



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε
κτίρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19**

ΧΡΗΣΤΟΣ ΚΑΣΣΑΜΠΙΑΝ

A.M.: 272017082

Επιβλέπων Καθηγητής: Αντώνιος Νάζος

Αθήνα, 2023

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων
κατά την πανδημία COVID-19

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή		
ΝΑΖΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ	ΜΑΪΤΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ	ΖΑΦΕΙΡΑΚΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Χρήστος Κασσαμπιάν του Βρεζ, με αριθμό μητρώου 272017082 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών

Περίληψη

Στην εργασία αυτή θα μελετηθεί και θα διερευνηθεί η συγκέντρωση του ιού σε εσωτερικούς χώρους και θα εξετασθούν δύο στρατηγικές μείωσης του λειτουργικού κόστους ενός συστήματος HVAC : (1) για παροχή 100% εξωτερικού αέρα στο κτίριο και (2) για χρήση διαφορετικών φίλτρων HVAC, συμπεριλαμβανομένου του MERV 10, MERV 13 και φίλτρα HEPA. Αυτές οι στρατηγικές θα εφαρμοστούν σε ένα υποθετικό κτίριο εκπαίδευσης που βρίσκεται σε ζώνες με ψυχρό και θερμό κλίμα.

Το Κεφάλαιο 1 αναφέρεται στην εισαγωγή της Διπλωματικής εργασίας, όπου παρουσιάζονται τα εισαγωγικά στοιχεία σε συνδυασμό με τον σκοπό της Διπλωματικής εργασίας και με τα ερευνητικά ερωτήματα. Τα Κεφάλαια 2 έως 4 αναλύουν την βιβλιογραφική ανασκόπηση και την τρέχουσα τεχνολογική στάθμιση που αφορούν τα συστήματα HVAC και την μετάδοση του COVID-19 σε εσωτερικούς χώρους. Το Κεφάλαιο 5 περιγράφει τα στάδια της μεθοδολογίας για την διερεύνηση της συγκέντρωσης του ιού στο υποθετικό κτήριο εκπαίδευσης και του λειτουργικού κόστους για κάθε σύστημα HVAC του προβλήματος. Το κεφάλαιο 6 διεξάγει των σχολιασμό των αποτελεσμάτων έπειτα από την επίλυση των βημάτων της μεθοδολογικής προσέγγισης. Το Κεφάλαιο 7 συγκεντρώνει τα συμπεράσματα της ολοκληρωτικής μελέτης, επιλέγεται ποια στρατηγική λειτουργίας συστημάτων HVAC είναι η βέλτιστη για την αξιοποίησή στην μονάδα του προβλήματος και αναφέρονται ιδέες για μελλοντική χρήση της εργασίας σε παρόμοια ζητήματα.

Λέξεις – κλειδιά: Συστήματα HVAC, COVID-19, Συγκέντρωση Ιού , 100% Εξωτερικός Αέρας, Φίλτρα HVAC, Λειτουργικό Κόστος

Abstract

This paper will study and investigate the indoor virus concentration and examine two strategies to reduce the operating cost of an HVAC system: (1) providing 100% outdoor air to the building and (2) using different HVAC filters, including MERV 10, MERV 13 and HEPA filters. These strategies will be applied to a hypothetical educational building located in cold and hot climate zones.

Chapter 1 refers to the introduction of the thesis, where the introductory information is presented together with the purpose of the thesis and the research questions. Chapters 2 through 4 discuss the literature review and the state of the art related to HVAC systems and COVID-19 indoor transmission. Chapter 5 describes the steps of the methodology for investigating the virus concentration in the hypothetical educational building and the operational costs for each HVAC system in the problem. Chapter 6 conducts the commentary of the results after solving the steps of the methodological approach. Chapter 7 brings together the conclusions of the comprehensive study, selects which HVAC system operation strategy is optimal for utilization in the problem unit and provides ideas for future use of the work on similar issues.

Keywords: HVAC Systems, COVID-19, Virus Concentration, 100% Outside Air, HVAC Filters, Operating Costs

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων
κατά την πανδημία COVID-19

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής και υπεύθυνο καθηγητή της Διπλωματικής εργασίας κ. Αντώνιο Νάζο που με καθοδήγησε σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που με την υποστήριξή της κατάφερα να πραγματοποιήσω όλους τους στόχους μου και να επιλύσω κάθε πρόβλημα που περνούσε από μπροστά μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη	4
Abstract	5
Ευχαριστίες	6
1. Εισαγωγή	9
1.1 Σκοπός Διπλωματικής εργασίας	10
1.2 Ερευνητικά Ερωτήματα.....	10
2. Συστήματα HVAC	11
2.1 Ποιότητα Εσωτερικού Αέρα / Indoor Air Quality	12
2.2 Θερμική Άνεση	14
2.3 Κλιματισμός	15
2.4 Ψυχομετρικός Χάρτης	16
2.5 Κεντρική Κλιματιστική Μονάδα (ΚΚΜ) / Air Handling Unit (AHU)	18
2.6 Κατηγοριοποίηση Συστημάτων Κλιματισμού	20
2.7 Εξαερισμός	25
3. Μηχανισμοί Μετάδοσης του COVID-19	30
3.1 Βασικές Αρχές Μετάδοσης του COVID-19	31
3.2 Αερογενής μετάδοση	35
4. Η Επίδραση των Συστημάτων HVAC στην Εξάπλωση του COVID-19	39
4.1 Εξαερισμός	41
4.2 Διήθηση του αέρα με την χρήση των HVAC φίλτρων	46
4.3 Αποφυγή της ανακυκλοφορίας του αέρα	53
4.4 UVGI (Ultraviolet Germicidal Irradiation)	54
4.5 Άλλες Στρατηγικές	56

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων
κατά την πανδημία COVID-19

5. Μεθοδολογική Προσέγγιση	57
5.1 Αναφορά των γενικών και απαραίτητων στοιχείων του υποθετικού κτηρίου και της ΚΚΜ	58
5.2 Περιγραφή μοντέλου υπολογισμού ισχύος του ψυκτικού και θερμαντικού στοιχείου και του ανεμιστήρα προσαγωγής	61
5.3 Διερεύνηση απόδοσης και στατικής πτώσης πίεσης των φίλτρων MERV 10, MERV 13 και HEPA	66
5.4 Διερεύνηση συγκέντρωσης του COVID-19 στον εσωτερικό χώρο του κτηρίου.....	68
5.5 Ανάλυση του λειτουργικού κόστους των συστημάτων HVAC	70
6. Αποτελέσματα και Σχολιασμοί	75
6.1 Ισχύς Ψυκτικού και Θερμαντικού Στοιχείου και του Ανεμιστήρα Προσαγωγής.....	75
6.2 Απόδοση Φίλτρων HVAC και Στατική Πτώση Πίεσης	78
6.3 Συγκέντρωση Ιού και Προβλεπόμενος Αριθμός Λοιμώξεων	79
6.4 Λειτουργικό Κόστος	85
7. Συμπεράσματα	87
8. Αναφορές – Πηγές	90
Παράρτημα 1: Κατάλογος Εικόνων	94
Παράρτημα 2: Κατάλογος Πινάκων	95
Παράρτημα 3: Κατάλογος Γραφημάτων	97

1. Εισαγωγή

Η πανδημία του COVID-19 στιγμάτισε την παγκόσμια κλίμακα και θεωρείται ως ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα του 21^{ου} αιώνα, διότι ο ιός SARS-COV-2 επεκτάθηκε ραγδαία σε όλο τον πλανήτη και προκάλεσε την μόλυνση και τον θάνατο σε εκατομμύρια ανθρώπους. [1] Ο COVID-19 ανάγκασε τις χώρες να εξαπολύσουν δραστικά μέτρα για τον περιορισμό της εξάπλωσης του ιού και ένα από αυτά τα μέτρα ήταν το γνωστό «lockdown». Παρόλα αυτά, η αναγκαστική αυτή επιλογή οδήγησε σε μια σειρά από αρνητικές επιπτώσεις όπου επηρεάστηκαν σε μεγάλο βαθμό οι διεθνείς οικονομίες και η δημόσια υγεία.[2] Επιπροσθέτως, η εμφάνιση της πανδημίας επηρέασε τον τομέα της εκπαίδευσης, δημιουργώντας σημαντικά ζητήματα λόγω της ξαφνικής διακοπής των δια ζώσης μαθημάτων και της δημιουργίας της εξ αποστάσεως εκπαίδευσης. [3]

Με την επαναλειτουργία των δημόσιων και εμπορικών κτηρίων (πανεπιστήμια, γραφεία, εμπορικά καταστήματα), η καταπολέμηση της μετάδοσης του COVID-19 στους εσωτερικούς χώρους αποτέλεσε αξιοσημείωτο ζήτημα για πολλές χώρες. Διάφορες ομοσπονδίες (REHVA,ASHRAEκ.λπ.) και μια τεράστια γκάμα ερευνητών από όλο τον πλανήτη υποστηρίζουν πως η μετάδοση του SARS-COV-2 πραγματοποιείται σε μεγάλο ποσοστό στους εσωτερικούς χώρους, για παράδειγμα στα κτήρια κατοικίας, στα δημόσια κτήρια, στα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς και σε χώρους εστίασης και πως η πιο επικίνδυνη μορφή εξάπλωσής του είναι η αερογενής, δηλαδή ο ιός μεταφέρεται μέσω του αέρα. Επομένως, καταλυτικός παράγοντας για την αντιμετώπιση της μετάδοσης του θεωρείται η αξιοποίηση των συστημάτων HVAC, τα οποία απαρτίζονται από διάφορες τεχνολογικές λύσεις (π.χ. συστήματα εξαερισμού, φίλτρα HVAC κ.λπ.) όπου κάθε μία κατέχει τα δικά της τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά. [4]

Μια σημαντική στρατηγική για την ελαχιστοποίηση της εξάπλωσης του COVID-19 θεωρείται η αύξηση της παροχής του εξωτερικού αέρα στον εσωτερικό χώρο. [1] Η κύρια εξήγηση είναι πως ο καλύτερος εξαερισμός προσφέρει μια ποιοτικότερη ατμόσφαιρα στον εσωτερικό χώρο χάρις της έμμεσης αλλαγής της θερμοκρασίας του χώρου και της υγρασίας. Με άλλα λόγια, οι συχνές εναλλαγές του αέρα στο εσωτερικό περιβάλλον τον απολυμαίνουν από τα αιωρούμενα σωματίδια. [4] Η αξιοποίηση του εξαερισμού, όμως, έρχεται σε αντιπαράθεση με τις ενεργειακές καταναλώσεις του κτηρίου (ανεμιστήρες προσαγωγής του αέρα, ψυκτικά στοιχεία κ.λπ.) γεγονός που οδηγεί σε νέες σκέψεις, όπως την αντικατάσταση των παλιών φίλτρων από μια Κεντρική Κλιματιστική Μονάδα με σύγχρονα αποδοτικά φίλτρα HVAC (MERV 13, HEPA). [5]

1.1 Σκοπός Διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα Διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην κατανόηση της σημαντικότητας των συστημάτων HVAC στην καταπολέμηση της εξάπλωσης του COVID-19 σε έναν εσωτερικό χώρο με χαρακτηριστικά από κτήριο εκπαιδευτηρίου. Επίσης, στοχεύει στην αξιολόγηση των συστημάτων HVAC ως προς τον βαθμό απόδοσης και το μειωμένο κόστος λειτουργίας της εγκατάστασης. Για την επίτευξη αυτού του στόχου θα υπολογισθούν διάφοροι παράμετροι, οι οποίοι είναι η ισχύς του ψυκτικού και θερμαντικού στοιχείου και τα χαρακτηριστικά των φίλτρων HVAC της Κεντρικής Κλιματιστικής Μονάδας, η συγκέντρωση του ιού στον εσωτερικό χώρο του εξεταζόμενου κτηρίου και τα κόστη λειτουργίας για κάθε στρατηγική λειτουργίας συστήματος HVAC. Να σημειωθεί ότι οι στρατηγικές αυτές χωρίζονται σε 2 κατηγορίες, στην εισαγωγή 100% νωπού αέρα (N.A.) και στην χρήση φίλτρων όπως το MERV 10, MERV 13 και HEPA. Ακόμη το εξεταζόμενο κτήριο εκπαίδευσης είναι υποθετικό και βρίσκεται σε θερμό και χειμερινό κλίμα.

1.2 Ερευνητικά Ερωτήματα

Τα ερευνητικά ερωτήματα της παρούσας Διπλωματικής εργασίας καταγράφονται ως εξής:

- Πώς κατηγοριοποιούνται τα συστήματα HVAC και ποιές είναι οι βασικές έννοιες του κλιματισμού;
- Ποίοι μηχανισμοί μετάδοσης θεωρούνται υπεύθυνοι για την εξάπλωση του COVID-19 στους εσωτερικούς χώρους και πόσο επικίνδυνη πρέπει να θεωρηθεί η αερομεταφερόμενη μετάδοση ενός ιού;
- Πώς επηρεάζουν τα συστήματα HVAC την μετάδοση του COVID-19 στους εσωτερικούς χώρους;
- Ποια στρατηγική λειτουργίας συστημάτων HVAC αυτής της μελέτης (100% Εξωτερικός Αέρας, Φίλτρα MERV 10, MERV 13, HEPA) κατέχει την υψηλότερη απόδοση στην μείωση της συγκέντρωσης του ιού σε εσωτερικό χώρο με το χαμηλότερο λειτουργικό κόστος;

2. Συστήματα HVAC

Η ιστορία των συστημάτων HVAC ξεκινάει από το πρώτο σύγχρονο κλιματιστικό που επινοήθηκε το 1902 από τον Willis Haviland Carrier, έναν εξειδικευμένο μηχανικό που άρχισε να πειραματίζεται με τους νόμους του ελέγχου της υγρασίας για να λύσει ένα πρόβλημα εφαρμογής σε ένα τυπογραφείο στο Μπρούκλιν της Νέας Υόρκης. Με δανεισμό από τις έννοιες της μηχανικής ψύξης που καθιερώθηκαν τα προηγούμενα χρόνια, το σύστημα της Carrier έστελνε αέρα μέσα από στοιχεία γεμάτα με κρύο νερό, ψύχοντας τον αέρα ενώ ταυτόχρονα αφαιρούσε την υγρασία για να ελέγξει την υγρασία του δωματίου.[6]



Εικόνα 1: Το πρώτο σύγχρονο κλιματιστικό από τον Willis Haviland Carrier [6]

Ο όρος HVAC αποτελεί σύντμηση των λέξεων θέρμανση (H - Heating), εξαερισμός (V - Ventilation) και κλιματισμός (AC – Air Conditioning). Συγκεκριμένα, ελέγχει την θερμοκρασία, την υγρασία, την ακτινοβολούμενη ενέργεια, την κίνηση και την ποιότητα του αέρα εντός ενός χώρου με σκοπό την ικανοποίηση των απαιτήσεων για θερμική άνεση και την διασφάλιση της ικανοποιητικής ποιότητας του εσωτερικού αέρα.[7] Τα συστήματα HVAC χρησιμοποιούνται περισσότερο σε διαφορετικούς τύπους κτιρίων όπως βιομηχανικά, εμπορικά, οικιστικά και θεσμικά κτήρια. [8]

Ο στόχος ενός συστήματος HVAC είναι να διασφαλίσει ότι ένα εσωτερικό περιβάλλον είναι ασφαλές και άνετο για τον άνθρωπο. Η ασφάλεια εδώ αφορά κυρίως την ποιότητα του αέρα ενός εσωτερικού χώρου («IAQ»), που σημαίνει ότι ο εσωτερικός αέρας πρέπει να περιέχει αρκετή περιεκτικότητα σε οξυγόνο και να είναι απαλλαγμένος από επιβλαβή αέρια. Η άνεση φυσικά βασίζεται στην ανθρώπινη αντίληψη, η οποία μπορεί να ποικίλλει εντός ορίων. Η ASHRAE (η Αμερικανική Εταιρεία Μηχανικών Θέρμανσης, Ψύξης και Κλιματισμού), ορίζει την ποιότητα του άνετου αέρα ως "για την οποία η σημαντική πλειοψηφία (80% ή περισσότερο) των ατόμων που εκτίθενται δεν εκφράζουν δυσαρέσκεια". [9]

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

Επιπροσθέτως, ένα σύστημα HVAC έχει τον ρόλο του να ελέγχει και να διαχειρίζεται την ροή και το φιλτράρισμα του αέρα σε έναν εσωτερικό χώρο. Επίσης, με τις μηχανικές παρεμβάσεις του μπορεί να διατηρεί τον αέρα του εσωτερικού περιβάλλοντος σε μια προτιμώμενη θερμοκρασία και σχετική υγρασία.

Για την καλύτερη κατανόηση των συστημάτων HVAC, θα γίνει μια σύντομη ανασκόπηση στις έννοιες της Θερμική Άνεσης και της Ποιότητας Εσωτερικού Αέρα και έπειτα θα αναλυθούν τα πιο απαραίτητα σημεία στον κλιματισμό και στον εξαερισμό ενός χώρου.

2.1 Ποιότητα Εσωτερικού Αέρα / Indoor Air Quality

Η ποιότητα εσωτερικού αέρα (Indoor Air Quality – «IAQ») αποτελεί σημαντική παράμετρο στα κτίρια, καθώς είναι στενά συνδεδεμένη τόσο με την υγεία όσο και με την άνεση των ανθρώπων που ζουν ή εργάζονται μέσα σε αυτό. [10]

Η ρύπανση της ατμόσφαιρας των εσωτερικών χώρων αποτελεί σημαντικό πρόβλημα για τις αναπτυσσόμενες και τις βιομηχανικά αναπτυγμένες χώρες, με διαφορετική βέβαια φύση και αιτιολογία σε κάθε περίπτωση. Σύμφωνα με έρευνες, στις βιομηχανικά αναπτυγμένες χώρες οι άνθρωποι ξοδεύουν κατά μέσο όρο το 90% του χρόνου τους στο εσωτερικό περιβάλλον. Τα ποσοστά διαφοροποιούνται ελαφρώς ανάλογα με το είδος της πληθυσμιακής ομάδας. [11]

Ο άνθρωπος έχει την τάση να πιστεύει πως ο αέρας που αναπνέουμε από το εξωτερικό περιβάλλον είναι αρκετά επικίνδυνος για την δημόσια υγεία εξαιτίας της ύπαρξης των ατμοσφαιρικών ρύπων (CO, NOx ,αιωρούμενα σωματίδια κλπ). Ωστόσο, έχει αποδειχθεί πως ο αέρας που υπάρχει στους εσωτερικούς χώρους είναι εξίσου μολυσματικός εξαιτίας των ρύπων που διεισδύουν από το εξωτερικό περιβάλλον, αλλά και των εσωτερικών πηγών που επηρεάζουν την ποιότητα του αέρα, οι οποίες ταξινομούνται στις ανθρώπινες δραστηριότητες (κάπνισμα, καύση στερεών καυσίμων, μαγείρεμα και καθαρισμός), στην παραγωγή ατμών και στους βιολογικούς ρύπους (μούχλα, αλλεργιογόνα, βακτήρια και ιούς).[12] Η ποιότητα του εσωτερικού αέρα είναι ένα παγκόσμιο ζήτημα. Τόσο η βραχυπρόθεσμη όσο και η μακροπρόθεσμη έκθεση στην ατμοσφαιρική ρύπανση των εσωτερικών χώρων μπορεί να προκαλέσει μια σειρά από προβλήματα υγείας, όπως αναπνευστικές παθήσεις, καρδιακές παθήσεις, γνωστικά ελλείμματα και καρκίνο. Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα, ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας υπολογίζει ότι 3,8 εκατομμύρια άνθρωποι παγκοσμίως πεθαίνουν κάθε χρόνο από ασθένειες που αποδίδονται στον επιβλαβή αέρα εσωτερικού χώρου από βρώμικες εστίες μαγειρέματος και καύσιμα. [11]

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

Συνοπτικά, οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την Ποιότητα Εσωτερικού Αέρα είναι: [13]

- Η παραγωγή ρύπων στους εσωτερικούς χώρους
- Οι ίδιοι οι χρήστες
- Ποιότητα του αέρα στο εξωτερικό περιβάλλον
- Μετεωρολογικοί παράγοντες
- Ο εξαερισμός και ο κλιματισμός
- Τα κατασκευαστικά υλικά

Ο **Πίνακας 1** δίνει μερικά παραδείγματα ρυπογόνων παραγόντων του αέρα σε εσωτερικό χώρο και τις δυνητικές πηγές τους .

A/A	Ρυπογόνος Παράγοντας	Πηγή
1	Αμίαντος	Ορισμένα παλαιά υλικά για πυροπροστασία ή θερμομόνωση , φρεάτια εξαερισμού και αγωγοί, λέβητες
2	Αμμωνία (NH ₃)	Ειδικά φωτοτυπικά μηχανήματα, χημικά καθαρισμού, απορρυπαντικά
3	Βενζόλιο, τολουόλιο, διαλύτες με βάση το πετρέλαιο	Γόμμα για καουτσούκ, φωτοτυπικό μελάνι, διαλύτες καθαρισμού για γόμμες, ορισμένες βαφές και επιχρίσματα
4	Διεθανολαμίνη	Πρόσθετο νερού που χρησιμοποιείται σε λέβητες ατμού
5	Μεθυλική αλκοόλη	Διαλύτης για φωτοαντιγραφικές μηχανές
6	Τριχλωροαιθυλένιο	Ορισμένα διορθωτικά υγρά, μελάνια, κόλλες, καθαριστικά, χημικά
7	Ατμοί βενζίνης	Εξατμίσεις αυτοκινήτων
8	Ιοί, βακτήρια, μύκητες	Συστήματα εξαερισμού και ύγρανσης, πύργοι ψύξης, αγωγοί εξαερισμού, δοχεία συλλογής νερού (από συμπύκνωση), χαλιά και έπιπλα, υγρασία στα παράθυρα
9	Φυτοφάρμακα και βιοκτόνα	Ψεκασμοί φυτών, εντόμων και καταπολέμηση τρωκτικών
10	Φορμαλδεύδη	Εκπομπές από έπιπλα, ρητίνες στις μοριοσανίδες, ξύλα από πολυστρώσεις
11	Πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC _s)	Δομικά υλικά-κόντρα πλακέ, ρητίνες, κόλλες, στεγανοποιητικές ενώσεις, νέα έπιπλα, βαφές με βάση το πετρέλαιο
12	Διοξείδιο του θείου (SO ₂)	Εξωτερικές πηγές όπως καύση ορυκτών καυσίμων
13	Όζον (O ₃)	Ηλεκτροστατικοί καθαριστές αέρα, φωτοτυπικές μηχανές, γεννήτριες όζοντος
14	Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂)	Το Διοξείδιο του Άνθρακα εκλύεται κατά την εκπνοή καθώς και κατά την καύση από

15	Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)	καυστήρες, τζάκια, λέβητες και οχήματα Το Μονοξείδιο του Άνθρακα είναι προϊόν ατελούς καύσης και εκλύεται από εξατμίσεις οχημάτων, τα τζάκια, τις θερμάστρες (υγραερίου και πετρελαίου) καθώς και από αναμμένα καπνικά προϊόντα
----	-----------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Πίνακας 1: Εσωτερικοί ρυπογόνοι παράγοντες του αέρα και οι δυνητικές πηγές τους [11]

2.2 Θερμική Άνεση

Η υγεία και η παραγωγική δραστηριότητα του ανθρώπου επηρεάζεται, σε μεγάλο βαθμό, από τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν στο άμεσο περιβάλλον του. Ο άνθρωπος προσπαθεί να προσαρμοστεί σε αυτό, προκειμένου να εξασφαλίσει την βιολογική και ψυχολογική του ισορροπία.

Η «θερμική άνεση» μπορεί να οριστεί ως «η αίσθηση μιας πλήρους φυσικής και διανοητικής ευχάριστης κατάστασης για τον άνθρωπο», μια κατάσταση πλήρους ευεξίας. [14]

Για την καλύτερη κατανόηση της έννοιας της θερμικής άνεσης έχουν καθοριστεί διαφορετικές προσεγγίσεις, οι οποίες είναι οι εξής:

- Σύμφωνα με την Αμερικάνικη Επιστημονική Εταιρία Θέρμανσης, Ψύξης και Κλιματισμού (ASHRAE , American Society of Heating, Refrigerating And Air Conditioning) ως θερμική άνεση ενός ατόμου ορίζεται “η κατάσταση του μυαλού , η οποία εκφράζει ικανοποίηση με τις επικρατούσες θερμικές συνθήκες”[15]
- Με βάση την θερμοφυσιολογική προσέγγιση, η θερμική άνεση βασίζεται στην ενεργοποίηση των θερμικών αισθητήρων στο δέρμα και τον υποθάλαμο και ορίζεται ως ο ελάχιστος ρυθμός των νευρικών σημάτων από αυτούς. [16]
- Ενώ, σύμφωνα με τον ενεργειακό ορισμό η κατάσταση της θερμικής άνεσης επιτυγχάνεται όταν η θερμότητα ρέει που από και προς το ανθρώπινο σώμα είναι ισοσταθμισμένη. [16]

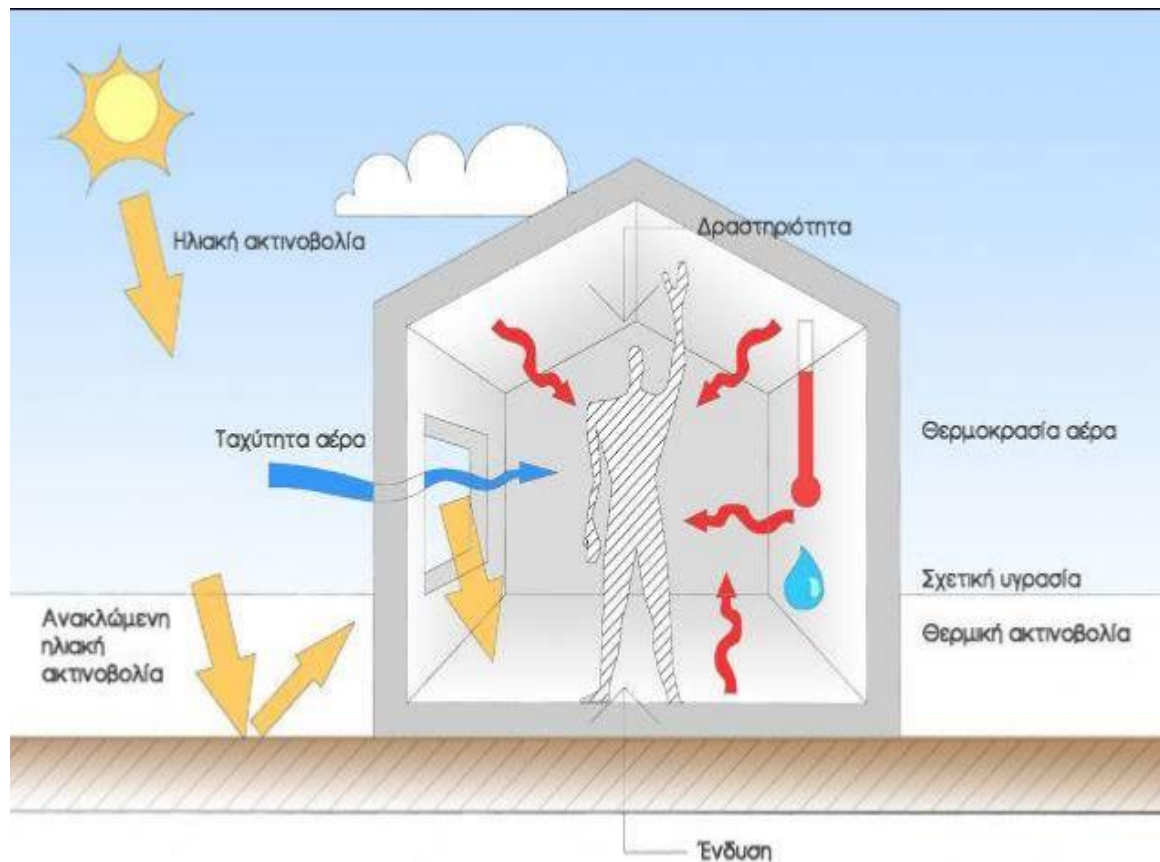
Η θερμική άνεση αποτελεί ποιοτικό στοιχείο του εσωτερικού ενός χώρου. Παρακάτω, παρουσιάζονται συνοπτικά οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την άνεση: [14]

- οι ατομικές δραστηριότητες του ανθρώπου
- η ένδυση
- η θερμοκρασία του αέρα
- η μέση θερμοκρασία ακτινοβολίας
- η ταχύτητα του αέρα

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

- η υγρασία του αέρα
- η δρώσα θερμοκρασία

Κατά συνέπεια, πρακτικά δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί το σημείο άριστης θερμικής άνεσης, αλλά μια σειρά συνθηκών, οι οποίες αποτελούν την «**περιοχή άνεσης**», όπου σύμφωνα με τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα το 70% των ατόμων νοιώθουν ευχάριστα. Βέβαια, πρέπει να τονιστεί το αίσθημα της ζέστης ή του κρύου είναι και ζήτημα υποκειμενικό και εξαρτάται και από άλλους παράγοντες, φυσιολογικούς και ψυχολογικούς. [14]



Εικόνα 2: Παράγοντες που επηρεάζουν την θερμική άνεση [14]

2.3 Κλιματισμός

Σύμφωνα με την τρέχουσα τεχνολογική στάθμιση, ο κλιματισμός ελέγχει απόλυτα την θερμοκρασία, την υγρασία, την παροχή του εξωτερικού αέρα για αερισμό, την διήθηση αιωρούμενων σωματιδίων, την ποιότητα και την κίνηση του αέρα σε έναν συγκεκριμένο χώρο. [17]

Οι βασικές λειτουργίες που εκτελούνται από ένα σύστημα κλιματισμού είναι: [18]

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

- **Θέρμανση:** είναι η διαδικασία προσθήκης θερμικής ενέργειας (θερμότητας) στον αέρα του κλιματιζόμενου χώρου προκειμένου να αυξηθεί η θερμοκρασία ή να διατηρηθεί η θερμοκρασία εντός ορισμένων ορίων.
- **Ψύξη:** είναι η διαδικασία αφαίρεσης της θερμικής ενέργειας (θερμότητας) από τον αέρα του κλιματιζόμενου χώρου προκειμένου να χαμηλώσει η θερμοκρασία ή να διατηρήσει τη θερμοκρασία εντός ορισμένων ορίων.
- **Υγρανση:** είναι η διαδικασία προσθήκης νερού (υγρασίας) στον αέρα του κλιματιζόμενου χώρου προκειμένου να αυξηθεί η σχετική υγρασία ή να διατηρηθεί σε ορισμένα όρια.
- **Αφύγρανση:** είναι η διαδικασία απομάκρυνσης του νερού (υγρασίας) από τον αέρα του κλιματιζόμενου χώρου προκειμένου να μειωθεί η σχετική υγρασία ή να διατηρηθεί εντός ορισμένων ορίων.
- **Ανανέωση του αέρα:** είναι η διαδικασία της λήψης εξωτερικού αέρα και της εκκένωσης αέρα ενός εσωτερικού χώρου προκειμένου να αραιωθούν οι ακαθαρσίες του αέρα και να διασφαλιστεί η απαραίτητη Ποιότητα Εσωτερικού Αέρα.
- **Καθαρισμός του αέρα:** είναι η διαδικασία απομάκρυνσης των σωματιδίων και των οργανικών ρύπων του αέρα προκειμένου να βελτιωθεί και να διατηρηθεί η Ποιότητα Εσωτερικού Αέρα.

2.4 Ψυχομετρικός Χάρτης

Πολλές από τις διαδικασίες του κλιματισμού περιλαμβάνουν αέρα στον οποίο υφίσταται ενεργειακές μεταβολές. Αυτές οι μεταβολές προκύπτουν εξαιτίας των αλλαγών της θερμοκρασίας του αέρα και της περιεκτικότητάς του σε υγρασία. Οι σχέσεις μεταξύ της θερμοκρασίας, της περιεκτικότητας της υγρασίας και της ενέργειας γίνονται πιο εύκολα αντιληπτά χρησιμοποιώντας το οπτικό βοήθημα που ονομάζεται ψυχομετρικός χάρτης. [17]

Το ψυχομετρικό διάγραμμα θεωρείται ένα εργαλείο βιομηχανικού προτύπου που αξιοποιείται για την οπτικοποίηση μεταξύ των αλληλεπιδράσεων μεταξύ του ξηρού αέρα, της υγρασίας και την ενέργειας. [17]

Όλοι οι υπολογισμοί που γίνονται με τη βοήθεια του ψυχομετρικού χάρτη, αποτελούν συνέπεια της αρχής διατήρησης της ενέργειας (Α' θερμοδυναμικός νόμος) και της αρχής διατήρησης της μάζας. Ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι μίγμα ξηρού αέρα και υδρατμών. Οι υδρατμοί αν και βρίσκονται σε μικρή ποσότητα (3% κ.μ.) η επίδρασή τους στις συνθήκες διαβίωσης είναι πολύ μεγάλη. [19]

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

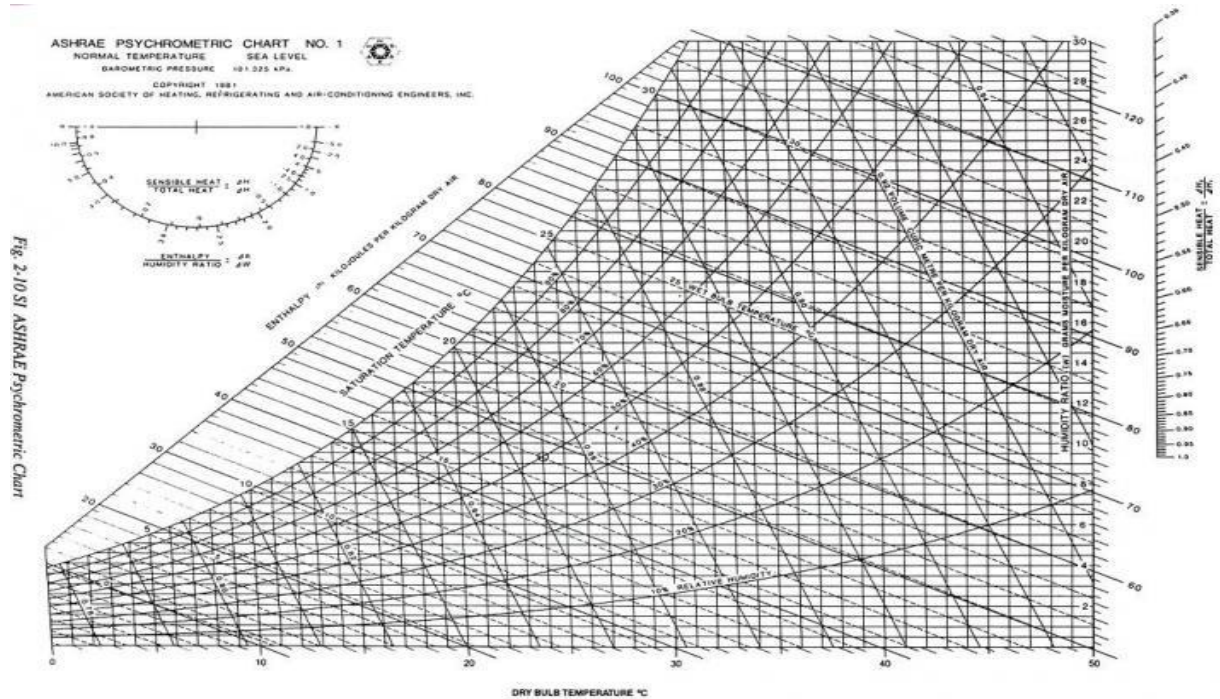


Fig. 2-10 SI ASHRAE Psychrometric Chart

Εικόνα 3: Ψυχομετρικός Χάρτης ASHRAE [19]

Ο Ψυχομετρικός Χάρτης περιλαμβάνει τα παρακάτω δεδομένα του νωπού αέρα: [19]

- **Θερμοκρασία ξηρού βολβού:** Είναι η ένδειξη ενός κοινού θερμομέτρου
- **Θερμοκρασία υγρού βολβού:** Είναι η ένδειξη ενός θερμομέτρου όπου ο βολβός περιτυλίγεται με ένα υγρό πανί και περιστρέφεται στον αέρα. Με την εξάτμιση του νερού η ένδειξη της θερμοκρασίας υγρού βολβού είναι χαμηλότερη της θερμοκρασίας ξηρού βολβού
- **Περιεχόμενο υγρασίας:** Είναι η ποσότητα του νερού που περιέχεται στη μονάδα μάζας ξηρού αέρα
- **Ειδική ενθαλπία**
- **Σχετική υγρασία:** Είναι ο λόγος του ποσού υγρασίας που περιέχεται στον αέρα, προς το μέγιστο ποσό υγρασίας που μπορεί να συγκρατήσει ο αέρας στην ίδια θερμοκρασία και πίεση
- **Ειδικός όγκος**
- **Σημείο δρόσου:** Είναι η θερμοκρασία του υγρού ατμοσφαιρικού αέρα στην οποία αρχίζει η συμπύκνωση των περιεχομένων σε αυτόν υδρατμών, χωρίς να μεταβάλλεται το περιεχόμενο υγρασίας

2.5 Κεντρική Κλιματιστική Μονάδα (KKM) / Air Handling Unit (AHU)

Η Κεντρική Κλιματιστική Μονάδα είναι η συσκευή μέσα στην οποία γίνεται η επεξεργασία του κλιματισμένου αέρα. Οι Κεντρικές Κλιματιστικές Μονάδες (KKM) χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις κεντρικού κλιματισμού σε εμπορικά κτίρια, ξενοδοχεία και κτίρια γραφείων, σε βιομηχανικές εφαρμογές αλλά και σε χώρους με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά όπως οι εσωτερικές πισίνες και spa ή κτίρια υψηλών απαιτήσεων όπως νοσοκομεία, κλινικές κ.ά. Σκοπός της λειτουργίας τους είναι να διοχετεύουν διαρκώς φρέσκο φιλτραρισμένο αέρα, διατηρώντας σταθερή την επιλεγμένη θερμοκρασία εξασφαλίζοντας έτσι συνθήκες άνεσης και υγιεινής, δηλαδή τη διατήρηση του μικροκλίματος στο χώρο κατά την απαίτηση των χρηστών, ενώ παράλληλα προστατεύουν το κτίριο και τον εξοπλισμό του από υγρασιές και διασπορά μικροβίων και σκόνης. Έτσι εξασφαλίζεται ο ύψιστος σκοπός που είναι η προστασία της υγείας των χρηστών, η άνεση και η ευεξία που παρέχει ένας σωστά κλιματιζόμενος χώρος. [8]

Στις Κεντρικές Κλιματιστικές Μονάδες πραγματοποιούνται οι εξής βασικές λειτουργίες: [20]

- Η θερμική επεξεργασία του αέρα (ψύξη/θέρμανση)
- Ο καθαρισμός (φιλτράρισμα του αέρα)
- η ύγρανση (πρόσδωση υγρασίας) του αέρα
- Η αφύγρανση (αφαίρεση υγρασίας) του αέρα
- Η ανανέωση του αέρα (προσθήκη νωπού αέρα και απόρριψη)

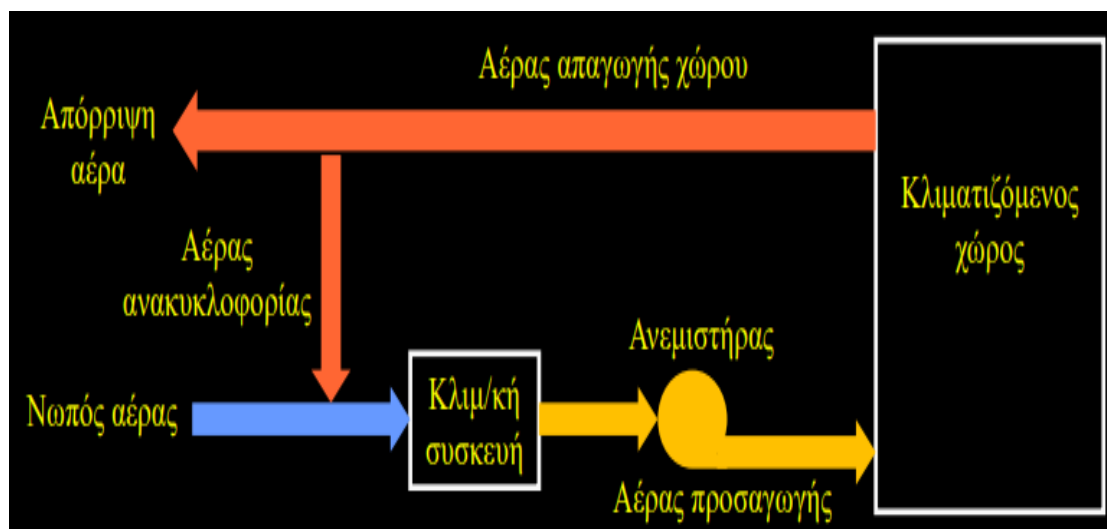
Για να πραγματοποιούνται οι παραπάνω λειτουργίες οι Κεντρικές Κλιματιστικές Μονάδες συγκροτούνται από διάφορα επιμέρους τμήματα: [20]

- Το τμήμα θερμικής επεξεργασίας και ρύθμισης της υγρασίας του αέρα.
- Το τμήμα ή τα τμήματα των ανεμιστήρων.
- Το κιβώτιο μίξης.
- Το τμήμα φίλτρων
- Το τμήμα εξοικονόμησης ενέργειας

Οι Κεντρικές Κλιματιστικές Μονάδες, που στην ξένη βιβλιογραφία συνήθως έχουν το ακρωνύμιο του A.H.U, βρίσκονται σε μεσαία έως και μεγάλα εμπορικά και βιομηχανικά κτίρια. Συνήθως βρίσκονται στο υπόγειο, στην ταράτσα ή στους ορόφους ενός κτιρίου. Ο κύριος σκοπός τους είναι να κλιματίζουν και να διανέμουν τον αέρα μέσα σε ένα κτήριο. [22] Αρχικά, ο νωπός αέρας αναρροφάται από το περιβάλλον και αναμιγνύεται με ποσότητα αέρα επιστροφής από το χώρο στο δοχείο ανάμειξης, για να επιτευχθεί εξοικονόμηση ενέργειας. Ο αναμιγμένος αέρας φιλτράρεται και στη συνέχεια οδηγείται στα στοιχεία για θέρμανση/ψύξη. Υπάρχουν

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

συνήθων προθερμαντικά στοιχεία, ψυκτικά στοιχεία και θερμαντικά στοιχεία, καθώς και υγραντήρας. Μετά τις προαναφερθείσες συσκευές, ο έτοιμος πλέον αέρας οδηγείται στο εσωτερικό του χώρου με τη βοήθεια ανεμιστήρων και αεραγωγών προσαγωγής. Από την άλλη πλευρά, αέρας εσωτερικού χώρου πηγαίνει στο δίκτυο απαγωγής. Κομμάτι αυτού του αέρα απορρίπτεται στο περιβάλλον και ένα άλλο κομμάτι οδηγείται στο δοχείο ανάμειξης και έτσι ο κύκλος κλείνει. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η ψύξη/θέρμανση παράγεται με χρήση ψυχρού/θεμού νερού το οποίο παράγεται από άλλες συσκευές (π.χ. αντλία θερμότητας ή λέβητας). Η ύγρανση πραγματοποιείται με την έκχυση νερού ή υδρατμού στον επεξεργαζόμενο αέρα. [21] Μια τυπική Κεντρική Κλιματιστική Μονάδα αποτυπώνεται από τη παρακάτω **Εικόνα 4**.



