



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Ενεργειακή Ανάλυση σε Κέντρο Διαχείρισης Δεδομένων (Datacenter).»



Χατζημαρινάκης Παύλος Α.Μ.: 47049
Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Ιωάννης Σαρρής

ΑΙΓΑΛΕΩ, 2024

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Όνοματεπώνυμο	Υπογραφή
ΣΑΡΡΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ	
ΚΑΝΕΤΑΚΗ ΖΩΗ	
ΠΡΟΕΣΤΑΚΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Παύλος Χατζημαρινάκης του Ανδρέα, με αριθμό μητρώου Α.Μ.: 47049, 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
(Υπογραφή)**



Παύλος Χατζημαρινάκης

Abstract

The purpose of this research work is to identify and propose ways to optimize the energy system which is responsible for creating more efficient cooling conditions based on the special configuration of the Racks in a Data Center.

For this research, the specialized software INVENTOR 2024 was used for the design of the geometries and Autodesk CFD 2024 for the analysis of the flow field as well as the temperature distributions. All the results were compared for a total of three different layouts whose main characteristic was the variation of the thermal loads produced in the space.

In the three different geometries created, the first had the characteristic that the large generated heat loads were placed relatively far apart. In the second arrangement the large loads were placed closer together, while in the third arrangement the loads were placed very close to each other.

It was observed that in the first arrangement there is a particularly efficient coverage of the thermal loads. The second arrangement covers the thermal requirements but with a lower degree of efficiency, while finally the third arrangement is deemed insufficient to cover the thermal requirements. Placing in close proximity sources of production of large thermal loads results in a wider increase in temperature in the surrounding area and, at the same time, a reduction in the efficient cooling of the systems located in the area.

Keywords: Data center, power consumption, data management center, computational fluid dynamics, flow field, temperature distribution, measurement sensors, continuous monitoring

Περίληψη

Η παρούσα ερευνητική εργασία σκοπό έχει να ερευνήσει και να προτείνει τρόπους βελτιστοποίησης του ενεργειακού συστήματος το οποίο είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία συνθηκών αποδοτικότερης ψύξης στη βάση πάντα της ειδικής διαμόρφωσης των Racks μέσα σε ένα Control Center.

Για την εν λόγω έρευνα, χρησιμοποιήθηκε το εξειδικευμένο λογισμικό INVENTOR 2024 για τον σχεδιασμό των γεωμετριών και το Autodesk CFD 2024 για την ανάλυση του πεδίου ροής καθώς και των θερμοκρασιακών κατανομών. Το σύνολο των αποτελεσμάτων συγκρίθηκε για συνολικά τρεις διαφορετικές διατάξεις των οποίων κύριο χαρακτηριστικό ήταν η διακύμανση των παραγόμενων θερμικών φορτίων στο χώρο.

Στις τρεις διαφορετικές γεωμετρίες που δημιουργήθηκαν, η πρώτη είχε το χαρακτηριστικό ότι τα μεγάλα παραγόμενα θερμικά φορτία τοποθετήθηκαν σχετικά σε μακρινές αποστάσεις. Στην δεύτερη διάταξη τα μεγάλα φορτία τοποθετήθηκαν πιο κοντά, ενώ στη τρίτη διάταξη τα εν φορτία τοποθετήθηκαν σε πολύ κοντινή απόσταση μεταξύ τους.

Παρατηρήθηκε ότι στην πρώτη διάταξη υπάρχει ιδιαίτερα αποδοτική κάλυψη των θερμικών φορτίων. Η δεύτερη διάταξη καλύπτει τις θερμικές απαιτήσεις αλλά με μικρότερο βαθμό απόδοσης, ενώ τέλος η τρίτη διάταξη κρίνεται μη επαρκής για την κάλυψη των θερμικών απαιτήσεων. Η τοποθέτηση σε κοντινή απόσταση πηγών παραγωγής μεγάλων θερμικών φορτίων έχει σαν αποτέλεσμα την ευρύτερη αύξηση της θερμοκρασίας στον περιβάλλοντα χώρο και παράλληλα την μείωση της αποδοτικής ψύξης των συστημάτων που βρίσκονται στο χώρο.

Λέξεις κλειδιά: κέντρα δεδομένων, κατανάλωση ενέργειας, κέντρο διαχείρισης δεδομένων, υπολογιστική ρευστοδυναμική, πεδίο ροής, κατανομή θερμοκρασίας, αισθητήρες μέτρησης, συνεχής παρακολούθηση.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Δρ. Σαρρή Ιωάννη που με ανέλαβε για την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, για την επίβλεψή του όλο αυτό το διάστημα και την βοήθειά του.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την ανεκτίμητη στήριξή τους στην ολοκλήρωση των σπουδών μου και την επίτευξη των στόχων μου.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	8
1.1 Η αλλαγή εποχής και η ψηφιοποίηση των δεδομένων	8
1.2 Οι νέες απαιτήσεις για μεγάλο όγκο δεδομένων και διαχείρισης	9
1.3 Σκοπός και στόχοι της Διπλωματικής.....	11
1.4 Περιορισμοί της Έρευνας	112
1.5 Δομή της Διπλωματικής	12
2. Βιβλιογραφική Επισκόπηση	133
2.1 Τα πρώτα κέντρα διαχείρισης δεδομένων.....	14
2.2 Εξέλιξη ανάπτυξης των Datacenters (τύποι/δομές/κατηγορίες Datacenters)	15
2.3 Σημερινή κατάσταση και απαιτήσεις της εποχής μας	20
2.4 Μελλοντική εξέλιξη και απαιτήσεις	25
2.5 Παραδείγματα από υφιστάμενα Datacenters	25
2.6 Ενεργειακή ανάλυση των DataCenters	30
2.6.1. Ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας	31
2.6.2 Απόδοση ψύξης	31
2.6.3 Εξοικονόμηση Ενέργειας και Μείωση Κατανάλωσης Συστήματος.....	333
2.7 Βασικές αρχές εφαρμοσμένης ρευστοδυναμικής	35
2.8 Συμπεράσματα	37
3. Ενεργειακή ανάλυση σε υφιστάμενη εφαρμογή	388
3.1 Επιλογή Data center για μελέτη	388
3.2 Επιλογή Οριακών συνθηκών	400
3.2.1 Οριακή συνθήκη εισόδου	400
3.2.2 Οριακή συνθήκη εξόδου	400
3.2.3 Οριακή συνθήκη θερμικών φορτίων	400
3.2.4 Οριακή συνθήκη θερμοκρασίας.....	411
3.3 Δημιουργία του πλέγματος.....	411
3.4 Επιλογή κατάλληλων ρυθμίσεων	422
3.5 Μέθοδοι παρουσίασης και σύγκρισης των αποτελεσμάτων	422
4. Παρουσίαση των αποτελεσμάτων	444
4.1 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της πρώτης διάταξης.....	444
4.1.1 Ανάλυση της ροής του αέρα	444
4.1.2 Ανάλυση Θερμικών φορτίων.....	488

4.2 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της δεύτερη διάταξης.....	500
4.2.1 Ανάλυση της ροής του αέρα	500
4.2.2 Ανάλυση Θερμικών φορτίων.....	544
4.3 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της τρίτης διάταξης	566
4.3.1 Ανάλυση της ροής του αέρα	566
4.3.2 Ανάλυση Θερμικών φορτίων.....	600
4.4 Συμπεράσματα	622
5. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων	633
5.1 Ανάλυση των αποτελεσμάτων της πρώτης γεωμετρίας	633
5.2 Ανάλυση των αποτελεσμάτων της δεύτερης γεωμετρίας.....	655
5.3 Ανάλυση των αποτελεσμάτων της τρίτης γεωμετρίας	666
6. Συμπεράσματα και Προτάσεις.....	677
6.1 Γενικά συμπεράσματα	677
6.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	688
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	69

1. Εισαγωγή

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, οι υπολογιστές γίνονται όλο και πιο αναπόσπαστο μέρος του τρόπου ζωής των ανθρώπων. Από τα απλά email έως τις θαυματοργές καινοτομίες στην ιατρική (και όχι μόνο), έχει παρατηρηθεί τεράστια αύξηση της υπολογιστικής ισχύος σε συνδυασμό πάντα με τις προόδους που έχουν επιτευχθεί στην αποθήκευση δεδομένων και την παγκόσμια δικτύωση, έχουν επιτευχθεί σημαντικές βελτιώσεις στην ποιότητα ζωής μας. Παρόλα αυτά, η ανάπτυξη προς αυτή την κατεύθυνση έχει οδηγήσει σε σημαντική αύξηση των ποσοτήτων ενέργειας που καταναλώνουν αυτά τα συστήματα, όχι μόνο για την λειτουργία τους, αλλά και για την κάλυψη αναγκών ψυκτικών φορτίων. Καθημερινά, όλο και περισσότερες λειτουργίες ενσωματώνονται στα συστήματα αυτά με αποτέλεσμα αυτή η αυξανόμενη τάση να δημιουργεί μια έντονη ανησυχία για την ταχεία ανάπτυξη της ζήτησης ενέργειας των κέντρων δεδομένων. Με δεδομένη και τη κατάσταση για τη περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση, οδηγούμαστε εύλογα σε αναζήτηση παραγόντων που σχετίζονται με την ενεργειακή απόδοση στον εν λόγω τομέα.

Τα κέντρα δεδομένων είναι τα εργοστάσια πληροφοριών που διαμορφώνουν τη σύγχρονη εμπειρία μας. Η πρόσβαση σε διαδικτυακές πληροφορίες που κυμαίνονται από την ανάγνωση της προσωπικής μας ηλεκτρονικής αλληλογραφίας (email), των ειδήσεων, το εμπόριο, τη χρήση των μέσων κοινωνικής δικτύωσης και ψυχαγωγίας, προβολή ταινιών, σχεδιασμό σύγχρονων προϊόντων κάθε κλίμακας, οι επιστημονικές ανακαλύψεις, η έρευνα για πετρέλαιο, η εξάπλωση και η καταπολέμηση ασθενειών, η ψηφιακή οικονομία κ.α., είναι κάποια από τα αντικείμενα τα οποία εξαρτώνται άμεσα από τα κέντρα δεδομένων τα οποία παρέχουν τον υπολογιστικό κορμό για το διαδίκτυο.

Το 2010, περίπου 30 εκατομμύρια διακομιστές λειτουργούσαν σε όλο τον κόσμο [2], ένας αριθμός ο οποίος αυξάνεται ετησίως. Η ανάπτυξη του “Internet of Things” (IOT) αναμένεται να αυξήσει ακόμα περισσότερο τον αριθμό των συνδεδεμένων συσκευών και να ενισχύσει την προσδοκία ότι οι ζωές μας συνδέονται μεταξύ τους μέσω της υπολογιστικής τεχνολογίας [3].

Από την προοπτική της συνολικής χρήσης ενέργειας, οι κεντρικοί υπολογιστές που χρησιμοποιούνται σε κέντρα δεδομένων σε σύγχρονες εγκαταστάσεις είναι ιδιαίτερα αποδοτικοί. Ωστόσο, τα κέντρα δεδομένων απαιτούν μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας τόσο άμεσα για να τροφοδοτήσουν με ηλεκτρική ενέργεια όλες αυτές τις ηλεκτρονικές πλακέτες, όσο και έμμεσα για να βοηθήσουν στην διατήρηση της θερμοκρασίας ώστε να μην υπάρξει πρόβλημα στον εξοπλισμό. Για το λόγο αυτό, τα μεγάλα θερμικά φορτία που παράγονται μέσα σε αυτά τα συστήματα θα πρέπει να αποβάλλονται ώστε να μην οδηγηθούμε σε καταστροφικά αποτελέσματα.

1.1 Η αλλαγή εποχής και η ψηφιοποίηση των δεδομένων

Καθώς η οικονομία μας μετατοπίζεται από τη διαχείριση χαρτιού στη διαχείριση ψηφιακών πληροφοριών, τα κέντρα δεδομένων τα οποία αποτελούνται από τις εγκαταστάσεις που περιέχουν κυρίως ηλεκτρονικό εξοπλισμό που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία δεδομένων, την αποθήκευση δεδομένων και δικτύωση επικοινωνιών, έχουν γίνει κοινά και απαραίτητα για τη λειτουργία του συνόλου των συστημάτων που χρησιμοποιούν οι αναπτυγμένες κοινωνίες. Τα κέντρα δεδομένων βρίσκονται σε σχεδόν κάθε τομέα της οικονομίας. Ο κλάδος αυτός, βρίσκεται στη μέση μιας σημαντικής περιόδου ανάπτυξης που τονώνεται από την αύξηση ζήτησης για επεξεργασία και αποθήκευση δεδομένων. Αυτή η ζήτηση καθοδηγείται από διάφορους παράγοντες, όπως:

- η αυξημένη χρήση ηλεκτρονικών συναλλαγών σε χρηματοοικονομικές υπηρεσίες, όπως η ηλεκτρονική τραπεζική και ηλεκτρονικές συναλλαγές
- η αυξανόμενη χρήση της διαδικτυακής επικοινωνίας και ψυχαγωγίας
- η στροφή σε ηλεκτρονικούς ιατρικούς φακέλους για την υγειονομική περίθαλψη
- η ανάπτυξη του παγκόσμιου εμπορίου και υπηρεσιών, και,
- η υιοθέτηση δορυφορικής πλοήγησης και ηλεκτρονικής παρακολούθησης αποστολών στις μεταφορές.

Άλλες σημαντικές τάσεις που συμβάλλουν στην ανάπτυξη των datacenter στον κυβερνητικό τομέα περιλαμβάνουν:

- χρήση του διαδικτύου για τη δημοσίευση κυβερνητικών πληροφοριών (π.χ. gov.gr)
- κυβερνητικούς κανονισμούς που απαιτούν διατήρηση ψηφιακών αρχείων
- βελτιωμένες απαιτήσεις αποκατάστασης από καταστροφές
- υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης, υγείας και ασφάλειας
- ασφάλεια πληροφοριών και εθνική ασφάλεια
- ψηφιακή παροχή κρατικών υπηρεσιών (π.χ. ηλεκτρονική υποβολή φόρων, on-line παρακολούθηση, κ.λπ.), και,
- επιστημονικούς υπολογισμούς υψηλής απόδοσης.

Τα τελευταία πέντε χρόνια, η αυξανόμενη ζήτηση για πόρους υπολογιστών έχει οδηγήσει σε σημαντική αύξηση του αριθμού των διακομιστών κέντρων δεδομένων, κάτι που συνοδεύεται με διπλασιασμό της ενέργειας που χρησιμοποιείται από αυτούς τους διακομιστές και την υποδομή τροφοδοσίας και ψύξης που τους υποστηρίζει. Αυτή η αύξηση σε χρήση ενέργειας έχει μια σειρά από σημαντικές επιπτώσεις, όπως:

- αυξημένο ενεργειακό κόστος για τις επιχειρήσεις και το κράτος που φιλοξενεί το συγκεκριμένο Datacenter
- αυξημένες εκπομπές, συμπεριλαμβανομένων των αερίων του θερμοκηπίου, από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- αυξημένη καταπόνηση στο υπάρχον δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη της αυξημένης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, και,
- αυξημένο κόστος κεφαλαίου για την επέκταση της χωρητικότητας των datacenter και την κατασκευή νέων κέντρων δεδομένων.

Για αυτούς τους λόγους, υπάρχει τεράστιο ερευνητικό ενδιαφέρον για νέο σχεδιασμό υψηλότερης ενεργειακής απόδοσης σε αυτό το τομέα ιδιαίτερα στην εποχή μας, όπου επικρατεί η τάση για δημιουργία όλο και μεγαλύτερου μεγέθους τέτοιων συστημάτων.

1.2 Οι νέες απαιτήσεις για μεγάλο όγκο δεδομένων και διαχείρισης

Με την έλευση των δικτύων κινητής τηλεφωνίας 5ης γενιάς, ο σωστός υπολογισμός των κέντρων δεδομένων αποτελεί ίσως το πιο σημαντικό παράγοντα στην υλοποίηση και λειτουργία αυτών των κέντρων. Ωστόσο, ο σωστός και αποδοτικός σχεδιασμός ανάλογων υποδομών συνδέεται άμεσα με την κατάλληλη επιλογή ή δημιουργία μεθόδων μεταφοράς υψηλής απόδοσης για την απόρριψη των μεγάλων παραγόμενων θερμικών ποσών, που δημιουργούνται κατά την λειτουργία ενός τέτοιου κέντρου.

Τα κέντρα δεδομένων και τα συστήματα ψύξης αυτών είναι κρίσιμες υποδομές που απαιτούν ενέργεια και λειτουργούν συνεχόμενα και αδιάλειπτα (24/7). Παρέχουν υπολογιστικές λειτουργίες που είναι ζωτικής σημασίας για τις καθημερινές λειτουργίες κορυφαίων οικονομικών, επιστημονικών και τεχνολογικών οργανισμών σε όλο τον κόσμο.

Η ποσότητα ενέργειας που καταναλώνεται από τα κέντρα αυτά υπολογίζεται στο 3% της συνολικής παγκόσμιας χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας, με ετήσιο ρυθμό αύξησης 4,4%. Φυσικά, αυτό έχει τεράστιο οικονομικό, περιβαλλοντικό αντίκτυπο και απόδοση που καθιστά την ενεργειακή απόδοση των συστημάτων ψύξης ένα από τα κύρια θέματα των σχεδιαστών κέντρων δεδομένων, πριν από τις παραδοσιακές εκτιμήσεις διαθεσιμότητας και ασφάλειας [4]. Από έρευνες [5], αποδεικνύεται ότι ο μεγαλύτερος καταναλωτής ενέργειας σε ένα τυπικό κέντρο δεδομένων είναι η υποδομή ψύξης (50%), ακολουθούμενη από διακομιστές και συσκευές αποθήκευσης (26%).

Έτσι, προκειμένου να ελεγχθεί το κόστος και να ανταποκριθεί στην αυξανόμενη ζήτηση για εγκαταστάσεις κέντρων δεδομένων, οι σχεδιαστές πρέπει να θέσουν την υποδομή ψύξης και την ενεργειακή της απόδοση ως πρωταρχικό στόχο.

Μέχρι πρόσφατα, αυτό ήταν ένα δύσκολο έργο λόγω του γεγονότος ότι τα βιομηχανικά πρότυπα που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης των κέντρων δεδομένων και των εγκαταστάσεων διακομιστών ήταν ασυνεπή. Μόλις το 2010, εισήχθη ο πρώτος κανονισμός για τις μετρήσεις ενεργειακής απόδοσης σε κέντρα δεδομένων, οι οποίες χρησίμευαν ως μέτρηση απόδοσης και όχι ως πρότυπο σχεδιασμού και παρόλα αυτά απέτυχε να αντιμετωπίσει σχετικά στοιχεία σχεδιασμού, επομένως το πρόβλημα παρέμεινε. Λίγα χρόνια αργότερα, και σε νεότερο πρότυπο ενεργειακής απόδοσης αναπτύχθηκε ένα νέο πρότυπο που ήταν πιο πρακτικό για τη βιομηχανία των κέντρων δεδομένων. Σε αυτό το πρότυπο, μεταξύ άλλων, καθορίζονται οι ελάχιστες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης των κέντρων αυτών για σχεδιασμό και κατασκευή, για τη δημιουργία ενός σχεδίου λειτουργίας και συντήρησης και για τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας[1].

Επιπλέον, παρέχονται οδηγίες για το σωστό σχεδιασμό, την κατασκευή, τη λειτουργία και τη συντήρηση αυτών των συστημάτων. Αυτό το πρότυπο αντιμετωπίζει ρητά τις μοναδικές ενεργειακές απαιτήσεις των κέντρων δεδομένων σε αντίθεση με τα τυπικά κτίρια, ενσωματώνοντας έτσι τις πιο κρίσιμες πτυχές και τους κινδύνους που περιβάλλουν τη λειτουργία αυτών.

Όλα τα παραπάνω είχαν σαν αποτέλεσμα να δημιουργηθούν συγκεκριμένες μορφές/μεθόδους ψύξης των κέντρων δεδομένων. Αυτές συνοψίζονται παρακάτω:

- Χρήση τυπικών κλιματιστικών μονάδων: οι πιο συνηθισμένοι τύποι είναι οι κεντρικές μονάδες κλιματιστικού (HVAC) ή μεμονωμένες κλιματιστικές μονάδες (AC) που παράγουν και οδηγούν μάζες κρύου αέρα προς την απαιτούμενη κατεύθυνση για να αφαιρέσουν τον ζεστό αέρα από τη γύρω περιοχή.
- Ζεστός διάδρομος/κρύος διάδρομος: ο κρύος αέρας (ή ο διάδρομος) περνάει στο μπροστινό μέρος των ραφιών διακομιστή και ο ζεστός αέρας βγαίνει από την πίσω πλευρά των ραφιών. Ο κύριος στόχος εδώ είναι η διαχείριση της ροής αέρα προκειμένου να εξοικονομηθεί ενέργεια και να μειωθεί το κόστος ψύξης.
- Περιοχή θερμού διαδρόμου/κρύου διαδρόμου: ο περιορισμός των θερμών/κρύων διαδρόμων γίνεται κυρίως για να διαχωριστεί ο κρύος και ο ζεστός αέρας μέσα στο δωμάτιο και να αφαιρεθεί ο ζεστός αέρας από τα “θερμά” κουτιά.
- Υγρόψυξη: τα συστήματα υγρής ψύξης παρέχουν έναν εναλλακτικό τρόπο αποβολής θερμότητας από το σύστημα. Αυτή η προσέγγιση περιλαμβάνει κλιματιστικά ή ψυκτικά με κρύο νερό κοντά στην πηγή θερμότητας (σύγχρονη μέθοδος ψύξης).
- Πράσινη ψύξη: είναι μία από τις βιώσιμες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στα κέντρα δεδομένων. Αυτό θα μπορούσε να περιλαμβάνει απλώς το άνοιγμα ενός παραθύρου του κέντρου δεδομένων που καλύπτεται με φίλτρα και περσίδες για να επιτραπεί η φυσική ψύξη. Αυτή η προσέγγιση εξοικονομεί τεράστιο ποσό χρημάτων και ενέργειας.

Η επιλογή του καταλληλότερου συνδυασμού αυτών των τεχνικών ψύξης μπορεί να είναι δύσκολη. Δεδομένης της φύσης του προβλήματος, θεωρείται σίγουρο στο σύνολο των περιπτώσεων ότι θα πρέπει να γίνει αναλυτική μελέτη για την επιλογή της αποδοτικότερης μεθόδου ή των συνδυασμό αυτών με απώτερο στόχο την αποδοτικότερη αποβολή του παραγόμενου θερμικού φορτίου.

1.3 Σκοπός και στόχοι της Διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά στο σχεδιασμό και την ανάλυση με τη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων συγκεκριμένων διατάξεων του εξοπλισμού και το τρόπο κατά τον οποίο αυτές οι διατάξεις επηρεάζουν στην απόδοση ψύξης σε ένα κέντρο δεδομένων.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να δημιουργηθούν τρεις συγκεκριμένες διατάξεις τοποθέτησης των μηχανημάτων που παράγουν θερμικά φορτία και με το τρόπο αυτό να αναλυθούν οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις σε συγκεκριμένα σημεία του χώρου. Με το τρόπο αυτό θα αποδειχθεί κατά πόσο επιτυγχάνεται αποδοτική ψύξη στο μεγαλύτερο μέρος του χώρου όπου τοποθετείται ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός με το δυνατόν χαμηλότερο ενεργειακό ποσό, με απώτερο στόχο την μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος του εν λόγω κέντρου.

Για την επίτευξη του στόχου αυτού, έχει χρησιμοποιηθεί το μηχανολογικό πακέτο INVENTOR στο οποίο έχουν σχεδιαστεί οι κατάλληλες γεωμετρίες και έχει πραγματοποιηθεί ανάλυση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής για να αποδοθούν τα κατά περίπτωση πεδία ροής καθώς και η απεικόνιση των θερμικών φορτίων ώστε να οδηγηθούμε σε κατάλληλα συμπεράσματα τα οποία οδηγούν στην βέλτιστη επιλογή του αποδοτικότερου συστήματος ψύξης και της καταλληλότερης διάταξης. Με το τρόπο αυτό επιτυγχάνεται συρρίκνωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος λειτουργίας του κέντρου δεδομένων, αφού απαιτείται χαμηλότερο ενεργειακό ποσό.

1.4 Περιορισμοί της Έρευνας

Αν και η προτεινόμενη μεθοδολογία δεν παρουσιάζει αυξημένο βαθμό δυσκολίας, υπάρχουν κάποια σημεία τα οποία έχουν επιλεγεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να μη αυξηθεί ο βαθμός δυσκολίας, αλλά ούτε και ο απαιτούμενος χρόνος δεδομένου ότι πρόκειται για διπλωματική εργασία.

Ένας πρώτος παράγοντας σχετίζεται με την επιλογή του συστήματος ψύξης των κέντρων δεδομένων. Από την βιβλιογραφία προκύπτουν πάρα πολλά διαφορετικά συστήματα τα οποία το κάθε ένα παρουσιάζει πλήθος πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε δύσκολες αποφάσεις σχετικά με το τι θα πρέπει να αναλυθεί προκαλώντας σύγχυση στον ερευνητή.

Για το λόγο αυτό, η παρούσα διπλωματική ασχολείται με την ανάλυση ενός παράγοντα εξ αυτών και συγκεκριμένα για την επίδραση που έχει η πυκνότητα συγκεκριμένων διατάξεων ραφιών διακομιστών. Έτσι, εξετάζονται και συγκρίνονται συγκεκριμένες περιπτώσεις τοποθέτησης στο διαθέσιμο χώρο, περισσότερες πληροφορίες παρέχονται παρακάτω στο κεφάλαιο τρία.

Στην ανάλυση των υπό μελέτη περιπτώσεων, δεν λαμβάνονται υπόψη άλλοι παράγοντες οι οποίοι είναι δύσκολο να αξιολογηθούν και να ποσοτικοποιηθούν, όπως π.χ., η εξωτερική θερμοκρασία (εποχή), οι διακυμάνσεις στη πυκνότητα του αέρα, οι απώλειες από άλλους παράγοντες (όπως π.χ. ανθρώπινη δραστηριότητα, τεχνικών, καθαριστών κ.α.), η επίδραση συστήματος φωτισμού κ.λπ.

Ένας άλλος παράγοντας είναι αυτός που συνδέεται με την μέθοδο προσομοίωσης και τον τρόπο με τον οποίο οι φυσικές πληροφορίες του προβλήματος μεταφέρονται σε πληροφορίες στην “γλώσσα” του υπολογιστή ώστε να προχωρήσει μία τέτοια διαδικασία ανάλυσης. Οι οριακές συνθήκες έχουν επιλεγεί με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στις πραγματικές συνθήκες.

Ένα άλλο θέμα που προκύπτει από την ανάλυση σχετίζεται με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων και συγκεκριμένα με τον αριθμό των στοιχείων (ή κελιών) τα οποία θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν ώστε να πετυχαίνεται λύση ανεξάρτητη της πυκνότητας του πλέγματος. Σε αυτή τη περίπτωση ο αριθμός των κελιών έχει επιλεγεί με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται σχετικά σωστό αποτέλεσμα με τον ελάχιστο δυνατό αριθμό κελιών, διατηρώντας χαμηλά τις χρονικές απαιτήσεις για την ολοκλήρωση της ανάλυσης.

1.5 Δομή της Διπλωματικής

Η δομή της διπλωματικής αυτής έχει επιλεγεί με τρόπο, ώστε να τροφοδοτεί τον αναγνώστη με το σύνολο του απαιτούμενου υλικού το οποίο θα συγκρίνει προκειμένου να οδηγηθεί σε βάσιμα συμπεράσματα.

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί γίνεται αναφορά σε υφιστάμενα εργαλεία και μεθοδολογίες οι οποίες χρησιμοποιούνται έως και σήμερα, ενώ παρέχεται και ένα μέρος ως μαθηματικό υπόβαθρο που απαιτείται προκειμένου να εφαρμοστεί η μέθοδος της υπολογιστικής ρευστομηχανικής.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία των υπό μελέτη περιπτώσεων, και οποιοδήποτε άλλο στοιχείο κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστεί ώστε να διευκολυνθεί η εν λόγω έρευνα.

Το κεφάλαιο τέσσερα περιέχει την παρουσίαση των αποτελεσμάτων από τις περιπτώσεις που αναλύθηκαν παραπάνω. Η βασική παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται με τη χρήση διανυσμάτων ταχύτητας για την απεικόνιση του πεδίου ροής και με διαγράμματα θερμοκρασιακών ζωνών για την παρουσίαση των θερμοκρασιακών μεταβολών.

