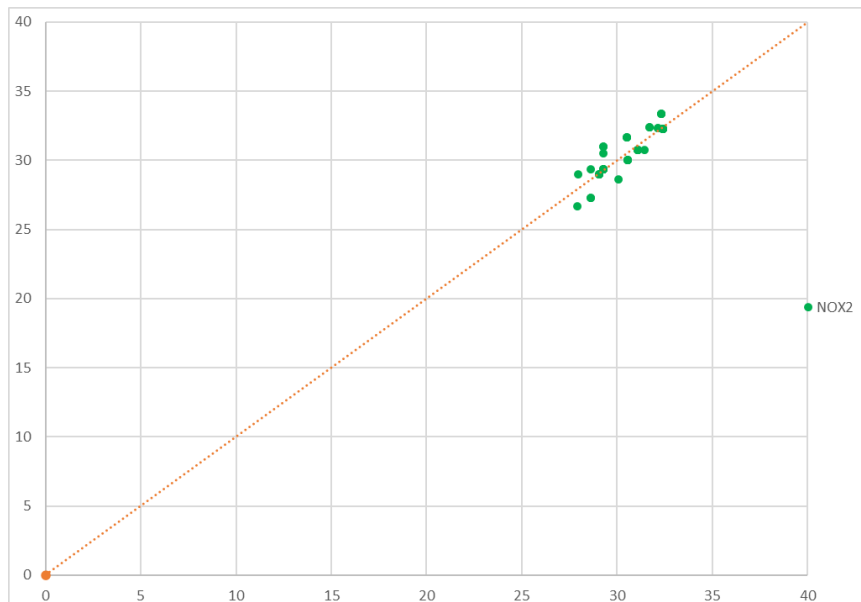


Figure 5: Cross-plot of the measured NOx_2 values in comparison with the model predictions.

In addition, a further validation for the accuracy of the model was carried out through the Ventsim. A total of 5 random input values were selected and compared between the model's prediction and the results obtained of the Ventsim. These are presented in table 2.

Table 2: Comparison between the prediction of the model and the results of the Ventsim.

	Airflow (m ³ /s)	Reg_1 (%)	Reg_2 (%)	NOx_1 (ppm)	NOx_2 (ppm)
ANN	31.4	12	82	10.36	31.1
Ventsim				11.7	35.7
Deviation				12.9 %	14.7 %
ANN	34.7	17	86	9.36	32.17
Ventsim				9.6	32.2
Deviation				2.5 %	0.09 %
ANN	33.3	5	90	16.35	26.9
Ventsim				15.9	27.8
Deviation				2.8 %	3.3 %
ANN	36.8	34	78	8.81	32.2
Ventsim				8.5	31.9
Deviation				3.6 %	0.9 %
ANN	32.5	25	97	9.17	32.5
Ventsim				10	36.6
Deviation				9 %	12.6 %

The above check confirms the accuracy of the neural network to provide reliable predictions, as the deviation between the prediction values of the neural network and the results of the validated model is small.

Conclusions

The aim of this thesis is the development of a machine learning model using artificial neural networks in order to adjust the operating parameters of the ventilation system to ensure better working conditions and to create a safer and controlled underground environment.

The results of the assumption (full operation of productive tunnels) together with the validation showed that the neural network model has the ability of generalization and can provide rational predictions.

Furthermore, as mining is a constantly expanding project, and therefore its dynamic situation is constantly changing, further research into the development of artificial neural networks is now necessary in order to achieve a significant improvement of safety level for personnel in underground mines and a significant reduction in operating costs.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά Στοιχεία Της Ατμόσφαιρας Των Μεταλλείων

Ένα αποτελεσματικό σύστημα αερισμού εξασφαλίζει τη διατήρηση της σύνθεσης της ατμόσφαιρας, της θερμοκρασίας και της υγρασίας, μέσα σε επιτρεπτά επίπεδα, με σκοπό να μην εκτίθενται σε κίνδυνο το προσωπικό και να λειτουργεί αποδοτικά ο μηχανικός εξοπλισμός. Για την σωστή προσαγωγή φρέσκου αέρα στις θέσεις εργασίας του μεταλλείου αλλά και την ταυτόχρονη αραίωση και απαγωγή των επικίνδυνων αερίων και κονιορτών ώστε να δημιουργούνται κατάλληλες κλιματολογικές συνθήκες με σκοπό οι εργαζόμενοι να μπορούν να δουλεύουν άνετα σε κάθε θέση εργασίας χρειάζεται ένας ορθολογικός σχεδιασμός του δικτύου αέρα. Για την εξασφάλιση των παραπάνω, πρώτα απ' όλα πρέπει να υπάρχει επαρκής γνώση όσον αφορά τα αέρια που επικρατούν στα υπόγεια μεταλλεία και στο πως αυτά επηρεάζουν την ποιότητα της εργασίας και την υγεία του προσωπικού.

1.2 Τα Αέρια Των Μεταλλείων

Η σύνθεση του όγκου του καθαρού ξηρού αέρα που εισέρχεται στα μεταλλεία είναι :

- 20.93% οξυγόνο (O_2)
- 78.10% άζωτο (N)
- 0.03% διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και
- 0.94% αργό (Ar)

Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως ο όρος «ξηρός αέρας» είναι υποθετικός και χρησιμοποιείται για ποιοτικό έλεγχο ή ψυχομετρικούς υπολογισμούς. Η πραγματική κατάσταση που επικρατεί στα υπόγεια μεταλλεία αφορά σε υγρό αέρα ή «κανονικό» αέρα, ο οποίος είναι μείγμα ξηρού αέρα και υδρατμών σε ποσοστό 0.1-0.4% κατ' όγκο. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, γίνεται αναφορά για «κανονική» ατμόσφαιρα, η οποία λειτουργεί ως βάση για υπολογισμούς ποιοτικού και ποσοτικού ελέγχου αέρα. Πρέπει να αναφερθεί ότι :

- Ο αέρας που εκπνέει ο ανθρώπινος οργανισμός περιέχει 16.3% οξυγόνο(O_2), 79.32% άζωτο(N) και 4.38% διοξείδιο του άνθρακα(CO_2).

- Ο μέσος άνθρωπος όταν βρίσκεται σε ανάπαυση αναπνέει 15 έως 18 φορές το λεπτό, εισπνέοντας 400-700 cm³ αέρα σε κάθε εισπνοή, δηλαδή 5-13 λίτρα αέρα το λεπτό. Κατ' αυτό τον τρόπο καταναλώνει 300 cm³ οξυγόνο το λεπτό, ενώ όταν εργάζεται σκληρά (άρα αναπνέει με ταχύτερο ρυθμό) μπορεί να καταναλώσει 3000 cm³ ή και περισσότερο σε κάθε εισπνοή.

Όσο ο αέρας κυκλοφορεί μέσα στο μεταλλείο αρχίζει και χάνει από το οξυγόνο του. Αυτό συνήθως είναι συνέπεια της αναπνοής των εργαζομένων και της λειτουργίας των μηχανών εσωτερικής καύσης αλλά και κάποιων αντιδράσεων οξείδωσης που συμβαίνουν στα κοιτάσματα [5].

- **Οξυγόνο (O₂)**

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. Στον πίνακα 1.1 σημειώνονται τι επιπτώσεις προκαλούν, στον ανθρώπινο οργανισμό, διάφορα ποσοστά οξυγόνου. Παρ' ότι, όπως φαίνεται και από τον πίνακα, απώλεια των αισθήσεων δεν επέρχεται παρά μόνο κάτω του 13% σε οξυγόνο, κανείς δεν πρέπει να εισέρχεται σε περιοχές που έχουν ποσοστά χαμηλότερα από 16,25% [5].

Πρέπει να αναφερθεί πως η έλλειψη οξυγόνου στην ατμόσφαιρα μπορεί να είναι αποτέλεσμα ύπαρξης ενός ή και περισσότερων αερίων, τα οποία παρουσιάζουν υψηλή συγκέντρωση. Ακόμα και μη τοξικά αέρια μπορούν να οδηγήσουν τον ανθρώπινο οργανισμό σε ασφυξία, αν η συγκέντρωσή τους είναι αρκετή για να προκαλέσει έλλειψη οξυγόνου [7].

Πίνακας 1.1: Επιδράσεις της μείωσης του ποσοστού οξυγόνου στον άνθρωπο.

Ποσοστό οξυγόνου	Επίδραση στον ανθρώπινο οργανισμό
21%	Η αναπνοή είναι άνετη και υπάρχει καλύτερη αποδοτικότητα εργασίας
17%	Ταχύτερη και βαθύτερη αναπνοή
15%	Κατά κανόνα, οι περισσότεροι άνθρωποι αισθάνονται ταχυπαλμία, ζάλη, βουή στα αυτιά και πονοκέφαλο

13%	Παρατηρείται έντονη ταχυπαλμία, εμετός και σε ορισμένες περιπτώσεις απώλεια αισθήσεων
< 10%	Παρατηρείται κυάνωση, κόμα και σπασμοί
7%	Υπάρχει άμεσος κίνδυνος απώλειας ζωής
6%	Επέρχεται γρήγορα ο θάνατος

- **Διοξείδιο του Άνθρακα (CO₂)**

Το διοξείδιο του άνθρακα συγκεντρώνεται στο δάπεδο των στοών καθώς είναι βαρύτερο από τον αέρα. Η αυξημένη συγκέντρωση CO₂ εγκυμονεί κινδύνους για το προσωπικό και έχει επιπτώσεις στο αναπνευστικό και κεντρικό νευρικό σύστημα. Στον Πίνακα 1.2. δίνονται οι φυσιολογικές επιδράσεις του διοξειδίου του άνθρακα. Όπως φαίνεται, σε ποσοστό 0.5% προκαλεί ανάγκη ταχύτερης και βαθύτερης αναπνοής, σε ποσοστό 2%, 3% ή 5% προκαλεί αντίστοιχη αύξηση του απαιτούμενου αέρα κατά 50%, 100% και 300% ενώ σε ποσοστό 10% δεν μπορεί να γίνει ανεκτό από τον ανθρώπινο οργανισμό περισσότερο από λίγα λεπτά της ώρας [7].

Πίνακας 1.2: Επιπτώσεις, λόγω αύξησης του διοξειδίου του άνθρακα, στον άνθρωπο

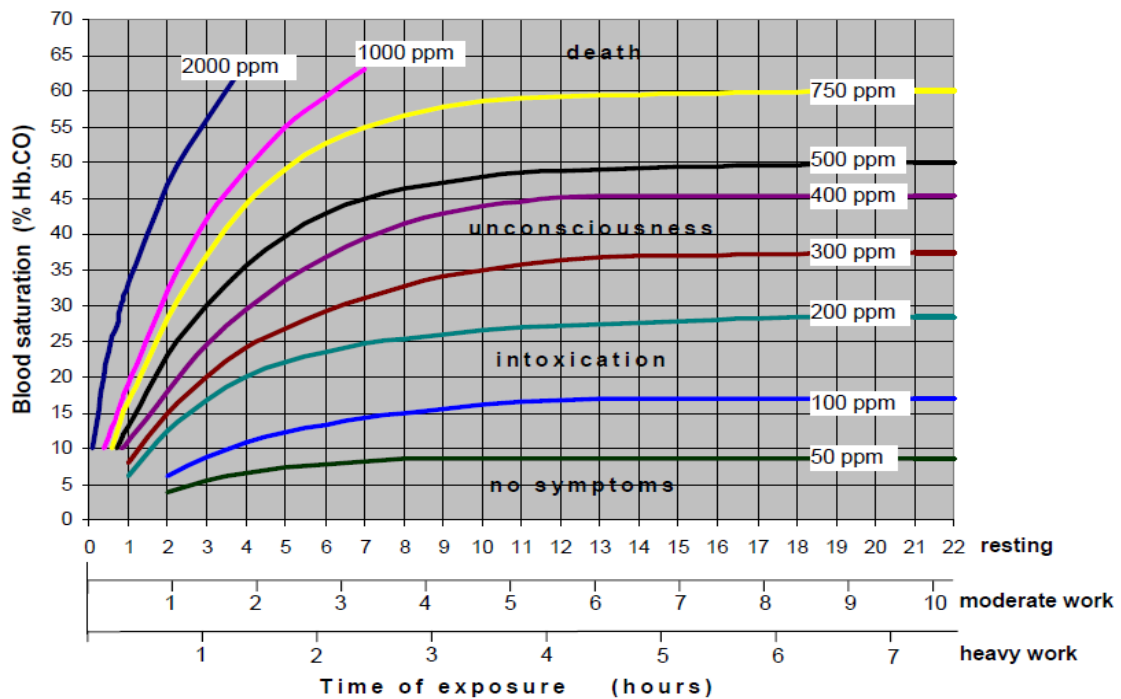
% περιεκτικότητα CO ₂ στον αέρα	Επιδράσεις
0,03	Καμία, κανονική συγκέντρωση ατμόσφαιρας
0,5	Αύξηση της αναπνοής κατά 5%
2,0	Αύξηση της αναπνοής κατά 50%
3,0	Αύξηση της αναπνοής κατά 100%
5 – 10	Πονοκέφαλος, βίαιοι πόνοι
10 – 15	Ανυπόφοροι πόνοι, έντονοι πονοκέφαλοι, γρήγορες αναπνοές, θάνατος

Οι παραπάνω επιδράσεις ισχύουν υπό την προϋπόθεση ότι το οξυγόνο παραμένει περίπου στα κανονικά όρια και ότι ο εργαζόμενος δεν πραγματοποιεί επίπονη εργασία. Σε αντίθετη περίπτωση τα συμπτώματα είναι πιο έντονα και φυσικά πιο επικίνδυνα, ακόμη και σε μικρότερες συγκεντρώσεις CO₂ [5].

- **Μονοξείδιο του Άνθρακα (CO)**

Πρόκειται για ένα άοσμο, άγευστο και άχρωμο αέριο υψηλής τοξικότητας. Προέρχεται από τα εκρηκτικά που χρησιμοποιούνται για την ανατίναξη καθώς και από την λειτουργία ντιζελοκίνητων μηχανών. Το σύνολο του μονοξειδίου του άνθρακα που παράγεται από τις παραπάνω πηγές μπορεί να ελαττωθεί σε ένα μικρό ποσοστό με την εφαρμογή χημικών και την τροποποίηση της τεχνικής γόμωσης των διατηρημάτων.

Για το μηχανικό μεταλλείων έχει περισσότερη πρακτική αξία η γνώση των συμπτωμάτων που προέρχονται από την εισπνοή μονοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο έκθεσης των εργαζομένων σε διάφορες συγκεντρώσεις του αερίου. Η παρακάτω εικόνα δίνει έναν οδηγό των φυσιολογικών αντιδράσεων στο μονοξείδιο του άνθρακα και λαμβάνει υπόψη το επίπεδο σωματικής δραστηριότητας καθώς και τον χρόνο έκθεσης.



Εικόνα 1.1: Επίδραση της συγκέντρωσης του CO στον αέρα στη λειτουργία του ανθρώπινου οργανισμού (ανακαλύφθηκαν από τον Strang and Wood, 1985) [7].

- **Μεθάνιο**

Το μεθάνιο είναι άοσμο και η εισπνοή του, σε μεγάλα ποσοστά, μπορεί να προκαλέσει ασφυξία. Αποτελεί παράγοντα πρωταρχικής σημασίας για την ασφάλεια των υπόγειων

μεταλλείων και πρέπει να υπάρχει καλό σύστημα αερισμού ώστε τα ποσοστά του αερίου στην ατμόσφαιρα να είναι κάτω του 0.5%. Ο επικίνδυνος χαρακτήρας του μεθανίου απαιτεί την ανίχνευση και τον προσδιορισμό του στις υπόγειες εργασίες, τόσο υπό κανονικές συνθήκες, όσο και μετά από επισημαίνουσες πυρκαγιές ή εκρήξεις.

- **Υδρόθειο (H₂S)**

Το υδρόθειο είναι δύσοσμο αέριο και αρκετά δηλητηριώδες. Ειδικά :

- Σε ποσοστό 0.005 – 0.010%, μετά από μια ώρα έκθεσης προκαλεί ορισμένα ελαφρά συμπτώματα (ερεθισμό στα μάτια και στις αναπνευστικές οδούς).
- Σε ποσοστό 0.02% - 0.07%, παρατηρείται έντονος ερεθισμός στα μάτια, πονοκέφαλος ναυτία, πόνοι στη μύτη, το λάρυγγα και το στήθος.
- Σε ποσοστό 0.07% - 0,1%, υπάρχει απώλεια των αισθήσεων, παύση της αναπνοής και θάνατος.
- Σε ποσοστό 0.1% – 0.2% προκαλείται θάνατος μέσα σε λίγα λεπτά.

Παρά το γεγονός ότι η έντονη οσμή του αερίου προδίδει την ύπαρξή του, πρέπει να σημειωθεί ότι η παρατεινόμενη έκθεση των εργαζομένων και σε χαμηλές ακόμη συγκεντρώσεις υδρόθειου, παραλύει την όσφρηση με επικίνδυνες συνέπειες. Έκθεση επί 15 λεπτά σε ποσοστό 0,01% προκαλεί απώλεια της οσφρήσεως. Αυτό βεβαίως μπορεί να συμβεί και σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις του αερίου εάν η έκθεση παραταθεί περισσότερο. Επίσης, σημειώνεται ότι αέρας που περιέχει 4,3 – 46 % H₂S θα εκραγεί αν υποστεί έναυση.

- **Οξείδια του Αζώτου**

Το Άζωτο σχηματίζει διάφορα οξείδια (N₂O, NO, NO₂, N₂O₄, N₂O₃ και N₂O₅) τα οποία, με εξαίρεση το N₂O είναι τοξικά. Στα υπόγεια μεταλλεία βρίσκονται συχνότερα τα οξείδια NO και NO₂ που προέρχονται κυρίως από τα αέρια αποσύνθεσης των εκρηκτικών υλών και τα καυσαέρια των μηχανών εσωτερικής καύσης.

Τα οξείδια του αζώτου σε μικρές συγκεντρώσεις προκαλούν ενοχλήσεις στον λάρυγγα και βήχα, ενώ σε μεγαλύτερα ποσοστά μπορούν να προκαλέσουν ερεθισμό των αναπνευστικών οδών, βρογχίτιδα ή πνευμονία. Ειδικά, μετά από εισπνοή NO₂, σε ποσοστό 0.01% και για λίγο χρόνο δημιουργείται επικίνδυνη κατάσταση, ενώ σε ποσοστό 0.07% και για περίπου μισή ώρα είναι θανατηφόρο. Συνεπώς, ο κατάλληλος αερισμός, για την αραίωση και την γρήγορη απαγωγή των καπνών που προέρχονται από την αποσύνθεση των εκρηκτικών υλών και την λειτουργία των μηχανών εσωτερικής καύσης, είναι απαραίτητος.

1.3 Νομοθεσία

Με βάση τα παραπάνω και καθώς είναι γνωστό πως ο αερισμός είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την ασφάλεια των εργαζομένων και την σωστή λειτουργία του υπόγειου έργου, οι εταιρείες που δραστηριοποιούνται στην εξορυκτική διαδικασία οφείλουν να υπακούν στους κανονισμούς που έχει θεσπίσει το κράτος.

Παρακάτω, σύμφωνα με τον Κανονισμό Μεταλλευτικών και Λατομικών Εργασιών (Κ.Μ.Λ.Ε ΥΑ 2223 ΦΕΚ 1227 14/06/11) και το ΠΡΟΕΔΡΙΚΟ ΔΙΑΤΑΓΜΑ 225/1989 «Υγιεινή και ασφάλεια στα υπόγεια τεχνικά έργα»(Φ.Ε.Κ. 106/Α/2-5-1989) θα αναφερθούν τα κυριότερα σημεία των κανονισμών αυτών τα οποία εστιάζουν κυρίως τις απαιτήσεις του αερισμού.

Σύμφωνα λοιπόν με το άρθρο 75 του Κ.Μ.Λ.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 ακόλουθα:

Σε όλες τις υπόγειες εκμεταλλεύσεις πρέπει να κυκλοφορεί επαρκές ρεύμα καθαρού αέρα για την άνετη αναπνοή των εργαζομένων σε κάθε θέση, καθώς και την αραίωση και απομάκρυνση, από το εργασιακό περιβάλλον, κάθε είδους επικίνδυνων αερίων καπνών και σκόνης.

1. Ο εισερχόμενος αέρας πρέπει να είναι καθαρός και να διοχετεύεται σε όλες τις θέσεις εργασίας.
2. 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 περιεκτικότητα σε οξυγόνο του αέρα σ' όλους τις χώρους εργασίας δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 19,5% σε όγκο. 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 50 ppm και η ανώτατη οριακή στα 300 ppm.
 - Για το μονοξείδιου του αζώτου η οριακή τιμή έκθεσης είναι 25 ppm.
 - Για το υδρόθειο η οριακή τιμή έκθεσης είναι στα 10 ppm και η ανώτατη οριακή στα 15 ppm.
 - Για το διοξείδιο του θείου η οριακή τιμή έκθεσης καθορίζεται στα 2 ppm και η ανώτατη οριακή στα 5 ppm.
 - Για το μεθάνιο το κατώτερο εκρηκτικό όριο είναι 5% και δεν είναι επικίνδυνο σε εισπνοή.
5. Σε κάθε περίπτωση το επίπεδο έκθεσης σε έναν παράγοντα πρέπει να είναι κατώτερο από εκείνο που ορίζει η αντίστοιχη «οριακή τιμή έκθεσης».
6. Η ατμόσφαιρα υπογείων έργων και στοών σε όλο το μήκος της και φρεάτων σε όλο το ύψος της, πρέπει να πληρεί ποιοτικά και ποσοτικά τους όρους που είναι απαραίτητο για την ασφάλεια και υγιεινή των εργαζομένων. Γι' αυτό, πρέπει να γίνονται οι σχετικές μετρήσεις, τα αποτελέσματα των οποίων πρέπει να καταγράφονται.
7. Για τον αερισμό τυφλών εκσκαφών, καθώς και κάθε θέση εργασίας όπου δεν είναι δυνατή η παροχή επαρκούς ποσότητας αέρα, επιβάλλεται η ύπαρξη δικτύων βοηθητικού αερισμού που πρέπει να λειτουργούν μέχρι να εξασφαλιστεί η κάλυψη των απαιτήσεων σε αερισμό.

8. Για να μην υπάρξει μείωση την περιεκτικότητας του οξυγόνου στην ατμόσφαιρα του μεταλλείου, στα τμήματα που υπάρχει προσωρινή διακοπή εργασίας, πρέπει να διατηρείται τουλάχιστον ένας στοιχειώδης αερισμός.
9. Τέλος σύμφωνα με το άρθρο 76 του Κ.Μ.Λ.Ε(ΥΑ 2223 ΦΕΚ 1227 14/06/11), ο σχεδιασμός του κυκλώματος αερισμού πρέπει να διαχωρίζει το εισερχόμενο ρεύμα αέρα από το εξερχόμενο.

2. ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΕΡΙΣΜΟΥ

2.1 Βασικά Στοιχεία Ροής Αέρα

Κατά την εκμετάλλευση των υπόγειων μεταλλείων, υπάρχει ανάγκη για μετακινήσεις μεγάλων όγκων αέρα, προκειμένου να επιτευχθούν σωστά όλες οι απαραίτητες λειτουργίες της εξόρυξης. Οι περισσότερες μετρήσεις της ροής του αέρα σε συστήματα αερισμού βασίζονται στον όγκο του αέρα (m^3) που διέρχεται μέσω μιας δεδομένης διατομής ενός αγωγού στη μονάδα του χρόνου (s). Η μονάδα μέτρησης της παροχής είναι m^3/s και υπολογίζεται με βάση τον τύπο [2.1]:

$$Q = v \times A \quad m^3/s \quad [2.1]$$

όπου:

v: ταχύτητα του αέρα (m/s)

A: διατομή του αγωγού (m^2)

2.2 Απώλειες Πίεσης

Στον αερισμό των υπογείων μεταλλείων σημείο ενδιαφέροντος παρουσιάζουν οι υφιστάμενες διαφορές πίεσης, και όχι οι απόλυτες τιμές των πιέσεων.

Η ροή στους αγωγούς προκαλείται μόνον όταν κάποια διαφορά πίεσης δημιουργηθεί μεταξύ δύο σημείων του συστήματος. Συνεπώς, ενέργεια η οποία παρέχεται, είτε από φυσική, είτε από μηχανική πηγή και δημιουργεί αυτή τη διαφορά πίεσης δαπανάται για να υπερνικηθούν οι απώλειες πίεσης κατά τη ροή.

Οι απώλειες πίεσης (h) μπορεί να διακριθούν σε δύο διαφορετικές ομάδες, ανάλογα με την αιτία από την οποία προέρχονται, τις απώλειες πίεσης λόγω τριβών και απώλειες πίεσης λόγω κρούσεων [5].

2.2.1 Απώλειες πίεσης λόγω τριβών

Οι απώλειες πίεσης λόγω τριβών (h_T), προκαλούνται από την επαφή των ρευμάτων αέρα με τα τοιχώματα των αγωγών. Οι απώλειες αυτές εξαρτώνται κυρίως από τις διαστάσεις των αγωγών του δικτύου του μεταλλείου, την κατάσταση των τοιχωμάτων τους και την ταχύτητα

του ρεύματος του αέρα. Οι απώλειες πίεσης σε ευθύγραμμα τμήματα, ομοιόμορφης περίπου διατομής, αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος των συνολικών απωλειών πίεσης στα συστήματα αερισμού.

Σε μηχανικώς αεριζόμενα μεταλλεία οι απώλειες πίεσης από τριβές στις κύριες στοές ανέρχονται σε 70 έως 90% του συνόλου, παρότι σε ορισμένες περιπτώσεις το ποσοστό αυτό είναι σημαντικά χαμηλότερο. Συνεπώς, οι απώλειες αυτές είναι κατά κανόνα πολύ μεγαλύτερης σημασίας σε σύγκριση με τις απώλειες λόγω κρούσεων και απαιτούν περισσότερη προσοχή και ακρίβεια κατά τους σχετικούς υπολογισμούς.

Κατά τη μελέτη των προβλημάτων αερισμού των μεταλλείων οι απώλειες πίεσης λόγω τριβών υπολογίζονται από τον ακόλουθο τύπο [2.2], γνωστό ως τύπο Murgue ή Atkinson:

$$h_{\tau} = \left(\frac{K \times L \times \Pi}{S} \right) v^2 \quad [2.2]$$

όπου:

h_{τ} : απώλειες πίεσης από τριβές (mm H₂O 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 (m³/s) συνδέεται με τα μεγέθη S και v με τον τύπο Q = S × v, εύκολα προκύπτει ότι :

$$h_{\tau} = \left(\frac{K \times L \times \Pi}{S^3} \right) Q^2$$

Ο συντελεστής 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) [5].

2.2.2 Απώλειες πίεσης λόγω κρούσεων

Απώλειες πίεσης λόγω κρούσεων (h_k), προκαλούνται από τη μεταβολή της διατομής των αγωγών στους οποίους κινούνται τα ρεύματα του αέρα.

Εάν στους αγωγούς του μεταλλείου γίνονται αλλαγές της διατομής ή της διεύθυνσης, συμβαίνουν απώλειες πίεσης λόγω κρούσεων, οι οποίες επιτείνονται εάν παρεμβάλλονται και εμπόδια (βαγόνια, ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός, υλικά κλπ).

Οι απώλειες αυτές ανέρχονται σε 10 έως 30% των συνολικών, όμως ο ακριβής υπολογισμός τους δεν είναι εύκολος λόγω της ποικιλίας των συνθηκών υπό τις οποίες μπορούν να συμβούν. Οι απώλειες λόγω κρούσεων είναι ανάλογες με τη δυναμική πίεση της ροής (P_Δ) που αντιστοιχεί στη μέση ταχύτητα του ρευστού και με ένα συντελεστή K' που υπολογίζεται πειραματικά και ονομάζεται συντελεστής κρούσης.

Υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο [2.3]:

$$h_k = K' \times P_\Delta = K' \left(\frac{\delta \times v^2}{2g} \right) \quad [2.3]$$

Δεδομένου ότι τα μεγέθη h_k και P_Δ εκφράζονται με τις ίδιες μονάδες και επηρεάζονται από τις μεταβολές της πυκνότητας του αέρα είναι φανερό ότι ο συντελεστής K' είναι αδιάστατος και από αυτή την πλευρά διαφέρει από το συντελεστή τριβής K , είναι όμως σε γενικές γραμμές ανάλογος με αυτόν [5].

Για λόγους απλοποίησης, η εισαγωγή της έννοιας του ισοδύναμου μήκους, δηλαδή του ευθύγραμμου μήκους του δεδομένου αγωγού στο οποίο σημειώνεται πτώση πίεσης ίση προς εκείνη που επισυμβαίνει λόγω της παρεμβολής εμποδίου στην ελεύθερη ροή του αέρα, φαίνεται να οδηγεί προς ένα γενικά παραδεκτό τρόπο υπολογισμού των απωλειών πίεσης λόγω κρούσεων. Με τη χρησιμοποίηση του ισοδύναμου μήκους (L_e), οι ολικές απώλειες πίεσης (λόγω τριβών και κρούσεων) υπολογίζονται με τη βοήθεια του τύπου [2.4]:

$$h = h_t + h_k = \frac{K \times \Pi \times (L + L_e) \times Q^2}{S^3} \quad [2.4]$$

Απώλειες πίεσεων λόγω τριβών ή κρούσεων συμβαίνουν ταυτόχρονα σε όλους σχεδόν τους τύπους υπόγειων εκσκαφών. Για λόγους υπολογισμού ο διαχωρισμός τους, αν και αυθαίρετος, είναι απαραίτητος καθώς οι απώλειες τριβών ή κρούσεων δεν υπακούουν στους ίδιους νόμους. Οι απώλειες πίεσεων σε ευθύγραμμο αγωγό, ομοιόμορφης και σταθερής

διατομής θεωρούνται αποκλειστικά απώλειες λόγω τριβής. Αν όμως υπάρξει μεταβολή της διατομής ή της ευθυγράμμισης του αγωγού τότε έχουμε απώλειες πίεσης λόγω κρούσεων, οι οποίες πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν παρά το γεγονός πως με την βοήθεια του ισοδύναμου μήκους μπορούν να εκτιμηθούν ως απώλειες λόγω τριβής.

Πρέπει να τονιστεί πάντως, πως κατά τον υπολογισμό των απωλειών πιέσεων η προσέγγιση που επιτυγχάνεται σε σχέση με την πραγματικότητα δεν είναι πάντα ικανοποιητική [5].