Εικόνα 4: Σχεδιάγραμμα Τυπικής Κεντρική Κλιματιστική Μονάδα με ανάμιξη υγρού/νωπού αέρα και αέρα ανακυκλοφορίας [19]

Επιπροσθέτως, μια Κεντρική Κλιματιστική Μονάδα μπορεί να καλύπτει μέρος ή ολόκληρο το φορτίο. Πιο συγκεκριμένα: [21]

- Στην περίπτωση που το κτήριο δεν διαθέτει λοιπές διατάξεις για θέρμανση/ψύξη, τότε η ΚΚΜ καλύπτει ολόκληρα τα φορτία θέρμανσης/ψύξης.
- Στην περίπτωση όπου υπάρχουν και λοιπές θερματικές μονάδες, τότε η ΚΚΜ καλύπτει τα φορτία αερισμού, δηλαδή τα φορτία για την προσαγωγή νωπού αέρα. Όταν η ΚΚΜ καλύπτει μόνο το φορτίο αερισμού, τότε το σύστημα θεωρείται ότι είναι σύστημα προκλιματισμού.

Για ειδικές εφαρμογές όπως νοσοκομεία και βιομηχανίες τροφίμων εφαρμόζονται ειδικές προδιαγραφές όπως ανοξείδωτα τοιχώματα εξωτερικά και εσωτερικά, στρογγυλεμένες γωνίες εσωτερικά και επικλινείς πυθμένες χωρίς αυλακώσεις και εσοχές για αποφυγή επικαθίσεων σκόνης και υγρασίας, ειδικές θυρίδες

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

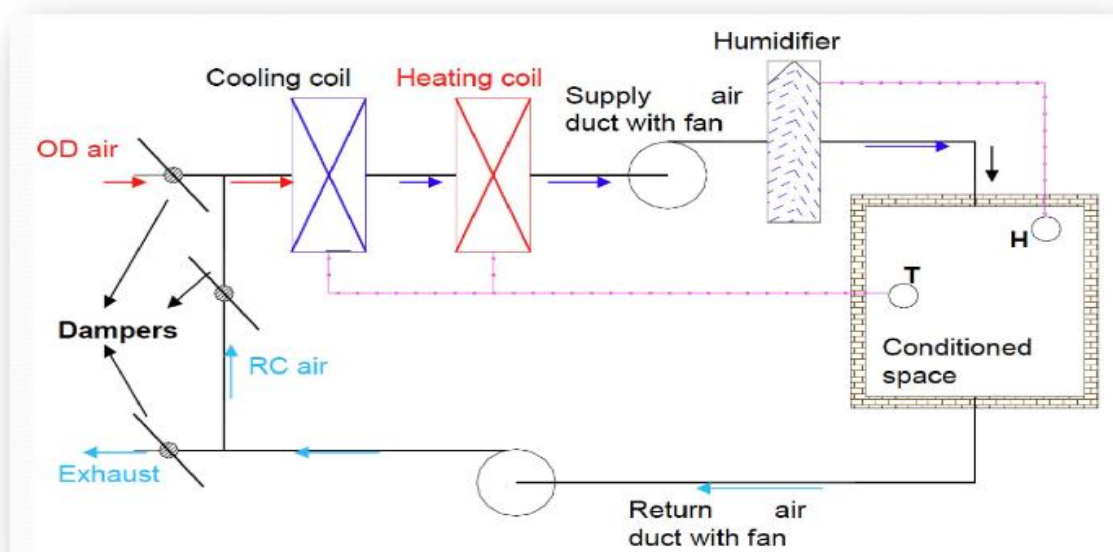
επιθεώρησης φίλτρων, εύκολα προσβάσιμες θυρίδες επίσκεψης κ.ά. σύμφωνα με όλα τα ευρωπαϊκά πρότυπα για στείρους (άσηπτους) χώρους. Η επίτευξη της επιθυμητής παροχής με την παράλληλη εξοικονόμηση ενέργειας επιτυγχάνεται με την επιλογή των κατάλληλων τμημάτων της Κεντρικής Κλιματιστικής Μονάδας (ΚΚΜ) κατά περίπτωση και του βέλτιστου συνδυασμού αυτών. Γι αυτό και η μελέτη της κάθε περίπτωσης πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή και σωστούς υπολογισμούς όλων των παραμέτρων. Λάθη στην μελέτη και στην επιλογή Κεντρικών Κλιματιστικών Μονάδων (ΚΚΜ) ή μη σωστή εφαρμογή των προβλεπόμενων κανόνων και συνθηκών λειτουργίας έχουν σαν συνέπεια το κακό αποτέλεσμα όσον αφορά το μικροκλίμα του χώρου – άρα τίθεται σε κίνδυνο η υγεία των χρηστών του χώρου - αλλά και την σπατάλη ενέργειας σε μόνιμη βάση.

2.6 Κατηγοριοποίηση Συστημάτων Κλιματισμού

Βάση του ρευστού που χρησιμοποιείται, τα συστήματα κλιματισμού χωρίζεται στις εξής κατηγορίες:

➤ Συστήματα κλιματισμού μόνο με χρήση αέρα (All-Air)

Όπως λέει και το όνομα, το εργαζόμενο μέσο σε αυτό το σύστημα είναι ο αέρας. Τα συγκεκριμένα συστήματα παρέχουν κλιματισμό με την βοήθεια του επεξεργασμένου αέρα στους χώρους. Για την υλοποίηση του απαιτείται ένας ουσιαστικός χώρος για να διοχετευθεί ο αέρας σε κάθε κλιματιζόμενη ζώνη (όταν ένα σύστημα έχει σχεδιαστεί για να παρέχει ανεξάρτητο έλεγχο σε διαφορετικούς χώρους, ο κάθε χώρος ξεχωριστά ονομάζεται "ζώνη"). [8]



Εικόνα 5: Τυπικό Σύστημα Κλιματισμού μόνο με χρήση του αέρα (All-Air) [23]

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

Η **Εικόνα 5** διευκρινίζει ένα τυπικό σύστημα All-Air. Περιλαμβάνει τα στόμια προσαγωγής του εξωτερικού αέρα («OD air») και του αέρα ανακυκλοφορίας («RC air»), το θερμαντικό στοιχείο («Heating Coil») και το ψυκτικό στοιχείο («Cooling Coil»), τον υγραντήρα (Humidifier), τον αεραγωγό παροχής αέρα με τον ανεμιστήρα προσαγωγής («Supply air duct with fan») και τον αεραγωγό επιστροφής του αέρα με τον ανεμιστήρα επιστροφής («Return air duct with fan») και το τμήμα εκτόνωσης του αέρα στο περιβάλλον («Exhaust»).[23]

Τα σύστημα κλιματισμού μόνο με αέρα μπορούν να διαχωριστούν με βάση διάφορα κριτήρια όπως: [21]

1) Ανάλογα με το πλήθος των κλιματιζόμενων ζωνών διακρίνονται σε:

- Μονοζωνικά
- Πολυζωνικά

2) Ανάλογα με τον τρόπο ανταπόκρισης στο μεταβαλλόμενο φορτίο διακρίνονται σε:

- Σταθερής παροχής αέρος και μεταβλητής θερμοκρασίας
- Μεταβλητής παροχής αέρος και σταθερής θερμοκρασίας

3) Ανάλογα με την σειρά ή εν παραλλήλω θέρμανση και ψύξη του αέρα, διακρίνονται σε:

- Μονού αγωγού
- Διπλού αγωγού

4) Ανάλογα με τη χρήση του αναθερμαντήρα διακρίνονται σε:

- Συστήματα με αναθέρμανση
- Συστήματα χωρίς αναθέρμανση

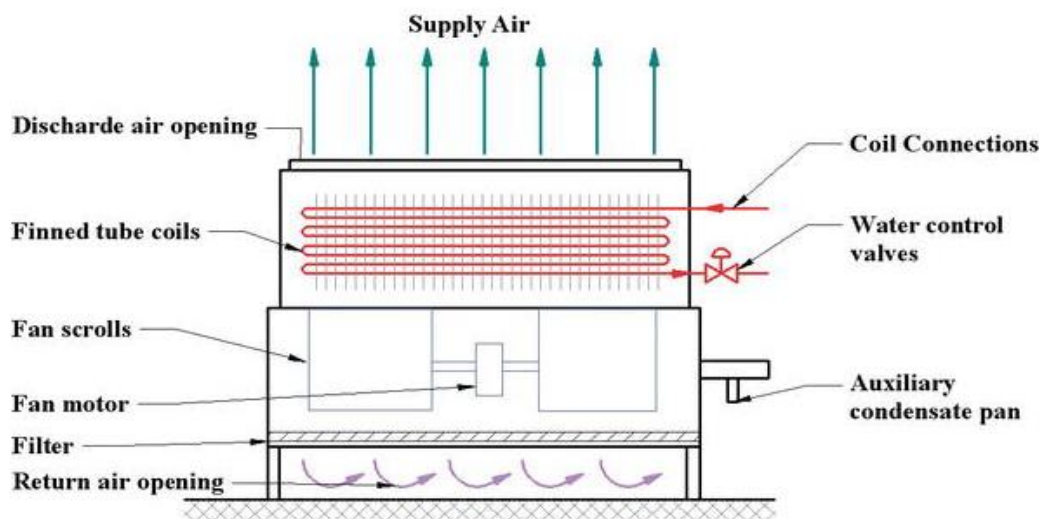
➤ Συστήματα Κλιματισμού μόνο με νερό (All-Water)

Σε ένα σύστημα All-Water, το θερμαινόμενο και το ψυχρό νερό διανέμεται από ένα κεντρικό σύστημα στους θερμαινόμενους χώρους για να παραλαμβάνουν τα αισθητά και λανθάνοντα φορτία του (ένα κεντρικό σύστημα μπορεί να εξυπηρετεί μία ή περισσότερες ζώνες και ο κύριος εξοπλισμός του βρίσκεται έξω από τις εξυπηρετούμενες ζώνες σε κατάλληλη κεντρική τοποθεσία είτε εντός του κτηρίου, είτε πλησίον του κτιρίου). Αυτό το σύστημα θεωρείται συγκριτικά με τα υπόλοιπα σχετικά πιο μικρό επειδή χρησιμοποιεί τους σωλήνες ως μέσο διανομής του νερού (αντί των αεραγωγών), όπου το νερό έχει μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα και πυκνότητα από τον αέρα, το οποίο απαιτεί μικρότερο όγκο για τη μεταφορά της θερμότητας. Το ψυχρό ή θερμό νερό παράγεται σε κεντρικό ψύκτη ή σε κεντρικό σύστημα θέρμανσης (λέβητας) [8][21]

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

Η θέρμανση μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση των ίδιων σωληνώσεων στο ίδιο στοιχείο (σύστημα δύο σωληνών) ή σε ανεξάρτητο στοιχείο με ανεξάρτητες σωληνώσεις (σύστημα τεσσάρων σωληνώσεων). Το σύστημα με τις δύο σωληνώσεις έχει χαμηλότερο κόστος αλλά δεν δίνει την δυνατότητα για ταυτόχρονη χρήση θέρμανσης και ψύξης σε διαφορετικούς χώρους. Επίσης, απαιτεί την εναλλαγή ρύθμισης θερμού-ψυχρού όταν αλλάζει η εποχή.[21]

Το κύριο μέσο που χρησιμοποιείται στα κτήρια για το κλιματισμό ολόκληρου του χώρου είναι η μονάδα ανεμιστήρα-στοιχείου (Fan Coil) Είναι μια πολύ μικρή μονάδα που μπορεί να εγκατασταθεί κατακόρυφα ή οριζόντια. Στα κεντρικά συστήματα, οι μονάδες Fan Coils συνδέονται με τους λέβητες για την παραγωγή θερμότητας και με ψύκτες νερού για την παραγωγή της ψύξης στον κλιματιζόμενο χώρο. Η επιθυμητή θερμοκρασία μιας ζώνης ανιχνεύεται από έναν θερμοστάτη που ελέγχει τη ροή του νερού στις μονάδες Fan Coil. Το κύριο μειονέκτημα τους είναι ότι ο εξαερισμός του χώρου επιτυγχάνεται μόνο εάν οι μονάδες αυτές συνδεθούν με τον εξωτερικό αέρα. Η **Εικόνα 6** δείχνει μια μονάδα Fan Coil σε ένα σύστημα κλιματισμού μόνο με νερό (All-Water). [8]



Εικόνα 6: Μονάδα Fan Coil σε σύστημα μόνο με νερό (All-Water) [8]

➤ Συστήματα κλιματισμού με αέρα και νερό (Air-Water)

Μετά συστήματα αέρα νερού, η παροχή θέρμανσης/ψύξης επιτυγχάνεται με τη παροχή αέρα και νερού στον χώρο. Ο αέρας και το νερό επεξεργάζονται σε κεντρικό σταθμό και από εκεί ξεκινάνε τα κυκλώματα διανομής προς τους χώρους. Χρησιμοποιούνται αεραγωγοί για τον αέρα και σωληνώσεις με τερματικές μονάδες για την αξιοποίηση του νερού. Πιο συγκεκριμένα, αξιοποιούνται μονάδες επαγωγής, τερματικές μονάδες ή πίνακες ακτινοβολίας. Τα συστήματα αέρα νερού είναι κατάλληλα για πολυζωνικά κτήρια με μεταβλητά φορτία και έχουν την ικανότητα να παρέχουν ταυτόχρονα θέρμανση και ψύξη σε διαφορετικούς χώρους, ανάλογα με τις ανάγκες του εκάστοτε χώρου.[21]

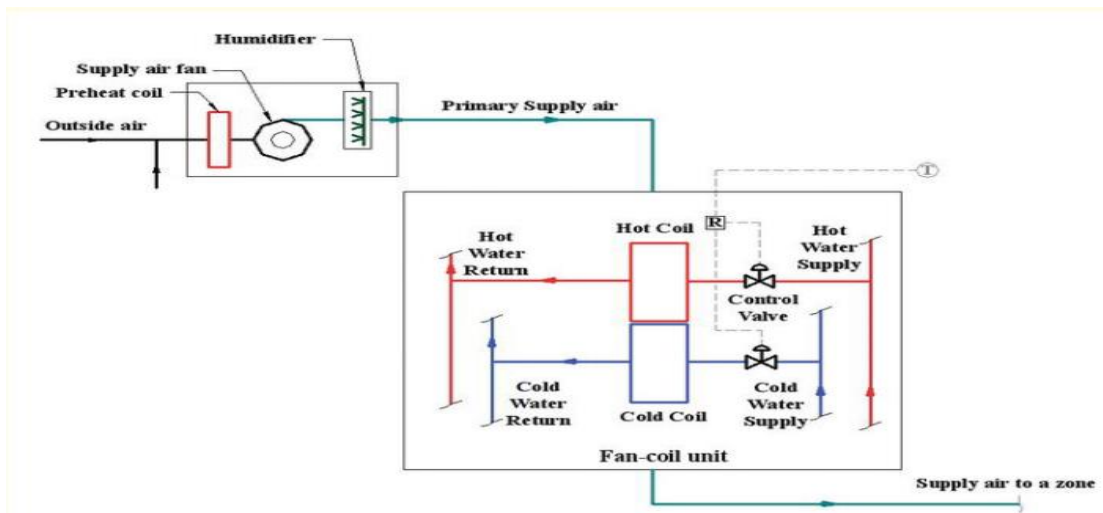
Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

Το τμήμα νερού του συστήματος αποτελείται από την αντλία κυκλοφορίας και το δίκτυο των σωληνώσεων το οποίο επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ της κεντρικής μονάδας και των τερματικών μονάδων. Η τερματική μονάδα μπορεί:

- Να έχει τοπικό θερμαντικό/ψυκτικό στοιχείο ενσωματωμένο στην μονάδα αέρα (π.χ. μονάδα επαγωγής).
- Να είναι εντελώς ανεξάρτητη της μονάδας αέρα (π.χ. πίνακες ακτινοβολίας).
- Να είναι στοιχείο τοπικής κλιματιστικής μονάδας (π.χ. Fan Coil) στην οποία ο αέρας μπορεί να προσάγεται ή όχι.

Το δίκτυο διανομής νερού από τον κεντρικό σταθμό στις τερματικές μονάδες ονομάζεται συνήθως δευτερεύον δίκτυο νερού, σε αντιδιαστολή προς το πρωτεύον. Στο πρωτεύον δίκτυο, το νερό ψύχεται στον ψύκτη (ή θερμαίνεται από μια πηγή θερμότητας) και διέρχεται από το πρωτεύον στοιχείο, το οποίο ψύχει τον πρωτεύοντα αέρα στην κεντρική κλιματιστική συσκευή. Το δευτερεύον δίκτυο διανομής νερού διακρίνεται στις εξής κατηγορίες: [21]

- Σύστημα δύο σωλήνων
- Σύστημα τριών σωλήνων
- Σύστημα τεσσάρων σωλήνων

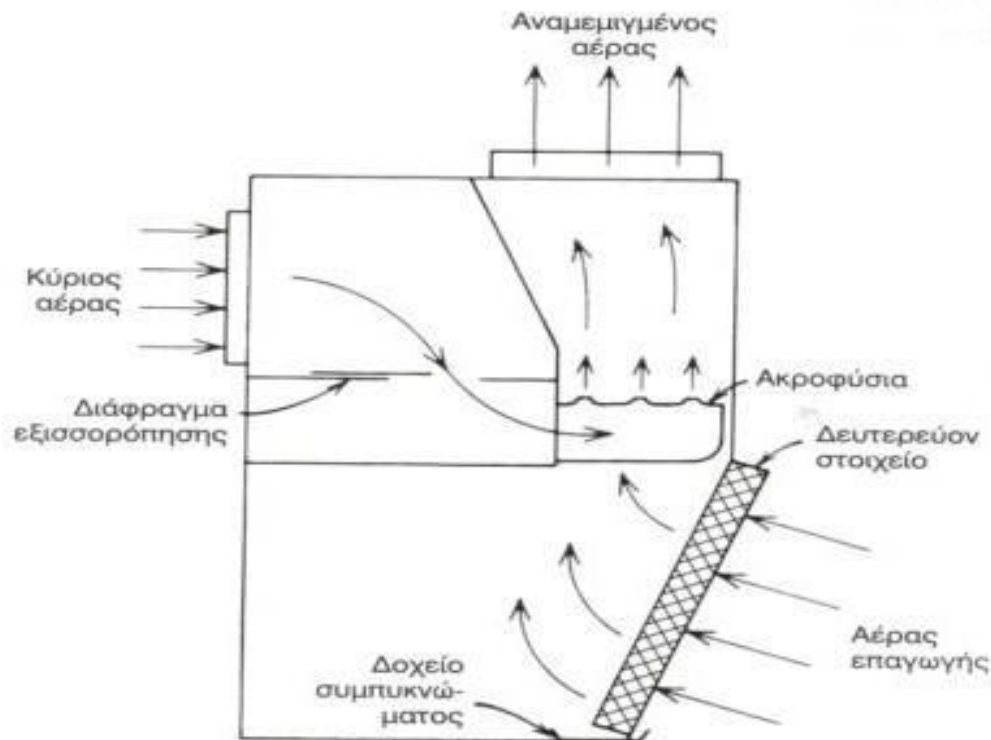


Εικόνα 7: Σύστημα Κλιματισμού με αέρα και νερό (Air-Water) [8]

Η βασική διάταξη του συστήματος αέρα νερού απεικονίζεται στο παραπάνω σχήμα. Ο κεντρικά κλιματιζόμενος πρωταρχικός αέρας παρέχεται στη μονάδα διάχυσης σε υψηλή πίεση. Ο διαχύτης λειτουργεί και ηχοαπορροφητικά για να μείνει μέρος του θορύβου που παράγεται στο σύστημα αγωγών και στη μονάδα. Ένα διάφραγμα εξισορρόπησης χρησιμοποιείται για να καθορίζει την ποσότητα του πρωταρχικού αέρα μέσα σε προκαθορισμένα όρια. Ο αέρας υψηλής πίεσης κυκλοφορεί μέσω των ακροφυσίων απαγωγής και απάγει δευτερεύοντα αέρα από το δωμάτιο επάνω στο δευτερεύον στοιχείο. Αυτός ο δευτερεύον αέρας είτε ψύχεται είτε θερμαίνεται στο στοιχείο ανάλογα με την εποχή, τις απαιτήσεις του δωματίου, ή και τα δύο. Συνήθως υφίσταται λανθάνουσα ψύξη στο στοιχείο του δωματίου, αλλά υπάρχει ένα δοχείο

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

συμπυκνωμάτων που συλλέγει τους συμπυκνωμένους υδρατμούς που προέρχονται από μη συνήθη λανθάνοντα φορτία μικρής διάρκειας ο πρωτεύον και ο δευτερεύον αέρας αναμειγνύονται και προωθούνται στο δωμάτιο. [21]



Εικόνα 8: Βασική διάταξη συστήματος αέρα με νερό [21]

Μονάδα Ανεμιστήρα – Στοιχείου

Η μονάδα κλιματισμού ανεμιστήρα στοιχείου είναι ένα χρήσιμο τερματικό δωματίου που εφαρμόζεται στα συστήματα αέρα νερού και αποκλειστικά νερού. Τα βασικά εξαρτήματα των μονάδων ανεμιστήρα στοιχείου είναι ένας σωληνωτός εναλλάκτης και ένα τμήμα ανεμιστήρα όπως φαίνεται στο σχήμα. Το τμήμα του ανεμιστήρα επανακυκλοφορεί διαρκώς τον αέρα από τον περιμετρικό χώρο προς το στοιχείο, στο οποίο γίνεται παροχή ψυχρού ή ζεστού νερού. Επιπρόσθετα, η μονάδα μπορεί να περιλαμβάνει ένα βοηθητικό θερμαντικό στοιχείο το οποίο είναι συνήθως τύπου ηλεκτρικής αντίστασης αλλά μπορεί και να είναι τύπου ατμού ή ζεστού νερού. Έτσι, ο αέρας ανακυκλοφορίας του δωματίου ψύχεται ή θερμαίνεται. Ο κύριος αέρας που συμπληρώνεται και από τον εξωτερικό για τη διατήρηση της σωστής ποιότητας παρέχεται από ένα ξεχωριστό κεντρικό σύστημα στο ύψος της οροφής. Ο κύριος αέρας θερμαίνεται στη θερμοκρασία δωματίου κατά τη διάρκεια της περιόδου θέρμανσης, ενώ υφίσταται ψύξη και αφύγρανση κατά τη διάρκεια της περιόδου ψύξης. Επίσης η παροχή του μπορεί να διακόπτεται σε περιόδους για λόγους διατήρησης ενέργειας. [21]



Εικόνα 9: Fan Coil Δαπέδου [24]



Εικόνα 10: Fan Coil Οροφής [25]

2.7 Εξαερισμός

Εξορισμού, ο εξαερισμός είναι η διαδικασία αντικατάστασης του μολυσμένου εσωτερικού αέρα με καθαρό εξωτερικό αέρα. Αυτή η διαδικασία μπορεί να είναι τυχαία με τη μορφή της διαρροής του αέρα μέσω των ρωγμών και των ανοιγμάτων του περιβλήματος του κτιρίου ή σκόπιμα παρέχοντας αερισμό με τη μορφή φυσικού, μηχανικού ή συνδυασμού των δύο (υβριδική ή μικτής λειτουργίας).[26]

Οι βασικές επιλογές εξαερισμού είναι οι εξής:

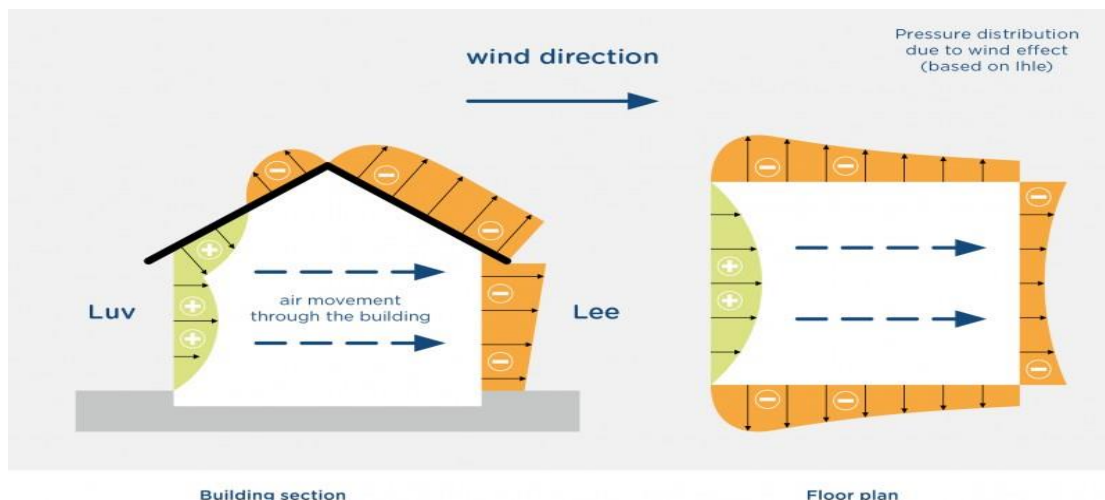
Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

- Φυσικός Εξαερισμός
- Εξαναγκασμένος ή Μηχανικός Εξαερισμός
- Υβριδικός Εξαερισμός

➤ Φυσικός Εξαερισμός

Η φυσική ροή του αέρα μεταξύ του εξωτερικού και του εσωτερικού μιας δομής ονομάζεται φυσικός εξαερισμός. Προκαλείται από 2 φυσικές δυνάμεις, από την διαφορά της πίεσης που δημιουργείται εξαιτίας του ανέμου που πνέει γύρω από το κτήριο και λόγω των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας. Ο φυσικός εξαερισμός ταξινομείται σε 2 βασικές κατηγορίες οι οποίες είναι οι εξής: [27]

- ❖ **Εξαερισμός βάση της κίνησης του ανέμου ή διασταυρούμενος εξαερισμός :** Όταν ένας άνεμος κινείται κοντά σε ένα κτήριο παράγει διαφορετικά τμήματα χαμηλής και υψηλής πίεσης. Το προσήνεμο τμήμα του κτηρίου είναι το τμήμα της υψηλής πίεσης, ενώ το υπήνεμο τμήμα και η οροφή είναι της χαμηλής πίεσης. Τοποθετώντας διαφορετικούς τύπους και διαφορετικά μεγέθη ανοιγμάτων στα τμήματα χαμηλής και υψηλής πίεσης ο άνεμος αναγκάζεται να μεταφερθεί μέσω του κτηρίου με αυξημένο ρυθμό και προς την επιθυμητή ταχύτητα.

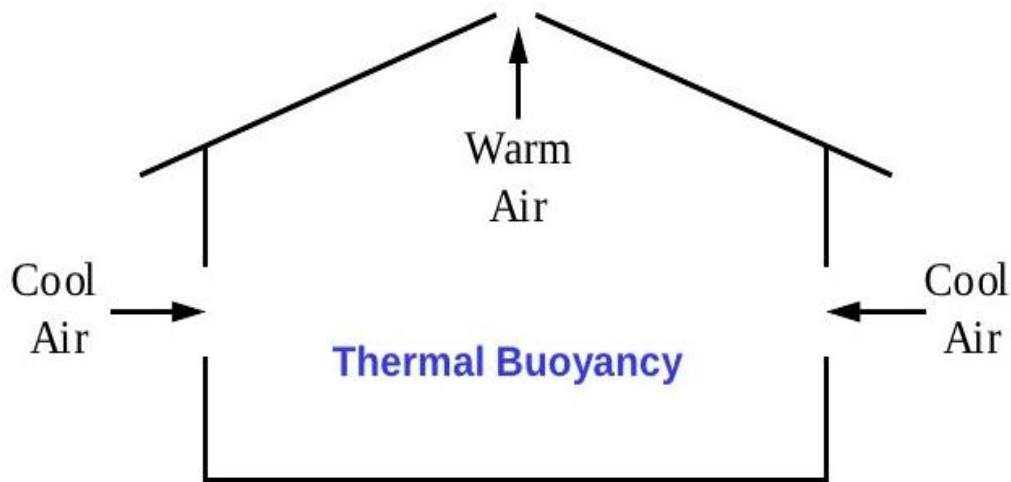


Εικόνα 11: Εξαερισμός βάση της κίνησης του ανέμου [27]

- ❖ **Εξαερισμός βάση της άνωσης :** Η θερμότητα που παράγεται στα κτήρια μεταφέρεται προς την οροφή. Σε μεγάλα κτήρια, όπου η κατασκευή έχει αξιοσημείωτο ύψος, η φυσική τάση του θερμού αέρα να ανέβει προκαλεί την διανομή του αέρα σε ολόκληρο το κτήριο. Ο θερμός αέρας ανεβαίνει μέσα από το κτήριο και εξέρχεται μέσω του φυσικού εξαερισμού. Τα ανοίγματα των τοίχων στο επίπεδο του δαπέδου επιτρέπουν την είσοδο του ψυχρού ρεύματος αέρα, παίρνοντας την θέση του θερμού αέρα που εξέρχεται. Στις βιομηχανικές κατασκευές, οι ψηλές στέγες προκαλούν σημαντικές διαφορές στις πιέσεις και στις θερμοκρασίες. Ως εκ τούτου, οι βιομηχανικοί χώροι είναι ιδανικές τοποθεσίες για τα συστήματα εξαερισμού με την αξιοποίηση της βαρύτητας. Η

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

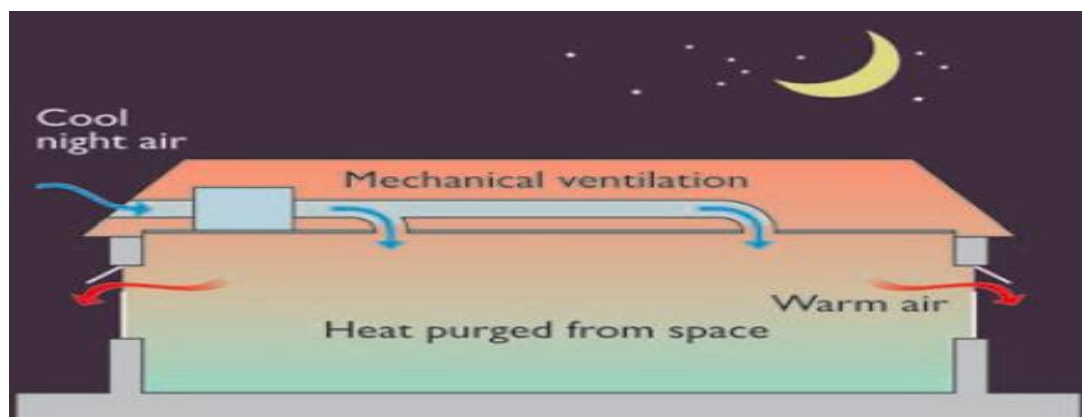
χρήση αυτών των διαφορών μπορεί να μεταφέρει αέρα πάνω και έξω από το κτήριο φυσικά. Η χρήση αυτών των διαφορών μπορεί να μεταφέρει τον αέρα άνω και έξω από το κτήριο με φυσικό τρόπο.



Εικόνα 12: Εξαερισμός βάση της άνωσης [27]

➤ Εξαναγκασμένος ή Μηχανικός Εξαερισμός

Ο εξαναγκασμένος εξαερισμός κατατάσσεται σε ένα σύστημα εξαερισμού των κτηρίων που χρησιμοποιεί ανεμιστήρες, φυσητήρες και διάφορα άλλα εξαρτήματα για να παρέχει φρέσκο αέρα σε χώρους όταν οι φυσικές δυνάμεις της πίεσης του αέρα και της βαρύτητας δεν επαρκούν για την κυκλοφορία του αέρα μέσα σε ένα κτήριο. Ο μηχανικός εξαερισμός αξιοποιείται για τον έλεγχο της Ποιότητας Εσωτερικού Αέρα. Η υγρασία, οι οσμές και οι ρύποι μπορούν συχνά να ελεγχθούν μέσω της αραίωσης ή της αντικατάστασης με τον εξωτερικό αέρα. [28]



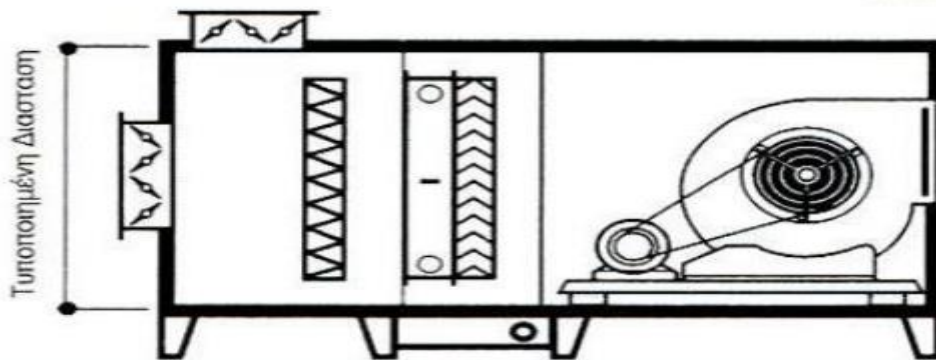
Εικόνα 13: Σύστημα εξαναγκασμένου ή μηχανικού εξαερισμού [30]

Για εμπορικούς ή βιομηχανικούς χώρους, ο μηχανικός εξαερισμός συνήθως γίνεται από τις Κεντρικές Κλιματιστικές Μονάδες(AHU), όπου συνδέονται με αγωγούς που

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

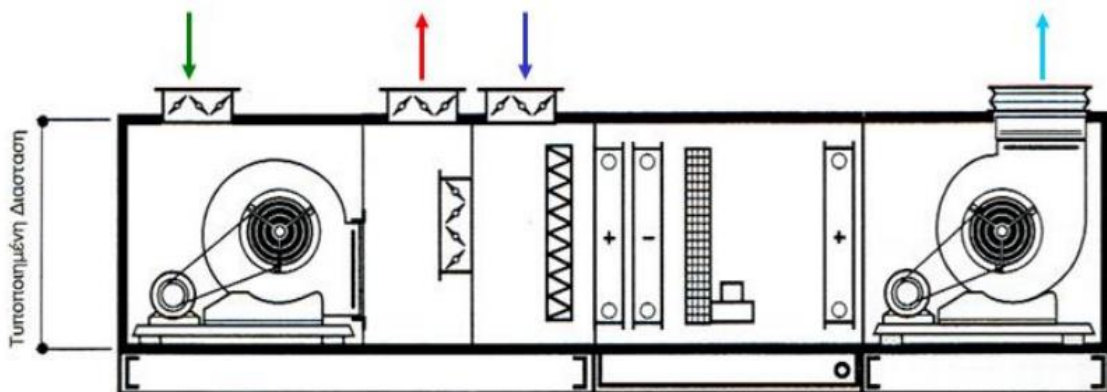
βρίσκονται εντός του κτιρίου, όπου τροφοδοτούν με νωπό αέρα τους εσωτερικούς χώρους και εξάγουν τον αέρα από αυτούς. [29]

Όταν ο νωπός αέρας που απαιτείται είναι μέχρι 10% του αέρα ανακυκλοφορίας, η απόρριψη του αέρα από τους χώρους του κτιρίου γίνεται με τοπικούς εξαεριστήρες ή μέσα από τους αρμούς των παραθύρων. Σε αυτή την περίπτωση τα δοχεία ανάμιξης είναι εφοδιασμένα με στόμια ανακυκλοφορίας του αέρα και με στόμια εισαγωγής νωπού αέρα. Η κεντρική κλιματιστική μονάδα έχει μόνο ανεμιστήρα προσαγωγής. [20]



Εικόνα 14: Κεντρική Κλιματιστική μονάδα με 10% παροχή νωπού αέρα [20]

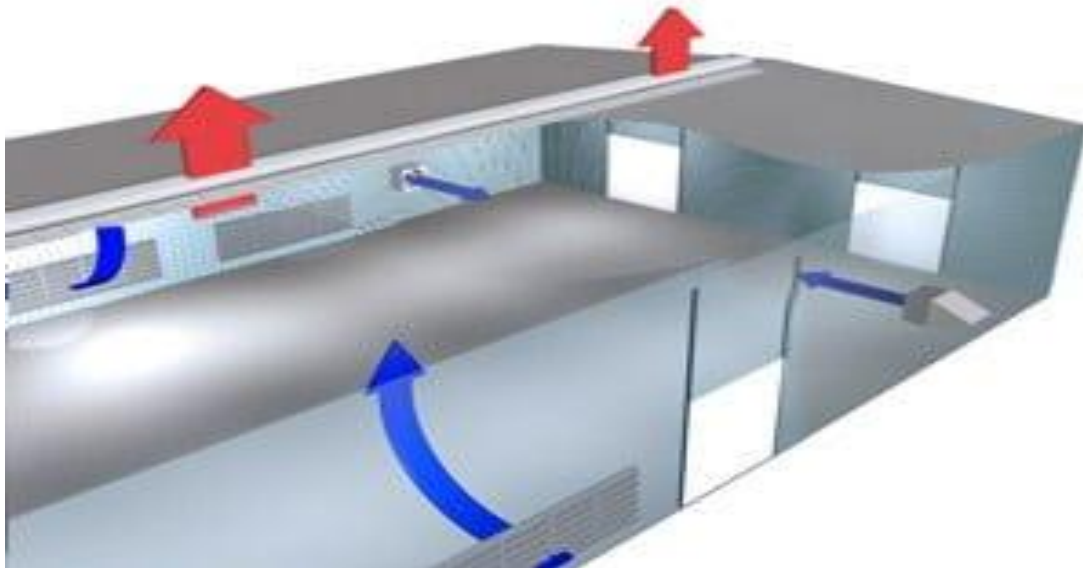
Σε περίπτωση που απαιτείται μεγαλύτερο ποσοστό νωπού αέρα (10% έως 100% του αέρα ανακυκλοφορίας) η απόρριψη του αέρα γίνεται μέσα από την κεντρική μονάδα κλιματισμού. Στην περίπτωση αυτή τα δοχεία ανάμιξης είναι εφοδιασμένα με στόμιο ανακυκλοφορίας του αέρα, με στόμιο απόρριψης του αέρα και με στόμιο εισαγωγής νωπού αέρα (με κατάλληλο συνδυασμό διαφραγμάτων). Σε αυτή την περίπτωση, η κεντρική κλιματιστική μονάδα έχει ανεμιστήρα προσαγωγής και ανεμιστήρα επιστροφής του αέρα. [20]