Ακολουθεί, η ανάλυση των αποτελεσμάτων στο πέμπτο κεφάλαιο, στο τελευταίο κεφάλαιο (έκτο κεφάλαιο), γίνεται καταγραφή των γενικών συμπερασμάτων που προέκυψαν από την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής, ενώ παρέχονται και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα στο συγκεκριμένο έργο.

2. Βιβλιογραφική Επισκόπηση

Ένα κέντρο διαχείρισης δεδομένων ή datacenter, είναι ένα κτίριο ή ένας ειδικός χώρος μέσα σε ένα κτίριο ή μια ομάδα κτιρίων[9] που χρησιμοποιείται για τη στέγαση συστημάτων υπολογιστών και συναφών εξαρτημάτων, όπως τηλεπικοινωνίες και συστήματα αποθήκευσης. Δεδομένου ότι οι λειτουργίες πληροφορικής είναι ζωτικής σημασίας, στον ίδιο χώρο περιλαμβάνονται πλεονάζοντα ή εφεδρικά εξαρτήματα για παροχή ρεύματος, συνδέσεις επικοινωνίας δεδομένων, περιβαλλοντικούς ελέγχους (π.χ. κλιματισμός, καταστολή πυρκαγιάς) και διάφορες συσκευές ασφαλείας.

Ένα μεγάλο κέντρο δεδομένων, είναι μια λειτουργία βιομηχανικής κλίμακας που χρησιμοποιεί τόσο ηλεκτρική ενέργεια όσο μια μικρή πόλη [10]. Η εκτιμώμενη παγκόσμια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας των κέντρων δεδομένων το 2022 ήταν 240-340 TWh, ή περίπου 1-1,3% της παγκόσμιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας [11]. Σε αυτό δεν συμπεριλαμβάνεται η ενέργεια που χρησιμοποιείται για την εξόρυξη κρυπτονομισμάτων, η οποία εκτιμήθηκε ότι ήταν περίπου 110 TWh το 2022, ή περίπου 0,4% της παγκόσμιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας[11].

Τα κέντρα δεδομένων μπορεί να διαφέρουν πολύ ως προς το μέγεθος, τις απαιτήσεις ισχύος, τον πλεονασμό και τη συνολική δομή. Τέσσερις κοινές ομάδες που χρησιμοποιούνται για την κατηγοριοποίηση αυτών των κέντρων είναι [12]:

- Τα επιτόπια κέντρα δεδομένων, που αναφέρονται επίσης ως κέντρα δεδομένων επιχείρησης, στεγάζονται σε έναν ειδικό χώρο της ίδιας της εταιρείας. Μπορούν να αλλάξουν ή να επεκταθούν ανάλογα με τις ανάγκες της και είναι εύκολα προσβάσιμα για γενική συντήρηση ή αντιμετώπιση προβλημάτων. Τα επιτόπια κέντρα δεδομένων, αυξάνουν την απόδοση επειδή ο εξοπλισμός αποθηκεύεται στην τοποθεσία της εταιρείας. Αυτό συνήθως, διατηρεί τα δεδομένα ασφαλή και τα δεδομένα μπορούν να ελέγχονται από την εταιρεία που τα κατέχει. Κάποια από τα μειονεκτήματα αυτής της κατηγορίας είναι ότι μπορεί να είναι ακριβά και να καταλαμβάνουν πολλούς πόρους, δεδομένου ότι, απαιτούν ένα αξιόπιστο σύστημα τροφοδοσίας και ψύξης, ένα μεγάλο δίκτυο, ένα σύστημα ασφαλείας και πολλά άλλα, τα οποία μπορεί να είναι δύσκολο να υποστηριχθούν εσωτερικά.
- Οι εγκαταστάσεις συνεγκατάστασης αποτελεί μία διαφορετική περίπτωση από την παραπάνω. Εδώ οι εταιρείες νοικιάζουν ή μισθώνουν χώρο σε πολλούς οργανισμούς για να στεγάσουν τα κέντρα δεδομένων τους. Πολλοί οργανισμοί, χρησιμοποιούν αυτό το τρόπο για να επωφεληθούν από την ψύξη, τη φυσική ασφάλεια, τις εγγυήσεις χρόνου λειτουργίας και παρακολούθησης, τη συντήρηση κ.λπ.. Αυτή η κατηγορία διαιρείται σε μικρής και μεγάλης κλίμακας. Η πρώτη παρέχει μικρότερους χώρους προς ενοικίαση και περιλαμβάνει μόνο εξοπλισμό υποδομής προς ενοικίαση, ενώ οι εγκαταστάσεις διατηρούν τον εξοπλισμό διανομής, τις γεννήτριες, την ψύξη, το UPS (για την αδιάλειπτη τροφοδοσία) και άλλο εξοπλισμό. Στη δεύτερη κατηγορία παρέχεται η δυνατότητα για ενοικίαση ολόκληρης της μονάδας κέντρου δεδομένων η οποία καταλαμβάνει μεγαλύτερους χώρους. Αυτές οι εγκαταστάσεις είναι συνήθως καλύτερες για εταιρείες που χρειάζονται πολύ χώρο και ενδέχεται να επεκταθούν στο μέλλον. Και στις δύο υποκατηγορίες μισθώνεται ισχύς ως κόστος ανά κιλοβάτ(KW).
- Τα κέντρα δεδομένων υπερκλίμακας, είναι μεγάλα και μπορούν να στεγάσουν χιλιάδες ή εκατομμύρια διακομιστές κέντρων δεδομένων. Αυτά τα κέντρα δεδομένων προορίζονται να κλιμακωθούν, κάτι που μπορεί να γίνει με την αύξηση της ισχύος του συστήματος ή την προσθήκη περισσότερων racks και εξοπλισμού κέντρων δεδομένων. Οι εταιρείες με μεγάλο όγκο δεδομένων επωφελούνται από την επεκτασιμότητα των κέντρων δεδομένων υπερκλίμακας.

- Τα κέντρα δεδομένων αιχμής (Edge Data Centers), είναι παρόμοια με τα παραδοσιακά κέντρα, με τη διαφορά ότι είναι μικρότερα και χτισμένα κοντά γεωγραφικά στον τελικό χρήστη. Τα κέντρα δεδομένων αυτού του τύπου μειώνουν την καθυστέρηση, αυξάνουν τη χωρητικότητα και βελτιώνουν τη συνδεσιμότητα.

Προκειμένου να γίνει κατανοητή η ανάλυση που ακολουθεί σε επόμενα κεφάλαια, κρίνεται σκόπιμο να αποδοθούν κάποια βασικά στοιχεία και να αναλυθούν τα κατάλληλα εργαλεία τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί για την πραγματοποίηση της παρούσας ερευνητικής εργασίας.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται σε αντίστοιχες παραγράφους στοιχεία για τον προσδιορισμό των απαιτούμενων ειδικών εννοιών και εργαλείων που χρησιμοποιούνται στη μεθοδολογία προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος ο οποίος είναι η ενεργειακή ανάλυση συγκεκριμένων περιπτώσεων κέντρων δεδομένων.

2.1 Τα πρώτα κέντρα διαχείρισης δεδομένων

Τα κέντρα δεδομένων έχουν τις ρίζες τους στη δεκαετία του 1940, μια εποχή όπου ο πρώτος προγραμματιζόμενος υπολογιστής στον κόσμο, ο ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer), ήταν η κορυφή της υπολογιστικής τεχνολογίας. Σχεδιάστηκε από τον στρατό των ΗΠΑ για τον υπολογισμό των πυρών πυροβολικού κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου και χρησιμοποιήθηκε ακόμη και από μαθηματικούς και επιστήμονες στο Manhattan Project για την ανάπτυξη της πρώτης θερμοπυρηνικής βόμβας, η οποία τελικά θα έπεφτε στη Χιροσίμα και στο Ναγκασάκι το 1945. Αυτή η νέα τεχνολογία είχε μεγάλες δυνατότητες, ειδικά στον αμυντικό τομέα, όπου αντίστοιχα κέντρα ENIAC είχαν κατασκευαστεί σε στρατιωτικές εγκαταστάσεις.

Το 1947, ανατέθηκε σε μηχανικούς και ερευνητές από τη νεοϊδρυθείσα Κεντρική Υπηρεσία Πληροφοριών (CIA) να βοηθήσουν στην ανάπτυξη και την καινοτομία της τεχνολογίας ENIAC κατά την περίοδο εκκίνησης του Ψυχρού Πολέμου. Τα πρώτα κέντρα δεδομένων ήταν απίστευτα πολύπλοκα. Με την πρωταρχική τους πρόθεση προσανατολισμένη προς τις υπηρεσίες πληροφοριών και τις στρατιωτικές λειτουργίες, η μυστικότητα ήταν πολύ σημαντική. Τα περισσότερα κέντρα δεδομένων είχαν μόνο μία ασφαλή πόρτα και κανένα παράθυρο. Χρειάζονταν τεράστιοι (και ακριβοί) αεραγωγοί και ανεμιστήρες για την ψύξη και εκατοντάδες μέτρα καλωδίωσης και σωλήνες κενού για τη σύνδεση όλων των εξαρτημάτων. Στη περίπτωση αυτή, τα κέντρα δεδομένων ήταν ακόμα πρωτόγονα. Τα καλώδια συχνά υπερθερμαίνονταν και αστοχούσαν. Η υπερθέρμανση αυτή, μπορούσε πολλές φορές να οδηγήσει ακόμη και σε πυρκαγιές.

Κατά τη διάρκεια των δεκαετιών του 1960 και του 1970, η υπολογιστική τεχνολογία εκτοξεύτηκε στα ύψη. Στις αρχές της δεκαετίας του 1960, η IBM (International Business Machines) κυκλοφόρησε τον πρώτο της υπολογιστή με τρανζίστορ που ονομάζεται TRADIC (TRANSistor DIGital Computer or TRansistorized Airborne DIGital Computer). Αυτό το νέο μοντέλο, βοήθησε τα κέντρα δεδομένων να περάσουν από τη στρατιωτική σφαίρα στην εμπορική, εξαλείφοντας την ανάγκη για εξελιγμένα συστήματα σωλήνων κενού. Το TRADIC αύξησε επίσης εκθετικά τις υπολογιστικές ικανότητες και δυνατότητες.

Επίσης, έκανε τα συστήματα υπολογιστών μικρότερα και ευκολότερα να χωρέσουν σε χώρους πολλαπλών χρήσεων όπως κτίρια γραφείων. Αυτά τα συστήματα, επέτρεψαν στη NASA να στείλει αστροναύτες στη Σελήνη. Η ταχεία καινοτομία και οι εξελίξεις κατά τη διάρκεια των δεκαετιών του 1960 και του 1970, σε συνδυασμό με τον τεράστιο πολλαπλασιασμό εταιρειών τεχνολογίας και υπολογιστών όπως η IBM, η IntelXerox και η SunMicrosystems, προανήγγειλαν την άφιξη των προσωπικών υπολογιστών στη δεκαετία του 1980. Η τεχνολογία της πληροφορίας άρχισε να γίνεται ένας τεράστιος οικονομικός συνεισφέρων σε όλο τον κόσμο και είχε αναπτυχθεί σε πρωτοφανή κλίμακα.

Το UNIX, έθεσε το πρότυπο για τους προσωπικούς υπολογιστές και ήταν η αφετηρία της τεχνολογίας που βασίζεται στα δεδομένα. Εξαρτήθηκε, από ένα μοντέλο «πελάτη-διακομιστή» στο οποίο πολλοί υπολογιστές, ορισμένοι προσωπικοί, άλλοι εμπορικοί, συνδέονταν μέσω του πρόσφατα αναπτυγμένου διαδικτύου σε έναν κεντρικό διακομιστή. Από τη δεκαετία του 1980 και τις αρχές της δεκαετίας του 1990, οι χρήστες άρχισαν να διασυνδέονται με διακομιστές που βρίσκονται σε κέντρα δεδομένων σε όλο τον κόσμο χρησιμοποιώντας το διαδίκτυο, θέτοντας τις βάσεις για το σύγχρονο κέντρο δεδομένων.

2.2 Εξέλιξη ανάπτυξης των Datacenters (τύποι/δομές/κατηγορίες Datacenters)

Η εποχή του dot-com ήταν μια γενική αναδιάρθρωση των παγκόσμιων οικονομιών που προκάλεσε η άνοδος του σύγχρονου διαδικτύου. Κατά συνέπεια, σηματοδότησε και την άνθηση του κέντρου δεδομένων παγκοσμίως. Το κέντρο δεδομένων έγινε κρίσιμο για την εθνική ασφάλεια, την υποδομή του διαδικτύου και την οικονομική απόδοση. Ακόμη και όταν η μόδα των dot-com έφτασε στην παρακμή της και άφησε στο πέρασμά της, τεράστιες οικονομικές διαμάχες, η έκρηξη του κέντρου δεδομένων συνεχίστηκε οδηγώντας Μηχανικούς σε όλο τον κόσμο να αφοσιωθούν στη δημιουργία κέντρων δεδομένων.

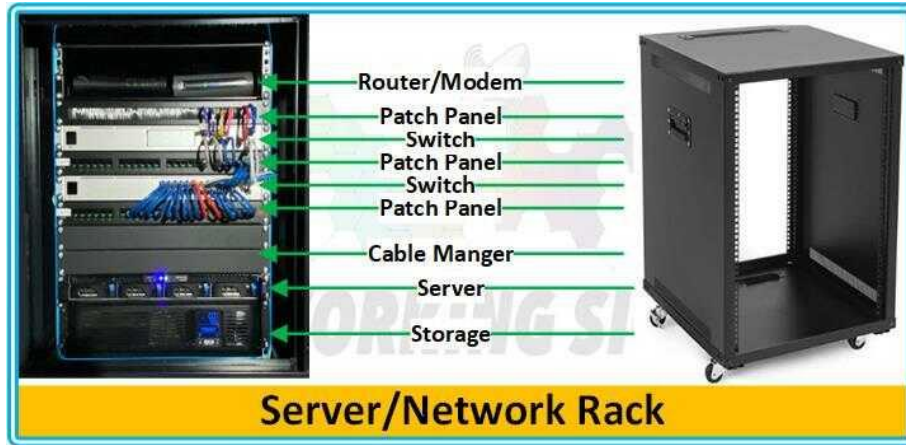
Οι εταιρείες χρειάζονταν γρήγορη σύνδεση στο διαδίκτυο και αδιάκοπη λειτουργία σε πρωτοφανή κλίμακα. Η δημιουργία τόσο ακριβών κέντρων δεδομένων και υποδομής διαδικτύου δεν ήταν βιώσιμη για πολλές μικρές εταιρείες, έτσι πολυεθνικές εταιρείες, όπως η Amazon και η Google άρχισαν να αναπτύσσουν τεράστια κέντρα δεδομένων που παρέχουν στις εταιρείες μια σειρά από υπηρεσίες και τεχνολογικές λύσεις. Ακολούθησε ο πολλαπλασιασμός σε μαζική κλίμακα στη δεκαετία του 2000 και του 2010. Αυτά τα νέα κέντρα δεδομένων, έφεραν χιλιάδες θέσεις εργασίας και απαιτούσαν σημαντικές αναβαθμίσεις στα τοπικά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας.

Ενώ πολλοί ήθελαν να αρπάξουν την ευκαιρία για υψηλότερους μισθούς και βελτιωμένες τοπικές υποδομές, υπήρξε μεγάλη διαμάχη γύρω από αυτά τα νέα κέντρα δεδομένων μεγέθους πόλης¹. Γρήγορα ακολούθησαν περιβαλλοντικοί κίνδυνοι και ζημιές, εξευγενισμός και μονοπώληση της εργασίας σε μικρές κοινότητες.

Τα κέντρα δεδομένων ξεκίνησαν να γίνονται συνώνυμα με την επιτήρηση. Επέτρεψαν σε Υπηρεσίες Εθνικής Ασφάλειας πολλών χωρών να κατασκοπεύουν ανθρώπους. Το διαδίκτυο άρχισε να καθορίζει όλο και περισσότερο τα παγκόσμια κοινωνικοοικονομικά τοπία, ενώ ταυτόχρονα έγιναν συνώνυμα με την οικονομική ανάπτυξη.

Η ανάπτυξη των κέντρων δεδομένων μεγάλης και υπερκλίμακας από το 2010 [15], έχει αλλάξει τον τρόπο με τον οποίο ο τομέας της πληροφορικής σχεδιάζεται και λειτουργεί. Στο παρελθόν, η παροχή ενέργειας και ο χώρος που βασίζεται σε άγνωστες ή γρήγορα μεταβαλλόμενες απαιτήσεις πληροφορικής, έχει οδηγήσει σε λανθάνουσα χωρητικότητα για την αναποτελεσματική χρήση της εγκατάστασης του κέντρου δεδομένων. Για παράδειγμα, έχουν δημιουργηθεί κέντρα διαχείρισης δεδομένων απαιτούμενης ισχύος 1,2 MW με τυχαία διαρρύθμιση και κατ' επέκταση πυκνότητας ραφιών (rack)η οποία οδήγησε σε απρόβλεπτες θερμικές ροές και υποβίβαση της σχετικής απόδοσης ενέργειας ψύξης.

¹ Ο όρος αναφέρεται στη βάση της απαιτούμενης καταναλισκόμενης ενέργειας, όπου πολλές φορές έφτανε αρκετά MW.



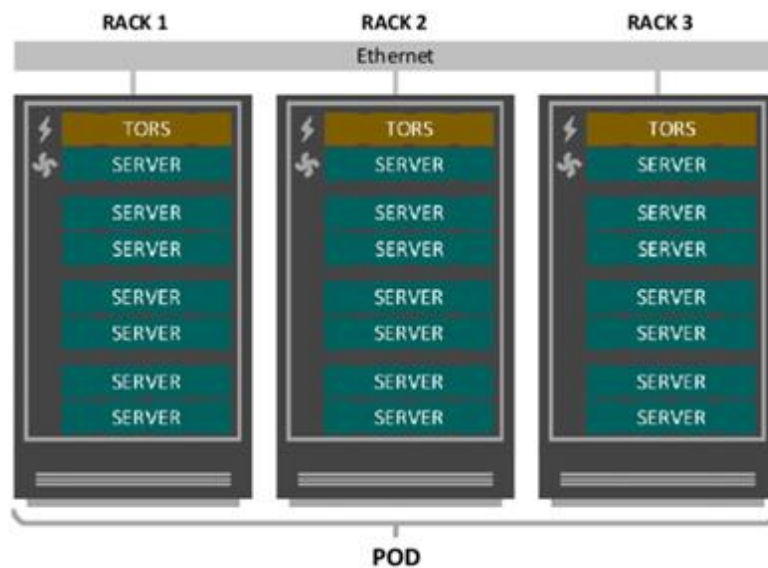
Σχήμα 2.1: Τυπική γεωμετρία rack.

Στα μικρά και μεσαία κέντρα δεδομένων, το rack είναι συνήθως το πρότυπο του υπολογισμού που χρησιμοποιούν οι σχεδιαστές για να εκτιμήσουν τις απαιτήσεις του κέντρου. Γνωρίζοντας τη μέση και τη μέγιστη πυκνότητα ραφιών μαζί με τον συνολικό αριθμό ραφιών, αυτό επιτρέπει, όχι μόνο τον υπολογισμό του αποτελεσματικού μεγέθους της εγκατάστασης, αλλά καθορίζει επίσης και θέματα τοπικών κυκλωμάτων και διακλάδωσης, καθώς και τη ροή αέρα που απαιτείται για κάθε ράφι.

Το πρότυπο rack, έχει δημιουργήσει επίσης ένα απλό πλαίσιο εργασίας ή μονάδα οργάνωσης για την ανάπτυξη IT και τη λειτουργία του. Για μεγαλύτερα κέντρα δεδομένων υπάρχει απαίτηση για ανάπτυξη IT πιο γρήγορα και σε μεγαλύτερες κλίμακες [17]. Αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη υποδομής σε επίπεδο pod. Ωστόσο, δεν υπάρχει παρόμοια βιομηχανική τυποποίηση για ανάπτυξη ομάδας ραφιών και υποστήριξη μεγαλύτερης υποδομής στον χώρο. Οι χειριστές κέντρων δεδομένων έχουν αναπτύξει τα δικά τους εσωτερικά πρότυπα, με εξειδικευμένες διαμορφώσεις διαδρόμων ζεστού-κρύου, χωρίς να υπάρχει κοινή/συγκεκριμένη αρχιτεκτονική.

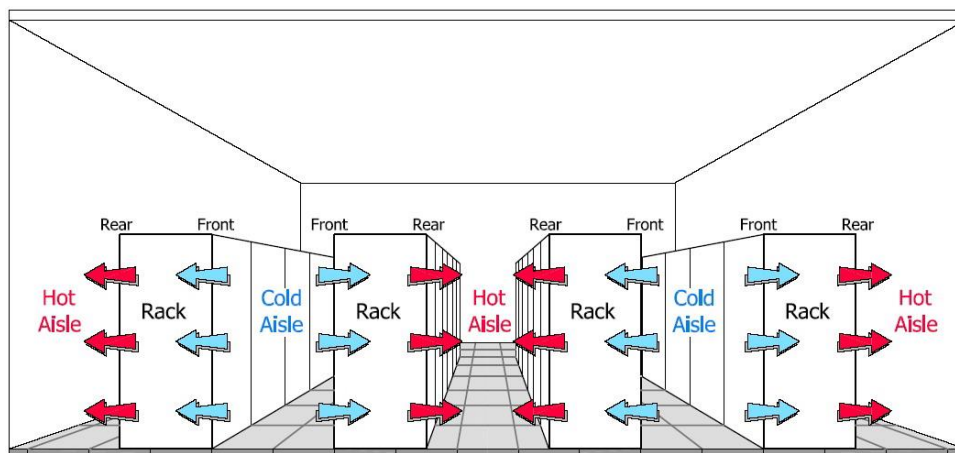


Σχήμα 2.2: Παράδειγμα γεωμετρίας pod.



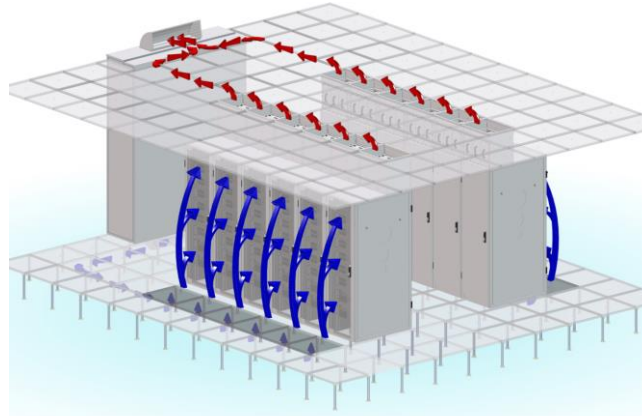
Σχήμα 2.3: Παράδειγμα διάταξης pod, (πηγή [16]).

Στόχος πάντα είναι, η βελτίωση της ομοιόμορφης ροής αέρα στην είσοδο ενός rack, διατηρώντας χαμηλό το κόστος εγκατάστασης. Ως εκ τούτου, η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη στρατηγική ψύξης είναι αυτή που αφορά στην ψύξη μεγάλων αποστάσεων, με κύριο στόχο να εμποδίζεται η ανακυκλοφορία του ζεστού αέρα και η μίξη του με το κρύο.



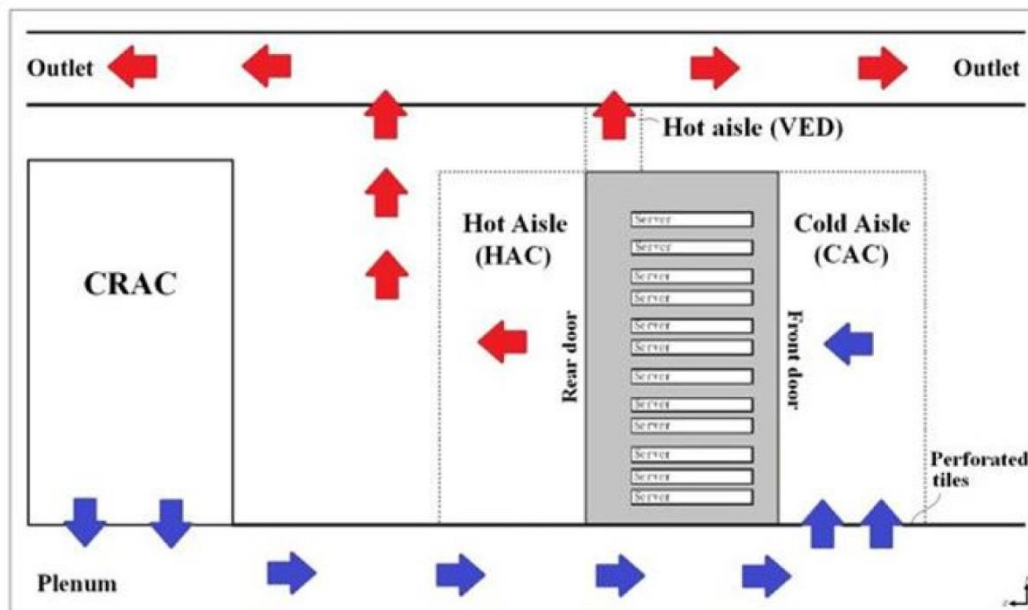
Σχήμα 2.4: Τυπική διάταξη κέντρου δεδομένων HVAC ζεστού διαδρόμου / κρύου διαδρόμου [81].

Οι συνήθεις προσεγγίσεις για την επίλυση των εν λόγω προβλημάτων είναι ο περιορισμός του ψυχρού διαδρόμου (CAC), ο περιορισμός θερμού διαδρόμου (HAC), και η τοποθέτηση καμινάδας με κατακόρυφο αγωγό (VED) [56]. Χρησιμοποιώντας CAC ή HAC μέσα σε ένα κέντρο δεδομένων, θα ωφελήσει τόσο την απαγωγή θερμότητας όσο και την εξοικονόμηση ενέργειας για το rack, ενώ η εγκατάσταση ενός VED βοηθά τον ζεστό αέρα να οδηγηθεί σε εξωτερικό περιβάλλον. Αυτές οι τεχνικές είναι πιο αποτελεσματικές από ένα παραδοσιακό ανοιχτό χώρο.



Σχήμα 2.5: Σχηματική απεικόνιση της διάταξης CAC, HAC και VED.

Ύστερα από πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν [18], [19], [20], για το θερμοκρασιακό πεδίο υπό συνθήκες σταθερής κατάστασης, αποδείχθηκε ότι, όταν το CAC είναι κλειστό, μπορεί να αποτρέψει αποτελεσματικά τη διαρροή κρύου αέρα, έτσι ώστε, τα διάτρητα πλακάκια μπροστά από το ράφι να μπορούν να οδηγήσουν ομαλά τον κρύο αέρα στον εσωτερικό χώρο του rack και όταν το HAC είναι ανοιχτό, η ροή ζεστού αέρα θα ανακυκλωθεί στο επάνω μέρος του rack σχηματίζοντας μια μικρή κυκλοφορία, προκαλώντας υπερθέρμανση και κάψιμο στον επάνω διακομιστή. Για να μειωθεί η προκύπτουσα ανομοιομορφία στη ροή του αέρα πριν εισέλθει στο ράφι, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάτρητα πλακίδια και ενεργά εξαρτήματα.



Σχήμα 2.6: Απεικόνιση θερμού και ψυχρού καναλιού κατά την ψύξη datacenter [58].

Οι ανεμιστήρες παράκαμψης που εισήχθησαν πρόσφατα μπορούν να βοηθήσουν τη ροή του αέρα να ξεπεράσει τη διαφορά πίεσης μεταξύ των διάτρητων πλακιδίων και του ψυχρού διαδρόμου, για τη βελτίωση της ομαλότητας της ροής αέρα και της ταχύτητα ροής στην είσοδο του κρύου διαδρόμου, καθώς και για τη μείωση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας ενός datacenter. Επιπλέον μελέτες που πραγματοποιήθηκαν [21], [22], σε περιπτώσεις με και χωρίς ανεμιστήρα παράκαμψης, διαπιστώθηκε ότι η προσθήκη ανεμιστήρα παράκαμψης μείωσε το εσωτερικό φορτίο

ενός συστήματος CRAC και έκανε τον εσωτερικό ανεμιστήρα να λειτουργεί με χαμηλότερη ταχύτητα, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση ενέργειας του CRAC στο 52%.