2.3 Χαρακτηριστικά Μεγέθη Μεταλλείου

2.3.1 Αντίσταση αγωγού

Σύμφωνα με τον τύπο [2.4] παρατηρείται ότι, για δεδομένο αγωγό, το μέγεθος $K \times \Pi \times (L + Le)$ είναι σταθερό. Αυτό ονομάζεται αντίσταση του αγωγού, R , η οποία εκφράζεται σε kps^2m^{-8} ή Ns^2m^{-8} . Προκύπτει έτσι η θεμελιώδης εξίσωση [2.5] (Murgue, Atkinson) του αερισμού των μεταλλείων :

$$h = R \times Q^2 \quad [2.5]$$

Οι αντιστάσεις των αγωγών είναι απαραίτητες για την μελέτη του δικτύου αερισμού των μεταλλείων και μπορούν να υπολογιστούν με την βοήθεια μετρήσεων παροχής και απωλειών πιέσεων μεταξύ των άκρων τους. Όμως, στην περίπτωση μεταλλείων που είναι προς σχεδίαση ή ανάπτυξη, όπως επίσης και αγωγών που διαρρέονται από ρεύμα αέρα μικρής ταχύτητας, η αντίσταση δεν μπορεί να μετρηθεί με την κατάλληλη ακρίβεια. Σε αυτές τις συνθήκες, αν είναι γνωστά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού και ο συντελεστής τριβής τότε η αντίσταση μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο [2.6] :

$$R = \frac{K \times \Pi \times (L + Le)}{s^3} \quad [2.6]$$

Είναι φανερό, ότι ο υπολογισμός της αντίστασης των στοών δεν παρουσιάζει κατά κανόνα δυσχέρειες, εάν ο συντελεστής τριβής επιλεγεί με επιτυχία [5].

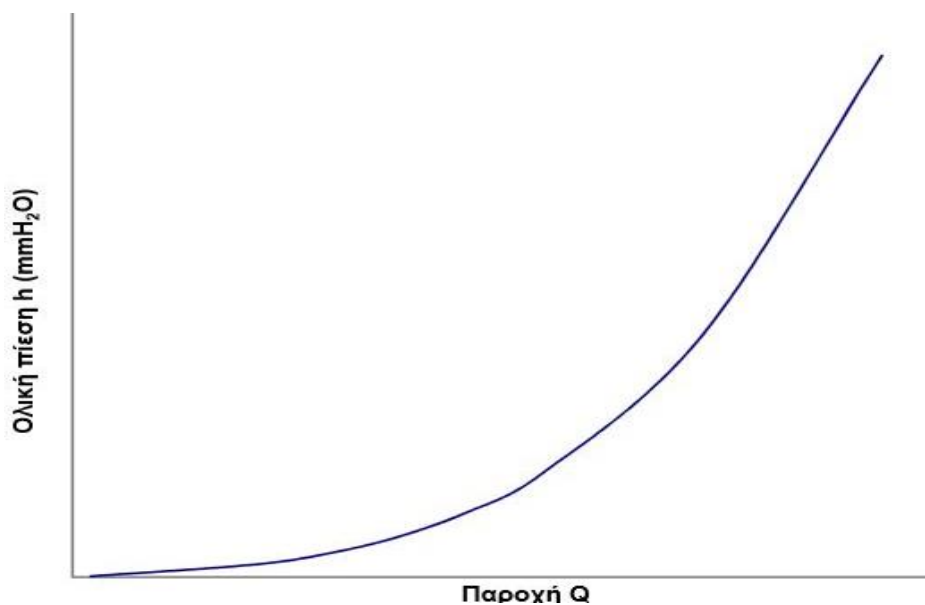
2.3.2 Χαρακτηριστική καμπύλη μεταλλείου

Όπως προκύπτει από την θεμελιώδη εξίσωση του αερισμού, $h = R \times Q^2$, οι απώλειες πίεσης μεταβάλλονται ανάλογα με το τετράγωνο της παροχής. Συνεπώς, για έναν δεδομένο σύστημα υπάρχει μια σταθερή αναλογία μεταξύ πιέσεων και παροχών και εάν το μέγεθος h

καθορισθεί για συγκεκριμένη παροχή Q , είναι εύκολο να προκύψουν οι τιμές οποιουδήποτε ζεύγους Q, h αφού ουσιαστικά η αντίσταση ($R = h \times Q^{-2}$) αποτελεί ένα συντελεστή αναλογίας.

Διευκρινίζεται ότι ο όρος ‘‘σύστημα’’ μπορεί να υποδηλώνει αγωγό, τμήμα ή και το σύνολο του μεταλλείου, υπό την προϋπόθεση ότι το τελευταίο εξυπηρετείται από ένα και μόνο κύριο ανεμιστήρα.

Χαρακτηριστική καμπύλη μεταλλείου ονομάζεται η χάραξη μια παραβολικής καμπύλης, η οποία έχει συντεταγμένες Q, h , και αφορά την αντίσταση του συνολικού δικτύου του μεταλλείου[5].



Εικόνα 2.1 : Χαρακτηριστική καμπύλη μεταλλείου.

Στις περισσότερες περιπτώσεις η χάραξη της καμπύλης αυτής γίνεται σε σχέση με τη στατική πίεση του μεταλλείου, συχνά όμως είναι χρήσιμο να αναφέρεται και στην ολική πίεση.

Η απαραίτητη ενέργεια, E , που απαιτείται για να αντιμετωπιστούν οι απώλειες πίεσης που αντιστοιχούν στη στατική πίεση του μεταλλείου προκειμένου να διοχετευθεί μέσα από το δίκτυο ποσότητα αέρα, Q , δίνεται από τη σχέση [2.7]:

$$E = Q \times h \quad [2.7]$$

Επομένως η απαιτούμενη ισχύς N , σε ίππους (HP) υπολογίζεται από τη σχέση [2.8]:

$$N = \frac{1}{75} \times Q \times h \quad [2.8]$$

Ο παραπάνω τύπος αναφέρεται στην θεωρητική ισχύ, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη η απόδοση της εγκαταστάσεως των ανεμιστήρων, που αποτελούν τις πηγές παροχής ενέργειας στον μηχανικό αερισμό.

Εάν ζητηθεί ο υπολογισμός της συνολικής ισχύος θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η δυναμική πίεση, δηλαδή στον τύπο [2.8] να εφαρμοσθεί η ολική πίεση του μεταλλείου.

2.3.3 Σχεδιαστικό πρόγραμμα Ventsim Design

Τα σχεδιαστικά προγράμματα που υπάρχουν πλέον διαθέσιμα, δίνουν την ευκαιρία όλα τα παραπάνω μεγέθη να υπολογίζονται απευθείας από το λογισμικό του προγράμματος με αποτέλεσμα να μπορεί να γίνεται γρήγορα και αποτελεσματικά η μοντελοποίηση των κυκλωμάτων αερισμού των υπόγειων μεταλλείων.

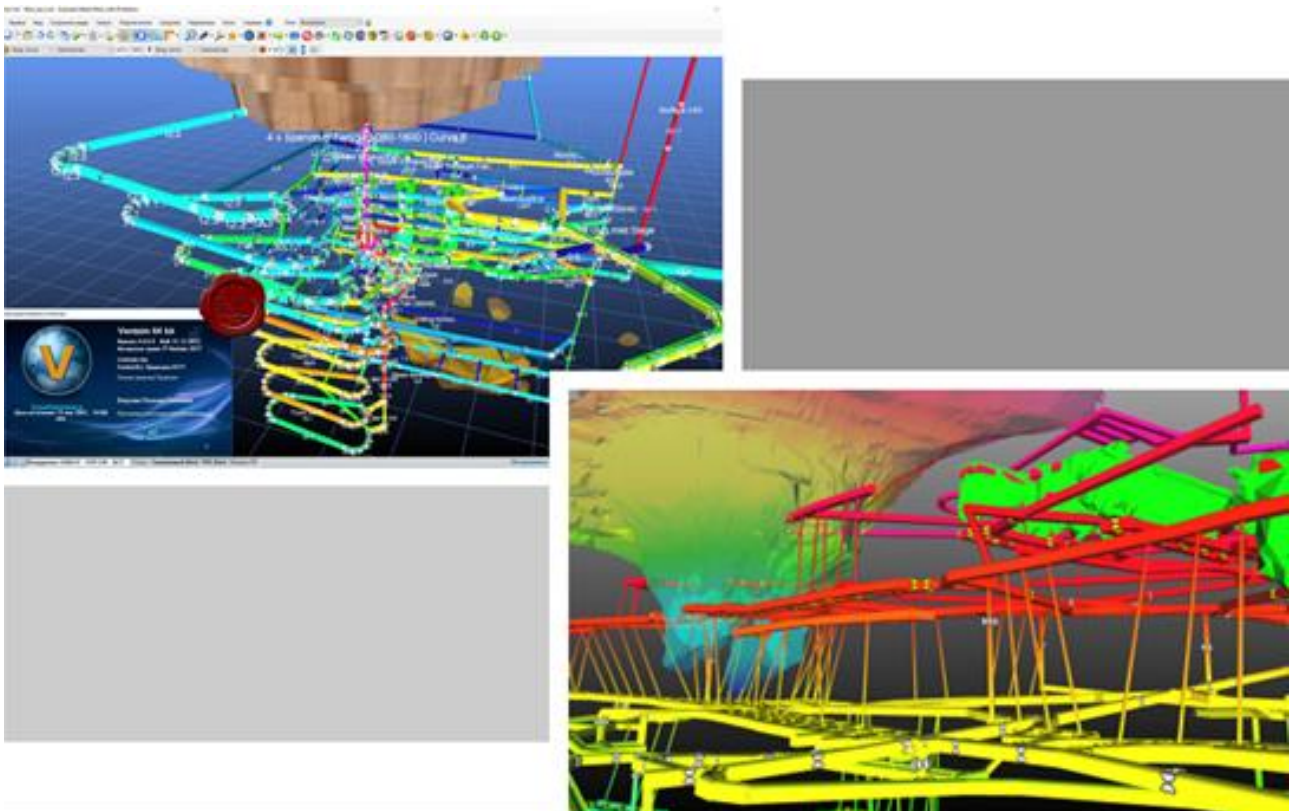
Τα αποτελέσματα αυτών των μετρήσεων έχουν άμεση εφαρμογή στην πραγματικότητα, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα ελεγχόμενο περιβάλλον, το οποίο ανταποκρίνεται πλήρως στην πραγματική κατάσταση που επικρατεί στο μεταλλείο και δίνει την δυνατότητα στον μηχανικό να εκτελεί οποιαδήποτε αλλαγή θέλει πάνω στο σύστημα χωρίς να βάζει σε κίνδυνο τους εργαζομένους και την αποδοτικότητα του έργου. Μπορεί έτσι να ελέγχει και να σχεδιάζει εναλλακτικές, να προσομοιώνει σχεδιασμούς ανάπτυξης γρήγορα και αποτελεσματικά, πράγμα που μπορεί να οδηγήσει στην βελτιστοποίηση και στον ορθολογικό σχεδιασμό των μελλοντικών κυκλωμάτων αερισμού του μεταλλείου.

Την ίδια στιγμή υπάρχουν πλέον λογισμικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πλήθος αναλύσεων όσον αφορά στην ποιότητα ατμόσφαιρας του μεταλλείου όπως, προσομοιώσεις πυρκαγιάς ή προγραμματισμένης έκρηξης των διατηρημάτων, οικονομικές προσομοιώσεις, ποιοτικές μετρήσεις της ατμόσφαιρας του χώρου κλπ. Όλα τα παραπάνω, βοηθούν στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων και του σωστού σχεδιασμού ολόκληρου του κυκλώματος αερισμού οποιουδήποτε υπόγειου μεταλλείου.

Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε το Ventsim Design το οποίο είναι ένα λογισμικό σχεδιασμού κυκλωμάτων αερισμού υπόγειων έργων. Σαν πρόγραμμα έχει την δυνατότητα εφαρμογής τρισδιάστατων απεικονίσεων προσφέροντας μια καλύτερη εικόνα, περισσότερο αντιπροσωπευτική στην πραγματικότητα, της κατάστασης του έργου. Το πρόγραμμα, εκτός των επιλογών που αναφέρθηκαν παραπάνω, διαθέτει ακόμα ένα μεγάλο εύρος ανεμιστήρων όλων των διατάξεων, των οποίων τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τα

διαγράμματα υπάρχουν διαθέσιμα στο εμπόριο. Αυτό σημαίνει πως το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα ενός σωστού σχεδιασμού του οποίου τα αποτελέσματα έχουν εφαρμογή στην πράξη.

Είναι ένα πρόγραμμα αρκετά φιλικό προς τον χρήστη, καθώς σε οποιαδήποτε στιγμή αν παραλειφθεί μια ενέργεια ή γίνει κάποιο σχεδιαστικό λάθος το οποίο επηρεάζει τις βασικές αρχές στις οποίες στηρίζεται ο αερισμός των υπόγειων έργων εμφανίζει προειδοποιητικά μηνύματα και δείχνει το ακριβές σημείο όπου εντοπίστηκε το σφάλμα. Εκτός βέβαια των δυνατοτήτων του σχεδιασμού και της βελτιστοποίησης, παρέχει εργαλεία που μπορούν να βοηθήσουν τους μηχανικούς να αναγνωρίσουν αν οι μελλοντικοί τους στόχοι είναι επιτεύξιμοι αλλά και πως αυτοί οι στόχοι αν εφαρμοστούν θα επηρεάσουν το έργο στο σύνολό του. Στην εικόνα 2.2 υπάρχουν δύο απεικονίσεις του περιβάλλοντος εργασίας του προγράμματος.



Εικόνα 2.2 : Περιβάλλον εργασίας σχεδιαστικού προγράμματος Ventsim Design

2.4 Αερισμός Υπόγειων Μεταλλείων

2.4.1 Κύριος (Πρωτεύων) αερισμός

Ο κύριος ή πρωτεύων αερισμός των μεταλλείων είναι δυνατόν να εξασφαλισθεί, είτε με φυσικό, είτε με μηχανικό αερισμό, είναι βέβαια εμφανές ότι η δεύτερη περίπτωση προϋποθέτει την χρησιμοποίηση ενός ή περισσοτέρων ανεμιστήρων. Ο βοηθητικός ή δευτερεύων αερισμός αφορά στον εξαερισμό στοών ή τμημάτων του μεταλλείου τα οποία δεν διαρρέονται από το κύριο ρεύμα του αέρα και απαιτούν πρόσθετη πηγή πίεσης.

Ο φυσικός ελκυσμός αποτελεί σε πολλές περιπτώσεις σημαντικό στοιχείο του αερισμού των μεταλλείων, πλην όμως η αύξηση του βάθους των υπογείων εκμεταλλεύσεων, η πραγματοποίηση εξαιρετικά υψηλών παραγωγών και η επιτακτική ανάγκη βελτίωσης της παραγωγικότητας και της ασφάλειας έχουν καταστήσει το μηχανικό αερισμό απαραίτητο.

Η εκτεταμένη χρησιμοποίηση ανεμιστήρων στα σύγχρονα μεταλλεία επιβάλλει ο μηχανικός της εκμετάλλευσης να γνωρίζει όχι μόνο τις δυνατότητες αλλά και τα βασικά στοιχεία κατασκευής του συγκεκριμένου εξοπλισμού. Πέρα απ' αυτό, πρέπει να εξετάζει λεπτομερώς τους παράγοντες που επηρεάζουν την εκλογή του τύπου και του μεγέθους του ανεμιστήρα, τη θέση που θα τοποθετηθεί, όπως επίσης και τους κανόνες της ασφαλούς και οικονομικής λειτουργίας του. Η ασφάλεια του προσωπικού και του έργου εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την καλή λειτουργία του ανεμιστήρα.

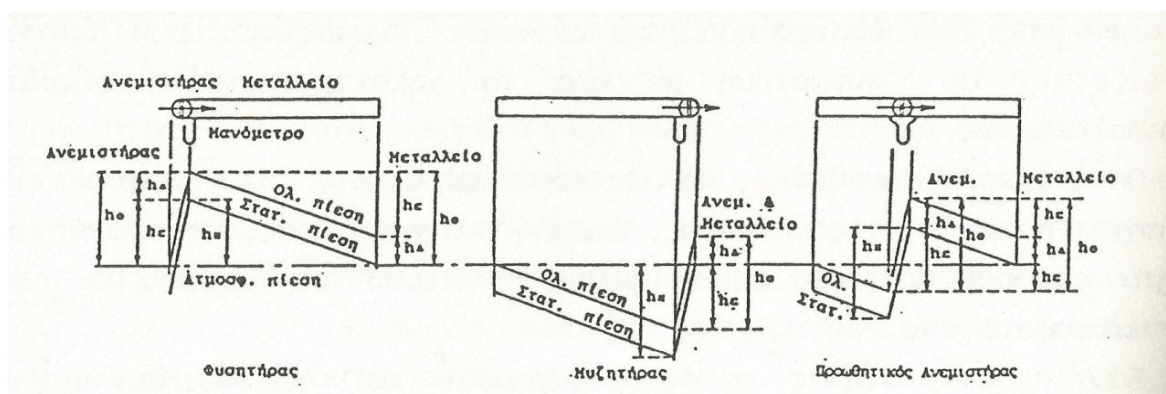
Ανεξάρτητα από τον τρόπο με τον οποίο επιτυγχάνεται ο αερισμός ενός μεταλλείου, τίθενται σε κάθε περίπτωση ορισμένα βασικά ερωτήματα, που διέπουν το ρεύμα του αέρα, ιδιαίτερα για τη διεύθυνση της ροής του, κατά πόσο δηλαδή αυτό είναι φυσικό ή μυζητικό. Οι απαντήσεις στα ερωτήματα αυτά εξαρτώνται σχεδόν εξ' ολοκλήρου από το είδος του μεταλλείου και τις συνθήκες που επικρατούν κατά την εκμετάλλευση του [5].

2.4.2 Φυσητικός και μυζητικός αερισμός-

Ο κύριος αερισμός του μεταλλείου μπορεί να είναι, είτε φυσητικός, είτε μυζητικός ανάλογα με τη θέση τοποθέτησης του κυρίου ανεμιστήρα. Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος αερισμού αποτελεί ειδικό πρόβλημα για κάθε περίπτωση, και πρέπει να εξετάζεται σε συνάρτηση με όλα τα χαρακτηριστικά στοιχεία της εκμετάλλευσης.

Στο φυσητικό σύστημα, ο ανεμιστήρας, τοποθετείται στο στόμιο εισόδου του αέρα και ανυψώνει την πίεση του μεταλλείου υπεράνω της ατμοσφαιρικής. Εάν ο ανεμιστήρας αυτός μεταφερθεί και τοποθετηθεί στο στόμιο εξόδου του αέρα, χωρίς να μεταβληθεί η διεύθυνση ροής, τότε το σύστημα είναι μυζητικό. Εάν ο ανεμιστήρας τοποθετηθεί εντός του δικτύου σε κάποια θέση μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του αέρα, ένα τμήμα του δικτύου θα βρεθεί υπό συνθήκες μυζητικού και το υπόλοιπο υπό συνθήκες φυσητικού συστήματος αερισμού. Σ' αυτή την περίπτωση ο ανεμιστήρας παραλαμβάνει αέρα υπό πίεση χαμηλότερη της ατμοσφαιρικής και τον προωθεί υπό πίεση υψηλότερη της ατμοσφαιρικής, γι' αυτό και το τελευταίο αυτό σύστημα καλείται προωθητικό.

Παρακατω, δίνονται παραστατικά τα τρία ανωτέρω συστήματα με τα αντίστοιχα διαγράμματα των πιέσεων από τα οποία προκύπτουν οι τιμές της ολικής και της στατικής πίεσης και φυσικά και της δυναμικής πίεσης εκ της διαφοράς $h_{\Delta} = h_o - h_{\Sigma}$, σε κάθε σημείο του αγωγού και γενικότερα του δικτύου.



Εικόνα 2.3 : Διαγράμματα πιέσεων για το φυσητικό, μυζητικό και προωθητικό σύστημα αερισμού [5].

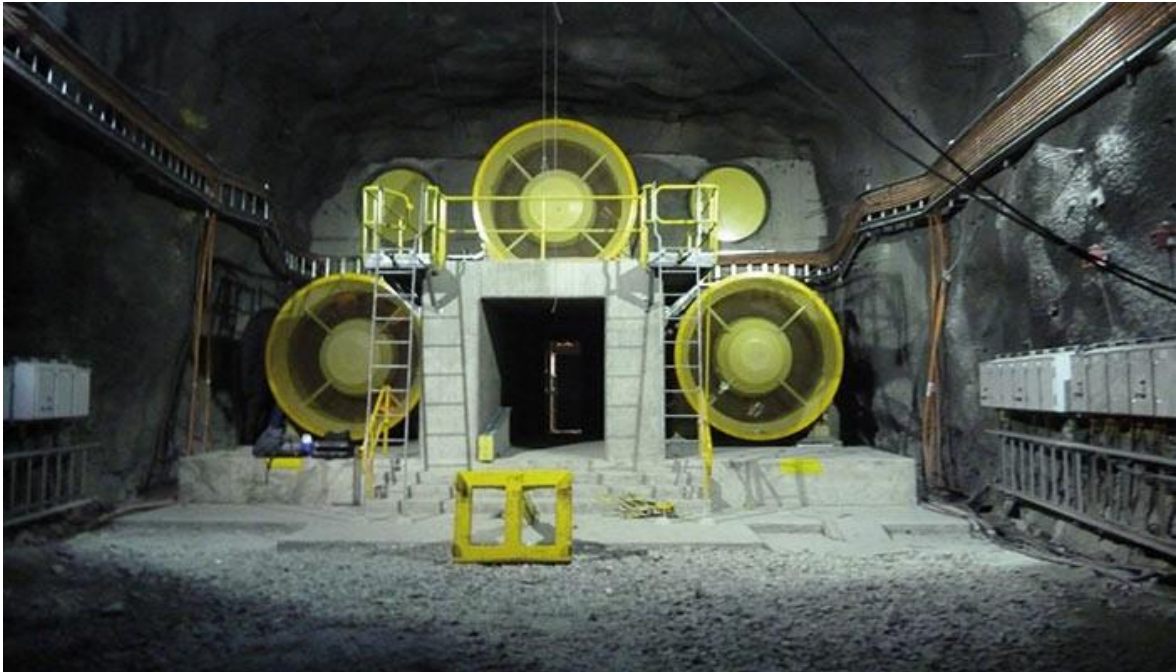
Παρατηρείται ότι στο φυσητικό σύστημα η δυναμική πίεση στην είσοδο είναι χαμηλότερη της ατμοσφαιρικής. Αυτό συμβαίνει διότι στο σημείο της εισόδου δημιουργείται μια μύζηση ώστε να εισέλθει ο αέρας από το κέλυφος του ανεμιστήρα στο δίκτυο. Αντίστοιχα, κατά την έξοδο του αέρα από το δίκτυο η δυναμική πίεση είναι μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής, διότι

ο αέρας που υπάρχει στο σύστημα εξέρχεται από αυτό με την υπάρχουσα κινητική του ενέργεια. Η διαδικασία αυτή αποτελεί μια απώλεια για το δίκτυο αερισμού, διότι η ταχύτητα του αέρα μειώνεται κατά την έξοδο του από το σύστημα [6].

2.5 Μηχανικός Αερισμός

2.5.1 Ανεμιστήρες

Ο μηχανικός εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την εξασφάλιση του αερισμού των μεταλλείων αποτελείται κυρίως από ανεμιστήρες, οι οποίοι διαιρούνται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: Τους φυγοκεντρικούς (ακτινικής ροής) ανεμιστήρες και τους ελικοφόρους (αξονικής ροής) ανεμιστήρες.



Εικόνα 2.4 : Εμπρόσθια άποψη μηχανικού αερισμού σε υπόγειο μεταλλείο

- **Ανεμιστήρες ακτινικής ροής (φυγόκεντρικοί ανεμιστήρες)**

Στην συγκεκριμένη κατηγορία ανεμιστήρων ο αέρας αναρροφείται με φυγοκέντριση μέσα σε έναν δίσκο που αποτελείται από πτερύγια. Έπειτα εισέρχεται σε ένα κέλυφος που το σχήμα του θυμίζει το κέλυφος του σαλιγκαριού και από το οποίο οδηγείται στο στόμιο εξόδου. Η διατομή του κελύφους μεγαλώνει προς το στόμιο εξόδου [5].



Εικόνα 2.5 : Φυγόκεντρικοί ανεμιστήρες σε μεταλλείο στο Μαντούδι Ευβοίας ("ΤΕΡΝΑ ΛΕΥΚΟΛΙΘΟΙ Α.Ε")

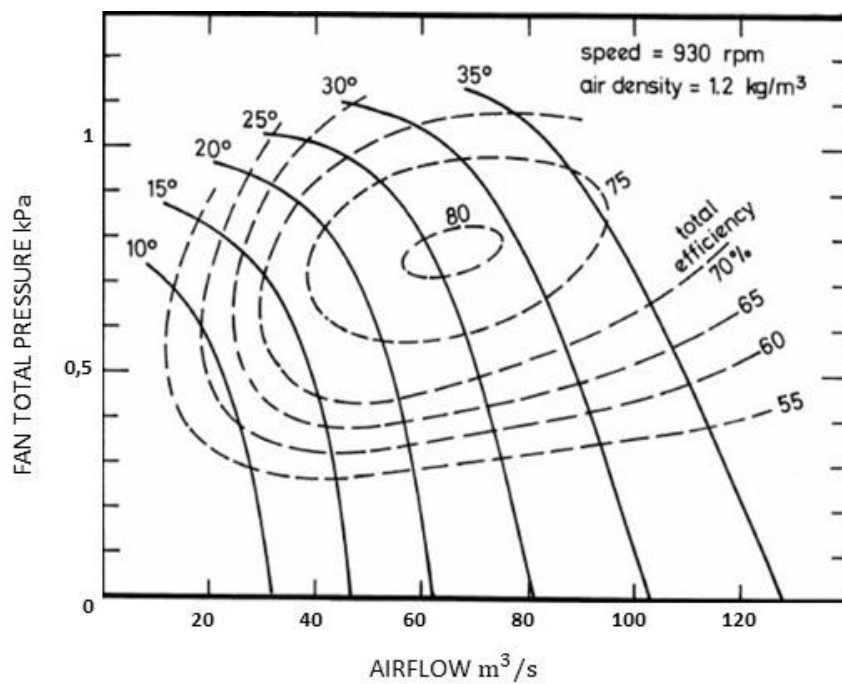
- **Ανεμιστήρες αξονικής ροής (ελικοφόροι ανεμιστήρες)**

Οι ελικοφόροι ανεμιστήρες περιλαμβάνουν, εντός κυλινδρικού ή ελαφρώς κωνικού κελύφους-αγωγού, έλικα ο οποίος αποτελείται από ορισμένο αριθμό πτερυγίων (λεπίδων) τα οποία είναι κατάλληλα στερεωμένα σε πλήμνη, ώστε να μπορούν να ρυθμίζονται. Οι σύγχρονοι ελικοφόροι ανεμιστήρες διαθέτουν πτερύγια ρυθμιζόμενης γωνίας κλίσης, τα οποία αποσκοπούν στην αποδοτικότερη λειτουργία για διάφορες παροχές. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η αύξηση της γωνίας κλίσης (προσβολής) συνεπάγεται αύξηση δύναμης η οποία προκαλεί την ώθηση του αέρα στον ανεμιστήρα, μέχρι μιας κρίσιμης γωνίας, πέραν της οποίας η λειτουργία του ανεμιστήρα καθίσταται ασταθής.



Εικόνα 2.6 : Ελικοφόρος ανεμιστήρας της εταιρείας ΕΛΕΒΟΡ Α.Ε.Β.Ε

Στην εικόνα, απεικονίζεται διάγραμμα ενός συνόλου από χαρακτηριστικές καμπύλες για αξονικό ανεμιστήρα με περύγια μεταβλητής γωνίας. Η ευελιξία αυτών των ανεμιστήρων, τους δίνει σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με τους φυγοκεντρικούς ανεμιστήρες.



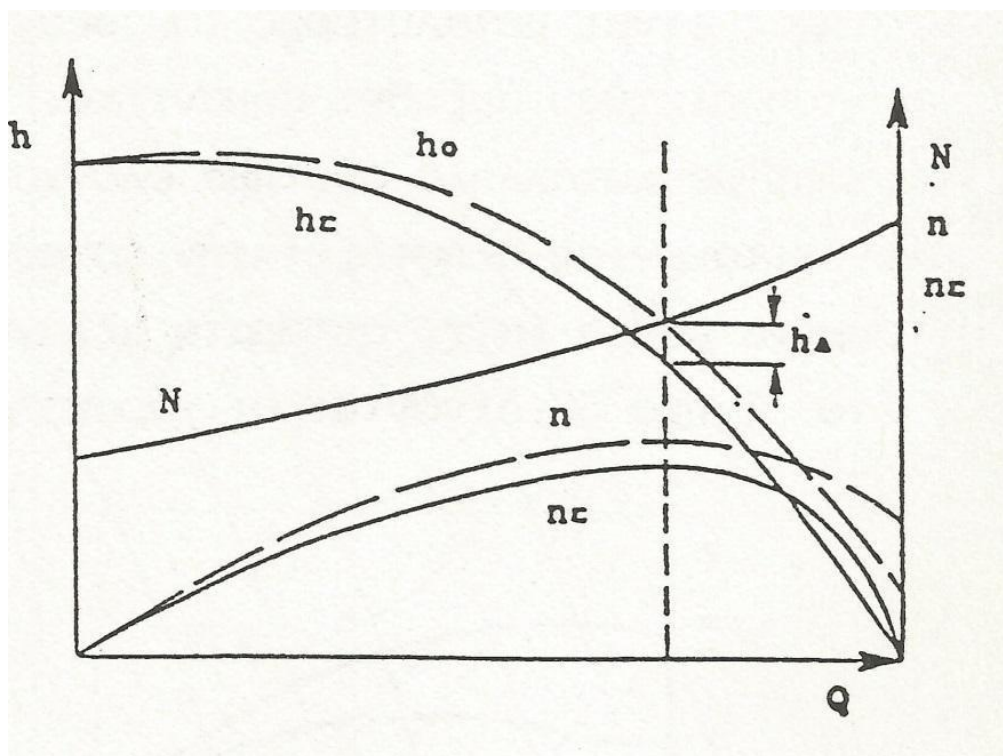
Εικόνα 2.7 : Συνόλου από χαρακτηριστικές καμπύλες για αξονικό ανεμιστήρα [7].