Εικόνα 15: Κεντρική Κλιματιστική Μονάδα με παροχή νωπού αέρα μεγαλύτερη από 10% [20]

➤ **Υβριδικός εξαερισμός**

Τα υβριδικά συστήματα εξαερισμού μπορούν να περιγραφούν ως συστήματα που παρέχουν ένα άνετο εσωτερικό περιβάλλον χρησιμοποιώντας και τον φυσικό εξαερισμό και τον εξαναγκασμένο, με την διαφορά ότι αυτά τα δύο συστήματα χρησιμοποιούνται με διαφορετικά χαρακτηριστικά σε διαφορετικές χρονικές στιγμές την ημέρα ή την εποχή του χρόνου. Στον υβριδικό εξαερισμό, οι μηχανικές και φυσικές δυνάμεις συνδυάζονται σε ένα σύστημα δύο μορφών λειτουργίας όπου η κάθε μορφή λειτουργίας ποικίλλει ανάλογα με την εποχή και εντός των μεμονωμένων ημερών. Η κύρια διαφορά μεταξύ ενός συμβατικού συστήματος εξαερισμού και ενός υβριδικού συστήματος είναι το γεγονός ότι ο υβριδικός εξαερισμός διαθέτει ένα έξυπνο σύστημα ελέγχου που μπορεί να εναλλάσσεται αυτόματα μεταξύ της φυσικής και της μηχανικής λειτουργίας του συστήματος με στόχο την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης της ενέργειας.[11] Επίσης, τα υβριδικά συστήματα εξαερισμού χρησιμοποιούν «μίξη αέρα» αντί για ανάκτηση θερμότητας για να εξασφαλίσουν ότι ο αέρας εισόδου παρέχεται σε άνετη θερμοκρασία. Ο αέρας εξαγωγής αναμιγνύεται με τον εξωτερικό αέρα πριν επιστρέψει στον χώρο. Αυτό μειώνει την ανάγκη θέρμανσης του εισερχόμενου αέρα, αλλά ανακυκλώνει ένα μέρος του αέρα πίσω στους εσωτερικούς χώρους. [10]



Εικόνα 16: Μηχανισμός υβριδικού εξαερισμού [32]

3. Μηχανισμοί Μετάδοσης του COVID-19

Η εμφάνιση του COVID-19 είχε εμφανίσει τεράστιες επιπτώσεις τόσο σε κοινωνικό όσο και σε οικονομικό επίπεδο. Ο ιός του COVID-19, ονομάστηκε κορονοϊός της Γιουχάν, και αυτό διότι εμφανίστηκε στην Κίνα, στην πόλη της Γιουχάν. [33] Στις 31 Δεκεμβρίου 2019, οι δημόσιες αρχές υγείας της Κίνας ενημέρωσαν τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (ΠΟΥ) για πολλές περιπτώσεις πνευμονίας άγνωστης αιτιολογίας στην πόλη Γιουχάν, της επαρχίας Hubei, στην κεντρική Κίνα. Από τις 30 Ιανουαρίου επιβεβαιώθηκαν 7.736 κρούσματα και 12.167 ύποπτα κρούσματα είχαν αναφερθεί στην Κίνα, ενώ 82 επιβεβαιωμένες περιπτώσεις είχαν εντοπιστεί σε 18 άλλες χώρες. Την ίδια ημέρα, ο ΠΟΥ κήρυξε την έκρηξη του SARS-CoV-2 ως έκτακτη ανάγκη διεθνούς ανησυχίας για τη δημόσια υγεία. [34]



Εικόνα 17: Αντιπροσωπευτική εικόνα του COVID-19 [35]

Όσον αφορά την Ελλάδα, μετά την επιβεβαίωση των τριών πρώτων κρουσμάτων, σταδιακά επιβλήθηκαν μέτρα αναστολής εκδηλώσεων, αρχικά σε τοπικό επίπεδο στις πληττόμενες περιοχές (ιδιαίτερα Ηλεία, Αχαΐα και Ζάκυνθο). Ωστόσο, εντός του Μαρτίου, λόγω της εμφάνισης κρουσμάτων του ιού σε διάφορες περιοχές της χώρας, αποφασίστηκε το πανελλαδικό κλείσιμο όλων των εκπαιδευτικών δομών και σταδιακά καταστημάτων εστίασης, εμπορικών καταστημάτων και χώρων λατρείας. Τα πρώτα έκτακτα μέτρα για την αντιμετώπιση της πανδημίας ξεκίνησαν στις 28 Φεβρουαρίου σε τοπικό επίπεδο στις πληγείσες περιοχές και κατέληξαν σε περιορισμό μετακινήσεων σε εθνικό επίπεδο στις 23 Μαρτίου. [36]

Η πανδημία αποτέλεσε ένα εξωγενές σοκ, προκάλεσε μια οικονομική δυσφορία σε ολόκληρη την κοινωνία αλλά και στη ίδια την οικονομία, η οποία είχε ανάγκη από μια σειρά μέτρων ως προς την περαιτέρω ενίσχυση της. Έτσι και η οικονομία της Ελλάδας προκειμένου να διαχειριστεί την πρωτόγνωρη αυτή κατάσταση και να μπορέσει να ανταπεξέλθει στις ανάγκες μιας δυναμικής οικονομίας θέσπισε κάποια μέτρα ως προς την πυροδότηση της και την αντιστάθμιση των περιοριστικών μέτρων για την Δημόσια Υγεία. [36]

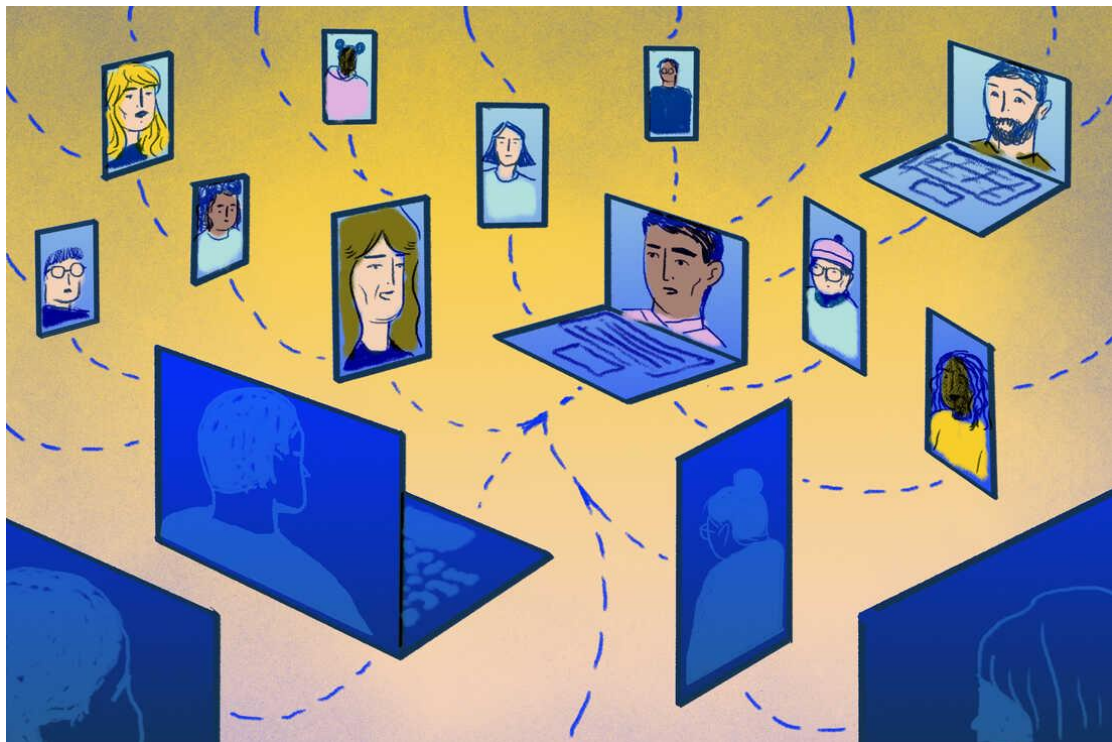
Η Διεθνής Ένωση Πανεπιστημίων που λειτουργεί υπό την αιγίδα της UNESCO είχε πραγματοποιήσει μια γενικού περιεχομένου έρευνα σε σχέση με τις επιπτώσεις της

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

πανδημίας στην ανώτατη εκπαίδευση. Όπως είχε προκύψει από στοιχεία της, την 1η Απριλίου 2020 είχαν κλείσει τα σχολεία και τα ανώτατα εκπαιδευτικά ιδρύματα σε 185 χώρες επηρεάζοντας κατ' αυτό τον τρόπο 1.5 δισεκατομμύριο μαθητές/σπουδαστές, το οποίο αποτελεί το 89.4% των συνολικά εμπλεκόμενων στην εκπαιδευτική διαδικασία παγκοσμίως.[37]

Η έρευνα είχε καλύψει την Ευρώπη, την Αφρική, την Αμερική (Βόρεια & Λατινική Αμερική, Καραϊβική) και την Ασία (χώρες της Νοτιοανατολικής Ασίας, Κίνα, Ινδία, Ινδονησία, Πακιστάν). Στην προαναφερόμενη έρευνα ανταποκρίθηκαν 424 πανεπιστήμια από 109 χώρες. [37]

Σε όλα σχεδόν τα ΑΕΙ, η πανδημία επηρέασε τη διδασκαλία και μάθηση, με τα δύο τρίτα των συμμετεχόντων να αναφέρουν ότι η διδασκαλία στην τάξη αντικαταστάθηκε από τη διδασκαλία & μάθηση από απόσταση. Η στροφή από την πρόσωπο με πρόσωπο διδασκαλία στην εξ αποστάσεως διδασκαλία δεν έγινε χωρίς προκλήσεις, η κυριότερη από αυτές να αφορά την πρόσβαση σε τεχνολογικές υποδομές και τις ικανότητες που αυτές προϋποθέτουν από τους εμπλεκόμενους. [37]



Εικόνα 18: Εικόνα της επίδρασης του COVID-19 στην διδασκαλία και την μάθηση [38]

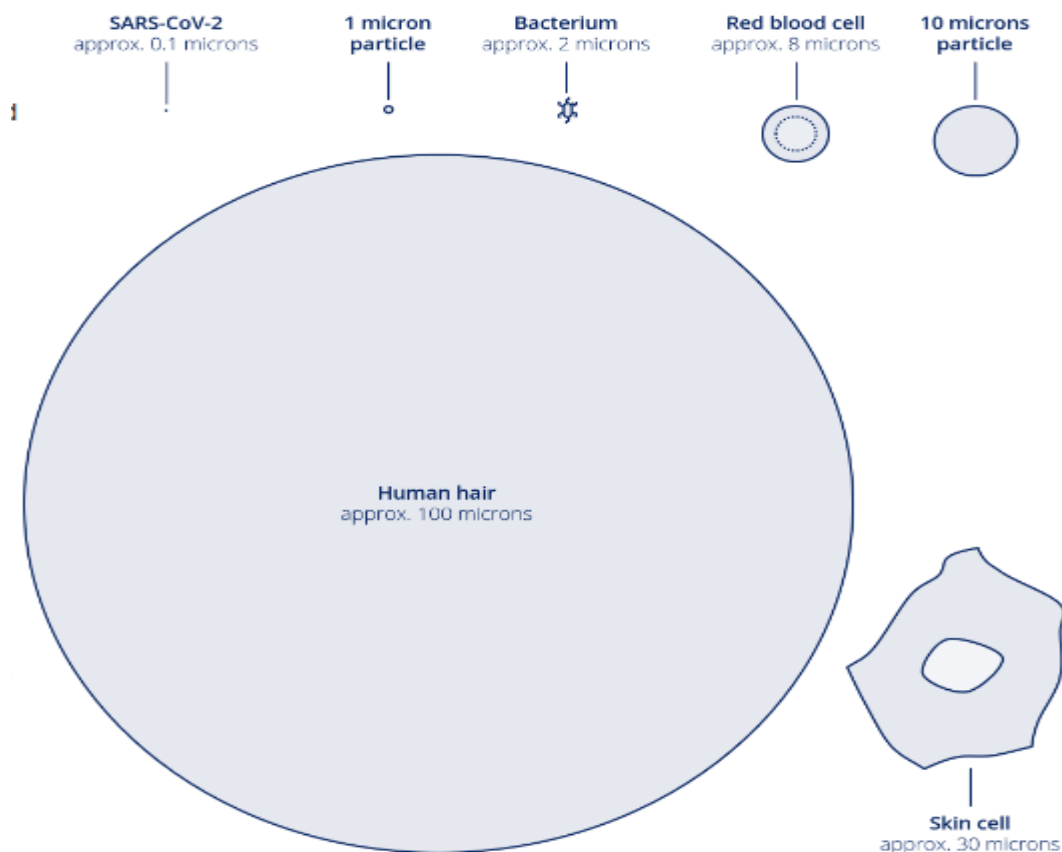
3.1 Βασικές Αρχές Μετάδοσης του COVID-19

Μια λοίμωξη του αναπνευστικού μπορεί να μεταδοθεί μέσω της άμεσης επαφής με επιφάνειες μολυσμένες από αναπνευστικά σταγονίδια, με την εισπνοή των αερομεταφερόμενων αναπνευστικών σταγονιδίων ή με την μετάδοση από την στοματική οδό.[4] Σύμφωνα με τα στοιχεία του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

(ΠΟΥ), οι αναπνευστικές λοιμώξεις μπορούν να μεταδοθούν μέσω σταγονιδίων διαφορετικών μεγεθών: όταν τα σωματίδια των σταγονιδίων έχουν διάμετρο >5-10 μm αναφέρονται ως αναπνευστικά σταγονίδια («respiratory droplets») και όταν έχουν διάμετρο <5 μm , αναφέρονται ως πυρήνες των σταγονιδίων («droplets nuclei»). [39]

Έρευνες έχουν δείξει ότι η διάμετρος ενός σωματιδίου SARS-COV-2 κυμαίνεται στα 0,1 μm . Ωστόσο, ο ιός δεν ταξιδεύει από μόνος του μέσα του αέρα, εφόσον, ο ιός αυτός είναι παγιδευμένος σε αναπνευστικά σταγονίδια και σε πυρήνες σταγονιδίων, όπου σε αυτήν την περίπτωση το μέγεθος του είναι κυρίως ίσο και μεγαλύτερο από 1 μm . [40]



Εικόνα 19: Το μέγεθος του COVID-19 [40]

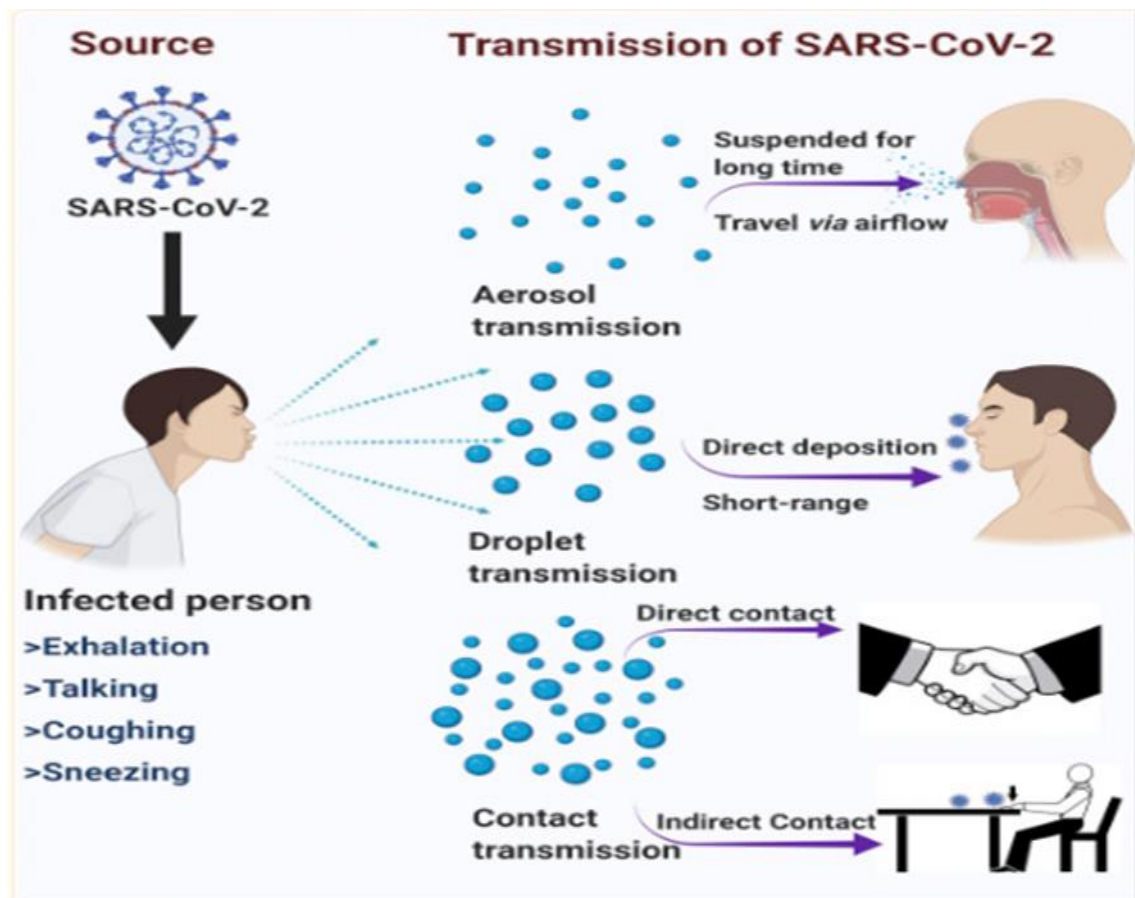
Οι κύριοι μηχανισμοί εξάπλωσης του COVID-19 είναι:

- **Μετάδοση μέσω της επαφής και των σταγονιδίων:** Η μετάδοση του SARS-COV-2 μπορεί να δημιουργηθεί μέσω της άμεσης ή της έμμεσης ή της στενής επαφής με τα μολυσμένα άτομα μέσω των μολυσμένων εκκρίσεων όπως το σάλιο και των αναπνευστικών εκκρίσεων ή των σταγονιδίων τους, τα οποία αποβάλλονται όταν ένα μολυσμένο άτομο βήχει, φτερνίζεται ή μιλάει. Η μετάδοση των αναπνευστικών σταγονιδίων (ή σταγονίδια του αναπνευστικού) μπορεί να συμβεί όταν ένα άτομο βρίσκεται σε στενή επαφή (εντός 1 m) με ένα μολυσμένο άτομο που έχει ορισμένα αναπνευστικά συμπτώματα (π.χ. βήχας ή φτέρνισμα) ή που μιλάει ή τραγουδά. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα αναπνευστικά σταγονίδια

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

τα οποία περιλαμβάνουν κάποιον ιό μπορούν να φτάσουν στο στόμα, τη μύτη ή τα μάτια ενός ευαίσθητου ατόμου και μπορεί να οδηγήσουν σε καταστάσεις μόλυνσης. Επίσης, θεωρείται δυνατή η μετάδοση μέσω της έμμεσης επαφής που περιλαμβάνει την επαφή ενός ευαίσθητου ξενιστή με ένα μολυσμένο αντικείμενο ή κάποια μολυσμένη επιφάνεια. [41]

- **Αερογενής μετάδοση:** Η αερογενής μετάδοση διαφέρει από τη παραπάνω μορφή μετάδοσης. Ορίζεται ως η εξάπλωση ενός μολυσματικού παράγοντα που προκαλείται από την μετάδοση των πυρήνων των σταγονιδίων (αεροζόλ) που παραμένουν μολυσματικές όταν αιωρούνται στον αέρα σε μεγάλη εμβέλεια και σε αρκετό χρονικό διάστημα.[41]



Εικόνα 20: Οι κύριοι μηχανισμοί εξάπλωσης του COVID-19 [2]

Ο Πίνακας 2 επισυνάπτει τις λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τη μετάδοση των σταγονιδίων και των αερολυμάτων που δημιουργούνται από τις ανθρώπινες εκπνευστικές δραστηριότητες.

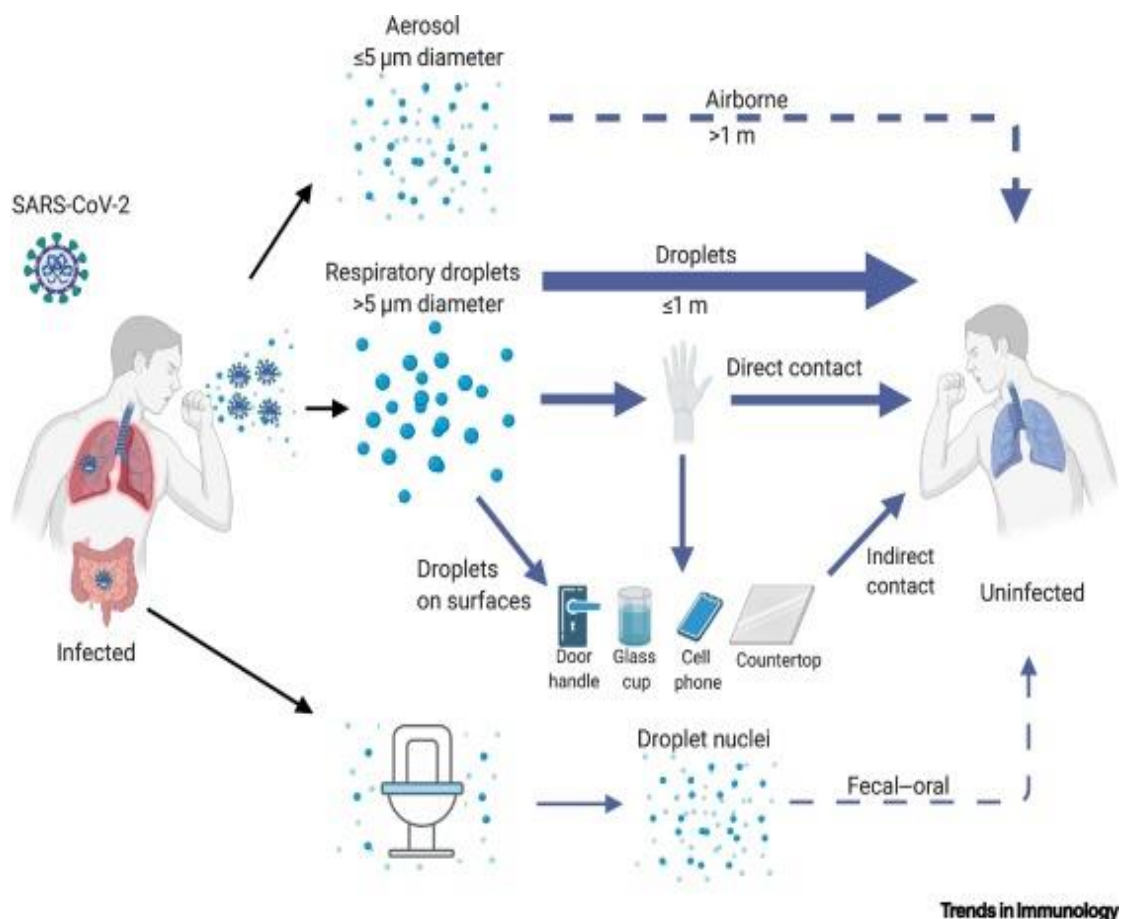
Δραστηριότητα	Ποσότητα σταγονιδίων και αερολυμάτων	Διάμετρος σταγονιδίων και αερολυμάτων	«Jet Velocity»
Φυσιολογική Αναπνοή	10.000	μικρότερη από 1μm	-
Ομιλία	-	μεγαλύτερη από	3,1 m/s

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

		60μm	
Απλός Βήχας	1000 σε 100.000	από 0,5 έως 30μm	11,7 m/s
Απλό Φτέρνισμα	40.000 σε 2.000.000	από 0,5 έως 16μm	100 m/s

Πίνακας 2: Πληροφορίες σχετικά με τα σταγονίδια και τα αερολύματα [2]

Επιπροσθέτως, δεν έχουν αναφερθεί περιπτώσεις μόλυνσης από τον COVID-19 λόγω της μετάδοσης μέσω των κοπράνων («face-oral») και ο ΠΟΥ δηλώνει ότι ο κίνδυνος μετάδοσης του COVID-19 από αυτήν είναι χαμηλός. Αυτή αναφέρεται στη διαδικασία κατά την οποία μια ασθένεια μεταδίδεται μέσω των μολυσματικών σταγονιδίων που εκκρίνονται από τα κόπρανα ενός μολυσμένου ατόμου, στη στοματική κοιλότητα ενός ευπαθή ατόμου. Αυτή η μετάδοση μπορεί να συμβεί μέσω των αδυναμιών στα συστήματα υγιεινής που οδηγούν στην έκθεση της μόλυνσης μέσω διαφόρων οδών, όπως τη τροφή, το νερό, τα χέρια, τις μύγες, τα άψυχα αντικείμενα ή τις επιφάνειες. Ωστόσο, τα ανθρώπινα απόβλητα είναι επικίνδυνα και μπορούν να περιέχουν πολυάριθμα παθογόνα, επομένως θα πρέπει να διαχειρίζονται με ασφάλεια. [42]



Εικόνα 21: Κύριοι μηχανισμοί εξάπλωσης του SARS-COV-2 [43]

3.2 Αερογενής μετάδοση

Παρόλο που σημαντικοί φορείς της δημόσιας υγείας, συμπεριλαμβανομένου και του ΠΟΥ, υποστηρίζουν πως ο πιο βασικός τρόπος μετάδοσης είναι μέσω της επαφής και των σταγονιδίων, η αερογενής ή αερομεταφερόμενη μετάδοση δεν έχει αναγνωριστεί ευρέως ως μια επικίνδυνη μορφή μετάδοσης των ιών. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη τις τελευταίες ενδείξεις για την παρουσία του SARS-CoV-2, η αερογενής μετάδοση θα πρέπει επίσης να αναγνωριστεί ως ένας σημαντικός τρόπος μετάδοσης του SARS-CoV-2. [44] Η κατανόηση των ιδιοτήτων των αερολυμάτων θεωρείται καταλύτης για την κατανόηση της αερογενής μετάδοσης του COVID-19. [2]

Η αερομεταφερόμενη μετάδοση του SARS-CoV-2 έχει σημαντικό ρόλο στη διασπορά του ιού στους κλειστούς χώρους, σύμφωνα με τους ερευνητές. Σχετικές μελέτες έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα πως ενώ η πιθανότητα της ύπαρξης της αερομεταφερόμενης μετάδοσης σε εξωτερικούς χώρους είναι εξαιρετικά χαμηλή, στους εσωτερικούς χώρους, και ειδικά σε εκείνους με υψηλή συγκέντρωση ατόμων, ακόμη και η χρήση της μάσκας του προσώπου προσφέρει περιορισμένη προστασία. [45]

«Η έρευνα για τις αερομεταφερόμενες ασθένειες πριν από την τρέχουσα πανδημία είχε επικεντρωθεί κυρίως σε “βίαια” φαινόμενα εκπνοής, όπως το φτάρνισμα και ο βήχας. Λιγότερη προσοχή είχε δοθεί στη μετάδοση αερολύματος (aerosol), αλλά υπάρχουν σημαντικοί λόγοι να υποψιαζόμαστε, ότι αυτός ο τρόπος μετάδοσης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην υψηλή μεταδοτικότητα της covid-19», ανέφερε ο Κωνσταντίνος Σιούτας, καθηγητής στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος και κάτοχος της έδρας Fred Champion στο Πανεπιστήμιο της Νότιας Καλιφόρνιας (USC), σε διαδικτυακή διάλεξη με θέμα «Ο Covid-19 από τη σκοπιά της επιστήμης των «aerosol», που έδωσε κατόπιν πρόσκλησης της Πολυτεχνικής Σχολής του ΑΠΘ. [45]

Τα αερολύματα είναι γενικά πολύ-διασπαρμένα σταγονίδια και σωματίδια τα οποία έχουν πολλά διαφορετικά μεγέθη. [46] Οι σύγχρονοι ερευνητές χρησιμοποιούν γενικά τη φράση «πυρήνες σταγονιδίων» για να αναφερθούν στα σταγονίδια των αναπνευστικών αερολυμάτων με αεροδυναμική διάμετρο <5 μm. Σήμερα, ορισμένες έρευνες αναφέρουν πως τα αναπνευστικά σταγονίδια με το συγκεκριμένο μέγεθος (<5μm) μπορούν να αποκαλούνται και αερολύματα.

Οι ερευνητές Song Tang κ.α. έθεσαν τα δικά τους κριτήρια, τα οποία αναφέρουν πως η μετάδοση του COVID-19 μέσω των αερολυμάτων είναι εύλογη όταν: [46]

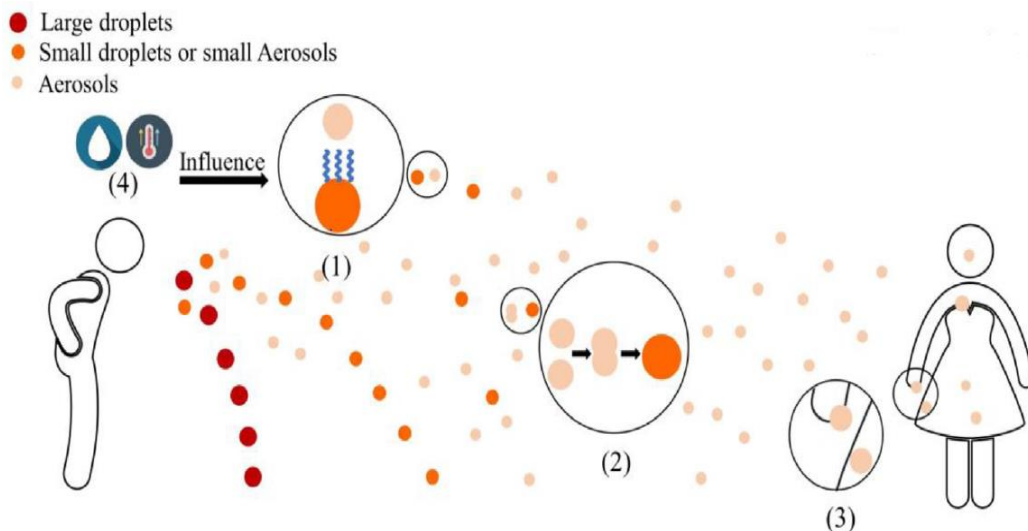
- 1) τα αερολύματα που περιέχουν το ιικό φορτίο παράγονται από κάποιο μολυσματικό άτομο
- 2) ο ιός παραμένει βιώσιμος και μολυσματικός στα αερολύματα για κάποιο χρονικό διάστημα

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

Τα αερολύματα μεταδίδονται στον αέρα μέσω της διαδικασίας της εξάτμισης, της αλληλεπίδρασης τους με άλλα σταγονίδια και της εναπόθεσης («deposition») στις επιφάνειες των αντικειμένων. Σύμφωνα με τα ευρήματα των Wandong Zheng κ.α.: [2]

- ❖ Η **εξάτμιση** μπορεί να επηρεάσει τη διάρκεια ζωής ενός αερολύματος μεταβάλλοντας το μέγεθός του. Τα μεγάλα αερολύματα καθιζάνουν γρήγορα από τη βαρύτητα, ενώ τα μικρά αερολύματα μπορούν να αιωρούνται στον αέρα για αρκετές ώρες. Η εξάτμιση των σταγονιδίων σχετίζεται κυρίως με την περιβαλλοντική σχετική υγρασία. Τα σταγονίδια που απελευθερώνονται από την αναπνευστική οδό επιταχύνουν την εξάτμιση σε περιβάλλοντα που χαρακτηρίζονται από χαμηλή σχετική υγρασία (< 40%) και υψηλή θερμοκρασία. Η εξάτμιση μπορεί να οδηγήσει σε ταχεία μείωση του μεγέθους των σωματιδίων, γεγονός που προκαλεί τη διασπορά περισσότερων σταγονιδίων στον αέρα ως αερολύματα, αυξάνοντας την εξάπλωση και τη μακροζωία των ιών.
- ❖ Η διάρκεια ζωής των αερολυμάτων που έρχονται σε επαφή με ένα αντικείμενο είναι διαφορετική από αυτή των αερολυμάτων που επιπλέουν στον αέρα. Ο χρόνος ζωής ενός αερολύματος αυξάνεται ή μειώνεται σημαντικά όταν είναι προσαρτημένο σε ένα αντικείμενο, και αυτό εξαρτάται κυρίως από τη φύση του αντικειμένου.

Με άλλα λόγια, οι παράγοντες που επηρεάζουν την μετάδοση των αερολυμάτων, όπως απεικονίζει και η **Εικόνα 22**, είναι: (1) Εξάτμιση, (2) Αλληλεπίδραση με άλλα σταγονίδια, (3) Με εναπόθεση στην επιφάνεια των αντικειμένων, (4) Με την επίδραση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας. [2]



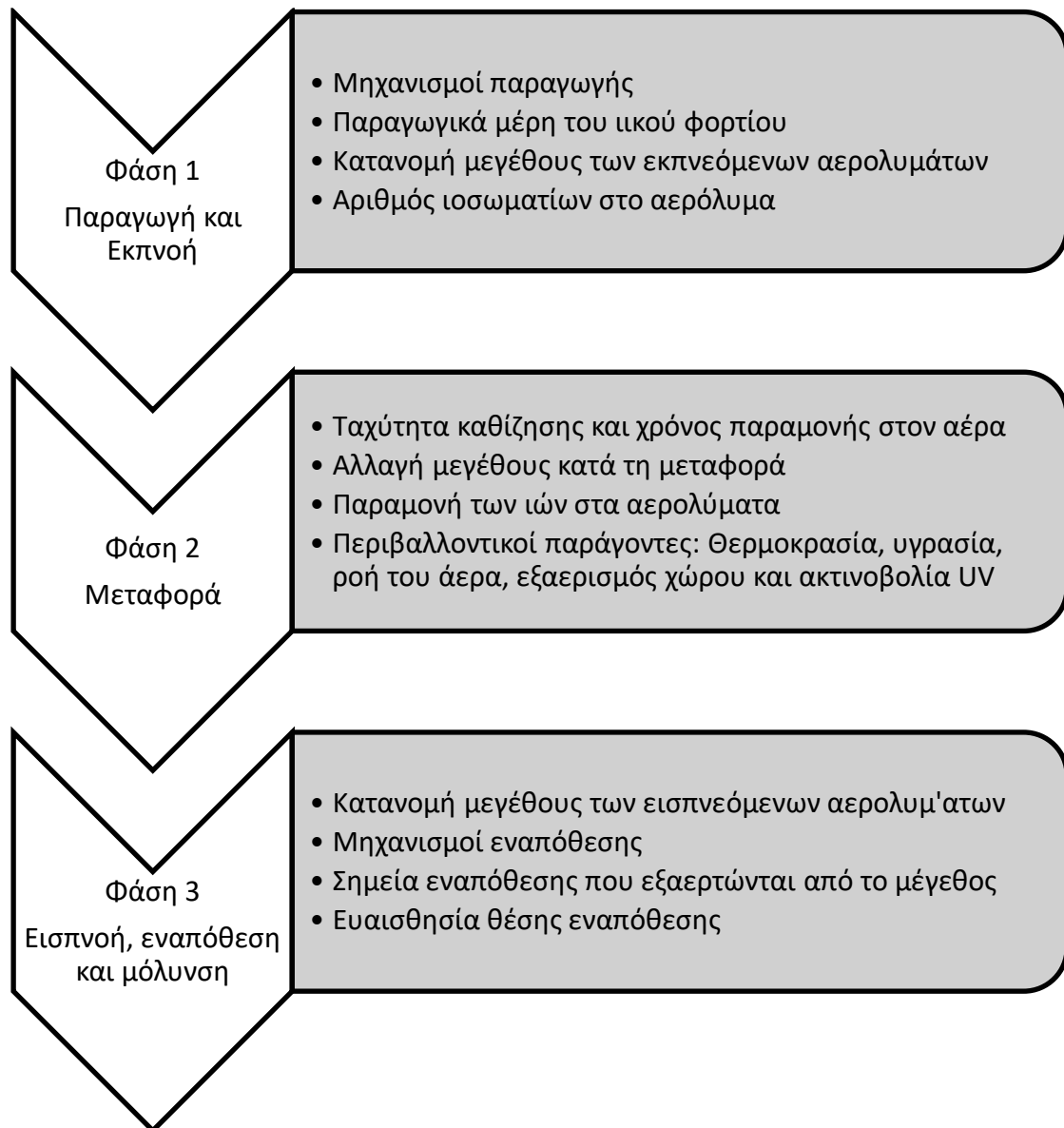
Εικόνα 22: Παράγοντες που επηρεάζουν την αερογενή μετάδοση του ιού [2]

Επομένως, για να δημιουργηθούν οι αποτελεσματικές οδηγίες για την προστασία ενός ατόμου από την αερομεταφερόμενη μετάδοση, είναι σημαντικό να κατανοηθούν καλύτερα οι εμπλεκόμενοι μηχανισμοί μετάδοσης. Για να συμβεί η μετάδοση μέσω του αέρα, πρέπει να παράγονται τα αερολύματα, να μεταφέρονται

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

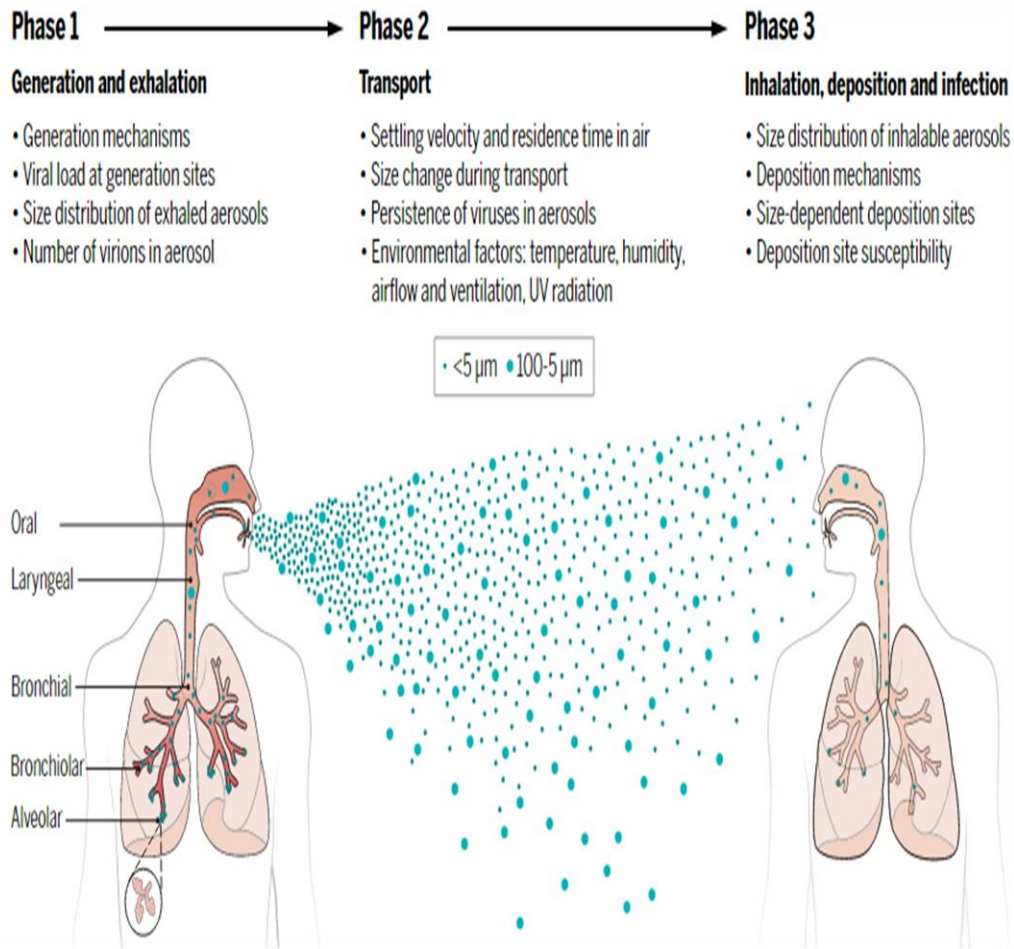
μέσω του αέρα, να εισπνέονται από έναν ευαίσθητο ξενιστή και να εναποτίθενται στην αναπνευστική οδό του μολυσμένου ατόμου ώστε ξεκινήσει η μόλυνση. Ο ιός προσπαθεί να διατηρήσει τη μολυσματικότητα του σε όλες αυτές τις διαδικασίες.