Στα παραδοσιακά ανοιχτά κέντρα δεδομένων, έχει υπολογιστεί ότι η ροή διαρροής ψυχρού αέρα αντιπροσωπεύει περίπου το 5-15% της συνολικής ροής [23], ενώ περαιτέρω έρευνα έχει αποκαλύψει ότι η σπατάλη του κρύου αέρα φτάνει το 20% [24]. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι, ο κρύος αέρας παρακάμπτει τους διακομιστές και ορισμένα άλλα θερμά σημεία που οδηγώντας σε σχετικά υψηλή κατανάλωση ενέργειας.

Σε μία άλλη μελέτη [25], παρουσιάζεται η επίδραση της θέσης που δημιουργεί το μεγάλο θερμοκρασιακό χάσμα μεταξύ των διακομιστών των CPU. Διαπιστώθηκε ότι, υπάρχει σημαντική ανακυκλοφορία αέρα από τον ζεστό διάδρομο στον κρύο διάδρομο. Δεδομένου ότι αυτή η δευτερεύουσα ροή έχει κρίσιμη επίδραση στη θερμοκρασία του διακομιστή, η διαφορά θερμοκρασίας θα αυξηθεί μαζί με την αύξηση του ύψους του rack και η θέση του διακομιστή θα επηρεάσει την ταχύτητα του ανεμιστήρα και την κατανάλωση ενέργειας. Εάν δεν ληφθεί υπόψη η ανακυκλοφορία, τότε ο διακομιστής πρέπει να τοποθετηθεί στην υψηλότερη θέση για βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης.

Ταυτόχρονα, σε μία άλλη μελέτη [26], αναλύθηκε ο τρόπος χρήσης του διαφράγματος, ώστε να επιτευχθεί αποτελεσματική μείωση της θερμοκρασίας του θερμού σημείου στην πίσω πλευρά της πόρτας μιας σχάρας. Χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά μεγέθη διαφραγμάτων και έξι διαφορετικές γωνίες τοποθέτησης για να προσδιοριστεί η καλύτερη κατανομή ροής του αέρα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αποκάλυψαν ότι, όταν ο διακομιστής λειτουργεί με πλήρες φορτίο, η χρήση ενός διαφράγματος 8cm×46cm με γωνία 45° στο πίσω μέρος, μπορεί αποτελεσματικά να εξαλείψει τη συσσώρευση θερμότητας και να βελτιώσει σημαντικά την κατανομή της ροής αέρα και την απόδοση ψύξης του κέντρου δεδομένων.

Ένα διάφραγμα 45°, μπορεί να μειώσει τη θερμοκρασία (hotspot) στο πίσω μέρος του διακομιστή κατά 1,9–2,5K, και επίσης επιτρέπει την κατανομή της θερμοκρασίας της εξαγωγής αέρα να είναι σχετικά ομοιόμορφη στο πάνω και κάτω μέρος του διακομιστή. Όταν χρησιμοποιούνται διαφράγματα με διαφορετικές γωνίες, η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας μπορεί να μειωθεί από 2,2 K έως 0,5 K [27] μέσα σε ένα ράφι που τροφοδοτείται με αέρα από το CRAC. Σχετικά με την ενέργεια κατανάλωσης ενός κέντρου δεδομένων, διαπιστώθηκε ότι, εάν η θερμοκρασία εισόδου του παρεχόμενου αέρα είναι πολύ χαμηλή, τότε θα απαιτηθεί περισσότερη ενέργεια για ψύξη.

Σε μία άλλη μελέτη που πραγματοποιήθηκε [28], εξετάστηκε η πρόοδος στη θερμική διαχείριση των κέντρων δεδομένων. Η ανασκόπηση έδειξε ότι, η περισσότερο σημαντική παράμετρος στη θερμική διαχείριση ενός κέντρου δεδομένων είναι η εγκατάσταση ροής αέρα κάτω από το υπερυψωμένο δάπεδο. Σε μία αριθμητική μελέτη [29], διερευνήθηκε η θερμική απόδοση του κέντρου δεδομένων για διάφορες διαμορφώσεις κλιματιστικών δωματίου υπολογιστών (CRAC) με διάταξη διαχωρισμού μονάδων και διαδρόμων. Τα αποτελέσματά έδειξαν ότι, η διάταξη της μονάδας CRAC έχει σημαντικές επιπτώσεις στη θερμική διαχείριση της συστοιχίας rack. Επιπλέον, ύστερα από διερεύνηση [30] των επιρροών της διάταξης των μονάδων CRAC στη θερμική διαχείριση των κέντρων δεδομένων, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η τοποθέτηση μονάδων CRAC κάθετα στη σειρά ραφιών μπορεί να παρέχει ομοιόμορφες ροές αέρα από τα διάτρητα πλακάκια κατά μήκος των σειρών racks. Σε μια πειραματική έρευνα [31], παρουσιάστηκε μία λύση του προβλήματος θερμικής ετερογένειας στους διακομιστές του κέντρου δεδομένων. Παρατηρήθηκε ότι, η ετερογένεια της θερμοκρασίας της επιφάνειας αυξάνεται με την ταυτόχρονη αύξηση της πυκνότητας της υπολογιστικής ισχύος.

Το κατάλληλο σχέδιο ρυθμού ροής αέρα είναι, να διατηρούνται όλοι οι επί μέρους διακομιστές στη χαμηλότερη δυνατή τιμή θερμοκρασίας. Περαιτέρω έρευνες [32], οι οποίες διερεύνησαν τις επιρροές της θέσης των ραφιών διακομιστή και των διαμορφώσεων φόρτωσης ισχύος στη θερμική διαχείριση των κέντρων, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα μεσαία ράφια (racks) παρουσιάζουν τη βέλτιστη θερμική απόδοση. Ενώ λίγο αργότερα σε μία άλλη μελέτη [33], η οποία επικεντρώθηκε στη θερμική διαχείριση διακομιστών στα κέντρα δεδομένων, απέδειξε ότι, η ανακυκλοφορία του αέρα

μειώνεται και η θερμοκρασία του αέρα παράκαμψης και διακομιστών αυξάνεται, καθώς αυξάνεται η πυκνότητα υπολογιστικής ισχύος.

Πρόσφατα, παρουσιάστηκε ένα open source rapid ρευστοδυναμικό μοντέλο [34], για τη θερμική διαχείριση των κέντρων δεδομένων. Βρέθηκε ότι, το προτεινόμενο μοντέλο παρέχει ίδιο επίπεδο ακρίβειας με το CFD όταν συγκρίνεται με τα πειραματικά δεδομένα. Επιπλέον, διερευνήθηκαν [35] οι επιρροές του βάθους του υπόγειου καναλιού (plenum) στη ροή του αέρα και τη θερμική διαχείριση στο κέντρο δεδομένων. Διαπιστώθηκε, ότι η ομοιομορφία στον ρυθμό ροής του αέρα στο κέντρο δεδομένων, αυξάνεται καθώς αυξάνεται το βάθος του εν λόγω καναλιού. Αυξάνοντας τη θερμοκρασία εισαγωγής πάνω από 18°C μπορεί να μειώσει αποτελεσματικά την κατανάλωση ενέργειας ενός συστήματος ψύξης.

Ωστόσο, αυτό θα αυξήσει την ισχύ που απαιτείται από τον ανεμιστήρα για την εσωτερική ψύξη του διακομιστή, με αποτέλεσμα ο διακομιστής να καταναλώνει περισσότερη ενέργεια στο σύνολό του. Επομένως, θα πρέπει να καθοριστεί η κατάλληλη πυκνότητα σε διακομιστές μέσα στο rack καθώς και η θερμοκρασία εισαγωγής στην είσοδο του rack. Από την άλλη πλευρά, εάν η θερμοκρασία του αέρα εξόδου του rack είναι πολύ υψηλή, τότε θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη θερμοκρασία εισόδου του rack, αντί να προστεθούν περιττοί ανεμιστήρες και ενεργά εξαρτήματα στην πλευρά της εξόδου, οδηγώντας έτσι, σε μία λιγότερο αποδοτική στρατηγική απαγωγής θερμότητας.

2.3 Σημερινή κατάσταση και απαιτήσεις της εποχής μας

Όπως οι οργανισμοί τυποποιούν και περιορίζουν τον αριθμό των διακομιστών και της διαμόρφωσης rack για την ταχύτητα και την απλούστευση των προμηθειών, της ανάπτυξης και των λειτουργιών, έτσι και στο τομέα του IT ακολουθείται παρόμοια μεθοδολογία [55].

Ξεκινώντας από ένα μεγάλο πλήθος μεγεθών διαχωριστικών μερών, τα οποία χρησιμοποιούνται για την δημιουργία μικρών δωματίων μέσα στο χώρο που στεγάζονται τα ηλεκτρονικά μηχανήματα, πετυχαίνεται η καλύτερη ενεργειακή διαχείριση των κέντρων δεδομένων. Ένα τέτοιο σύστημα παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.7: Σύστημα διαχωρισμάτων για δημιουργία μικρότερου μεγέθους τμημάτων για την καλύτερη ενεργειακή διαχείριση [55].

Αν και αυτός ο τρόπος περιπλέκει τη συντήρηση, αυτή η τυποποίηση επιτρέπει στους κατασκευαστές να προετοιμάσουν το προϊόν, ώστε να επιτυγχάνεται περαιτέρω μείωση του χρόνου παράδοσης. Για να επιταχυνθεί περαιτέρω η ανάπτυξη του IT και να διευκολυνθεί η πλήρης διαμόρφωση σε ράφια μέσα και έξω, συνιστάται μία ανεξάρτητη γεωμετρία πλαισίου. Με το τρόπο αυτό μειώνεται η ανάγκη για υπερυψωμένο δάπεδο ή η τοποθέτηση και αγκίστρωση άλλων μερών στο ταβάνι. Το ερώτημα που δημιουργείται είναι, πόσο μεγάλο πρέπει να είναι αυτό το διαχωριστικό μέρος, ποια η χωρητικότητα, ποιο το συνολικό μήκος των ραφιών, κ.λπ.. Η βελτιστοποίηση της αρχιτεκτονικής rod απαιτεί εξέταση του φυσικού χώρου, της ηλεκτρικής τροφοδοσίας, της πυκνότητας ραφιών, των απαιτήσεων ψύξης κ.α.. Όλα αυτά μπορούν να προσδιοριστούν από τρεις βασικούς παράγοντες:

- Μέγεθος ηλεκτρικής τροφοδοσίας: στα κέντρα δεδομένων, η μαζική ισχύς μετρείται σε PDU (Power Distribution Unit) ή RPP (Remote Power Panel). Τα Pods έχουν αποκλειστική ηλεκτρική τροφοδοσία. Για ένα διαμέρισμα εντός των κέντρων δεδομένων χαμηλής πυκνότητας απαιτείται χαμηλότερη τροφοδοσία ισχύος. Για τον τυπικό εξοπλισμό στα κέντρα δεδομένων, υποθέτουμε ότι όλη η παρεχόμενη ισχύ εντός ενός τέτοιου τμήματος μετατρέπεται σε θερμότητα. Αυτή η θερμότητα πρέπει να αφαιρεθεί από το σύστημα ψύξης χρησιμοποιώντας αέρα, νερό ή ψυκτικό μέσο. Ο πίνακας 2.1 δείχνει την απαιτούμενη ογκομετρική ροή αέρα και νερού για δύο τυπικά μεγέθη ισχύος.

Category	150kW	250kW
Airflow*	8,500 – 11,400 l/s	14,000 – 19,000 l/s
	18,000 – 24,000 CFM	30,000 – 40,000 CFM
Water flow**	7 L/s	11.7 L/s
	111 GPM	185 GPM

* assumes 11C (20F) to 15C (26F) deltaT across IT equipment

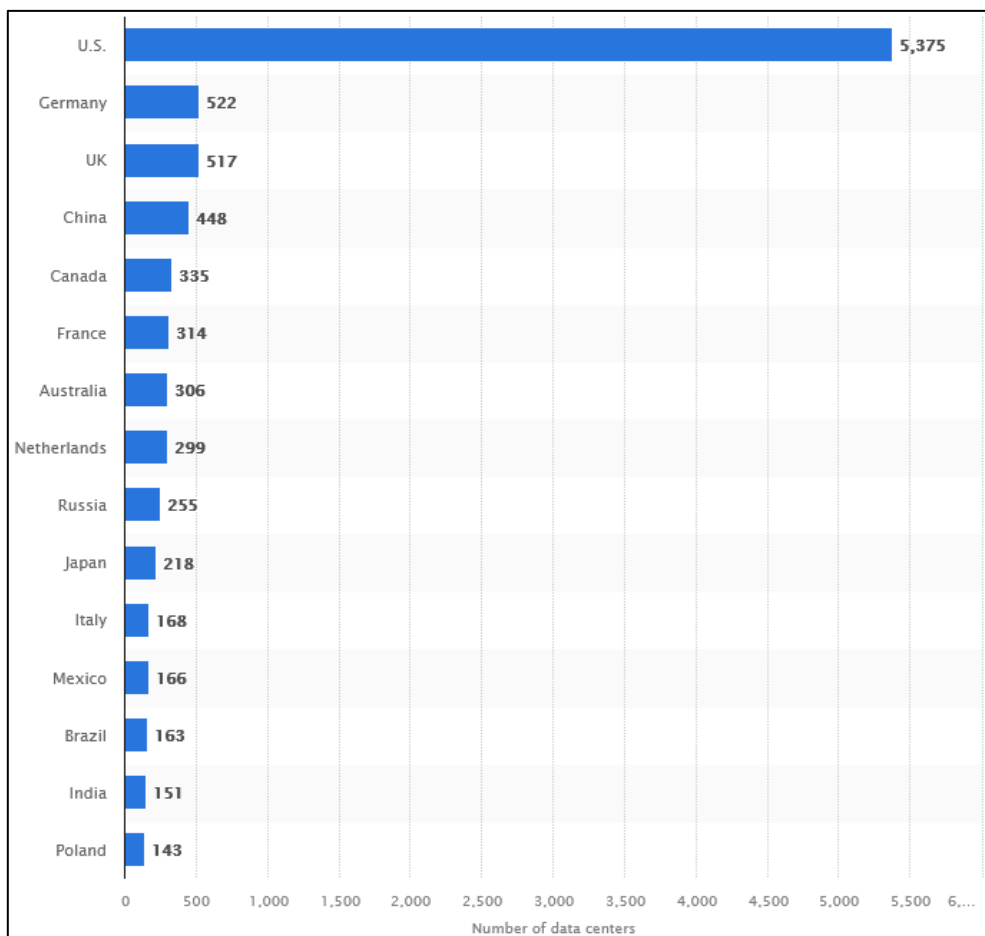
** assumes 5.6C (10F) deltaT and 100% sensible cooling and 0% glycol

Πίνακας 2.1: Απαιτούμενη ογκομετρική παροχή αέρα και νερού για δύο τυπικά μεγέθη απαιτούμενης ισχύος τμημάτων.

- Διαθέσιμος χώρος εγκατάστασης: ο χώρος που θα πρέπει να αποδοθεί σε ένα τέτοιο διαμέρισμα είναι συνάρτηση των διαστάσεων του rod. Κατ' επέκταση, όλο αυτό έχει άμεση σχέση με το βάθος των ραφιών IT συν τα αποδεκτά πλάτη διαδρόμων που πληρούν τους τοπικούς κώδικες. Για καλύτερη αξιοποίηση του χώρου, συνήθως επιλέγεται μεγάλου μεγέθους rods, καθώς και ισχύς και πυκνότητα ραφιών. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί ότι, η τοποθέτηση των διαχωριστικών για την δημιουργία διαμερισμάτων στην αίθουσα δεδομένων δεν είναι καθόλου εύκολη. Ένα σημαντικό μέρος από παράγοντες θα πρέπει να ληφθούν υπόψη όπως το σχήμα του δωματίου, οι κολώνες του κτιρίου, η αρχιτεκτονική ψύξης και οι αγωγοί αυτών, το σχέδιο καταστολής πυρκαγιάς, η πρόσβαση ανθρώπων, οι απαιτήσεις ασφαλείας κ.λπ.
- Πυκνότητα ραφιών: Η μέση πυκνότητα rack μέσα σε ένα rod είναι ένας απλός υπολογισμός των διαθέσιμων kW της ισχύος, διαιρούμενη με τον αριθμό των ραφιών. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτή είναι η μέση πυκνότητα ραφιών, σε άλλες διατάξεις υπάρχει διαφορετική λειτουργική ευελιξία που καθορίζεται μεταξύ άλλων και από τα αντίστοιχα κυκλώματα διακλάδωσης. Η εξισορρόπηση της χωρητικότητας της υποδομής με τον διαθέσιμο χώρο, ήταν πάντα μια πρόκληση με ταχέως μεταβαλλόμενες απαιτήσεις

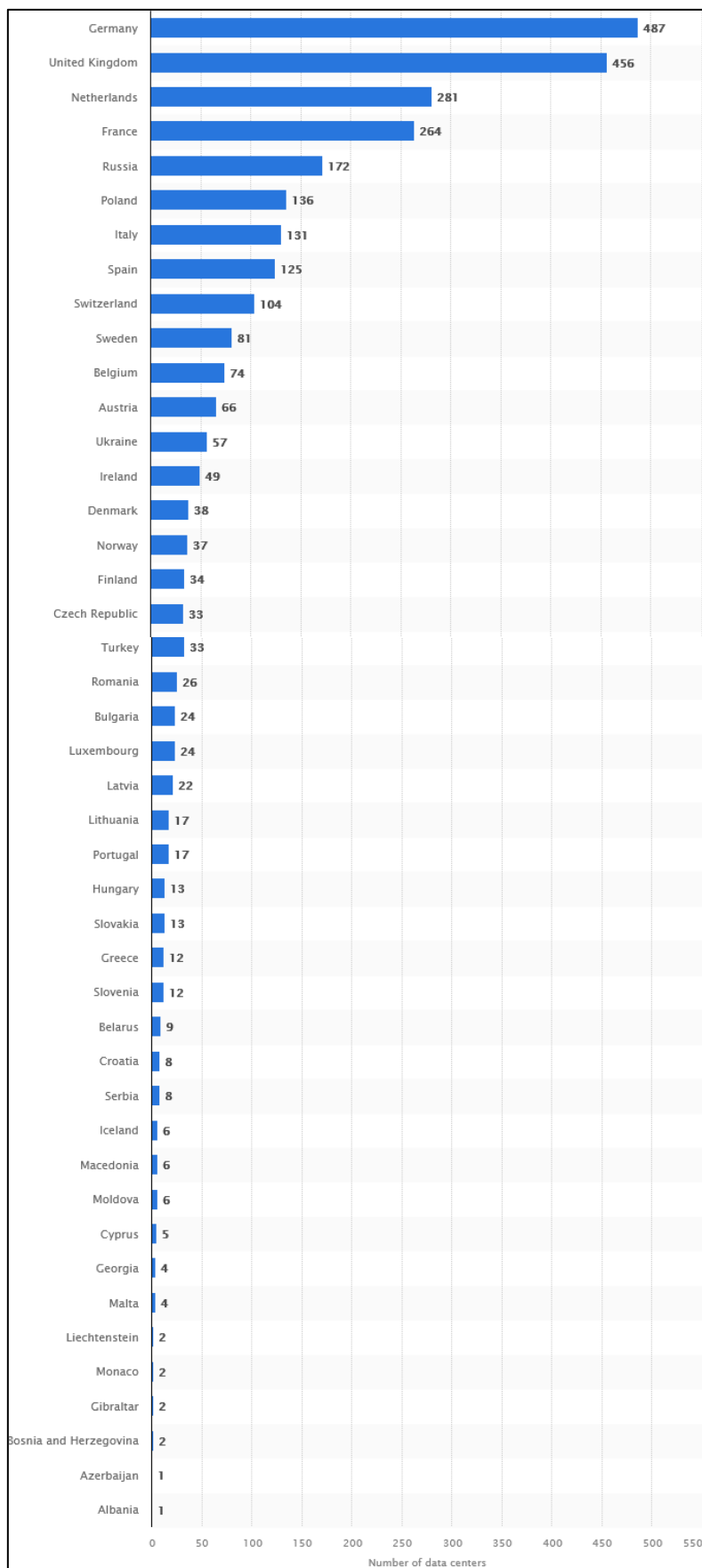
εξοπλισμού πληροφορικής. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι σχεδιαστές δεν θα πρέπει να υποτιμούν την αναμενόμενη πυκνότητα ραφίου. Σε αυτήν την περίπτωση, εάν τα εγκατεστημένα ράφια λειτουργούν με μεγαλύτερη πυκνότητα, τότε γίνεται εκτεταμένη χρήση του πιο ακριβού πόρου, δηλαδή του ρεύματος για τη ψύξη.

Στην βάση όσων έχουν αναφερθεί παραπάνω, θα πρέπει να γίνει αντιληπτό ότι, η ενέργεια που χρησιμοποιείται από τους διακομιστές και τα κέντρα δεδομένων των χωρών είναι σημαντική. Τυπικά, ένας τύπος διακομιστή συγκεκριμένου όγκου ευθυνόταν για το μεγαλύτερο μέρος (περίπου 68%) της ηλεκτρικής ενέργειας που κατανάλωνε ένα κέντρο δεδομένων το 2006. Η ενέργεια που χρησιμοποιείται από αυτόν τον τύπο διακομιστή υπερδιπλασιάστηκε από το 2000 έως το 2006, κάτι το οποίο αποτελεί την μεγαλύτερη αύξηση μεταξύ διαφορετικών τύπων διακομιστών. Η μονάδα τροφοδοσίας και η υποδομή ψύξης που υποστηρίζει τον εξοπλισμό πληροφορικής στα κέντρα δεδομένων χρησιμοποιεί επίσης σημαντική ενέργεια, η οποία μπορεί να φτάσει έως και 50% της συνολικής κατανάλωσης των κέντρων δεδομένων. Στα παρακάτω δύο σχήματα παρουσιάζονται οι χώρες με τα περισσότερα κέντρα δεδομένων σε παγκόσμιο επίπεδο, καθώς και ο αριθμός των datacenters που λειτουργεί σήμερα στις Ευρωπαϊκές χώρες αντίστοιχα.



Σχήμα 2.8: Αριθμός κέντρων δεδομένων ανά κράτος το 2023 (πηγή [82]).

Ενεργειακή Ανάλυση σε Κέντρο Διαχείρισης Δεδομένων (Data center).



Σχήμα 2.9: Αριθμός κέντρων δεδομένων ανά ευρωπαϊκό κράτος το 2023 (πηγή [83]).

2.4 Μελλοντική εξέλιξη και απαιτήσεις

Ο εκσυγχρονισμός και ο μετασχηματισμός των κέντρων δεδομένων βελτιώνουν σημαντικά την λειτουργική και την ενεργειακή απόδοση [1444]. Η ασφάλεια των πληροφοριών αποτελεί επίσης σημαντικό παράγοντα και για αυτόν τον λόγο, ένα κέντρο δεδομένων πρέπει να προσφέρει ένα ασφαλές περιβάλλον που ελαχιστοποιεί τις πιθανότητες παραβίασης της ασφάλειας.

Η εταιρεία βιομηχανικών ερευνών IDC (International Data Corporation), αναφέρει ότι η μέση ηλικία ενός κέντρου δεδομένων είναι τα εννέα έτη [1444]. Η Gartner, μια άλλη εταιρεία ερευνών, λέει ότι τα κέντρα δεδομένων ηλικίας άνω των επτά ετών είναι απαρχαιωμένα [1555]. Η αύξηση των δεδομένων (163 zettabytes έως το 2025 [166]) είναι ένας παράγοντας που οδηγεί στην ανάγκη περαιτέρω και διαρκούς εκσυγχρονισμού των κέντρων αυτών.

Στο εγγύς μέλλον, τα “ηλεκτρονικά ράφια”(racks) θα φιλοξενούν τσιπ υψηλής απόδοσης με ροές θερμότητας που θα πλησιάζουν τα 100 W/cm^2 , ενώ οι τάσεις ισχύος στους servers θα φτάνουν τα 60kW.

Προφανώς, τα σημερινά συστήματα ψύξης των κέντρων δεδομένων θα είναι ανεπαρκή και θα πρέπει να διερευνηθούν νέες λύσεις. Ως εκ τούτου, το βασικό ζήτημα που αξίζει να διερευνηθεί θα είναι ο εντοπισμός και η κάλυψη των απαιτούμενων προδιαγραφών των νέων θερμικών ζητημάτων, λαμβάνοντας υπόψη το λειτουργικό περιβάλλον των κέντρων δεδομένων, το οποίο θα είναι επόμενης γενιάς. Το παράδειγμα του ανοιχτού συστήματος θερμικής αποσυμφόρησης με συγκεκριμένες σχεδιαστικές προδιαγραφές, θα οδηγεί σε ιδανική λύση για την ψύξη κέντρων δεδομένων επόμενης γενιάς. Εδώ αναμένεται να παίζει σημαντικό ρόλο η υδρόψυξη με εφαρμογή ακριβώς στη πηγή παραγωγής των θερμικών φορτίων.

2.5 Παραδείγματα από υφιστάμενα Datacenters

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται κάποια από τα πιο δημοφιλή κέντρα διαχείρισης δεδομένων σε παγκόσμιο επίπεδο.



Σχήμα 2.10: Iron Mountain data center.

Ενεργειακή Ανάλυση σε Κέντρο Διαχείρισης Δεδομένων (Data center).

Στην τοποθεσία Νιου Τζέρσεϊ, ΗΠΑ και σε έκταση 830.000ft² έχει δημιουργηθεί το κέντρο δεδομένων NJE-1 από την Iron Mountain, μια γνωστή εταιρεία διαχείρισης και αποθήκευσης δεδομένων. Βρίσκεται σε μικρή απόσταση με το αυτοκίνητο νοτιοδυτικά της Νέας Υόρκης. Το κέντρο δεδομένων έχει χωρητικότητα ισχύος 25,6MW, που σημαίνει ότι μπορεί να χειριστεί τις ενεργειακές ανάγκες διαφόρων και απαιτητικών λειτουργιών πληροφορικής. Επιπλέον, πληροί τα πρότυπα του Telecommunications Industry Association για την υποδομή και το σχεδιασμό των κέντρων δεδομένων. Αυτή η εγκατάσταση Tier III μπορεί να προσφέρει ένα εξαιρετικό επίπεδο πλεονασμού, ασφάλειας και απόδοσης ισχύος, με PUE=1,2 (Power Usage Effectiveness) αποδεικνύει τη δέσμευσή του στην ενεργειακή απόδοση, η οποία μεταφράζεται σε εξοικονόμηση κόστους για τους πελάτες και μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Επιπλέον, η εγκατάσταση λειτουργεί με 100% ανανεώσιμη ενέργεια, ελαχιστοποιώντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της και συμβάλλοντας σε ένα καθαρότερο ενεργειακό μέλλον.

Στην τοποθεσία Βομβάη της Ινδίας, το Yotta NM1 είναι το πρώτο από τα πέντε κτίρια κέντρων δεδομένων έκτασης 820.000ft², στο Integrated Yotta Data Center Park. Βρίσκεται στο Hiranandani Fortune City στο Panvel, το οποίο βρίσκεται κοντά στη Βομβάη. Το κτίριο διαθέτει 7.200 rack και καταναλώνει 50 MW ισχύος. Η εγκατάσταση έχει συνολική χωρητικότητα 30.000 rack και ισχύ 250 MW. Το ενιαίο κέντρο δεδομένων NM1 μπορεί να φιλοξενήσει περιεχόμενο cloud, χειριστές ΟΤΤ και σημαντικές κυβερνητικές και εταιρικές εφαρμογές. Διαθέτει τέσσερις περιττές ιδιόκτητες διαδρομές οπτικών ινών που συνδέουν το κέντρο δεδομένων με τις εθνικές οδούς. Επιπλέον, το NM1 κάνει το επιπλέον μίλι για να προστατεύσει τα δεδομένα που φιλοξενούνται στις εγκαταστάσεις του. Υπάρχουν πολλά επίπεδα μέτρων ασφαλείας, τα οποία περιλαμβάνουν βιομετρικούς ελέγχους πρόσβασης, επιτήρηση, φυσική ασφάλεια και άλλα προηγμένα πρωτόκολλα ασφαλείας. Αυτό παρέχει το υψηλότερο επίπεδο προστασίας για τα δεδομένα και τον εξοπλισμό που βρίσκονται στο κέντρο δεδομένων.



Σχήμα 2.11:Yotta NM1 data center.



Σχήμα 2.12 Intergate Seattle data center.