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε κάθε συγκεκριμένο 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.

Οι καμπύλες των διαφόρων μεταβλητών χαράσσονται σε σχέση με την παροχή και φυσικά η χαρακτηριστική καμπύλη πιέσεων-παροχών αποτελεί την πιο σημαντική καμπύλη του ανεμιστήρα. Η χάραξη της καμπύλης αυτής δεν είναι γενικά εύκολη, δεδομένου ότι μεταβλητό μέρος της παραγόμενης πίεσης δαπανάται ως απώλεια κατά τη δίοδο του αέρα δια του ανεμιστήρα, γεγονός που απαιτεί την εκτέλεση ειδικών μετρήσεων και δοκιμών.

Στην **εικόνα 3.6**, δίνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες ενός ανεμιστήρα με αναφορά, τόσο στη στατική όσο και την ολική πίεση. Η διακεκομμένη γραμμή δίνει τις τιμές των μεγεθών Q , h_{Σ} και N που αντιστοιχούν στη μέγιστη απόδοση του ανεμιστήρα η .



Εικόνα 2.8 : Χαρακτηριστικές καμπύλες ανεμιστήρα [5].

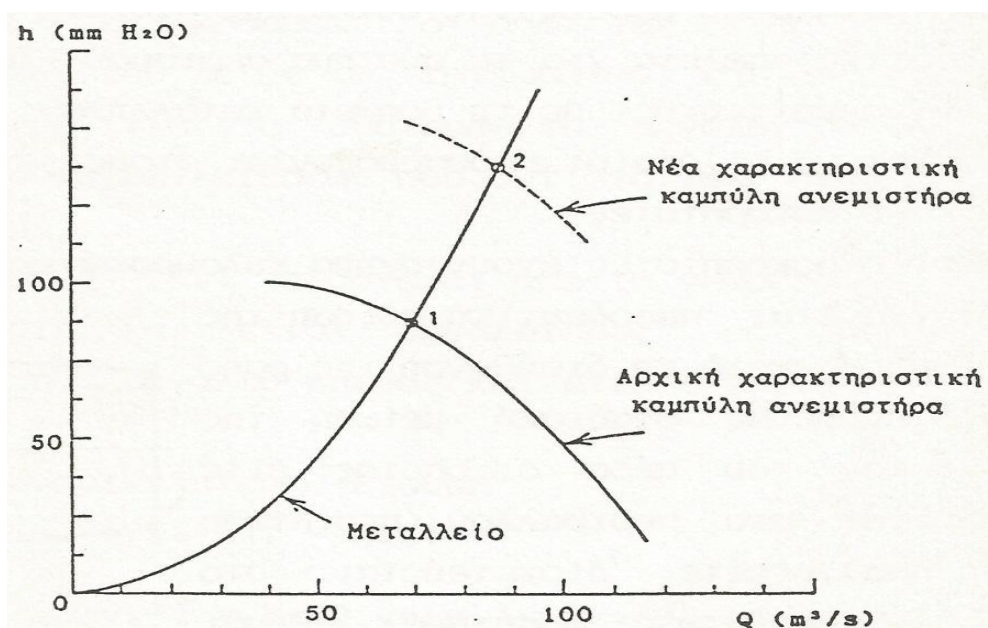
2.5.2 Σημείο λειτουργίας ανεμιστήρα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ένα σύστημα αερισμού αποτελείται από έναν ή περισσότερους ανεμιστήρες κατάλληλα συνδεδεμένους με ένα δίκτυο αγωγών, από τους οποίους διέρχεται η συνολική παροχή αέρα στο μεταλλείο.

Είναι γνωστό πως η αντίσταση του δικτύου εξαρτάται κυρίως από την διάταξη και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αγωγών αλλά και την μορφή των τοιχωμάτων τους. Η αντίσταση επίσης μπορεί να επηρεαστεί από πλευράς μεγέθους και από τον μηχανικό, όσον αφορά τη φάση μελέτης και σχεδιασμού των έργων προσπέλασης και ανάπτυξης.

Αντίθετα, η χαρακτηριστική καμπύλη του ανεμιστήρα εξαρτάται από το μέγεθος και τον σχεδιασμό του μηχανήματος από τον σχεδιαστή. Άρα, ο μηχανικός πρέπει να προσαρμόσει τον κατάλληλο ανεμιστήρα στο δίκτυο με σκοπό τον βέλτιστο αερισμό του μεταλλείου. Κάθε ανεμιστήρας που στρέφεται με δεδομένη σταθερή ταχύτητα μπορεί να λειτουργήσει με άπειρους αλλά καθορισμένους συνδυασμούς πιέσεων-παροχών (όπως προκύπτει από την αντίστοιχη καμπύλη λειτουργίας του).

Συγχρόνως το δίκτυο των υπογείων έργων χαρακτηρίζεται από την χαρακτηριστική παραβολική καμπύλη ($h = R \times Q^2$). Δεδομένου ότι οι απώλειες πίεσης που συμβαίνουν κατά τη ροή του αέρα πρέπει να ισοσταθμιστούν από την πίεση του ανεμιστήρα, είναι φανερό ότι ο ανεμιστήρας που εισάγεται στο σύστημα θα επιλέξει ως σημείο λειτουργίας του το σημείο τομής των δύο χαρακτηριστικών καμπυλών που προαναφέρθηκαν.



Εικόνα 2.9 : Σημείο λειτουργίας ανεμιστήρα [5].

Συνήθως στο πρακτικό κομμάτι μιας μεταλλευτικής δραστηριότητας για να καθορισθεί το σημείο λειτουργίας χρησιμοποιούνται οι χαρακτηριστικές καμπύλες πιέσεων-παροχών (ανεμιστήρα και μεταλλείου) που αναφέρονται στις στατικές πιέσεις. Οι δυναμικές πιέσεις παραλείπονται. Οι περισσότεροι ανεμιστήρες έχουν σχεδιασθεί ώστε

να λειτουργούν με ασφάλεια και οικονομία σε ορισμένο μόνο τμήμα της κατασκευαστικής καμπύλης τους. Το σημείο αυτό παραμένει σταθερό εφόσον οι παράμετροι του δικτύου (αντίσταση, φυσικός ελκυσμός, κλπ) παραμένουν σταθερές [6].

2.5.3 Συνδυασμός ανεμιστήρων

Η εφαρμογή σε ένα σημείο του δικτύου της συνολικής παραγόμενης μηχανικής πίεσης, η οποία απαιτείται για τον αερισμό ενός μεταλλείου, είναι κατά κανόνα περισσότερο οικονομική. Εν τούτοις, η εφαρμογή της πίεσης αυτής σε περισσότερα του ενός σημεία του δικτύου μπορεί να εξασφαλίσει περισσότερη αποτελεσματική διανομή της ροής και καλύτερη λειτουργία του συστήματος ιδιαίτερα σε περιπτώσεις εξαιρετικά υψηλής αντίστασης.

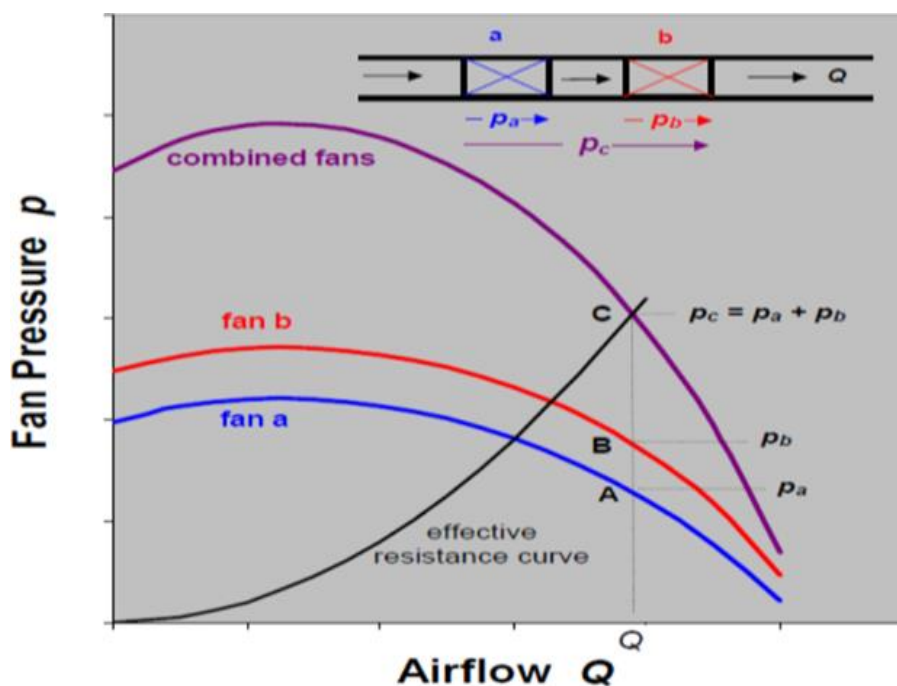
Η χρησιμοποίηση δύο ή περισσότερων ανεμιστήρων μπορεί να γίνει με τοποθέτηση τους στο δίκτυο είτε σε σειρά, είτε σε παράλληλη διάταξη, ή ακόμη σε κατάλληλο μεταξύ τους συνδυασμό. Προς απλοποίηση των περιπτώσεων που ακολουθούν, οι δυναμικές πιέσεις των ανεμιστήρων θεωρούνται αμελητέες και παραλείπονται [5].

- **ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΕΣ ΣΕ ΣΕΙΡΑ**

Στην διάταξη σε σειρά, οι ανεμιστήρες τοποθετούνται στο ίδιο κύκλωμα και καθένας από αυτούς αντιμετωπίζει την συνολική παροχή και μεταφέρει μέρος της απαιτούμενης πίεσεως με σκοπό την επίτευξη συγκεκριμένης ροής. Το σημείο λειτουργίας του συστήματος βρίσκεται στην τομή της χαρακτηριστικής καμπύλης του μεταλλείου και της καμπύλης του συνδυασμένου αποτελέσματος από την σύγχρονη λειτουργία των ανεμιστήρων. Για να χαραχθεί η καμπύλη του συνδυασμένου αποτελέσματος (**εικόνα 3.8**) πρέπει να προστεθούν οι πιέσεις των ανεμιστήρων για κάθε τιμή της παροχής αέρα.

Θα πρέπει να αναφερθεί, πως εάν η επιλογή των ανεμιστήρων δεν είναι σε κάθε περίπτωση επιτυχής, τα αποτελέσματα δεν είναι ικανοποιητικά και η συνδυασμένη λειτουργία δεν φέρει την μέγιστη απόδοση. Γι' αυτό το λόγο, η επιλογή των ανεμιστήρων, που πρόκειται να τοποθετηθούν στο δίκτυο σε σειρά, πρέπει να γίνεται

με προσοχή ώστε να μπορούν να λειτουργούν στο τμήμα της χαρακτηριστικής καμπύλης που υπάρχει η καλύτερη δυνατή απόδοση [5].



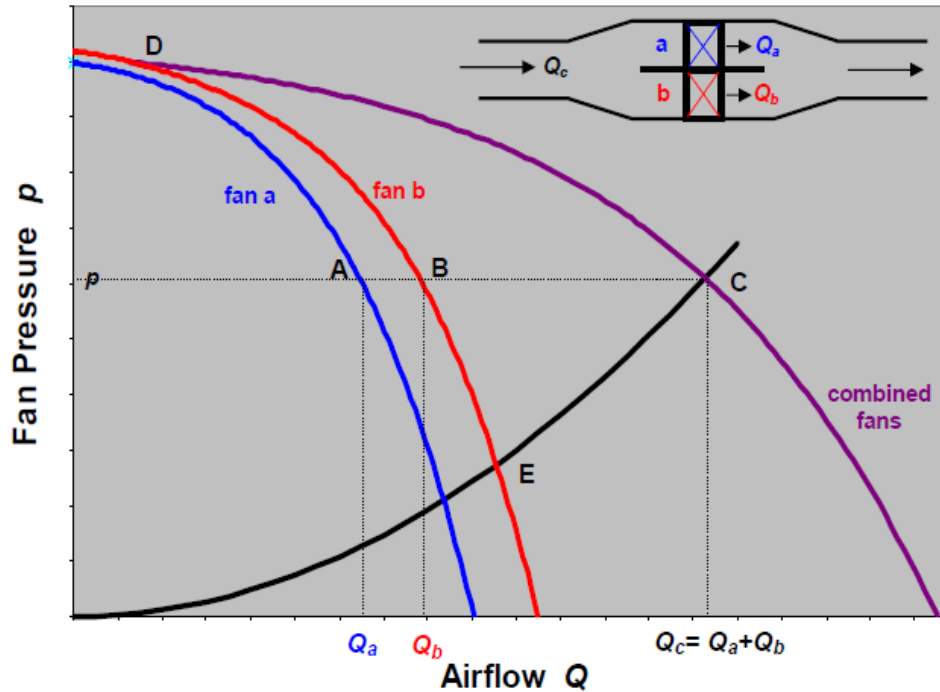
Εικόνα 2.10 : Χαρακτηριστικές καμπύλες και σημείο λειτουργίας για ανεμιστήρες συνδεδεμένους σε σειρά [7].

• ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΕΣ ΣΕ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Όταν οι συνθήκες του μεταλλείου το επιβάλλουν, δύο ή περισσότεροι ανεμιστήρες μπορούν να λειτουργήσουν σε παράλληλη διάταξη ώστε να αυξηθεί η παροχή αέρα. Για παράδειγμα, σε περίπτωση ανάπτυξης του μεταλλείου και δημιουργίας νέων θέσεων εκμετάλλευσης η αντίσταση του δικτύου αυξάνεται και οι ανάγκες του συστήματος απαιτούν μεγαλύτερες παροχές αέρα. Στην περίπτωση αυτή η τοποθέτηση ενός ανεμιστήρα ο οποίος θα λειτουργεί παράλληλα προς τον κύριο ανεμιστήρα του έργου δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Για την χάραξη της καμπύλης του συνδυασμένου αποτελέσματος, πρέπει να προστεθούν οι παροχές των ανεμιστήρων για κάθε τιμή πίεσης.

Στην περίπτωση που η χαρακτηριστική καμπύλη του μεταλλείου δεν τέμνει την καμπύλη του συνδυασμένου αποτελέσματος, τότε ο ανεμιστήρας με την υψηλότερη

πίεση θα παρέχει μόνος του περισσότερο αέρα απ' όσο και οι δυο ανεμιστήρες μαζί, με αποτέλεσμα την αντιστροφή αέρα μέσα από τον ανεμιστήρα με την χαμηλότερη πίεση.



Εικόνα 2.11 : Χαρακτηριστικές καμπύλες δύο ανεμιστήρων τοποθετημένων παράλληλα [7].

Πρέπει να σημειωθεί πως οι ανεμιστήρες οι οποίοι έχουν μεγάλης κλίσης χαρακτηριστικές καμπύλες συνδυάζονται ικανοποιητικά σε παράλληλη διάταξη. Παρ' όλα αυτά, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή για να βεβαιωθεί ότι τα σημεία λειτουργίας δε θα μετακινηθούν πολύ μακριά πάνω από τις αντίστοιχες χαρακτηριστικές τους καμπύλες. Αυτό είναι αρκετά σημαντικό στους αξονικούς ανεμιστήρες λόγω των χαρακτηριστικών τους. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να διερευνηθεί η μέγιστη διακύμανση που μπορεί να δεχτεί η αντίσταση του συστήματος, σε περίπτωση παράλληλης διάταξης [5].

2.5.4 Διευθέτηση του ρεύματος αέρα

Εάν δεν γίνουν οι απαραίτητες ενέργειες για τη ρύθμιση του δικτύου, ο εισερχόμενος στο μεταλλείο αέρας θα κατανεμηθεί σύμφωνα με τους νόμους της ροής. Η φυσική αυτή διανομή δεν είναι συνήθως αποτελεσματική και δεν ικανοποιεί τις ανάγκες και τις απαιτήσεις του μεταλλείου, που αφορούν στον αερισμό του υπογείου δικτύου και

ειδικότερα των μετώπων, οπότε είναι δυνατόν να καταστεί απαραίτητη η εφαρμογή ελεγχόμενης διανομής της παροχής.

Γι' αυτό το λόγο είναι απαραίτητο η διεύθυνση και η παροχή των ρευμάτων αέρα να διευθετούνται και να ελέγχονται αποτελεσματικά, προκειμένου να επιτυγχάνεται η ορθή κατανομή της εισερχόμενης ποσότητας του αέρα στο μεταλλείο. Οι απαιτούμενες για την εν λόγω διεύθυνση διατάξεις περιλαμβάνουν κυρίως:

- φράγματα
- θύρες
- ρυθμιστές
- παραπετάσματα και
- διασταυρώσεις.

2.6 Βοηθητικός Αερισμός

2.6.1 Γενικά - σκοπός βοηθητικού αερισμού

Με το βοηθητικό αερισμό (εικόνα 3.10) επιδιώκεται η εξασφάλιση του απαραίτητου αέρα στο τμήματα του δικτύου τα οποία δεν διαρρέονται από το ρεύμα του κύριου αερισμού. Ο σκοπός αυτός επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση κατάλληλου εξοπλισμού (κυρίως ανεμιστήρων και αεραγωγών) με τη βοήθεια του οποίου ουσιαστικά ενισχύεται το σύστημα του κύριου αερισμού με πρόσθετες πηγές πίεσης.

Ο βοηθητικός αερισμός αφορά κατά κύριο λόγο σε στοές υπό προχώρηση, σε μέτωπα εκμετάλλευσης που δεν έχουν άμεση σύνδεση με στοές επιστροφής του αέρα και γενικά σε υπόγειες εκσκαφές οι οποίες λόγω του είδους και της θέσης τους δεν εξυπηρετούνται από το πρωτεύον ρεύμα. Εξ' άλλου η χρησιμοποίηση πρόσθετων ανεμιστήρων, μεγάλης σχετικά ισχύος, προς βελτίωση των συνθηκών του αερισμού σε τμήματα του μεταλλείου, τα οποία παρουσιάζουν αυξημένες ανάγκες παροχής, αποτελεί, κατά μια ευρεία έννοια, πρακτική που εντάσσεται στη διαδικασία του βοηθητικού αερισμού.

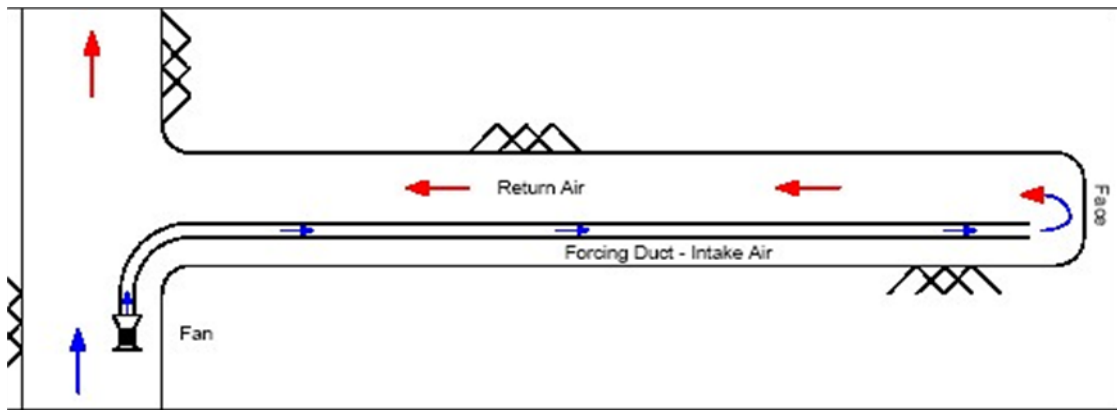


Εικόνα 2.12 : Βοηθητικός αερισμός σε υπόγειο μεταλλείο χρυσού

Η ποσότητα του αέρα που διοχετεύεται με το βοηθητικό αερισμό πρέπει να εξασφαλίζει την άνετη αναπνοή, την αραιώση και απαγωγή των καπνών που παράγονται κατά την αποσύνθεση των χρησιμοποιούμενων εκρηκτικών υλών αλλά και την αραιώση και απαγωγή των αερίων που προέρχονται, είτε από το κοίτασμα και τα περιβάλλοντα πετρώματα, είτε από τις εκπομπές των μηχανών εσωτερικής καύσης που χρησιμοποιούνται κατά την εξορυκτική διαδικασία [5].

❖ ΦΥΣΗΤΙΚΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΣ

Στον φυσητικό αερισμό η ζώνη των καπνών, η οποία βρίσκεται πίσω από το μέτωπο, ωθείται από το ρεύμα αέρα, διαλύεται λιγότερο ή περισσότερο και κινείται κατά μήκος της στοάς. Εάν η απόσταση του στομίου του αγωγού και του μετώπου είναι μικρή τότε η απομάκρυνση των καπνών είναι γρήγορη. Αντίθετα, στην περίπτωση που η συγκεκριμένη απόσταση είναι μεγάλη, οι καπνοί διατηρούνται στο βάθος της στοάς όπου υπάρχει μια ζώνη (νεκρή ζώνη) όπου ο αέρας παραμένει σχεδόν ακίνητος με αποτέλεσμα να αυξάνεται σημαντικά ο χρόνος που απαιτείται για την απομάκρυνση των καπνών.



Εικόνα 2.13: Φυσητικός αερισμός [3]

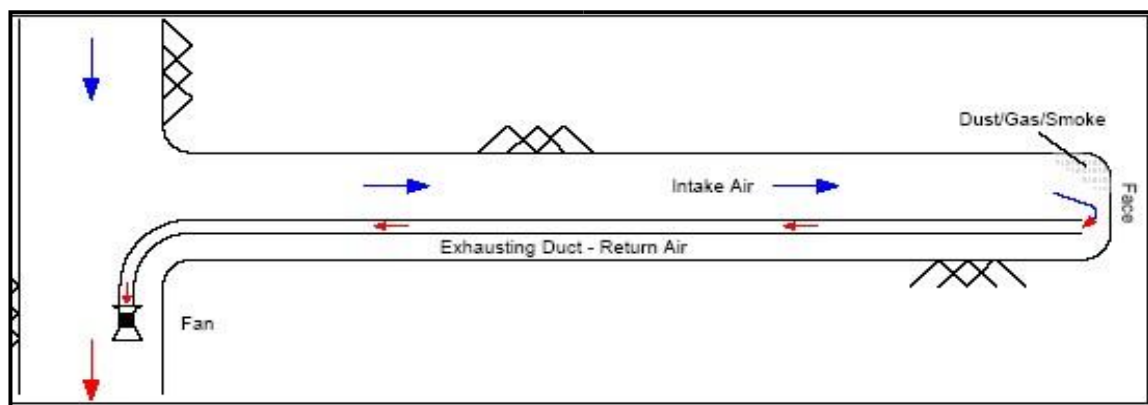
Είναι λοιπόν φανερό , ότι πρέπει να μειώνεται κατά τον δυνατόν η απόσταση μεταξύ του στομίου του αγωγού και του μετώπου. Αυτό βέβαια δεν μπορεί να γίνει πάντα καθώς υπάρχει μεγάλος κίνδυνος παραμόρφωσης ή και καταστροφής των αγωγών μετά την πυροδότηση των διατηρημάτων. Επίσης με τον φυσητικό αερισμό οι καπνοί, που έχουν αρχίσει να αραιώνονται, θα μετακινηθούν προς την είσοδο της στοάς πράγμα που σημαίνει πως η απαγόρευση της κυκλοφορίας του προσωπικού, μέχρι να αποκατασταθούν οι ασφαλείς συνθήκες εργασίας, είναι απαραίτητη.

❖ ΜΥΖΗΤΙΚΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΣ

Κατά την εφαρμογή του μυζητικού αερισμού το ρεύμα αέρα εισέρχεται μέσα στον αγωγό, με αποτέλεσμα να εξαφανίζεται οποιαδήποτε αισθητή κίνηση αέρα, ακόμη και σε πολύ μικρή απόσταση πέρα από το στόμιο του αγωγού.

Με αυτόν τον τρόπο στο χώρο από το στόμιο περίπου του αγωγού μέχρι το μέτωπο ο αέρας είναι πρακτικά ακίνητος. Οι καπνοί που καταλαμβάνουν το χώρο της στοάς παρασύρονται μέσα στον αγωγό, μαζί με ποσότητα καθαρού αέρα, ενώ οι καπνοί που βρίσκονται στη νεκρή ζώνη απάγονται με πολύ αργό ρυθμό.

Το κύριο πλεονέκτημα του μυζητικού αερισμού είναι η αποφυγή δημιουργίας κινούμενης ζώνης καπναερίων μέσα στη στοά, αλλά ο καθαρισμός του μετώπου είναι δύσκολος και εξαιρετικά αργός εκτός αν η απόσταση του στομίου του αγωγού και του μετώπου είναι εξαιρετικά μικρή. Επομένως προκειμένου να επιτευχθούν καλύτερα αποτελέσματα ο μυζητικός αερισμός πρέπει να συνδυαστεί κατάλληλα με φυσητικό αερισμό, δηλαδή να εφαρμοσθεί μεικτός αερισμός [5].



Εικόνα 2.14 : Μυζητικός αερισμός [3]

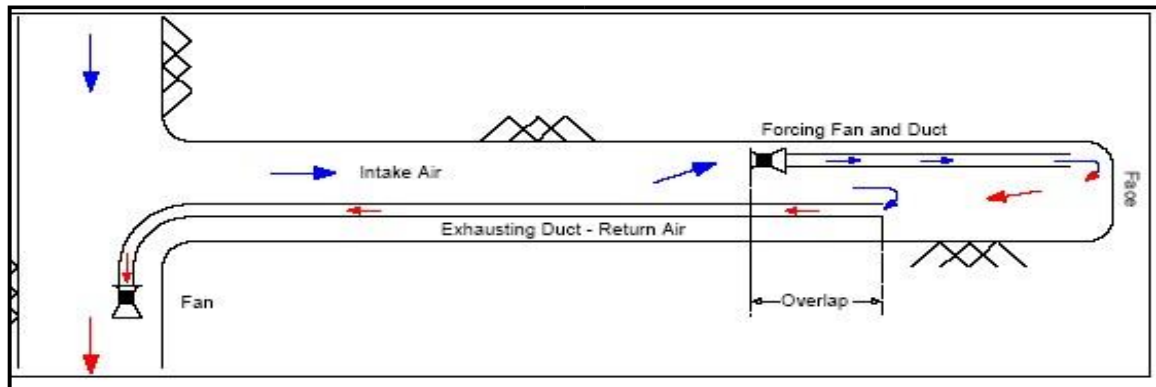
❖ ΜΕΙΚΤΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΣ

Ο μεικτός αερισμός (συνδυασμός φυσητικού και μυζητικού αερισμού) επιτυγχάνεται, είτε διαδοχικώς είτε συγχρόνως. Στην πρώτη περίπτωση εφαρμόζεται αρχικά μύζηση η οποία ακολουθείται από φύσηση. Κατά τη φάση της μυζήσεως απομακρύνεται το τμήμα της ζώνης καπνού που βρίσκεται μπροστά από το στόμιο του αγωγού. Στη συνέχεια ακολουθεί η φάση της φύσησης κατά την οποία η περιοχή μεταξύ του στομίου του αγωγού και του μετώπου καθαρίζεται από τους καπνούς. Όπως είναι φυσικό μία ποσότητα καπνού θα μετατοπιστεί μέσα στη στοιά αλλά με πολύ μικρότερο κίνδυνο λόγω της αραιώσης που έχει επέλθει. Πάντως ο απαιτούμενος συνολικά χρόνος για τον καθαρισμό του μετώπου είναι πολύ μεγαλύτερος από ότι στο φυσητικό σύστημα.

Στη δεύτερη περίπτωση είναι απαραίτητοι δύο ανεξάρτητοι αγωγοί, εκ των οποίων ο χρησιμοποιούμενος για τη φύσηση του αέρα μπορεί να είναι μικρού μήκους και διαμέτρου ώστε να μεταφέρεται εύκολα πολύ κοντά στο μέτωπο, μειώνοντας τον απαιτούμενο χρόνο καθαρισμού του αέρα. Έτσι το στόμιο του αγωγού μυζήσεως μπορεί να τοποθετηθεί σε αρκετή απόσταση από το μέτωπο πράγμα που επιτρέπει τη χρησιμοποίηση αγωγού μεγάλης διαμέτρου χωρίς να υπάρχει κίνδυνος καταστροφής του κατά την πυροδότηση των διατηρημάτων.

Τέλος οι καπνοί που αναμογλεύονται και απωθούνται από το φυσητικό αγωγό δεν θα κυκλοφορήσουν πίσω από το στόμιο του μυζητικού αγωγού αν η παροχή αυτού είναι μεγαλύτερη. Με αυτόν τον τρόπο το σύνολο των καπνών απάγεται χωρίς να

μετακινηθεί μέσα στην στοά. Πρόκειται λοιπόν για την πιο αποτελεσματική διάταξη [5].



Εικόνα 2.15 : Μεικτός αερισμός [3]

2.6.2 Εξοπλισμός βοηθητικού αερισμού

❖ Ανεμιστήρες

Ο ανεμιστήρας του βοηθητικού αερισμού έχει ως στόχο να παραλάβει από το κύκλωμα του πρωτεύοντος αερισμού μικρή σχετικά ποσότητα αέρα την οποία, μέσω αγωγού, διοχετεύει σε θέσεις όπου υπάρχει ελλιπής αερισμός.



Εικόνα 2.16 : Άποψη ανεμιστήρα βοηθητικού αερισμού

Οι ανεμιστήρες που χρησιμοποιούνται για τον βοηθητικό αερισμό είναι παρόμοιοι με αυτούς του κύριου αερισμού αλλά με λιγότερες δυνατότητες. Για τον αερισμό των υπογείων τεχνικών έργων ανεμιστήρες που χρησιμοποιούνται

είναι, κατά κανόνα, οι ελικοφόροι διότι είναι επιθυμητό να μην ελαττώνεται σημαντικά η παροχή σε περίπτωση αύξησης του μήκους του αγωγού, γεγονός που χαρακτηρίζει τους φυγοκεντρικούς ανεμιστήρες. Ακόμα, η εγκατάσταση του βοηθητικού αερισμού δεν είναι μόνιμη, δεδομένου ότι τόσο οι ανεμιστήρες, όσο και οι αγωγοί μεταφέρονται συχνά από θέση σε θέση ανάλογα με την πρόοδο της εκμετάλλευσης και των αναγκών σε αέρα. Γι' αυτό το λόγο, οι ανεμιστήρες πρέπει να είναι ισχυρής κατασκευής, αεροδυναμικού σχήματος και να καταλαμβάνουν τον ελάχιστο δυνατό χώρο. Προϋποθέσεις τις οποίες πληρούν κατά τον καλύτερο τρόπο οι ελικοφόροι ανεμιστήρες [5].