Το **Γράφημα 1** και η **Εικόνα 23** αναφέρει συνοπτικά τις φάσεις που εμπλέκονται στην αερομεταφερόμενη μετάδοση των αερολυμάτων φορτωμένων με τον ιό. Οι φάσεις αυτές περιλαμβάνουν: [47]



Γράφημα 1: Οι φάσεις της αερομεταφερόμενης μετάδοσης των αερολυμάτων [47]

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19



Εικόνα 23: Τα στάδια με τα οποία αναπτύσσεται η αερομεταφερόμενη μετάδοση [47]

Δεδομένου της παρουσίας των αυξανόμενων ενδείξεων ότι το SARS CoV-2 έχει την δυνατότητα να μεταδίδεται μέσω του αέρα και ότι ο ιός σε μικρά σωματίδια αερολύματος μπορεί να επιβιώσει στον αέρα για ώρες, είναι σημαντικό να μελετηθεί ο αερομεταφερόμενος μηχανισμός της μετάδοσης του.[39] Έπειτα από μια μακρά και έντονη συζήτηση, ο ΠΟΥ δήλωσε πως ότι η αερομεταφερόμενη διαδρομή είναι ένας σημαντικός τρόπος μετάδοσης του ιού. Υπάρχει ακόμα η συζήτηση για την διαφορά στον ορισμό του σταγονιδίου και του αερολύματος. Παρόλα αυτά, είναι πλέον ευρέως αποδεκτό πως η μετάδοση των αερολυμάτων παίζει σημαντικό ρόλο σε αυτήν την πανδημία. Έχει γίνει μια συλλογική έκκληση για τον έλεγχο των αναπνευστικών λοιμώξεων στους εσωτερικούς χώρους μέσω του εξαερισμού και των μηχανικών ελέγχων και επομένως στο μέλλον, ο σχεδιασμός των κτηρίων θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη την εξάπλωση των αερολυμάτων. Εάν η μετάδοση των αεροζόλ ελέγχεται με τις βέλτιστες προσεγγίσεις, τότε η πανδημία θα μπορούσε να ελαχιστοποιηθεί ουσιαστικά.[48]

Επομένως, ο ρόλος των συστημάτων HVAC παίζει καθοριστικό ρόλο στη διάδοση, στην πρόληψη και στον έλεγχο του COVID-19. Στο επόμενο κεφάλαιο αναφέρονται οι πιο κρίσιμες στρατηγικές λειτουργίας των HVAC συστημάτων οι οποίες επιδρούν σημαντικά στην μετάδοση του ιού.

4. Η Επίδραση των Συστημάτων HVAC στην Εξάπλωση του COVID-19

Η καταπολέμηση της εξάπλωσης του COVID-19 πραγματοποιείται με τις παρακάτω μεθόδους: [2]

- **Άμεση Εξάλειψη:** Φυσική αφαίρεση των παθογόνων μικροοργανισμών
- **Μηχανικοί Έλεγχοι:** Διαχωρισμός των ανθρώπων με τους παθογόνους μικροοργανισμούς
- **Υποκατάσταση:** Επιβολή οδηγιών στους ανθρώπους
- **Μέτρα Ατομικής Προστασίας:** Χρήση μάσκας, γαντιών κλπ



Γράφημα 2: Μέθοδοι διαχείρισης των λοιμώξεων [1]

Τα συστήματα HVAC ανήκουν στην κατηγορία των Μηχανικών Ελέγχων. Ο πρωταρχικός ρόλος των συστημάτων HVAC είναι να διατηρούν την θερμική άνεση ενός χώρου, όπου οι βασικοί παράγοντες για την επικράτηση της είναι η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και ο κλιματισμός ενός χώρου. Επειδή πολλά συστήματα HVAC μετακινούν τον αέρα και μαζί και ορισμένες μολυσματικές ασθένειες οι οποίες θεωρούνται ως αερομεταφερόμενες, υπάρχει ενδιαφέρον για το εάν τα συστήματα αυτά μπορούν να παίξουν ρόλο στη διαχείριση της μετάδοσης των ιών.[49][50] Η θέρμανση, ο εξαερισμός και ο κλιματισμός (HVAC), επομένως, διαδραματίζουν έναν κρίσιμο ρόλο στην ελαχιστοποίηση του κινδύνου μετάδοσης του COVID-19, επομένως, οι στρατηγικές λειτουργίας των συστημάτων HVAC μπορούν να μειώσουν την αερομεταφερόμενη διασπορά του ιού. [49]

Υπάρχουν αρκετοί μέθοδοι για τη βελτίωση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα με τη αξιοποίηση των λειτουργιών των συστημάτων HVAC, καθεμία με διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Οι ερευνητές Guo κ.α. συνόψισαν και συνέκριναν τις οδηγίες για την δραστηριότητα των HVAC λειτουργιών κατά τη διάρκεια της πανδημίας πάνω στο κομμάτι των κτηρίων σε ένα εύρος χωρών και με βάση την έρευνα τους, κατέληξαν στα εξής αποτελέσματα:[5]

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

- 1) την αύξηση της παροχής του εξωτερικού αέρα,
- 2) την αύξηση των περιόδων λειτουργιών των συστημάτων HVAC για την απολύμανση των εσωτερικών χώρων από τους μολυσματικούς ιούς
- 3) τη αναβάθμιση της διήθησης του αέρα ανακυκλοφορίας.

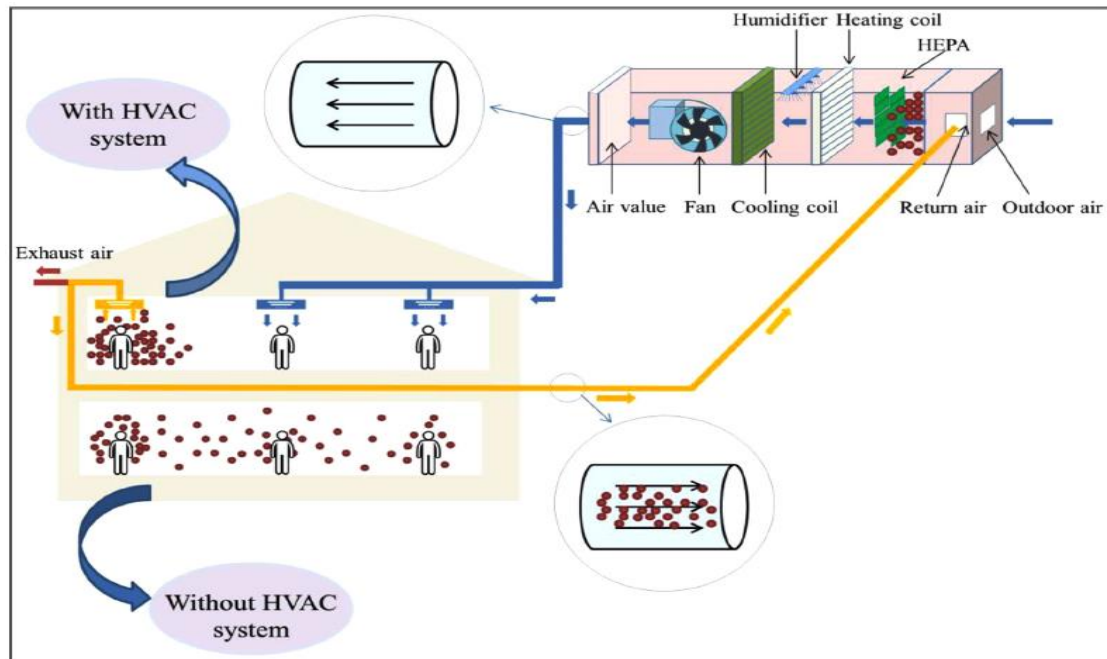
Αυξάνοντας την παροχή του εξωτερικού δίνεται η δυνατότητα να περιοριστεί η συγκέντρωση του ιού στους εσωτερικούς χώρους χωρίς να την ανάγκη της αγοράς και της συντήρησης νέου εξοπλισμού καθώς και χωρίς την αύξηση της πτώσης πίεσης στις Κεντρικές Κλιματιστικές Μονάδες (ΚΚΜ). Ωστόσο, αυτή η αλλαγή μπορεί να αυξήσει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας για τις ανάγκες σε θέρμανση ή ψύξη, όταν η θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος διαφέρει αρκετά από το σημείο ρύθμισης της θερμοκρασίας του εσωτερικού χώρου. Σε αντίθεση με την βελτίωση του ρυθμού του εξαερισμού, η βελτίωση της διήθησης του ανακυκλούμενου αέρα (όπως με την αναβάθμιση των φίλτρων MERV 13) μπορεί να μειώσει τη συγκέντρωση του ιού χωρίς να αυξήσει την κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση ή ψύξη. [5][50] Παρ' όλα αυτά, η αντίσταση της ροής του αέρα που προκαλείται από τα φίλτρα των συστημάτων HVAC έχουν την τάση να αυξάνουν την στατική πτώση πίεσης μέσω των ΚΚΜ, γεγονός που θα μπορούσε να διεγείρει την καταναλισκόμενη ενέργεια των ανεμιστήρων ή/και να μειώσει την παροχή του αέρα προσαγωγής στο σύστημα. Επιπλέον, υπάρχουν σχετικές οικονομικές δαπάνες για την αγορά και την εγκατάσταση των φίλτρων αυτών, καθώς και για την αντικατάσταση τους αφού συσσωρεύουν σωματίδια με την πάροδο του χρόνου.[5]

Τα συστήματα HVAC προϋπήρχαν προτού εμφανιστεί η πανδημία του COVID-19. Ο πρωταρχικός του στόχος ήταν και είναι φυσικά να επιφέρουν την θερμική άνεση και τη βελτιωμένη Ποιότητα Εσωτερικού Αέρα στους εσωτερικούς χώρους των κτηρίων αντιμετωπίζοντας τα ψυκτικά φορτία και τις θερμικές απώλειες, όπως επίσης απομακρύνοντας τους μολυσματικούς παράγοντες (CO₂ και αιωρούμενα σωματίδια). Με την εμφάνιση του SARS-COV-2, τα συστήματα HVAC λειτουργούν και για να περιορίζουν την μετάδοση του ιού. [2]

Σύμφωνα με την άντληση στοιχείων από διάφορα επιστημονικά άρθρα, οι πιο διαδεδομένες τεχνολογίες αντιμετώπισης της εξάπλωσης του SARS-COV-2 σε ένα εσωτερικό περιβάλλον είναι οι εξής: [1][5][4][51]

- Εξαερισμός
- Διήθηση του αέρα με τη χρήση των HVAC φίλτρων
- Αποφυγή της ανακυκλοφορίας του αέρα
- UVGI (Ultraviolet Germicidal Irradiation)
- Διαχείριση λειτουργίας των συστημάτων HVAC
- Έλεγχος της θερμοκρασίας και της υγρασίας

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19



Εικόνα 24: Η επίδραση των συστημάτων HVAC στην πρόληψη και στον έλεγχο του COVID-19 [2]

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθούν οι προαναφερόμενες λύσεις που βοηθούν στην μείωση ή/και στην καταπολέμηση της μετάδοσης του SARS-COV-2, με μεγαλύτερο επίκεντρο στις δύο πιο σημαντικές στρατηγικές, οι οποίες είναι η βελτίωση του ρυθμού εξαέρωσης και η διήθηση του αέρα στους εσωτερικούς χώρους.

4.1 Εξαερισμός

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο εξαερισμός θεωρείται η διαδικασία παροχής του εξωτερικού αέρα σε έναν χώρο ή σε ένα κτήριο με φυσικά ή μηχανικά μέσα. Ελέγχει το πόσο γρήγορα αφαιρείται ο αέρας ενός δωματίου και αντικαθίσταται με καθαρό για κάποιο χρονικό διάστημα. Οι τεχνολογίες του εξαερισμού χωρίζονται κυρίως σε 3 βασικές κατηγορίες, οι οποίες είναι ο φυσικός, ο μηχανικός ή εξαναγκασμένος εξαερισμός και ο υβριδικός εξαερισμός.

Μια σημαντική προσέγγιση για τη μείωση των συγκεντρώσεων των μολυσματικών σωματιδίων ή των ρύπων του εσωτερικού αέρα (σκόνη, αμίαντος, μονοξείδιου του άνθρακα κλπ.) συμπεριλαμβανομένων τυχόν ιών που μπορεί να υπάρχουν στον αέρα, είναι να αυξηθεί ο εξαερισμός. Η διασφάλιση της κατάλληλης μονάδας εξαερισμού με την αξιοποίηση του εξωτερικού αέρα μπορεί να βοηθήσει στη μείωση της συγκέντρωσης των ατμοσφαιρικών ρύπων, συμπεριλαμβανομένων των ιών, στους εσωτερικούς χώρους. Ο σωστός εξαερισμός ελαχιστοποιεί επίσης τη μόλυνση των επιφανειών αφαιρώντας ορισμένα σωματίδια του ιού προτού πέσουν από τον αέρα και προσκολληθούν στις επιφάνειες. [52]



Εικόνα 25: Σύστημα εξαερισμού σε εσωτερικό χώρο

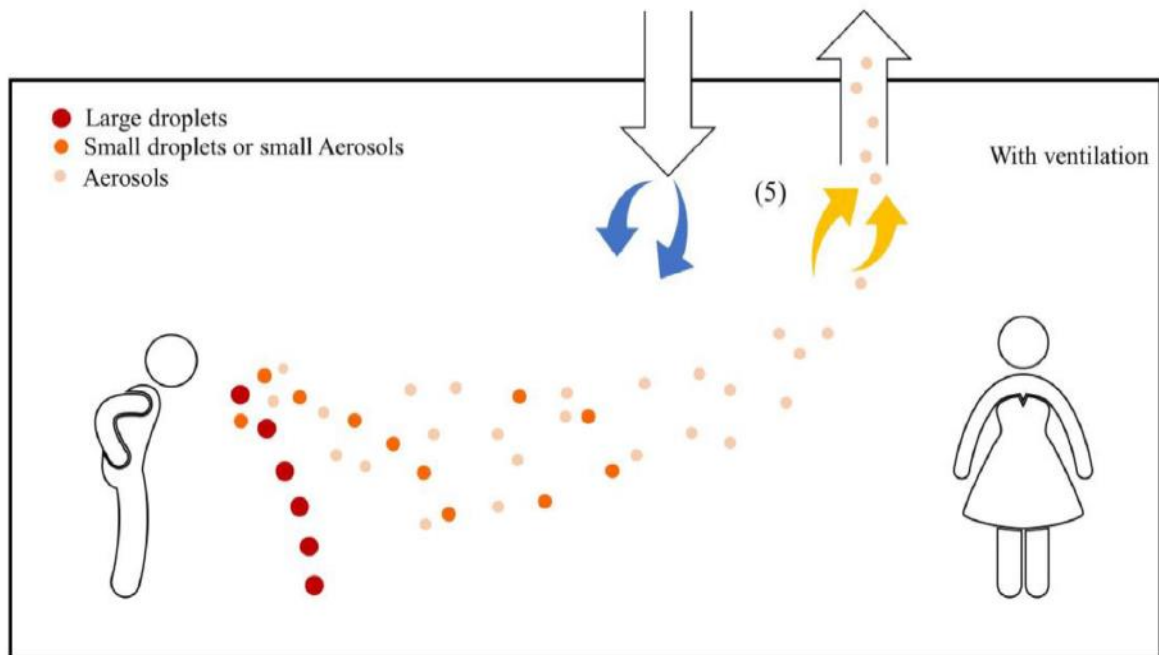
Η αναβάθμιση της παροχής του εξωτερικού αέρα βοηθάει στην μείωση της μετάδοσης του COVID-19, διότι με τον ανεπαρκή εξαερισμό παρουσιάζονται φαινόμενα αύξησης της συγκέντρωσης των μολυσματικών αερολυμάτων, με την ταυτόχρονη παραμονή τους σε έναν εσωτερικό χώρο για αρκετό χρονικό διάστημα ώστε να θεωρηθεί επικίνδυνη η μετάδοση του COVID-19. [53]

Όπως δείχνει η **Εικόνα 26**, τα συστήματα εξαερισμού παίζουν σημαντικό ρόλο στην μετάδοση των αερολυμάτων, διότι με την κατάλληλη εισαγωγή του εξωτερικού αέρα μπορεί να μεταβληθεί η ροή της διάδοσης και της συγκέντρωσης των αερολυμάτων και να ελαττωθεί ο αριθμός των μολύνσεων. Ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα του εξαερισμού μπορεί να διακόψει την μετάδοση της μολυσμένης ροής του ιού σε άλλες κατειλημμένες περιοχές και μπορεί να αραιώσει τη συγκέντρωση του για να μετριάσει τους κινδύνους της μόλυνσης, ενώ ένα κακώς σχεδιασμένο σύστημα παροχής του αέρα μπορεί να επιδεινώσει την εξάπλωση του. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο να μελετηθεί ο μηχανισμός του εξαερισμού για τον έλεγχο της αερομεταφερόμενης μετάδοσης των ιών.[2]

Διάφοροι επαγγελματικοί οργανισμοί από όλο τον κόσμο έχουν παρουσιάσει τις δικές τους εθνικές κατευθυντήριες γραμμές που στοχεύουν στην καταπολέμηση της εξάπλωσης του COVID-19 στα δημόσια κτίρια. Η Αμερικάνικη Εταιρία Μηχανικών Θέρμανσης, Ψύξης και Κλιματισμού ή αλλιώς ASHRAE προτείνει: [4]

1. την αύξηση της παροχής του εξωτερικού αέρα στα κτήρια και
2. το άνοιγμα των στομιών που εισάγουν εξωτερικού αέρα, έως και στο 100%, αν αυτό είναι εφικτό

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19



Εικόνα 26: Επίδραση συστήματος εξαερισμού στην μετάδοση των αερολυμάτων [2]

Με απλά λόγια, η ASHRAE προτείνει ότι η παροχή του όγκου του εξωτερικού αέρα πρέπει να βελτιστοποιηθεί τόσο όσο γίνεται για κάθε σύστημα HVAC. Σε ήπιες μόνο καιρικές συνθήκες, συνιστάται το άνοιγμα των εξωτερικών στομιών του αέρα έως και στο 100%. Εάν η αύξηση του εξαερισμού είναι αδύνατη ή μη πρακτική, ο περιορισμός του αριθμού των ατόμων στο κτίριο είναι μια εφικτή λύση για την βελτίωση του αποτελεσματικού εξαερισμού.

Η Ομοσπονδία Θέρμανσης, Εξαερισμού και Κλιματισμού της Ευρώπης ή αλλιώς REHVA και η Εταιρεία Μηχανικών Θέρμανσης, Κλιματισμού και Υγιεινής της Ιαπωνίας ή αλλιώς SHASE συμβουλεύουν: [4]

1. την παροχή όσο το δυνατόν περισσότερου εξωτερικού αέρα και αν δύναται την αλλαγή των τερματικών συσκευών σε 100% εξωτερικό αέρα και
2. το τακτικό άνοιγμα των κουφωμάτων. Ειδικότερα, η SHASE συνιστά να ανοίγονται τα εξωτερικά παράθυρα για να εισάγεται ο εξωτερικός αέρας ακόμα και αν τα συστήματα εξαερισμού είναι ενεργοποιημένα, διασφαλίζοντας παράλληλα την θερμική άνεση χωρίς την κατανάλωση του ρεύματος, επειδή το 95% του εσωτερικού αέρα θα αντικατασταθεί όταν ο εξωτερικός αέρας είναι τριπλάσιος του όγκου του δωματίου.

Τέλος, η Κίνα συμβουλεύει : [4]

1. την παροχή όσο το δυνατόν περισσότερου εξωτερικού αέρα και αν δύναται την αλλαγή των τερματικών συσκευών σε 100% εξωτερικό αέρα και
2. τη ρύθμιση του κιβωτίου μίξης ώστε το ποσοστό εισαγωγής του νωπού αέρα να είναι το 40% του αέρα ανακυκλοφορίας.

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

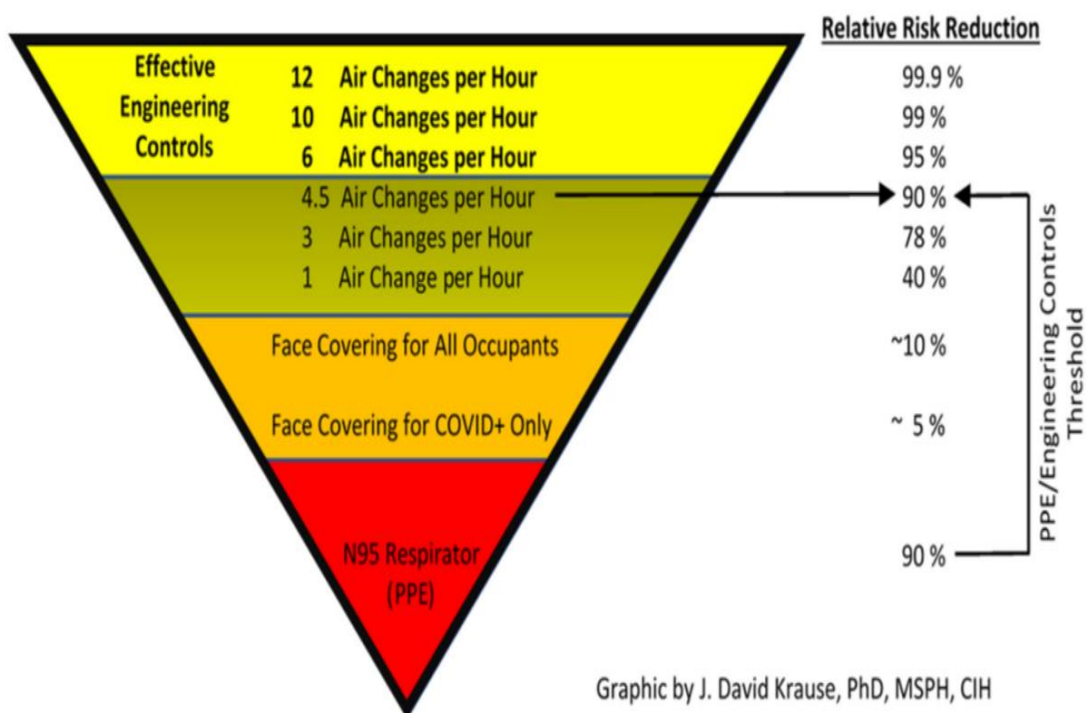
Οι Nima Izadyar κ.α. σύνταξαν ένα ερευνητικό άρθρο που αφορά τις στρατηγικές εξαερισμού και τις επιπτώσεις του σχεδιασμού στην αερογενή μετάδοση στους εσωτερικούς χώρους των κλινικών και μη κλινικών περιβαλλόντων. Συγκεκριμένα, στο άρθρο αυτό έχουν συλλέξει πληροφορίες από διάφορους ερευνητές και έχουν αποτυπώσει τα πιο βασικά συμπεράσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητα των πιο σημαντικών τύπων εξαερισμού των κτηρίων, δηλαδή του φυσικού, του εξαναγκασμένου και του μικτού, κατά την εξάπλωση του SARS-COV-2. Σύμφωνα με το άρθρο τους επισημαίνεται ότι οι στρατηγικές του μηχανικού εξαερισμού θα πρέπει να συνδέονται με την κατάλληλη παραμετροποίηση (δηλαδή, την ταχύτητα του παρεχόμενου αέρα και τη θέση εισαγωγής και εξαγωγής του αέρα) για τον έλεγχο της μετάδοσης αναπνευστικών σωματιδίων φορτωμένων με ιούς και την ελαχιστοποίηση των μολύνσεων. Επίσης, προσθέτει πως η αξιοποίηση των φίλτρων στα εξαναγκασμένα συστήματα εξαερισμού έχει προσελκύσει πρόσφατα την προσοχή των ερευνητών ως μια αποτελεσματική στρατηγική για τη μείωση της αερομεταφερόμενης εξάπλωσης και ότι χρησιμοποιώντας τα συστήματα διήθησης του αέρα και τα συστήματα της παροχής του εξωτερικού αέρα, διακρίνεται ως η πιο αποτελεσματική στρατηγική αφαίρεσης της συγκέντρωσης των αερολυμάτων κατά 90%, ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων του ιού. [1]

Μια εμπειρική διερεύνηση των επιπτώσεων του δείκτη ACH στη συγκέντρωση των σωματιδίων του ιού αποκάλυψε ότι οι επιπτώσεις του θα πρέπει να διερευνάται σε σχέση με το υπάρχον μέγεθος των σωματιδίων.[1] Οι εναλλαγές του αέρα ανά ώρα (ACH) είναι μια μέτρηση που χρησιμοποιείται στην ανάλυση του εξαερισμού ενός κτιρίου. Στο πιο βασικό επίπεδο, είναι ο ρυθμός εναλλαγής του αέρα ανά ώρα για έναν όγκο ελέγχου αέρα. Η **Εικόνα 27** δείχνει ένα αντιπροσωπευτικό σχεδιάγραμμα της αύξησης του δείκτη ACH, ο οποίος συνιστάται ιδιαίτερα για τη μείωση των κινδύνων μετάδοσης των ιών και του COVID-19 [54] Στη συγκεκριμένη ανασκόπηση αποδεικνύεται ότι η κλιμάκωση του δείκτη ACH οδηγεί στη χαμηλότερη συγκέντρωση των μικρών σωματιδίων ενώ έχει μικρές επιπτώσεις στα μεγαλύτερα σωματίδια λόγω των επιφανειακών εναποθέσεων. Αυτό το εύρημα υποστηρίζεται βιβλιογραφικά, με τα αποτελέσματα να δείχνουν ότι η αύξηση του ρυθμού εξαερισμού μείωσε τη συγκέντρωση των μικρών σωματιδίων και δεν μείωσε τη συγκέντρωση των μεγαλύτερων σωματιδίων. Αν και ο δείκτης ACH είναι μια κρίσιμη παράμετρος που παρέχει καθαρό αέρα και αραιώνει τον μολυσμένο αέρα, δεν είναι η μόνη σημαντική παράμετρος. Τα συστήματα με μηχανικό εξαερισμό θα πρέπει να σχεδιάζονται λαμβάνοντας υπόψη τον ρυθμό εξαερισμού, το πρότυπο ροής του αέρα, την ποσότητα εισαγωγής και εξαγωγής του αέρα και τη θέση για τον έλεγχο της αερογενούς μετάδοσης.[1]

Όσον αφορά τον φυσικό εξαερισμό, ο ΠΟΥ συνέστησε σθεναρά αυτόν τον τύπο εξαερισμού για την μείωση των κινδύνων μόλυνσης. Ωστόσο, αν και ο φυσικός εξαερισμός έχει αναγνωριστεί ως μια πολύτιμη στρατηγική για την αφαίρεση των

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

αερολυμάτων, δεν εφαρμόζεται συνήθως σε κλινικά και εμπορικά περιβάλλοντα, δηλαδή σε μεγάλης κλίμακας κτηρίων, λόγω της ύπαρξης ορισμένων μειονεκτημάτων, όπως της ασυνεπής ροής του αέρα, των μεγάλων συγκεντρώσεων των σωματιδίων, του ασταθού ρυθμού αερισμού και της λιγότερης θερμικής άνεσης σε έντονα κλίματα. Επίσης, δεν επαρκεί σε καταστάσεις με υψηλή ένταση πληρότητας. Παρόλα αυτά, ο υβριδικός εξαερισμός μπορεί να θεωρηθεί ως μια αξιόπιστη στρατηγική για την παροχή σταθερής ροής του αέρα, την αραίωση των μολυσματικών παραγόντων, την ανανέωση του εσωτερικού αέρα και την προσφορά της θερμικής άνεσης του εσωτερικού χώρου, ιδιαίτερα όταν σχετίζεται με μια στρατηγική ελέγχου. [1]



Εικόνα 27: Σχεδιάγραμμα του δείκτη ACH [54]

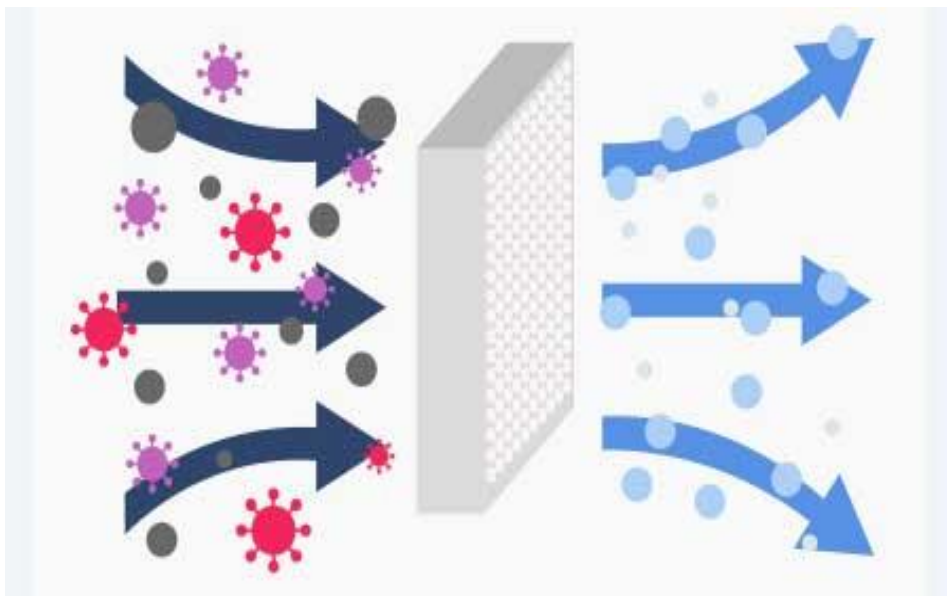
Τέλος, η αξιοποίηση των ανεμιστήρων εξάτμισης του αέρα θεωρείται μια πρόταση για την βελτίωση του εξαερισμού διότι με την εγκατάστασή τους, ο εσωτερικός αέρας ωθείται προς το εξωτερικό περιβάλλον του κτηρίου. Τα περισσότερα κτήρια έχουν τους ανεμιστήρες εξάτμισης στο μπάνιο και μερικές φορές στην κουζίνα και επίσης μπορούν να προστεθούν σε οποιοδήποτε δωμάτιο. Χαρακτηρίζονται ως απαραίτητοι στα μπάνια των σχολείων ή σε άλλα πολυσύχναστα κτίρια.



Εικόνα 28: Ανεμιστήρας εξάτμισης του αέρα [55]

4.2 Διήθηση του αέρα με την χρήση των HVAC φίλτρων

Μπορεί ο εξαερισμός να θεωρείται μια από τις πιο αποτελεσματικές στρατηγικές για την μείωση ή ακόμα και για την εξάλειψη του COVID-19, ωστόσο, αυξάνοντας τον ρυθμό εξαερισμού δηλαδή την παροχή εξωτερικού αέρα σε έναν χώρο μπορεί να αυξηθεί σημαντικά η κατανάλωση ενέργειας για την κάλυψη των θερμικών ή ψυκτικών φορτίων και μπορεί, επίσης, να αλλοιώσει την θερμική άνεση, καθώς τα περισσότερα συστήματα HVAC δεν έχουν σχεδιαστεί σε τέτοιο μέγεθος ώστε να ανταπεξέρχονται σε υψηλότερες παροχές του εξωτερικού αέρα. [4]

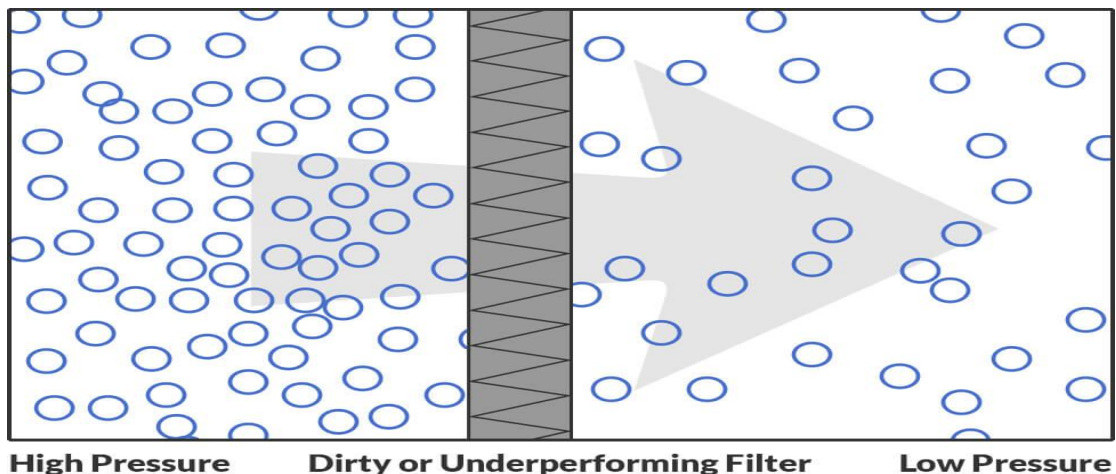


Εικόνα 29: Μηχανισμός διήθησης του αέρα μέσω φίλτρου[56]

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

Στην επιστημονική έρευνα των Leonard F. Pease κ.α. αναφέρεται πως για τυπικά επίπεδα ανακυκλοφορίας του αέρα, η διήθηση είναι η πιο αποτελεσματική μέθοδος για τη μείωση της συγκέντρωσης των αερολυμάτων και της πιθανότητας της μόλυνσης μέσω των συστημάτων HVAC, καθώς τα φίλτρα εμποδίζουν τη διαδρομή του αερολύματος.[57] Βελτιώνοντας την διήθηση του ανακυκλούμενου αέρα μειώνεται η συγκέντρωση του COVID-19 χωρίς να αυξηθεί η καταναλισκόμενη ενέργεια για θέρμανση ή ψύξη. Όμως, με την αξιοποίηση των HVAC φίλτρων παρουσιάζεται το μειονέκτημα της αύξησης της πτώσης πίεσης μέσω της Κεντρικής Κλιματιστικής Μονάδας (AHU) εξαιτίας της αντίστασης της ροής του αέρα που προκαλείται στα συγκεκριμένα φίλτρα, γεγονός που επιφέρει την αύξηση της καταναλισκόμενης ενέργειας των ανεμιστήρων ή/και ακόμα να μειώσει τον ρυθμό ροής του συστήματος HVAC. [5]

Η πτώση πίεσης περιγράφει την διαδικασία που συμβαίνει όταν η πίεση του αέρα μειώνεται από ένα τμήμα ενός συστήματος HVAC σε ένα άλλο τμήμα κατάντη. Καθώς ο αέρας κινείται μέσα από ένα σύστημα HVAC και συναντά ένα φίλτρο, το φίλτρο δημιουργεί αντίσταση στη ροή του αέρα καθώς απομακρύνει τα σωματίδια και τους ρύπους από αυτόν. Αυτό το φαινόμενο έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση της χαμηλότερης πίεσης του αέρα στην πλευρά του φίλτρου από την οποία εξέρχεται ο αέρας. Η χαμηλότερη πίεση του αέρα θα προκαλέσει στη συνέχεια ορισμένη σπατάλη ενέργειας διότι το σύστημα HVAC θα χρειαστεί να αφιερώσει περισσότερο χρόνο και να καταναλώσει περισσότερη ενέργεια για να θερμάνει ή να ψύξει το κτίριο στην επιθυμητή θερμοκρασία. [58]

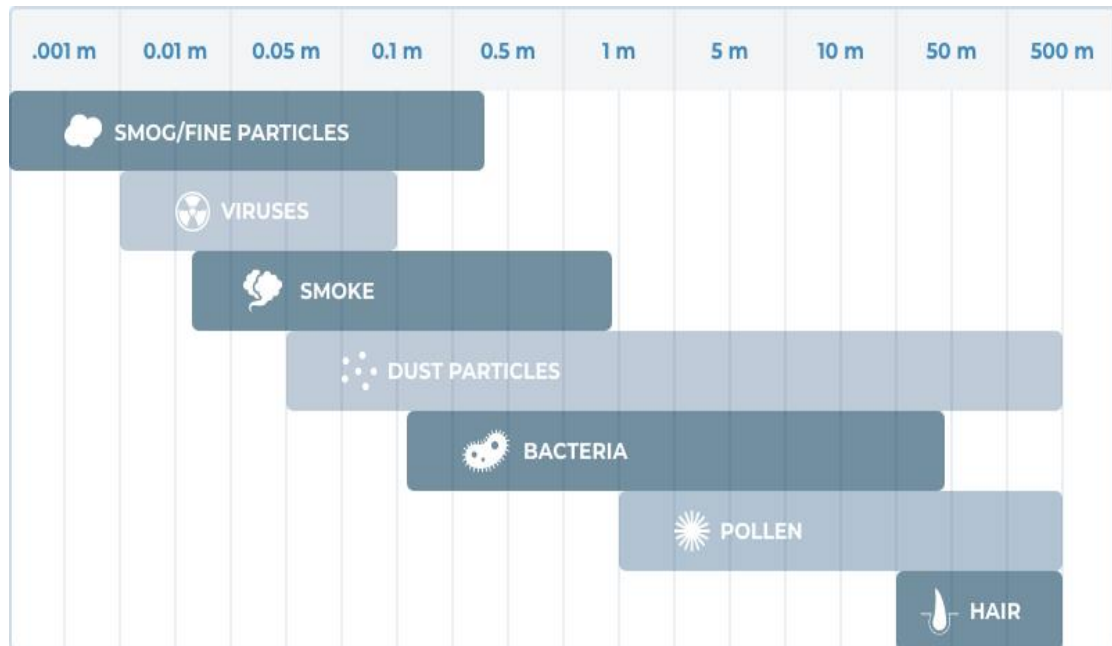


Εικόνα 30: Φαινόμενο πτώσης πίεσης λόγω αντίστασης της ροής του αέρα [58]

Η καλή Ποιότητα του Εσωτερικού Αέρα των κτηρίων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αποτελεσματικότητα του συστήματος φιλτραρίσματος του αέρα που είναι εγκατεστημένα στα HVAC συστήματα. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι φίλτρων στα συστήματα HVAC έχουν σχεδιαστεί για να μειώνουν τη συγκέντρωση των σωματιδιακών ρύπων που προέρχονται από το εσωτερικό τμήμα του κτιρίου ή από

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

τον αέρα που εισέρχεται στο κτίριο. Οι βασικές κατηγορίες των σωματιδιακών ρύπων είναι οι αέριοι ρύποι όπου έχουν, συνήθως, διάμετρο μικρότερη από 0,01μμπ.χ. οξείδιο του αζώτου, διοξείδιο του αζώτου, μονοξείδιο του άνθρακα και διοξείδιο του θείου) και οι βιολογικοί ρύποι όπου είναι ένα κλάσμα του μεγέθους άλλων ρύπων (π.χ. βακτήρια, ιοί και μυκητιακοί οργανισμοί), οι χημικοί και οι ραδιολογικοί ρυπαντές.[56]



Εικόνα 31: Κατηγορίες σωματιδιακών ρύπων [59]

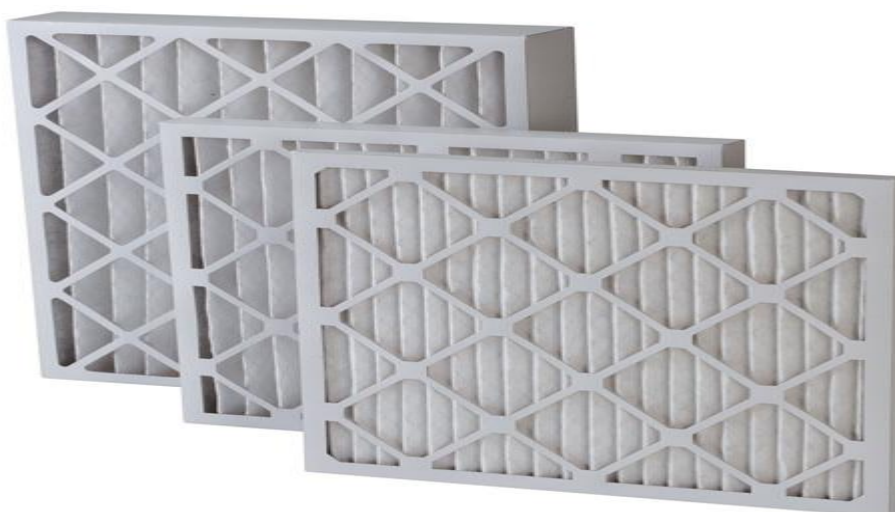
Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα σύστημα φιλτραρίσματος στα κτίρια είναι τα μηχανικά φίλτρα αέρα. Τα φίλτρα αυτά αποτελούνται από ένα περιστρεφόμενο γυαλί ή ένα μη υφαντό υλικό υψηλής στάθμης που λειτουργεί μέσω της διαδικασίας της τάνυσης και της πρόσκρουσης των σωματιδίων με το υλικό του φίλτρου. Ο ρυθμός με τον οποίο το μέσο του φίλτρου αφαιρεί τα σωματίδια από τον αέρα που διέρχεται από αυτό ισοδυναμεί με την απόδοση του φίλτρου. [56]

Όσο υψηλότερη είναι η αξιολόγηση MERV, τόσο καλύτερη είναι η διήθηση του αέρα, δηλαδή τόσο καλύτερα το φίλτρο παγιδεύει συγκεκριμένους τύπους σωματιδίων. [56][60] Η παράμετρος MERV («Minimum Efficiency Reporting Value») αναφέρει την ικανότητα ενός φίλτρου να συλλαμβάνει τα σωματίδια με διάμετρο μεταξύ 0,3 και 10μm. Αυτή η παράμετρος είναι χρήσιμη για να συγκρίνει τις αποδόσεις διαφόρων φίλτρων και η βαθμολογία αυτή προέρχεται από μια δοκιμαστική μέθοδος που αναπτύχθηκε από την American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE). [60] Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει τις αξιολογήσεις MERV από το Πρότυπο 52.2 της ASHRAE.