Στην πολιτεία Ουάσιγκτον, Ηνωμένες Πολιτείες, το Intergate Seattle είναι η ναυαρχίδα του Sabey Data Center, έκτασης 900.000ft², βρίσκεται στην 35th Ave S, Tukwila και έχει πρόσβαση σε πάνω από 70 MW ισχύος. Ο ευέλικτος και αρθρωτός σχεδιασμός του θα μπορούσε να φιλοξενήσει οποιαδήποτε διαμόρφωση δαπέδου. Τα πλεονάζοντα ηλεκτρικά συστήματα παρέχουν ένα ανθεκτικό περιβάλλον για την ελαχιστοποίηση του χρόνου διακοπής λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα, περιέχει πλεονάζοντα συστήματα HVAC και γεννήτριες ισχύος 2,5 MW με χρόνο λειτουργίας 72 ωρών σε φορτίο αιχμής. Χρησιμοποιεί πράσινη, οικονομικά αποδοτική υδροηλεκτρική ενέργεια σε συνδυασμό με «δωρεάν ψύξη» για το μεγαλύτερο μέρος του έτους. Η εταιρεία χρησιμοποιεί αποκλειστικές «Mobile Courting Units» για να διατηρεί ακριβή έλεγχο της ροής του αέρα και του ηλεκτρικού φορτίου, διασφαλίζοντας βέλτιστη λειτουργία και αποδοτικότητα.



Σχήμα 2.13: Core Site Reston VA3 data center.

Στη τοποθεσία Βόρεια Βιρτζίνια, Ηνωμένες Πολιτείες υπάρχουν τρεις εγκαταστάσεις στο κέντρο δεδομένων Reston του Core Site: VA1, VA2 και VA3. Το VA3 είναι το μεγαλύτερο, με συνολική επιφάνεια άνω των 940.000ft². Παρέχει πρόσβαση σε όλους σχεδόν τους παρόχους υπηρεσιών

Ενεργειακή Ανάλυση σε Κέντρο Διαχείρισης Δεδομένων (Data center).

cloud, δικτύου και διαχειριζόμενων υπηρεσιών. Το κτίριο περιλαμβάνει συστήματα UPS υψηλής απόδοσης, ανεμιστήρες μεταβλητής ταχύτητας για οπτική ψύξη και αυτόνομες μονάδες AC στον τελευταίο όροφο με ενσωματωμένο σύστημα αφύγρανσης. Αυτή η διευκόλυνση χρησιμεύει ως μια οικονομικά αποδοτική εναλλακτική λύση στο Ashburn, με ευνοϊκές επιλογές μετακίνησης, φορολογικά κίνητρα και πρόσβαση με χαμηλή καθυστέρηση σε διάφορους παρόχους. Στην πραγματικότητα, το CoreSite είναι ο μόνος πάροχος στη Βόρεια Βιρτζίνια που προσφέρει άμεσες συνδέσεις με κορυφαίες υπηρεσίες cloud, όπως το Oracle Cloud Fast Connect, το IBM Cloud Direct Link, το Google Cloud Platform, το Microsoft Azure Express Route και το AWS Direct Connect.



Σχήμα 2.14: Tulip data center.

Στην Bengaluru της Ινδίας, η Tulip Data Center Services Pvt Ltd είναι ο κορυφαίος πάροχος εταιρικών υπηρεσιών δεδομένων στην Ινδία. Είναι μια πολυεπίπεδη εγκατάσταση κατασκευασμένη σύμφωνα με τα πρότυπα της βαθμίδας 3 και 4 σε έκταση 950.000ft². Η εγκατάσταση υποστηρίζεται από ισχύ 100 MW και έχει τη δυνατότητα να φιλοξενήσει 12.000 rack. Τα ολοκληρωμένα συστήματα διαχείρισης κτιρίου ελέγχουν όλα τα κρίσιμα στοιχεία του κτιρίου, συμπεριλαμβανομένης της ισχύος, του κλιματισμού και της ασφάλειας. Όντας το πιο ενεργειακά αποδοτικό και «πράσινο» κέντρο δεδομένων στην Ινδία, η εγκατάσταση εξοικονομεί έως και 35 MW ισχύος σε πλήρη ισχύ. Οι υπηρεσίες Tulip αναπτύσσονται για την ελαχιστοποίηση της πολυπλοκότητας, τον εξορθολογισμό των λειτουργιών και την απλοποίηση της διαχείρισης προμηθευτών. Η εταιρεία εστιάζει στην απόδοση, την αξιοπιστία, τη διαθεσιμότητα και την ικανοποίηση του τελικού χρήστη.



Σχήμα 2.15: CWL1 data center.

Σε μία απέραντη έκταση 1.850.000ft², στο Νιούπορτ της Ουαλίας Βρίσκεται κοντά στο Κάρντιφ στο Δυτικό Ηνωμένο Βασίλειο, το CWL1, το μεγαλύτερο κέντρο δεδομένων στην Ευρώπη. Διαθέτει

Ενεργειακή Ανάλυση σε Κέντρο Διαχείρισης Δεδομένων (Data center).

πολλά ειδικά γραφεία και χώρους εργασίας που προσαρμόζονται σύμφωνα με τις ανάγκες των πελατών. Αφού υπάρχουν πολλοί χώροι συσκέψεων και αίθουσες συνεδριάσεων. Το CWL1 είναι σήμερα ένα από τα πιο αποδοτικά κέντρα δεδομένων στο Ηνωμένο Βασίλειο, με χαμηλή χρήση ενέργειας (PUE). Διαθέτει άμεση σύνδεση SuperGrid 400 kV, γεννήτριες υψηλής ελαστικότητας και συστήματα UPS. Χτισμένο σύμφωνα με τα πρότυπα Tier III, το κέντρο δεδομένων προσφέρει φιλοξενία cloud, ιδιωτικές αίθουσες δεδομένων και λύσεις συντοπισμού σε ανταγωνιστικές τιμές.



Σχήμα 2.16: China Telecom data center.

Σε ακόμα μεγαλύτερη έκταση 10.763.910ft², στη τοποθεσία Hohhot στη Κίνα, η ChinaTelecom διαθέτει το μεγαλύτερο διαδικτυακό κέντρο δεδομένων στον κόσμο και έχει εξασφαλίσει πάνω από 50% μερίδιο αγοράς στην κινεζική αγορά κέντρων δεδομένων. Διαθέτει ένα εκτεταμένο παγκόσμιο δίκτυο με περισσότερα από 400 κέντρα δεδομένων που βρίσκονται σε κορυφαίες περιοχές στην ηπειρωτική Κίνα και στις αγορές του εξωτερικού. Το κύριο τμήμα του στο Inner Mongolia Information Park είναι χτισμένο σε 100 εκτάρια, με αρχική επένδυση 2,5 δισεκατομμυρίων δολαρίων. Αυτή η τοποθεσία επιλέχθηκε για δύο βασικούς λόγους: Δεδομένου ότι η Εσωτερική Μογγολία βρίσκεται στη ζώνη ακτινοβολίας του οικονομικού κύκλου Πεκίνου-Τιαντζίν, είναι γεωγραφικά βολική για τη μετάδοση δεδομένων και τις υπηρεσίες πληροφοριών. Η μέση θερμοκρασία των 6°C προσφέρει δωρεάν ψύξη αέρα για έως και οκτώ μήνες το χρόνο. Τα κέντρα δεδομένων της China Telecom χρησιμοποιούνται κυρίως για τηλεπικοινωνίες, υπολογιστικό νέφος και χρηματοοικονομικές εταιρείες. Οι υπηρεσίες του cloud computing χρησιμοποιούνται από αρκετούς τεχνολογικούς γίγαντες (συμπεριλαμβανομένων των Alibaba, Baidu και Tencent), καθώς και από μεγάλες επιχειρήσεις και ιδρύματα. Η εταιρεία έχει θεσπίσει πολιτικές «πράσινων» κέντρων δεδομένων για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας. Έχει επίσης δώσει έμφαση στη συλλογή όμβριων υδάτων για τη μείωση της κατανάλωσης οικιακού νερού.



Σχήμα 2.17: Green Mountain data center.

Το Green Mountain Data Center της Νορβηγίας αποτελεί τη πιο πράσινη φάρμα διακομιστών στον κόσμο με τη διοχέτευση δροσερού νερού από ένα κοντινό φιόρδ στις ορεινές αίθουσες που θα στεγάσουν τα ράφια διακομιστών, οι δημιουργοί του ελπίζουν να εξαλείψουν την ανάγκη για ηλεκτρικά ψυκτικά συγκροτήματα που απαιτούν, δυστυχώς, χωρίς φιόρδ, η πλειοψηφία των κέντρων δεδομένων του κόσμου. Το Green Mountain Data Center θα στεγαστεί σε ένα πρώην κέντρο πυρομαχικών του NATO μέσα σε ένα βουνό στην άκρη του Boknafjord στην κομητεία Rogaland της Νορβηγίας. Θα αντλεί νερό απευθείας από το φιόρδ όλο το χρόνο σε θερμοκρασία 8οC. Αυτή η μέθοδος δωρεάν ψύξης θα δώσει στο Green Mountain μια «παγκόσμιας κλάσης» αποτελεσματικότητα χρήσης ενέργειας, μειώνοντας το κόστος λειτουργίας έως και 30%.

Υποστηρίζεται ότι η εγκατάσταση αυτή θα έχει μηδενικές εκπομπές άνθρακα. Η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας θα τροφοδοτείται απευθείας από τρεις ξεχωριστούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας, επομένως για να ισχύουν οι ισχυρισμοί εκπομπών, θα πρέπει να είναι καθαρές πηγές ενέργειας. Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι άφθονη στη Νορβηγία, επομένως φαίνεται ένας απολύτως εύλογος ισχυρισμός. Το Green Mountain θα καταλαμβάνει 226.000ft²κατανεμημένα σε 3x2 ορόφους Mountain Halls(τρεις διώροφες αίθουσες).

Τέλος, το 2106, η Microsoft σχεδίασε να λειτουργήσει ένα πειραματικό υποβρύχιο σύστημα διαχείρισης δεδομένων στα ανοικτά των ακτών του Όρκνεϊ [41]. Το κλειστό σύστημα διακομιστών το οποίο περιέχει ατμόσφαιρα αζώτου τοποθετήθηκε στο βυθό της θάλασσας τον Μάιο του 2018 και περιλάμβανε 855 διακομιστές. Τροφοδοτούμενο αποκλειστικά με ηλεκτρισμό από τον Ήλιο και τον άνεμο, το σύστημα αυτό λειτούργησε για δύο χρόνια, μέχρι τον Μάιο του 2020, όταν τελείωσε το πείραμα, το κλειστό αυτό σύστημα αναδύθηκε στην επιφάνεια για ανάλυση. Τα προκαταρκτικά αποτελέσματα έδειξαν ότι μόνο 8 από τους 855 διακομιστές απέτυχαν κατά τη διάρκεια της διετούς δοκιμής, ποσοστό αποτυχίας μόλις 1/8 από εκείνο των υπέργειων συστημάτων διακομιστών της Microsoft [43].



Σχήμα 2.18:Υποβρύχιο σύστημα βάσης δεδομένων της Microsoft[41]

2.6 Ενεργειακή ανάλυση των DataCenters

Η χρήση ενέργειας είναι ένα μεγάλο ζήτημα για τα κέντρα δεδομένων. Η κατανάλωση ισχύος κυμαίνεται από μερικά kW για ένα rack διακομιστών σε ένα ντουλάπι έως αρκετές δεκάδες MW για μεγάλες εγκαταστάσεις. Ορισμένες εγκαταστάσεις έχουν απαιτήσεις ισχύος μεγαλύτερη από 100 φορές εκείνης ενός τυπικού κτιρίου γραφείων [86]. Για ακόμα μεγαλύτερες εγκαταστάσεις, το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας είναι κυρίαρχο λειτουργικό κόστος και αντιπροσωπεύει πάνω από το 10% του συνολικού κόστους ιδιοκτησίας (TCO—Total Cost of Ownership) ενός κέντρου δεδομένων[87].

2.6.1. Ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας

Η ομοιομορφία κατανομής θερμοκρασίας μέσα σε ένα κέντρο δεδομένων και ο αριθμός των εντοπισμένων hotspots είναι κρίσιμοι παράγοντες [91] για τον καθορισμό της επιτυχίας της θερμικής διαχείρισης. Η ανάμιξη ζεστού και κρύου αέρα και τα εντοπισμένα hotspots συνδέονται με μια ανομοιόμορφη κατανομή ροής αέρα, η οποία είναι στενά συνδεδεμένη με το συνολικό πεδίο πίεσης και ροής αέρα. Υπάρχουν αρκετά σημαντικά στοιχεία που καθορίζουν το πεδίο πίεσης, όπως το ύψος του υπερυψωμένου δαπέδου, ο βαθμός ανοίγματος των διάτρητων πλακιδίων, τα εμπόδια στο σύστημα εξαερισμού [92], κ.λπ.. Ένα υψηλότερο ύψος δαπέδου, έχει ως αποτέλεσμα μια ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας διακομιστή και αποτελεσματική ψύξη, που αντιπροσωπεύει τη μειωμένη πιθανότητα υπερθέρμανσης του διακομιστή. Το συνιστώμενο ύψος δαπέδου είναι 1,0–1,2m, 0,6–0,8m και 0,4–0,6m σε υπαίθρια ψύξη, κλειστή δομή ψυχρού διαδρόμου και κλειστή δομή θερμού διαδρόμου, αντίστοιχα, [93]. Σε μία άλλη μελέτη [94], προτείνεται ένας σχεδιασμός μεταβλητών διάτρητων πλακιδίων. Αύξηση του ανοίγματος των διάτρητων πλακιδίων στην έξοδο του CRAC και μείωση του ανοίγματος πριν από την είσοδο στον ψυχρό διάδρομο, μπορεί να μετριάσει τη μη ομοιόμορφη κατανομή ροής αέρα χωρίς αύξηση της ισχύος της αντλίας.

2.6.2 Απόδοση ψύξης

Η μείωση της θερμοκρασίας του διακομιστή για να διατηρείται σε ασφαλή θερμοκρασία λειτουργίας, είναι ο πρωταρχικός στόχος που πρέπει να επιτευχθεί με ένα σύστημα ψύξης. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ψύξη του αέρα, καθώς και η αποτελεσματικότητα αναλύονται σε μία άλλη μελέτη [95] βασισμένη σε λογισμικό ρευστοδυναμικής. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, η ανάμιξη θερμού αέρα, μια παράκαμψη κρύου αέρα και η αρνητική πίεση στις εισόδους αέρα του διαχωριστικού δαπέδου σε μια αίθουσα δεδομένων είναι οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση. Η ανάμιξη ζεστού και κρύου αέρα μπορεί να λυθεί κλείνοντας τον ψυχρό διάδρομο, βελτιστοποιώντας τη διάταξη εισόδου αέρα, μπλοκάροντας το κενό μεταξύ ραφιών, προσθήκη διαχωριστικών δαπέδου και προσθήκη αεραγωγών οροφής [96]. Σε μία παρόμοια μελέτη [97], παρατήρησε ότι η δυνατότητα ανάμιξης ζεστού και κρύου αέρα είναι ελάχιστη και η βέλτιστη ψύξη αέρα επιτυγχάνεται όταν η απόσταση μεταξύ της εισόδου αέρα και της οροφής είναι 1m αλλάζοντας το θέση της εισόδου αέρα με βάση αριθμητικές προσομοιώσεις. Ο δείκτης θερμότητας προσφοράς/επιστροφής (SHI/RHI), ο δείκτης ψύξης rack (RCI) και ο δείκτης θερμοκρασίας επιστροφής (RTI) συνήθως χρησιμοποιούνται ως μέτρα στην έρευνα, με τα SHI και RHI να ορίζονται ως εξής:

$$SHI = \left(\frac{\delta Q}{Q + \delta Q} \right) = \frac{\text{Enthalpy rise due to iniltration in cold aisle}}{\text{Total enthalpy rise at the rack exhaust}} \quad (2.1)$$

$$RHI = \left(\frac{Q}{Q + \delta Q} \right) = \frac{\text{Total heat extraction by the CARA units}}{\text{Total enthalpy rise at the rack exhaust}} \quad (2.2)$$

$$Q = \sum_j \sum_i m_{i,j}^r C_P \left[(T_{out}^r)_{i,j} - (T_{in}^r)_{i,j} \right] \quad (2.3)$$

Όπου:

Q είναι η συνολική ποσότητα θερμότητας που διαχέεται από όλα τα rack στο κέντρο δεδομένων.

δQ είναι το αύξηση της ενθαλπίας του ψυχρού αέρα πριν εισέλθει στο ράφι.

Η παράμετρος, δείκτης θερμότητας παροχής, SHI, είναι ο λόγος της θερμότητας που αποκτάται από τον ψυχρό διάδρομο αέρα πριν εισέλθει στο ράφι προς τη συνολική θερμότητα που αποκτά ο αέρας που βγαίνει από το ράφι, ενώ η παράμετρος δείκτης θερμότητας rack, RHI, είναι ο λόγος της συνολικής θερμότητας που διαχέεται από όλα τα rack προς τη συνολική θερμότητα που αποκτάται από τον αέρα που βγαίνει από το ράφι.

Τα SHI και RHI υποδεικνύουν το βαθμό ανάμειξης του ζεστού και κρύου αέρα. Η σχέση μεταξύ SHI και RHI μπορεί να εκφραστεί με την εξίσωση 2.4. Καλύτερος διαχωρισμός του ζεστού και κρύου αέρα επιτυγχάνεται, όταν το SHI τείνει προς το 0 και το RHI τείνει προς το 1 [98].

$$SHI + RHI = 1 \quad (2.4)$$

Το RCI χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του βαθμού υπερθέρμανσης και υπερψύξης ενός rack, συμπεριλαμβανομένων των RCI_{HI} και RCI_{LO} , και ορίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} RCI_{HI} &= \left(1 - \frac{\text{Total over temperature}}{\text{Max allowable over temperature}} \right) \times 100\% \\ &= \left(1 - \frac{\sum (T_i - T_{\max-rec})_{T_i > T_{\max-rec}}}{n \times (T_{\max-all} - T_{\max-rec})} \right) \times 100\% \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} RCI_{LO} &= \left(1 - \frac{\text{Total under temperature}}{\text{Max allowable under temperature}} \right) \times 100\% \\ &= \left(1 - \frac{\sum (T_{\min-rec} - T_i)_{T_i < T_{\min-rec}}}{n \times (T_{\min-rec} - T_{\min-all})} \right) \times 100\% \end{aligned} \quad (2.6)$$

Όπου: T_i είναι η μέση θερμοκρασία κάθε εισόδου rack.

n είναι ο συνολικός αριθμός (εισόδων) ραφιών

$T_{\max\text{-rec}}$ είναι η μέγιστη συνιστώμενη θερμοκρασία σύμφωνα με ορισμένες οδηγίες ή πρότυπα

$T_{\min\text{-rec}}$ είναι η ελάχιστη συνιστώμενη θερμοκρασία σύμφωνα με ορισμένους κατευθυντήριες γραμμές ή πρότυπα

$T_{\max\text{-all}}$ είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία σύμφωνα με ορισμένους κατευθυντήριες γραμμές ή πρότυπα, και,

$T_{\min\text{-all}}$ είναι η ελάχιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία σύμφωνα σε ορισμένες κατευθυντήριες γραμμές ή πρότυπα.

Θεωρητικά, το RCI_{HI} θα πρέπει να είναι ίσο με 1 προς αποφυγή υπερθέρμανση του rack.

Το RTI χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ποσότητας παράκαμψης κρύου αέρα και της επιστροφής θερμού αέρα σύμφωνα με την εξίσωση 2.7. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η ποσότητα παράκαμψης κρύου αέρα και η ποσότητα επιστροφής θερμού αέρα, το RTI θα πρέπει να προσεγγίσει το 1.

$$RTI = \frac{T_r - T_s}{\Delta T_e} \times 100\% \quad (2.7)$$

Όπου: T_r είναι η θερμοκρασία επιστροφής ζεστού αέρα (K)

T_s είναι η θερμοκρασία παροχής ψυχρού αέρα (K)

ΔT_e είναι η διαφορά θερμοκρασίας πριν και μετά την είσοδο του αέρα στο rack.

2.6.3 Εξοικονόμηση Ενέργειας και Μείωση Κατανάλωσης Συστήματος

Ενόψει των αυξανόμενων ενεργειακών απαιτήσεων, οι αλλαγές στα συστήματα ψύξης και η έγκαιρη ανάκτηση της απορριπτόμενης θερμότητας μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Επί του παρόντος, η αποτελεσματικότητα χρήσης ενέργειας (PUE) χρησιμοποιείται ως ένα αποτελεσματικό κριτήριο για την μέτρηση και σύγκριση της ενεργειακής απόδοσης του κέντρου δεδομένων και ορίζεται ως, ο λόγος της συνολικής ισχύος που αντλείται από μια εγκατάσταση κέντρου δεδομένων προς την ισχύ που χρησιμοποιείται από το IT εξοπλισμός σε αυτή την εγκατάσταση:

$$\text{PUE} = \frac{\text{Total facility power consumption}}{\text{IT equipment power consumption}} \quad (2.8)$$

Η συνολική ισχύς που αντλείται από μια εγκατάσταση κέντρου δεδομένων περιλαμβάνει την ενέργεια που καταναλώνεται από το σύστημα ψύξης. Ως εκ τούτου, προκειμένου να επιτευχθεί υψηλότερη ενεργειακή απόδοση του κέντρου, υπάρχει η ανάγκη όλης της ενέργειας που καταναλώνεται από την εγκατάσταση να χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία του εξοπλισμού πληροφορικής και να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας του συστήματος ψύξης. Όταν η κατανάλωση στο σύστημα ψύξης μειώνεται, η ενεργειακή απόδοση αυξάνεται και το PUE πλησιάζει το ένα.

Για να πληροί τις περιβαλλοντικές προϋποθέσεις, ένα κέντρο δεδομένων πρέπει να λειτουργεί αποτελεσματικά, να διαθέτει κάποια μορφή περιορισμού της ροής αέρα για τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης. Το επίκεντρο της μέτρησης και της ανάλυσης της χρήσης ενέργειας υπερβαίνει αυτό που χρησιμοποιείται από τον εξοπλισμό πληροφορικής. Το υλικό υποστήριξης εγκαταστάσεων όπως τα ψυκτικά συγκροτήματα και οι ανεμιστήρες χρησιμοποιούν επίσης ενέργεια.

Η χαρτογράφηση θερμικών ζωνών χρησιμοποιεί αισθητήρες και μοντελοποίηση υπολογιστή για να δημιουργήσει μια τρισδιάστατη εικόνα των θερμών και ψυχρών ζωνών σε ένα κέντρο δεδομένων. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό της βέλτιστης θέσης του εξοπλισμού του κέντρου. Για παράδειγμα, κρίσιμοι διακομιστές μπορεί να τοποθετηθούν σε μια ψυχρή ζώνη που εξυπηρετείται από πλεονάζουσες μονάδες AC.

Στην βάση των παραπάνω μεθοδολογιών σταδιακά οδηγούμαστε στα πράσινα κέντρα δεδομένων, όπου η καταναλισκόμενη ενέργεια προέρχεται στο σύνολό της από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Χώρες με ευνοϊκές συνθήκες, είναι ο Καναδάς, η Φινλανδία, η Σουηδία, η Νορβηγία και η Ελβετία οι οποίες προσπαθούν να προσελκύσουν κέντρα δεδομένων υπολογιστικού νέφους.

Η επαναχρησιμοποίηση της θερμότητας είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί σε πολλές περιπτώσεις ιδιαίτερα όταν το θερμικό φορτίο προέρχεται από τα αερόψυκτα κέντρα δεδομένων. Για το λόγο αυτό, οι υποδομές των κέντρων δεδομένων είναι πιο συχνά εξοπλισμένες με αντλίες θερμότητας. Μια εναλλακτική λύση στις αντλίες θερμότητας είναι η υιοθέτηση της υγρής ψύξης σε ένα κέντρο δεδομένων. Διαφορετικές τεχνικές υγρής ψύξης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να επιτρέψουν μια πλήρως υγρόψυκτη υποδομή που συλλαμβάνει όλη τη θερμότητα με νερό. Οι διαφορετικές τεχνολογίες υγρών κατηγοριοποιούνται σε 3 κύριες ομάδες, έμμεση υγρή ψύξη (υδρόψυκτα rack), άμεση υγρή ψύξη (direct-to-chip ψύξη) και ολική υγρή ψύξη (πλήρης εμβάπτιση σε υγρό, βλέπε διακομιστή εμβάπτισης ψύξης). Αυτός ο συνδυασμός τεχνολογιών επιτρέπει τη δημιουργία ενός θερμικού φορτίου ικανού να παράξει νερό υψηλής θερμοκρασίας από το κέντρο δεδομένων.

2.7 Βασικές αρχές εφαρμοσμένης ρευστοδυναμικής

Η απόδοση του συστήματος ψύξης σε ένα κέντρο δεδομένων εξαρτάται από το πεδίο ροής του αέρα. Η υπολογιστική ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics) ή CFD είναι ένα αποτελεσματικό εργαλείο για την παροχή λεπτομερών πληροφοριών σχετικά με το ροή αέρα. Οι πειραματικές διαδικασίες είναι πιο δαπανηρές και χρονοβόρες. Ένα άλλο πλεονέκτημα της μοντελοποίησης είναι η δυνατότητα ανάλυσης προτεινόμενων διαμορφώσεων κέντρων δεδομένων που δεν έχουν υπάρξει/κατασκευαστεί ακόμη (εκτός από τα ήδη υπάρχοντα κέντρα δεδομένων). Ωστόσο, είναι πολύ σημαντικό οι προσομοιώσεις να πραγματοποιούνται με ποιότητα και αξιοπιστία.

Αυτός ο τύπος ανάλυσης χρησιμοποιεί εξελιγμένα εργαλεία και τεχνικές για την κατανόηση των μοναδικών θερμικών συνθηκών που υπάρχουν σε κάθε κέντρο δεδομένων. Η πρόβλεψη της θερμοκρασίας, της ροής αέρα και της συμπεριφοράς πίεσης ενός κέντρου δεδομένων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά συμπεράσματα για την αξιολόγηση της απόδοσης και της κατανάλωσης ενέργειας, χρησιμοποιώντας αριθμητική μοντελοποίηση[95]. Με την πρόβλεψη των επιπτώσεων αυτών των περιβαλλοντικών συνθηκών, η ανάλυση CFD ενός κέντρου δεδομένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόγνωση του αντίκτυπου των ραφιών υψηλής πυκνότητας που αναμειγνύονται με rack χαμηλής πυκνότητας[96] και του μελλοντικού αντίκτυπου στους πόρους ψύξης, τις κακές πρακτικές διαχείρισης υποδομής και βλάβη AC ή την διακοπή λειτουργίας AC για προγραμματισμένη συντήρηση.

Σημαντικές παράμετροι όπως η ποιότητα του υπολογιστικού πλέγματος, οι οριακές συνθήκες και η επιλογή του μοντέλου τύρβης πρέπει να εξεταστούν προσεκτικά. Σε διαφορετική περίπτωση, Τα αποτελέσματα από τη μοντελοποίηση μπορεί να είναι παραπλανητικά. Ο αριθμός Reynolds είναι πιθανότατα υψηλός σε μεγάλα τμήματα των κέντρων δεδομένων και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη μοντελοποίηση της ροής αέρα. Το πιο κοινό μοντέλο τύρβης που χρησιμοποιείται είναι το μοντέλο $k-\epsilon$ [99].

Το μειονέκτημα του μοντέλου $k-\epsilon$ είναι η αδυναμία του να προβλέψει την ανισότροπη τύρβη [100]. Υποθέτει επίσης ότι η ροή είναι πλήρως τυρβώδης, κάτι που είναι ανακριβές εάν οι ταχύτητες είναι μικρές σε ορισμένα μέρη του υπολογιστικού χώρου².

Σε αυτή την εργασία, για να απλοποιηθεί ο υπολογισμός του προβλήματος, γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές. Το πεδίο υπολογισμένης ροής είναι μια σταθερή κατάσταση, τυρβώδης και ασυμπίεστη ροή, όπου οι επιδράσεις της ακτινοβολίας, της διαρροής αερίου και της άνωσης αγνοούνται. Οι εξισώσεις που διέπουν τις ροές ρευστού γενικά είναι οι νόμοι διατήρησης της μάζας, της ορμής και της ενέργειας. Σε τυρβώδεις ροές, οι στιγμιαίες μεταβλητές συχνά διαχωρίζονται σε μια μέση τιμή και μια κυμαινόμενη, όπου η μέση τιμή είναι συνήθως το πιο σημαντικό μέρος.