❖ Αγωγοί

Ο βοηθητικός αερισμός χρησιμοποιεί αγωγούς για την παροχέτευση του ρεύματος αέρα στο επιθυμητό σημείο, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην **εικόνα 3.15**, όπου παρουσιάζεται μια διάταξη διακλάδωσης αγωγών.



Εικόνα 2.17 : Αγωγός βοηθητικού αερισμού

Πιο συγκεκριμένα οι αγωγοί που χρησιμοποιούνται σε συστήματα βοηθητικού αερισμού, θα πρέπει να παρέχουν ελάχιστη αντίσταση στη δίοδο του αέρα, με λίγες διαφυγές, να προσαρμόζονται ευχερώς στις συνθήκες του μεταλλείου, να παρουσιάζουν αντοχή στις κακώσεις και στη διάβρωση και να μεταφέρονται και

να αποθηκεύονται εύκολα, όπως επίσης και να κατασκευάζονται από άφλεκτες ύλες, για να αποφεύγεται η μετάδοση πυρκαγιών. Τέλος είναι σημαντικό να παρουσιάζουν σχετική ηλεκτρική αγωγιμότητα, ώστε να αποφεύγεται η συγκέντρωση ηλεκτροστατικών φορτίων, τα οποία μπορεί να προκληθούν κυρίως από τριβή κονιορτών στην επιφάνεια των αγωγών.

Είναι φανερό ότι κάθε τύπος αγωγού δεν είναι δυνατόν να συγκεντρώνει στο μέγιστο βαθμό όλες τις παραπάνω ιδιότητες. Οι αγωγοί διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

1. Άκαμπτοι αγωγοί: Κατασκευάζονται από έλασμα (λαμαρίνα), από ξύλα (κόντρα πλακέ) και από άκαμπτη πλαστική ύλη. Χαρακτηρίζονται από την ανθεκτικότητά τους και την μικρή αντίσταση που παρέχουν στη δίοδο του αέρα μέσω αυτών.
2. Εύκαμπτοι αγωγοί: Κατασκευάζονται, είτε από κατάλληλα αδιάβροχα υφάσματα, είτε από αμιγείς πλαστικές ύλες, όπως χλωριούχο βινύλιο, νεοπρένιο, πολυαιθυλένιο κλπ. Το βάρος τους είναι 10 έως 20 φορές μικρότερο, σε σύγκριση με το βάρος των άκαμπτων αγωγών, πράγμα που αποτελεί και το κύριο πλεονέκτημά τους. Παράλληλα όμως παρουσιάζουν αρκετά μειονεκτήματα, όπως αυξημένη αντίσταση στη δίοδο του αέρα, σημαντικές διαφυγές, μειωμένη σχετικά αντίσταση στη δίοδο της φλόγας και ελαττωμένη γενικά αντοχή στις κακώσεις που οδηγούν συνήθως σε σχισίματα [5].

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι εύκαμπτοι αγωγοί δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν σε μυζητικό αερισμό εκτός αν διαθέτουν εσωτερικά σπειροειδή ελατήριο για την συγκράτηση της διατομής.



Εικόνα 2.18 : Εύκαμπτος αγωγός με σπειροειδή ελατήριο

Ακόμα με τη βοήθεια σχέσεων μπορούν να υπολογιστούν οι αντιστάσεις και οι απώλειες πιέσεων που δημιουργούνται κατά τη δίοδο του αέρα μέσω των αγωγών (ιδανική προϋπόθεση ότι είναι απόλυτα στεγανοί, πράγμα που δεν συμβαίνει στην πράξη). Η ανά μονάδα μήκους αντίσταση αγωγού κυκλικής διατομής, διαμέτρου D (m) υπολογίζεται από τη σχέση [3.1] σε kMu .

$$r = 0.0156 \times \lambda' \times \frac{\pi}{S^3} \quad [3.1]$$

όπου :

λ' : ο συντελεστής τριβής (χωρίς διαστάσεις)

Συνεπώς, οι απώλειες πίεσης h σε αγωγό μήκους l και με παροχή Q είναι:

$$h = r \times l \times Q^2 \quad [3.2]$$

Η σχέση [3.2] αυτή ισχύει για άκαμπτους αγωγούς.

Οι τιμές του συντελεστή λ' είναι για την περίπτωση αυτή:

- 0.018 για αγωγούς από άκαμπτη πλαστική ύλη
- 0.0205 για καινούργιους μεταλλικούς αγωγούς
- 0.022 για αγωγούς από αντικολλητικά ξύλα
- 0.026 για μεταλλικούς αγωγούς που έχουν υποστεί σχετική παραμόρφωση και οξείδωση

Οι διάφορες τιμές των αντιστάσεων των αγωγών μπορούν να ληφθούν και απευθείας από σχετικούς πίνακες. Η εξίσωση $h = r \times l \times Q^2$ δεν έχει εφαρμογή σε εύκαμπτους αγωγούς για πολλούς λόγους, κυρίως δε διότι η διάμετρος αυτών αυξάνεται με την πίεση. Στην πράξη, για τους εύκαμπτους αγωγούς χρησιμοποιείται η σχέση [3.3]:

$$h = 0.1 \times \left(\frac{\lambda'}{D^5} \right) \times l \times Q^a \quad [3.3]$$

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.

3. VOD (Ventilation On Demand)

Ο ορισμός του ventilation on demand θα μπορούσε να διατυπωθεί ως εξής: « Ο αερισμός κατ' απαίτηση (VOD) είναι η δυνατότητα ο αέρας ενός μεταλλείου να κατευθύνεται στην περιοχή που τον απαιτεί, στην ποσότητα που απαιτείται για τις τοπικές δραστηριότητες και τις συνθήκες του περιβάλλοντος την δεδομένη στιγμή. Με άλλα λόγια είναι η δυνατότητα να παρέχεται η απαιτούμενη ποσότητα αέρα εκεί που χρειάζεται μόνο όταν χρειάζεται» [14].

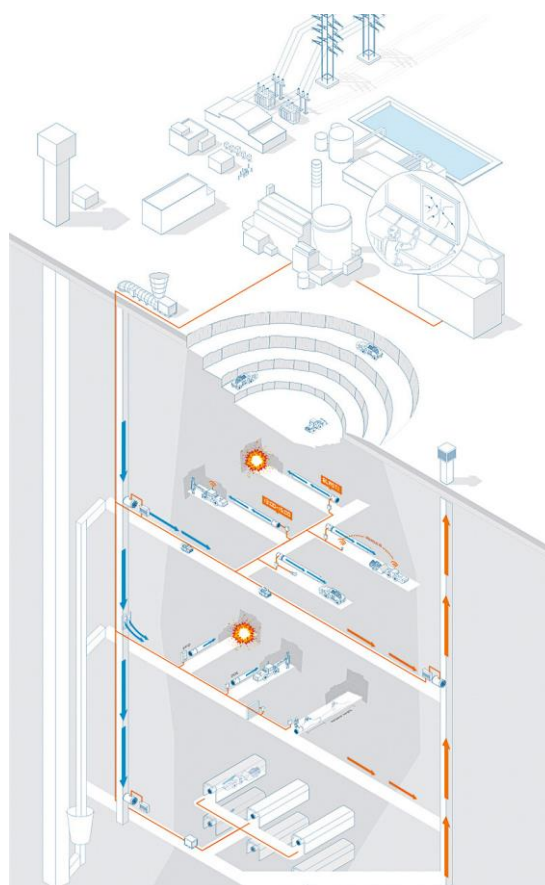
Καθώς η εξορυκτική δραστηριότητα αναπτύσσεται, τόσο τα μεταλλεία αυξάνονται σε βάθος και πολυπλοκότητα και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνονται και οι απαιτήσεις σε αέρα. Ωστόσο, όσον αφορά στον αερισμό των μεταλλείων υπάρχει ακόμα η νοοτροπία «set and forget mentality» [11], η οποία και αποτρέπει κατά έναν τρόπο την βελτιστοποίηση των συγκεκριμένων συστημάτων. Έτσι τα συστήματα αυτά παραμένουν σταθερά κατά την ανάπτυξη του υπόγειου χώρου με αποτέλεσμα να υπάρχει απώλεια της συνολικής απόδοσης.

Επίσης καθώς αυξάνεται η τιμή κατανάλωσης ενέργειας και παράλληλα τα όρια που θεσπίζονται από τον νόμο, για την έκθεση του προσωπικού στα αέρια και τις σκόνες των μεταλλείων, γίνονται όλο και πιο αυστηρά και η περιβαλλοντική συνείδηση των τοπικών κοινωνιών γίνεται όλο και πιο έντονη, είναι πρόδηλο πως η εφαρμογή του ventilation on demand κρίνεται αναγκαία. Διότι ο αερισμός κατ' απαίτηση οδηγεί μια στατική κατάσταση σε μια δυναμική και κατά κάποιο τρόπο έξυπνη κατανομή αέρα, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση ενέργειας μέσω της μείωσης της συνολικής παροχής και παράλληλα οι απαιτήσεις της ποιότητας αέρα είναι ευκολότερο να ικανοποιηθούν, δημιουργώντας έτσι ένα καθαρότερο και ασφαλέστερο περιβάλλον εργασίας [12,13].

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως κατά μέσο ορό, το κύκλωμα αερισμού αντιπροσωπεύει έως και το 50% του ενεργειακού κόστους ενός μεταλλείου και έως και το 15% του συνολικού κόστους του μεταλλείου[12]. Ισχύει γενικά η παραδοχή πως το VoD εφαρμόζεται για εξοικονόμηση ενέργειας και αύξηση παραγωγικότητας καθώς με τον συγκεκριμένο έλεγχο είναι δυνατή η ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας έως και 50% [24].

3.1 Χαρακτηριστικά του Ventilation on demand

Τα συστήματα VoD χρησιμοποιούν αισθητήρες, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στους χώρους του μεταλλείου, που μεταδίδουν σε πραγματικό χρόνο δεδομένα βασικών παραμέτρων όπως για παράδειγμα τις θέσεις του προσωπικού και του μηχανολογικού εξοπλισμού, τις τιμές των ρυπαντών, της θερμοκρασίας και της ποσότητας του αέρα, σε ένα κεντρικό σύστημα ελέγχου, επιτρέποντας τον έλεγχο των ανεμιστήρων και των ρυθμιστών αέρα του μεταλλείου [24].



Εικόνα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση εφαρμογής συστήματος VoD [14].

Γενικά, αναγνωρίζονται πέντε επίπεδα εφαρμογής των τεχνολογιών του Ventilation on Demand [14]:

- 1^ο επίπεδο: Manual Control. Σε αυτό το επίπεδο ο έλεγχος γίνεται χειροκίνητα. Δηλαδή ένας χειριστής μπορεί να ενεργοποιεί και να απενεργοποιεί τους ανεμιστήρες και να μεταβάλλει τους ρυθμιστές και τις θύρες αερισμού. Οι ανεμιστήρες μπορούν επίσης να εξοπλιστούν με VFD μονάδες (variable frequency drive) για να ρυθμίζεται η ταχύτητά τους.

- 2° επίπεδο: **Time of Day Scheduling**. Στο συγκεκριμένο επίπεδο οι προγραμματισμένες αλλαγές δεν γίνονται από κάποιον χειριστή αλλά έχουν προκαθοριστεί με βάση την ώρα εισόδου, ώστε να ακολουθείται ένα συγκεκριμένο πρόγραμμα.
- 3° επίπεδο: **Event- based**. Ο αερισμός αλλάζει ανάλογα με συγκεκριμένες δραστηριότητες του μεταλλείου. Π.χ.: ένας βοηθητικός ανεμιστήρας ενεργοποιείται μετά την ανατίναξη μετώπου ώστε να μειωθεί ο χρόνος απαγωγής των αερίων. Σε ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να οριστεί από πριν η επιθυμητή κατάσταση, όπως για παράδειγμα να ενεργοποιηθεί ένας συγκεκριμένος booster ανεμιστήρας μόνο αν γίνει ενεργοποίηση ενός συγκεκριμένου βοηθητικού ανεμιστήρα ώστε να εξασφαλιστεί η απαιτούμενη παροχή σε μια θέση εργασίας [25].
- 4° επίπεδο: **Tagging**. Η στρατηγική ελέγχου "Tagging" συνδέεται συνήθως με την έννοια του ventilation on demand, καθώς ο αέρας μπορεί να κατανεμηθεί στο μεταλλείο σύμφωνα με τις θέσεις του προσωπικού και του μηχανολογικού εξοπλισμού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τα συστήματα αερισμού να ρυθμίζονται έτσι ώστε να τροφοδοτούν τις θέσεις εργασίας με την απαιτούμενη παροχή με το ελάχιστο ενεργειακό κόστος τόσο για το βοηθητικό όσο και για το κυρίως δίκτυο αέρα [25].
- 5° επίπεδο: **Environmental**. Ο περιβαλλοντικός έλεγχος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δικλείδα ασφαλείας σε περίπτωση που οι συγκεντρώσεις των αερίων υπερβούν, τις θεσπισμένες από τον νόμο, ανώτατες τιμές έκθεσης. Ο περιβαλλοντικός έλεγχος επιτρέπει στο σύστημα αερισμού να κατανέμει αυτόματα την παροχή σύμφωνα με τις περιβαλλοντικές μεταβολές [25].

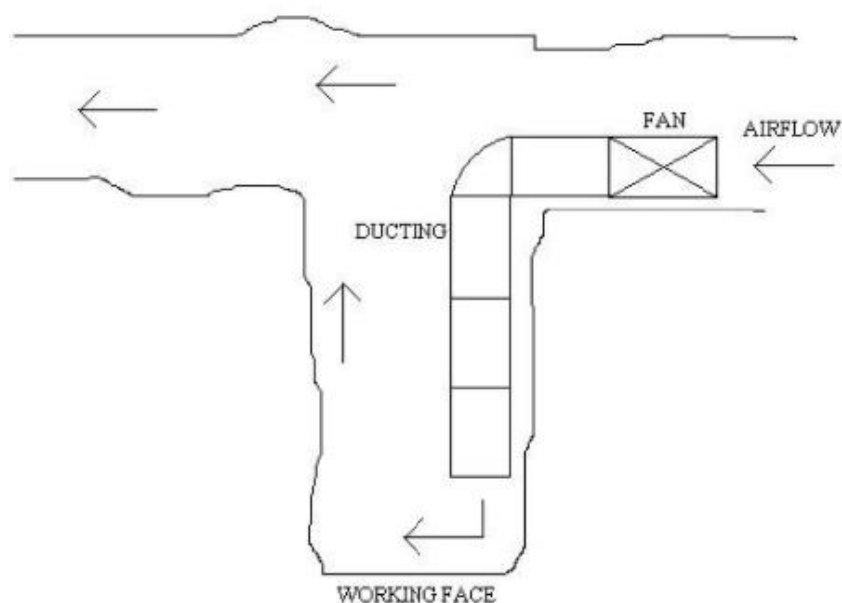
3.2 Εφαρμογές

Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής του Ventilation on Demand αποτελεί η προσέγγιση από τους Acuña et al (2014) [26]. Στην συγκεκριμένη θεωρητική μελέτη θεωρήθηκαν τρία σενάρια. Στο πρώτο υπάρχει η συμβατική πρακτική λειτουργίας ενός βοηθητικού ανεμιστήρα, δηλαδή ο ανεμιστήρας είτε ενεργοποιείται στην αρχή της βάρδιας είτε είναι μόνιμα ενεργός. Στο δεύτερο σενάριο, ο ανεμιστήρας ενεργοποιείται μόνο όταν εισέρχεται στο μέτωπο εργασίας ένα μηχάνημα LHD και απενεργοποιείται

μετά την έξοδό του. Τέλος στο τρίτο σενάριο, ο ανεμιστήρας ενεργοποιείται μόνο όταν η συγκέντρωση του NO₂ φτάσει σε μια ορισμένη προειδοποιητική τιμή (TWV), ώστε να εξασφαλιστεί το επίπεδο ασφαλείας της εργασίας. Και τα τρία σενάρια έχουν ως κοινό στόχο την αραίωση και την απομάκρυνση του αερίου, εξασφαλίζοντας ένα ασφαλές εργασιακό περιβάλλον.

Στην συγκεκριμένη μελέτη συγκρίνεται τόσο η συγκέντρωση των ρύπων όσο και το ενεργειακό κόστος στο πλαίσιο κάθε σεναρίου, προκειμένου να αξιολογηθεί η πιθανή εξοικονόμηση ενέργειας. Η τιμή του αερίου χρησιμοποιείται ως δείκτης αποτελεσματικότητας και η κατανάλωση ενέργειας ως δείκτης αποδοτικότητας .

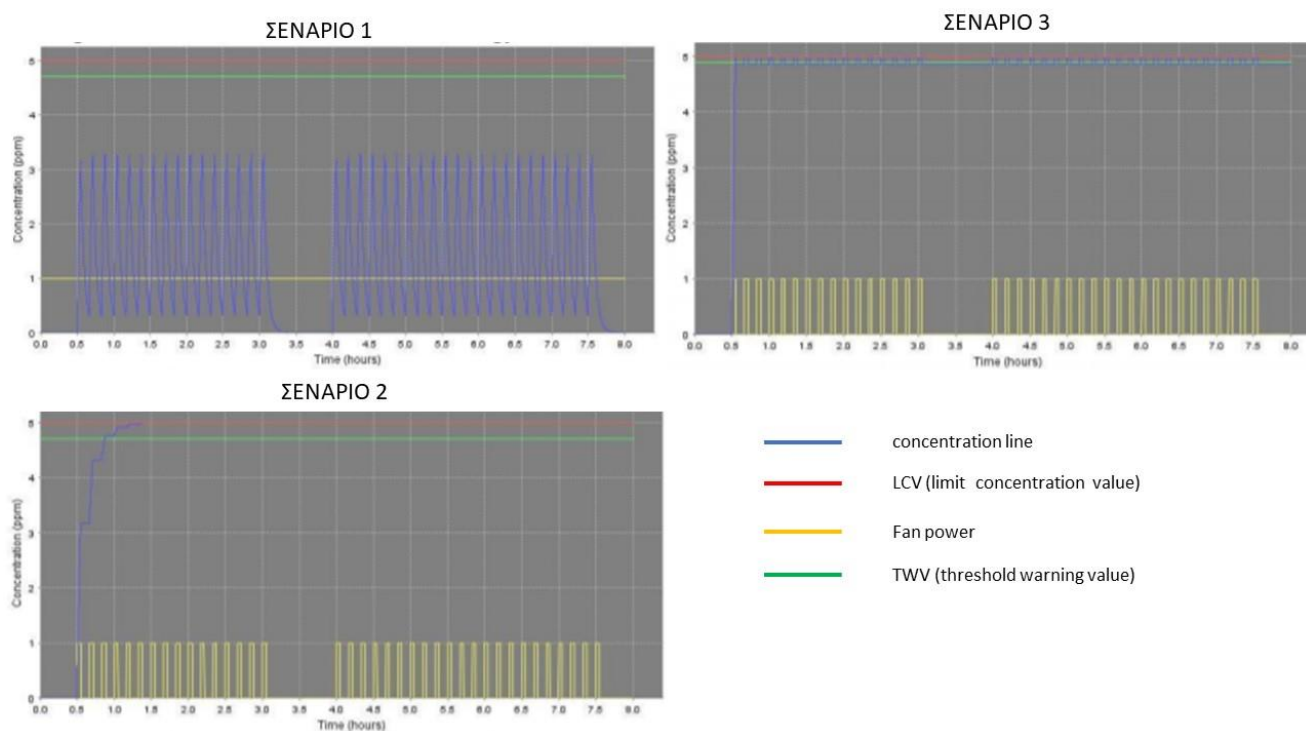
Επίσης το πρώτο σενάριο χρησιμοποιείται ως βάση αξιολόγησης των άλλων δύο. Το μηχάνημα LHD έχει ισχύ 400hp και λειτουργεί μόνο του στον χώρο εργασίας όπως φαίνεται στην εικόνα. Επίσης ο βοηθητικός ανεμιστήρας τροφοδοτεί την θέση εργασίας με μια παροχή 20 m³/s. Σε κάθε 10λεπτο κύκλο, το LHD θεωρήθηκε ότι βρισκόταν 3 λεπτά στο μέτωπο εργασίας και 7 λεπτά έξω από αυτό.



Εικόνα 3.2 : Σχηματική αναπαράσταση μετώπου εργασίας.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στην παρακάτω εικόνα 3.3, η διαφορά μεταξύ της γραμμής LCV (limit concentration value) και της γραμμής συγκέντρωσης του αερίου εκφράζει το ποσό της ενέργειας που μπορεί να εξοικονομηθεί. Και τα τρία σενάρια κρίθηκαν αποτελεσματικά, καθώς η τιμή του αερίου δεν ξεπέρασε το στόχο των 5 ppm. Η μέγιστη συγκέντρωση που καταγράφηκε για το πρώτο σενάριο ήταν 3,28 ppm,

ωστόσο ο σταθμισμένος χρονικός μέσος όρος ήταν μόνο 1,19 ppm, υποδεικνύοντας ότι η παροχή του αέρα στο χώρο εργασίας ήταν περισσότερο από επαρκής. Επομένως, η λύση αυτή είναι αποτελεσματική αλλά μπορεί να μην είναι η πλέον οικονομική και αναμένεται ότι τα αλλά δυο σενάρια μπορούν να βελτιώσουν περαιτέρω το λειτουργικό κόστος εξασφαλίζοντας συγχρόνως ένα ασφαλές περιβάλλον εργασίας.



Εικόνα 3.3: Αποτελέσματα σεναρίων

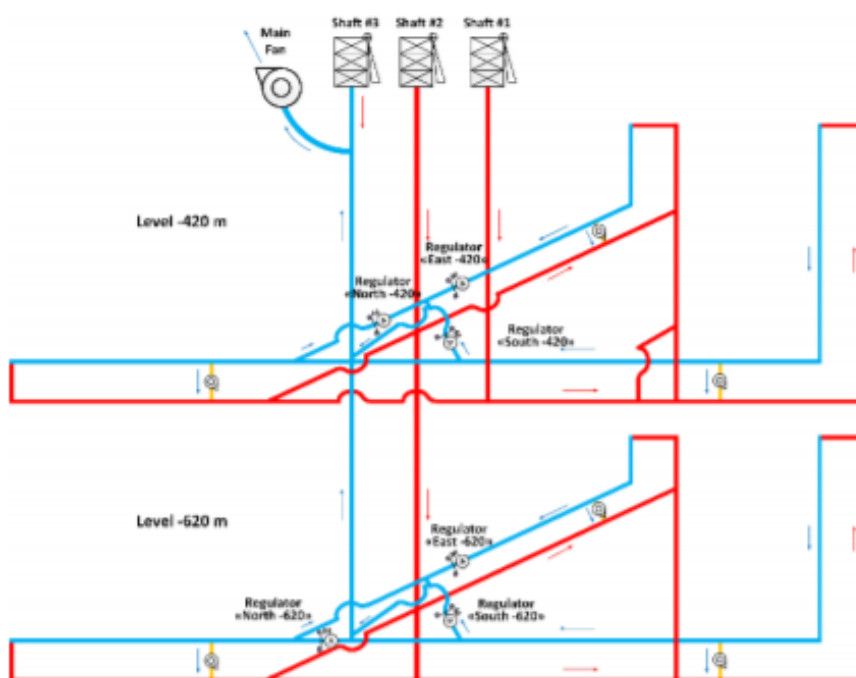
Αν και η συγκεκριμένη ανάλυση είναι θεωρητική αποτελεί ωστόσο ένα σημαντικό παράδειγμα της βελτίωσης της αποδοτικότητας του συστήματος αερισμού που μπορεί να επιφέρει η εφαρμογή του Ventilation on Demand.

Αν και έχουν αναπτυχθεί λογισμικά προγράμματα για εφαρμογή του VOD, ωστόσο στα περισσότερα από αυτά τα προγράμματα απαιτείται ο έλεγχος της κατάστασης και της ρύθμισης των παραμέτρων λειτουργίας να γίνεται από κάποιον χρήστη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να έχουν παρατηρηθεί λάθη ή ελλείψεις στον καθημερινό προγραμματισμό. Λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα έρχονται να δώσουν τα αυτόματα συστήματα ελέγχου.

Συγκεκριμένα, πολύ ενδιαφέρον παράδειγμα είναι η μελέτη που έγινε για το μεταλλείο #3 της εταιρείας Belaruskali (Δημοκρατία της Λευκορωσίας) από το Ινστιτούτο Μεταλλείων της Ρωσίας. Στα μεταλλεία ποτάσας η βάρδια παραγωγής απαιτεί την

περισσότερη παροχή αέρα λόγω της εκπομπής αερίων, ενώ στην βάρδια συντήρησης οι απαιτήσεις παροχής καθορίζονται ανάλογα του μηχανολογικού εξοπλισμού και του ανθρώπινου δυναμικού. Έτσι, κατά συνέπεια, οι απαιτήσεις αέρα μεταβάλλονται αισθητά από βάρδια σε βάρδια.

Για τον λόγο αυτόν, σχεδιάστηκε ένα σύστημα αυτόματου ελέγχου του αερισμού με χρήση τεχνητού νευρωνικού δικτύου. Το νευρωνικό δίκτυο σχεδιάστηκε ώστε να ρυθμίζει την γωνία ανοίγματος των πτερυγίων του ρυθμιστή με βάση τις απαιτήσεις σε αέρα. Όπως φαίνεται και στην εικόνα η διεύθυνση του αέρα γίνεται με την βοήθεια έξι ρυθμιστών.



Εικόνα 3.4: Σχηματική αναπαράσταση των θέσεων των ρυθμιστών.

Ο αλγόριθμος ελέγχου που δημιουργήθηκε περιστρέφει επαναληπτικά τα φύλλα κάθε ρυθμιστή έως ότου οι τιμές της προβλεπόμενης και της πραγματικής παροχής που διέρχεται από τους ρυθμιστές εξισωθούν. Δεδομένου ότι όλοι οι ρυθμιστές λειτουργούν στο ίδιο δίκτυο αέρα, η αλλαγή της θέσης των φύλλων ενός ρυθμιστή έχει ως αποτέλεσμα την ανακατανομή του αέρα σε ολόκληρο το δίκτυο και εφόσον το συγκεκριμένο δίκτυο έχει αργή απόκριση, η διαδικασία της ρύθμισης είναι χρονοβόρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι διακυμάνσεις αυτές να επιταχύνουν τη φθορά του εξοπλισμού αλλά παράλληλα καθίσταται και αδύνατη οποιαδήποτε περαιτέρω αναβάθμιση του ελέγχου, όπως για παράδειγμα ο εντοπισμός των θέσεων του

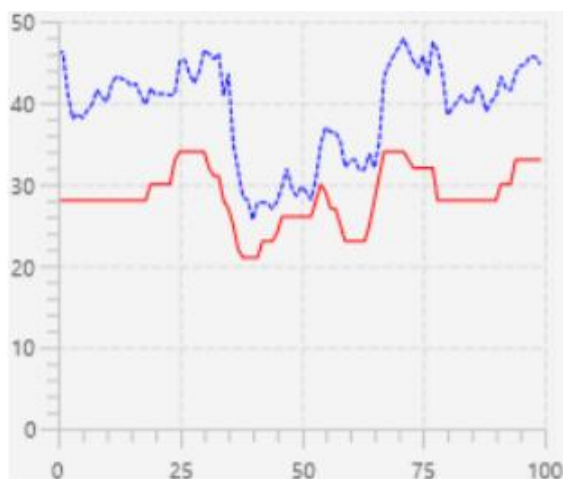
μηχανολογικού εξοπλισμού, επειδή η περίοδος ρύθμισης του συστήματος υπερβαίνει την περίοδο ενημέρωσης των απαιτήσεων αέρα.

Το παραπάνω πρόβλημα, λύθηκε με την ανάπτυξη ενός μοντέλου μηχανικής μάθησης με την χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων.

Αρχικά κατασκευάστηκε το μοντέλο του νευρωνικού δικτύου το οποίο περιέχει ένα κρυφό επίπεδο με 12 νευρώνες, ως συνάρτηση ενεργοποίησης ορίστηκε η συνάρτηση εφαπτομένης, ως δεδομένα εισόδου ορίστηκε η συνολική παροχή του δικτύου και ως δεδομένα εξόδου οι γωνίες των ανοιγμάτων των ρυθμιστών. Επιλέχθηκε η συνολική παροχή ως δεδομένο εισόδου, διότι αυτή μπορεί να επιτευχθεί για διαφορετικά σύνολα γωνιών των ρυθμιστών.

Το σφάλμα της εκπαίδευσης του συγκεκριμένου μοντέλου ήταν μεγαλύτερο του 20% και το οποίο χαρακτηρίζεται ως αρκετά μεγάλο, άρα το νευρωνικό δίκτυο δεν λειτουργούσε ορθά. Ως εκ τούτου, το επόμενο βήμα ήταν η κατασκευή διαφορετικών δικτύων, με την ίδια ακριβώς αρχιτεκτονική, για κάθε ρυθμιστή. Το καινούργιο σφάλμα εκπαίδευσης ήταν λιγότερο του 3% για ένα σύνολο δεδομένων το οποίο διαμορφώθηκε για βραχυπρόθεσμες προβλέψεις.

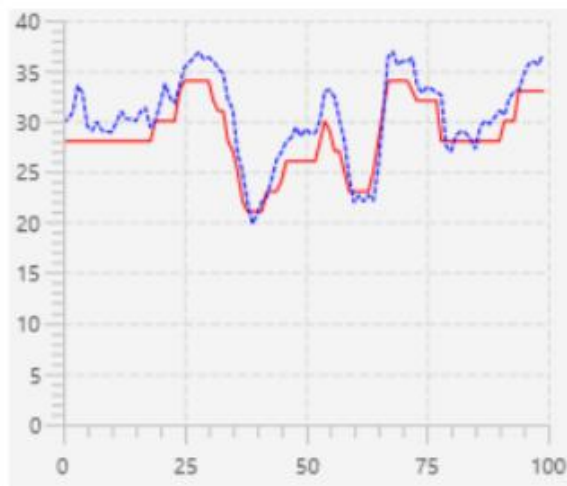
Ωστόσο, η εφαρμογή του μοντέλου για μακροπρόθεσμες προβλέψεις (μετά από τρεις μήνες) οδήγησε σε δραματική αύξηση των σφαλμάτων εκπαίδευσης (έως και 10%).