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

Πρότυπο 52.2 MERV	Απόδοση Σύνθετου Μέσου Μεγέθους Σωματιδίων (%)		
	Εύρος 1 0.30 έως 1.0 (μm)	Εύρος 2 1.0 έως 3.0 (μm)	Εύρος 3 3.0 έως 10.0 (μm)
1	N/A	N/A	$E_3 < 20$
2	N/A	N/A	$E_3 < 20$
3	N/A	N/A	$E_3 < 20$
4	N/A	N/A	$E_3 < 20$
5	N/A	N/A	$20 \leq E_3$
6	N/A	N/A	$35 \leq E_3$
7	N/A	N/A	$50 \leq E_3$
8	N/A	$20 \leq E_2$	$70 \leq E_3$
9	N/A	$20 \leq E_2$	$75 \leq E_3$
10	N/A	$35 \leq E_2$	$80 \leq E_3$
11	$20 \leq E_1$	$50 \leq E_2$	$85 \leq E_3$
12	$35 \leq E_1$	$65 \leq E_2$	$90 \leq E_3$
13	$50 \leq E_1$	$80 \leq E_2$	$90 \leq E_3$
14	$75 \leq E_1$	$90 \leq E_2$	$95 \leq E_3$
15	$85 \leq E_1$	$90 \leq E_2$	$95 \leq E_3$
16	$95 \leq E_1$	$95 \leq E_2$	$95 \leq E_3$

Πίνακας 3: Αξιολογήσεις MERV από το Πρότυπο 52.2 της ASHRAE [61]

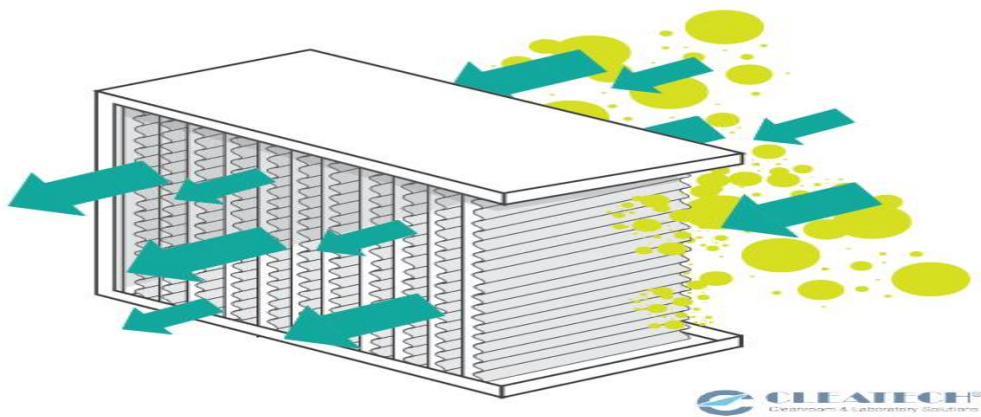


Εικόνα 32: Φίλτρο MERV 13 [62]

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

Μια αξιοσημείωτη παρατήρηση είναι πως ενώ τα φίλτρα με αξιολόγηση MERV από 8 και πάνω μπορούν να αποδίδουν αποτελεσματικά στα σωματίδια με διάμετρο 1 – 3μm και 3 – 10μm, αδυνατούν να απομακρύνουν τα σωματίδια με διάμετρο 0.3 – 1μm σε έναν ικανοποιητικό βαθμό. Η ASHRAE συνιστά τη χρήση φιλτραρίσματος που επιτυγχάνει τουλάχιστον δείκτη αξιολόγησης MERV 13 κατά τη διάρκεια της πανδημίας λόγω της ικανότητάς τους να φιλτράρουν τουλάχιστον το 85% των αιωρούμενων σωματιδίων με διάμετρο μεταξύ 1-3 μm.[63]

Τα πιο αποδοτικά φίλτρα HVAC είναι γνωστά ως υψηλής απόδοσης φίλτρα απορρόφησης των σωματιδίων ή αλλιώς HEPA. Τα φίλτρα HEPA (HIGH EFFICIENCY PARTICULATE AIR) μπορούν θεωρητικά να αφαιρέσουν τυχόν αερομεταφερόμενα σωματίδια μεγέθους 0.3μm σε ποσοστό 99.97%. Για σωματίδια με μεγαλύτερη διάμετρο, το ποσοστό αυτό αυξάνεται. [60]



Εικόνα 33: Αναπαράσταση φίλτρου HEPA [64]



Εικόνα 34: Φίλτρο HEPA [65]

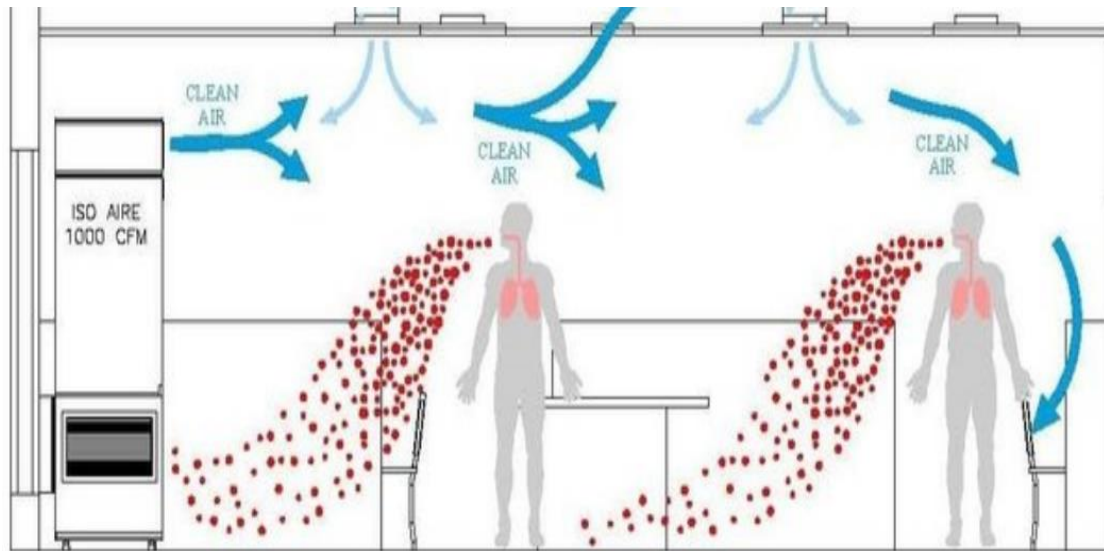
Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

Όσον αφορά την ενεργειακή κατανάλωση των HVAC φίλτρων, υπάρχει το πόρισμα που αναφέρει ότι όσο αυξάνεται η παράμετρος της αξιολόγησης MERV τόσο μεγαλώνει η αντίσταση στη ροή του αέρα. Είναι δύσκολο για πολλά συστήματα HVAC να προσαρμόσουν ένα MERV 13 εξαιτίας του αυξημένου φορτίου που υπάρχει στον ανεμιστήρα ώστε να καλύψει την αυξημένη αντίσταση που δημιουργείται. [66] Επιπροσθέτως, η πτώση πίεσης σε ένα σύστημα HVAC θα ποικίλλει μεταξύ διαφορετικών φίλτρων που έχουν την ίδια αξιολόγηση MERV. Για παράδειγμα, η πιο συνηθισμένη αιτία της πτώσης πίεσης είναι ένα ακαθάριστο φίλτρο και ορισμένα φίλτρα MERV 13 χαμηλής ποιότητας φράζουν πιο συχνά, οδηγώντας στην αυξημένη πτώση πίεσης. Επιπλέον, σε ορισμένα φίλτρα μειώνεται η αξιολόγηση MERV με την πάροδο της χρήσης τους (π.χ. ένα MERV 13 γίνεται MERV 9) και δεν μπορούν να διατηρήσουν την αποτελεσματικότητά τους. Μια στρατηγική για την επίλυση αυτού του θέματος είναι τα ιδρύματα και άλλες εμπορικές/βιομηχανικές εγκαταστάσεις να λάβουν μέτρα για να μειώσουν το λειτουργικό τους κόστος προσαρμόζοντας τη στρατηγική τους για τα φίλτρα του αέρα επιλέγοντας φίλτρα υψηλότερης ποιότητας για την μακροπρόθεσμη εξοικονόμηση χρημάτων. [58] Τέλος, μια επιπρόσθετη και ικανοποιητική λύση για την διήθηση του αέρα θεωρείται η χρήση των καθαριστών του αέρα («air purifiers»). Ένας φορητός καθαριστής του αέρα με φίλτρο HEPA μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε χώρους όταν δεν γίνεται να ανοιχθούν παράθυρα ή να χρησιμοποιηθούν οι ανεμιστήρες. Στην **Εικόνα 35** παρουσιάζεται μια συγκεκριμένη μάρκα καθαριστή του αέρα και στην **Εικόνα 36** αποτυπώνεται η επίδραση τους στους εσωτερικούς χώρους με την εγκατάστασή τους. [67]



Εικόνα 35: Καθαριστές του αέρα [67]

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19



Εικόνα 36: Η απολύμανση του αέρα με την αξιοποίηση των καθαριστών αέρα [67]

Ο Πίνακας 4 αποτυπώνει τις μέσες αποδόσεις φιλτραρίσματος των καθαριστών αέρα για συγκεκριμένα μεγέθη ρύπων. Για παράδειγμα: [68]

- **Φίλτρα με αξιολόγηση MERV 10:** θα απομακρύνουν τα σωματίδια με διάμετρο **3 – 10 μ m** σε ποσοστό 85% και άνω και με διάμετρο **1 – 3 μ m** σε ποσοστό 50 – 64.9%
- **Φίλτρα με αξιολόγηση MERV 14:** θα απομακρύνουν τα σωματίδια με διάμετρο **1 – 3 μ m** και 3 – 10 μ m σε ποσοστό 90% και άνω και αυτά με διάμετρο **0.3 – 1 μ m** σε ένα εύρος ποσοστού 75%-84%.

Αξιολόγηση MERV	0.3 – 1.0 μ m	1.0 – 3.0 μ m	3.0 – 10.0 μ m
MERV 1	<20%	<20%	<20%
MERV 2	<20%	<20%	<20%
MERV 3	<20%	<20%	<20%
MERV 4	<20%	<20%	<20%
MERV 5	<20%	<20%	20% - 34%
MERV 6	<20%	<20%	35% - 49%
MERV 7	<20%	<20%	50% - 69%
MERV 8	<20%	<20%	70% - 85%
MERV 9	<20%	<50%	>85%
MERV 10	<20%	50% - 64%	>85%

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

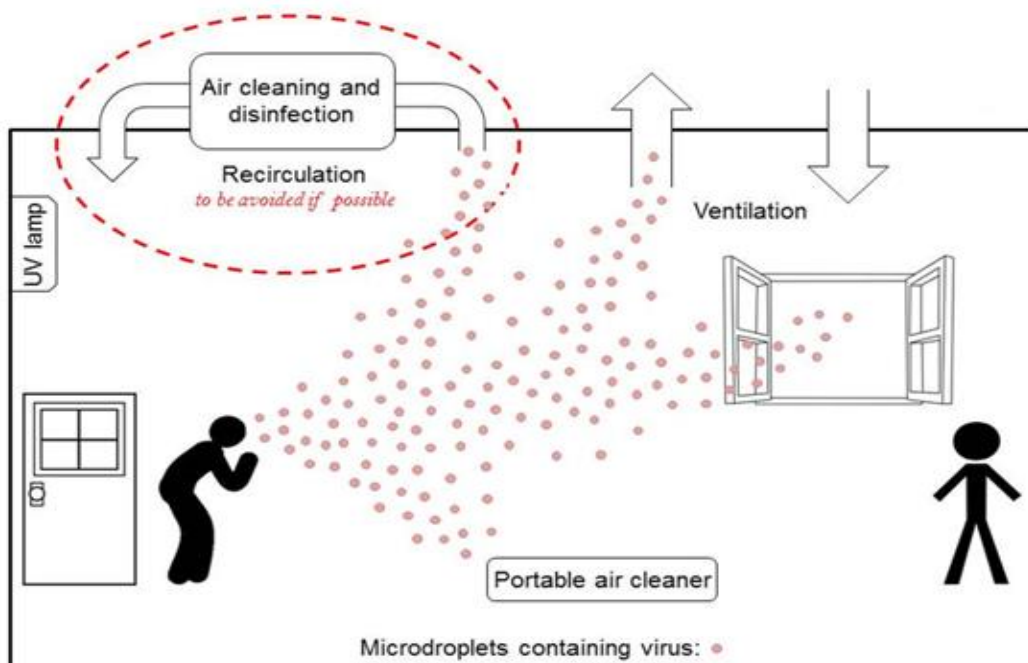
MERV 11	<20%	65% - 79%	>85%
MERV 12	<20%	80% - 90%	>90%
MERV 13	<75%	>90%	>90%
MERV 14	75% - 84%	>90%	>90%
MERV 15	85% - 94%	>95%	>90%

Πίνακας 4: Μέσες αποδόσεις φίλτραρίσματος των καθαριστών αέρα [68]

4.3 Αποφυγή της ανακυκλοφορίας του αέρα

Η Ομοσπονδία Ευρωπαϊκών Ενώσεων Θέρμανσης, Εξαερισμού και Κλιματισμού, επισήμανε πως πρέπει να σταματήσει η ανακυκλοφορία του αέρα στα κτίρια για την αποφυγή της εξάπλωσης του COVID-19. [69]

Η ανακυκλοφορία του αέρα είναι ένα μέτρο εξοικονόμησης της ενέργειας, αλλά πρέπει να ληφθεί μέριμνα, καθώς μπορεί να μεταφέρει τους ατμοσφαιρικούς ρύπους (συμπεριλαμβανομένων των μολυσματικών ιών) από έναν χώρο και να τους διανείμει σε άλλους χώρους που συνδέονται στο ίδιο σύστημα, αυξάνοντας πιθανώς τον κίνδυνο μόλυνσης από τον αέρα σε περιοχές που σε άλλη περίπτωση δεν θα είχαν μολυνθεί. Γενικά, ο αέρας δεν πρέπει να είναι ανακυκλούμενος όσο είναι πρακτικά δυνατό, για να αποφευχθεί η διάδοση των σωματιδίων επιβαρυσμένων με ιούς σε όλο το εσωτερικό περιβάλλον. [70]



Εικόνα 37: Η σημασία της αποφυγής της ανακυκλοφορίας του αέρα [70]

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

Για κεντρικές μονάδες που διαχειρίζονται τον αέρα σε επίπεδο ολόκληρου κτηρίου ή σε πολλαπλές ζώνες, θα πρέπει να αποφεύγεται η ανακυκλοφορία και το σύστημα να λειτουργεί με την εισαγωγή 100% του εξωτερικού αέρα, εάν φυσικά αυτό είναι εφικτό. Η απενεργοποίηση της ανακυκλοφορίας μπορεί να επιτευχθεί κλείνοντας τα στόμια ανακυκλοφορίας του αέρα και ανοίγοντας τους αποσβεστήρες του εξωτερικού αέρα. Στα συστήματα όπου αυτό είναι αδύνατο θα πρέπει να μεγιστοποιείται η παροχή εισαγωγής του εξωτερικού αέρα και γενικά η αποτελεσματικότητα των συστημάτων εξαερισμού θα πρέπει να είναι βελτιωμένη. Τέλος, θεωρείται απαραίτητο να εφαρμοστούν οι στρατηγικές της διήθησης ή της υπεριώδους μικροβιοκτόνου ακτινοβολίας (ή αλλιώς UVGI) ώστε να αφαιρεθεί ή να απομακρυνθεί η πιθανή ιική μόλυνση από τον ανακυκλούμενο αέρα. [70]

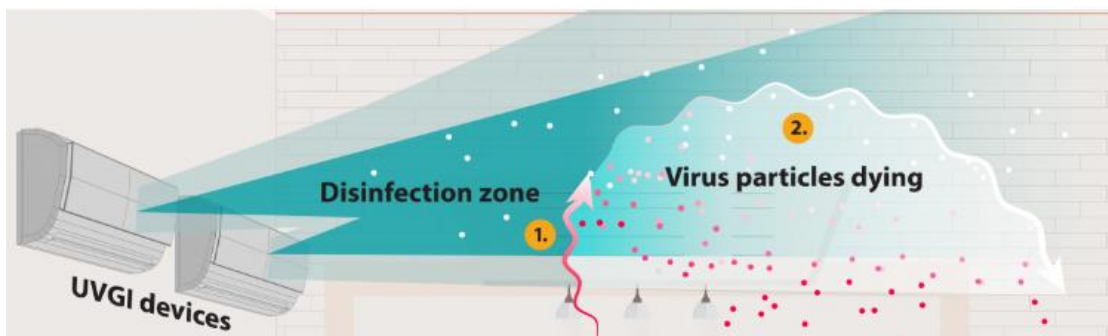
4.4 UVGI (Ultraviolet Germicidal Irradiation)

Ένα επαγγελματικά σχεδιασμένο σύστημα υπεριώδους μικροβιοκτόνου ακτινοβολίας (UVGI) που είναι καλά εγκατεστημένο και συντηρημένο μπορεί να σκοτώσει αποτελεσματικά τον ιό του COVID-19 και να βοηθήσει στην προστασία των ανθρώπων από τη νόσο στους εσωτερικούς χώρους. [71] Η υπεριώδης μικροβιοκτόνος ακτινοβολία, ή UVGI, είναι η χρήση υπεριώδους (UV) ενέργειας για την εξόντωση των ιικών, βακτηριακών και μυκητιακών οργανισμών. Τα φωτιστικά UVGI παράγουν ενέργεια UV-C, η οποία έχει μικρότερα μήκη κύματος (200–280 nm) από τις πιο διεισδυτικές ακτίνες UV-A (320–400 nm) και UV-B (280–320 nm) και θέτει λιγότερο σε κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία. [72][51] Όταν ένα παθογόνο απορροφά φωτόνια που παράγονται από την υπεριώδη ακτινοβολία, η γενετική του σύνθεση (δηλαδή το δεοξυριβονουκλεϊκό οξύ (DNA) στις περιπτώσεις βακτηρίων και μυκήτων και το ριβονουκλεϊκό οξύ (RNA) στις περιπτώσεις των ιών) αλλάζει, που οδηγεί σε αδρανοποίηση και αδυναμία αναπαραγωγής. Η UV-C θεωρείται η πιο αποτελεσματική μικροβιοκτόνος ακτινοβολία επειδή το μέγιστο μήκος κύματος της (260–265 nm) συμπίπτει με τη μέγιστη απορρόφηση UV του DNA.[51]

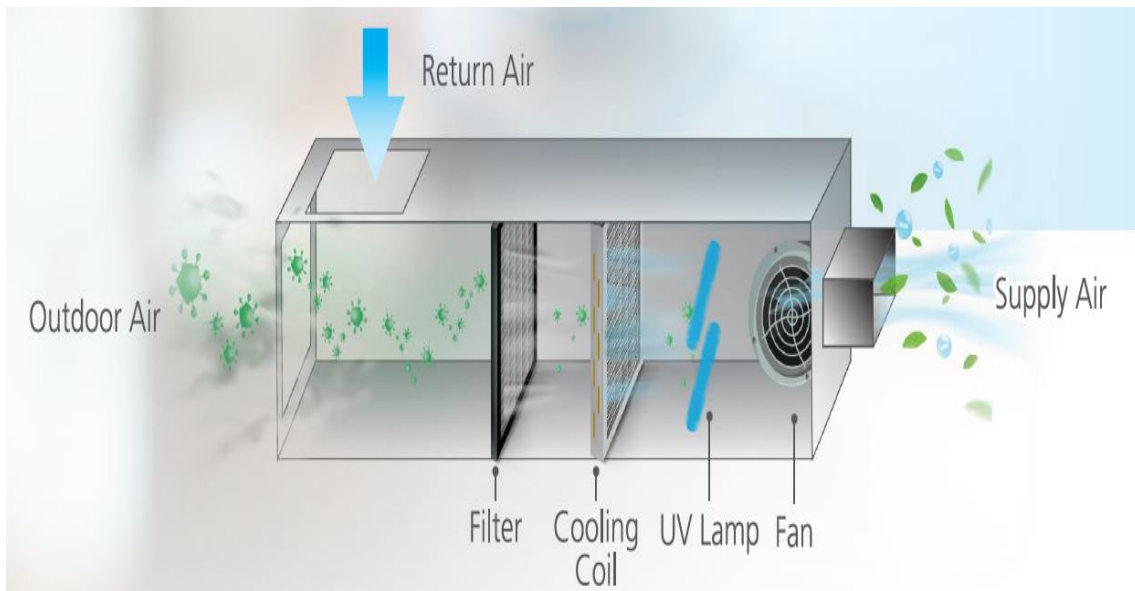
Λόγω της υψηλής σκοπιμότητας απενεργοποίησης του SARS-COV-2 με την χρήση της ακτινοβολίας UV-C σε λιγότερο από ένα λεπτό, η εφαρμογή του στα συστήματα HVAC εξετάζεται σοβαρά για την απολύμανση του αέρα. Τόσο το Κέντρο Ελέγχου και Πρόληψης Νοσημάτων (CDC) όσο και η ASHRAE συνέστησαν τον επανασχεδιασμό των συστημάτων εξαερισμού των κτηρίων με την αξιοποίηση της UVGI, ιδιαίτερα στα κτήρια με μεγάλη συγκέντρωση ατόμων. Σύμφωνα με τις κατευθυντήριες οδηγίες της ASHRAE είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί η UV-C ακτινοβολία σε ένα σύστημα HVAC ακτινοβολώντας τον αέρα του ανωτέρου σημείου του χώρου («upper room») ή ακτινοβολώντας τον αέρα καθώς διέρχεται από τους αγωγούς. Ωστόσο, η ακτινοβολία του ανωτέρου σημείου του χώρου

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

απαιτεί πρόσθετες βάσεις και μονάδες στους τοίχους και στις οροφές. Επομένως, η ακτινοβολία του αέρα εντός των αεραγωγών θεωρείται ως πιο εύκολη μέθοδος για να εφαρμοστεί. [51] Ένα επιπλέον πλεονέκτημα είναι πως θεωρείται πιο ασφαλές τρόπος χρήσης της ακτινοβολίας UV-C, επειδή η άμεση έκθεση σε UV-C στο ανθρώπινο δέρμα ή στα μάτια μπορεί να προκαλέσει τραυματισμούς και η εγκατάσταση της UV-C σε έναν αεραγωγό είναι λιγότερο πιθανό να προκαλέσει έκθεση στο δέρμα και τα μάτια.[73] Στις Κεντρικές Κλιματιστικές Μονάδες, οι λαμπτήρες UV-C μπορούν να παρέχουν μεγαλύτερη απόδοση έντασης και υψηλότερο αποτέλεσμα απολύμανσης. Οι λαμπτήρες UV-C εγκαθίστανται στις ΚΚΜ για αποστείρωση και απολύμανση των επιφανειών. Στοχεύουν και ακτινοβολούν το ψυκτικό στοιχείο και τη λεκάνη αποστράγγισης συμπυκνωμάτων.[74]



Εικόνα 38: Συσκευές UVGI [72]



Εικόνα 39: Λαμπτήρες UV-C εντός αεραγωγού [74]

4.5 Άλλες Στρατηγικές

Δύο επιπρόσθετες και σημαντικές στρατηγικές για την καταπολέμηση της μετάδοσης του ιού είναι η διαχείριση της λειτουργίας των συστημάτων HVAC και ο έλεγχος της θερμοκρασίας και της υγρασίας.

Ο έλεγχος της θερμοκρασίας και της υγρασίας είναι μια ευεργετική μέθοδος για την αντιμετώπιση της αερογενούς μετάδοσης του ιού και το σημείο ρύθμισης («set point») της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας ενός κτηρίου θα πρέπει να εξετάζεται προσεκτικά κατά περίπτωση. Έρευνες αποδεικνύουν ότι η πιο δυσμενής συνθήκη επιβίωσης των μικροοργανισμών είναι η σχετική υγρασία να βρίσκεται σε ποσοστό μεταξύ 40% έως 60% και μελέτες δείχνουν ότι μια σχετική υγρασία κάτω από 40% μπορεί να αυξήσει τον αριθμό των λοιμώξεων. [4] Μια άλλη μελέτη επιβεβαίωσε ότι για την αδρανοποίηση του ιού χρειάστηκαν 37 °C για μία ημέρα και 56 °C για 30 λεπτά.

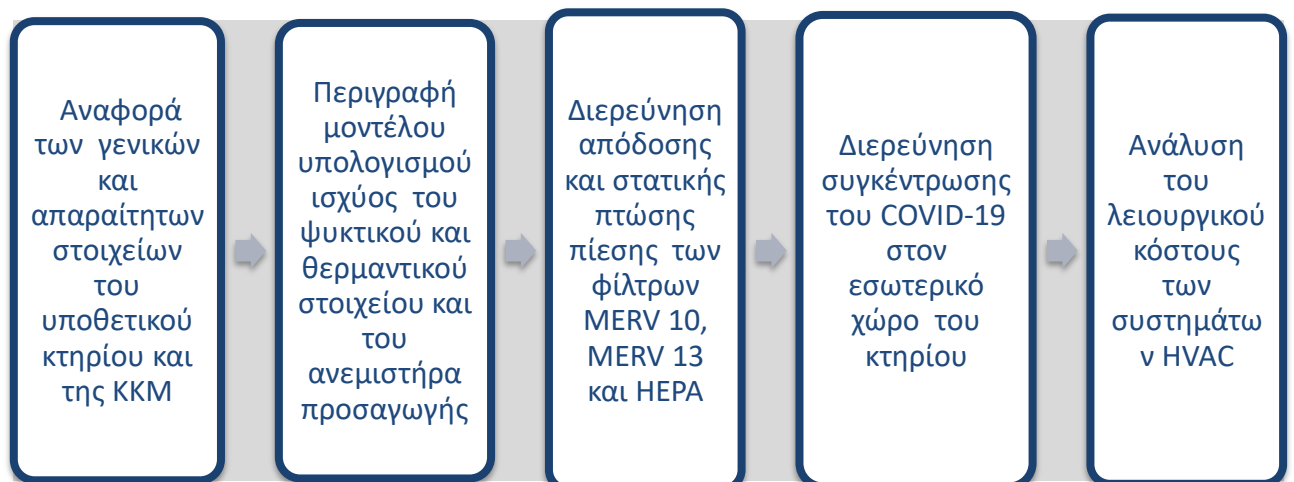
Μετά το ξέσπασμα της εξάπλωσης του COVID-19, πραγματοποιήθηκαν ορισμένες τροποποιήσεις στις λειτουργίες των συστημάτων HVAC. Στο πλαίσιο αυτών των τροποποιήσεων, η Ευρωπαϊκή Ομοσπονδία Θέρμανσης, Εξαερισμού και Κλιματισμού (REHVA) έχει προτείνει τον εξαερισμό στην ονομαστική ταχύτητα για τουλάχιστον 2 ώρες πριν από το χρόνο χρήσης του κτηρίου και σε χαμηλότερη ταχύτητα 2 ώρες μετά τον χρόνο χρήσης του κτηρίου. Σε κτίρια που έχουν εκκενωθεί λόγω της έξαρσης του ιού, όπως σε γραφεία και σχολεία, δεν συνιστάται η απενεργοποίηση του συστήματος εξαερισμού, αλλά η συνεχής λειτουργία του συστήματος σε χαμηλότερη ταχύτητα, έτσι ώστε ο ιός να μπορεί να απομακρυνθεί από το κτήριο με περιορισμένες ενεργειακές κυρώσεις. Για το σύστημα εξαερισμού της τουαλέτας, συνιστάται να λειτουργεί για 24 ώρες την ημέρα, 7 ημέρες την εβδομάδα. Όσον αφορά τη λειτουργία των τερματικών συσκευών, οι μονάδες που διαχειρίζονται τον αέρα ανακυκλοφορίας («AHU») συνιστάται να μεταβαίνουν σε κατάσταση εισαγωγής 100% εξωτερικού αέρα, ακόμα και για συστήματα που εξοπλίζονται με φίλτρα στα οποία ο αέρας ανακυκλώνεται, με συνέπεια οι ιοί να επιστρέφουν ξανά μέσα στο κτήριο (τα φίλτρα αυτά δεν πληρούν τα πρότυπα HEPA και συνήθως δεν είναι αποτελεσματικά). Τέλος, τα fan coils που λειτουργούν με την συνεχή κυκλοφορία του αέρα θα πρέπει να είναι απενεργοποιημένα για να αποφευχθεί η επαναιώρηση των σωματιδίων του ιού στο χώρο. [4]

5. Μεθοδολογική Προσέγγιση

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, ο κύριος στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι να συγκριθούν δύο στρατηγικές λειτουργίας συστημάτων HVAC, οι οποίες είναι υπεύθυνες τόσο για την αναβάθμιση της Ποιότητας Εσωτερικού Αέρα στους εσωτερικούς χώρους των κτηρίων, όσο και για την μείωση της συγκέντρωσης του ιικού φορτίου του COVID-19. Για την μελέτη της ανάλυσης των δύο αυτών εξεταζόμενων στρατηγικών υλοποιήθηκε ολοκληρωμένο μοντέλο υπολογισμού το οποίο εφαρμόζεται σε υποθετικό κτήριο εκπαιδευτηρίου, για το θερινό και για το ψυχρό κλίμα.

Τα κύρια μεθοδολογικά βήματα του ολοκληρωμένου μοντέλου υπολογισμού αναπτύσσονται ως εξής:

- Αναφορά στα **γενικά και απαραίτητα στοιχεία** του υποθετικού κτιρίου και της Κεντρικής Κλιματιστικής Μονάδας (ΚΚΜ) που είναι ήδη εγκατεστημένη στο υποθετικό κτίριο εκπαίδευσης.
- Περιγραφή μοντέλου υπολογισμού της **ψυκτικής ισχύς** του ψυκτικού στοιχείου (θερινό κλίμα) , της **ισχύς του θερμαντικού στοιχείου** (ψυχρό κλίμα) και της **ισχύς του ανεμιστήρα προσαγωγής** για κάθε στρατηγική λειτουργίας συστημάτων HVAC.
- Διερεύνηση της **απόδοσης των φίλτρων HVAC** (MERV 10, MERV 13 , HEPA) και της **στατικής πτώσης πίεσης** λόγω της αντίστασης που δημιουργείται εξαιτίας των φίλτρων HVAC.
- Διερεύνηση της **συγκέντρωσης του ιικού φορτίου COVID-19** στον εσωτερικό χώρο του εξεταζόμενου κτιρίου για κάθε στρατηγική λειτουργίας συστημάτων HVAC.
- Ανάλυση και σύγκριση **του λειτουργικού κόστους**.



Γράφημα 3: Διάγραμμα Ροής ανάλυσης των βασικών βημάτων υλοποίησης της μελέτης

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

Η διαδικασία της παραπάνω μεθοδολογικής προσέγγισης αποτυπώνεται συνοπτικά και σχηματικά στο παραπάνω διάγραμμα ροής. Επιπροσθέτως, στον **Πίνακα 5** παρουσιάζονται εν συντομία οι στρατηγικές λειτουργίες συστημάτων HVA στις οποίες θα βασιστεί η παρούσα Διπλωματική Εργασία.

ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ HVAC

α) 100% Εισαγωγή Νωπού Αέρα (N.A.)

β) Χρήση Φίλτρων MERV 10, MERV 13, HEPA

Πίνακας 5: Στρατηγικές λειτουργίας συστημάτων HVAC στην παρούσα Διπλωματική εργασία

5.1 Αναφορά των γενικών και απαραίτητων στοιχείων του υποθετικού κτηρίου και της ΚΚΜ

Στο αρχικό στάδιο της μεθοδολογικής προσέγγισης καταγράφονται τα βασικά δεδομένα εισόδου του εκάστοτε προβλήματος, αναφέρονται τα αρχιτεκτονικά στοιχεία του εξεταζόμενου κτηρίου και αναλύονται συνοπτικά τα αναγκαία χαρακτηριστικά της εκάστοτε ΚΚΜ.

➤ Δεδομένα Εισόδου – Συνθήκες Υπολογισμού

Στα δεδομένα εισόδου περιλαμβάνονται όλα τα στοιχεία τα οποία θεωρούνται απαραίτητα για τους υπολογισμούς των απαραίτητων παραμέτρων υλοποίησης του εκάστοτε προβλήματος.

- Συνθήκες Εσωτερικού Χώρου και Περιβάλλοντος

Κλίμα	Εσωτερικός Χώρος	Περιβάλλον
Θερινό	26 °C DB – 50% RH	35 °C DB – 60% RH
Χειμερινό	22 °C DB – 50% RH	2 °C DB – 70% RH

Πίνακας 6: Συνθήκες Εσωτερικού Χώρου και Περιβάλλοντος του εξεταζόμενου κτηρίου (DB: Θερμοκρασία Ξηρού Βολβού, RH: Σχετική Υγρασία)

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

- Θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του νερού στο ψυκτικό και θερμαντικό στοιχείο της ΚΚΜ. Η διανομή του θα πραγματοποιείται από το ψυχροστάσιο και το λεβητοστάσιο του εξεταζόμενου κτηρίου.

Λειτουργία	Θερμοκρασία εισόδου νερού	Θερμοκρασία εξόδου νερού
Ψύξη	7°C	12°C
Θέρμανση με λέβητα	70°C	60°C

Πίνακας 7: Συνθήκες θερμοκρασιών νερού στο ψυκτικό και θερμαντικό στοιχείο της ΚΚΜ

- Ψυκτικά φορτία και θερμικές απώλειες του εξεταζόμενου κτηρίου

Ψυκτικά Φορτία (kW)		Θερμικές Απώλειες (kW)
Αισθητό Φορτίο RSH _c	Λανθάνον Φορτίο RLH _c	22
36	18	

Πίνακας 8: Δεδομένα για τα ψυκτικά φορτία και τις θερμικές απώλειες του εξεταζόμενου κτηρίου

➤ Αρχιτεκτονικά στοιχεία εξεταζόμενου κτηρίου

Το υποθετικό κτίριο εκπαίδευσης αποτελείται από ενιαίο εσωτερικό και κλιματιζόμενο χώρο στους οποίους παρέχεται αέρας επεξεργασμένος από την ΚΚΜ μέσω κατάλληλου δικτύου αεραγωγών για την επίτευξη της θερμικής άνεσης των χώρων. Στον Πίνακα 9 παρουσιάζονται τα γενικά αρχιτεκτονικά δεδομένα του υποθετικού κτηρίου.

Αρχιτεκτονικοί Παράμετροι

Ζώνες	1
Επιφάνεια Υποθετικού Κτηρίου - A	400 m ²
Ύψος Υποθετικού Κτηρίου - H	6 m
Όγκος Υποθετικού Κτηρίου - V	2400 m ³

Πίνακας 9: Αρχιτεκτονικά δεδομένα του υποθετικού κτηρίου

➤ Κεντρική Κλιματιστική Μονάδα

Οι ανάγκες κάλυψης του θερινού και του χειμερινού κλιματισμού του εξεταζόμενου κτηρίου βασίζονται στο εγκατεστημένο κεντρικό σύστημα κλιματισμού. Στο σύστημα αυτό εντάσσεται Κεντρική Μονάδα Κλιματισμού (ΚΚΜ)

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

στην οποία παρασκευάζεται ο κλιματισμένος αέρας και μεταφέρεται μέσω δικτύου αεραγωγών στους εσωτερικούς χώρους του εξεταζόμενου κτιρίου. Η εγκατεστημένη ΚΚΜ λειτουργεί με 20% νωπό αέρα και 80% αέρα με ανακυκλοφορίας.

Η κατάσταση λειτουργίας του στηρίζεται στην διεργασία πλήρους φορτίου, δηλαδή στον θερινό κλιματισμό πραγματοποιεί τις διεργασίες της ψύξης και της αφύγρανσης του αέρα, ενώ στον χειμερινό κλιματισμό της θέρμανσης και της ύγρανσης του αέρα. Η ψύξη και η αφύγρανση του αέρα πραγματοποιείται με ψυχρό νερό, το οποίο παρασκευάζεται στη ψυκτική μονάδα που αποτελείται από αερόψυκτο ψύκτη και οδηγείται στην ΚΚΜ σε εναλλάκτη αέρα – νερού, δηλαδή στο ψυκτικό στοιχείο. Η θέρμανση του αέρα υλοποιείται με θερμό νερό, το οποίο παρασκευάζεται στο λέβητα και οδηγείται στον εναλλάκτη αέρα – νερού της ΚΚΜ, δηλαδή στο θερμαντικό στοιχείο. Τέλος, η ύγρανση του αέρα γίνεται από τον υγραντήρα, ο οποίος διοχετεύει νερό στην ΚΚΜ της παρούσας μελέτης.

Η υπάρχουσα Κεντρική Κλιματιστική Μονάδα (**Εικόνα 40**) συγκροτείται από τα παρακάτω τμήματα:

- **Ανεμιστήρας Προσαγωγής / Ανεμιστήρας Επιστροφής:**

Η προσαγωγή και απαγωγή του αέρα εξασφαλίζεται με τους φυγοκεντρικούς ανεμιστήρες με πτερωτές προς τα εμπρός κεκλιμένες.

- **Κιβώτιο Μίξης:**

Το κιβώτιο μίξης θα αποτελείται από στόμια για τον αέρα ανακυκλοφορίας και τον νωπό αέρα. Κάθε στόμιο είναι εφοδιασμένο με ρυθμιστικά διαφράγματα. Τα στόμια είναι προσαρτημένα ώστε να πετυχαίνεται η βέλτιστη ανάμιξη των 2 ρευμάτων αέρα.

- **Τμήμα Φίλτρων Αέρα:**

Χρησιμοποιείται **Φίλτρο Λεπτής Σκόνης** κλάσης **F7**.

- **Τμήμα Στοιχείων (Ψυκτικό και Θερμαντικό Στοιχείο):**

Ψυκτικό Στοιχείο Νερού

Επιτρεπόμενη Μετωπική Ταχύτητα Αέρα	2,5m/sec
Θερμοκρασία εισόδου και εξόδου του ψυχρού νερού στο ψυκτικό στοιχείο	$t_{\text{εισ}} = 7^{\circ}\text{C}$ $t_{\text{εξ}} = 12^{\circ}\text{C}$
Πτώση Πίεσης του αέρα στο στοιχείο	Έως 275 Pa

Πίνακας 10: Χαρακτηριστικά Ψυκτικού Στοιχείου

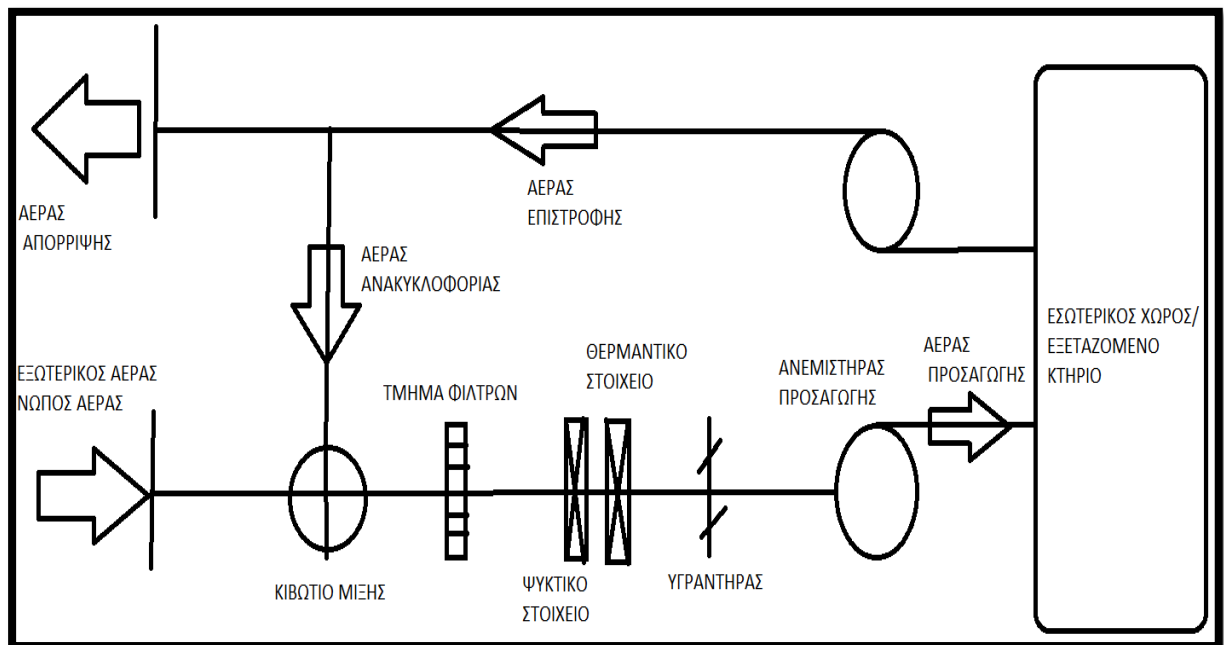
Θερμαντικό Στοιχείο Νερού

Επιτρεπόμενη Μετωπική Ταχύτητα Αέρα	3m/sec
Θερμοκρασία εισόδου – εξόδου θερμού νερού στο θερμαντικό στοιχείο	$t_{\text{εισ}} = 70^{\circ}\text{C}$ $t_{\text{εξ}} = 60^{\circ}\text{C}$
Πτώση Πίεσης του αέρα στο στοιχείο	Έως 50 Pa

Πίνακας 11: : Χαρακτηριστικά Θερμαντικού Στοιχείου

- Υγραντήρας

Η μονάδα περιέχει αυτόνομο ηλεκτρικό υγραντήρα ατμού.