Μετά από κάποιες τροποποιήσεις, στις μεταβλητές των εξισώσεων Navier–Stokes και λαμβάνοντας υπόψη την μέση τιμή ως προς τον χρόνο, οδηγούμαστε στις εξισώσεις που επιτυγχάνεται η σταθερή μέση ροή. Αυτές ονομάζονται εξισώσεις Reynolds-Averaged Navier–Stokes (RANS). Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι εξισώσεις που θα χρησιμοποιηθούν σε αυτή τη μελέτη περιλαμβάνουν την εξίσωση συνέχειας, την εξίσωση ορμής και την εξίσωση ενέργειας για την προσομοίωση της κίνησης του ρευστού και τον υπολογισμό των φαινόμενων μεταφοράς θερμότητας. Οι εξισώσεις αυτές παρουσιάζονται παρακάτω:

² Αν και συνήθως επειδή υπάρχει σχετικά μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά, η ροή είναι τυρβώδης στα σημεία υψηλού ενδιαφέροντος.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = S_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial(\overline{\rho u'_i u'_j})}{\partial x_j}, \quad (2.10)$$

Όπου: $\overline{\rho u'_i u'_j}$ είναι οι τάσεις Reynolds.

Όπως φαίνεται από τον πρώτο όρο στην αριστερή πλευρά, ανάλογα σχετικά με την επιλογή της κλίμακας υπολογισμού του μέσου χρόνου, οι μεταβάσεις και οι μεγαλύτερες διακυμάνσεις στη ροή εξακολουθούν να υπολογίζονται. Για να κλείσει το σύστημα εξισώσεων για τη σταθερή μέση ροή, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα μοντέλο τύρβης. Το μοντέλο k-ε, λύνει επιπλέον εξισώσεις μεταφοράς για δύο μεταβλητές, την τυρβώδη κινητική ενέργεια και τον ρυθμό διάχυσης τυρβώδους κινητικής ενέργειας.

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\theta}{\theta x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\theta k}{\theta x_j} \right] + \mu_t S^2 - \rho \varepsilon \quad S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (2.11)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\theta}{\theta x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\theta \varepsilon}{\theta x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} \mu_t S^2 - \rho C_{2\varepsilon} \varepsilon) \quad (2.12)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.13)$$

Η μέθοδος αυτή μοντελοποίησης βασίζεται στην υπόθεση τυρβώδους ιξώδους, που προϋποθέτει ισότροπη τύρβη και αναλογικότητα μεταξύ των τάσεων Reynolds και του μέσου όρου διαβαθμίσεις ταχύτητας σύμφωνα με την εξίσωση:

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \right) \quad (2.14)$$

Για την επίλυση, αναλύονται πρόσθετες εξισώσεις μεταφοράς για τις έξι επιμέρους τάσεις Reynolds, καθώς και μια πρόσθετη εξίσωση για το ρυθμό διάχυσης. Οι επιμέρους τάσεις Reynolds χρησιμοποιούνται για να επιτευχθεί το “κλείσιμο” των εξισώσεων RANS. Η υπόθεση τυρβώδους-ιζώδους δεν χρειάζεται, πράγμα που σημαίνει ότι ένα από τα κύρια μειονεκτήματα του μοντέλου k-ε εξαλείφονται.

Κοντά σε ένα τοίχωμα, η ταχύτητα πλησιάζει στο μηδέν, και υπάρχει μια “παχύρρευστη” υποστιβάδα. Μακριά από τον τοίχο, οι δυνάμεις ιζώδους είναι αμελητέες σε σύγκριση με τις δυνάμεις αδράνειας. Κάπου ανάμεσα σε αυτά τα όρια υπάρχει μια περιοχή που ονομάζεται επίπεδο log-law, όπου υπάρχει μια λογαριθμική σχέση μεταξύ των αδιάστατων εκφράσεων για την ταχύτητα και την απόσταση από το τοίχωμα. Οι δυνάμεις ιζώδους και οι δυνάμεις αδράνειας είναι εξίσου σημαντικές σε αυτήν την περιοχή. Τα σημεία του πλέγματος κοντά στον τοίχο θα πρέπει να βρίσκονται μέσα στο επίπεδο log-law.

Για τον υπολογισμό των θερμικών φορτίων θα πρέπει να επιλυθεί ακόμα μία εξίσωση, αυτή είναι η εξίσωση ενέργειας και είναι η εξής:

$$\rho_c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \mu \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \quad (2.15)$$

Με την επίλυση των παραπάνω εξισώσεων μπορεί να υπολογιστεί το πεδίο ροής καθώς και η θερμική κατανομή στον υπολογιστικό χώρο, ώστε να οδηγηθούμε στην διαπίστωση του εάν ένας συγκεκριμένος τρόπος ψύξης είναι αποδοτικός ή θα πρέπει να γίνουν τροποποιήσεις αυτού.

2.8 Συμπεράσματα

Κάθε μέρα, δημιουργούνται περισσότερα από 350 εκατομμύρια terabyte δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων αυτών που δημιουργήθηκαν πρόσφατα, αντιγράφηκαν και καταναλώθηκαν. Με τη διαρκώς αυξανόμενη δημοτικότητα του διαδικτύου των πραγμάτων (IoT), αυτός ο ρυθμός παραγωγής δεδομένων θα αυξάνεται ακόμη περισσότερο. Όλα αυτά τα δεδομένα αποθηκεύονται σε ειδικές εγκαταστάσεις που ονομάζονται κέντρα δεδομένων (datacenters). Αν και τα πρώτα κέντρα δεδομένων διαχειριζόντουσαν μικρό όγκο, οι τρέχουσες τεχνολογίες, όπως η τεχνητή νοημοσύνη και η μηχανική μάθηση, έχουν πάρει το τιμόνι και μας οδήγησαν σε έναν κόσμο που βασίζεται στα δεδομένα. Αυτός ο πολλαπλασιασμός δεδομένων επέτρεψε σημαντικές προόδους σε τομείς που κυμαίνονται από τα οικονομικά και την υγειονομική περίθαλψη έως τις μεταφορές και την ψυχαγωγία, αναδιαμορφώνοντας τον τρόπο που ζούμε, εργαζόμαστε και διασυνδεόμαστε με τον κόσμο.

Όλος ο εξοπλισμός ο οποίος παρέχει αυτές τις υπηρεσίες, καταναλώνουν τεράστια ποσά ενέργειας τόσο για την λειτουργία τους, όσο και για την διατήρηση των θερμοκρασιακών συνθηκών λειτουργίας. Κρίσιμοι παράγοντες, όπως η χρήση ενέργειας, ο αριθμός των διακομιστών, η χωρητικότητα αποθήκευσης και η πολυπλοκότητα των συστημάτων ψύξης και διαχείρισης μας παρέχουν μια ολιστική εικόνα της κλίμακας και των δυνατοτήτων των κέντρων αυτών.

Σε αυτό το κεφάλαιο, έγινε αναφορά στους παράγοντες που αφορούν στην ψύξη αυτών των συστημάτων, η οποία απαιτεί τεράστια ενεργειακά ποσά, ώστε να παρέχονται οι κατάλληλες συνθήκες λειτουργίας του ευαίσθητου ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Στα κεφάλαια που ακολουθούν, θα γίνει μία ανάλυση με τη βοήθεια υπολογιστικού πακέτου, με απώτερο στόχο να οδηγηθούμε σε συγκεκριμένα συμπεράσματα που αφορούν σε σχεδιαστικά θέματα τέτοιων συστημάτων.

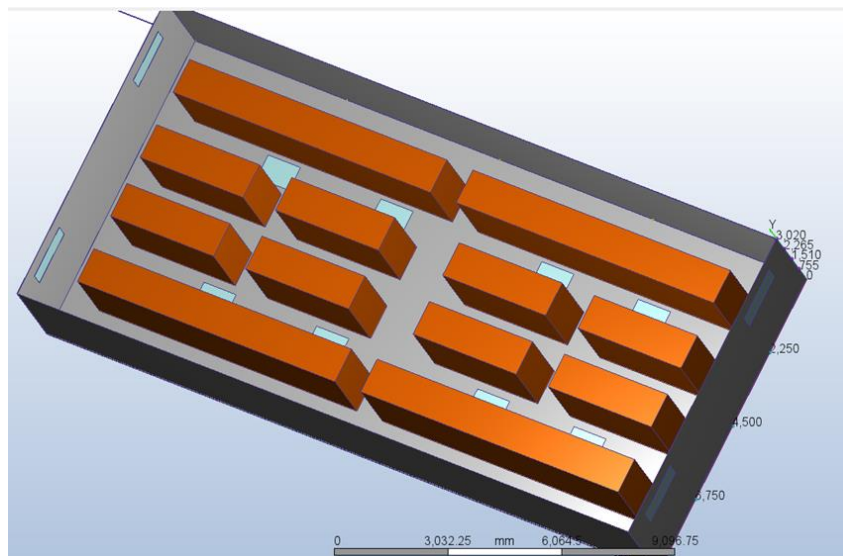
3. Ενεργειακή ανάλυση σε υφιστάμενη εφαρμογή

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστεί η μεθοδολογία η οποία ακολουθήθηκε προκειμένου να υπολογιστούν και να συγκεκριμενοποιηθούν οι ανάγκες, ώστε να καταλήξουμε στο αποδοτικότερο σύστημα. Στο κεφάλαιο αυτό, θα παρουσιαστούν στοιχεία της μοντελοποίησης τα οποία εφαρμόστηκαν προκειμένου να φράσουμε στα αποτελέσματα τα οποία ακολουθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

3.1 Επιλογή Data center για μελέτη

Όταν αναφερόμαστε στα ενεργειακά φορτία ενός κτιρίου, προφανώς δεν είναι άλλα, από τα θερμικά φορτία καθώς και τα φορτία ψύξης αυτού. Ο σωστός υπολογισμός τους μας επιτρέπει να επιλέξουμε το αποδοτικότερο σύστημα ψύξης θέρμανσης, ενώ υπάρχει πάντα και η πιθανότητα απόρριψης τύπου συστημάτων, αφού αυτά δεν θα πληρούν τις εν λόγω προϋποθέσεις. Δεδομένης της πολυπλοκότητας του προβλήματος η ανάλυση περιορίζεται σε διαφορετικές διατάξεις τοποθέτησης των Racks. Για το σκοπό αυτό σχεδιάστηκαν συνολικά τρεις διαφορετικές γεωμετρίες.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η σχετική διάταξη και παρουσιάζεται σε τρισδιάστατη μορφή για την πρώτη γεωμετρία.

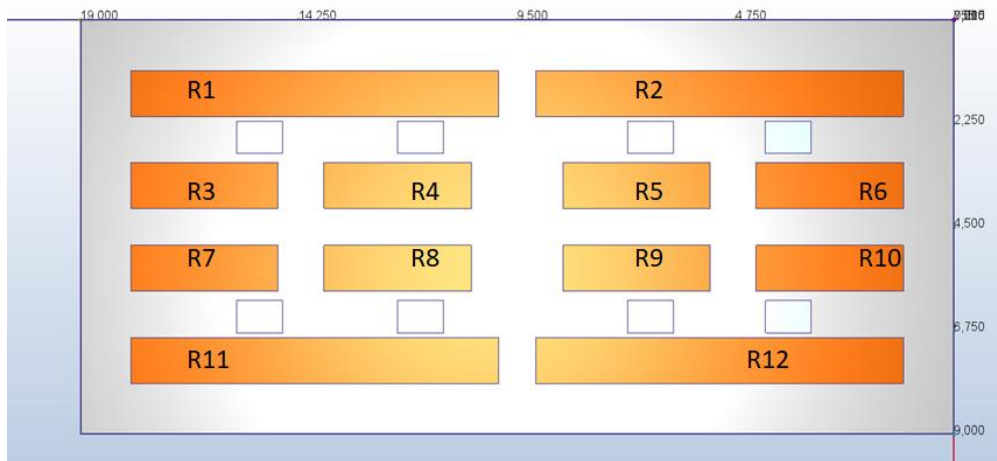


Σχήμα 3.1: Τρισδιάστατη απεικόνιση της γεωμετρίας της πρώτης διάταξης.

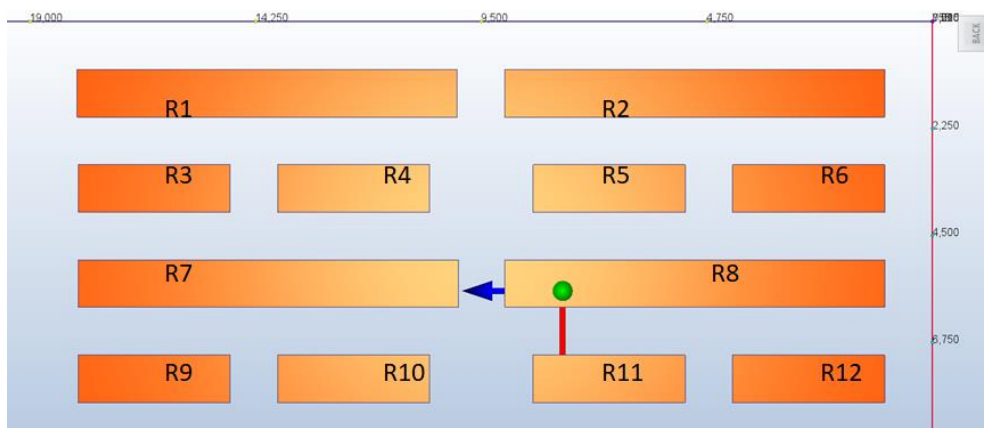
Στο σχήμα παρουσιάζεται ο χώρος δωματίου καθώς και τα διάφορα Racks. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, για τις ανάγκες της εν λόγω ανάλυσης έχουν επιλεγθεί δύο διαφορετικοί τύποι Racks και συγκεκριμένα ο μικρός αποτελείται από 88 servers και έχει διαστάσεις 2,2m x 3,2m x 1,0m ενώ ο δεύτερος έχει χωρητικότητα 220 servers με διαστάσεις 2,2m x 8,0m x 1,0m. Στο σχήμα απεικονίζονται με το πορτοκαλί χρώμα.

Για να αποφευχθεί σύγχυση κυρίως στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων, τα εν λόγω Racks έχουν ονομαστεί όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

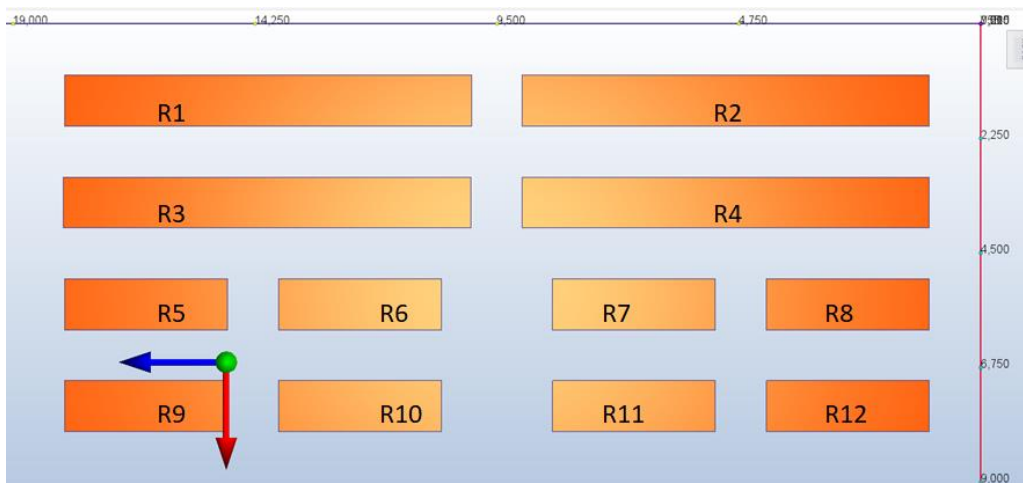
Ενεργειακή Ανάλυση σε Κέντρο Διαχείρισης Δεδομένων (Data center).



Σχήμα 3.2: Ονοματολογία των διατάξεων των Racks της πρώτης περίπτωσης.



Σχήμα 3.3: Ονοματολογία των διατάξεων των Racks της δεύτερης περίπτωσης.



Σχήμα 3.4: Ονοματολογία των διατάξεων των Racks της τρίτης περίπτωσης.

Όλες οι γεωμετρίες σχεδιάστηκαν στο σχεδιαστικό μηχανολογικό λογισμικό Inventor 2024 με ξεχωριστά μέρη τα οποία εν συνεχεία τοποθετήθηκαν σε συγκεκριμένες θέσεις ώστε τελικά να προκύψει ένα αρχείο assembly. Αυτό το αρχείο εισήχθη στο λογισμικό Autodesk CFD 2024 προκειμένου να πραγματοποιηθεί η ανάλυση ρευστοδυναμικής.

3.2 Επιλογή Οριακών συνθηκών

Για την ανάλυση των τριών περιπτώσεων έχουν επιλεγεί συγκεκριμένες οριακές συνθήκες οι οποίες έχουν τοποθετηθεί και στις τρεις γεωμετρίες προκειμένου να προχωρήσουμε σωστή σύγκριση των αποτελεσμάτων ώστε να προβούμε σε βάσιμα συμπεράσματα. Για τον σκοπό αυτό έχουν επιλεγεί συγκεκριμένες οριακές συνθήκες οι οποίες έχουν προκύψει από τη διεθνή βιβλιογραφία [1].

Οι οριακές συνθήκες διαχωρίζονται σε δύο ομάδες. Τις μόνιμες οριακές συνθήκες οι οποίες δηλώνονται και παραμένουν σταθερές σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, μία τέτοια είναι η οριακή συνθήκη θερμικού φορτίου ενός σώματος (π.χ. ένα Rack), και σε συνθήκες οι οποίες δηλώνονται μόνο στην αρχή της προσομοίωσης και μετά οι τελική τιμή τους προκύπτει μέσα από την διαδικασία επίλυσης των εξισώσεων. Μία τέτοια συνθήκη είναι π.χ., η θερμοκρασία του χώρου.

3.2.1 Οριακή συνθήκη εισόδου

Ξεκινώντας από την οριακή συνθήκη της εισόδου, αυτή διαθέτει δύο χαρακτηριστικά ενώ βρίσκεται στο κάτω μέρος της γεωμετρίας και συγκεκριμένα στο επίπεδο του χώρου. Η συγκεκριμένη γεωμετρία διαθέτει (σχήμα 3.2) 8 συνολικά σημεία εισόδου τα οποία διαθέτουν διαστάσεις 1m x 0,7m. Υπολογίζοντας την σχετική παροχή για τα συγκεκριμένα ανοίγματα καταλήγουμε ότι η ταχύτητα που θα πρέπει να αποδοθεί (με φορά κάθετη προς τα επάνω) είναι 0,257m/s.

Στην είσοδο αποδίδεται και συγκεκριμένη θερμοκρασία η οποία όμως αναλύεται σε επόμενη παράγραφο.

3.2.2 Οριακή συνθήκη εξόδου

Η συνθήκη της εξόδου είναι σημαντική καθώς θα πρέπει να διατηρείται το ισοζύγιο μάζας. Για τον σκοπό αυτό έχουν επιλεγεί συνολικά τέσσερα ανοίγματα στους κάθετους τοίχους όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1. Στο συγκεκριμένο λογισμικό, η οριακή συνθήκη της εξόδου δηλώνεται απλά επιλέγοντας τα σημεία και θέτοντας την τιμή της πίεσης ίση με μηδέν.

3.2.3 Οριακή συνθήκη θερμικών φορτίων

Τα θερμικά φορτία είναι μία πολύ σημαντική οριακή συνθήκη ενώ θα πρέπει να δηλωθεί με ιδιαίτερο τρόπο καθώς σε αντίθετη περίπτωση μπορούμε να οδηγηθούμε σε τελείως διαφορετικά αποτελέσματα. Από της βιβλιογραφία [1], προκύπτει ότι για κάθε server

δημιουργείται ένα θερμικό φορτίο της τάξης του 1,5kW. Για την ανάλυση και με δεδομένο ότι έχουμε δύο διαφορετικές γεωμετρίες Racks υπολογίζονται οι τιμές 330kW και 132kW αντίστοιχα.

Δεδομένου ότι θα πρέπει τα εν λόγω θερμικά φορτία να τοποθετηθούν στις επιφάνειες των Racks, οι παραπάνω τιμές έχουν αναχθεί σε τιμές εξωτερικών επιφανειών και έχουν δηλωθεί στις αντίστοιχες επιφάνειες αυτών.

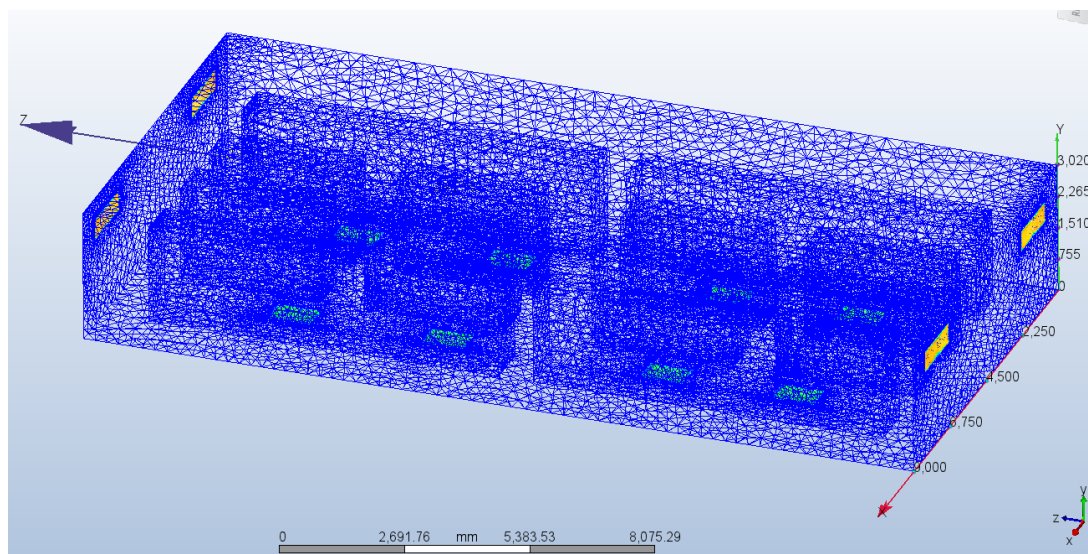
3.2.4 Οριακή συνθήκη θερμοκρασίας

Η οριακή συνθήκη της θερμοκρασίας είναι σημαντική καθώς εάν δεν δοθεί η σωστή τιμή της αρχικά, τότε τα θερμικά φορτία τα οποία παρέχονται μπορεί να οδηγήσουν σε λάθος αποτελέσματα. Για το σκοπό αυτό, έχει αποδοθεί σταθερή οριακή συνθήκη θερμοκρασίας 8°C στην είσοδο αφού προφανώς ο αέρας που χρησιμοποιείται για να ψύξει τον χώρο θα πρέπει να είναι σε αρκετά χαμηλότερη θερμοκρασία (συνήθως 7-8 βαθμούς) ώστε να λειτουργήσει αποδοτικά η ψύξη και συγκεκριμένα η απομάκρυνση των παραγόμενων θερμικών φορτίων από το χώρο.

Επίσης, έχει δηλωθεί σαν αρχική μόνο οριακή συνθήκη και έχει αποδοθεί στα Racks θερμοκρασία των 40°C. Προφανώς, η συνθήκη αυτή είναι αρχική, η τελική τιμή θα προκύψει μέσα από την επίλυση των εξισώσεων.

3.3 Δημιουργία του πλέγματος

Η δημιουργία του κατάλληλου πλέγματος είναι υψίστης σημασίας καθώς είναι εκείνο που θα ορίσει την ακρίβεια επίλυσης και την ορθότητα των αποτελεσμάτων. Επιλέγοντας ένα πολύ πυκνό πλέγμα θα έχει σαν αποτέλεσμα η λύση μας να έχει πολύ μικρό περιθώριο λάθους όμως απαιτεί πολύ χρόνο για την επίλυση. Για τις ανάγκες της διπλωματικής αυτής επιλέχθηκε πλέγμα το οποίο να παρέχει αρκετά σωστά αποτελέσματα σε βαθμό που να μην επηρεάζει/καθυστερεί πολύ την επίλυση των εξισώσεων.



Σχήμα 3.5: Παρουσίαση του υπολογιστικού πλέγματος.

Δεδομένου ότι μιλάμε για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις και κατά συνέπεια τρεις διαφορετικές γεωμετρίες, ισάριθμες δομές πλέγματος δημιουργήθηκαν. Έτσι στην πρώτη περίπτωση ο αριθμός των στοιχείων ήταν 365.776, στην δεύτερη 668931 και στην τρίτη 486.244. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα οι χρόνοι επίλυσης να είναι περίπου από 1,5 (πρώτη περίπτωση) έως 1ώρα και 45λεπτά (για την δεύτερη). Η Τρίτη περίπτωση απαίτησε περίπου 1 ώρα και 35 λεπτά.

3.4 Επιλογή κατάλληλων ρυθμίσεων

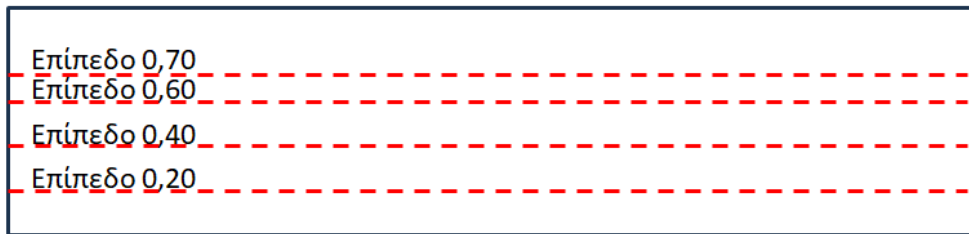
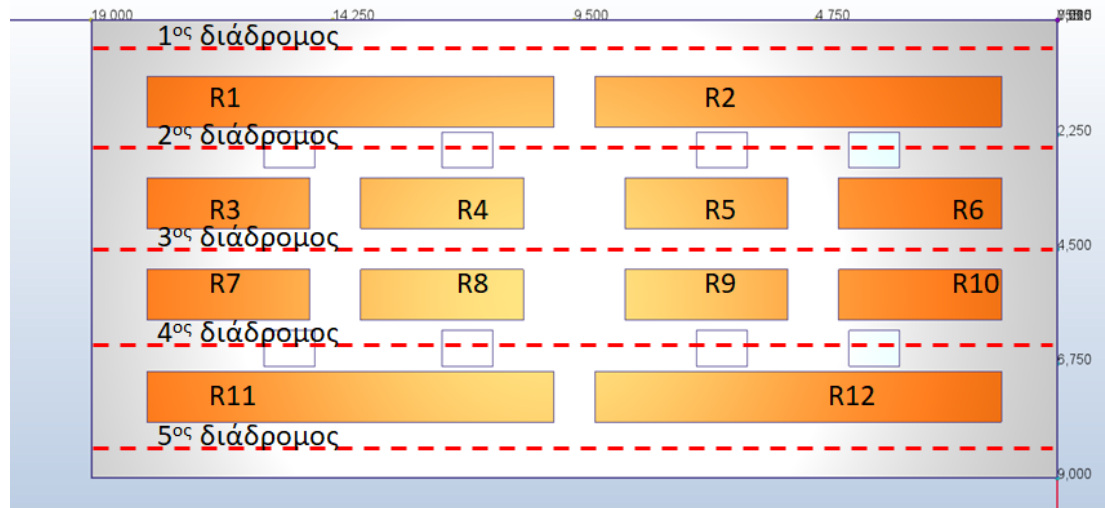
Για την επίλυση των εξισώσεων το λογισμικό χρησιμοποίησε το k-ε μοντέλο, ενώ υπήρχε και ειδική επιλογή για τη επίλυση της εξίσωσης για τον υπολογισμό των θερμοκρασιακών μεταβολών.

3.5 Μέθοδοι παρουσίασης και σύγκρισης των αποτελεσμάτων

Μετά την επίλυση των εξισώσεων ακολουθεί η φάση της παρουσίασης των αποτελεσμάτων ώστε να οδηγηθούμε σε βάσιμα συμπεράσματα. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με συγκεκριμένη σειρά. Συνήθως, η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων ξεκινάει από την παρουσία και τον έλεγχο του πεδίου ροής το οποίο γίνεται με τη βοήθεια διανυσμάτων.