Εικόνα 3.5: Approximated values of regulator#4 angles on test set (after three months).

Για την επίλυση του προβλήματος έγινε εισαγωγή, στο επίπεδο εισόδου του δικτύου, μιας παραμέτρου η οποία εκφράζει την σχέση μεταξύ της παροχής αέρα στον ρυθμιστή προς την συνολική παροχή του μεταλλείου διαιρεμένη με την αντίστοιχη γωνία των

περυγίων των ρυθμιστών. Με αυτή την ρύθμιση τα νευρωνικά δίκτυα παρουσίαζαν ένα σφάλμα περίπου στο 2 % και όπως φαίνεται και στην εικόνα οι προβλέψεις που έδιναν ήταν πολύ κοντά στις πραγματικές.



Εικόνα 3.6: Approximated values of regulator#4 angles on test set (after three months) calculated using a temporal parameter.

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα της εφαρμογής αυτής έχουν την πιθανότητα είτε να υπερεκτιμήσουν την απαιτούμενη παροχή αέρα, άρα το σύστημα αερισμού δεν είναι αποδοτικό, είτε να υποτιμήσουν την απαιτούμενη παροχή, που σημαίνει πως δεν υπάρχει ασφαλές περιβάλλον εργασίας. Σύμφωνα με αυτήν την παραδοχή, έγινε εισαγωγή μιας χρονικής παραμέτρου η οποία επιτρέπει την μείωση του αριθμού των επαναλήψεων ώστε να μειωθεί η διάρκεια των πιθανών διακυμάνσεων του ρυθμιστή.

Από τα παραπάνω, είναι προφανές πως η τεχνητή νοημοσύνη και κατ' επέκταση οι εφαρμογές της Μηχανικής μάθησης βελτιστοποιούν την τεχνολογία του Ventilation on Demand. Η ανάπτυξη ενός μοντέλου Μηχανικής μάθησης το οποίο είναι αριθμητικό και όχι αναλυτικό, δηλαδή τα δεδομένα του έχουν συλλεχθεί βάση βηματικών αλλαγών, σημαίνει ότι η αρχική ανάπτυξη ελέγχου και η συντήρηση του μοντέλου κατά την ανάπτυξη του μεταλλείου είναι συγκριτικά μια εύκολη διαδικασία [23]. Με την χρήση της τεχνητής νοημοσύνης το σύστημα, δηλαδή οι ανεμιστήρες και οι ρυθμιστικές θύρες, αρχικά εκπαιδεύεται μέσα από μια βάση αριθμητικών δεδομένων, δηλαδή των μετρήσεων που παρέχουν οι αισθητήρες. Ουσιαστικά, δημιουργείται ένα σύστημα αυτόματου ελέγχου, το οποίο την χρονική στιγμή ένα, δηλαδή την στιγμή που

αλλάζει η δυναμική κατάσταση του χώρου και στέλνονται τα σήματα από τους αισθητήρες, θα μεταβάλλει αυτόματα, το σημείο λειτουργίας του συστήματος.

Η ανάπτυξη ενός μοντέλου αυτόματου ελέγχου μπορεί να αποφέρει πολλά οφέλη. Κυριότερα από αυτά είναι πως οι περιορισμοί που θέτονται κατά την εκπαίδευση του μοντέλου (π.χ. ανώτατο όριο τιμής αερίου) μπορούν πολύ εύκολα να διαμορφωθούν και να αλλάξουν χωρίς να επιφέρουν καθυστερήσεις στην ανταπόκριση του συστήματος ή σημαντικό κόστος. Επίσης η αναβάθμιση τους μπορεί να είναι συνεχής καθώς οι βάσεις των δεδομένων εκπαίδευσης μπορούν να εμπλουτίζονται με την πάροδο του χρόνου άρα το μοντέλο θα αναγνωρίζει περισσότερα μοτίβα με αποτέλεσμα να δίνει καλύτερες μελλοντικές προβλέψεις. Τέλος, τα συγκεκριμένα μοντέλα μπορούν να διασφαλίσουν την συνεχή βελτιστοποίηση του δικτύου αερισμού, παρά την συνεχή ανάπτυξη του μεταλλείου, καθώς αξιολογούν κάθε σήμα που στέλνεται από τους αισθητήρες πριν μεταβάλλουν τις λειτουργικές παραμέτρους του συστήματος.

4. ΤΕΧΝΗΤΗ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ (Artificial Intelligence)

Η Τεχνητή Νοημοσύνη είναι από τις πλέον ενδιαφέρουσες γνωστικές περιοχές της πληροφορικής. Κύριος στόχος της είναι η δημιουργία ευφών υπολογιστικών συστημάτων τα οποία μπορούν να χαρακτηριστούν ότι αντικατοπτρίζουν αυτό ακριβώς που σημαίνει «νοημοσύνη» για τους ανθρώπους. Η τεχνητή νοημοσύνη χωρίζεται σε δυο κατηγορίες:

1. Την κλασική ή συμβολική νοημοσύνη η οποία ασχολείται με την προσομοίωση της ανθρώπινης νόησης. Προσεγγίζει συστήματα και αλγόριθμους που βασίζονται στην γνώση όπως για παράδειγμα τα expert systems που χρησιμοποιούν λογική, κανόνες και βάσεις γνώσης.
2. Την υπολογιστική νοημοσύνη η οποία βασίζεται στην μίμηση βιολογικών εργασιών όπως αυτή του ανθρώπινου εγκεφάλου. Χαρακτηριστικά συστήματα είναι τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα και οι γενετικοί αλγόριθμοι [9].

Η τεχνητή νοημοσύνη είναι ένα πεδίο μελέτης το οποίο περιλαμβάνει αρκετές θεωρίες, τεχνολογίες και μεθόδους. Για να λειτουργήσει χρειάζεται γρήγορους, ευφυείς και επαναληπτικής διαδικασίας αλγόριθμους σε συνδυασμό με μεγάλες βάσεις δεδομένων έτσι ώστε το λογισμικό να μπορέσει να μάθει αυτόματα από τα μοτίβα ή τα χαρακτηριστικά των δεδομένων. Στην συγκεκριμένη εργασία αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος μηχανικής μάθησης με τη χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων.

➤ **Machine learning (μηχανική μάθηση):**

Η μηχανική μάθηση χρησιμοποιεί μεθόδους από τα νευρωνικά δίκτυα, την στατιστική, την φυσική και την επιχειρησιακή έρευνα με σκοπό την παραγωγή γνώσης από την ανάλυση των δεδομένων χωρίς όμως να έχει προγραμματιστεί συγκεκριμένα τι να εξετάσει ή τι να συμπεράνει. Η μηχανική μάθηση ουσιαστικά αυτοματοποιεί την κατασκευή των αναλυτικών μοντέλων.

➤ **Artificial Neural network (τεχνητά νευρωνικά δίκτυα):**

Είναι ένας τύπος μηχανικής μάθησης που αποτελείται από αλληλοσυνδεδεμένες απλές μονάδες επεξεργασίας, τους νευρώνες (neurons). Βασικό χαρακτηριστικό των νευρωνικών δικτύων είναι πως παρέχουν την

δυνατότητα για μαζική παράλληλη επεξεργασία των δεδομένων που λαμβάνουν σε αντίθεση με τα συνήθη μοντέλα τα οποία στηρίζονται σε σειριακή εκτέλεση λογικών και μαθηματικών πράξεων. Πρόκειται ουσιαστικά για απλουστευμένα μαθηματικά μοντέλα, όπου οι μονάδες είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους με μια συγκεκριμένη μορφή τοπολογίας. Με τον τρόπο αυτό, κάθε νευρώνας επεξεργάζεται τα δεδομένα εισόδου και στέλνει το αποτέλεσμα αυτής της επεξεργασίας στους άλλους νευρώνες με τους οποίους είναι συνδεδεμένος. Η συγκεκριμένη διαδικασία απαιτεί πολλές διελεύσεις των δεδομένων ώστε να βρεθούν οι κατάλληλες συνδέσεις για να επιτευχθεί η εξαγωγή νοήματος από τα δεδομένα.

Ουσιαστικά κύριος στόχος της τεχνητής νοημοσύνης είναι η ανάπτυξη ενός λογισμικού το οποίο μπορεί να αναλύει τα δεδομένα εισόδου και συγχρόνως να εξάγει πληροφορίες με νόημα [9].

4.1 Machine Learning (Μηχανική Μάθηση)

Ο όρος μηχανική μάθηση εισήχθη πρώτη φορά στην IBM το 1959 από τον Αμερικανό εμπειρογνώμονα της Τεχνητής Νοημοσύνης Arthur Samuel και αναφέρει το εξής: "Ένα πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή λέγεται ότι μαθαίνει από την εμπειρία (E) σε σχέση με κάποια κλάση εργασιών (T) και μέτρηση απόδοσης (P) εάν η απόδοσή του σε εργασίες στο T όπως μετράται από το P βελτιώνεται με την εμπειρία E".

Η μηχανική μάθηση είναι μια προηγμένη μορφή ανάλυσης και υπολογισμού δεδομένων η οποία χρησιμοποιεί τις τεχνικές αναγνώρισης προτύπων (pattern recognition) των υπολογιστών για την εξαγωγή γνώσης από τα δεδομένα. Ουσιαστικά είναι μια τεχνική προγραμματισμού εμπνευσμένη από την τεχνητή νοημοσύνη και η οποία στοχεύει στην εύρεση μοτίβων, από τα δεδομένα με τα οποία τροφοδοτείται, με σκοπό την αυτόματη πρόβλεψη κάποιας εξόδου δεδομένων με βάση το συγκεκριμένο μοτίβο. Εκτός από τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα τα οποία θα αναπτυχθούν παρακάτω, καθώς είναι και ο τύπος Μηχανικής μάθησης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία., υπάρχουν και άλλες μέθοδοι machine learning όπως είναι τα δέντρα αποφάσεων (Decision Trees), ο επαγωγικός λογικός προγραμματισμός (Inductive Logic Programming), οι μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης (Support Vector

Machines), η ομαδοποίηση (Clustering), τα δίκτυα Bayes και οι γενετικοί αλγόριθμοι (Genetic Algorithms).

4.1.1 Τύποι Μηχανικής Μάθησης

Υπάρχουν τέσσερις γενικευμένες κατηγορίες μηχανικής μάθησης:

➤ **Μάθηση με επίβλεψη (supervised learning) :**

Σε αυτήν την κατηγορία η επιθυμητή έξοδος είναι γνωστή από τον χρήστη, ο οποίος μπορεί να δώσει νόημα στα δεδομένα αλλά και να διορθώσει πιθανά λάθη του συστήματος. Η μηχανή εκπαιδεύεται χρησιμοποιώντας εισόδους με ετικέτες τις οποίες συνδέει σε αντίστοιχες εξόδους. Κατά αυτόν τον τρόπο αναπτύσσεται ένα μοντέλο πρόβλεψης (predictive model). Στην υπο επίβλεψη μάθηση οι αλγόριθμοι εκπαιδεύονται με ένα σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης (training data) με τα αναμενόμενα αποτελέσματα να είναι καλά καθορισμένα. Οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται συχνά σε προβλήματα ταξινόμησης και παλινδρόμησης.

➤ **Μάθηση χωρίς επίβλεψη (unsupervised learning):**

Στην μάθηση χωρίς επίβλεψη ο χρήστης συχνά δεν γνωρίζει την σωστή απάντηση και ο υπολογιστής βρίσκει τις τάσεις στα δεδομένα με βάση κάποιον αλγόριθμο εκπαίδευσης (συνήθως πρόκειται για τεχνική ομαδοποίησης (clustering technique)). Ουσιαστικά οι αλγόριθμοι σχεδιάζονται ώστε να ανιχνεύουν δομές σε σύνολα δεδομένων που το επιθυμητό αποτέλεσμα είναι άγνωστο.

➤ **Μάθηση με ημι-επίβλεψη (semi-supervised learning):**

Η συγκεκριμένη μάθηση βρίσκεται μια κατηγορία κάτω από την μάθηση με επίβλεψη. Δηλαδή υπάρχουν δεδομένα εισόδου τα οποία δεν έχουν κάποια ετικέτα και η μηχανή πρέπει να κάνει τις απαραίτητες προσεγγίσεις ώστε να αντισταθμίσει τα συγκεκριμένα δεδομένα. Θεωρείται πως είναι πιο αργή και λιγότερο αποδοτική από την μάθηση με επίβλεψη.

➤ **Ενισχυτική μάθηση (reinforcement learning):**

Πρόκειται για μια προσέγγιση δοκιμής και σφάλματος που βασίζεται σε σύστημα ανταμοιβής με πόντους. Ουσιαστικά ο αλγόριθμος μαθαίνει μια στρατηγική ενεργειών μέσα από άμεση αλληλεπίδραση με το περιβάλλον. Είναι μια τεχνική

πολύ χρήσιμη σε προβλήματα σχεδιασμού όπως για παράδειγμα η βελτιστοποίηση εργασιών σε εργοστασιακούς χώρους.

4.2 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ)

Πρόκειται ουσιαστικά για μια αρχιτεκτονική δομή η οποία αποτελείται από διασυνδεδεμένα νευρωνικά υπολογιστικά στοιχεία, δηλαδή από ένα πλήθος τεχνητών νευρώνων οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους. Είναι μοντέλα που χαρακτηρίζονται από την ικανότητα να ανταποκρίνονται σε ερεθίσματα που δέχονται στην είσοδο τους, να μαθαίνουν και να προσαρμόζονται στο περιβάλλον τους.

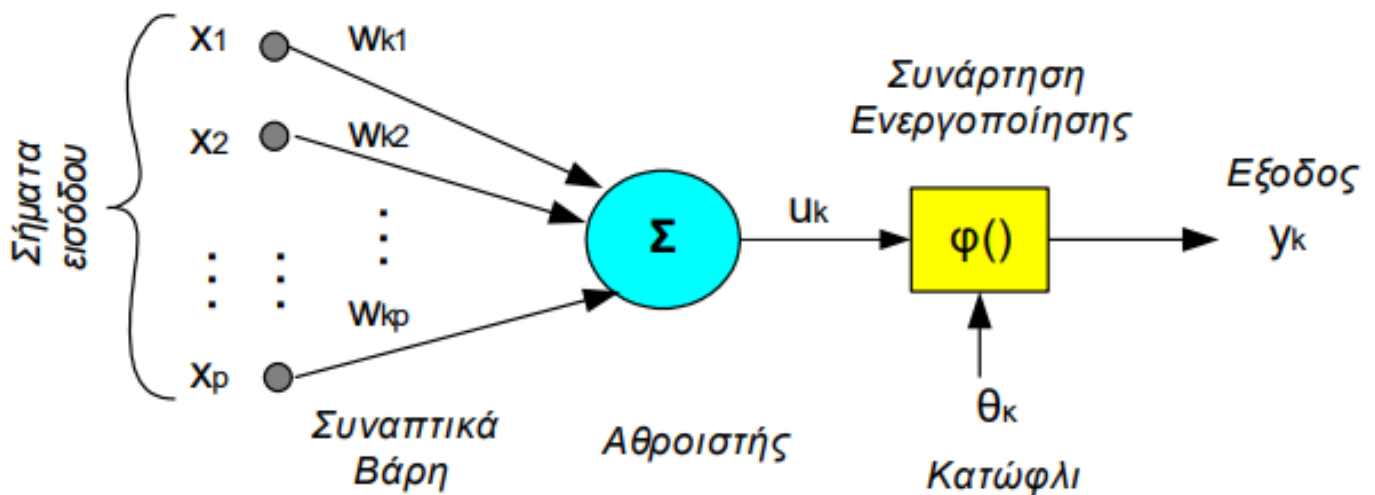
Οι αλγόριθμοι που εφαρμόζονται προσπαθούν ουσιαστικά να μιμηθούν τον τρόπο λειτουργίας των νευρώνων του ανθρώπινου εγκεφάλου. Κάθε τεχνητός νευρώνας είναι στην ουσία μια συνάρτηση (συνάρτηση ενεργοποίησης) η οποία δέχεται μια είσοδο και παράγει μια έξοδο. Σε ένα ΤΝΔ η επεξεργασία των δεδομένων είναι παράλληλη και κατανομημένη και ο βαθμός διασύνδεσης μεταξύ των τεχνητών νευρώνων είναι πολύ μεγάλος [9]. Επίσης η ομοιότητα που έχουν σε σχέση με τον ανθρώπινο εγκέφαλο αναγνωρίζεται στην γνώση, αποκτάται από το δίκτυο μέσα από μια διαδικασία μάθησης- εκπαίδευσης και στο γεγονός πως οι δυνάμεις σύνδεσης των νευρώνων (συνοπτικά βάρη) χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση γνώσης.

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα εμφανίζουν τα εξής βασικά χαρακτηριστικά:

- Προσαρμοστικότητα (μπορούν να προσαρμόζονται και να αναδιοργανώνονται)
- Γενικευσιμότητα (αποδίδουν ικανοποιητικά ακόμη και σε καταστάσεις θορύβου)
- Αντιμετώπιση χρονικά εξελισσόμενων καταστάσεων (ικανοποιητική αντιμετώπιση δυναμικών καταστάσεων)

4.2.1 Μοντέλο τεχνητού νευρώνα

Η θεμελιώδης μονάδα επεξεργασίας της πληροφορίας στα ΤΝΔ είναι ο τεχνητός νευρώνας (artificial neuron) ή κόμβος (node) ο οποίος είναι ένα υπολογιστικό μοντέλο, τα μέρη του οποίου αντιστοιχούν με αυτά του βιολογικού νευρώνα. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το γενικό μοντέλο ενός τεχνητού νευρώνα.



Εικόνα 4.1: Γενικό μοντέλο τεχνητού νευρώνα [9]

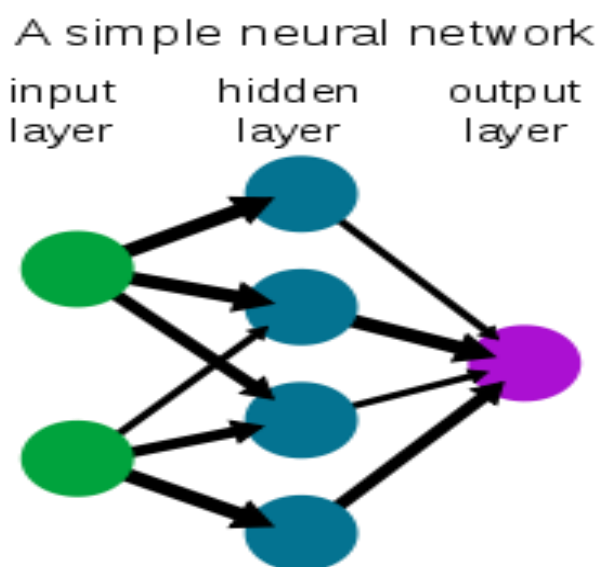
Παρατηρώντας το παραπάνω μοντέλο αναγνωρίζονται τα εξής βασικά στοιχεία:

- Συνάψεις (synapses) ή Συνδέσεις (connections) οι οποίες χαρακτηρίζονται από ένα βάρος (weight). Συγκεκριμένα, ένα σήμα x_j στην είσοδο της σύναψης j , που συνδέεται με τον νευρώνα k , πολλαπλασιάζεται με το βάρος w_{kj} .
- Αθροιστής (adder) ο οποίος προσθέτει τα σήματα εισόδου τα οποία έχουν πολλαπλασιαστεί με τα βάρη.
- Συνάρτηση ενεργοποίησης (activation function) η οποία καθορίζει την έξοδο του νευρώνα
- Εξωτερικό κατώφλι (threshold) ενεργοποίησης θ_k . Η τιμή του κατωφλιού καθορίζει πότε ενεργοποιείται ο νευρώνας.

Περνώντας σε περαιτέρω ανάλυση της ανατομίας ενός ΤΝΔ, είναι σημαντικό να προσδιοριστούν συγκεκριμένοι όροι. Καταρχάς κάθε ΤΝΔ αποτελείται, όπως έχει αναφερθεί, από νευρώνες οι οποίοι έχουν συνδέσεις που τους επιτρέπουν να δέχονται (outputs ή inputs) και να αποστέλλουν «σήματα». Στην συνέχεια, το σύνολο των εισερχομένων σημάτων «αθροίζεται» και στην περίπτωση που το αποτέλεσμα υπερβαίνει κάποιο όριο ενεργοποίησης (activation level), υφίστανται μετατροπή μέσω μιας συνάρτησης μεταφοράς (transfer function). Το συγκεκριμένο εξερχόμενο σήμα είναι το δεδομένο εισόδου (input) του επόμενου νευρώνα ή το αποτέλεσμα εξόδου

(output). Το σημείο επικοινωνίας δυο νευρώνων ονομάζεται σύνδεση και η ισχύς της συνοπτικό βάρος (synaptic weight).

Κατά δεύτερον, υπάρχουν οι στοιβάδες (layers). Κάθε τεχνητό νευρωνικό δίκτυο αποτελείται από στοιβάδες νευρώνων οι οποίες είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους. Διακρίνονται σε στοιβάδα εισόδου (input layer), σε στοιβάδα εξόδου (output layer) και σε κρυμμένη στοιβάδα (hidden layer). Η κρυμμένη στοιβάδα μπορεί να είναι παραπάνω από μια στο πλήθος. Μια χαρακτηριστική δομή ενός απλού νευρωνικού δικτύου παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4.2: Απεικόνιση απλού νευρωνικού δικτύου

Ο ορισμός της κρυμμένης στοιβάδας οφείλεται στην ανυπαρξία γνώσεων του χρήστη για το είδος των διεργασιών, των υπολογισμών και της προσαρμογής των παραμέτρων. Αναφέρεται συχνά ως «μαύρο κουτί» ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου, το οποίο μόλις εισαχθούν τα δεδομένα εισόδου επιλέγει μόνο του ποιες μεταβλητές είναι σημαντικότερες για την ανάπτυξη του μοντέλου. Αν και είναι φανερό πως η κρυμμένη στοιβάδα αποτελεί μειονέκτημα, αυτό υπερκαλύπτεται αν οι νευρώνες εξόδου παρέχουν σωστή απόκριση του δικτύου άρα και τη λύση του προβλήματος.

Επίσης, υπάρχουν οι συνδέσεις (connections). Πρόκειται ουσιαστικά για κάθε γραμμή επικοινωνίας μεταξύ του νευρώνα-πομπού και του νευρώνα-δέκτη του σήματος. Υπάρχουν οι διεγερτικές συνδέσεις (excitatory) που προκαλούν ενεργοποίηση του νευρώνα και οι ανασταλτικές (inhibitory) που αποτρέπουν αυτή την ενεργοποίηση,

όπως επίσης και πολύπλοκα είδη συνδέσεων. Ουσιαστικά οι συνδέσεις μαζί με τα συνοπτικά βάρη καθορίζουν την διάδοση του σήματος μέσα στο δίκτυο.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η σωστή ρύθμιση των βαρών είναι πολύ σημαντική για την αποτελεσματική λειτουργία του δικτύου. Τα βάρη σταθμίζουν την έξοδο του νευρώνα, οι τιμές που παίρνουν κυμαίνονται μεταξύ είτε του 0 ως 1 είτε του -1 ως 1. Όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή τόσο περισσότερο το συγκεκριμένο στοιχείο εισόδου επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα. Πρόκειται ουσιαστικά, για την μνήμη του νευρωνικού δικτύου.

Κλείνοντας, πρέπει να σημειωθεί πως τα δεδομένα εισόδου χωρίζονται εξ' αρχής σε τρεις ομάδες:

- Ομάδα εκπαίδευσης (training set)
- Ομάδα αξιολόγησης ή επικύρωσης (cross validation set)
- Ομάδα ελέγχου (testing set)

Κατά την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου, οι τιμές των συναπτικών βαρών μεταβάλλονται συνεχώς με βάση τον κανόνα εκμάθησης (learning rule). Οπότε ανάλογα με την αρχιτεκτονική του δικτύου απαντώνται και διαφορετικές διαδικασίες εκμάθησης όπως για παράδειγμα η ελεγχόμενη μάθηση (supervised learning) και η μη-ελεγχόμενη μάθηση (unsupervised learning).

❖ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΙΣ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ /ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Μόλις τα δεδομένα εισόδου εισέλθουν στον νευρώνα, αθροίζονται για να δώσουν το αποτέλεσμα της συνάρτησης, η οποία είναι θεμελιωδής για όλα τα δίκτυα:

$$net_i = \sum_{j=1}^n (w_{ij} \times x_j)$$

Όπου, το καθαρό αποτέλεσμα (net) του εξερχόμενου σήματος από τον νευρώνα i , ισούται με το άθροισμα του γινομένου των βαρών επί των αντίστοιχων σημάτων που δέχεται ο νευρώνας i από τον νευρώνα j .

Άρα, το αποτέλεσμα της συνάρτησης ενεργοποίησης είναι το άθροισμα των εισερχομένων σημάτων σε μια δεδομένη χρονική στιγμή. Οι κατεξοχήν χρησιμοποιούμενες τιμές είναι -1 (ανενεργός νευρώνας) και 1 (ενεργός νευρώνας). Η

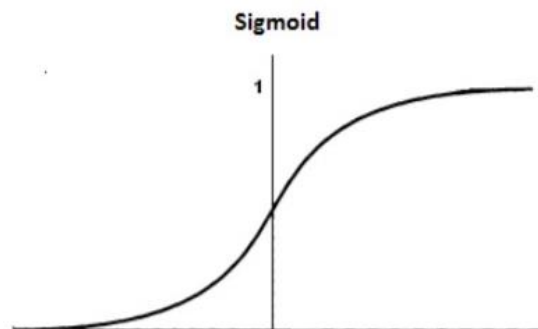
τιμή αυτή εισάγεται στην συνάρτηση μεταφοράς η οποία και δίνει το πραγματικό αποτέλεσμα εξόδου. Σε περίπτωση που είναι επιθυμητό ο νευρώνας να ενεργοποιηθεί για μια τιμή η οποία είναι μεγαλύτερη από έναν συγκεκριμένο αριθμό τότε στο τέλος του παραπάνω αθροίσματος προσθέτουμε την παράμετρο bias (όριο διέγερσης/συστηματικό σφάλμα). Είναι ουσιαστικά μια παραμετρος αδράνειας, διότι αν το άθροισμα των εισερχομένων σημάτων δεν ξεπερνάει την τιμή της παραμέτρου ο νευρώνας θα παραμείνει ανενεργός.

Υπάρχει ένα πλήθος από διαθέσιμες συναρτήσεις ενεργοποίησης του νευρώνα. Η επιλογή τους εξαρτάται κάθε φορά από την εφαρμογή που βρίσκει το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο. Στην συγκεκριμένη εργασία θα αναπτυχθούν οι τρεις δημοφιλέστερες:

- Σιγμοειδής ή λογιστική συνάρτηση (sigmoid or logistic)

Πρόκειται για μια συνεχή και μονότονη καμπύλη. Η συγκεκριμένη συνάρτηση είναι παραγωγίσιμη σε όλο το πεδίο ορισμού της και συμπιέζει τις τιμές των αποτελεσμάτων εξόδου μεταξύ του 0 και 1. Δηλαδή, οι αρνητικές είσοδοι παίρνουν τιμές κοντά στο 0 και οι θετικές κοντά στο 1.

$$F = \frac{1}{1 + e^{-\beta(NE(x)-\theta)}}$$

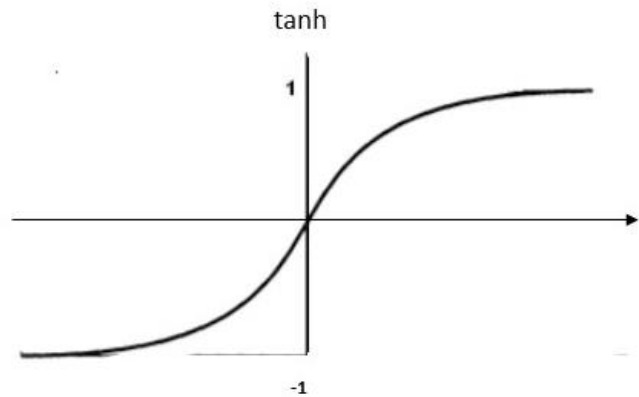


Όπου, θ είναι το όριο διέγερσης και β ένας παράγοντας που σχετίζεται με την κλίση. Αν και η σιγμοειδής συνάρτηση ήταν η πλέον χρησιμοποιούμενη στις κρυφές στοιβάδες των πολυστοιβαδικών ΤΝΔ, πλέον έχει αντικατασταθεί σε μεγάλο ποσοστό από συναρτήσεις όπως η \tanh ή η ReLU.

- Υπερβολική συνάρτηση εφαπτομένης (hyperbolic tangent)

Είναι ουσιαστικά ίδιας μορφής με την σιγμοειδή και διαθέτει τις ίδιες ιδιότητες, με την διαφορά πως επειδή δίνει στα αποτελέσματα εξόδου τιμές από -1 έως 1, έχει καλύτερες δυνατότητες.