Εικόνα 40: Ενδεικτικό σχεδιάγραμμα της Υπάρχουσας ΚΚΜ του προβλήματος

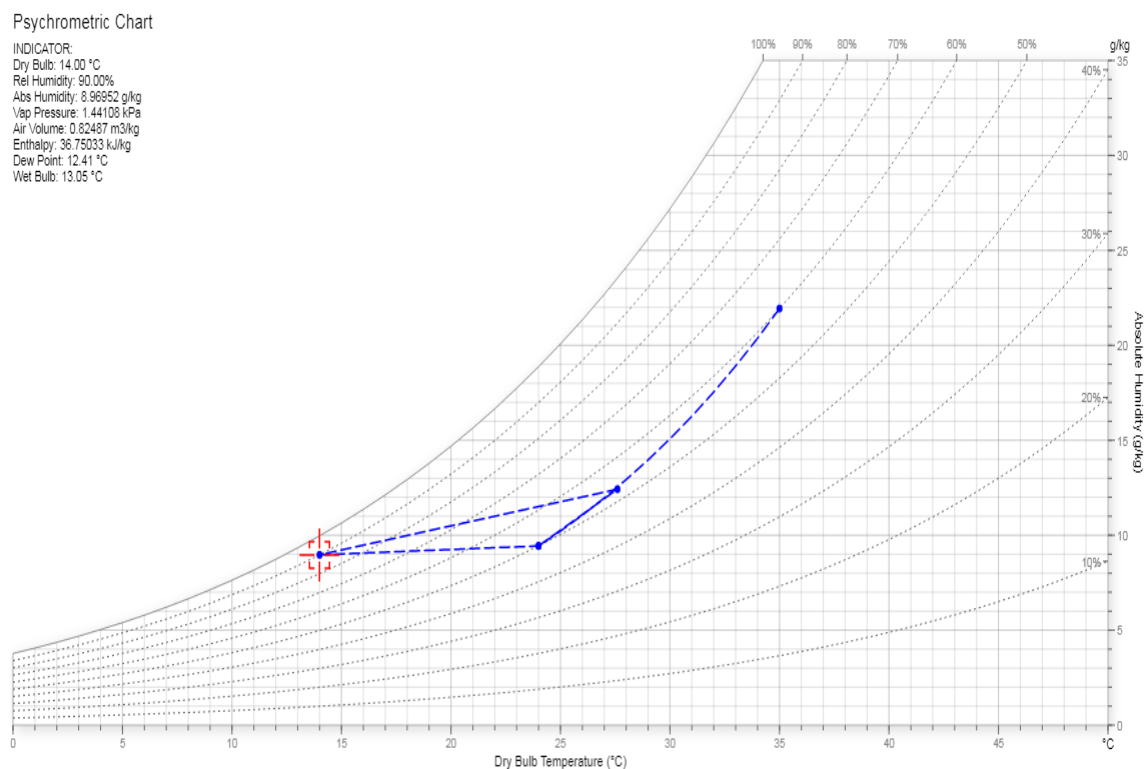
5.2 Περιγραφή μοντέλου υπολογισμού ισχύος του ψυκτικού και θερμαντικού στοιχείου και του ανεμιστήρα προσαγωγής

Ένα σημαντικό στάδιο για την επίτευξη του στόχου της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι ο υπολογισμός των βασικών ψυχομετρικών παραμέτρων του κεντρικού συστήματος κλιματισμού της μελέτης. Η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί για την εύρεση αυτών των παραμέτρων στηρίζεται στο κομμάτι της Ψυχομετρίας και ειδικότερα στον **Ψυχομετρικό Χάρτη της ASHRAE**. Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, με την αξιοποίηση του Ψυχομετρικού Χάρτη της ASHRAE δύναται να εντοπισθούν και να μελετηθούν οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του υγρού αέρα.

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

Με την συγκέντρωση των στοιχείων από τον Ψυχομετρικό Χάρτη της ASHRAE παρέχεται η δυνατότητα να υπολογισθούν ορισμένοι παράμετροι όπως η μάζα του ξηρού αέρα στην έξοδο του ψυκτικού και θερμαντικού στοιχείου, η θερμοκρασία του αέρα προσαγωγής, η ισχύς του ψυκτικού και θερμαντικού στοιχείου της ΚΚΜ και γενικά οι συνθήκες του αέρα σε διάφορες καταστάσεις.

Το υπολογιστικό εργαλείο που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των ψυχομετρικών ιδιοτήτων του προβλήματος είναι το «**Interactive Psychrometric Chart**».[75] Είναι ένα διαδικτυακό πρόγραμμα όπου εισάγοντας τα κατάλληλα δεδομένα μπορεί να παρουσιάσει σε ψυχομετρικό χάρτη τις διεργασίες που πραγματοποιούνται σε μια τυπική κεντρική μονάδα κλιματισμού για τον θερινό και για τον χειμερινό κλιματισμό. Επίσης, προσφέρει την δυνατότητα στον χρήστη του προγράμματος να αντλεί σημαντικά δεδομένα από κάθε κατάσταση των διεργασιών ,όπως για παράδειγμα για τον θερινό κλιματισμό, τις συνθήκες του αέρα μέσα στο χώρο, στο περιβάλλον, στο κιβώτιο μίξης και στην έξοδο του ψυκτικού στοιχείου, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 41**.



Εικόνα 41: Ενδεικτική διεργασία στο Ψυχομετρικό Χάρτη του λογισμικού «Interactive Psychrometric Chart» [75]

Όπως προαναφέρθηκε παραπάνω, η αξιοποίηση του Ψυχομετρικού Χάρτη αποτελεί αναγκαίο εργαλείο για τον υπολογισμό της ισχύς του ψυκτικού και θερμαντικού στοιχείου. Στη συνέχεια της μεθοδολογικής προσέγγισης του άρθρου θα αναλυθούν διεξοδικά τα στάδια που θα ακολουθηθούν για τον υπολογισμό αυτών των ισχύων τόσο για το θερινό όσο και για τον χειμερινό κλιματισμό.

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

Προτού όμως ακολουθηθεί αυτή η ανάλυση, θα γίνει αναφορά στην σημειολογία των συνθηκών του αέρα, η οποία παρουσιάζεται στον **Πίνακας 12**.

ΣΗΜΕΙΟΛΟΓΙΑ			
Θερινό Κλίμα		Χειμερινό Κλίμα	
Συνθήκες του αέρα	Συμβολισμός	Συνθήκες του αέρα	Συμβολισμός
1) Συνθήκες του νωπού αέρα	O	1) Συνθήκες του νωπού αέρα	O
2) Συνθήκες του αέρα στο χώρο	R	2) Συνθήκες του αέρα στο χώρο	R
3) Συνθήκες του αέρα τροφοδοσίας στο χώρο	S	3) Συνθήκες του αέρα τροφοδοσίας στο χώρο	S
4) Συνθήκες του αέρα μετά την ανάμιξη	M	4) Συνθήκες του αέρα στην έξοδο του θερμαντικού στοιχείου	S'
		5) Συνθήκες του αέρα μετά την ανάμιξη	M
		6) Συνθήκες του αέρα μετά την έξοδο του από τον προθερμαντήρα	O'

Πίνακας 12: Σημειολογία συνθηκών του αέρα

➤ **Θερινό Κλίμα**

Για τον υπολογισμό της **ισχύς του ψυκτικού στοιχείου** για το θερινό κλίμα (θερινός κλιματισμός) και στην κατάσταση **εισαγωγής 20% νωπού αέρα** στην ΚΚΜ αξιοποιήθηκε η παρακάτω **Εξίσωση 1**: [19]

$$\dot{Q}_{c,20\%} = \dot{m}_c * (h_M - h_S) \text{ [kW]} \quad (1)$$

- \dot{m}_c : η παροχή μάζας του αέρα στην έξοδο του ψυκτικού στοιχείου. [kg/s]

Υπολογίζεται από το πηλίκο $\frac{RSH_c}{t_R - t_S}$, όπου το RSH_c είναι το αισθητό φορτίο των ψυκτικών φορτίων, t_R η θερμοκρασία του αέρα στον εσωτερικό χώρο και t_S η θερμοκρασία του αέρα προσαγωγής.

- h_M : η ενθαλπία του αέρα στο κιβώτιο μίξης [kJ/kg]
- h_S : η ενθαλπία του αέρα προσαγωγής στο χώρο [kJ/kg]

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

Στην περίπτωση **εισαγωγής 100% νωπού αέρα** στην ΚΚΜ, η **ισχύς του ψυκτικού στοιχείου** υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\dot{Q}_{c,100\%} = \dot{m} * (h_0 - h_s) \text{ [kW]} \quad (2)$$

- \dot{m}_c : η παροχή μάζας του ξηρού αέρα στην έξοδο του ψυκτικού στοιχείου, η οποία είναι ίση με αυτήν της **Εξίσωσης 1** [kg/s]
- h_0 : η ενθαλπία του νωπού αέρα [kJ/kg]
- h_s : η ενθαλπία του αέρα μετά το ψυκτικό στοιχείο [kJ/kg]

Σύστημα HVAC	Παροχή Μάζας Αέρα Προσαγωγής (kg/s)	Παροχή Όγκου Αέρα Προσαγωγής (m ³ /h)	Παροχή Όγκου Νωπού Αέρα (m ³ /h)	Παροχή Όγκου Ανακυκλοφορούμενου Αέρα (m ³ /h)
Υπάρχουσα ΚΚΜ	2,28	6656	1331	5325
100%	2,28	6656	6656	0
Εισαγωγή N.A.				
MERV 10	2,43	7142	1428	5713
MERV 13	2,52	7415	1483	5932
HEPA	2,82	8345	1669	6676

Πίνακας 13: Παροχές αέρα όλων των συστημάτων HVAC του προβλήματος

Παραδοχές

- Η **Εξίσωση 1** χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ψυκτικής ισχύς, όταν η ΚΚΜ λειτουργεί υπό την επήρεια των φίλτρων MERV 10, MERV 13 και HEPA.
- Σε ρεαλιστικές συνθήκες, τα φίλτρα τα οποία είναι πιο αποδοτικά στην διήθηση των ιών, όπως για παράδειγμα το φίλτρο HEPA, επιφέρουν μεγαλύτερη αντίσταση στην ροή του αέρα μέσα στον αγωγό με αποτέλεσμα να μειώνεται η παροχή του αέρα στον εσωτερικό χώρο, όπως δηλώνουν και οι Cary κ.α. στην δημοσίευσή τους [5]. Για λόγους απλότητας, αυτή η συνθήκη δεν λαμβάνεται υπόψη, δηλαδή θεωρείται πως ο ανεμιστήρας προσαγωγής της συγκεκριμένης μελέτης διαθέτει το μέγεθος να ανταπεξέλθει σε όλες τις αυξημένες πτώσεις πιέσεων.
- Λαμβάνεται υπόψη η άνοδος της θερμοκρασίας του αέρα λόγω των φίλτρων [5] η οποία διαφέρει αναλόγως την στατική πτώση πίεσης που προκαλείται από το φίλτρο. Επομένως, με την παραγωγή θερμότητας από την ύπαρξη της μεγάλης στατικής πτώσης πίεσης τους δημιουργούνται θερμικά κέρδη μέσα στον εσωτερικό χώρο του κτηρίου.

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

- Η αύξηση της θερμοκρασίας από τους ανεμιστήρες προσαγωγής και επιστροφής του αέρα θεωρείται αμελητέα.

➤ Χειμερινό Κλίμα

Για τον υπολογισμό της **ισχύς του θερμαντικού στοιχείου** για το χειμερινό κλίμα (χειμερινός κλιματισμός) και στην κατάσταση **εισαγωγής 20% νωπού αέρα** στην ΚΚΜ χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω **Εξίσωση 3**: [19]

$$\dot{Q}_{h,20\%} = \dot{m}_h * c * (t_s - t_M) \text{ [kW]} \quad (3)$$

- \dot{m}_h : η παροχή μάζας του αέρα στην έξοδο του θερμαντικού στοιχείου [kg/s]
- c : ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα με τιμή 1,02 [kJ/kgK]
- t_M : η θερμοκρασία του αέρα στο κιβώτιο μίξης [°C]
- t_s : η θερμοκρασία του αέρα μετά την έξοδο από το θερμαντικό στοιχείο [°C]

Στην περίπτωση **εισαγωγής 100% νωπού αέρα** στην ΚΚΜ, η **ισχύς του ψυκτικού στοιχείου** υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\dot{Q}_{h,100\%} = \dot{m}_h * c * (t_s - t_o) \text{ [kW]} \quad (4)$$

- \dot{m}_h : η παροχή μάζας του αέρα στην έξοδο του θερμαντικού στοιχείου, που ισούται με αυτήν της **Εξίσωσης 1** και της **Εξίσωσης 3** [kg/s]
- c : ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα με τιμή 1,02 [kJ/kgK]
- t_o : η θερμοκρασία του νωπού αέρα [°C]
- t_s : η θερμοκρασία του αέρα μετά την έξοδο από το θερμαντικό στοιχείο [°C]. Ο υπολογισμός της υλοποιείται χάρις του αισθητού φορτίου RSH_H , της παροχής μάζας \dot{m}_h και της θερμοκρασίας του αέρα στον εσωτερικό χώρο t_R .

Παραδοχές

- Οι παραδοχές που αναγράφονται στην **Ενότητα 5.2** «Θερινό Κλίμα» επικολλούνται και στο «Χειμερινό Κλίμα».
- Η παροχή μάζας του αέρα \dot{m}_h είναι ίδια με αυτήν του θερινού κλιματισμού \dot{m}_c διότι το σύστημα της παρούσας μελέτης είναι σταθερού όγκου.

➤ Ισχύς Ανεμιστήρα Προσαγωγής

Το ηλεκτρικό φορτίο του ανεμιστήρα προσαγωγής που απαιτείται για την αντιμετώπιση της πτώσης πίεσης που δημιουργείται εξαιτίας των εγκατεστημένων φίλτρων αυξάνεται καθώς τα φίλτρα φορτίζονται περισσότερο, δηλαδή τα φίλτρα με αυξημένη απόδοση φιλτραρίσματος χρειάζονται και περισσότερο επιπρόσθετο

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

φορτίο. [76][77] Έτσι, η ισχύς που απαιτείται στον ανεμιστήρα προσαγωγής της ΚΚΜ για να διανέμει την απαραίτητη παροχή όγκου του αέρα στον εσωτερικό χώρο του κτηρίου έπειτα από την χρήση των συστημάτων HVAC μπορεί να εκτιμηθεί από την **Εξίσωση 5**. [77]

$$\dot{Q}_{fan} = \frac{Q_{filter}}{\eta_{fan} * \eta_{motor}} * \Delta P_{avg} * 10^{-3} [\text{kW}] \quad (5)$$

- Q_{filter} : Παροχή όγκου του αέρα μέσω του φίλτρου [m^3/s]
- ΔP_{avg} : Η μέση πτώση πίεσης στο φίλτρο [Pa]
- η_{fan} : Η απόδοση του ανεμιστήρα προσαγωγής [%]
- η_{motor} : Η απόδοση του μοτέρ [%]

Η απόδοση του ανεμιστήρα προσαγωγής η_{fan} και του μοτέρ η_{motor} εκτιμώνται πως είναι 70% και 65% αντιστοίχως με βάση την βιβλιογραφία των Bekö κ.α.[76] Η παροχή όγκου του αέρα μέσω του φίλτρου Q_{filter} εντοπίζεται για κάθε ξεχωριστή στρατηγική λειτουργίας HVAC από την **Ενότητα 5.2** «Θερινό Κλίμα», ενώ η μέση στατική πτώση πίεσης του εγκατεστημένου φίλτρου ΔP_{avg} από την **Ενότητα 5.3**, η οποία επέρχεται παρακάτω. Τέλος, ο ανεμιστήρας προσαγωγής θεωρείται πως λειτουργεί στο 100% λειτουργίας του εξεταζόμενου κτηρίου.

5.3 Διερεύνηση απόδοσης και στατικής πτώσης πίεσης των φίλτρων MERV 10, MERV 13 και HEPA

Σε αυτό το στάδιο θα περιγραφεί η μεθοδολογία για τον εντοπισμό της απόδοσης των φίλτρων MERV 10, MERV 13 και HEPA και της στατικής πτώσης πίεσης τους. Η αποτελεσματικότητα αφαίρεσης των μολυσματικών σωματιδίων συνδέεται άμεσα με τον δείκτη αξιολόγησης MERV από το Πρότυπο ASHRAE 52.2. Η σταθμισμένη απόδοση φιλτραρίσματος των μολυσματικών σωματιδίων δίνεται από τη σχέση: [77]

$$\eta_{filter} = \sum_{i=1}^3 (\eta_i * F_i) [\%] \quad (6)$$

- η_i [%]: Αποδοτικότητα των φίλτρων για τη διήθηση ιών με τη χρήση του δείκτη αξιολόγησης MERV από τον **Πίνακα 14**.
- F_i [%]: Το εύρος των κατανομών μεγέθους των μολυσματικών σωματιδίων για τον ιό της γρίπης από τον **Πίνακα 15**, στον οποίο συλλέγονται οι πρόσφατες έρευνες για αυτές τις κατανομές. Να σημειωθεί ότι το περιβάλλον δειγματοληψίας των μελετών περικυκλώνεται από κέντρα υγείας, δωμάτια επειγόντων περιστατικών, κλινικές άμεσης περίθαλψης κλπ.

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

MERV	Εύρος 1 0.3 έως 1.0	Εύρος 2 1.0 έως 3.0	Εύρος 3 3.0 έως 10.0
10	N/A	50%	80%
13	50%	85%	90%
HEPA	99,9%	99,9%	99,9%

Πίνακας 14: Δείκτης αξιολόγησης MERV για τα φίλτρα MERV 10, MERV 13 και HEPA με τη χρήση του Προτύπου ASHRAE 52.2 [61]

Δειγματοληψία Ερευνών	Αναφερόμενη Κατανομή Μεγέθους Σωματιδίων της Γρίπης			Υποθετική Κατανομή του Ιού της Γρίπης με την αξιοποίηση του Προτύπου ASHRAE 52.2 (F_i)		
				0.3 – 1 μm	1 – 3 μm	3 – 10 μm
1 ^η Δειγματοληψία	<1.7μm 32%	1.7 – 4.9μm 16%	>4.9 μm 52%	19%	20%	62%
2 ^η Δειγματοληψία	<1 μm 13%	1-4.1 μm 37%	>4.1 μm 50%	13%	24%	63%
3 ^η Δειγματοληψία	<1 μm 9%	1-4.1 μm 27%	>4.1 μm 64%	9%	17%	74%
4 ^η Δειγματοληψία	<1 μm 4%	1–4μm 49%	>4μm 47%	4%	33%	63%
5 ^η Δειγματοληψία	<1 μm 42%	1–4μm 23%	>4μm 35%	42%	15%	43%
6 ^η Δειγματοληψία	<1 μm 36%	1– 2.5μm 28%	>2.5μm 36%	36%	37%	27%
7 ^η Δειγματοληψία	<1 μm 19.5%	1–4μm 75.5%	>4μm 5%	20%	50%	30%

Πίνακας 15: Ανασκόπηση πρόσφατων μελετών που ανιχνεύουν τον ιό της γρίπης σε δειγματοληπτες σωματιδίων [77]

Κατόπιν της παρούσας μελέτης, πραγματοποιείται ανάλυση της στατικής πτώσης πίεσης των φίλτρων MERV 10, MERV 13 και HEPA. Ο τύπος που αξιοποιείται για τον υπολογισμό της αναγράφεται ως εξής: [5]

$$\Delta P_{filter} = k_{filter} * \dot{m}_{filter}^2 \text{ [Pa]} \quad (7)$$

- k_{filter} : Σταθερά η οποία υπολογίζεται από το κλάσμα $\frac{\Delta p_{nom}}{\dot{m}_{nom}^2}$, όπου Δp_{nom} η ονομαστική πτώση πίεσης στην ονομαστική παροχή μάζας \dot{m}_{nom}^2 [Pa/(kg/s)²]
- \dot{m}_{filter}^2 : Παροχή μάζας του αέρα μέσω του φίλτρου [kg/s]

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε πραγματικές συνθήκες, η στατική πτώση πίεσης των φίλτρων αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου, αλλά για λόγους απλότητας

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

θεωρείται αμετάβλητη. Επιπροσθέτως, παρόμοια φίλτρα με τον ίδιο δείκτη αξιολόγησης MERV μπορούν να έχουν διαφορετικές πτώσεις πιέσεων ανάλογα με τον τύπο και το βάθος του φίλτρου, επομένως, για τη συγκεκριμένη εργασία, η παραμετροποίηση αυτών των χαρακτηριστικών θεωρείται αυθαίρετη. Έτσι, η επιλογή των ονομαστικών πτώσεων πιέσεων ΔP_{nom} υλοποιείται με βάση το μέσο όρο μεταξύ της τυπικής αρχικής πτώσης πίεσης του φίλτρου και της τελικής πτώσης πίεσης που συνιστά ο κατασκευαστής και για ονομαστική παροχή της μάζας που ισούται με 1.0 kg/s και αποτυπώνονται στον **Πίνακας 16**. [5] Να σημειωθεί ότι για την παρούσα μελέτη, η ονομαστική πτώση πίεσης ΔP_{nom} ισούται με την μέση πτώση πίεση στο φίλτρο, η οποία αναφέρεται στην **Ενότητα 5.2**. Τέλος, οι παροχές των μαζών του αέρα μέσω των φίλτρων υπολογίστηκαν από την **Ενότητα 5.2**.

Φίλτρο	Παροχή Μάζας Αέρα \dot{m}_{filter} (kg/s)	Ονομαστική Πτώση Πίεσης ΔP_{nom} (Pa)
MERV 10	2,43	143
MERV 13	2,52	162
HEPA	2,82	374

Πίνακας 16: Δεδομένα εύρεσης της στατικής πτώσης πίεσης για κάθε φίλτρο HVAC

5.4 Διερεύνηση συγκέντρωσης του COVID-19 στον εσωτερικό χώρο του κτηρίου

Η φιλοσοφία του εντοπισμού της συγκέντρωσης του ιού στον εσωτερικό χώρο του εξεταζόμενου κτηρίου στηρίζεται σε μια σημαντική παράμετρο, στον Ρυθμό Εκπομπής Κβάντων (ER_q) [78], όπου διαθέτει μεγάλο βαθμό δυσκολίας στην ποσοτικοποίηση του εξαιτίας της εξάρτησής του από αβέβαιες παραμέτρους [5]. Ως κβάντο ορίζεται ως η δόση πυρήνων αερομεταφερόμενων σταγονιδίων που απαιτείται για την πρόκληση λοίμωξης στο 63% των ευπαθών ατόμων [78].

Εν ολίγοις, η συγκέντρωση των κβάντων ή αλλιώς η συγκέντρωση του ιικού φορτίου τη χρονική στιγμή t , σε ένα εσωτερικό περιβάλλον βασίζεται στο ισοζύγιο μάζας των κβάντων και μπορεί να εκτιμηθεί ως εξής: [78]

$$n(t) = n_o * e^{-IVRR*t} + \frac{ER_q * I}{IVRR * V} * (1 - e^{-IVRR*t}) \quad [\text{quanta/m}^3] \quad (8)$$

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

- n_o : Η αρχική συγκέντρωση του ιού για την χρονική στιγμή $t = 0$, η οποία υπολογίζεται από τη σχέση $n_o = \frac{ER_q * I}{V}$ [quanta/m³]
- $IVRR$: Ο ρυθμός απομάκρυνσης των μολυσματικών ιών στον εξεταζόμενο χώρο [h⁻¹]
- V : Ο όγκος του εξεταζόμενου χώρου [m³]
- I : Ο αριθμός των επιρρεπών ατόμων για μόλυνση από τον ιό
- ER_q : Ο Ρυθμός Εκπομπής Κβάντων [quanta/h]

Η **Εξίσωση 8** εφαρμόζεται στο υποθετικό κτήριο εκπαίδευσης, όπου ο όγκος του είναι $V = 2400\text{m}^3$ και θεωρήθηκε ότι στο κτήριο υπάρχουν $N = 200$ μαθητές, υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας του. Στην παρούσα μελέτη, το συγκεκριμένο κτήριο εκπαίδευσης λειτουργεί από τις 8:00 AM έως τις 8:00 PM. Δημιουργείται η υπόθεση της ύπαρξης ενός άρρωστου ατόμου στον εσωτερικό χώρο [5][77], ο οποίος είναι μολυσμένος με τον ιό του SARS-COV-2. Το συγκεκριμένο άτομο εισέρχεται στο κτήριο εκπαίδευσης κατά τις 9:00AM και θεωρείται πως η αίθουσα δεν αδειάζει από άτομα για όλη την χρονική περίοδο λειτουργίας του εξεταζόμενου κτηρίου. Επομένως, για ευνόητους λόγους ισχύει η ισότητα $I = N - 1 = 199$ για όσο βρίσκεται το άρρωστο άτομο εντός του εσωτερικού χώρου.

Στη συνέχεια, ο ρυθμός απομάκρυνσης του μολυσματικών ιών στον εξεταζόμενο χώρο $IVRR$ είναι συνάρτηση 3 παραμέτρων. Στην παρούσα μελέτη, η επιλογή αυτών των παραμέτρων έγινε βάση ερευνών των **Cary κ.α.** [5], **Parham κ.α.** [77], **Buonanno κ.α.** [78] και **Leonard κ.α.** [57] και οι επεξηγήσεις τους παρουσιάζονται ως εξής:

$$IVRR = f(\lambda, k_{filter}, k_{decay}) \quad (9)$$

- $\lambda = \frac{Q_{oa}}{V}$ [h⁻¹]: Ο ρυθμός αερισμού του εξωτερικού νωπού αέρα, όπου Q_{oa} η παροχή μάζας του νωπού αέρα και V ο όγκος του εξεταζόμενου χώρου.
- $k_{filter} = f_{HVAC} * \frac{Q_{filter} * \eta_{filter}}{V}$ [h⁻¹]: Ο ρυθμός απομάκρυνσης των μολυσματικών σωματιδίων λόγω της διήθησης, όπου f_{HVAC} ο κλασματικός χρόνος λειτουργίας HVAC που ισούται με 1 ($f_{HVAC} = 1$), Q_{filter} η παροχή όγκου του αέρα μέσω του φίλτρου, η_{filter} η απόδοση του φίλτρου και V ο όγκος του εξεταζόμενου χώρου.
- k_{decay} [h⁻¹]: Ο ρυθμός αποσύνθεσης του ιού.

Στις παραμέτρους λ και k_{filter} ενσωματώνονται δεδομένα τα οποία εντοπίζονται από τα προηγούμενα στάδια της μεθοδολογικής προσέγγισης. Η παράμετρος k_{decay} θεωρείται ως σταθερά που σχετίζεται με την επιφάνεια των αντικειμένων και η αριθμητική τιμή της αντικατοπτρίζει πόσο γρήγορα διασπώνται οι ιοί σε αναστολή σε κάποια επιφάνεια. Για την παρούσα εργασία ο ρυθμός αποσύνθεσης του ιού k_{decay} επιλέγεται να ισούται με $0,48 \text{ h}^{-1}$ [57]. Συνοπτικά, οι τιμές των παραμέτρων $IVRR$ παρουσιάζονται στον παρακάτω **Πίνακας 17**.

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ HVAC	λ (h ⁻¹)	k_{filter} (h ⁻¹)	k_{decay} (h ⁻¹)	IVRR (h ⁻¹)
ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΚΚΜ	0,55	0,00	0,48	1,03
100% N.A.	2,77	0,00	0,48	3,25
MERV 10	0,60	1,32	0,48	2,39
MERV 13	0,62	1,99	0,48	3,09
HEPA	0,70	2,78	0,48	3,95

Πίνακας 17: Τιμές των παραμέτρων IVRR

Όσον αφορά τον Ρυθμό Εκπομπής Κβάντων ER_q , επιλέγονται τρεις διαφορετικές τιμές από την βιβλιογραφία των **Buonanno κ.α.**[78], οι οποίες είναι $ER_q = 10$ quanta/h, $ER_q = 100$ quanta/h, $ER_q = 270$ quanta/h. Αυτοί οι ρυθμοί παραγωγής του ιού καλύπτουν ένα εύρος δραστηριοτήτων ενός αρρώστου, ο οποίος βρίσκεται σε μια αίθουσα συνεδριάσεων ή σε κάποιο αμφιθέατρο. Η διαφοροποίηση των τιμών ER_q πραγματοποιείται για την σύγκριση της συμπεριφοράς του ιού σε έναν εσωτερικό χώρο.

Για να αξιολογηθεί σωστά η έννοια της συγκέντρωσης του ιού σε ένα εσωτερικό χώρο $n(t)$ πρέπει να συνδυαστεί με τον προβλεπόμενο αριθμό λοιμώξεων στην πάροδο του χρόνου $R_o(t)$ και μπορεί να υπολογιστεί ως εξής [5]:

$$R_o(t) = I * R(t) \quad (10)$$

- I : Ο αριθμός των επιρρεπών ατόμων ως προς την μόλυνση του ιού ($I = N - 1 = 199$)
- $R(t)$: Ο κίνδυνος μόλυνσης με βάση τη συγκέντρωση του ιού, που υπολογίζεται με τη χρήση της προσέγγισης Wells-Riley και αποτυπώνεται ως $R(t) = 1 - \exp(-p * \int_{t_1}^{t_2} n(t) dt)$, όπου p ο ρυθμός εισπνοής που ισούται με $0,54 \text{ m}^3/\text{h}$ [78] και $\int_{t_1}^{t_2} n(t) dt$. Η εξίσωση Wells-Riley απαιτεί οι παροχές του αέρα, ο Ρυθμός Εκπομπής Κβάντων (ER_q) και οι συγκεντρώσεις των μολυσματικών παραγόντων να βρίσκονται σε σταθερή κατάσταση [57].

5.5 Ανάλυση του λειτουργικού κόστους των συστημάτων HVAC

Η απόδοση των συστημάτων HVAC πρέπει να συνδυαστεί και με οικονομικούς όρους διότι έχει αποδειχθεί από μια μεγάλη γκάμα ερευνητών πως όσο πιο αποδοτικό θεωρείται ένα σύστημα, δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η διηθητική μηχανική των φίλτρων και ο ρυθμός εισαγωγής του νωπού αέρα στην ΚΚΜ, τόσο αυξάνονται τα λειτουργικά κόστη, όπως θα αποτυπωθεί και στη συνέχεια. Τα

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

συνολικά λειτουργικά κόστη στη παρούσα μελέτη κατηγοριοποιούνται σε όρους καταναλισκόμενης ενέργειας λόγω της παροχής του νωπού αέρα και σε όρους χρήσης των φίλτρων HVAC. Επίσης, θα υπάρξουν και τα αποτελέσματα από τα κόστη αγοράς και εργασίας των φίλτρων HVAC, όπου αυτά θεωρούνται δευτερεύοντα κόστη για την συγκεκριμένη μελέτη.



Γράφημα 4: Κατηγοριοποίηση λειτουργικών κοστών συστημάτων HVAC

➤ **Λειτουργικό κόστος καταναλισκόμενης ενέργειας παροχής νωπού αέρα**

Η ποσότητα της ενέργειας που απαιτείται για την επίτευξη του κλιματισμού του αισθητού φορτίου του εσωτερικού χώρου εξαιτίας του αερισμού του εξωτερικού νωπού αέρα μπορεί να εκτιμηθεί με τη χρήση των Βαθμοημερών Θέρμανσης **HDD** (χειμερινό κλίμα) και των Βαθμοωρών Ψύξης **CDH** (θερινό κλίμα), οι οποίες εντοπίστηκαν με την βοήθεια του ΤΟΤΕΕ 20701-3/2010 [79] και παρουσιάζονται στον **Πίνακας 18** και **Πίνακας 19**, αντιστοίχως. Να σημειωθεί πως οι **HDD** και **CDH** υπολογίζονται για τις ημέρες λειτουργίας του εξεταζόμενου κτηρίου. Η **Εξίσωση 11** επιδεικνύει την ετήσια καταναλισκόμενη ενέργεια για τη θέρμανση του εξεταζόμενου κτηρίου, ενώ η **Εξίσωση 12** για την ψύξη του. Το **Γράφημα 5** παρουσιάζει τη συμπεριφορά της καταναλισκόμενης ενέργειας παροχής νωπού αέρα E συναρτήσει του ρυθμού αερισμού του εξωτερικού λ για τιμές μεταξύ 0,5-3,0 1/h. Οι προαναφερόμενες εξισώσεις υποθέτουν πως η παροχή του νωπού αέρα στον εσωτερικό χώρο δεν μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του χρόνου λειτουργίας του κτηρίου. [77] Επίσης, στην παρούσα μελέτη, οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για την ψύξη του εσωτερικού χώρου λειτουργούν με ηλεκτρική ενέργεια ενώ αυτές για την θέρμανση με φυσικό αέριο.

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

$$E_h = \lambda * V * \rho_{air} * C_p * HDD * \frac{1}{\eta_h} * \alpha \text{ [kWh]} \quad (11)$$

- $\lambda [h^{-1}]$: Ο ρυθμός αερισμού του εξωτερικού νωπού αέρα, που εντοπίζεται στην **Ενότητα 5.4**
- $V [m^3]$: Ο όγκος του εξεταζόμενου χώρου
- $\rho_{air} [\frac{kg}{m^3}]$: Η πυκνότητα του αέρα (1,2 kg/m³)
- $C_p [\frac{kJ}{kgK}]$: Ειδική Θερμοχωρητικότητα του αέρα (1,02kJ/kgK)
- **HDD [K*days]**: Βαθμοημέρες Θέρμανσης
- η_h [%]: Απόδοση Λέβητα (90%)
- α : Συντελεστής μετατροπή των μονάδων μέτρησης της εξίσωσης (24h/day * 0,277 kWh/MJ * 10⁻⁶MJ/J)

Αντιστοίχως:

$$E_c = \lambda * V * \rho_{air} * C_p * CDH * \frac{1}{\eta_c} * \alpha \text{ [kWh]} \quad (12)$$

- **CDH [K*days]**: Βαθμοώρες Ψύξης
- η_c [%]: Απόδοση αερόψυκτου ψύκτη (EER = 2,82)

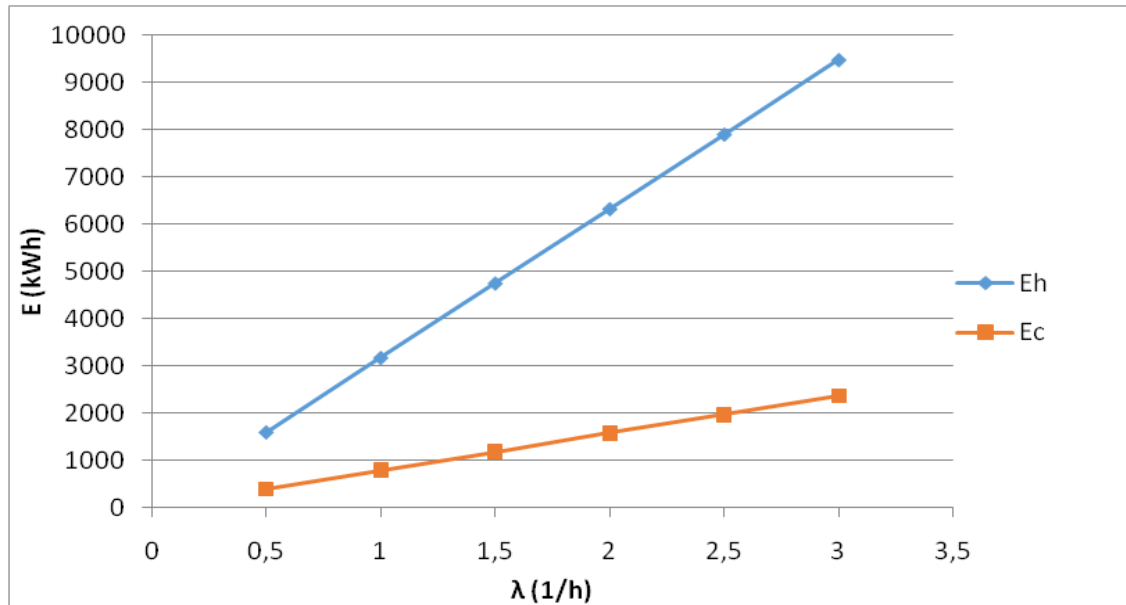
HDD					
ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡΤ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ
147	113	115	9	-	-
ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠΤ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
-	-	-	-	32	40

Πίνακας 18: Βαθμοημέρες Θέρμανσης με τη χρήση του ΤΟΤΕΕ 20701-3/2010

CDH					
ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡΤ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ
-	-	-	-	-	11
ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠΤ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
70	32	-	-	-	-

Πίνακας 19: Βαθμοώρες Ψύξης με τη χρήση του ΤΟΤΕΕ 20701-3/2010

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19



Γράφημα 5: Καταναλισκόμενη ενέργεια παροχής νωπού αέρα συναρτήσει του ρυθμού αερισμού του εξωτερικού νωπού αέρα

Επομένως, το κόστος της καταναλισκόμενης ενέργειας παροχής του νωπού αέρα για το χειμερινό και το θερινό κλίμα υπολογίζεται με την αξιοποίηση των παρακάτω σχέσεων: [77]

$$C_{heating} = E_h * P_{heating} \text{ [€]} \quad (13)$$

- E_h [kWh]: Ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την θέρμανση του κτηρίου, η οποία μετρήθηκε από την **Εξίσωση 11**.
- $P_{heating}$ [€/kWh]: Τιμή φυσικού αερίου ανά kWh (0,145€/kWh) [81]

$$C_{cooling} = E_c * P_{electricity} \text{ [€]} \quad (14)$$

- E_c [kWh]: Ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την ψύξη του κτηρίου, η οποία μετρήθηκε από την **Εξίσωση 12**.
- $P_{electricity}$ [€/kWh]: Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας ανά kWh (0,157€/kWh) [81]

➤ **Λειτουργικό κόστος φίλτρων HVAC**

Το επιπρόσθετο κόστος για την διήθηση των ιών με την βοήθεια των φίλτρων HVAC μπορεί να εκφραστεί με την ισχύ του ανεμιστήρα προσαγωγής, το οποίο προέκυψε από τη σχέση: [76]

$$C_{fan} = \dot{Q}_{fan} * t_{operating} * P_{electricity} \text{ [€]} \quad (15)$$

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων
κατά την πανδημία COVID-19

- \dot{Q}_{fan} [kW]: Η ισχύς του ανεμιστήρα προσαγωγής, που υπολογίζεται από την Εξίσωση 5.
- $t_{operating}$ [h]: Ο χρόνος λειτουργίας του εξεταζόμενου κτηρίου (2640h)

6. Αποτελέσματα και Σχολιασμοί

Σε αυτό το στάδιο, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από την επίλυση των μεθοδολογικών βημάτων με μια γκάμα από πίνακες και γραφήματα, καθώς και με περαιτέρω σχολιασμούς. Αρχικά, θα αποτυπωθούν τα αποτελέσματα της ισχύς του ψυκτικού και θερμαντικού στοιχείου και του φορτίου του ανεμιστήρα προσαγωγής του αέρα για κάθε στρατηγική λειτουργίας HVAC και θα ακολουθήσουν αυτά της απόδοσης των φίλτρων HVAC και της στατικής πτώσης πίεσης που προκαλείται από αυτά. Στη συνέχεια, θα πραγματοποιηθεί ανάλυση για τα αποτελέσματα της συγκέντρωσης του ιού και του προβλεπόμενου αριθμού των λοιμώξεων στον εσωτερικό χώρο του εξεταζόμενου κτηρίου. Τέλος, θα περιγραφούν τα αποτελέσματα του λειτουργικού κόστους για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις των συστημάτων HVAC, προσθέτοντας μια αναφορά στα κόστη των φίλτρων HVAC.