Η παρουσίαση των θερμοκρασιακών κατανομών πραγματοποιείται με περιγράμματα χρωμάτων (contour plots) τα οποία αποδίδουν με χρώματα τις διάφορες θερμοκρασιακές τιμές.

Τέλος, έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση της ροής επειδή αυτή είναι τρισδιάστατη και ροϊκές γραμμές (Traces).



Σχήμα 3.6: Επιλογή κάθετων και οριζόντιων επιπέδων απεικόνισης αποτελεσμάτων.

Δεδομένου ότι οι ροή που αναλύεται είναι τρισδιάστατη, αυτό αποτελεί ένα βαθμό δυσκολίας στον τρόπο παρουσίασης των αποτελεσμάτων καθώς μπορεί να δημιουργήσει σύγχυση εάν δεν επιλεγούν κατάλληλα οι αντίστοιχες δομές παρουσίασης των αποτελεσμάτων. Για τον σκοπό αυτό έχουν ακολουθηθεί συγκεκριμένος τρόπος παρουσίασης. Αυτός φαίνεται στο παραπάνω σχήμα όπου παρουσιάζονται τα επιλεγμένα επίπεδα (κάθετα και οριζόντια) για τα οποία θα αναλυθούν και θα συγκριθούν τα πεδία ροών καθώς και οι θερμοκρασιακές κατανομές. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η ευκολότερη απόδοση συγκεκριμένων συμπερασμάτων ως προς την σύγκριση των παραπάνω περιπτώσεων/διατάξεων.

4. Παρουσίαση των αποτελεσμάτων

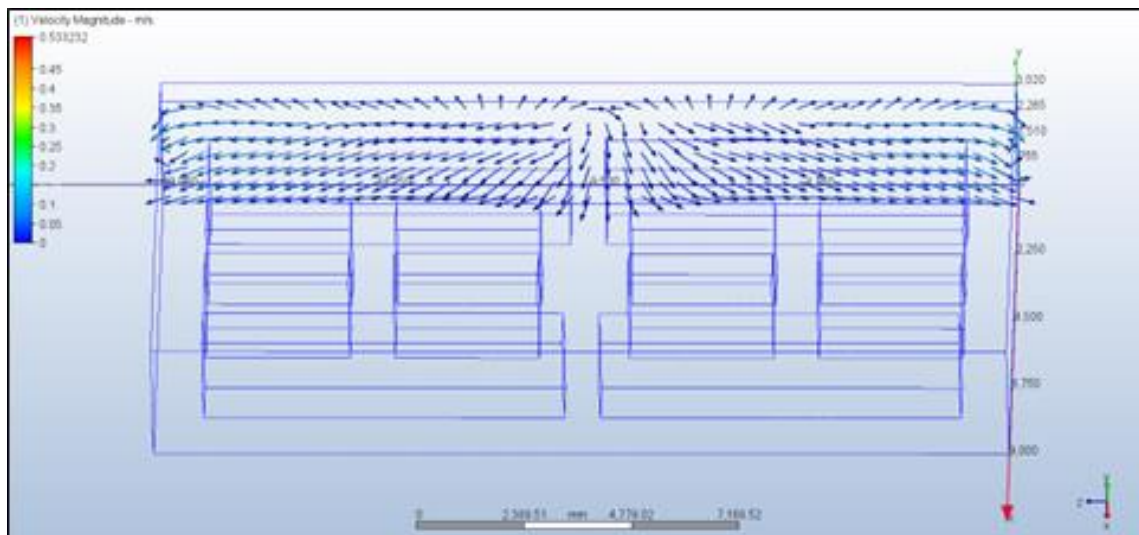
Το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει μόνο το σύνολο των αποτελεσμάτων (η ανάλυση αυτών γίνεται στο πέμπτο κεφάλαιο) τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί προκειμένου να καταλήξουμε σε βασικά συμπεράσματα. Για την επίτευξη του στόχου έχουν επιλεγεί αρκετοί διαφορετικοί τρόποι απεικόνισης. Για την καλύτερη διαχείριση παρόλα αυτά, το κεφάλαιο έχει διαχωριστεί σε τρία βασικά μέρη τα οποία είναι ισάριθμα των γεωμετριών που έχουν χρησιμοποιηθεί.

4.1 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της πρώτης διάταξης

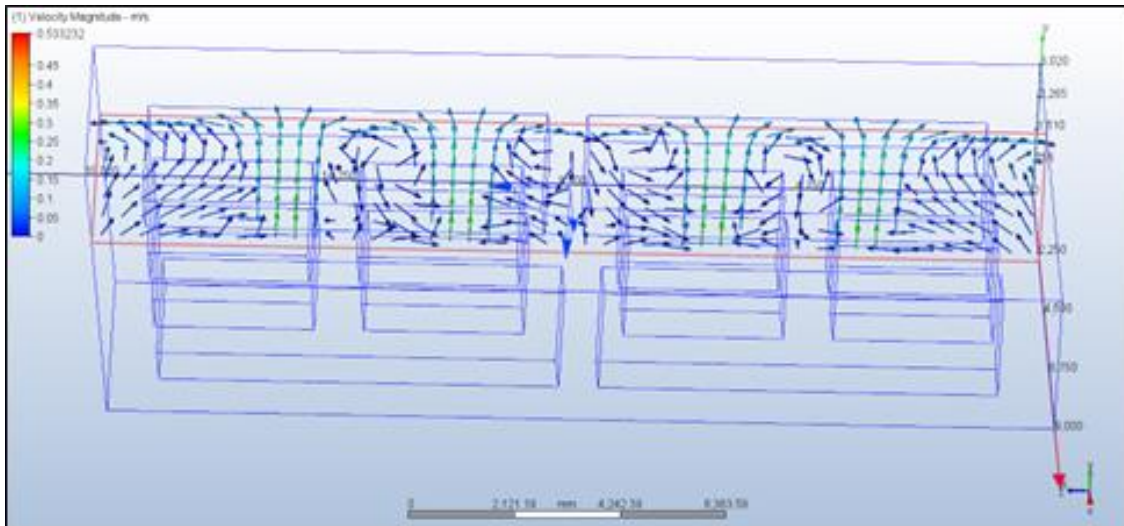
Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα ροής και θερμοκρασιακής κατανομής της πρώτης γεωμετρίας.

4.1.1 Ανάλυση της ροής του αέρα

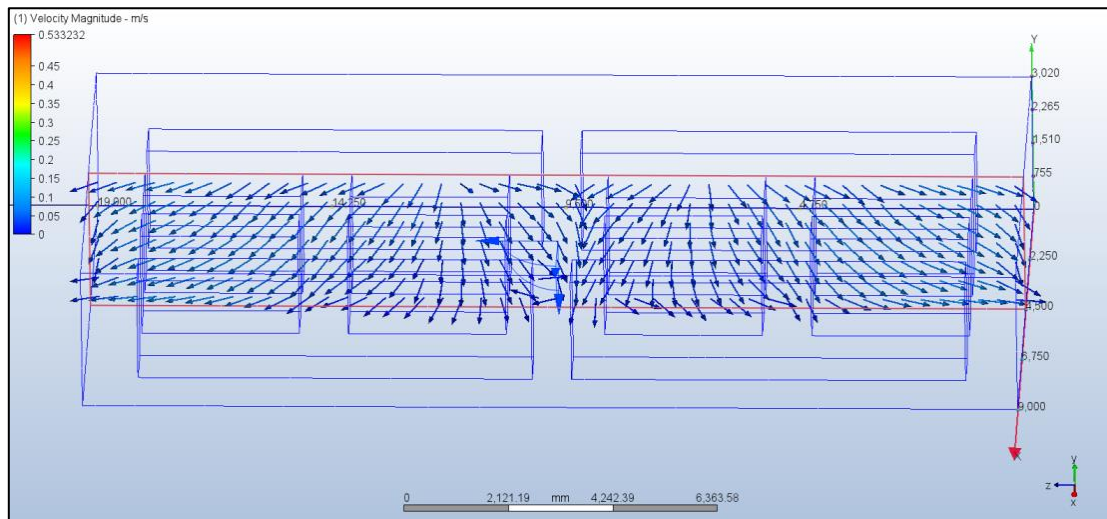
Η παρουσίαση ξεκινάει με την ανάλυση του πεδίου ροής. Επειδή η γεωμετρία είναι τρισδιάστατη έχουν επιλεγεί και απεικονίζονται παρακάτω τα προφίλ των ροών σε διάφορα επίπεδα κάθετα και οριζόντια (βλ. σχήμα 3.6).



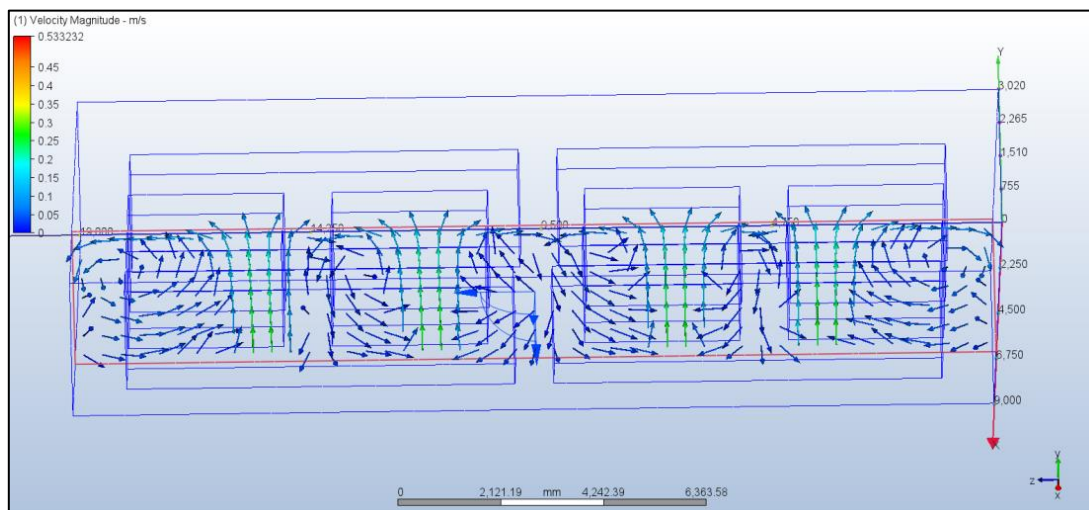
Σχήμα 4.1: Προφίλ ταχυτήτων στο 1^ο κάθετο επίπεδο (1^ος διάδρομος).



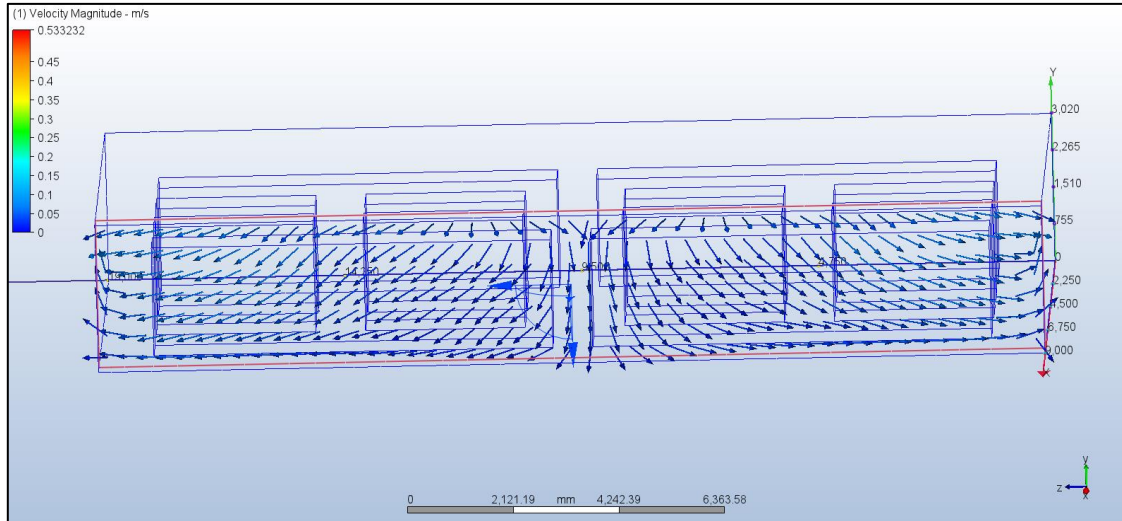
Σχήμα 4.2: Προφίλ ταχυτήτων στο 2^ο κάθετο επίπεδο (2^{ος} διάδρομος).



Σχήμα 4.3: Προφίλ ταχυτήτων στο 3^ο κάθετο επίπεδο (3^{ος} διάδρομος).

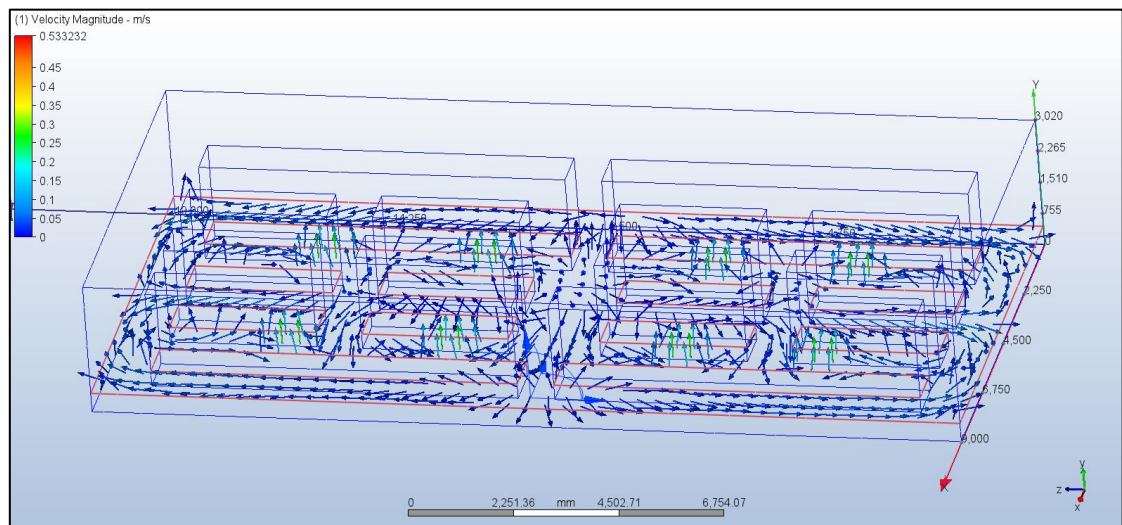


Σχήμα 4.4: Προφίλ ταχυτήτων στο 4^ο κάθετο επίπεδο (4^{ος} διάδρομος).

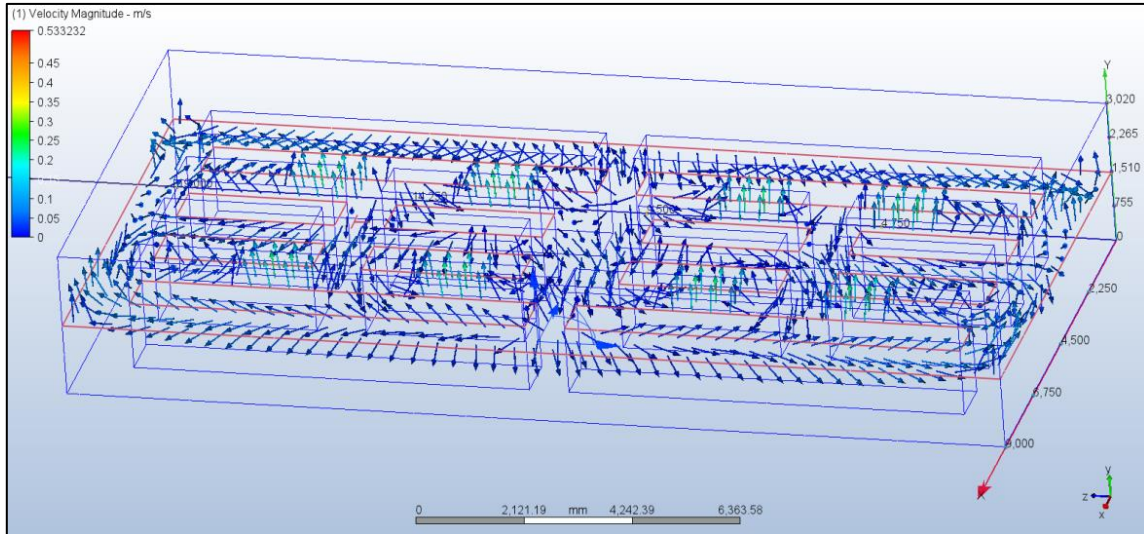


Σχήμα 4.5: Προφίλ ταχυτήτων στο 5^ο κάθετο επίπεδο (5^{ος} διάδρομος).

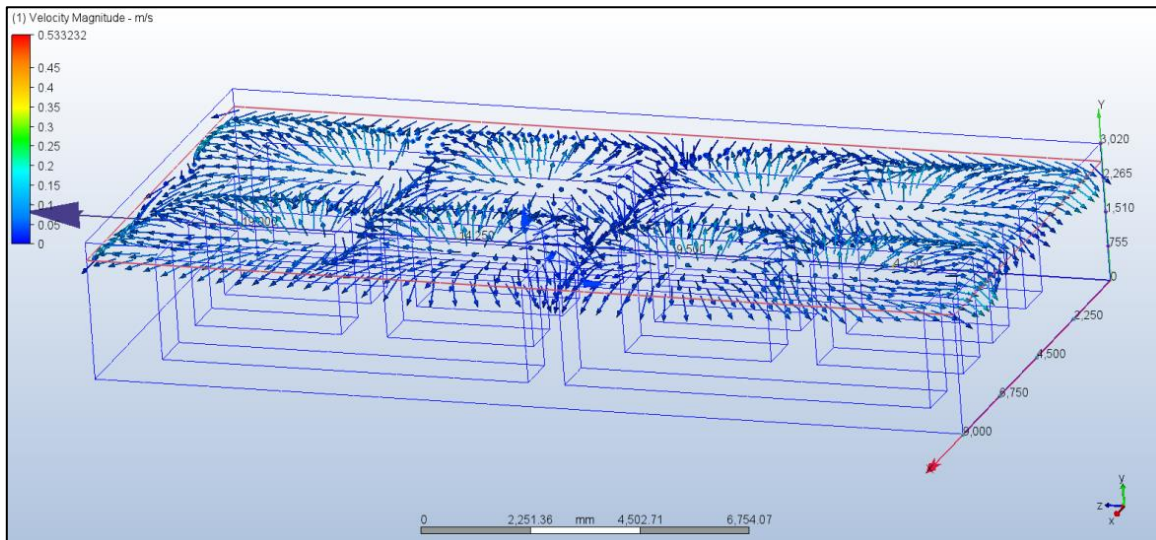
Παρακάτω απεικονίζεται το προφίλ ταχυτήτων για διατάξεις οριζόντιου επιπέδου και συγκεκριμένα για τα ύψη 0,35m, 1,5m και 2,6μαντίστοιχα.



Σχήμα 4.6: Προφίλ ταχυτήτων στο 1^ο οριζόντιο επίπεδο ($y=0,35m$).

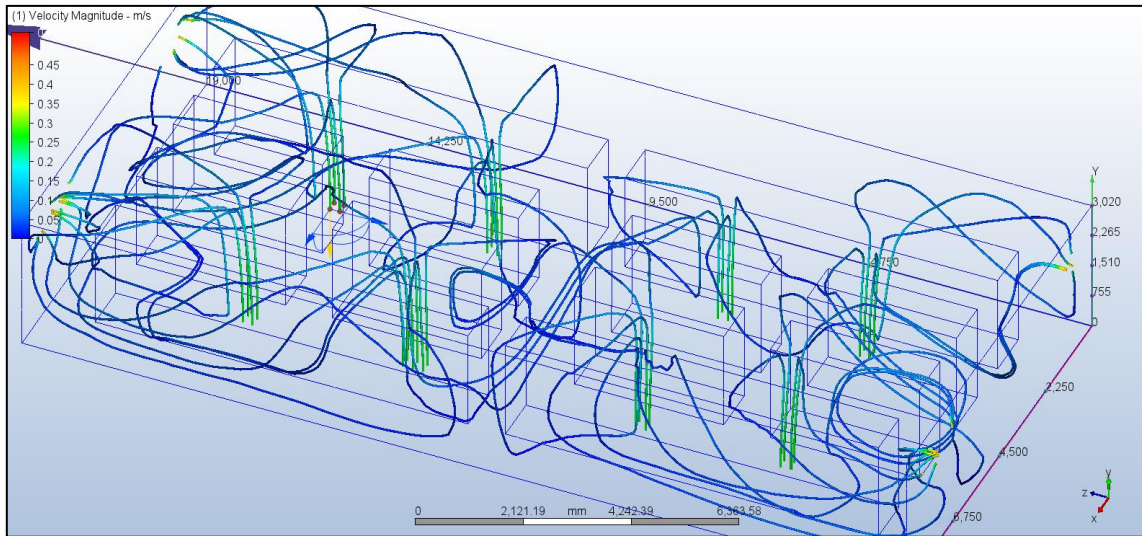


Σχήμα 4.7: Προφίλ ταχυτήτων στο 2^ο οριζόντιο επίπεδο ($\gamma=1,5\text{m}$).



Σχήμα 4.8: Προφίλ ταχυτήτων στο 3^ο οριζόντιο επίπεδο ($\gamma=2,6\text{m}$).

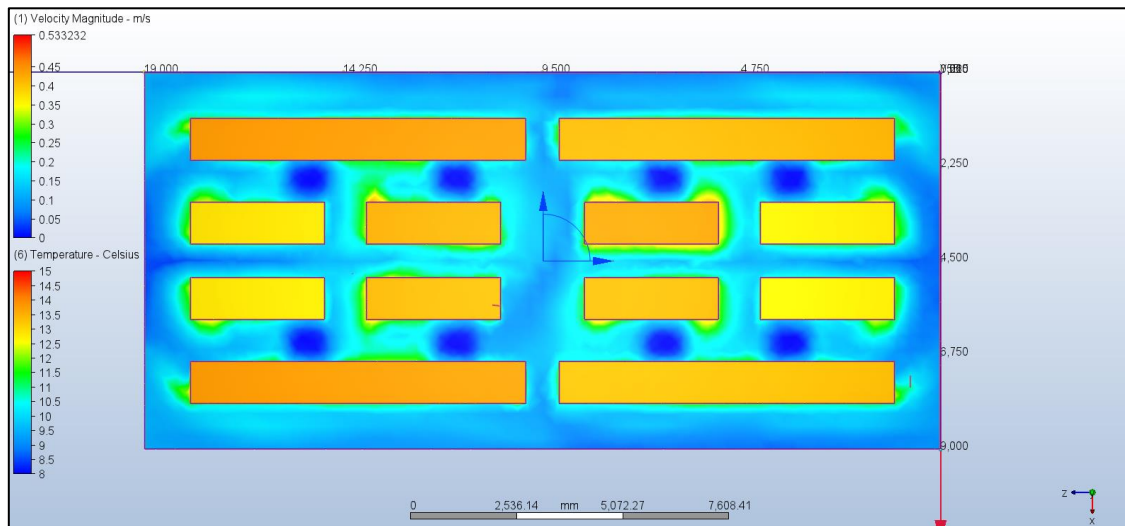
Επιπροσθέτως έχουν δημιουργηθεί και παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα οι ροϊκές γραμμές για μόρια αερίου τα οποία βρίσκονται στα σημεία εισόδου αέρα του χώρου, δηλαδή στο δάπεδο αυτού.



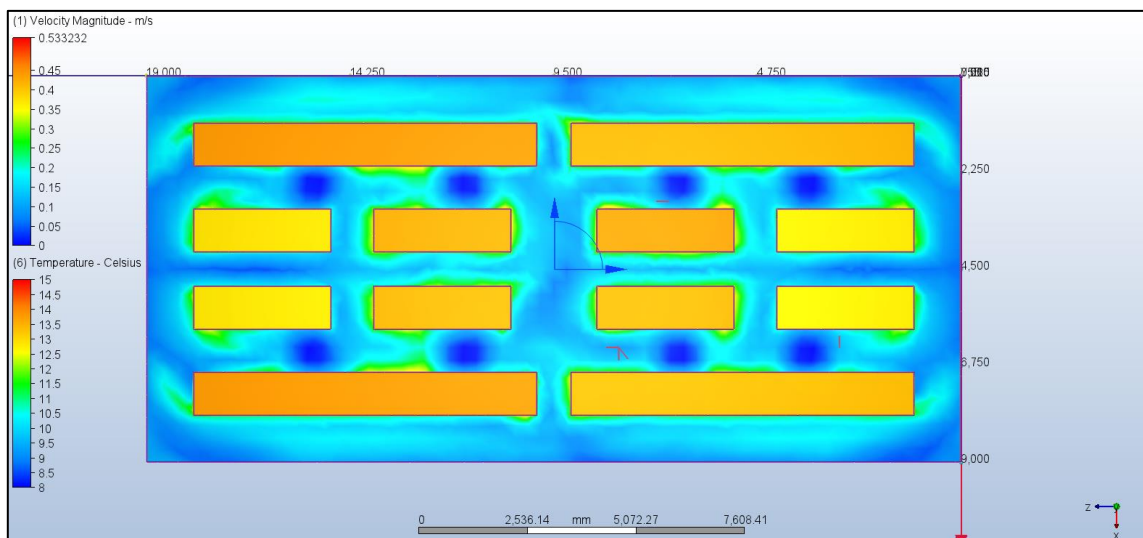
Σχήμα 4.9: Ροϊκές γραμμές μορίων του αέρα.

4.1.2 Ανάλυση Θερμικών φορτίων

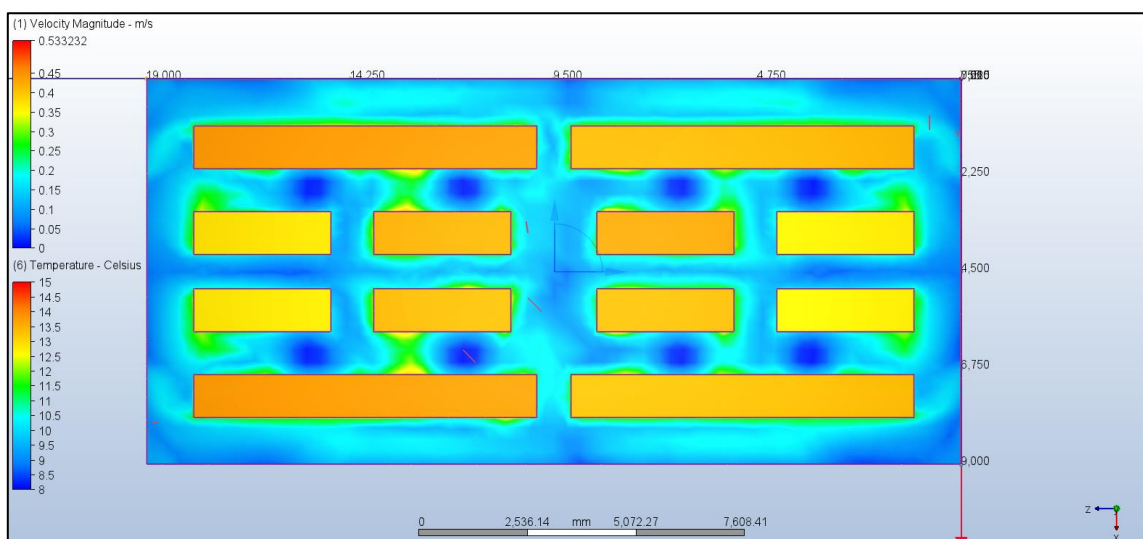
Στην υπό-παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν οι θερμοκρασιακές κατανομές για τα επίπεδα (γ^*) 0,20, 0,40, 0,60 και 0,70 αντίστοιχα. Για λόγους διευκόλυνσης ως προς την σύγκριση των αποτελεσμάτων, η κλίμακα της θερμοκρασίας έχει επιλεγεί να είναι η ίδια σε όλες τις περιπτώσεις.