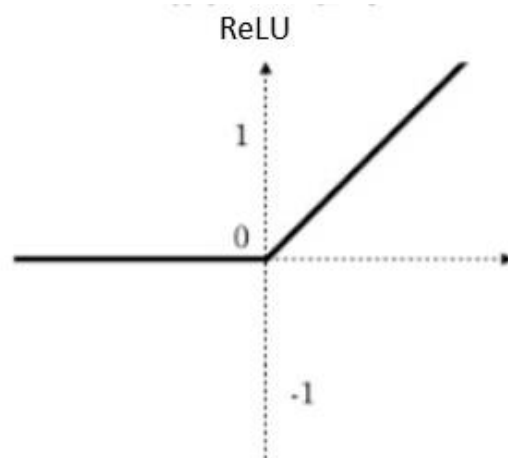
$$F = \tanh(x/2)$$



- Ανορθωμένη γραμμική (ReLU / Rectified Linear Unit)

Η συγκεκριμένη συνάρτηση δεν ενεργοποιεί όλους τους νευρώνες ταυτόχρονα. Όπως φαίνεται και στην γραφική παράσταση, οι αρνητικές τιμές μετατρέπονται σε μηδέν και κατά αυτόν τον τρόπο ο εκάστοτε νευρώνας δεν ενεργοποιείται, με αποτέλεσμα το σύστημα να είναι πιο αποδοτικό καθώς δεν λειτουργούν όλοι οι νευρώνες κάθε φορά. Στην πράξη, η συγκεκριμένη συνάρτηση συγκλίνει έξι φορές περισσότερο από την σιγμοειδή και την συνάρτηση υπερβολικής εφαπτομένης.

$$F = \max(0, x)$$



Αν και υπάρχουν πολλές παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψιν ώστε να αναπτυχθεί ένα μοντέλο και οι οποίες παίζουν σημαντικό ρόλο στην ορθή εκπαίδευση του, ωστόσο είναι φανερό πως κάθε τεχνητό νευρωνικό δίκτυο απαρτίζεται από τρία βασικά χαρακτηριστικά:

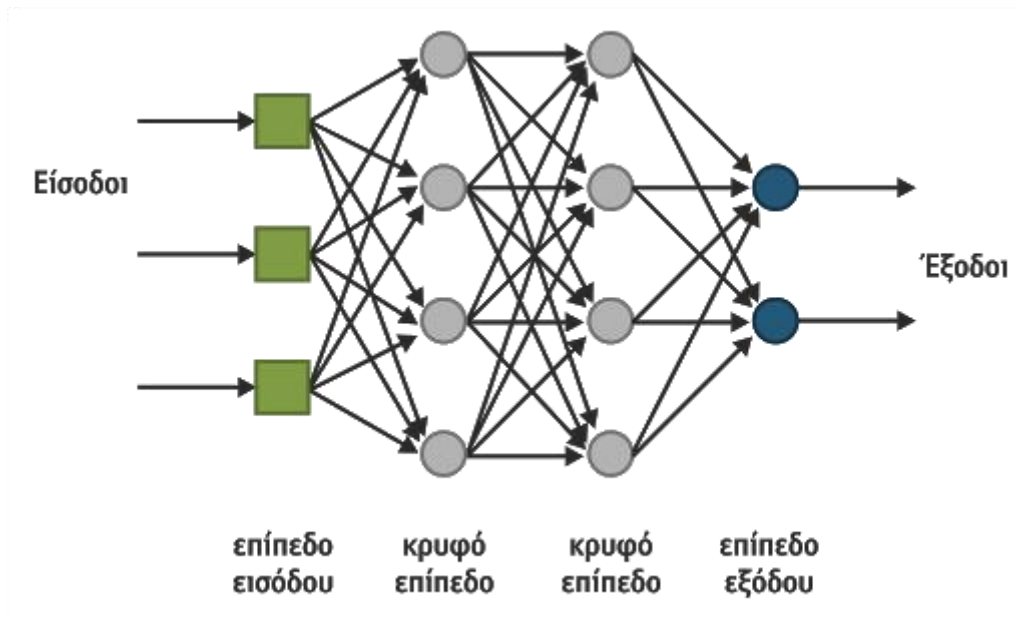
1. **Την αρχιτεκτονική του (τοπολογία).** Δηλαδή τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται όλοι οι νευρώνες μεταξύ τους. Είναι ίσως το σημαντικότερο χαρακτηριστικό, διότι ανάλογα με την αρχιτεκτονική καθορίζονται και οι δυνατότητες του δικτύου.
2. **Τον αλγόριθμο εκπαίδευσης.** Ουσιαστικά πρόκειται για την μέθοδο που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των τιμών των συντελεστών βαρύτητας των συνδέσεων.
3. **Τον τύπο της συνάρτησης ενεργοποίησης.**

4.2.2 Τύποι τεχνητών νευρωνικών δικτύων

Στην βάση των παραπάνω, έχουν δημιουργηθεί πολλά διαφορετικά είδη τεχνητών νευρωνικών δικτύων, ώστε κάθε ένα από αυτά να μπορεί να επιλύσει διαφορετικά είδη προβλημάτων. Γενικά οι βασικοί και δημοφιλέστεροι τύποι τεχνητών νευρωνικών δικτύων αριθμούνται κοντά στους 30, όπως είναι τα FFN (Feed Forward Networks/ Πρόσθιας τροφοδότησης), τα RNN (Recurrent Neural Networks/ Επαναλαμβανόμενα νευρωνικά δίκτυα), τα LSTM (Long/Short Term Memory Μακροπρόθεσμης/Βραχυπρόθεσμης μνήμης) και τα CNN (Convolutional Neural Networks/ συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα).

❖ **Feed Forward Networks – FFN (Πρόσθιας τροφοδότησης)**

Θεωρούνται τα ευρέως γνωστά και χρησιμοποιούμενα ΤΝΔ και κυρίως βρίσκουν εφαρμογή σε προβλήματα που απαιτούν να γίνει αντιστοίχιση μιας ομάδας διανυσμάτων εισόδου σε μια διαφορετική αλλά καθορισμένη ομάδα διανυσμάτων εξόδου. Έχουν εφαρμογή κυρίως στην συμπίεση δεδομένων, την αναγνώριση μοτίβου, αναγνώριση ομιλίας και χειρόγραφων χαρακτήρων και αναγνώριση στόχου Sonar. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το μοντέλο ενός FFN.

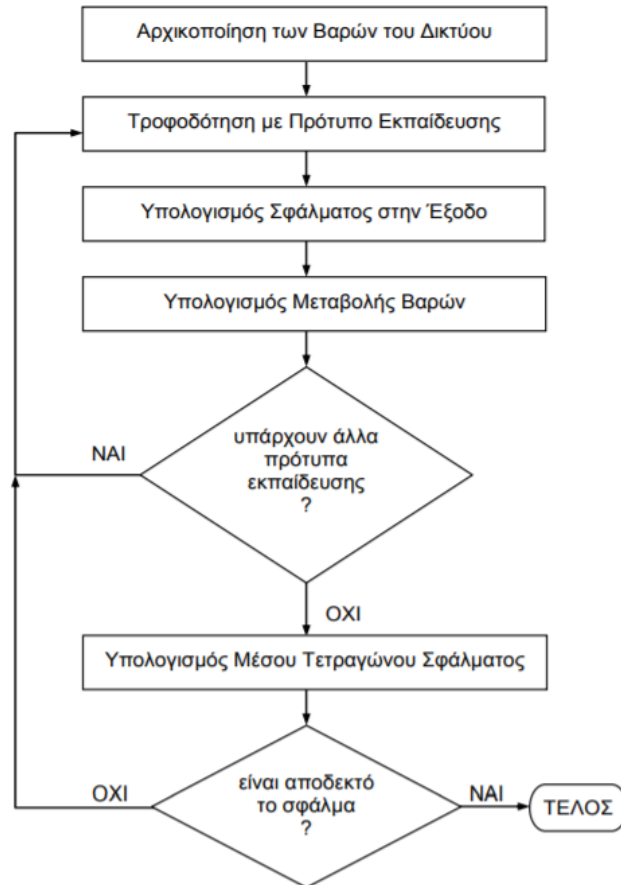


Εικόνα 4.3: Μοντέλο Feed Forward Networks – FFN

Στα νευρωνικά δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης τα σήματα διαδίδονται αποκλειστικά και μόνο με κατεύθυνση από την είσοδο του δικτύου προς την έξοδο [8]. Στην συγκεκριμένη αρχιτεκτονική δεν υπάρχει κανένα σημείο ανατροφοδότησης, δηλαδή δεν υπάρχει μέσα στο δίκτυο κανένας νευρώνας του οποίου η έξοδος να αποτελεί είσοδο άλλου νευρώνα του ίδιου ή του προηγούμενου επιπέδου. Οπότε κάθε νευρώνας σε ένα επίπεδο, συνδέεται με κάθε νευρώνα του επόμενου επιπέδου, και κατ' αυτόν τον τρόπο όλοι οι νευρώνες είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους. Επίσης, πρέπει να αναφερθεί πως επειδή δεν υπάρχει, όπως γίνεται προφανές, κάποια σύνδεση μεταξύ των νευρώνων του ίδιου επιπέδου για να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα πρόβλεψης και να ενημερωθούν σωστά οι τιμές των βαρών χρησιμοποιείται κατά γενικό κανόνα ο αλγόριθμος backpropagation.

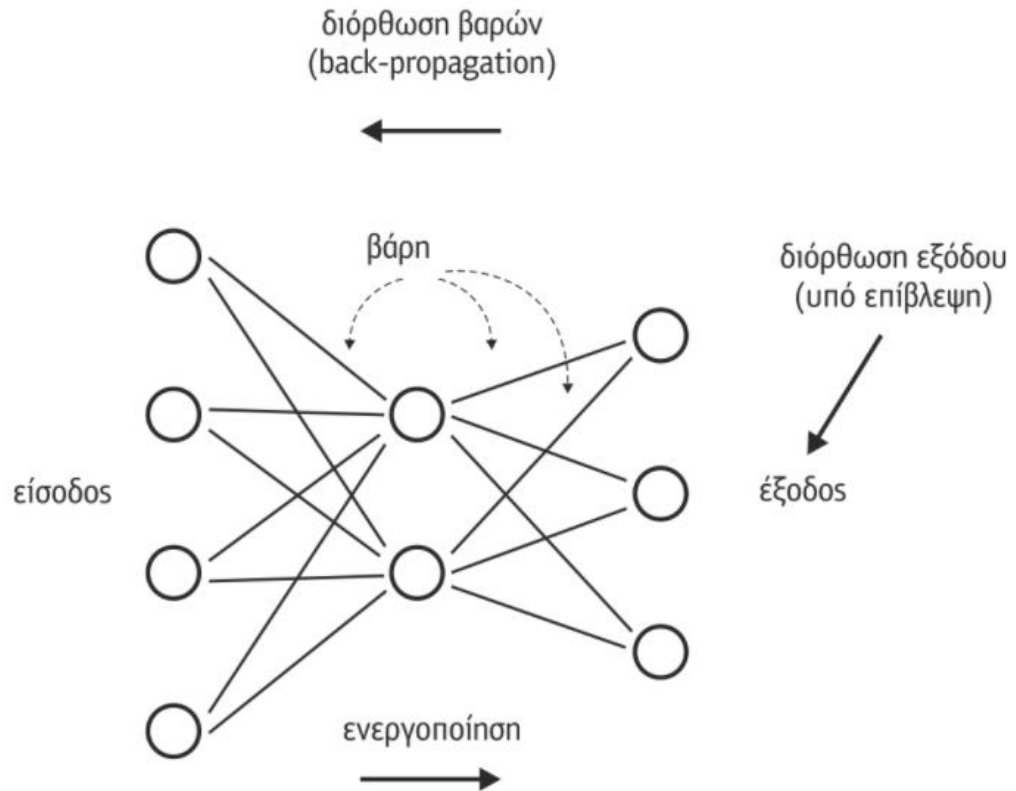
❖ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ Backpropagation

Η βασική ιδέα του κανόνα οπισθοδιάδοσης είναι ο καθορισμός του ποσοστού του συνολικού σφάλματος που αντιστοιχεί σε κάθε νευρώνα, ακόμη και στους νευρώνες των κρυφών επιπέδων. Η αναπροσαρμογή των βαρών γίνεται από το επίπεδο εξόδου προς το επίπεδο εισόδου. Παρακάτω παρουσιάζεται ψευδοκώδικας του κανόνα οπισθοδιάδοσης σφάλματος.



Εικόνα 4.4: Ψευδοκώδικας του κανόνα οπισθοδιάδοσης σφάλματος.

Πρόκειται για τον συνηθέστερο τρόπο επιβλεπόμενης μάθησης για πολυεπίπεδα ΤΝΔ. Ουσιαστικά κατά την εκπαίδευση για κάθε είσοδο που δίνεται στο δίκτυο υπολογίζονται οι έξοδοι με την εφαρμογή των συναρτήσεων μεταφοράς σε κάθε μονάδα κρυφού ή εξωτερικού επιπέδου. Για κάθε μονάδα εξωτερικού επιπέδου λαμβάνονται υπόψιν οι διαφορές μεταξύ του υπολογιζόμενου και του επιθυμητού αποτελέσματος και διαδίδονται προς τα πίσω στις μονάδες των κρυφών επιπέδων ώστε να καθοριστούν οι απαραίτητες αλλαγές των βαρών. Η συμμετοχή μιας μονάδας στα σφάλματα των μονάδων του επόμενου επιπέδου είναι ανάλογη της τρέχουσας εισόδου της και των συντελεστών βαρύτητας που την συνδέουν με τις μονάδες του επόμενου επιπέδου. Στην συνέχεια το δίκτυο εφαρμόζει εκ νέου τις συναρτήσεις μεταφοράς ώστε να υπολογιστεί το νέο σφάλμα.



Εικόνα 4.5: Εκπαίδευση ΤΝΔ με οπισθοδιάδοση σφάλματος

Η διαδικασία εκπαίδευσης περιλαμβάνει πληθώρα κύκλων διόρθωσης σφάλματος και λήγει είτε με την μείωση του σφάλματος κάτω από το επιθυμητό όριο, είτε αν οριστεί ως συνθήκη τερματισμού η πραγματοποίηση ενός συγκεκριμένου αριθμού κύκλων εκπαίδευσης (εποχή εκπαίδευσης/ training epoch) ή η πάροδος ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος. Γενικά για να επιτευχθεί η σύγκλιση του σφάλματος κάτω από ένα προκαθορισμένο επίπεδο συχνά χρειάζεται να υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός εποχών για τα συγκεκριμένα μοντέλα νευρωνικών δικτύων.

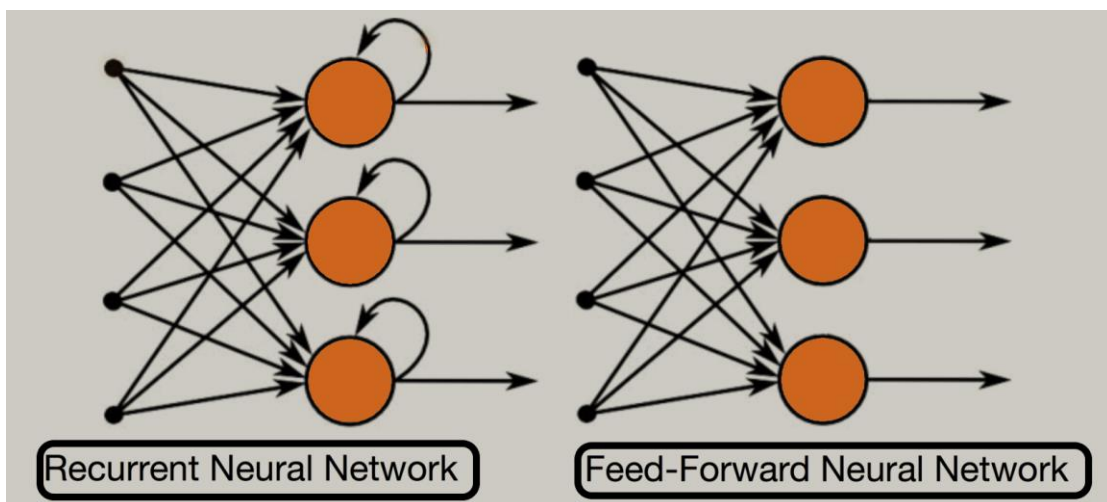
Τέλος, είναι φανερό πως στην περίπτωση που πρέπει να αυξηθεί το ποσοστό ενεργοποίησης ενός νευρώνα, το μοντέλο θα προσπαθήσει να το επιτύχει με έναν από τους τρεις παρακάτω τρόπους:

1. Αύξηση της παραμέτρου bias (όριο διέγερσης/συστηματικό σφάλμα).
2. Αύξηση των βαρών που συνδέουν τον νευρώνα με τους νευρώνες του προηγούμενου επιπέδου.

3. Αλλαγή της συνάρτησης ενεργοποίησης από το προηγούμενο επίπεδο στο επίπεδο που βρίσκεται ο συγκεκριμένος νευρώνας.

❖ **Recurrent Neural Networks -RNN (Επαναλαμβανόμενα νευρωνικά δίκτυα)**

Τα RNN είναι μια παραλλαγή των FFN. Στον συγκεκριμένο τύπο κάθε νευρώνας των κρυμμένων επιπέδων λαμβάνει μια είσοδο με μια συγκεκριμένη χρονική καθυστέρηση. Ουσιαστικά τα συγκεκριμένα δίκτυα μπορούν να επεξεργαστούν τις εισόδους και να μοιραστούν τυχόν μήκη και βάρη με την πάροδο του χρόνου. Βασική διαφορά με τα FFN είναι πως τα συγκεκριμένα ΤΝΔ μοιράζονται παραμέτρους σε κάθε επίπεδο, δηλαδή ενώ τα πρόσθιας τροφοδότησης έχουν διαφορετικά βάρη σε κάθε κόμβο, τα επαναλαμβανόμενα νευρωνικά δίκτυα έχουν το ίδιο βάρος σε κάθε επίπεδο. Στα συγκεκριμένα δίκτυα χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος backpropagation μέσω του χρόνου (BPTT) και ο οποίος είναι λίγο διαφορετικός από τον απλό αλγόριθμο της οπισθοδιάδοσης του σφάλματος. Ο αλγόριθμος BPTT αθροίζει τα σφάλματα σε κάθε χρονικό βήμα διότι οι παράμετροι μοιράζονται σε κάθε επίπεδο, κάτι που δεν συμβαίνει στα FNN. Κύρια μειονεκτήματα των επαναλαμβανόμενων νευρωνικών δικτύων είναι η αργή υπολογιστική ταχύτητα, η αδυναμία απομνημόνευσης προηγούμενων πληροφοριών και η μη ικανότητα εξέτασης μελλοντικών στοιχείων για μια τρέχουσα κατάσταση.



Εικόνα 4.6: Σχηματική αναπαράσταση Επαναλαμβανόμενων νευρωνικών δικτύων σε σχέση με νευρωνικά δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης

❖ **Long / Short Term Memory -LSTM (Μακροπρόθεσμης/Βραχυπρόθεσμης μνήμης)**

Είναι μια αρχιτεκτονική RNN δικτύων με την διαφορά ότι στα LSTM εισάγεται ένας νευρώνας μνήμης ώστε να έχουν την ικανότητα, σε αντίθεση με τα επαναλαμβανόμενα νευρωνικά δίκτυα, να απομνημονεύουν δεδομένα που μπορεί να έχουν προηγηθεί νωρίτερα.

❖ **Convolutional Neural Networks -CNN (Συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα)**

Χρησιμοποιούνται συνήθως για την ταξινόμηση και συγκέντρωση εικόνων και την αναγνώριση αντικειμένων. Τα CNN επιτρέπουν την μη εποπτευόμενη κατασκευή ιεραρχικών αναπαραστάσεων εικόνας. Ως συνέλιξη είναι η εφαρμογή ενός φίλτρου σε μια είσοδο το οποίο οδηγεί σε ενεργοποίηση, με αποτέλεσμα η επαναλαμβανόμενη εφαρμογή του ίδιου φίλτρου να οδηγεί σε ένα χάρτη ενεργοποιήσεων ο οποίος υποδεικνύει τις θέσεις και την δύναμη ενός ανιχνευμένου χαρακτηριστικού εισόδου, όπως μια εικόνα. Τα συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα έχουν την ικανότητα αυτόματης εκμάθησης ενός μεγάλου αριθμού φίλτρων για ένα σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης υπο τους περιορισμούς ενός συγκεκριμένου προβλήματος προγνωστικής μοντελοποίησης, όπως η ταξινόμηση εικόνας [21].

4.2.3 Βασικοί στόχοι εκπαίδευσης δικτύου

Κατά την εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου απαιτούνται κάποιοι βασικοί στόχοι.

1. Γενίκευση. Είναι η ικανότητα ενός ΤΝΔ να κάνει σωστές προβλέψεις για πρότυπα εισόδων τα οποία είναι άγνωστα, και όχι μόνο για τα δεδομένα εισόδου της εκπαίδευσης. Η ικανότητα γενίκευσης είναι από τα πιο σημαντικά λειτουργικά χαρακτηριστικά των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Η ακρίβεια της γενίκευσης ενός εκπαιδευμένου νευρωνικού δικτύου, αξιολογείται με βάση το σχετικό σφάλμα ανάμεσα στην προβλεπόμενη και στην πραγματική τιμή.

$$G = \frac{Actual - Predicted}{Actual} (\%)$$

2. Αποφυγή Overfitting. Η υπερβολική απομνημόνευση των δεδομένων αποτελεί ένα από τα κυριότερα προβλήματα των εκπαιδευμένων νευρωνικών δικτύων. Οφείλεται συνήθως σε αρκετά πολύπλοκες αρχιτεκτονικές με μεγάλο πλήθος νευρώνων. Ουσιαστικά το μοντέλο τείνει να μαθαίνει πολύ καλά τα δεδομένα εκπαίδευσης αλλά το σφάλμα της γενίκευσης είναι αρκετά μεγάλο. Έτσι, το μοντέλο δεν μπορεί να δώσει σωστές προβλέψεις για πρότυπα δεδομένων που είναι άγνωστα.

4.3 Γλώσσα Προγραμματισμού Python

Η Python είναι μια δυναμική γλώσσα προγραμματισμού, γενικού σκοπού και πολύ υψηλού επιπέδου. Κύριος στόχος της είναι η αυξημένη παραγωγικότητα του προγραμματιστή και η αναγνωσιμότητα του κώδικα. Περιέχει ενσωματωμένες δομές δεδομένων, όπως λίστες και πίνακες κατακερματισμού (dictionaries), και μια αρκετά μεγάλη βιβλιοθήκη. Η συγκεκριμένη γλώσσα προγραμματισμού θεωρείται ισχυρή και εύκολη στην εκμάθησή της. Έχει αποδοτικές δομές δεδομένων υψηλού επιπέδου και μια απλή αλλά αποτελεσματική προσέγγιση στον αντικειμενοστρεφή προγραμματισμό.

```
In [2]: from sklearn.model_selection import train_test_split
```

```
In [3]: def plot_history(h):
fig, (ax1, ax2) = plt.subplots(1, 2, figsize=(18,8))
for label in h:
    ax1.plot(h[label].history['loss'], label='{0:s} train loss'.format(label))
    ax1.plot(h[label].history['val_loss'], label='{0:s} validation loss'.format(label))
ax1.set_title('Model loss')
ax1.set_ylabel('Loss')
ax1.set_xlabel('Epochs')
ax1.legend(loc='best')
for label in h:
    ax2.plot(h[label].history['mse'], label='{0:s} train mse'.format(label))
    ax2.plot(h[label].history['val_mse'], label='{0:s} validation mse'.format(label))
ax2.set_title('Model mse')
ax2.set_ylabel('MSE')
ax2.set_xlabel('Epochs')
ax2.legend(loc='best')
plt.show()
```

Εικόνα 4.7: Εντολές της γλώσσας Python στο περιβάλλον του Jupyter Notebook.

Αν και διακρίνεται λόγω του μεγάλου πλήθους βιβλιοθηκών που περιέχει και το συντακτικό είναι δομημένο κατά τέτοιο τρόπο που χρειάζονται λιγότερες γραμμές κώδικα απ' ότι σε άλλες γλώσσες όπως η C++ ή η Java, ωστόσο επειδή είναι

διερμηνευόμενη είναι πιο αργή από τις μεταγλωττισμένες γλώσσες (π.χ. C, C++). Γι' αυτόν τον λόγο δεν είναι κατάλληλη για ανάπτυξη λειτουργικών συστημάτων.

Επίσης, οι διερμηνευτές της Python είναι διαθέσιμοι για τα περισσότερα λειτουργικά συστήματα και ο πηγαίος της κώδικας διατίθεται δωρεάν. Αναπτύσσεται ως ανοικτό λογισμικό, η διαχείριση της γίνεται από τον μη κερδοσκοπικό οργανισμό Python Software Foundation και η επίσημη ιστοσελίδα της είναι η <http://www.python.org>.

4.3.1 Βιβλιοθήκες Python

Όπως αναφέρθηκε η Python ξεχωρίζει για το εύρος βιβλιοθηκών που περιλαμβάνει και που προσφέρουν ευκολία στην συγγραφή του κώδικα. Παρακάτω θα αναπτυχθούν οι σημαντικότερες βιβλιοθήκες της Python, καθώς χρησιμοποιήθηκαν και στην συγκεκριμένη εργασία.

Αρχικά μέσω του λειτουργικού συστήματος Anaconda υπάρχουν διαθέσιμα τα περιβάλλοντα Spyder και Jupyter Notebook στα οποία και γράφεται ο κώδικας. Το Spyder είναι ένα περιβάλλον ανάπτυξης (IDE) για επιστημονικούς σκοπούς και προσφέρει έναν συνδυασμό λειτουργικότητας, επεξεργασίας, ανάλυσης, εντοπισμού σφαλμάτων κ.α. Το Jupyter Notebook, στο οποίο και γράφτηκε ο κώδικας της συγκεκριμένης εργασίας, είναι μια εφαρμογή web ανοιχτού κώδικα που περιέχει οπτικοποιήσεις, κείμενο και εξισώσεις. Γενικά είναι ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται για την εκμάθηση της γλώσσας όπως και για τον καθορισμό και μετατροπή επιστημονικών δεδομένων, για αριθμητική προσομοίωση, για στατιστική και μοντελοποίηση.

Πρέπει να σημειωθεί, πως για την ανάπτυξη ενός προγράμματος όπου χρησιμοποιούνται βιβλιοθήκες υπάρχουν τρία στάδια:

1. Data Exploration (εξερεύνηση δεδομένων), όπου γίνεται περεταίρω ανάλυση των δεδομένων
2. Data Munging (καθορισμός δεδομένων), όπου γίνεται καθορισμός των δεδομένων ώστε να προσαρμοστούν καλύτερα στην στατιστική μοντελοποίηση και
3. Predictive Modeling (προγνωστική μοντελοποίηση), όπου εκτελούνται οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης

NumPy (Numerical Python) είναι μια βιβλιοθήκη που αποτελείται από συλλογή ρουτινών για την επεξεργασία ακολουθιών και πολυδιάστατων πινάκων. Χρησιμοποιείται κυρίως για μαθηματικές και λογικές πράξεις σε ακολουθίες και πίνακες.

Pandas θεωρείται πολύ σημαντική στην επιστήμη των δεδομένων. Παρέχει εργαλεία υψηλής απόδοσης για τον χειρισμό και την ανάλυση δεδομένων. Κύρια μονάδα της είναι το DataFrame, το οποίο μοιάζει με ένα φύλλο Excel και περιέχει ενσωματωμένες δεκάδες λειτουργίες για προεπεξεργασία ή χειρισμό δεδομένων. Η συγκεκριμένη βιβλιοθήκη παρέχει εύκολη αντιμετώπιση ελλειπόντων δεδομένων ή ακραίων τιμών, εύκολο χειρισμό πλήρων στηλών ή σειρών δεδομένων, καθώς επίσης υποστηρίζει την ανάγνωση και σύνταξη διαφορετικών τύπων αρχείων.

Sklearn or Scikit-Learn είναι από τις σημαντικότερες βιβλιοθήκες για όσους ξεκινούν να ασχολούνται με την μηχανική μάθηση καθώς περιλαμβάνει εξειδικευμένους αλγόριθμους μηχανικής μάθησης έτοιμους προς χρήση, έχει πολύ καλή τεκμηρίωση και είναι πολύ εύκολη στην χρήση.

Matplotlib είναι η θεμελιώδης βιβλιοθήκη της Python για την σχεδίαση κυρίως διδιάστατων αλλά και μερικών τρισδιάστατων δεδομένων. Χρησιμοποιείται για διαφορετικά γραφήματα όπως ιστογράμματα, ραβδογράμματα, θερμικούς χάρτες, διαγράμματα με γραμμές, διαγράμματα διασποράς και πολλά άλλα.

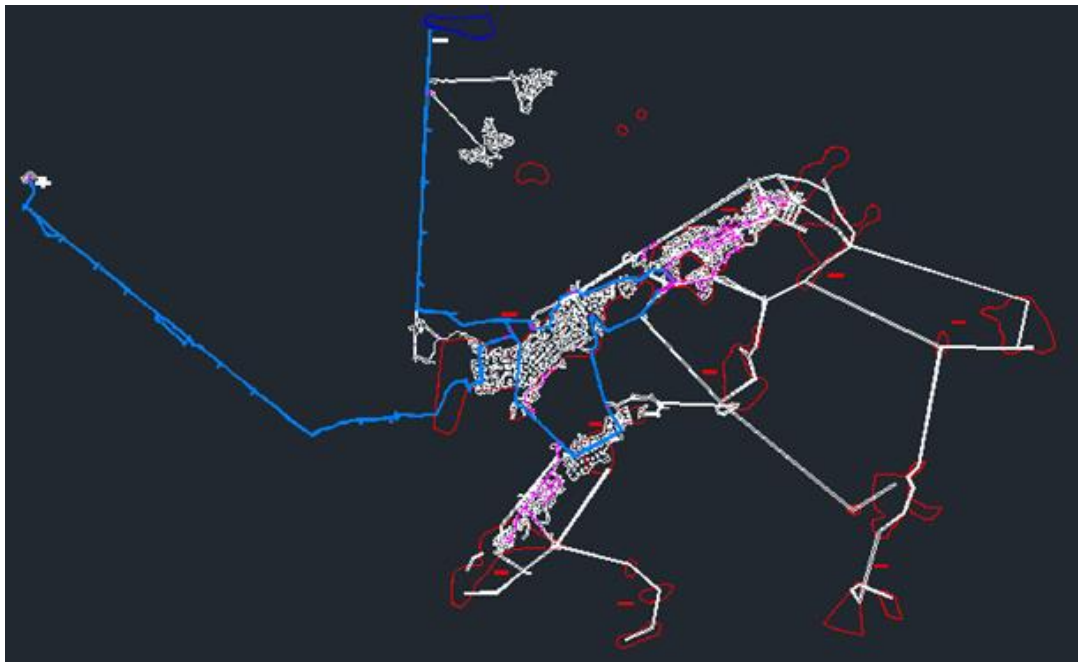
Seaborn χρησιμοποιείται για οπτικοποίηση στατιστικών δεδομένων με βάση την matplotlib

TensorFlow είναι από τις πιο γνωστές δομές (frameworks) για την υλοποίηση βαθιών νευρωνικών δικτύων και συνήθως χρησιμοποιείται για φυσική επεξεργασία γλώσσας, ταξινόμηση κειμένου και αναγνώριση εικόνων και ομιλίας.