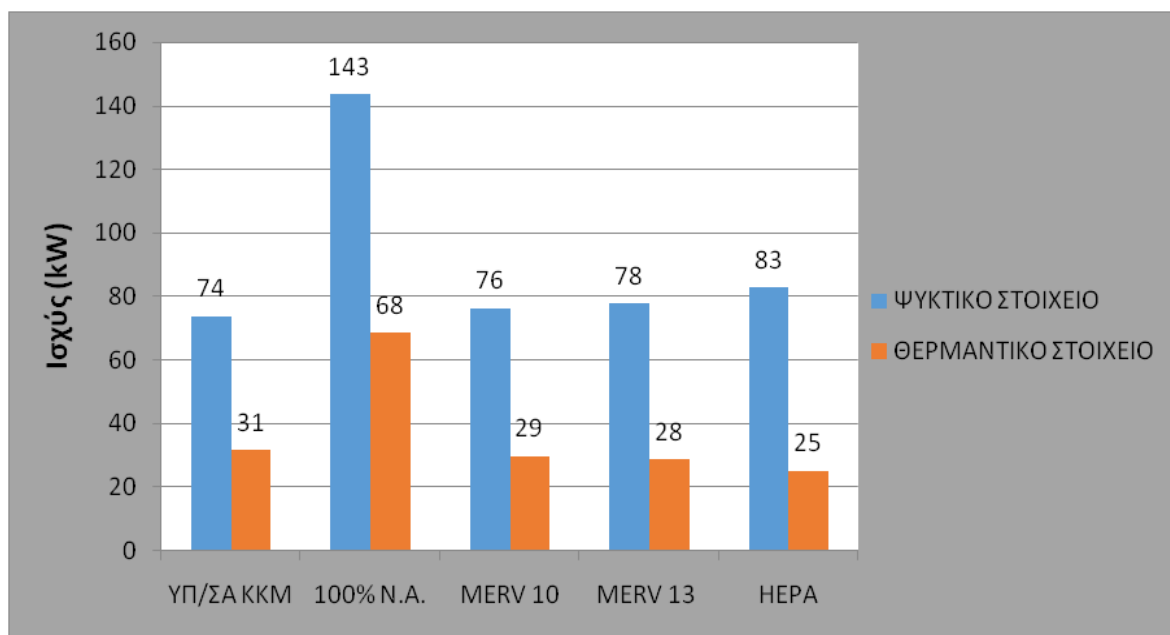
6.1 Ισχύς Ψυκτικού και Θερμαντικού Στοιχείου και του Ανεμιστήρα Προσαγωγής

Το συγκεκριμένο στάδιο πραγματοποιείται με στόχο την κατανόηση της επίδρασης των συστημάτων HVAC στις συσκευές που είναι απαραίτητες για τον σωστό κλιματισμό του εσωτερικού χώρου. Τα αποτελέσματα της ψυκτικής ισχύς και της ισχύς του θερμαντικού στοιχείου αποτυπώνονται συνδυαστικά στον **Πίνακα 20** στο **Γράφημα 6**. Στην παρούσα έρευνα, η ισχύς του ψυκτικού στοιχείου κυριαρχεί αυτής του θερμαντικού στοιχείου λόγω της κλιματικής ζώνης στην οποία βρίσκεται το υποθετικό κτήριο εκπαίδευσης (Ζώνη Β), συνεπώς επικρατούν τα ψυκτικά φορτία. Σημαντικό ρόλο παίζει και η κατάσταση στην οποία βρίσκεται η ΚΚΜ, η οποία είναι σταθερού όγκου με συνέπεια να μην μεταβάλλεται η παροχή μάζας και όγκου που διέρχεται από τα στοιχεία. Όσον αφορά τις στρατηγικές λειτουργίες HVAC, γίνεται κατανοητό μέσω του γραφήματος πως την μεγαλύτερη ισχύ την κατέχει το σύστημα εισαγωγής 100% νωπού αέρα (N.A.) εξαιτίας της υψηλής τιμής της ενθαλπίας του εξωτερικού αέρα ($h = 91,5 \text{ kJ/kg}$) στο θερινό κλίμα και της χαμηλής θερμοκρασίας ξηρού βολβού ($t_{db} = 2 \text{ }^\circ\text{C}$) στο χειμερινό κλίμα. Λόγω αυτής της κατάστασης, το σύστημα 100% N.A. θέτει στο ψυκτικό στοιχείο να λειτουργεί με 49% περισσότερη ισχύ από την περίπτωση της υπάρχουσας ΚΚΜ και με 42% περισσότερη από της περίπτωσης του φίλτρου HEPA και το θερμαντικό στοιχείο με 54% και 64% αντιστοίχως.

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ	ΙΣΧΥΣ ΨΥΚΤΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ (kW)	ΙΣΧΥΣ ΘΕΡΜΑΝΤΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ (kW)	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΙΣΧΥΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (kW)
ΥΠ/ΣΑ ΚΚΜ	74	31	105
100% N.A.	143	68	212
MERV 10	76	29	106
MERV 13	78	28	106
HEPA	83	25	108

Πίνακας 20: Ισχύς Ψυκτικού και Θερμαντικού Στοιχείου για κάθε στρατηγική λειτουργίας HVAC



Γράφημα 6: Ψυκτική Ισχύς και Ισχύς Θερμαντικού Στοιχείου για κάθε στρατηγική λειτουργίας HVAC του προβλήματος

Στην περίπτωση των φίλτρων MERV 10, MERV 13 και HEPA παρατηρείται μια μικρή ανάπτυξη στην ψυκτική ισχύ. Το φίλτρο MERV 10 αυξάνει τα φορτία του ψυκτικού στοιχείου κατά 3% από την περίπτωση του ήδη υπάρχοντος φίλτρου της ΚΚΜ, το φίλτρο MERV 13 τα αυξάνει κατά 2% στην περίπτωση του φίλτρου MERV 10 και το φίλτρο HEPA κατά 6% στην περίπτωση του φίλτρου MERV 13. Αυτό οφείλεται στην δημιουργία των θερμικών κερδών χάρις της παρουσίας της υψηλής στατικής πτώσης πίεσης εξαιτίας της αντίστασης της ροής του αέρα από τα φίλτρα. Συνεπώς, όσο μεγαλώνει η πτώση πίεσης τόσο προστίθενται τα θερμικά κέρδη στον χώρο με άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας προσαγωγής του αέρα που συνεπάγεται με την ανάπτυξη της ενθαλπίας προσαγωγής του αέρα που εξέρχεται από το ψυκτικό στοιχείο.[82]

Το χειμερινό κλίμα παρουσιάζει μια αντίθετη συμπεριφορά από το θερινό κλίμα. Η ισχύς του θερμαντικού στοιχείου στην περίπτωση του φίλτρου HEPA είναι μικρότερη κατά 6% στην περίπτωση του φίλτρου MERV 13, 8% στην περίπτωση του

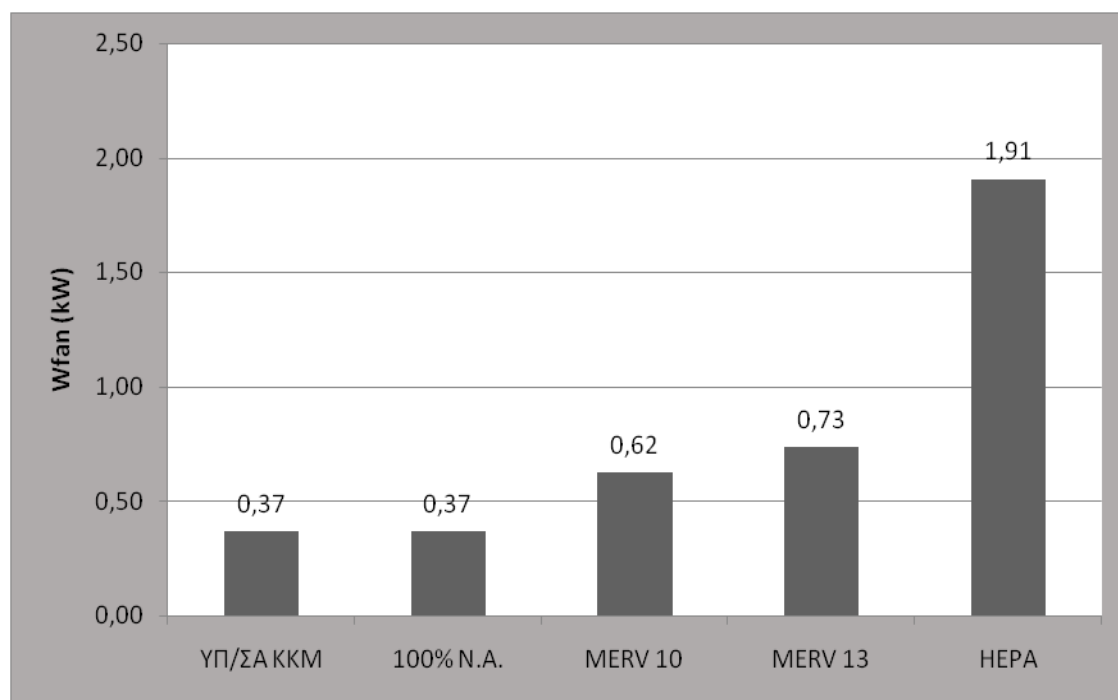
Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

φίλτρου MERV 10 και 11% στην περίπτωση της υπάρχουσας ΚΚΜ. Αυτό προκύπτει ξανά στην ύπαρξη της δημιουργίας θερμικών κερδών στο εσωτερικό χώρο μόνο που στο χειμερινό κλίμα επιφέρει θετικές επιδράσεις, διότι αυτά τα θερμικά κέρδη προσφέρουν θερμότητα στο εξεταζόμενο κτήριο. Με άλλα λόγια, στην παρούσα μελέτη, θεωρήθηκε πως όσο πιο αποδοτικό είναι το φίλτρο HVAC στην εγκατάσταση κλιματισμού τόσο πιο μειωμένη θεωρείται η θερμοκρασία του αέρα που εξέρχεται από το θερμαντικό στοιχείο (π.χ. η θερμοκρασία του αέρα που εξέρχεται από το φίλτρο HEPA είναι χαμηλότερη από αυτή που εξέρχεται από το φίλτρο MERV 13).

Τα αποτελέσματα της επίλυσης της **Εξίσωσης 5**, η οποία αφορά την εκτίμηση της ισχύος του ανεμιστήρα προσαγωγής, δείχνονται στο **Πίνακα 21** και στο **Γράφημα 7**.

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ	ΙΣΧΥΣ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑ (kW)
ΥΠ/ΣΑ ΚΚΜ	0,37
100% N.A.	0,37
MERV 10	0,62
MERV 13	0,73
HEPA	1,91

Πίνακας 21: Ισχύς Ανεμιστήρα Προσαγωγής για κάθε στρατηγική λειτουργίας HVAC του προβλήματος



Γράφημα 7: Ισχύς Ανεμιστήρα Προσαγωγής για κάθε στρατηγική λειτουργίας HVAC του προβλήματος

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

Όπως γίνεται αντιληπτό, όσο αυξάνεται η απόδοση των φίλτρων τόσο αναπτύσσονται μεγαλύτερα φορτία στον ανεμιστήρα προσαγωγής. Το γεγονός αυτό συμβαίνει επειδή ο ανεμιστήρας προσαγωγής πρέπει να καταπολεμήσει την αντίσταση της ροής του αέρα (στατική πτώση πίεσης) που προκαλείται από την υψηλή φόρτιση των φίλτρων. Επιπροσθέτως, η αυξημένη αντίσταση της ροής του αέρα οδηγεί στη ΚΚΜ να εισάγει περισσότερη ποσότητα νωπού αέρα, με άμεση συνέπεια την αύξηση της παροχής μάζας ή όγκου στον εσωτερικό χώρο του κτηρίου. Επομένως, στην συγκεκριμένη έρευνα, το φορτίο του ανεμιστήρα προσαγωγής στην περίπτωση του φίλτρου MERV 10 αποδεικνύεται πως είναι κατά 41% περισσότερο από το φορτίο της περίπτωσης της υπάρχουσας ΚΚΜ και της εισαγωγής 100% Ν.Α. , ενώ στη περίπτωση του φίλτρου MERV 13 είναι κατά 15% περισσότερο από αυτό της περίπτωσης του φίλτρου MERV 10. Τέλος, παρατηρείται μια σημαντική διαφορά μεταξύ του φίλτρου HEPA και των υπολοίπων στρατηγικών, όπου στην υπόθεσή του αναγκάζει τον ανεμιστήρα προσαγωγής να λειτουργεί με 62% μεγαλύτερη ισχύ από την υπόθεση του φίλτρου MERV 13.

6.2 Απόδοση Φίλτρων HVAC και Στατική Πτώση Πίεσης

Σε αυτό το στάδιο θα διεξαχθούν τα αποτελέσματα για την απόδοση των φίλτρων HVAC και της στατικής πτώσης πίεσης που αναπτύσσεται στο σύστημα της ΚΚΜ. Ο **Πίνακας 22** περιλαμβάνει τις τιμές της απόδοσης των φίλτρων HVAC, έπειτα από την εκτέλεση της **Εξίσωσης 6**.

ΦΙΛΤΡΑ	MERV 10	MERV 13	HEPA
$\eta_{\text{filter}} (\%)$	55%	81%	99,90%

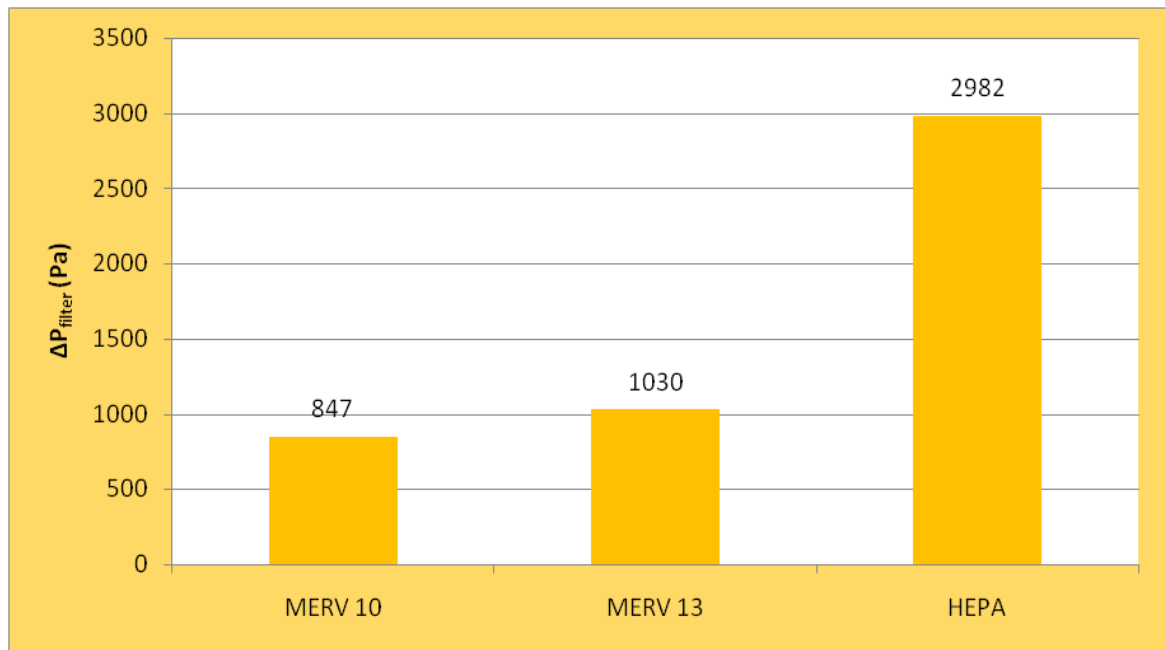
Πίνακας 22: Αποδόσεις φίλτρων HVAC του προβλήματος

Είναι προφανές και από το παραπάνω πίνακα πως το πιο αποδοτικό φίλτρο για την ευνοϊκότερη διήθηση του αέρα από τον ιό του SARS-COV-2 είναι το φίλτρο HEPA με ποσοστό που φτάνει στο 99,90%, όπου ακολουθεί το φίλτρο MERV 13 με ποσοστό στο 81% και τελευταία επιλογή για το αποτελεσματικότερο φιλτράρισμα την κατέχει το φίλτρο MERV10 με ποσοστό στο 55%. Όπως δείχνει και ο **Πίνακας 14**, το φίλτρο HEPA έχει την ικανότητα να φιλτράρει όλα τα εύρη μεγεθών των ιών (0.3 – 1.0 μm , 1.0 – 3.0 μm και 3.0 – 10.0 μm) με το ίδιο υψηλό ποσοστό στο 99,90%, επομένως σε επίπεδο φιλτραρίσματος θεωρείται σε μεγάλο βαθμό κατάλληλο για την αντιμετώπιση του ιού COVID-19. Επίσης, το φίλτρο MERV 13 μπορεί να εκφραστεί ως ικανοποιητικό φίλτρο για την καταπολέμηση του SARS-COV-2, διότι φιλτράρει τους ιούς με εύρος 0,3 έως 1,0 μm και με εύρος 1,0 έως 3,0 μm με ποσοστό 50% και

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

85% αντιστοίχως, εύρη στα οποία εντάσσεται και το μέγεθος του COVID-19. Το φίλτρο MERV 10 δεν διαθέτει τα ίδια επίπεδα απόδοσης με τα υπόλοιπα του προβλήματος γιατί μπορεί να διηθήσει μόνο τα εύρη 1,0 έως 3,0 μm και εύρη 3,0 έως 10,0 μm σε ποσοστό 50% και 80% αντιστοίχως.

Όσον αφορά το κομμάτι της στατικής πτώση πίεσης που οφείλεται από την αντίσταση των φίλτρων, το **Γράφημα 8** αποτυπώνει τα αποτελέσματα από την επίλυση της **Εξίσωσης 7**. Το φίλτρο MERV 13 προκαλεί 12% μεγαλύτερη πτώση πίεσης από το φίλτρο MERV 10, ενώ το φίλτρο HEPA 57% μεγαλύτερη από το φίλτρο MERV 13. Η αξιοσημείωτη διαφορά που υπάρχει ανάμεσα στο φίλτρο HEPA και στα υπόλοιπα του προβλήματος οφείλεται μεν στην υψηλότερη παροχή μάζας που διέρχεται από το φίλτρο ($\dot{m}_{filter} = 2,82 \text{ kg/s}$) αλλά κυρίως στην ονομαστική πτώση πίεσης του ΔP_{nom} η οποία είναι ανάλογη της στατικής πτώσης πίεσης ΔP_{filter} .



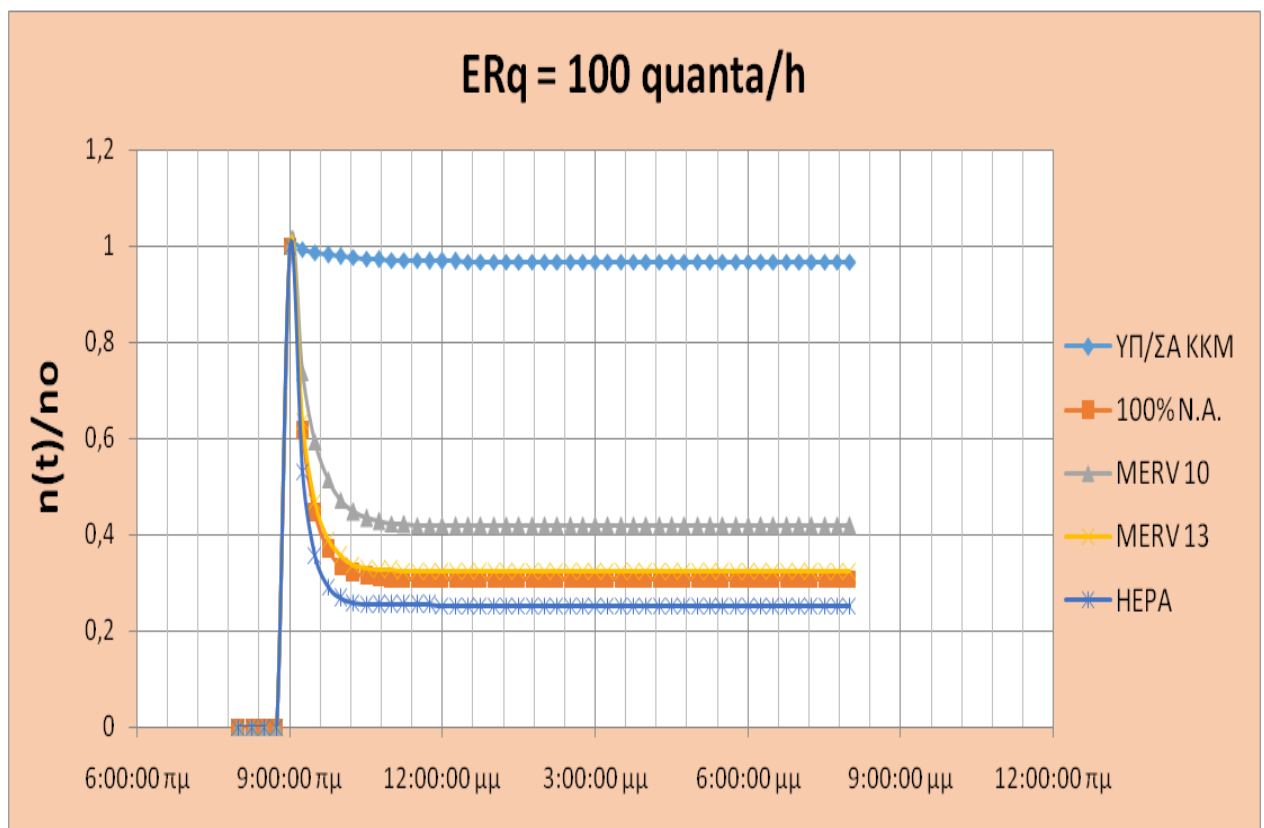
Γράφημα 8: Στατική Πτώση Πίεσης λόγω της αντίστασης των φίλτρων HVAC

6.3 Συγκέντρωση Ιού και Προβλεπόμενος Αριθμός Λοιμώξεων

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, οι στρατηγικές λειτουργίας συστημάτων HVAC του προβλήματος (φίλτρα HVAC, εισαγωγή 100 N.A.) έχουν ως βασικό στόχο την βελτίωση της Ποιότητας Εσωτερικού Αέρα του εσωτερικού χώρου του εξεταζόμενου κτηρίου. Τα αποτελέσματα της συγκέντρωσης του ιού και του προβλεπόμενου αριθμού λοιμώξεων παρουσιάζονται από μια σειρά διαγραμμάτων, ώστε να κατανοήσει ο αναγνώστης την σημαντικότητα της χρήσης των στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC στην καταπολέμηση της εξάπλωσης του COVID-19.

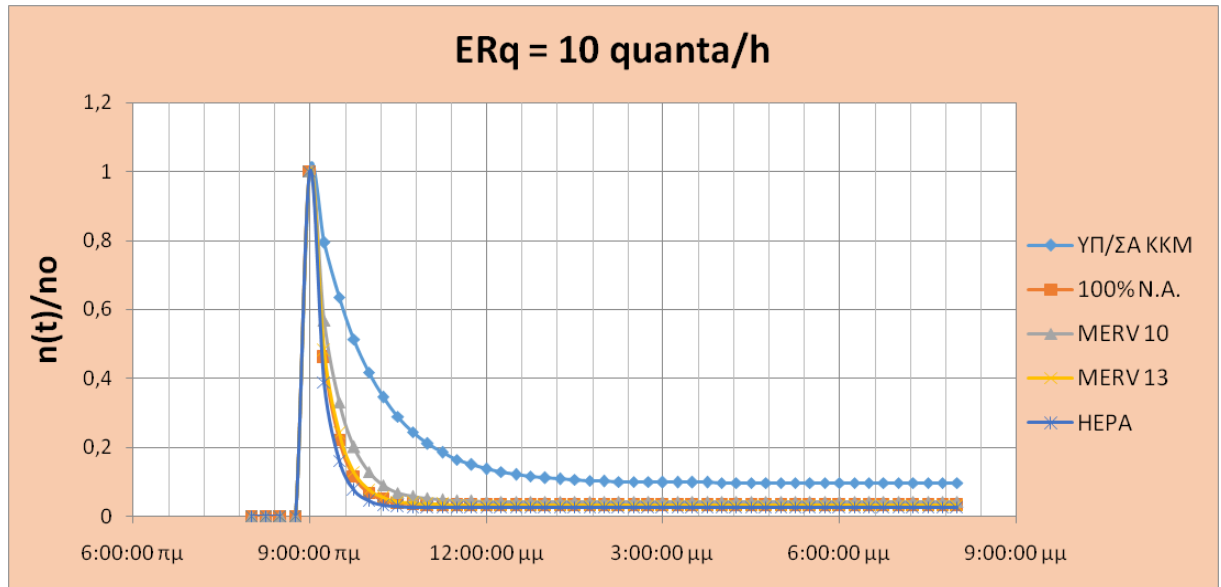
Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

Το **Γράφημα 9**, το **Γράφημα 10** και το **Γράφημα 11** αποτυπώνουν την ημερήσια συμπεριφορά της συγκέντρωσης του ιού στον εσωτερικό χώρο του υποθετικού κτηρίου εκπαίδευσης για τις τρεις διαφορετικές τιμές ER_q (Ρυθμός Παραγωγής Κβάντων). Η επιλογή των τριών αυτών τιμών ($ER_q = 100$ quanta/h, $ER_q = 10$ quanta/h, $ER_q = 270$ quanta/h) έγινε με γνώμονα την δραστηριότητα του αρρώστου, όπως αναφέρεται και στην **Ενότητα 5.4**. Στην εκάστοτε εργασία, η ανάλυση της συγκέντρωσης του ιού δεν επηρεάζεται από το κλίμα (χειμερινό ή θερινό) διότι η ΚΚΜ λειτουργεί υπό σταθερό όγκο επομένως, η παροχή του νωπού αέρα στο χειμερινό κλίμα ισούται με την παροχή του αέρα στο θερινό κλίμα. Επίσης, η συνάρτηση της συγκέντρωσης του ιού $n(t)$ είναι ομαλοποιημένη με την αρχική συγκέντρωση, η οποία υπολογίζεται από το γινόμενο του ρυθμού παραγωγής του ιού με τη μεσαία δραστηριότητα του μολυσμένου ατόμου ($ER_q = 100$ quanta/h) επί τον αριθμό των επιρρεπών ατόμων για μόλυνση από τον ιό ($I = 199$) διαιρεμένο με τον όγκο του κτηρίου ($V = 2400$ m³).

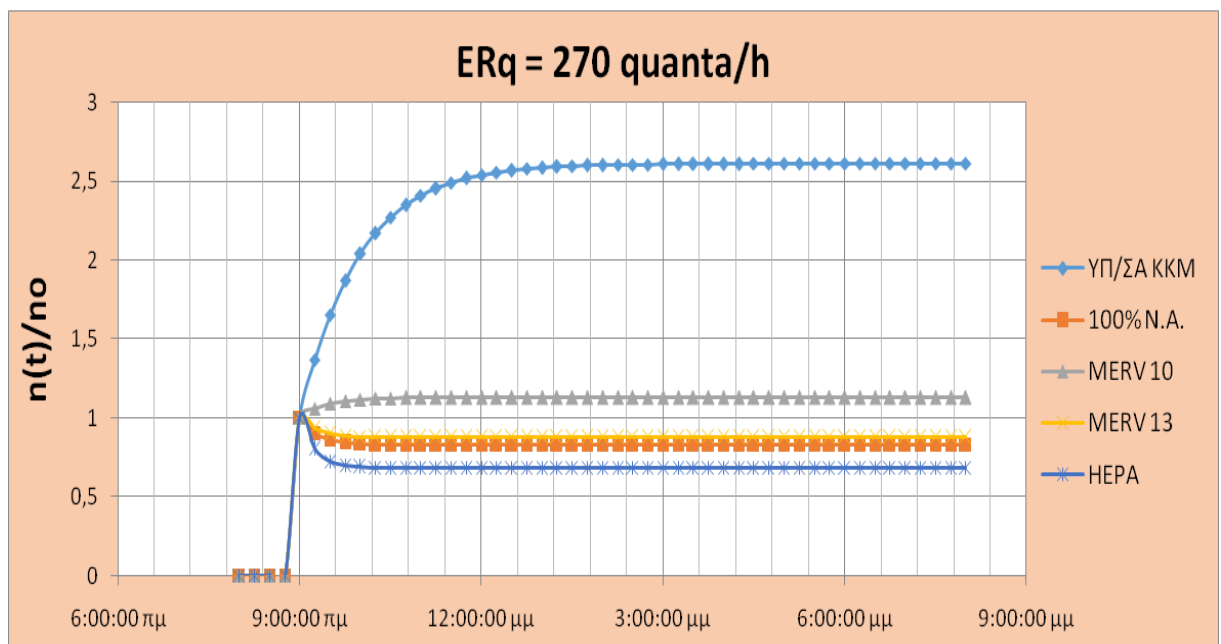


Γράφημα 9: Ομαλοποιημένη συγκέντρωση του COVID-19 στον εσωτερικό χώρο για $ER_q = 100$ quanta/h

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19



Γράφημα 10: Ομαλοποιημένη συγκέντρωση του COVID-19 στον εσωτερικό χώρο για $ER_q = 10$ quanta/h



Γράφημα 11: Ομαλοποιημένη συγκέντρωση του COVID-19 στον εσωτερικό χώρο για $ER_q = 270$ quanta/h

Όπως γίνεται αντιληπτό από τα γραφήματα, την χρονική στιγμή $t = 0$ (9:00AM), δηλαδή την ώρα που το μολυσμένο άτομο εισέρχεται στο κτήριο, όλες οι καμπύλες των συγκεντρώσεων ισούται με την τιμή $\frac{n(t)}{n_0} = 1$, που σημαίνει πως την δεδομένη χρονική στιγμή η συγκέντρωση του ιού ισούται με την αρχική συγκέντρωση n_0 . Έπειτα, παρατηρείται πως η συμπεριφορά για κάθε καμπύλη της συγκέντρωσης του ιού διαφοροποιείται ανάλογα με το σύστημα HVAC και τον ρυθμό παραγωγής του ιού ER_q . Για όλες τις τιμές ER_q και σε σύγκριση με την περίπτωση της

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

Υπάρχουσας ΚΚΜ, η στρατηγική λειτουργίας MERV 10 προκαλεί μείωση στη συγκέντρωση του ιού στον εσωτερικό χώρο περίπου στο 57%, η στρατηγική λειτουργίας MERV 13 περίπου στο 67%, η στρατηγική λειτουργίας 100 N.A. περίπου στο 68% και τέλος η στρατηγική λειτουργίας HEPA περίπου στο 74%. Τα ποσοστά αυτά καταγράφονται και στον **Πίνακας 23**.

Συνεπώς, από αυτά τα αποτελέσματα βγαίνει το συμπέρασμα πως το φίλτρο HEPA θεωρείται η πιο αποτελεσματική στρατηγική λειτουργίας για να καταπολεμήσει την εξάπλωση του COVID-19 στο εξεταζόμενο κτήριο, ακολουθούν οι στρατηγικές του 100 N.A. και του φίλτρου MERV 13, τα οποία έχουν μικρή απόκλιση στο ποσοστό μείωσης, ενώ το φίλτρο MERV 10 αποτελεί την τελευταία επιλογή για την ελαχιστοποίηση της συγκέντρωσης του ιού.

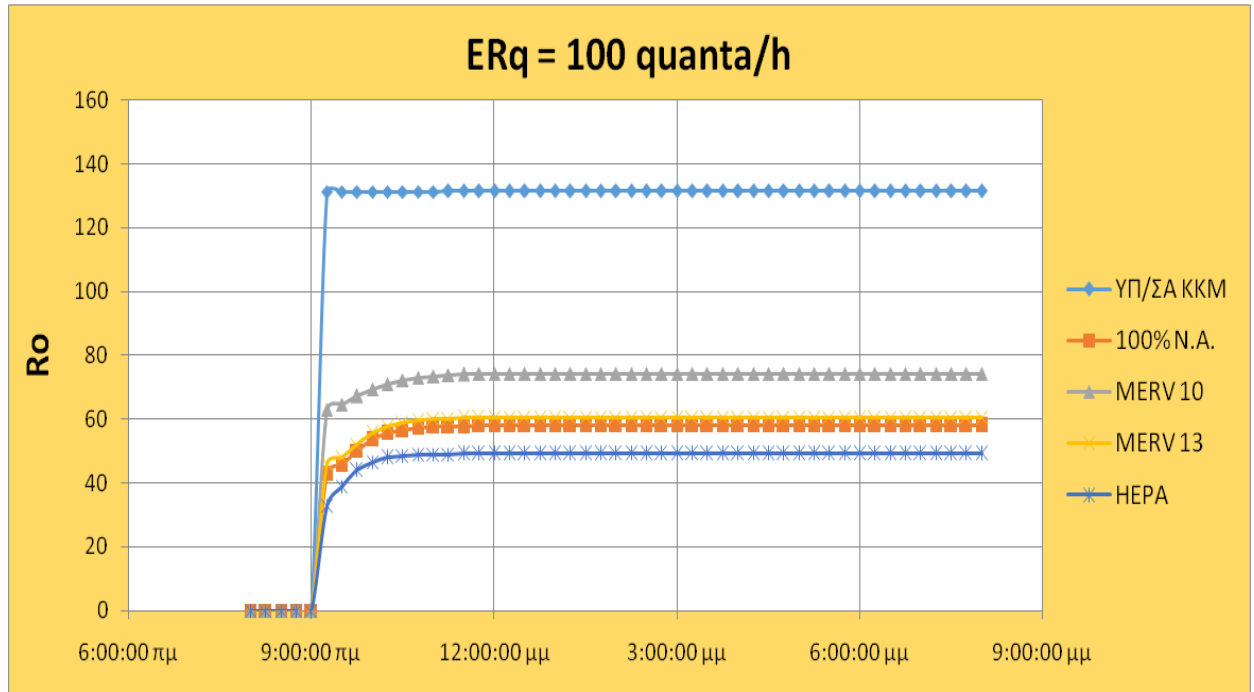
Στρατηγική Λειτουργίας Συστήματος HVAC	Ποσοστό μείωσης της συγκέντρωσης του ιού στον εσωτερικό χώρο σε σύγκριση με την περίπτωση της Υπάρχουσας ΚΚΜ
MERV 10	≈ 57%
MERV 13	≈ 67%
100% N.A.	≈ 68%
HEPA	≈ 74%

Πίνακας 23: Ποσοστό μείωσης της συγκέντρωσης του ιού στον εσωτερικό χώρο

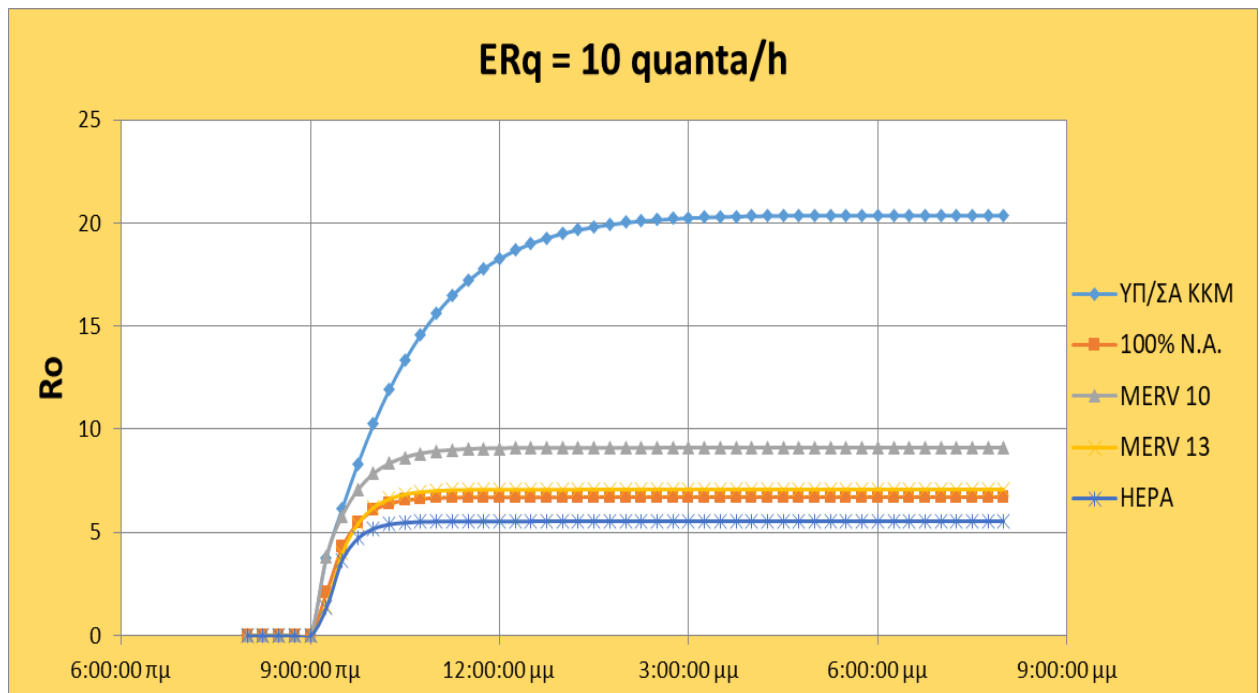
Ένα επιπλέον σχόλιο που αντλείται από τα διαγράμματα της συγκέντρωσης του ιού είναι η επίδραση της δραστηριότητας του μολυσμένου ατόμου στην συμπεριφορά της συγκέντρωσης του ιού. Για τους χαμηλούς ρυθμούς παραγωγής του ιού ($ER_q = 10$ quanta/h), οι αποκλίσεις των τιμών των συγκεντρώσεων φαίνονται πως είναι ελάχιστες εκτός στην περίπτωση της Υπάρχουσας ΚΚΜ. Αυτό σημαίνει ότι οι αποδόσεις των στρατηγικών λειτουργίας των συστημάτων HVAC για τους χαμηλούς ρυθμούς παραγωγής του ιού ER_q δεν διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό. Από την άλλη πλευρά, στις υψηλές δραστηριότητες του μολυσμένου ατόμου, οι καμπύλες των συγκεντρώσεων του ιού παρουσιάζουν μια εντελώς διαφορετική εικόνα από τα άλλα διαγράμματα. Αρχικά, οι καμπύλες των συγκεντρώσεων για τις στρατηγικές λειτουργίας 100% N.A., MERV 13 και HEPA προσεγγίζουν την αρχική συγκέντρωση του ιού (δηλαδή $n(t) = n_0$) μολονότι τον ισχυρό βαθμό απόδοσης απομάκρυνσης του ιού. Επιπροσθέτως, στις περιπτώσεις της Υπάρχουσας ΚΚΜ και του φίλτρου MERV 10 παρατηρείται παροδική αύξηση της συγκέντρωσης παρόλο της χρήσης του δείκτη IVRR (ρυθμός απομάκρυνσης των μολυσματικών ιών) και οι τιμές της ξεπερνούν την μονάδα ($\frac{n(t)}{n_0} > 1$). Αυτό συμβαίνει επειδή η αρχική συγκέντρωση n_0 έχει ορισθεί με βάση τον ρυθμό παραγωγής του ιού $ER_q = 100$ quanta/h, ο οποίος θεωρείται πολύ μικρότερος από αυτόν με $ER_q = 270$ quanta/h.

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

Για την καλύτερη κατανόηση της σημασίας της συγκέντρωσης του ιού στον εσωτερικό χώρο δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα του προβλεπόμενου αριθμού των λοιμώξεων. Το **Γράφημα 12**, το **Γράφημα 13** και το **Γράφημα 14** παρουσιάζουν τον ημερήσιο προβλεπόμενο αριθμό λοιμώξεων R_0 .