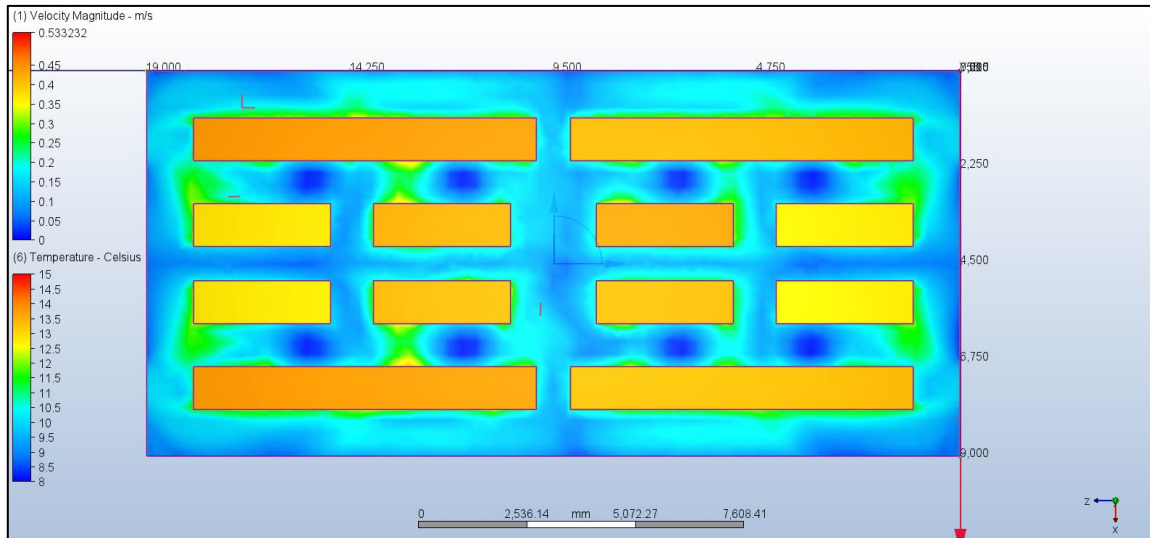
Σχήμα 4.10: Θερμοκρασιακή κατανομή στο επίπεδο $\gamma^*=0,20$.



Σχήμα 4.11: Θερμοκρασιακή κατανομή στο επίπεδο $\gamma^*=0,40$.



Σχήμα 4.12: Θερμοκρασιακή κατανομή στο επίπεδο $\gamma^*=0,60$.



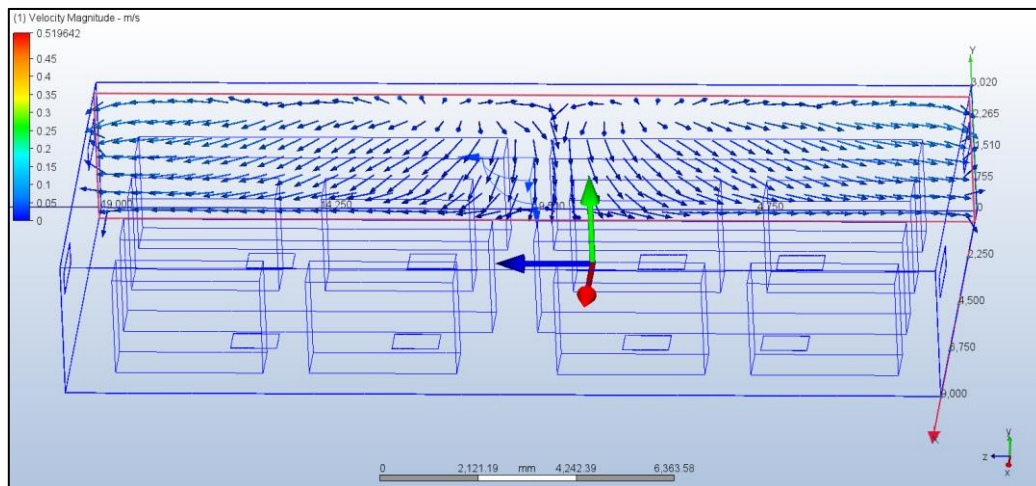
Σχήμα 4.13: Θερμοκρασιακή κατανομή στο επίπεδο $\gamma^*=0,70$.

4.2 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της δεύτερης διάταξης

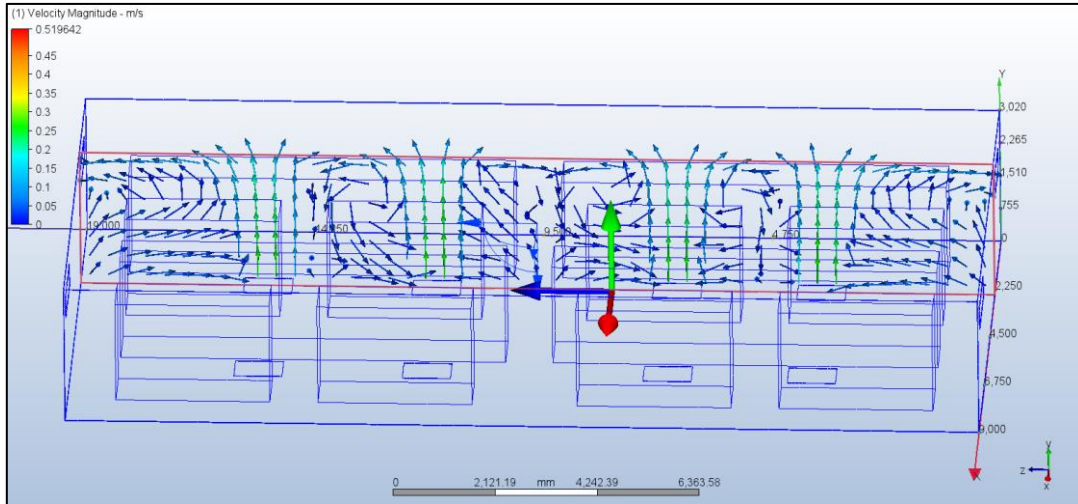
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα (προφίλ ταχυτήτων και θερμοκρασιακές κατανομές) της ανάλυσης της δεύτερης διάταξης.

4.2.1 Ανάλυση της ροής του αέρα

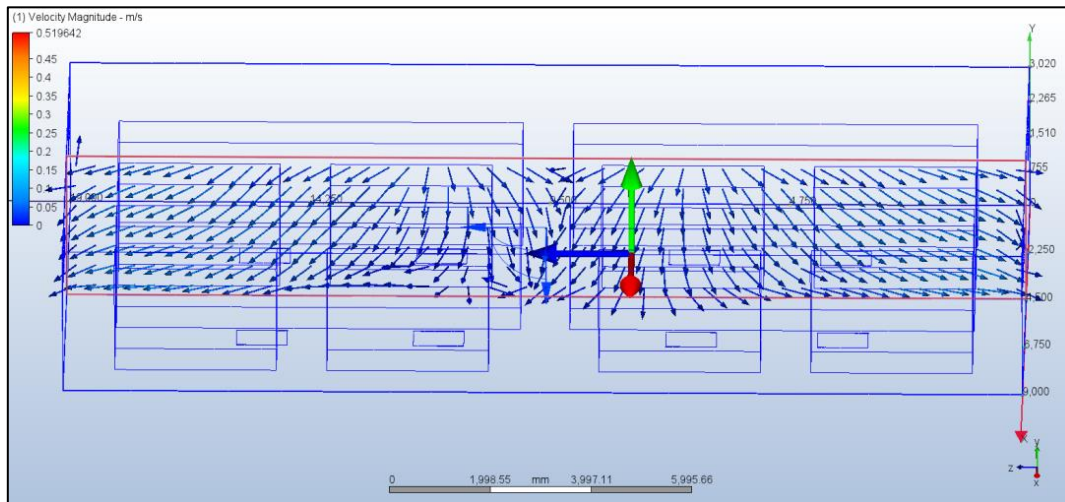
Η παρουσίαση ξεκινάει με την ανάλυση του πεδίου ροής και πάντα με την βοήθεια του σχήματος 3.6.



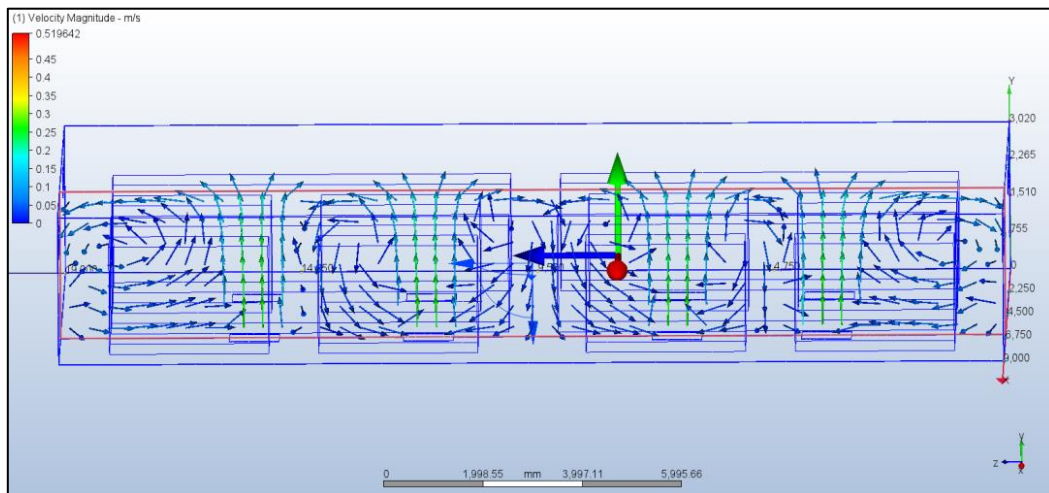
Σχήμα 4.14: Προφίλ ταχυτήτων στο 1^ο κάθετο επίπεδο (1^{ος} διάδρομος).



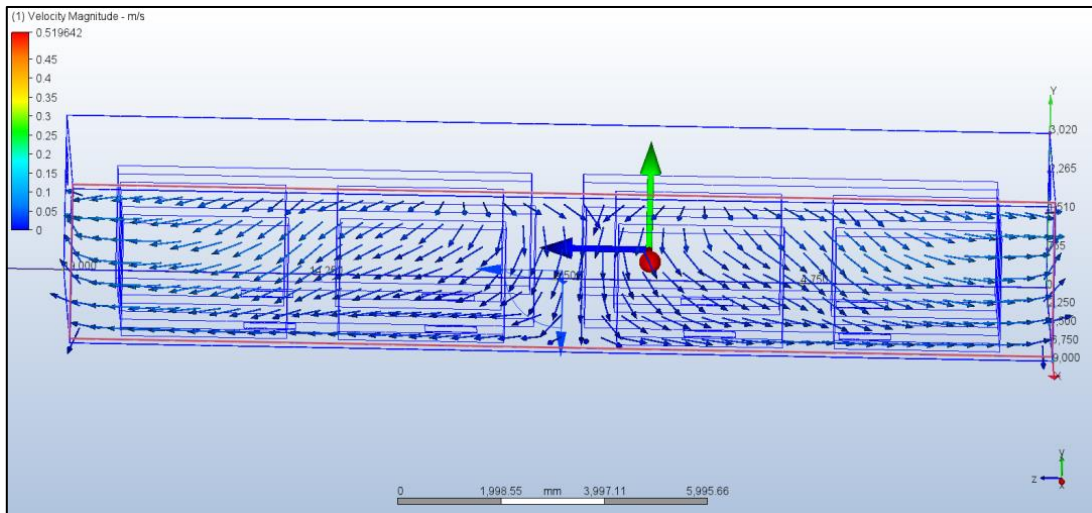
Σχήμα 4.15: Προφίλ ταχυτήτων στο 2^ο κάθετο επίπεδο (2^ος διάδρομος).



Σχήμα 4.16: Προφίλ ταχυτήτων στο 3^ο κάθετο επίπεδο (3^ος διάδρομος).

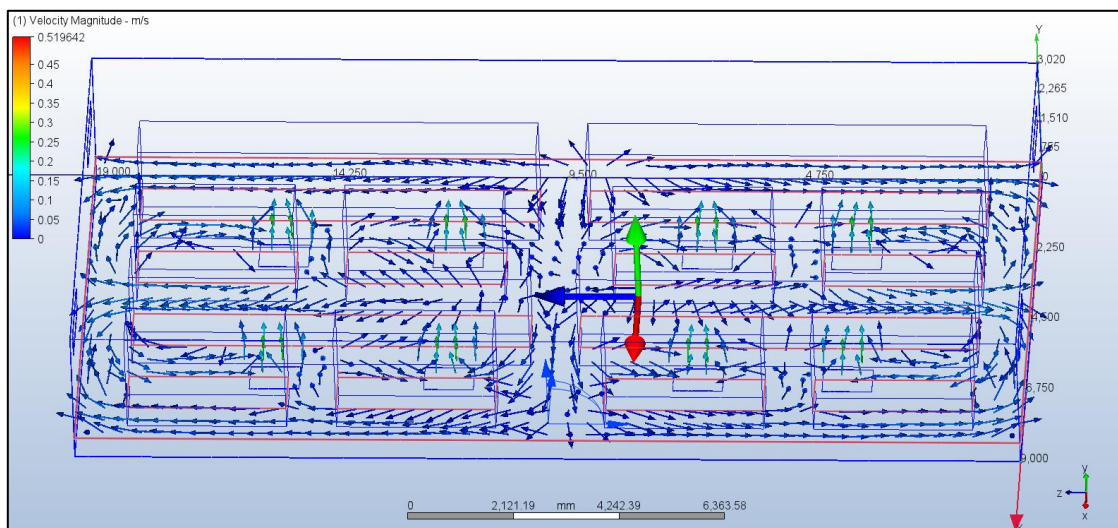


Σχήμα 4.17: Προφίλ ταχυτήτων στο 4^ο κάθετο επίπεδο (4^ος διάδρομος).

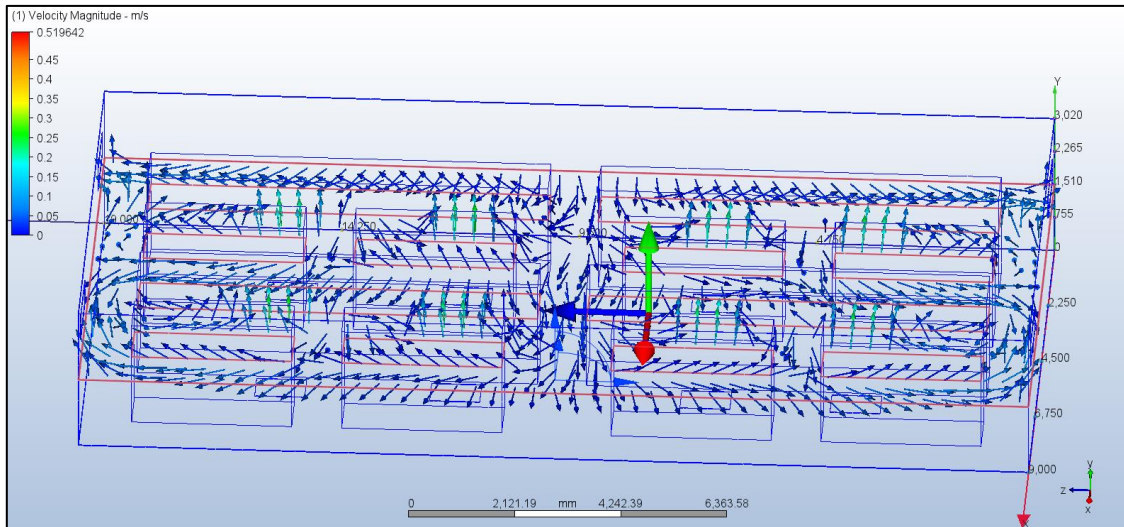


Σχήμα 4.18: Προφίλ ταχυτήτων στο 5^ο κάθετο επίπεδο (5^ο διάδρομος).

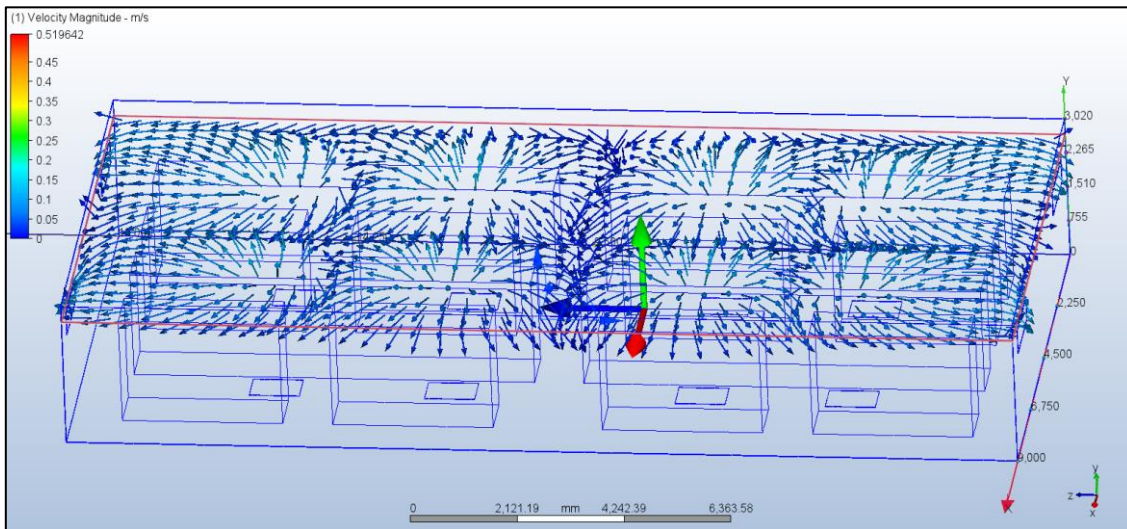
Παρακάτω απεικονίζεται το προφίλ ταχυτήτων για διατάξεις οριζόντιου επιπέδου και συγκεκριμένα για τα ύψη 0,35m, 1,5m και 2,6μαντίστοιχα.



Σχήμα 4.19: Προφίλ ταχυτήτων στο 1^ο οριζόντιο επίπεδο ($\gamma=0,35\text{m}$).

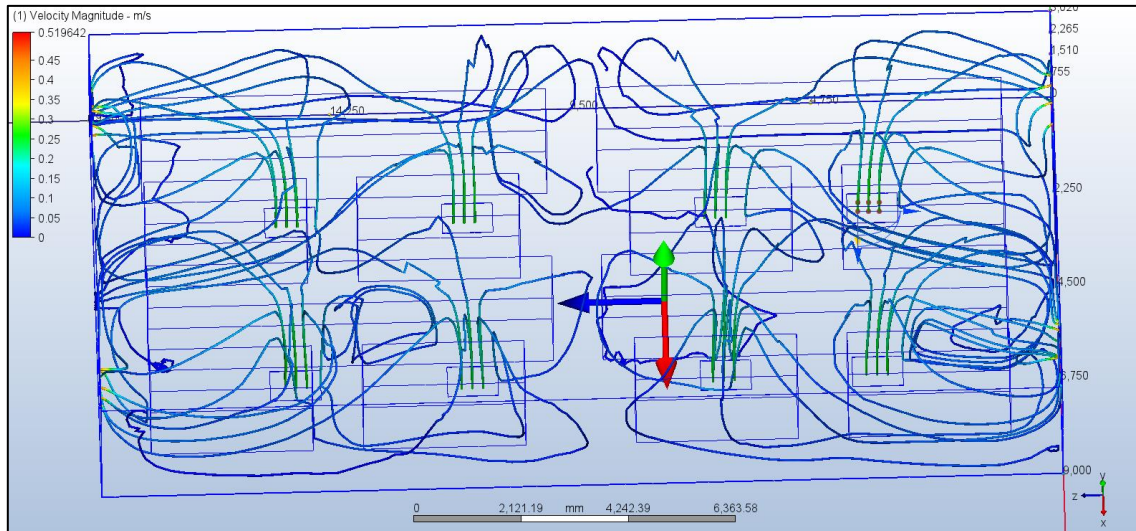


Σχήμα 4.20: Προφίλ ταχυτήτων στο 2^ο οριζόντιο επίπεδο ($y=1,5m$).



Σχήμα 4.21: Προφίλ ταχυτήτων στο 3^ο οριζόντιο επίπεδο ($y=2,6m$).

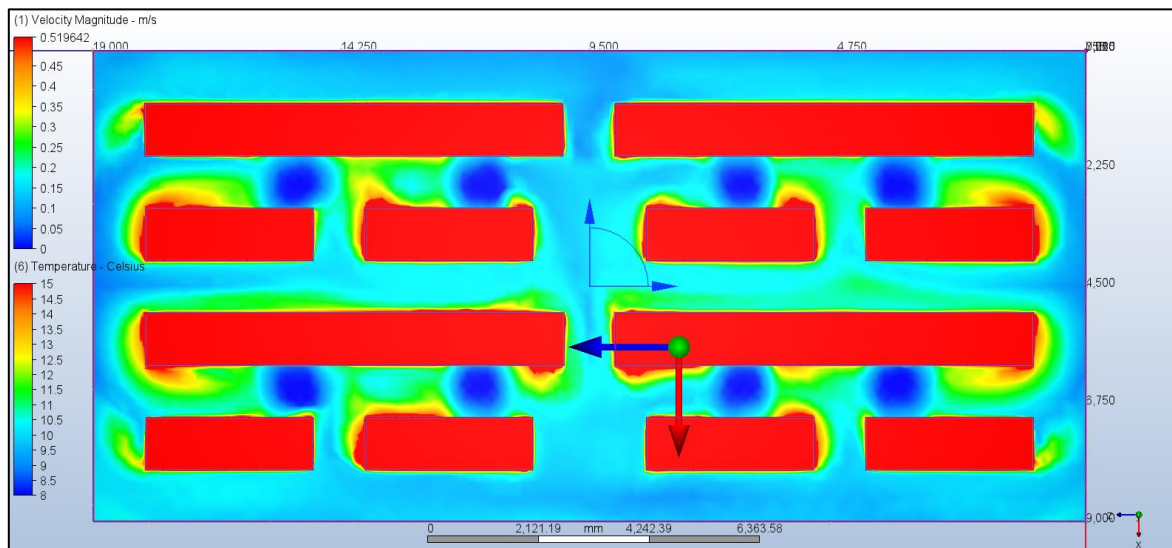
Επιπροσθέτως έχουν δημιουργηθεί και παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα οι ροϊκές γραμμές για μόρια αερίου τα οποία βρίσκονται στα σημεία εισόδου αέρα του χώρου, δηλαδή στο δάπεδο αυτού.



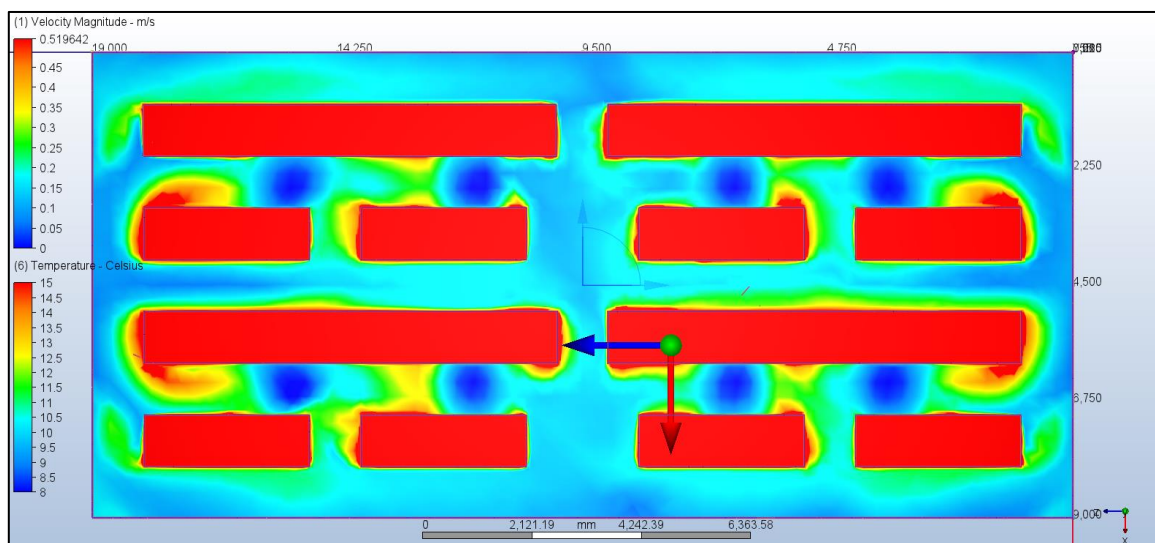
Σχήμα 4.22: Ροϊκές γραμμές μορίων του αέρα.

4.2.2 Ανάλυση Θερμικών φορτίων

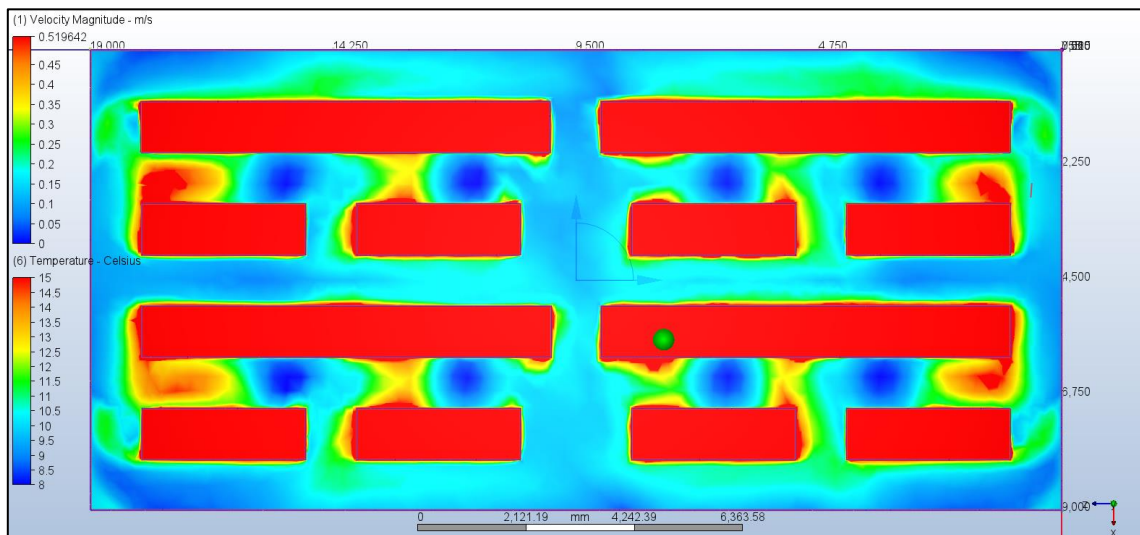
Στην υπό-παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν οι θερμοκρασιακές κατανομές για τα επίπεδα (γ^*) 0,20, 0,40, 0,60 και 0,70 αντίστοιχα. Για λόγους διευκόλυνσης ως προς την σύγκριση των αποτελεσμάτων, η κλίμακα της θερμοκρασίας έχει επιλεγεί να είναι η ίδια σε όλες τις περιπτώσεις.



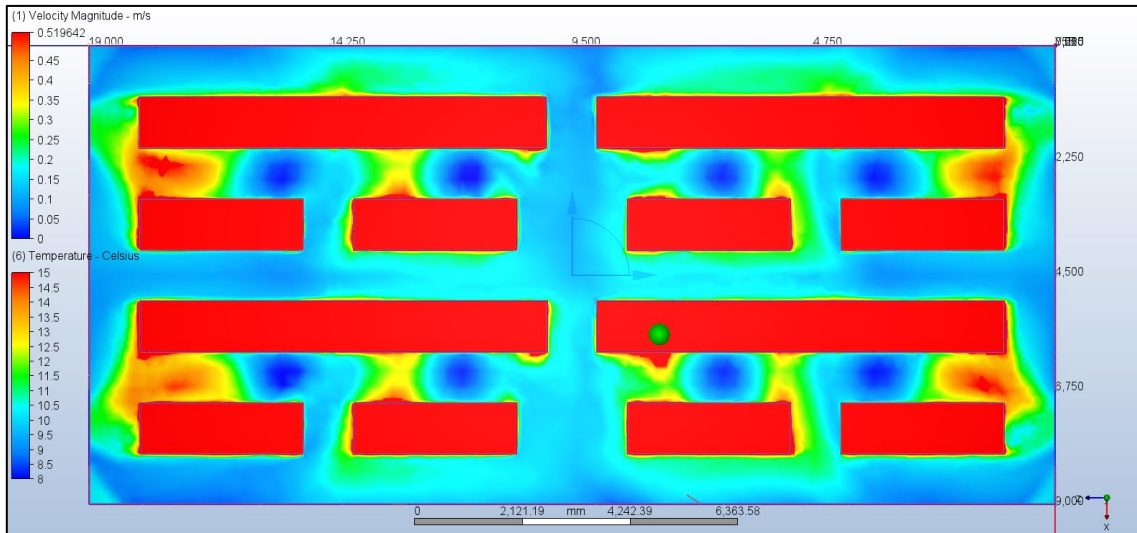
Σχήμα 4.23: Θερμοκρασιακή κατανομή στο επίπεδο $\gamma^*=0,20$.