Keras είναι μια βιβλιοθήκη ανοιχτού κώδικα η οποία χρησιμοποιείται ιδιαίτερα στην βαθιά μάθηση και μάλιστα στα νευρωνικά δίκτυα και επίσης, χρησιμοποιεί σαν βάση το TensorFlow. Είναι πολύ γρήγορη και εύκολη στην χρήση για την δημιουργία μοντέλων τεχνητής νοημοσύνης και υποστηρίζει ένα πλήθος βαθιών νευρωνικών δικτύων όπως είναι τα CNN,RNN,LSTM.

5. Μοντελοποιημένο κύκλωμα αερισμού

Για το δίκτυο αερισμού που μοντελοποιήθηκε λήφθηκαν τα απαραίτητα στοιχεία, όπως τα χαρακτηριστικά των στοών, των εύκαμπτων αγωγών, των συστημάτων του αερισμού και ο μηχανολογικός εξοπλισμός από το μεταλλείο της Βάργιανης της εταιρείας Δελφοί Δίστομον Α.Μ.Ε. Στην περιοχή εκμετάλλευσης πραγματοποιείται εξόρυξη βωξίτη και το συγκεκριμένο μεταλλείο είναι το μεγαλύτερο και από τα πιο παραγωγικά της εταιρείας. Τα κοιτάσματα του θεωρούνται πολύ καλής ποιότητας και το δίκτυο αερισμού του χαρακτηρίζεται αρκετά δύσκολο και πολύπλοκο, όπως είναι αλώςτε και τα περισσότερα κυκλώματα αερισμού των βωξιτικών εκμεταλλεύσεων. Η πολυπλοκότητα αυτών των δικτύων οφείλεται στο γεγονός πως τα κοιτάσματα βωξίτη είναι υπο την μορφή φακών, οι οποίοι είναι διάσπαρτοι στον χώρο εκμετάλλευσης, με αποτέλεσμα να γίνονται αρκετά προσπελαστικά έργα και έργα ανάπτυξης ώστε να μπορέσει να γίνει η εξόρυξη του κοιτάσματος. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ο δισδιάστατος χάρτης του μεταλλείου που απεικονίζει το κύκλωμα αερισμού και τους φακούς των υφιστάμενων αλλά και μελλοντικών κοιτασμάτων (κόκκινο χρώμα).



Εικόνα 5.1: Δισδιάστατος χάρτης μεταλλείου Βάργιανης.

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 εύκαμπτων αγωγών, όπως και της

εισαγωγής των διαστάσεων και χαρακτηριστικών του κύριου και βοηθητικού δικτύου αέρα.

Ο αέρας τροφοδοτείται μέσω της βορειοδυτικής στοάς εισόδου (Σ617) και αφού ακολουθήσει μια πορεία 1,7 χιλιομέτρων φτάνει στο κεντρικό σημείο της περιοχής εκμετάλλευσης από όπου και διευθετείται στις θέσεις εργασίας και έπειτα εξέρχεται από το μεταλλείο από την στοά Σ592. Συνολικά το σύστημα αερισμού του μεταλλείου αποτελείται από 8 χιλιόμετρα κύριου δικτύου στοών αερισμού και 2,7 χιλιόμετρα εύκαμπτων αγωγών. Επίσης, ο μηχανολογικός εξοπλισμός του μεταλλείου αποτελείται από 2 LHD, 2 Jumbo για διάτρηση και υποστήριξη, 2 υπόγεια φορτηγά μεταφοράς μεταλλεύματος, 1 ξεσκαρωτή και 1 ανυψωτική πλατφόρμα.

Οι δύο κύριοι ανεμιστήρες, οι οποίοι είναι σε παράλληλη διάταξη μεταξύ τους, στην είσοδο της στοάς Σ617 τροφοδοτούν το μεταλλείο με συνολική παροχή αέρα στα 89 m³/s για την εξασφάλιση των λειτουργικών απαιτήσεων. Επίσης, η αντίσταση του μεταλλείου, η οποία είναι η απώλεια αέρα για δεδομένη παροχή, υπολογίζεται σε 0,07 Ns²/m⁸. Στον πίνακα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των στοών και των εύκαμπτων αγωγών. Ο συντελεστής τριβής που επιλέχθηκε αντιπροσωπεύει μια τυπική τιμή για σχετικά λείες στοές μεταλλείου ορθογωνικής περίπου διατομής και για τους εύκαμπτους αγωγούς αντιστοιχεί σε μια ενδιάμεση κατάσταση υλικού από άποψη ποιότητας. Επιπλέον, επειδή οι γωνίες των στοών και των αγωγών είναι μέτριας καμπυλότητας επιλέχθηκε μια μέση κατάσταση από πλευράς απωλειών πίεσης λόγω κρούσεων.

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά κύριων στοών και βοηθητικών αγωγών αερισμού.

Στοές αερισμού	Προφίλ	Διαστάσεις	Συντελεστής τριβής (Atkinson k friction)	Απώλειες πιέσεων
Κύριες στοές	Πεταλοειδές	5,33 x 5 (m ²)	0,01 Kg/m ³	mild
Εύκαμπτοι αγωγοί	Κυκλικό	1,2 m (διάμετρος)	0,01 Kg/m ³	mild

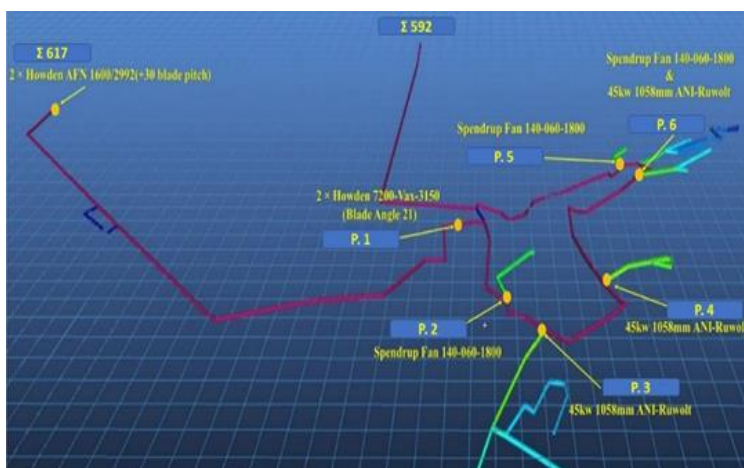
Εκτός των παραπάνω, προσδιορίστηκαν και τα χαρακτηριστικά των ανεμιστήρων, αν και κατά την αξιολόγηση τους τα μονά διαθέσιμα στοιχεία ήταν η μέγιστη ονομαστική τιμή της παροχής και της ισχύς τους. Η λύση που υιοθετήθηκε ήταν να αναλυθεί μια λίστα ανεμιστήρων που τα χαρακτηριστικά τους αντιστοιχούν σε μεγάλο βαθμό στους υπάρχοντες και στη συνέχεια επιλέχθηκε ο βέλτιστος συνδυασμός όπως φαίνεται στον

παρακάτω πίνακα. Η τοποθέτησή τους στο δίκτυο αντιστοιχεί στην πραγματικές θέσεις των υφιστάμενων ανεμιστήρων, και η απαιτούμενη παροχή αέρα διαμορφώνεται περίπου στα 89 m³/s.

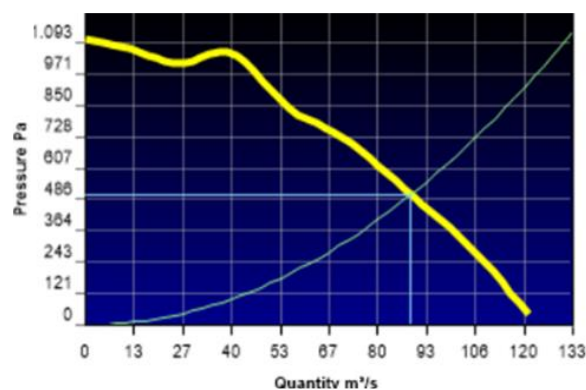
Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικά επιλεγμένου συνδυασμού ανεμιστήρων.

Ανεμιστήρας	Τύπος	Ισχύς	Θέση
2 x Howden AFN 1600/2992	Κύριος	45kw(2 x 45kw εν παραλλήλω)	Σ617
2 x Howden 7200-Vax-3150	Βοηθητικός	47kw (2 x 47kw εν παραλλήλω)	1
ANI-Ruwolt	Βοηθητικός	47kw	3, 4, 6
Spendrup Fan	Βοηθητικός	25kw	2, 5, 6

Οι θέσεις των ανεμιστήρων στο περιβάλλον του προγράμματος δίνονται στην παρακάτω εικόνα. Με βάση το συγκεκριμένο μοντέλο, το σημείο λειτουργίας του συστήματος εκτιμάται στα 88.8 m³/s.



(α)



(β)

Εικόνα 5.2: (α) Θέσεις τοποθέτησης ανεμιστήρων, (β) σημείο λειτουργίας συστήματος.

Για την αποδοχή ότι η μοντελοποίηση του δικτύου είναι ορθολογική, έγινε επικύρωση της πιστότητάς του συγκρίνοντας τα ποιοτικά και ποσοτικά δεδομένα αέρα που εξήχθησαν από το πρόγραμμα με τις αντίστοιχες επι τόπου μετρήσεις, καθώς και με τα θεσπισμένα όρια έκθεσης των αερίων κατά Κ.Μ.Λ.Ε (ΥΑ 2223 ΦΕΚ 1227 14/06/11) όπως φαίνονται στον πίνακα.

Πίνακας 5.3: Ανώτατη τιμή έκθεσης αερίων κατά Κ.Μ.Λ.Ε.

Αέρια	Ανώτατη τιμή έκθεσης κατά Κ.Μ.Λ.Ε
O ₂	> 19,5 %
CO ₂	5000 ppm (0,5%)
CO	50 ppm
NO	25 ppm
NO ₂	5 ppm

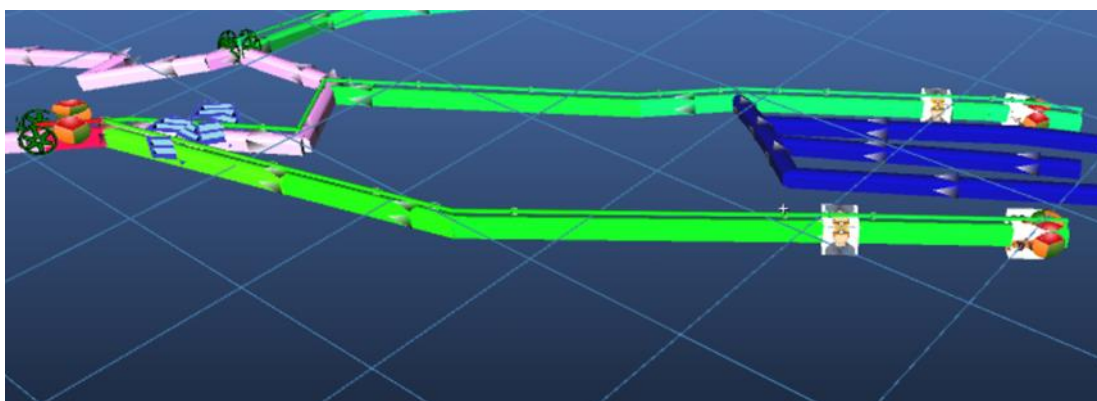
5.1 Αξιολόγηση Μοντελοποιημένου Δικτύου

Όπως έχει προαναφερθεί η εφαρμογή του ventilation on demand 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.

Το σενάριο που ακολουθεί είναι μια αξιολόγηση της ποσοτικής και ποιοτικής κατάστασης του αέρα σε δύο μέτωπα εργασίας, μέσω του προγράμματος Ventsim, ώστε μετέπειτα όταν δημιουργηθεί το τεχνητό νευρωνικό μοντέλο να είναι γνωστές οι συσχετίσεις που έχουν τα αέρια μεταξύ τους.

5.1.1 Σενάριο εφαρμογής

Θεωρείται, πως στο μεταλλείο βρίσκεται σε φάση ανάπτυξης και κατασκευής δυο νέων στοών για την εξόρυξη φακών κοιτασμάτων. Στην θέση εργασίας 1, δουλεύει ένα Jumbo διάτρησης (80 hp) και 2 εργαζόμενοι και στην θέση εργασίας 2, ένα LHD μηχανήμα (350 hp) και ένας εργαζόμενος.



Εικόνα 5.3: Επιλεγμένο τμήμα μεταλλείου.

Σύμφωνα με τον Κ.Μ.Λ.Ε (ΥΑ 2223 ΦΕΚ 1227 14/06/11) οι απαιτήσεις του προσωπικού σε αέρα είναι 5,66 m³/min και εργαζόμενο και για στις μηχανές DIESEL 2,3 m³/min και ίππο μηχανημάτων και η ταχύτητα του αέρα στα μέτωπα εργασίας πρέπει να είναι μεγαλύτερη του 0.1 m/s και να μην ξεπερνάει τα 6 m/s.

Για την θέση 1 η απαιτούμενη παροχή εκτιμάται σε:

$$Q_{\min} = \frac{(5.66 \times 2) + (2.3 \times 80)}{60} = 3.25 \text{ m}^3/\text{s}$$

Αντίστοιχα και για την θέση 2 η ελάχιστη παροχή υπολογίζεται:

$$Q_{\min} = \frac{(5.66 \times 1) + (2.3 \times 350)}{60} = 13.5 \text{ m}^3/\text{s}$$

Στον πίνακα 5.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων από το πρόγραμμα Ventsim στις δύο θέσεις εργασίας.

Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα ποσοτικών μετρήσεων του προγράμματος στα μέτωπα εργασίας

Θέσεις εργασίας	Παροχή	Ταχύτητα αέρα
Θέση 1 (Jumbo)	5.4 m ³ /s	0.2 m/s
Θέση 2 ((LHD)	13.8 m ³ /s	0.6 m/s

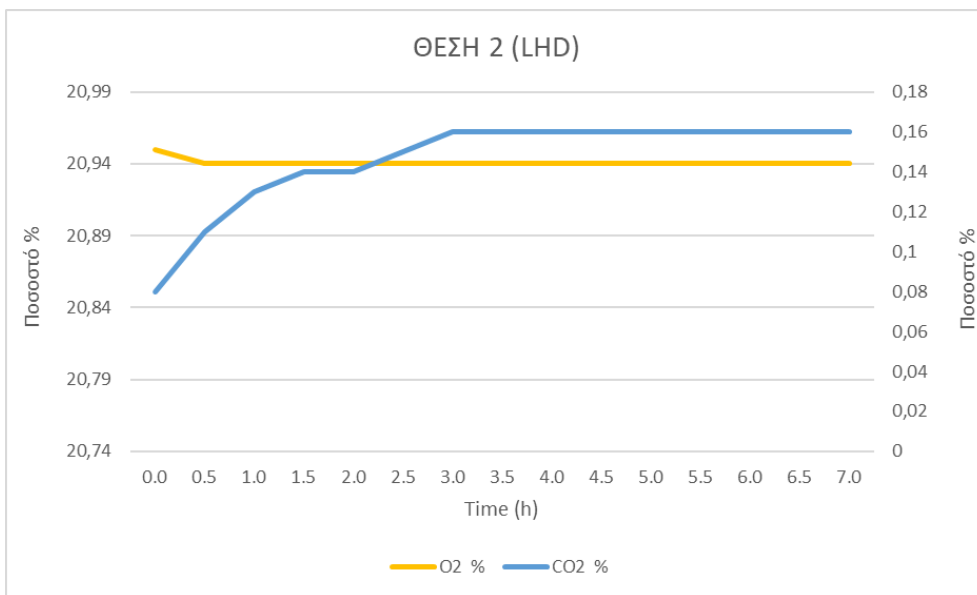
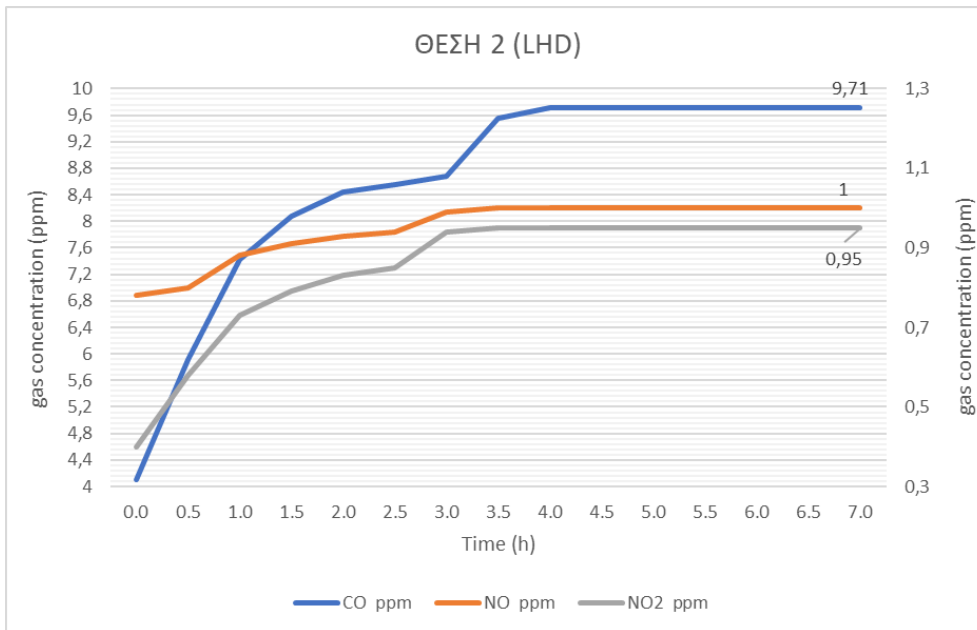
Μετά τον έλεγχο των παροχών αέρα, έγιναν οι αντίστοιχοι έλεγχοι των τιμών των αερίων του μεταλλείου. Για την πραγματοποίησή τους, τοποθετήθηκαν αισθητήρες στις κατάλληλες θέσεις και πραγματοποιήθηκε dynamic simulation για ολόκληρη τη βάρδια (7 ώρες). Στην συγκεκριμένη προσομοίωση πρέπει να αναφερθεί πως θεωρήθηκε ότι τα μηχανήματα δουλεύουν συνεχόμενα σε όλη την βάρδια εργασίας. Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η κατανομή των αερίων ρυπαντών στις αντίστοιχες θέσεις.

➤ ΘΕΣΕΙΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ 1,2

Αν και οι τιμές των αερίων είναι μέσα στα όρια του Κ.Μ.Λ.Ε, φαίνεται πως υπάρχει μια αύξηση τους, καθώς πρόκειται για μια επιβαρυνμένη κατάσταση από άποψη ποιότητας αέρα λόγω των μηχανών εσωτερικής καύσης. Παρατηρείται ωστόσο μια σταθεροποίηση των τιμών των αερίων λίγο μετά τις 3 πρώτες ώρες εργασίας. Σύμφωνα με τα διαγράμματα που ακολουθούν προφανές πως το correlation των αερίων ισούται με ένα. Ως συσχέτιση (correlation) στην εφαρμοσμένη στατιστική, αναφέρεται ο βαθμός (ένταση) με τον οποίο συσχετίζονται (συμμεταβάλλονται) δύο ή περισσότερες μεταβλητές. Όπως φαίνεται όλα τα αέρια αυξάνονται συγχρόνως και σταθεροποιούνται συγχρόνως, άρα η μείωση της περιεκτικότητας του ενός έχει ως απόρροια μείωση των περιεκτικότητων και των υπολοίπων.



Διάγραμμα 5.1: Ποιοτική κατανομή αέρα στην θέση εργασίας 1.



Διάγραμμα 5.2: Ποιοτική κατανομή αέρα στην θέση εργασίας 2.

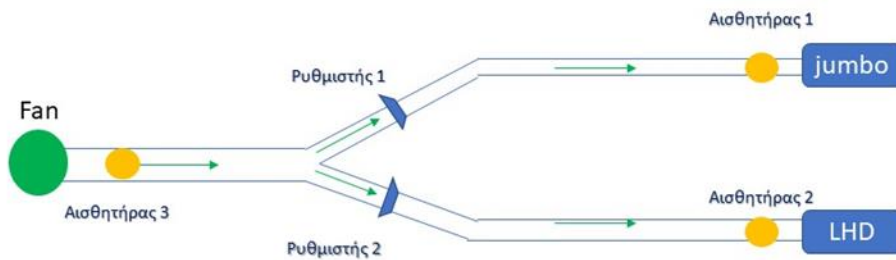
5.2 Ανάπτυξη Μοντέλου Νευρωνικού Δικτύου

Για την ανάπτυξη του τεχνητού νευρωνικού δικτύου έγιναν οι παρακάτω παραδοχές:

1. Επιλέχθηκε τμήμα του μεταλλείου στο οποίο υπάρχουν δυο παραγωγικές στοές (στοά 1 και στοά 2), ο αερισμός των οποίων εξυπηρετείται από τον ίδιο ανεμιστήρα ο οποίος τους στέλνει την απαραίτητη παροχή αέρα. Στόχος του συστήματος είναι η βελτιστοποίηση του κυκλώματος αερισμού ώστε να καλύπτονται οι ελάχιστες απαιτήσεις παροχής με βάση τον αριθμό των εργαζομένων και τον μηχανημάτων που θα εργάζονται εκεί (ventilation on demand).
2. Στις δυο στοές λειτουργεί μηχανολογικός εξοπλισμός με αντίστοιχο αριθμό εργαζομένων (στοά 1 λειτουργία ενός jumbo διάτρησης και 2 εργαζόμενοι και στοά 2 λειτουργία ενός LHD και ένας εργαζόμενος) και απαιτείται η μέγιστη παροχή για την κάλυψη των αναγκών. Στην εικόνα 5.5 φαίνεται η σχηματική αναπαράσταση του σεναρίου.
3. Επίσης, γίνεται η υπόθεση ότι υπάρχουν ρυθμιστικές θύρες που ελέγχουν την παροχή στις στοές. Συνεπώς για την ρύθμιση της απαραίτητης παροχής αέρα στις δύο στοές μπορεί να γίνει ρύθμιση τόσο της ταχύτητας του ανεμιστήρα όσο και του ανοίγματος των ρυθμιστικών θυρών.
4. Το αέριο που επιλέχθηκε να εξεταστεί είναι το NO_x (NO και NO₂). Η επιλογή ενός μόνο αερίου για την ανάπτυξη του νευρωνικού δικτύου οφείλεται στην συσχέτιση που παρουσίασαν τα αέρια μεταξύ τους με βάση τα διαγράμματα κατανομής τους στις θέσεις εργασίας 1 και 2.
5. Ως δεδομένα εισόδου για την δημιουργία της βάσης δεδομένων ορίζονται η συνολική παροχή του ανεμιστήρα (Airflow), το άνοιγμα της ρυθμιστικής θύρας 1 (Open1) και το άνοιγμα της ρυθμιστικής θύρας 2 (Open2) και ως δεδομένα εξόδου ορίζονται οι περιεκτικότητες του NO_x (NO_{x_1}, NO_{x_2}) για κάθε θέση εργασίας.

Για την εξαγωγή των δεδομένων εισόδου και εξόδου, τοποθετήθηκαν αισθητήρες (dynamic monitors) στην έξοδο από το στόμιο του ανεμιστήρα και στις θέσεις όπου δουλεύουν τα μηχανήματα στις δύο στοές. Τα dynamic monitors που υπάρχουν στο λογισμικό Ventsim λειτουργούν ουσιαστικά ως αισθητήρες, που καταγράφουν

τις περιεκτικότητες των αερίων, την παροχή των ανεμιστήρων, την ταχύτητα του αέρα στις θέσεις όπου έχουν τοποθετηθεί. Με αυτόν τον τρόπο όταν γίνει ποιοτική προσομοίωση του μοντέλου στο Ventsim, καταγράφονται οι αντιστοιχίσεις των τιμών της παροχής με τις περιεκτικότητες των αερίων.



Εικόνα 5.4: Σχηματική αναπαράσταση σεναρίου.

5.2.1 Χωρισμός βάσης δεδομένων

Από την βάση δεδομένων που δημιουργήθηκε, η οποία αποτελείται από 229 καταγραφές, το 80% (183) χρησιμοποιήθηκε για training set και το 20% (46) για το test set όπου είναι και ο έλεγχος στο αν το μοντέλο εκπαιδεύτηκε σωστά ώστε να έχει την ικανότητα γενίκευσης (ικανότητα σωστής πρόβλεψης). Ο χωρισμός των δεδομένων είναι τυχαίος διότι πρέπει να διατηρηθούν τα μοτίβα ανέπαφα ώστε να υπάρχει καλή αντιπροσώπευση των δεδομένων.

Στα δεδομένα εισόδου έγινε κανονικοποίηση (normalization) με την μέθοδο του μεγίστου - ελαχίστου για κάθε ομάδα των δεδομένων εισόδου, διότι έχουν διαφορετικές μονάδες μέτρησης (η παροχή είναι σε m^3/s και τα ανοίγματα των ρυθμιστικών θυρών σε ποσοστό επι τοις %).

Στις δύο εικόνες που ακολουθούν φαίνεται ένα μέρος του συνόλου των δεδομένων εκπαίδευσης και ελέγχου όπως παρουσιάζεται στο περιβάλλον του Jupyter notebook.

```
In [24]: x_train
```

```
Out [24]:
```

	Airflow	open1	open2
44	0.875071	0.25	0.90
96	0.983099	0.50	0.95
129	0.935772	0.50	0.90
83	0.942488	0.45	0.85
54	0.896043	0.35	0.90
...
103	0.971639	1.00	0.85
67	0.899940	0.35	0.90
117	0.930848	0.50	0.90
47	0.875071	0.25	0.90
172	0.827340	0.30	1.00

Εικόνα 5.5: Μέρος του συνόλου δεδομένων εκπαίδευσης

```
In [25]: x_test
```

```
Out [25]:
```

	Airflow	open1	open2
94	0.983099	0.50	0.95
18	1.000000	0.75	0.85
33	1.000000	0.75	0.85
98	0.983099	0.50	0.95
181	0.827339	0.30	1.00
...
26	1.000000	0.75	0.85
60	0.899940	0.35	0.90
170	0.827340	0.30	1.00
159	0.829468	0.40	0.95
8	0.999909	0.75	0.75

Εικόνα 5.6: Μέρος του συνόλου δεδομένων ελέγχου.

Επίσης στον πίνακα 5.5 παρουσιάζονται οι μέγιστες, μέσες και οι ελάχιστες τιμές των συνολικών δεδομένων.

Πίνακας 5.5: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές των δεδομένων

	Airflow m ³ /s	Open1 %	Open2 %	NO _x _1 ppm	NO _x _2 ppm
Maximum	38,2	100	100	26,6	36,5
Average	34,9	25,2	88,3	11,9	30,5
Minimum	30,4	5	50	8,1	25,7

5.2.2 Αρχιτεκτονική δικτύου

Στην συγκεκριμένη εργασία το μοντέλο έχει αναπτυχθεί με τεχνητό νευρωνικό δίκτυο πρόσθιας τροφοδότησης (FFN) και έχει εφαρμοστεί ελεγχόμενη μάθηση. Η αρχιτεκτονική του δικτύου είναι 3x45x30x20x10x2 και δομείται ως εξής:

- Αρχικά υπάρχουν 3 νευρώνες εισόδου (Airflow, Open1, Open2)
- Έπειτα υπάρχει το πρώτο κρυφό επίπεδο με 45 νευρώνες
- Στην συνέχεια γίνεται ένα dropout 20%. Η εντολή Dropout ουσιαστικά απενεργοποιεί ένα ποσοστό νευρώνων στο επίπεδο έτσι ώστε οι υπόλοιποι νευρώνες να δουλέψουν υπο μεγαλύτερη πίεση
- Ακολουθούν αλλά 3 κρυφά επίπεδα με 30, 20 και 10 νευρώνες αντίστοιχα και
- Τέλος υπάρχουν 2 νευρώνες εξόδου (NO_x_1, NO_x_2).

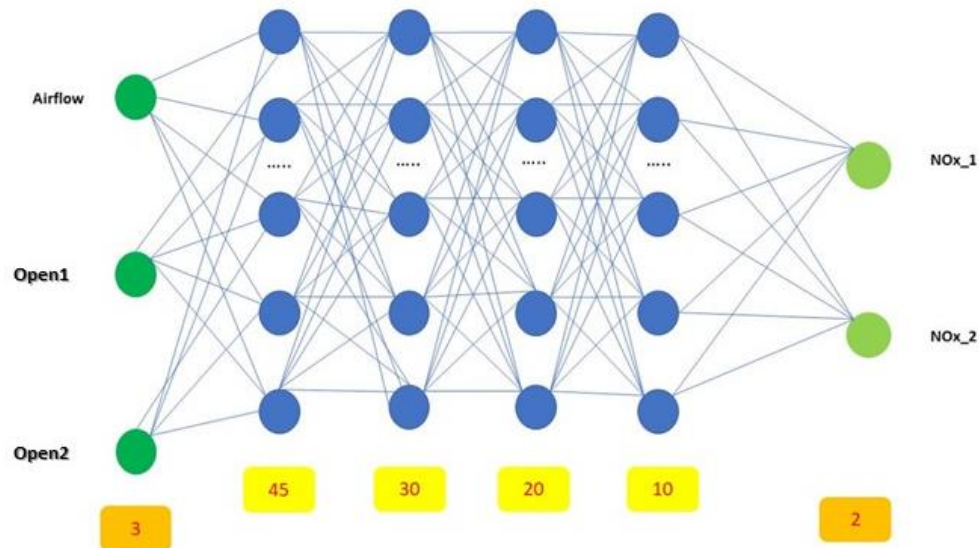
Επιλέχθηκε η παραπάνω αρχιτεκτονική καθώς, μέσα από ένα εύρος δοκιμών διαφορετικών αρχιτεκτονικών ήταν αυτή που έδινε τα βέλτιστα αποτελέσματα κατά την εκπαίδευση του αλγορίθμου.

Επιπλέον, ως συνάρτηση ενεργοποίησης χρησιμοποιήθηκε η ReLU, στους νευρώνες εξόδου η γραμμική συνάρτηση και ορίστηκε και η συνάρτηση βελτιστοποίησης Adam με learning rate = 0.004, ο οποίος είναι και ο προεπιλεγμένος ρυθμός μάθησης για την συγκεκριμένη συνάρτηση.

Τέλος, έγινε χρήση του αλγορίθμου backpropagation (οπισθοδιάδοσης σφάλματος) και ως κριτήριο διακοπής της εκπαίδευσης ορίστηκε είτε η συμπλήρωση 2000 εποχών, είτε η επίτευξη του ελάχιστου σφάλματος εκπαίδευσης (MSE) με την προϋπόθεση πως σε

50 συνεχόμενες εποχές δεν θα υπάρξει μεγαλύτερο ελάχιστο σφάλμα από το ήδη υπάρχον.