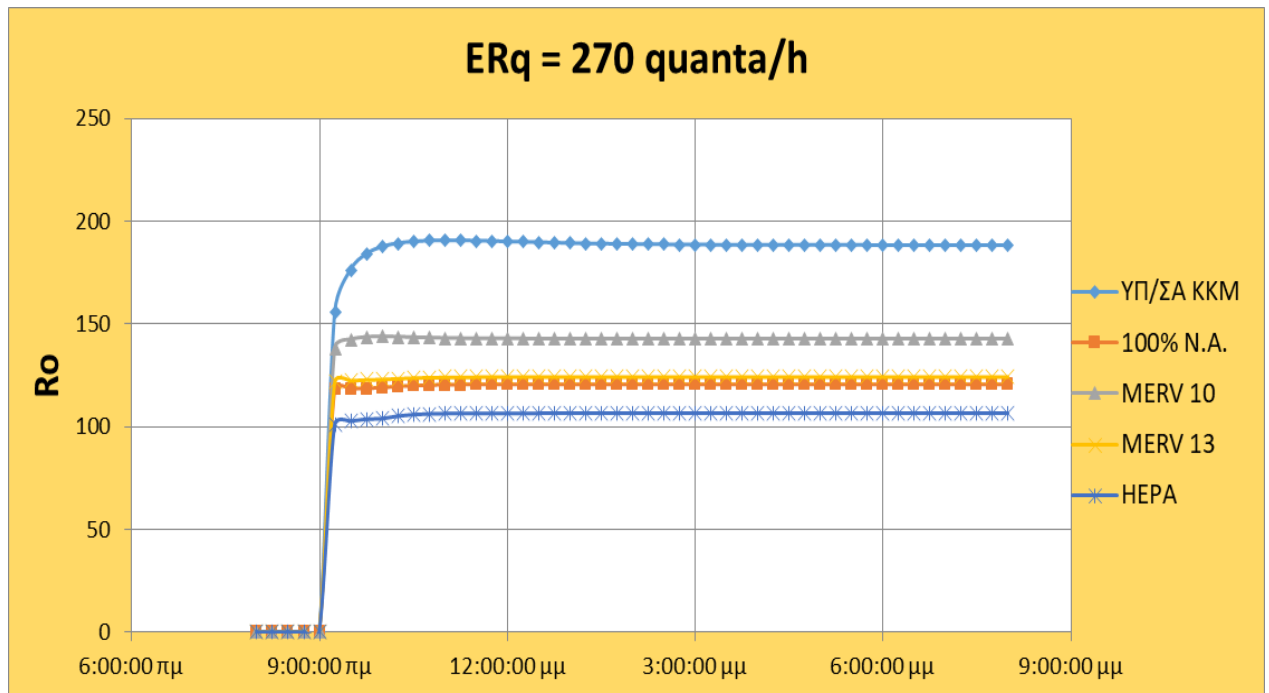


Γράφημα 12: Προβλεπόμενος αριθμός λοιμώξεων για $ER_q = 100$ quanta/h



Γράφημα 13: Προβλεπόμενος αριθμός λοιμώξεων για $ER_q = 10$ quanta/h

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19



Γράφημα 14: Προβλεπόμενος αριθμός λοιμώξεων για $ER_q = 270$ quanta/h

Στην υπόθεση της μεσαίας δραστηριότητας του μολυσμένου ατόμου ($ER_q = 100$ quanta/h), όταν δεν εφαρμόζεται καμία στρατηγική λειτουργίας συστήματος HVAC (ΥΠ/ΣΑ ΚΚΜ), τότε ο μέσος προβλεπόμενος αριθμός των λοιμώξεων εκτιμάται πως είναι στις 130 λοιμώξεις. Με την αξιοποίηση των συστημάτων HVAC ο αριθμός αυτός μειώνεται σε ικανοποιητικό βαθμό, όπου συγκεκριμένα, το φίλτρο MERV 10 τις μειώνει στις 74 λοιμώξεις, το φίλτρο MERV 13 στις 60, ο 100 N.A. στις 57 και το φίλτρο HEPA στις 49 λοιμώξεις. Συνεπώς, το φίλτρο HEPA θεωρείται ως τη κατάλληλη στρατηγική για την ελαχιστοποίηση του προβλεπόμενου αριθμού των λοιμώξεων, ενώ η εισαγωγή του 100 N.A. και το φίλτρο MERV 13 έχουν μικρή απόκλιση στις τιμές των R_o . Στον Πίνακα 24 αποτυπώνονται όλες οι μέσες τιμές του R_o για όλους τους ρυθμούς παραγωγής του ιού ER_q .

ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	Μέσος Προβλεπόμενος Αριθμός Λοιμώξεων R_o		
	$ER_q = 100$ quanta/h	$ER_q = 10$ quanta/h	$ER_q = 270$ quanta/h
ΥΠ/ΣΑ ΚΚΜ	130	20	190
100 N.A.	57	7	120
MERV 10	74	9	142
MERV 13	60	7	124
HEPA	49	5	106

Πίνακας 24: Μέσος προβλεπόμενος αριθμός των λοιμώξεων για κάθε στρατηγική λειτουργίας συστήματος HVAC του προβλήματος

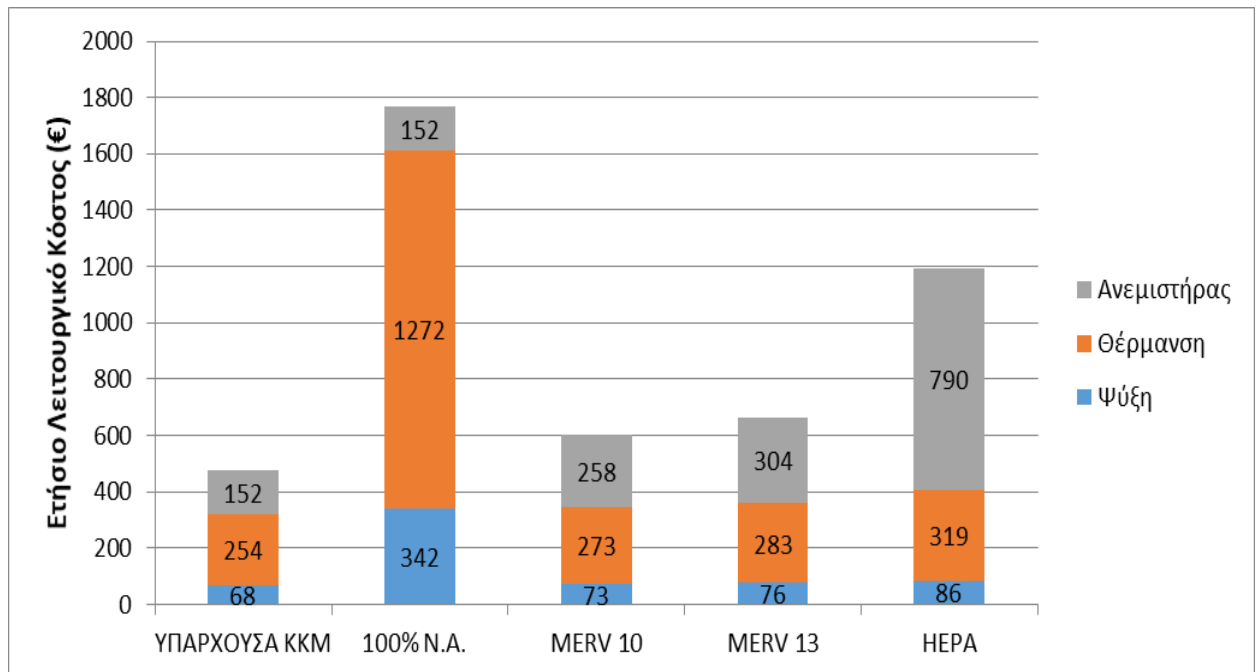
Οι χαμηλές δραστηριότητες του μολυσμένου ατόμου ($ER_q = 10$ quanta/h) προκαλούν ελαχιστοποιημένες λοιμώξεις στον εσωτερικό χώρο, ενώ υψηλές

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

δραστηριότητες ($ER_q = 270$ quanta/h) τις αυξάνουν σε μεγάλο βαθμό. Επίσης, όπως φαίνεται και στα γραφήματα, η διαφοροποίηση των τιμών ER_q μεταβάλλει και τη χρονική στιγμή στην οποία σταθεροποιείται η καμπύλη του R_0 .

6.4 Λειτουργικό Κόστος

Η εξέταση των αποτελεσμάτων των λειτουργικών κοστών των στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC αποτελεί αξιοσημείωτο κομμάτι της Διπλωματικής εργασίας. Το **Γράφημα 15** δείχνει τα ετήσια λειτουργικά κόστη για κάθε περίπτωση στρατηγικής λειτουργίας, τα οποία απαρτίζονται σε όρους θέρμανσης, ψύξης και ανεμιστήρα προσαγωγής του αέρα. Να επισημανθεί πως ο όρος του ανεμιστήρα συνεπάγεται με τα φίλτρα HVAC, όπως αναφέρεται στην **Ενότητα 5.2**.



Γράφημα 15: Λειτουργικά Κόστη για κάθε στρατηγική λειτουργίας συστημάτων HVAC του προβλήματος

Με μια πρώτη ματιά παρατηρείται ότι η πιο οικονομικά δαπανηρή στρατηγική λειτουργίας είναι η εισαγωγή 100% N.A. και ειδικότερα, όταν η συγκεκριμένη πρέπει να καλύψει τις θερμικές απώλειες και τα ψυκτικά φορτία του εξεταζόμενου κτηρίου τον χειμώνα (βλέπε 100% N.A. – Θέρμανση, Ψύξη). Σε αντίθεση με τη θέρμανση και τη ψύξη, η περίπτωση της 100% N.A. δαπανάει τα λιγότερα λειτουργικά κόστη μαζί με την περίπτωση της υπάρχουσας ΚΚΜ στα ηλεκτρικά φορτία του ανεμιστήρα προσαγωγής και αυτό οφείλεται διότι δεν αυξάνεται η στατική πτώση πίεσης συγκριτικά με την χρήση των φίλτρων MERV 10, MERV 13 και HEPA.

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

Η δεύτερη πιο οικονομικά δαπανηρή στρατηγική λειτουργίας βάση του διαγράμματος φαίνεται πως είναι η περίπτωση του φίλτρου HEPA. Μπορεί στις ανάγκες της θέρμανσης και της ψύξης να μην καταναλώνονται σημαντικά λειτουργικά κόστη σε σχέση με τις υπόλοιπες στρατηγικές, ο ανεμιστήρας προσαγωγής αυξάνει τις δαπάνες της σε μεγάλο βαθμό. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει, προφανώς, επειδή η στατική πτώση πίεσης με τη χρήση του φίλτρου HEPA έχει αποδειχθεί πως είναι αρκετά ισχυρότερη συγκριτικά με τις άλλες περιπτώσεις, όπως δείχνεται και στην **Ενότητα 6.2**. Μια αξιοσημείωτη παρατήρηση είναι τα λειτουργικά κόστη της ΚΚΜ με την εφαρμογή του φίλτρου MERV 13. Παρότι η απόδοση του είναι αρκετά ικανοποιητική (βλέπε **Ενότητα 6.2**) για να διηθήσει τον αέρα ανακυκλοφορίας από τα σωματίδια του COVID-19, τα λειτουργικά του κόστη είναι σε χαμηλά επίπεδα. Συγκεκριμένα, τα λειτουργικά κόστη της στρατηγικής MERV 13 εκτιμώνται πως είναι περίπου 10% μεγαλύτερα από την περίπτωση MERV 10 και περίπου 30% από την περίπτωση της Υπάρχουσας ΚΚΜ.

7. Συμπεράσματα

Έπειτα από τις πρόσφατες ενδείξεις πως η αερογενής μετάδοση συμβάλλει στην μετάδοση του COVID-19 στα εσωτερικά περιβάλλοντα, δημιουργήθηκε η ανάγκη της ενσωμάτωσης των μηχανικών ελέγχων. Σε αυτούς ενσωματώνονται τα συστήματα HVAC με την παραδοχή πως η πλειοψηφία των συστημάτων HVAC λειτουργεί με εργαζόμενο μέσο τον αέρα. Επομένως, διάφοροι ερευνητές και διεθνείς ομοσπονδίες όπως η «ASHRAE» και η «REHVA» αναφέρουν πως τα συστήματα HVAC δεν πρέπει να αξιοποιούνται αποκλειστικά για την βελτίωση της θερμικής άνεσης και της Ποιότητας του Εσωτερικού Αέρα των κτηρίων, αλλά και για την καταπολέμηση της μετάδοσης του COVID-19.

Ο σκοπός της παρούσας Διπλωματικής εργασίας είναι να διαλευκάνει ποια στρατηγική λειτουργίας των συστημάτων HVAC αποδίδει καλύτερα στην μείωση της συγκέντρωσης του COVID-19 σε έναν εσωτερικό χώρο με τα ελάχιστα λειτουργικά κόστη. Το πρόβλημα αυτό πραγματοποιήθηκε σε ένα υποθετικό κτήριο εκπαιδευτηρίου με μία ζώνη, στο οποίο είναι εγκατεστημένη Κεντρική Κλιματιστική Μονάδα σταθερού όγκου παροχής, η οποία επεξεργάζεται τον αέρα και καλύπτει τις ανάγκες του θερινού και του χειμερινού κλιματισμού. Οι περιπτώσεις των στρατηγικών λειτουργίας χωρίστηκαν σε 2 κατηγορίες, στον εξαερισμό και στην διήθηση του αέρα. Στην πρώτη αξιοποιήθηκε η εισαγωγή 100% νωπού αέρα (N.A.) στη ΚΚΜ και στη δεύτερη τα φίλτρα MERV 10, MERV 13 και HEPA.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την επίλυση του προβλήματος στηρίχθηκε σε μοντέλα υπολογισμού της ισχύς του ψυκτικού και θερμαντικού στοιχείου και του φορτίου του ανεμιστήρα προσαγωγής για κάθε στρατηγική λειτουργίας συστήματος HVAC, της απόδοσης και της στατικής πτώσης πίεσης των φίλτρων MERV 10, MERV 13 και HEPA και σε διερευνήσεις της συγκέντρωσης του COVID-19 και του προβλεπόμενου αριθμού των λοιμώξεων στο εξεταζόμενο κτήριο και των λειτουργικών κοστών όλων των στρατηγικών λειτουργίας του προβλήματος.

Τα προσδοκώμενα αποτελέσματα, τα οποία συνδυάστηκαν με γραφήματα και πίνακες, σχολιάστηκαν με τη σύγκριση όλων των συστημάτων HVAC της εργασίας και με την υπάρχουσα ΚΚΜ. Από τα αποτελέσματα μπορούμε να καταλήξουμε σε μια σειρά από σημαντικά συμπεράσματα, τα οποία καταγράφονται ως εξής:

- Παρόλο που οι περιπτώσεις του 100% N.A. και του φίλτρου HEPA οδηγούν στις χαμηλότερες τιμές της ημερήσιας συγκέντρωσης του ιού και του ημερήσιου προβλεπόμενου αριθμού των λοιμώξεων, παρουσιάζουν τις υψηλότερες συνολικές ισχύεις των στοιχείων (212 kW για 100% N.A. και 108 kW για HEPA) και τα περισσότερα ετήσια λειτουργικά κόστη (1766 € για 100% N.A. και 1195 € για HEPA). Πιο ειδικά, ο 100% N.A. αναγκάζει το ψυκτικό στοιχείο να λειτουργεί με 143 kW, ενώ το φίλτρο HEPA είναι επικεφαλής στην ισχύ του ανεμιστήρα

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

προσαγωγής, που φτάνει στα 1,91 kW, λόγω της υψηλής στατικής πτώσης πίεσης.

- Η στρατηγική λειτουργίας του φίλτρου MERV 13 διαθέτει πολλά οφέλη για την εφαρμογή του, επειδή έχει ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης για το φιλτράρισμα του αέρα από τους παθογόνους μικροοργανισμούς ($\eta_{\text{filter}} = 81\%$) και δεν έχει σημαντικό ποσοστό αύξησης στις υπόλοιπες παραμέτρους (ισχύς ψυκτικού και θερμαντικού στοιχείου, φορτίο ανεμιστήρα προσαγωγής, κόστος λειτουργίας).

Συνεπώς, η πιο τεχνικοοικονομική λύση για το πρόβλημα της παρούσας Διπλωματικής εργασίας είναι η εφαρμογή του φίλτρου MERV 13. Το πόρισμα αυτό πηγάζει, επίσης, από τις ενδείξεις της «ASHRAE» πως ένα φίλτρο MERV 13 έχει την δυνατότητα να εξασφαλίζει σε ένα σύστημα HVAC την ικανοποιητική Ποιότητα του Εσωτερικού Αέρα με το ελάχιστο λειτουργικό κόστος.

Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης Διπλωματικής εργασίας απέχουν από άλλα ερευνητικά άρθρα παρόλο που ανήκουν στην ίδια θεματολογία. Ένα σημαντικό παράδειγμα μπορεί να θεωρηθεί η εργασία του **Cary A. Faulkner κ.α.** [5], στην οποία διερευνάται η συγκέντρωση του COVID-19 και ο προβλεπόμενος αριθμός των λοιμώξεων αλλά σε εσωτερικούς χώρους υποθετικών γραφείων. Η μεθοδολογία του στηρίζεται στη χρήση προσομοιωτή και όχι αποκλειστικά στην αναζήτηση των βιβλιογραφιών, ενώ το σύστημα HVAC πάνω στο οποίο γίνεται η ανάλυση της μελέτης του είναι μεταβλητού όγκου παροχής του αέρα («VAV»). Επίσης, θεωρεί πως στη περίπτωση του φίλτρου HEPA, η παροχή του αέρα μειώνεται σε μεγάλο βαθμό μεταβάλλοντας, έτσι, τα αποτελέσματα του. Στη συνέχεια, το δημοσιευμένο άρθρο των **Ali Mohammadi Nafchi κ.α.** [80] αναδεικνύει διαφορετικές τιμές στην συγκέντρωση του COVID-19 σε κτήριο σχολείου, επειδή πάρθηκαν πραγματικές μετρήσεις μέσα στις αίθουσες και χρησιμοποιεί διαφορετικές οδηγίες ως προς τις παροχές όγκου του αέρα στους εσωτερικούς χώρους. Τέλος, στην έρευνα του **Leonard F. Pease κ.α.** [57], τα αποτελέσματα της συγκέντρωσης του ιού διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό, με την εξήγηση ότι αξιοποιεί πιο εξειδικευμένα μοντέλα υπολογισμού, προσθέτοντας περισσότερες παραμέτρους μέσα στις εξισώσεις του.

Τα τυχόν προβλήματα που προέκυψαν από την μελέτη είναι η ελάχιστη έως μηδενική αναγνωρισιμότητα του συγκεκριμένου θέματος, δηλαδή της επίδρασης των συστημάτων HVAC στην αερογενή μετάδοση του COVID – 19 σε εσωτερικούς χώρους των κτηρίων στην Ελλάδα. Η αναζήτηση έγινε στα πλαίσια των ξένων ερευνητικών πηγών, επειδή υπήρξε περιορισμός στις ελληνικές βιβλιογραφίες. Επίσης, πρέπει να αναφερθεί πως δεν αξιοποιήθηκε κάποιο λογισμικό ή κάποιος προσομοιωτής που είναι εξειδικευμένα στον υπολογισμό των παραμέτρων των συστημάτων HVAC. Συνεπώς, υπάρχει η πιθανότητα να έχουν προκύψει κάποια τυχαία ή συστηματικά σφάλματα κατά την υλοποίηση της μελέτης.

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

Εν κατακλείδι, η Διπλωματική εργασία θέτει τα θεμέλια για την μελλοντική αντιμετώπιση της μετάδοσης του COVID-19 και άλλων παθογόνων μικροοργανισμών στους εσωτερικούς χώρους των δημοσίων κτηρίων, όπως των εμπορικών, των εκπαιδευτηρίων κλπ. Αποσκοπεί στον αναγνώστη να κατανοήσει πως ένας ιός μπορεί να καταπολεμηθεί όχι μόνο από τις κατευθυντήριες οδηγίες του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας, δηλαδή με τη χρήση μάσκας και της διατήρησης της απόστασης μεταξύ των ατόμων, αλλά και με τα συστήματα HVAC, τα οποία είναι υπεύθυνα στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα σε εσωτερικά περιβάλλοντα. Με την χρήση ολοκληρωτικών μοντέλων υπολογισμού, των λογισμικών ή ακόμη και των πειραμάτων, μπορούν να γίνουν παρόμοιες αναλυτικές έρευνες, οι οποίες να εφαρμόζονται και σε άλλα κτήρια πέραν των εκπαιδευτηρίων, όπως σε εμπορικά καταστήματα, σε σουπερμάρκετ, σε γραφεία, σε γήπεδα ακόμη και στα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς.

8. Αναφορές – Πηγές

1. Nima Izadyar, Wendy Miller, Ventilation strategies and design impacts on indoor airborne transmission: A review, 2022
2. Wandong Zheng, Jingfan Hu, Zhaoying Wang, Jimbo Li, Zheng Fu, Han Li, Jakub Jurasz, S.K Chou, Jinyue Yan, COVID-19 Impact on Operation and Energy Consumption of Heating, Ventilation and Air-Conditioning (HVAC) Systems, 2021
3. Gerardo Gómez-García, Magdalena Ramos-Navas-Parejo, Juan-Carlos de la Cruz-Campos, Carmen Rodríguez-Jiménez, Impact of COVID-19 on University Students: An Analysis of Its Influence on Psychological and Academic Factors, 2022
4. Mingyue Guo, Peng Xu, Tong Xiao, Ruikai He, Mingkun Dai, Shelly L. Miller, Review and comparison of HVAC operation guidelines in different countries during the COVID-19 pandemic, 2021
5. Cary A. Faulkner, John E. Castellini Jr., Wangda Zuo, David M. Lorenzetti, Michael D. Sohn, Investigation of HVAC operation strategies for office buildings during COVID-19 pandemic, 2022
6. John Varrasi, Global Cooling: The History of Air Conditioning, 2011
7. Alvsståg, Ø., HVAC-systems: Modeling, simulation and control of HVAC-systems. 2011
8. Shaimaa Seyam, Types of HVAC Systems, 2018
9. <https://www.understandconstruction.com/understand-hvac-systems.html>
10. <https://ventive.co.uk/resources/ventilation-guide-for-schools-best-practice-in-a-post-covid-world/>
11. National Institute of Environmental Health Sciences, Indoor Air Quality, 2021
12. «Υπουργός Εργασίας, Πρόνοιας και Κοινωνικών Ασφαλίσεων, με το περί Ασφάλειας και Υγείας στην Εργασία», Ποιότητα Αέρα Εσωτερικού Χώρου, 2014
13. Kayhan, Babaroglu, Leading factors affecting indoor air quality, 2005, 2015
14. Ανδρεαδάκης Ε., Βιοκλιματικός Σχεδιασμός – Περιβάλλον και Βιωσιμότητα, 2006
15. Γεώργιος Μαντίκας, Αξιολόγηση Συνθηκών Άνεσης σε Κτίρια του Δήμου Πυλαίας Χορτιάτη, 2016
16. Φωκός Φραγγής, Θερμική Άνεση σε Κτίρια Γραφείων, 2011
17. Robert McDowall, Fundamentals of HVAC Systems, 2007
18. Γεωργία Βενιανάκη, Μοντελοποίηση, Προσομοίωση για Ενεργειακό Έλεγχο Συστήματος Κλιματισμού σε Κτίριο, 2018
19. Δρ. Γεώργιος Αλέξης, Θέρμανση Ψύξη Κλιματισμός 1 - Ψυχομετρία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής (Διάλεξη)
20. Παπακώστας Κωνσταντίνος, Υπολογισμός – Επιλογή συσκευών κλιματισμού, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (Διάλεξη)

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων
κατά την πανδημία COVID-19

21. Δρ. Ευάγγελος Μπέλλος, Συστήματα Κλιματισμού – Κεντρική Κλιματιστική Μονάδα (ΚΚΜ), Τμήμα Εκπαιδευτικών Μηχανολόγων Μηχανικών, ΑΣΠΑΙΤΕ (Διάλεξη)
22. <https://www.airtecnic.com/news/what-is-an-air-handling-unit-ahu>
23. Harish Choudhary, All Air Systems, All Water Systems, Air Water Systems, Direct Refrigerant systems, 2016
24. <https://www.adtherm.gr>
25. <https://polydomiki.gr>
26. Hazim Bashir Awbi, Ventilation and air distribution systems in buildings, 2015
27. «Linqip Team», Natural Ventilation: Types ,Advantages and Disadvantages, 2022
28. <http://uol-ventilation.weebly.com/mechanical.html>
29. Designing Buildings, Mechanical ventilation of buildings
30. «The Reenage», Mechanical Ventilation in buildings – what you need to know, 2015
31. Per Heiselberg, Principles of Hybrid Ventilation, 2002
32. <https://www.moffittcorp.com/hybrid-ventilation-system>
33. Κωνστάντω Νατσιοπούλου, Πανδημία COVID-19 και επιπτώσεις στην οικονομία, 2022
34. Δ. Καββαδάς, Ν. Στοϊλά, Ε. Τσοπάνογλου, Α. Καββαδά, Α. Σιόγκα, Από την αθηναϊκή πανούκλα έως την Covid-19. Μια ιστορική αναδρομή των επιδημιών και ο αντίκτυπός τους στην ψυχική υγεία, 2020
35. <https://www.eom.gr/covid-19-kai-metamoscheyseis-sympagon-organon>
36. Αλεξία Σωτηρίου, Το ημερολόγιο της πανδημίας στην Ελλάδα, 2021
37. Δρ. Ευαγγελία Κρασαδάκη, Οι συνέπειες της πανδημίας στην Ανώτατη Εκπαίδευση, 2020
38. Anya Kamenetz, 6 Ways Universities Are Responding To Coronavirus, 2020
39. «WHO», Modes of transmission of virus causing COVID-19: implications for IPC precaution recommendations, 2020
40. <https://www.aerosol.mech.ubc.ca/what-size-particle-is-important-to-transmission>
41. WHO, Transmission of SARS-CoV-2: implications for infection prevention precautions, 2020
42. Jackie Knee, Can COVID-19 be transmitted by faecal-oral routes? , 2020
43. Andrew G. Harrison, Tao Lin, Pengua Wang, Mechanisms of SARS-CoV-2 Transmission and Pathogenesis, 2020
44. Priyanka P. , Om Prakash Choudhary, Indraj Singh, Gautam Patra, Aerosol transmission of SARS-CoV-2: The unresolved paradox, 2020
45. «NEWSROOM», Πώς μεταδίδεται ο κορωνοϊός σε εσωτερικούς χώρους, 2020
46. Song Tang, Yixin Mao, Rachel M. Jones, Qiyue Tan, John S. Ji, Na Li, Jin Shen, Yuebein Lv, Lijun Pan, Pei Ding, Xiaochen Wang, Youbin Wang, C. Raina

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων
κατά την πανδημία COVID-19

- MacIntyre, Xiaoming Shi, Aerosol transmission of SARS-CoV-2? Evidence, prevention and control, 2020
47. Chia C. Wang, Kimberly A. Prather, Josué Sznitman, Jose L. Jimenez, Seema S. Lakdawala, Zeynep Tufekci, Linsey C. Marr, Airborne transmission of respiratory viruses, 2021
 48. Maosheng Yao, SARS-CoV-2 aerosol transmission and detection, 2022
 49. «Climate and Clean Air Coalition», The role of HVAC in preventing COVID-19 transmission,
 50. Gary Elovitz, Ken Elovitz, Assessing the Role of HVAC Systems in Fighting COVID-19, 2020
 51. Jubair A. Shamim, Wei-Lun Hsu, Hirofumi Daiguji, Review of component designs for post COVID-19 HVAC systems: possibilities and challenges, 2022
 52. «EPA», Ventilation and Coronavirus (COVID – 19), 2023
 53. «ACT Goverment», COVID-19 guidance on ventilation, 2022
 54. Paul Sims, What are Air Changes per Hour (ACH) and how do they relate to UV disinfection in Building Ventilation Systems?
 55. <https://7shopai.link/products.aspx?cname=stainless+exhaust+fan&cid=307>
 56. James Piper, 4 Effective Air Filtration System Options, 2021
 57. Leonard F. Pease, Na Wang, Timothy I. Salsbury, Ronald M. Underhill, Julia E. Flaherty, Alex Vlachokostas, Gourihar Kulkarni, Daniel P. James, Investigation of potential aerosol transmission and infectivity of SARS-CoV-2 through central ventilation systems , 2021
 58. «R.P. Fedder Industrial, LLC», MERV 13 Filter Pressure Drop: Guidance for Facility Managers
 59. <https://filterbuy.com/resources/air-filter-basics/merv-mpr-fpr-ratings/>
 60. «EPA», What is a HEPA filter? , 2023
 61. ANSI/ASHRAE Standard 52.2-2017, Method of Testing General Ventilation Air-Cleaning Devices for Removal Efficiency by Particle Size
 62. https://www.cleartheairinc.com/Merv_13_1_Furnace_Filter_p/cta-m13-01-12pack.htm
 63. ASHRAE Epidemic Task Force, Core recommendations for reducing airborne infectious aerosol exposure, 2021
 64. <https://www.laboratory-supply.net/blog/difference-between-a-hepa-and-ulpa-filter/>
 65. <https://www.iqsdirectory.com/articles/air-filter/hepa-air-filters.html>
 66. «ISO – Aire», What Are the Differences between a MERV 13 and a HEPA Filter? ,
 67. «ISO – Aire», How Our Commercial Air Purifiers Work
 68. Learn Metrics, HVAC Systems, MERV Rating Chart: Understanding 1-20 MERV Rating (For Filters)
 69. «bere:architects», Covid-19 and the risk from air-recirculation in buildings
 70. Lidia Morawska, Julian W. Tang, William Bahnfleth, Philomena M. Bluysen, Atze Boerstra, e Giorgio Buonanno, How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised? , 2020

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων
κατά την πανδημία COVID-19

71. <https://www.epa.gov/coronavirus/what-upper-room-ultraviolet-germicidal-irradiation-uvgi-what-hvac-uvgi-can-either-be>
72. Centers of Disease Control and Prevention, Upper-Room Ultraviolet Germicidal Irradiation (UVGI), 2021
73. «FDA», Coronavirus (COVID-19) and Medical Devices, 2023
74. <https://www.daikin.com.sg/building-solutions/healthy-building-solutions/UVGI-system>
75. <https://hvac-eng.com/interactive-psychrometric-chart/>
76. Gabriel Bekö, Geo Clausen, Charles J. Weschler, Is the use of particle air filtration justified? Costs and benefits of filtration with regard to health effects, building cleaning and occupant productivity, 2008
77. Parham Azimi, Brent Stephens, HVAC filtration for controlling infectious airborne disease transmission in indoor environments: Predicting risk reductions and operational costs, 2013
78. G. Buonanno, L. Morawska, L. Stabile, Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection: Prospective and retrospective applications, 2020
79. Τ.Ο.Τ.Ε.Ε 20701 – 3/2010, Κλιματικά Δεδομένα Ελληνικών Περιοχών, Παράγραφος 3 « ΜΕΣΕΣ ΜΗΝΙΑΙΕΣ ΤΙΜΕΣ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ»
80. Ali Mohammadi, Vincent Blouin, Nigel B Kayne, Andrew R Metcalf, Room HVAC Influences on the Removal of Airborne Particulate Matter: Implications for School Reopening during the COVID-19 Pandemic, 2021
81. <https://www.insurancemarket.gr/>
82. Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701 – 1/2017, ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΕΘΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΤΗΡΙΩΝ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΚΔΟΣΗ ΤΟΥ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ, Παράγραφος 5.6.3 « Κεντρικές Κλιματιστικές Μονάδες»

Παράρτημα 1: Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Το πρώτο σύγχρονο κλιματιστικό από τον Willis Haviland Carrier [6]

Εικόνα 2: Παράγοντες που επηρεάζουν την θερμική άνεση [14]

Εικόνα 3: Ψυχομετρικός Χάρτης ASHRAE [19]

Εικόνα 4: Σχεδιάγραμμα Τυπικής Κεντρική Κλιματιστική Μονάδα με ανάμιξη υγρού/νωπού αέρα και αέρα ανακυκλοφορίας [19]

Εικόνα 5: Τυπικό Σύστημα Κλιματισμού μόνο με χρήση του αέρα (All-Air) [23]

Εικόνα 6: Μονάδα Fan Coil σε σύστημα μόνο με νερό (All-Water)

Εικόνα 7: Σύστημα Κλιματισμού με αέρα και νερό (Air-Water) [8]

Εικόνα 8: Βασική διάταξη συστήματος αέρα με νερό [21]

Εικόνα 9: Fan Coil Δαπέδου [24]

Εικόνα 10: Fan Coil Οροφής [25]

Εικόνα 11: Εξαερισμός βάση της κίνησης του ανέμου [27]

Εικόνα 12: Εξαερισμός βάση της άνωσης [27]

Εικόνα 13: Σύστημα εξαναγκασμένου ή μηχανικού εξαερισμού [30]

Εικόνα 14: Κεντρική Κλιματιστική μονάδα με 10% παροχή νωπού αέρα [20]

Εικόνα 15: Κεντρική Κλιματιστική Μονάδα με παροχή νωπού αέρα μεγαλύτερη από 10% [20]

Εικόνα 16: Μηχανισμός υβριδικού εξαερισμού [32]

Εικόνα 17: Αντιπροσωπευτική εικόνα του COVID-19 [35]

Εικόνα 18: Εικόνα της επίδρασης του COVID-19 στην διδασκαλία και την μάθηση [38]

Εικόνα 19: Το μέγεθος του COVID-19 [40]

Εικόνα 20: Οι κύριοι μηχανισμοί εξάπλωσης του COVID-19 [2]

Εικόνα 21: Κύριοι μηχανισμοί εξάπλωσης του SARS-COV-2 [43]

Εικόνα 22: Παράγοντες που επηρεάζουν την αερογενή μετάδοση του ιού [2]

Εικόνα 23: Τα στάδια με τα οποία αναπτύσσεται η αερομεταφερόμενη μετάδοση [47]

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων κατά την πανδημία COVID-19

Εικόνα 24: Η επίδραση των συστημάτων HVAC στην πρόληψη και στον έλεγχο του COVID-19 [2]

Εικόνα 25: Σύστημα εξαερισμού σε εσωτερικό χώρο

Εικόνα 26: Επίδραση συστήματος εξαερισμού στην μετάδοση των αερολυμάτων [2]

Εικόνα 27: Σχεδιάγραμμα του δείκτη ACH [54]

Εικόνα 28: Ανεμιστήρας εξάτμισης του αέρα [55]

Εικόνα 29: Μηχανισμός διήθησης του αέρα μέσω φίλτρου [56]

Εικόνα 30: Φαινόμενο πτώσης πίεσης λόγω αντίστασης της ροής του αέρα [58]

Εικόνα 31: Κατηγορίες σωματιδιακών ρύπων [59]

Εικόνα 32: Φίλτρο MERV 13 [62]

Εικόνα 33: Αναπαράσταση φίλτρου HEPA [64]

Εικόνα 34: Φίλτρο HEPA [65]

Εικόνα 35: Καθαριστές του αέρα [67]

Εικόνα 36: Η απολύμανση του αέρα με την αξιοποίηση των καθαριστών αέρα [67]

Εικόνα 37: Η σημασία της αποφυγής της ανακυκλοφορίας του αέρα [70]

Εικόνα 38: Συσκευές UVGI [72]

Εικόνα 39: Λαμπτήρες UV-C εντός αεραγωγού [74]

Εικόνα 40: Ενδεικτικό σχεδιάγραμμα της Υπάρχουσας ΚΚΜ του προβλήματος

Εικόνα 41: Ενδεικτική διεργασία στο Ψυχομετρικό Χάρτη του λογισμικού «Interactive Psychometric Chart» [75]

Παράρτημα 2: Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Εσωτερικοί ρυπογόνοι παράγοντες του αέρα και οι δυνητικές πηγές τους [11]

Πίνακας 2: Πληροφορίες σχετικά με τα σταγονίδια και τα αερολύματα [2]

Πίνακας 3: Αξιολογήσεις MERV από το Πρότυπο 52.2 της ASHRAE [61]

Πίνακας 4: Μέσες αποδόσεις φιλτραρίσματος των καθαριστών αέρα [68]

Διερεύνηση στρατηγικών λειτουργίας συστημάτων HVAC σε κτήρια εκπαιδευτηρίων
κατά την πανδημία COVID-19

Πίνακας 5: Στρατηγικές λειτουργίας συστημάτων HVAC στην παρούσα Διπλωματική εργασία

Πίνακας 6: Συνθήκες Εσωτερικού Χώρου και Περιβάλλοντος του εξεταζόμενου κτιρίου (DB: Θερμοκρασία Ξηρού Βολβού, RH: Σχετική Υγρασία)

Πίνακας 7: Συνθήκες θερμοκρασιών νερού στο ψυκτικό και θερμαντικό στοιχείο της ΚΚΜ

Πίνακας 8: Δεδομένα για τα ψυκτικά φορτία και τις θερμικές απώλειες του εξεταζόμενου κτηρίου

Πίνακας 9: Αρχιτεκτονικά δεδομένα του υποθετικού κτηρίου

Πίνακας 10: Χαρακτηριστικά Ψυκτικού Στοιχείου

Πίνακας 11: : Χαρακτηριστικά Θερμαντικού Στοιχείου

Πίνακας 12: Σημειολογία συνθηκών του αέρα

Πίνακας 13: Παροχές αέρα όλων των συστημάτων HVAC του προβλήματος

Πίνακας 14: Δείκτης αξιολόγησης MERV για τα φίλτρα MERV 10, MERV 13 και HEPA με τη χρήση του Προτύπου ASHRAE 52.2 [61]

Πίνακας 15: Ανασκόπηση πρόσφατων μελετών που ανιχνεύουν τον ιό της γρίπης σε δειγματολήπτες σωματιδίων [77]

Πίνακας 16: Δεδομένα εύρεσης της στατικής πτώσης πίεσης για κάθε φίλτρο HVAC

Πίνακας 17: Τιμές των παραμέτρων IVRR

Πίνακας 18: Βαθμομημέρες Θέρμανσης με τη χρήση του TOTEE 20701-3/2010

Πίνακας 19: Βαθμώρες Ψύξης με τη χρήση του TOTEE 20701-3/2010

Πίνακας 20: Ισχύς Ψυκτικού και Θερμαντικού Στοιχείου για κάθε στρατηγική λειτουργίας HVAC

Πίνακας 21: Ισχύς Ανεμιστήρα Προσαγωγής για κάθε στρατηγική λειτουργίας HVAC του προβλήματος

Πίνακας 22: Αποδόσεις φίλτρων HVAC του προβλήματος

Πίνακας 23: Ποσοστό μείωσης της συγκέντρωσης του ιού στον εσωτερικό χώρο

Πίνακας 24: Μέσος προβλεπόμενος αριθμός των λοιμώξεων για κάθε στρατηγική λειτουργίας συστήματος HVAC του προβλήματος

Παράρτημα 3: Κατάλογος Γραφημάτων

Γράφημα 1: Οι φάσεις της αερομεταφερόμενης μετάδοσης των αερολυμάτων [47]

Γράφημα 2: Μέθοδοι διαχείρισης των λοιμώξεων [1]

Γράφημα 3: Διάγραμμα Ροής ανάλυσης των βασικών βημάτων υλοποίησης της μελέτης

Γράφημα 4: Κατηγοριοποίηση λειτουργικών κοστών συστημάτων HVAC

Γράφημα 5: Καταναλισκόμενη ενέργεια παροχής νωπού αέρα συναρτήσει του ρυθμού αερισμού του εξωτερικού νωπού αέρα

Γράφημα 6: Ψυκτική Ισχύς και Ισχύς Θερμαντικού Στοιχείου για κάθε στρατηγική λειτουργίας HVAC του προβλήματος

Γράφημα 7: Ισχύς Ανεμιστήρα Προσαγωγής για κάθε στρατηγική λειτουργίας HVAC του προβλήματος

Γράφημα 8: Στατική Πτώση Πίεσης λόγω της αντίστασης των φίλτρων HVAC

Γράφημα 9: Ομαλοποιημένη συγκέντρωση του COVID-19 στον εσωτερικό χώρο για $ERq = 100$ quanta/h

Γράφημα 10: Ομαλοποιημένη συγκέντρωση του COVID-19 στον εσωτερικό χώρο για $ERq = 10$ quanta/h

Γράφημα 11: Ομαλοποιημένη συγκέντρωση του COVID-19 στον εσωτερικό χώρο για $ERq = 270$ quanta/h

Γράφημα 12: Προβλεπόμενος αριθμός λοιμώξεων για $ERq = 100$ quanta/h

Γράφημα 13: Προβλεπόμενος αριθμός λοιμώξεων για $ERq = 10$ quanta/h

Γράφημα 14: Προβλεπόμενος αριθμός λοιμώξεων για $ERq = 270$ quanta/h

Γράφημα 15: Λειτουργικά Κόστη για κάθε στρατηγική λειτουργίας συστημάτων HVAC του προβλήματος