Στην εικόνα 5.8 φαίνεται και η οπτικοποίηση του νευρωνικού δικτύου που αναπτύχθηκε.



Εικόνα 5.7: Οπτικοποίηση νευρωνικού δικτύου.

5.2.3 Αποτελέσματα εκπαίδευσης

Με το πέρας της εκπαίδευσης του δικτύου παρατηρούνται τα παρακάτω αποτελέσματα.

Όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες οι τιμή του σφάλματος (MSE) που υπήρξε κατά την εκπαίδευση και την γενίκευση του δικτύου είναι 1.6 για την εκπαίδευση και 1.7 για την γενίκευση.

Αν και επιδιώκεται το σφάλμα να είναι κάτω του μηδενός στην συγκεκριμένη περίπτωση το σφάλμα που υπολογίζεται είναι το γενικό, δηλαδή έχει γίνει μια πρόσθεση του σφάλματος της πρώτης εξόδου με αυτό της δεύτερης.

```
In [112]: score = model.evaluate(x_train,train_y, verbose=0)
print('Train loss:', score[0])
print('Train MSE:', score[1])
print('Train Mean error: {:.3f}%'.format(score[2]*100))
score[3]
```

```
Train loss: 1.6093671321868896
Train MSE: 1.6093671321868896
Train Mean error: -1.090%
```

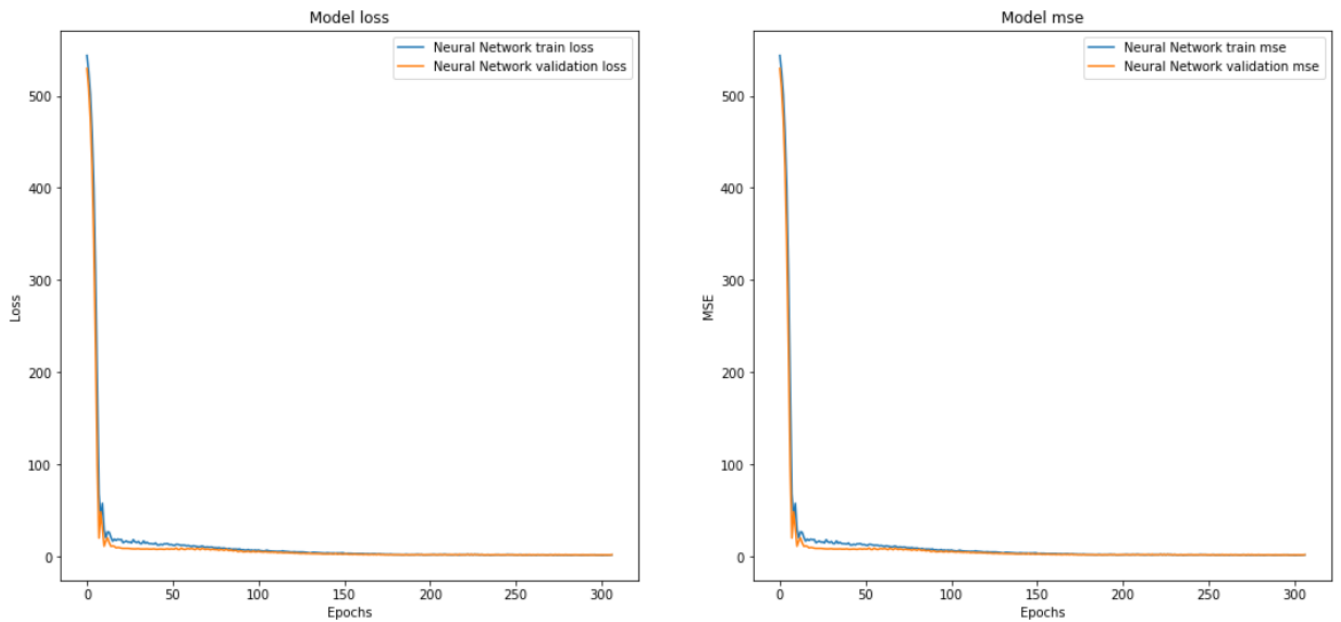
Εικόνα 5.8: MSE και τελική μέση τιμή σχετικών σφαλμάτων εκπαίδευσης

```
In [111]: score = model.evaluate(x_test,test_y, verbose=0)
print('Test loss:', score[0])
print('Test MSE:', score[1])
print('Test Mean error: {:.3f}%'.format(score[2]*100))
score[3]
```

```
Test loss: 1.7071114778518677
Test MSE: 1.7071114778518677
Test Mean error: 0.970%
```

Εικόνα 5.9: MSE και τελική μέση τιμή σχετικών σφαλμάτων γενίκευσης

Παρατηρείται πως το μέσο σχετικό σφάλμα (train mean error) της εκπαίδευσης έχει αρνητικό πρόσημο. Αυτό σημαίνει πως κατά την εκπαίδευση του το νευρωνικό δίκτυο είχε την τάση να υποτιμά κάποιες τιμές που προέβλεπε. Παρακάτω παρουσιάζονται τα γραφήματα της εκπαίδευσης του δικτύου. Αριστερά είναι η συνάρτηση απώλειας ή σφάλματος όπως ονομάζεται, ουσιαστικά πρόκειται για την συνάρτηση στόχου (objective function) και δεξιά είναι το μετρούμενο σφάλμα MSE. Είναι φανερό πως η πορεία που ακολουθείται και στις δυο περιπτώσεις είναι ακριβώς ίδια.

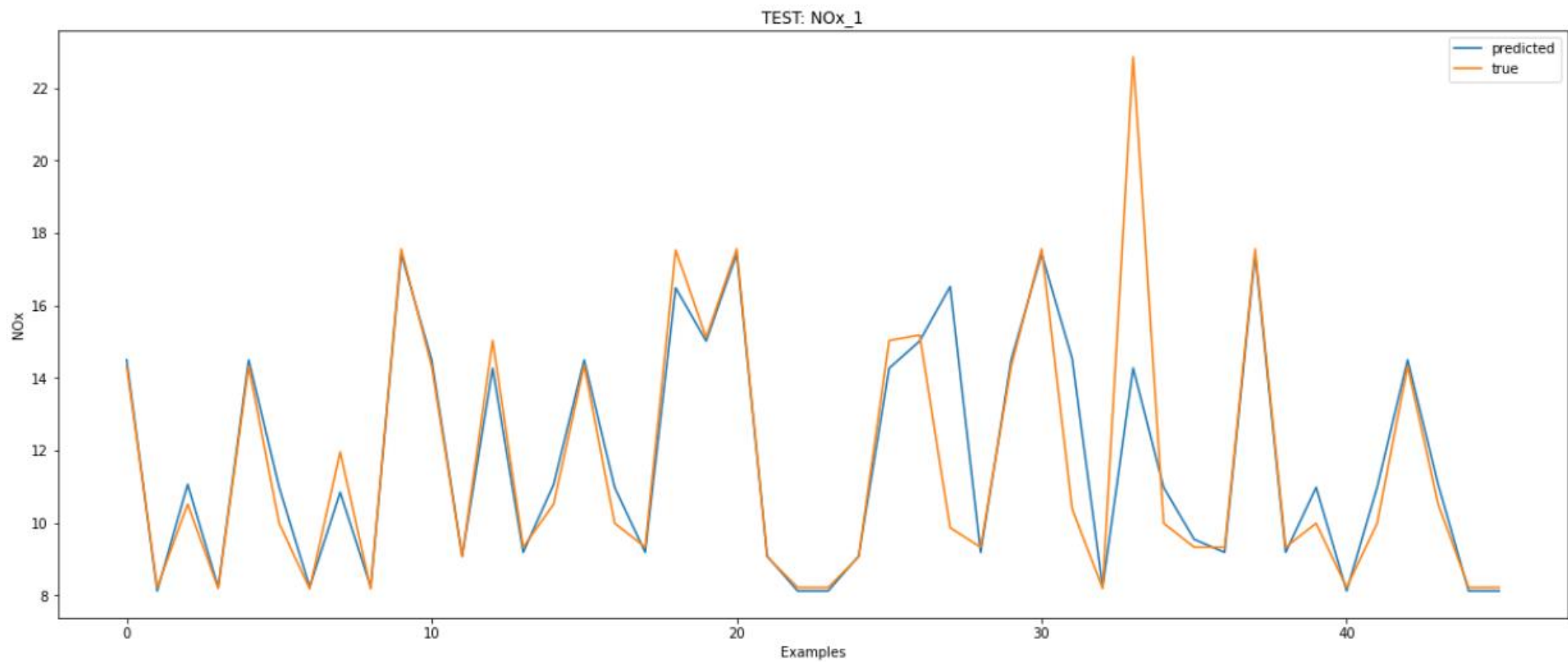


Διάγραμμα 5.3: Model loss και Model MSE του εκπαιδευμένου δικτύου.

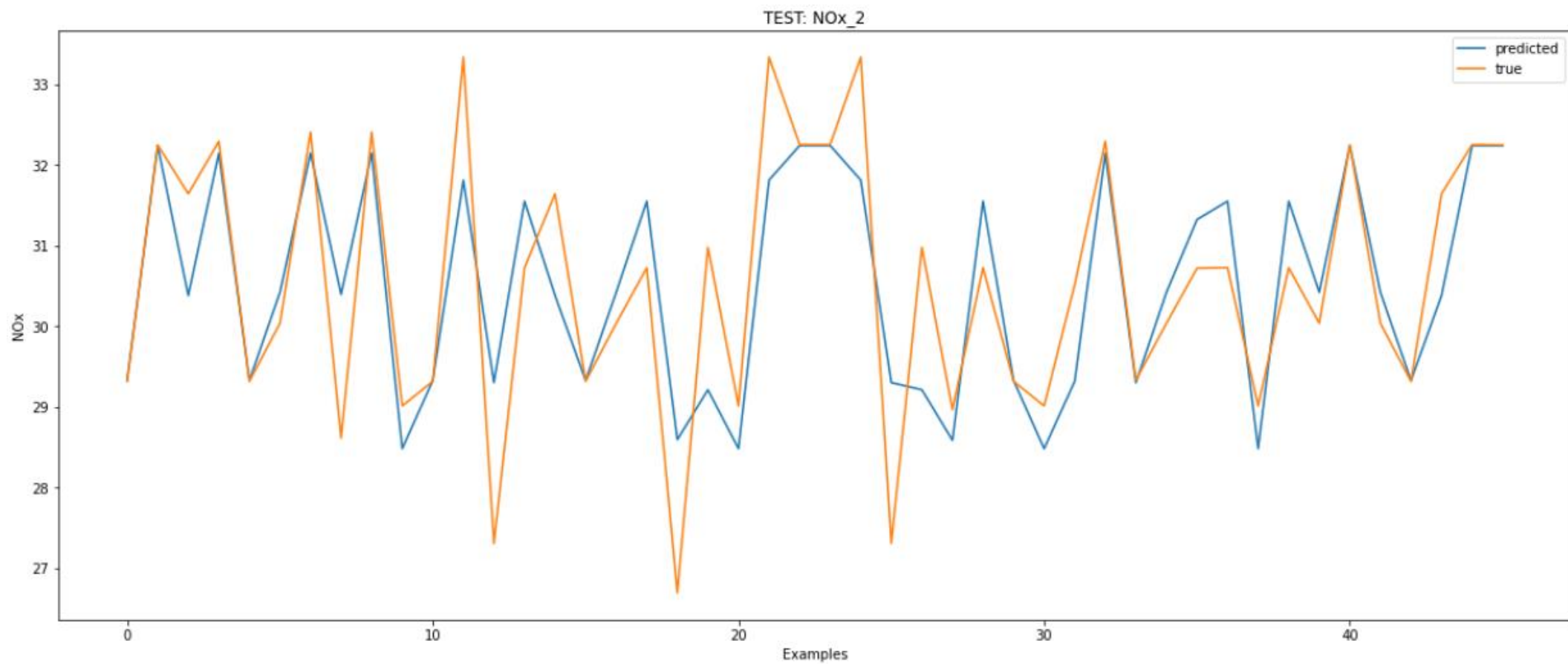
Εκτός των παραπάνω τιμών, πολύ σημαντικό κομμάτι των νευρωνικών δικτύων είναι ο έλεγχος της συνολικής συμπεριφοράς του μοντέλου. Αν το ΤΝΔ έχει καλή συμπεριφορά απόκρισης, δηλαδή ακολουθεί την τάση των δεδομένων και δεν επικεντρώνεται σε συγκεκριμένες ομάδες τιμών, σημαίνει πως είναι ικανό να προσφέρει αξιόπιστες προβλέψεις.

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η συμπεριφορά της γενίκευσης του μοντέλου για το NO_x_1 και αντίστοιχα για το NO_x_2. Η πορτοκαλή γραμμή απεικονίζει τις πραγματικές τιμές και η μπλε τις τιμές πρόβλεψης του δικτύου.

Είναι φανερό πως και στις δυο περιπτώσεις το δίκτυο έχει πιάσει την γενική τάση, δηλαδή είναι ικανό να προβλέψει ορθολογικά τις περιεκτικότητες του αερίου NO_x σε κάθε μια από τις δύο θέσεις εργασίας, ανάλογα με την ποσότητα παροχής του ανεμιστήρα και το άνοιγμα των ρυθμιστών.

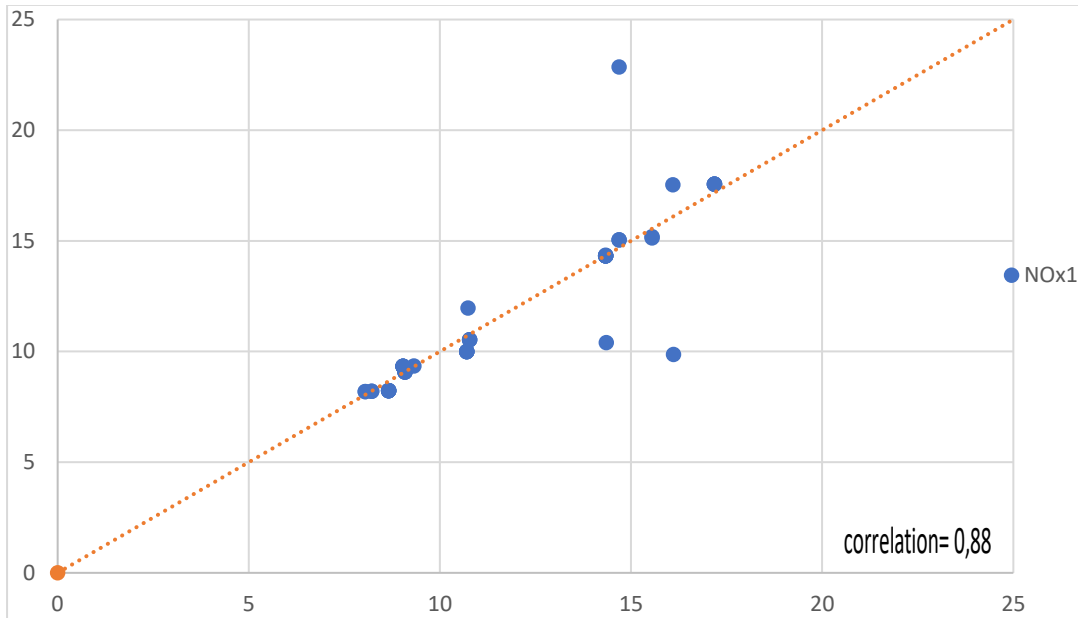


Διάγραμμα 5.4: Συμπεριφορά μοντέλου γενίκευσης για το NOx της θέσης μέτρησης 1.

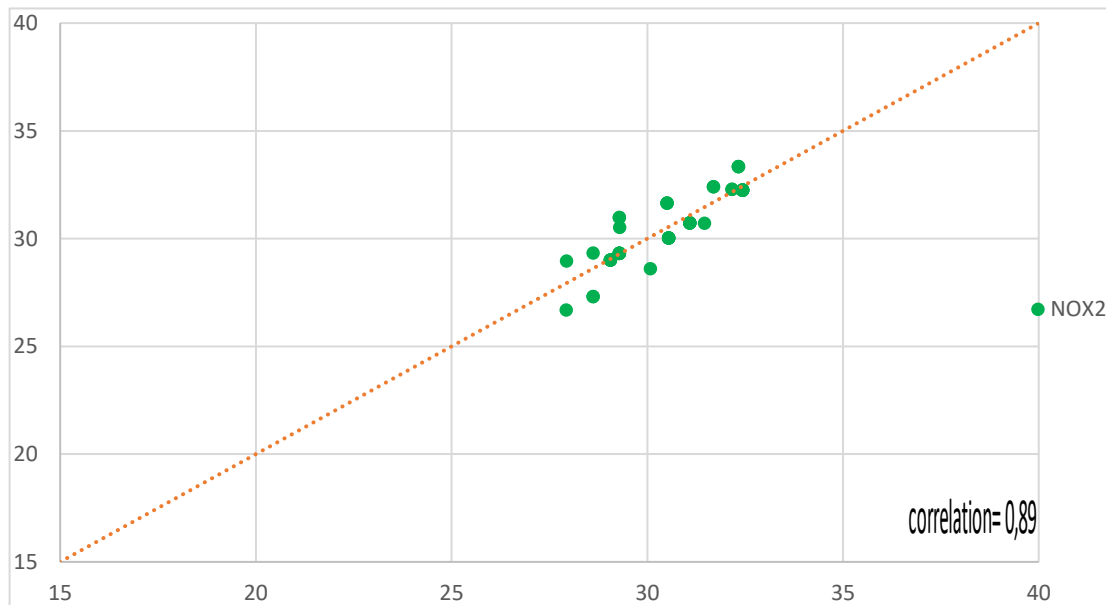


Διάγραμμα 5.5: Συμπεριφορά μοντέλου γενίκευσης για το NOx της θέσης μέτρησης 2.

Έπειτα γίνεται σύγκριση των πραγματικών τιμών των αερίων σε σχέση με τις τιμές πρόβλεψης του μοντέλου. Όπως φαίνεται η γενική μέση ακρίβεια πρόβλεψης είναι 96.36% και ξεχωριστά για την θέση 1 είναι στο 94.75% και για την θέση 2 στο 97.96%, συμπερασματικά οι προβλέψεις του μοντέλου ακολουθούν με μια ικανοποιητική ακρίβεια τις μεταβολές των πραγματικών τιμών.



Διάγραμμα 5.6: Σύγκριση πραγματικών τιμών και τιμών πρόβλεψης μοντέλου θέσης 1



Διάγραμμα 5.7: Σύγκριση πραγματικών τιμών και τιμών πρόβλεψης μοντέλου θέσης 2

Επιπλέον έγινε ένας περαιτέρω έλεγχος ώστε να επικυρωθεί πως το νευρωνικό μοντέλο έχει εκπαιδευτεί σωστά και δεν έχει κάνει overfitting. Επιλέχθηκαν 5 τυχαίες τιμές εισόδου οι οποίες δεν υπήρχαν μέσα στη βάση δεδομένων. Αυτές οι τιμές εισήχθησαν μέσα στο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο και έπειτα πάρθηκαν οι αντίστοιχες τιμές πρόβλεψης. Στην συνέχεια, έγινε εισαγωγή των ίδιων τιμών εισόδου στο πρόγραμμα Ventsim όπου και εξήχθησαν τα αντίστοιχα δεδομένα των περιεκτικότητων των αερίων. Τα αποτελέσματα του παραπάνω ελέγχου παρουσιάζονται στον πίνακα.

Πίνακας 5.6 : Αποτελέσματα ελέγχου πιστότητας

	Airflow (m ³ /s)	Reg_1 (%)	Reg_2 (%)	NOx_1 (ppm)	NOx_2 (ppm)
ANN	31.4	12	82	10.36	31.1
Ventsim				11.7	35.7
Απόκλιση				12.9 %	14.7 %
ANN	34.7	17	86	9.36	32.17
Ventsim				9.6	32.2
Απόκλιση				2.5 %	0.09 %
ANN	33.3	5	90	16.35	26.9
Ventsim				15.9	27.8
Απόκλιση				2.8 %	3.3 %
ANN	36.8	34	78	8.81	32.2
Ventsim				8.5	31.9
Απόκλιση				3.6 %	0.9 %
ANN	32.5	25	97	9.17	32.5
Ventsim				10	36.6
Απόκλιση				9 %	12.6 %

Με τον έλεγχο αυτόν επιβεβαιώνεται η καλή εκπαίδευση του τεχνητού νευρωνικού μοντέλου και η ικανότητα του να προσφέρει προβλέψεις οι οποίες είναι αξιόπιστες καθώς οι τιμές που έδωσε δεν έχουν μεγάλη απόκλιση από τα αποτελέσματα του πιστοποιημένου μοντέλου.

6. Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός μοντέλου μηχανικής μάθησης με χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων ώστε να μπορούν να ρυθμιστούν οι παράμετροι λειτουργίας του συστήματος αερισμού με σκοπό τόσο την εξασφάλιση καλύτερων συνθηκών εργασίας αλλά και την δημιουργία ενός ασφαλέστερου και ελεγχόμενου περιβάλλοντος υπόγειου χώρου.

Χρησιμοποιήθηκε ένα μοντελοποιημένο δίκτυο αέρα του οποίου τα χαρακτηριστικά των στοών, των συστημάτων λειτουργίας αερισμού και του μηχανολογικού εξοπλισμού πάρθηκαν από το υπόγειο μεταλλείο βωξίτη της Βάργιανης της εταιρείας Δελφοί Δίστομον Α.Μ.Ε.. Αρχικά, έγινε αξιολόγηση της περιβαλλοντικής κατάστασης δύο μετώπων εργασίας του μεταλλείου μέσω του προγράμματος Ventsim Design. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης έδειξαν πως τα αέρια του μεταλλείου έχουν απόλυτη συσχέτιση μεταξύ τους.

Έπειτα, επιλέχθηκε ένα τμήμα του μεταλλείου, το οποίο αποτελείται από δυο παραγωγικές στοές και έγινε η παραδοχή πως υπάρχει πλήρης λειτουργία των στοών. Η τροφοδότηση αέρα στα δυο μέτωπα εργασίας γίνεται από τον ίδιο ανεμιστήρα και οι ρυθμιστικές θύρες που υπάρχουν στις στοές βοηθούν για την σωστή διεύθυνση του αέρα. Με την τοποθέτηση αισθητήρων σε κατάλληλα σημεία έγινε εξαγωγή δεδομένων ώστε να δημιουργηθεί η βάση δεδομένων για την εκπαίδευση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου.

Αναπτύχθηκε τεχνητό νευρωνικό δίκτυο πρόσθιας τροφοδότησης το οποίο δέχεται ως δεδομένα εισόδου την συνολική παροχή του ανεμιστήρα και το ποσοστό του ανοίγματος κάθε ρυθμιστικής θύρας και ως δεδομένα εξόδου ορίστηκαν οι περιεκτικότητες του NOx για κάθε θέση εργασίας. Επιλέχθηκε, επιβλεπόμενη μάθηση για την εκπαίδευση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου και τα αποτελέσματα της έδειξαν πως το μοντέλο ακολουθούσε πιστά τις πραγματικές τιμές των δεδομένων με την γενική μέση ακρίβεια πρόβλεψης να είναι στο 96.36%. Τέλος ακολούθησε έλεγχος πιστότητας του ΤΝΔ συγκρίνοντας τις προβλέψεις του τεχνητού νευρωνικού δικτύου με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από το μοντέλο του Ventsim για ένα σύνολο τυχαίων δεδομένων.

Τα αποτελέσματα της εκπαίδευσης σε συνδυασμό με τον έλεγχο πιστότητας έδειξαν πως το μοντέλο του νευρωνικού δικτύου που δημιουργήθηκε έχει την ικανότητα γενίκευσης, μπορεί δηλαδή να δώσει προβλέψεις οι οποίες είναι ορθολογικές και που μπορούν να προσφέρουν ένα ελεγχόμενο περιβάλλον εργασίας, καθώς δίνει την δυνατότητα τους μηχανικούς να γνωρίζουν από πριν ποια θα είναι η ποιοτική κατάσταση του αέρα του μεταλλείου για κάθε μεταβολή των παραμέτρων λειτουργίας των συστημάτων αερισμού.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, τα συστήματα αυτόματου ελέγχου είναι η απάντηση για την δημιουργία ασφαλέστερων και καθαρότερων περιβάλλοντων εργασίας στους υπόγειους χώρους αλλά και για την βελτιστοποίηση της εφαρμογής του ventilation on demand που έχει ως στόχο τόσο την μείωση του ενεργειακού κόστους του αερισμού και την αύξηση της παραγωγικότητας του έργου αλλά και την δημιουργία ενός πλήρους παραμετροποιήσιμου και ασφαλέστερου χώρου εργασίας.

Τέλος, καθώς τα μεταλλεία είναι έργα τα οποία αναπτύσσονται συνεχώς, άρα αλλάζει διαρκώς η δυναμική τους κατάσταση, ακόμα και μέσα στην βάρδια εργασίας, καθίσταται πλέον αναγκαία η περεταίρω έρευνα για την ανάπτυξη τεχνητών νευρωνικών δικτύων, όπως για παράδειγμα τα RNN ή τα LSTM, ώστε να επιτευχθεί η μοντελοποίηση και ο έλεγχος της ποιότητας ατμοσφαιρας σχεδόν σε συνεχή και δυναμική βάση. Αυτό θα επιτρέψει σημαντική αναβάθμιση του επιπέδου ασφαλείας των εργαζομένων και χρηστών στους υπόγειους χώρους αλλά και ταυτόχρονα σημαντικές μειώσεις του κόστους λειτουργίας των συστημάτων αερισμού που υφίστανται εκεί.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Δελφοί – Δίστομον Α.Μ.Ε., 2018, «ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΤΟΥ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΣ ΒΑΡΓΙΑΝΗ G,K,J,M,N», Ιούνιος 2018
- [2] Μπενάρδος Α., Καλιαμπάκος Δ. 2010, «Υπόγεια Έργα», Σημειώσεις, Σχολή Μηχ. Μεταλλείων - Μεταλλουργών ΕΜΠ, Αθήνα
- [3] Μαούνης Δ., «Ανάπτυξη υπολογιστικού εργαλείου για συστήματα βοηθητικού αερισμού σε περιβάλλον JAVA», Διπλωματική εργασία, Σχολή Μηχ. Μεταλλείων - Μεταλλουργών Ε.Μ.Π., Αθήνα
- [4] Μπενάρδος, Α., 2014. Μέθοδοι υπόγειας εκμετάλλευσης στα κοιτάσματα του Ελλαδικού χώρου, Σημειώσεις, Σχολή Μηχ. Μεταλλείων - Μεταλλουργών Ε.Μ.Π., Αθήνα
- [5] Οικονομόπουλος Ι.Ν., 2002, «Εκμετάλλευση Μεταλλείων ΙΙ – Ο αερισμός των μεταλλείων», Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα
- [6] Howard L. Hartman, R.V. Ramani, Jan M. Mutmansky, Y.J. Wank, «Mine ventilation and air conditioning» (third edition), Wiley Interscience, ISBN: 0-471-11635-1
- [7] McPherson, 1993, «Subsurface Ventilation and Environmental Engineering»
- [8] Simon Haykin, 2009, «Νευρωνικά δίκτυα και Μηχανική μάθηση»
- [9] Ioannis Stylios, 2019, «Data Science with Python», University of Athens
- [10] A. Kashnikov, L. Levin, Applying machine learning techniques to mine ventilation control systems, May 2017
- [11] Lagowski, K.: Air Supply on Demand – New Ventilation Technology Provides Airflow When and Where It Is Needed. 2013
- [12] Hardcastle, S. G. Gangal, M. K. Schreer M. Gauthier, P.: Ventilation-on-Demand – Quantity or Quality – A Pilot Trial at Barrick Gold’s Bousquet Mine. In: Proceedings of the 8th US Mine Ventilation Symposium, Rolla, 1999
- [13] Katary, S.: Ventilation on Demand – CAF (Community Adjustment Fund). CEMI, 2012

- [14] Tran-Valade, T & Allen, C 2013, 'Ventilation-On-Demand key consideration for the business case', in Canadian Institute of Mining (CIM) Convention: proceedings of the Toronto 2013 CIM Conference, Toronto, Canada
- [15] Α. Τερζίδου, Μ. Δασυγένης, 2016, «Python Programming», Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη
- [16] Γ. Μανής, 2015, «Εισαγωγή στον Προγραμματισμό με Αρωγό τη Γλώσσα Python», Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων
- [17] Βασίλειος Γ. Καμπουρλάζος, Γεώργιος Α. Παπακώστας, 2015, «Εισαγωγή στην ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ», ΕΜΠ, Αθήνα
- [18] ΘΑΔΟΓΟΡΗ-ΚΟΚΚΙΝΟΥ Α., 2013, «Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα και εφαρμογές στα Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου», Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών
- [19] Η. Καταβάτης, Ε. Α. Γάκης, 2019, «Neural Networks and Learning Machines», Πτυχιακή Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών
- [20] Σ. Πάντος, 2006, «ΜΕΛΕΤΗ, ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ μ C ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΝΕΥΡΩΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ», Πτυχιακή Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολογικών Εφαρμογών, Κρήτη
- [21] Κ. Σιούτας, 2021, «Πρόβλεψη του Ρυθμού Προχώρησης Μηχανών Ολομέτωπης Κοπής (TBM) με τη χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων», Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα
- [22] Costa L., Silva J., 2020, «Strategies used to control the costs of underground ventilation in some Brazilian mines. », REM - International Engineering Journal, v. 73, pp. 555-560. Available from: <https://doi.org/10.1590/0370-44672019730057>.
- [23] S. Sjöström, E. Klintenäs, P. Johansson, J. Nyqvist, 2020, «Optimized model-based control of main mine ventilation air flows with minimized energy consumption», International Journal of Mining Science and Technology, Volume 30, Issue 4, pp 533-539.
- [24] <https://www.canadianminingjournal.com/featured-article/abb-discusses-the-advantages-of-ventilation-on-demand>.

[25] Acuña E., Alvarez R., Hurtado J., 2016, Updated Ventilation On Demand review: implementation and savings achieved, 1st International Underground Mining Conference.

[26] Acuña E., Alvarez R., Hardcastle S., 2014, A theoretical comparison of ventilation on demand strategies for auxiliary mine ventilation systems, 10th International Mine Ventilation Congress,