Σχήμα 4.24: Θερμοκρασιακή κατανομή στο επίπεδο $\gamma^*=0,40$.



Σχήμα 4.25: Θερμοκρασιακή κατανομή στο επίπεδο $\gamma^*=0,60$.



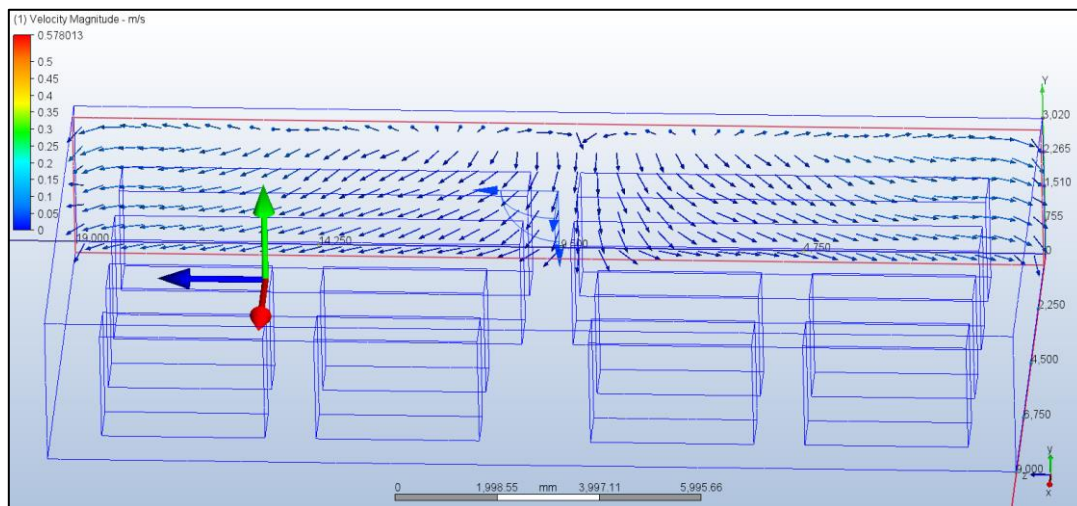
Σχήμα 4.26: Θερμοκρασιακή κατανομή στο επίπεδο $\gamma^*=0,70$.

4.3 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της τρίτης διάταξης

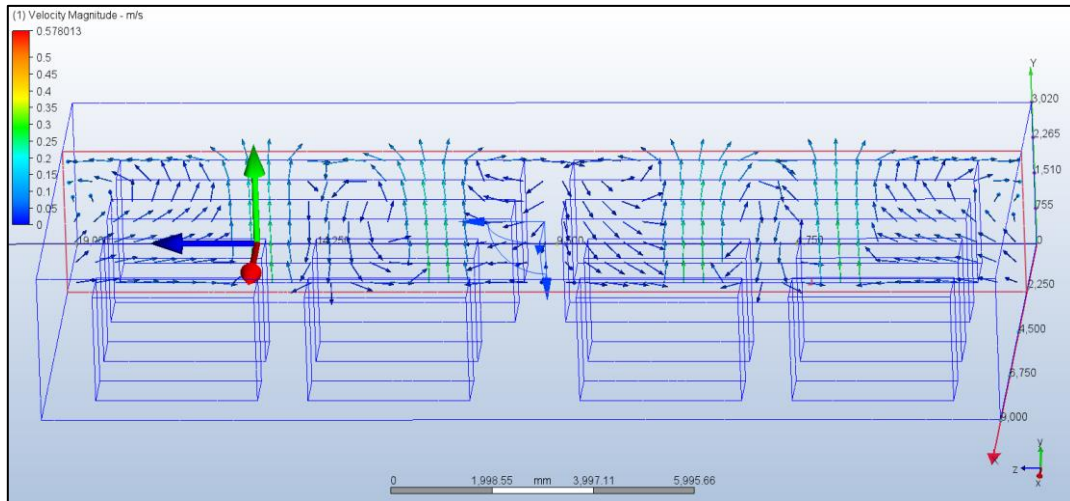
Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα ροής και θερμοκρασιακής κατανομής της τρίτης γεωμετρίας.

4.3.1 Ανάλυση της ροής του αέρα

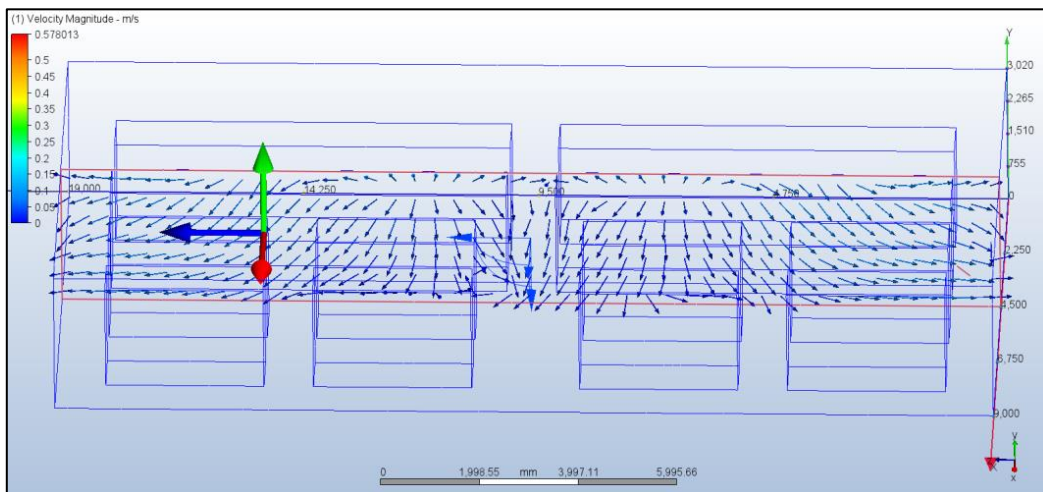
Η παρουσίαση ξεκινάει με την ανάλυση του πεδίου ροής και πάντα με την βοήθεια του σχήματος 3.6.



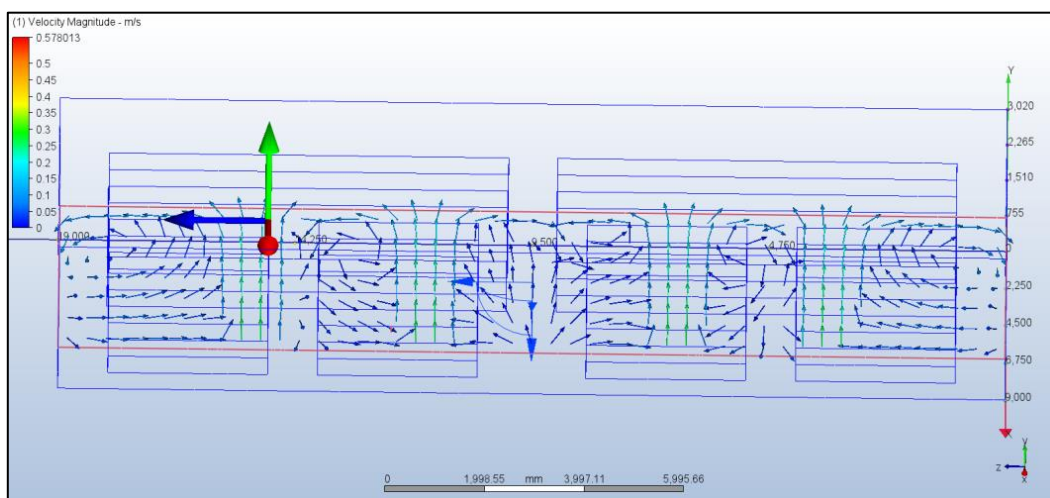
Σχήμα 4.27: Προφίλ ταχυτήτων στο 1^ο κάθετο επίπεδο (1^{ος} διάδρομος).



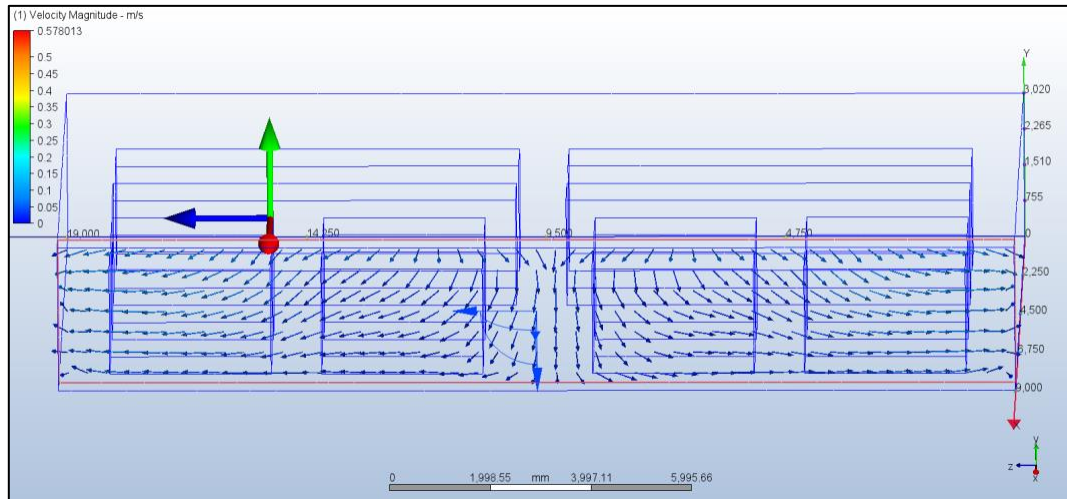
Σχήμα 4.28: Προφίλ ταχυτήτων στο 2^ο κάθετο επίπεδο (2^{ος} διάδρομος).



Σχήμα 4.29: Προφίλ ταχυτήτων στο 3^ο κάθετο επίπεδο (3^{ος} διάδρομος).

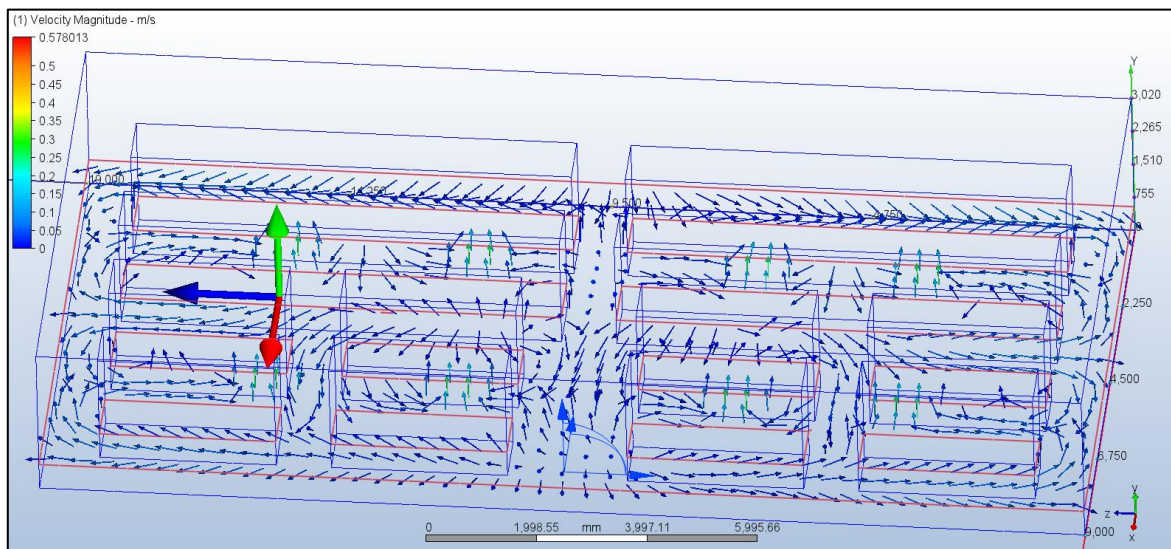


Σχήμα 4.30: Προφίλ ταχυτήτων στο 4^ο κάθετο επίπεδο (4^{ος} διάδρομος).

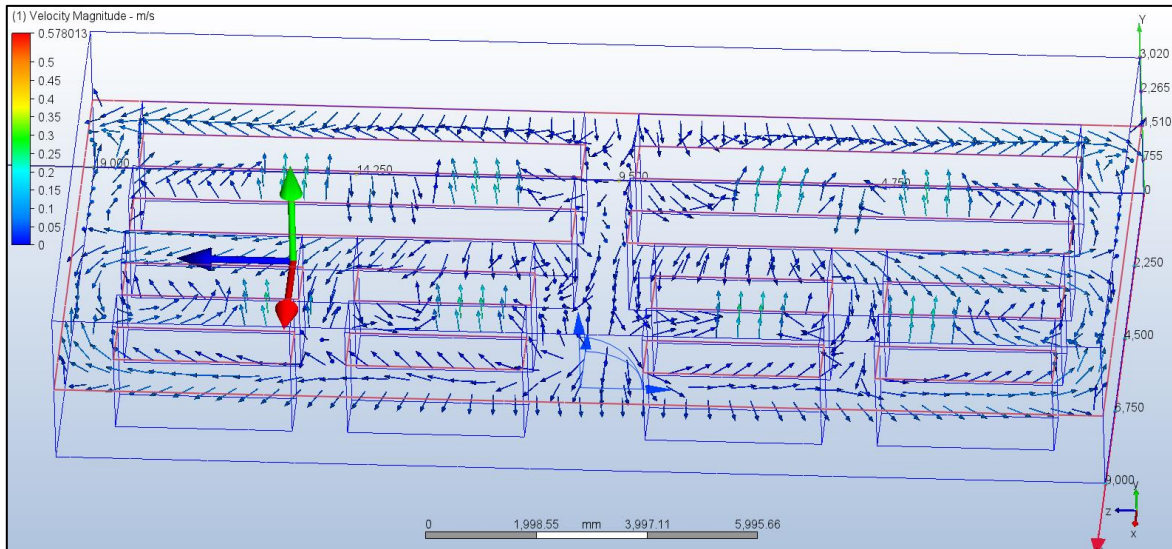


Σχήμα 4.31: Προφίλ ταχυτήτων στο 5^ο κάθετο επίπεδο (5^{ος} διάδρομος).

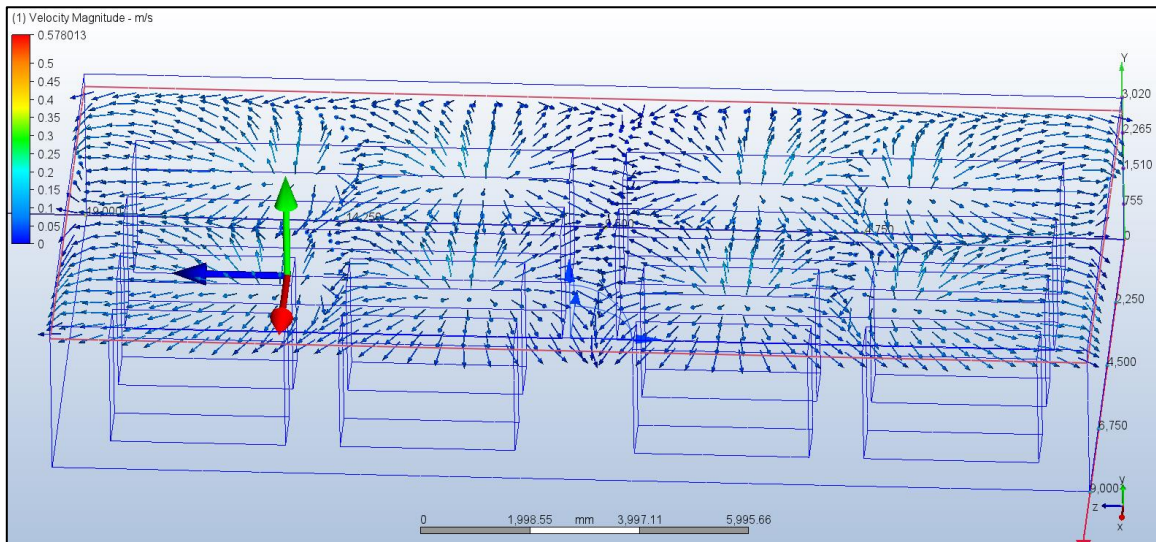
Παρακάτω απεικονίζεται το προφίλ ταχυτήτων για διατάξεις οριζόντιου επιπέδου και συγκεκριμένα για τα ύψη 0,35m, 1,5m και 2,6m αντίστοιχα.



Σχήμα 4.32: Προφίλ ταχυτήτων στο 1^ο οριζόντιο επίπεδο ($\gamma=0,35m$).

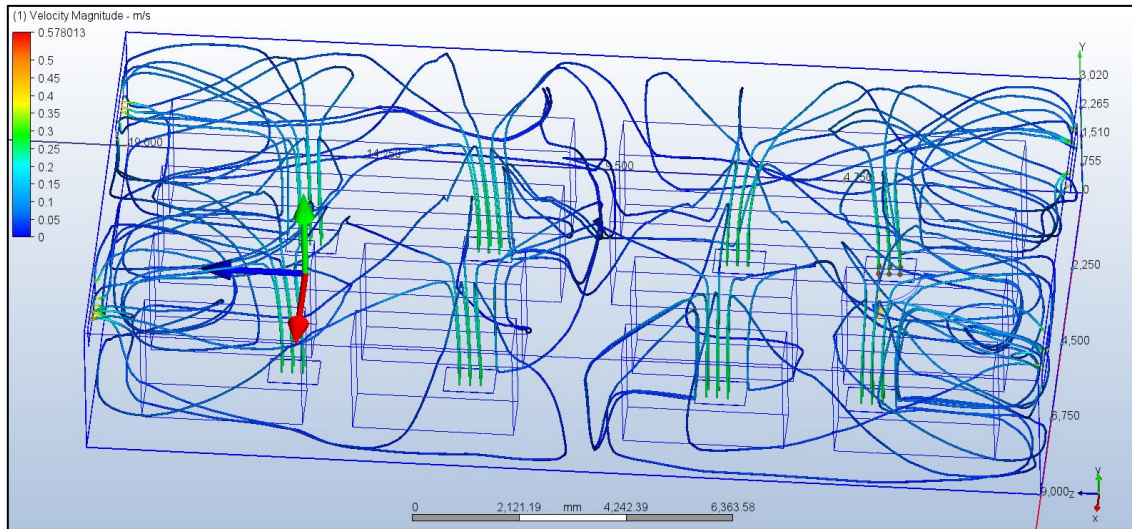


Σχήμα 4.33: Προφίλ ταχυτήτων στο 2^ο οριζόντιο επίπεδο ($\gamma=1,5\text{m}$).



Σχήμα 4.34: Προφίλ ταχυτήτων στο 3^ο οριζόντιο επίπεδο ($\gamma=2,6\text{m}$).

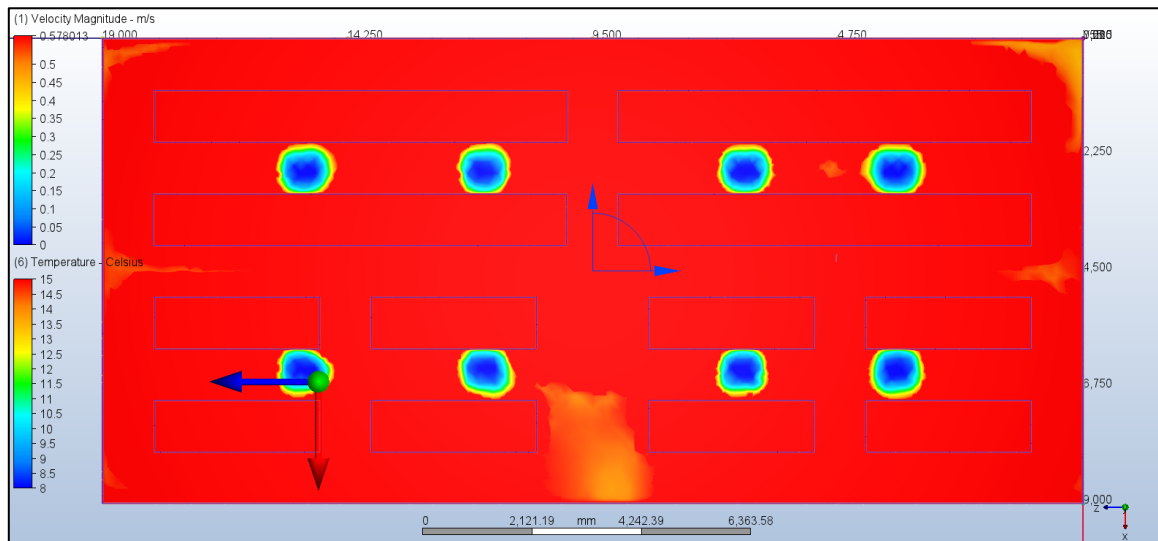
Επιπροσθέτως έχουν δημιουργηθεί και παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα οι ροϊκές γραμμές για μόρια αερίου τα οποία βρίσκονται στα σημεία εισόδου αέρα του χώρου, δηλαδή στο δάπεδο αυτού.



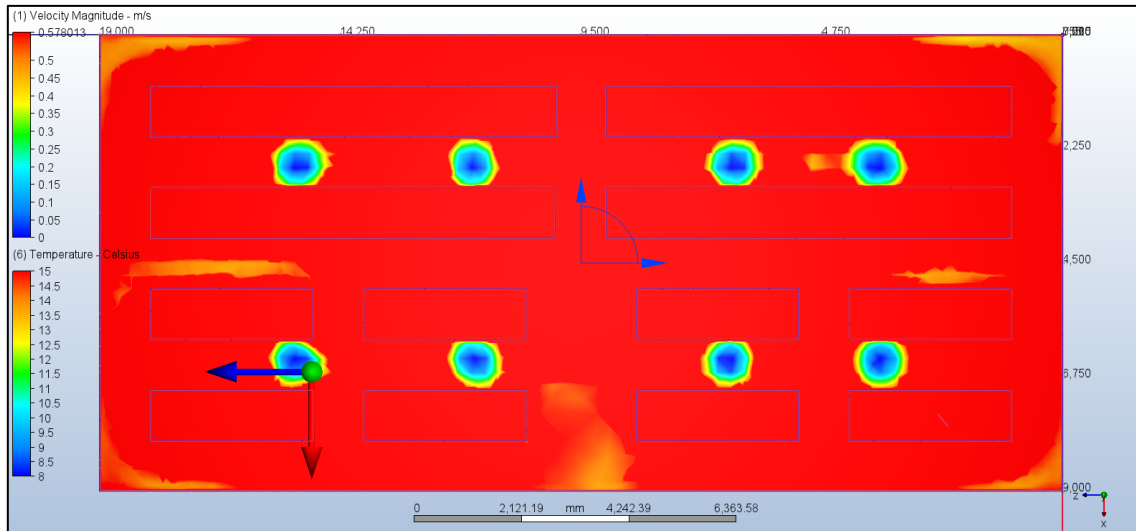
Σχήμα 4.35: Ροϊκές γραμμές μορίων του αέρα.

4.3.2 Ανάλυση Θερμικών φορτίων

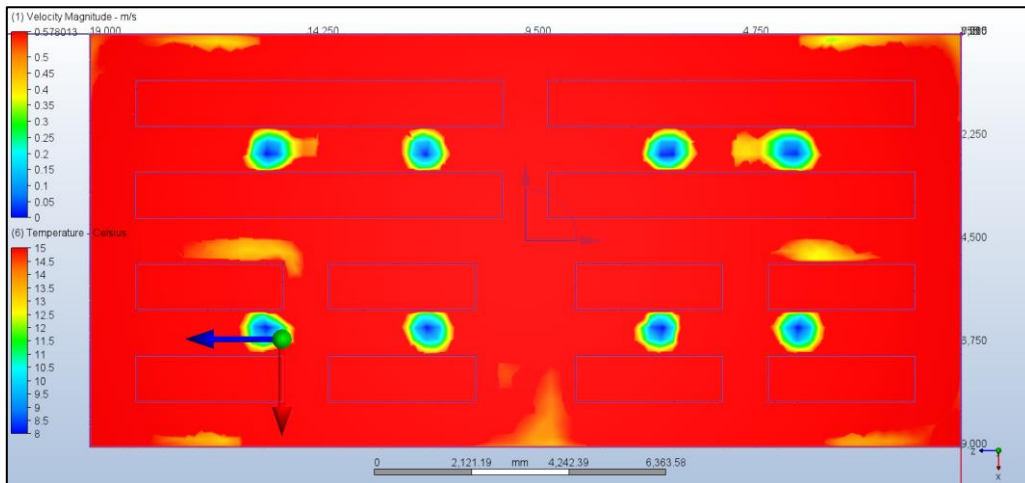
Στην υπό-παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν οι θερμοκρασιακές κατανομές για τα επίπεδα (γ^*) 0,20, 0,40, 0,60 και 0,70 αντίστοιχα. Για λόγους διευκόλυνσης ως προς την σύγκριση των αποτελεσμάτων, η κλίμακα της θερμοκρασίας έχει επιλεγεί να είναι η ίδια σε όλες τις περιπτώσεις.



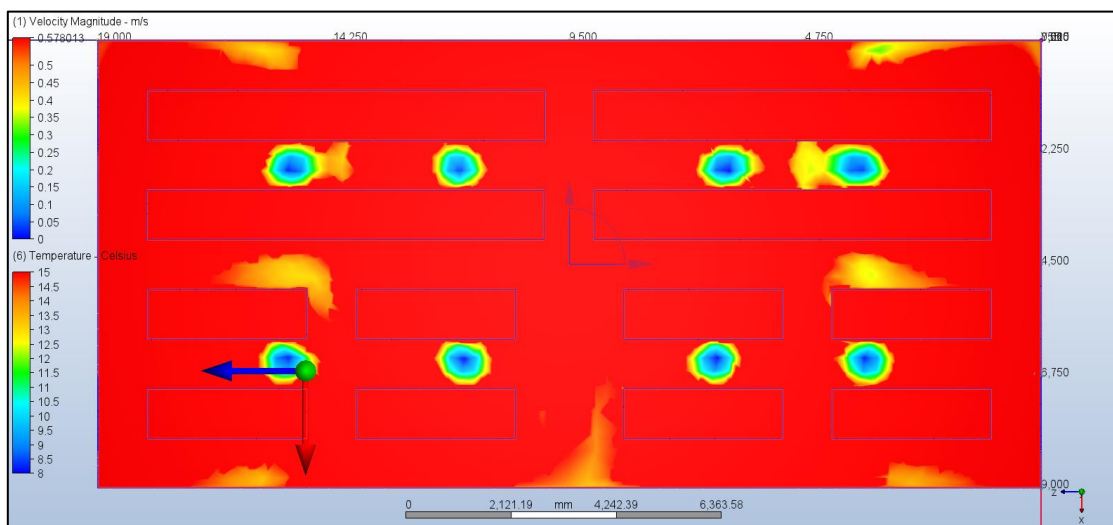
Σχήμα 4.36: Θερμοκρασιακή κατανομή στο επίπεδο $\gamma^*=0,20$.



Σχήμα 4.37: Θερμοκρασιακή κατανομή στο επίπεδο $\gamma^*=0,40$.



Σχήμα 4.38: Θερμοκρασιακή κατανομή στο επίπεδο $\gamma^*=0,60$.



Σχήμα 4.39: Θερμοκρασιακή κατανομή στο επίπεδο $\gamma^*=0,70$.

4.4 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό έγινε η παρουσίαση των αποτελεσμάτων για τις τρεις γεωμετρίες. Τα αποτελέσματα έχουν διαχωριστεί για την αποδοτικότερη αξιολόγησή τους σε δύο κατηγορίες και συγκεκριμένα σε εκείνα που αναφέρονται στην απεικόνιση του πεδίου ροής και σε εκείνα που απεικονίζουν την θερμοκρασιακή κατανομή. Η ανάλυση των εν λόγω αποτελεσμάτων ακολουθεί στο πέμπτο κεφάλαιο και τα συμπεράσματα αποδίδονται στο τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας.

5. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα των τριών διαφορετικών διατάξεων των οποίων η προσομοίωσή πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό Autodesk CFD 2024, και τα οποία παρουσιάστηκαν στο τέταρτο κεφάλαιο. Με το τρόπο αυτό μπορούμε να οδηγηθούμε πιο μεθοδικά σε βασικά συμπεράσματα και τελικώς να επιτευχθεί ο στόχος της εν λόγω εργασίας.

Το κεφάλαιο αυτό έχει υποδιαιρεθεί σε τρία μέρη προκειμένου στο κάθε ένα από αυτά να αναφερθούμε αναλυτικά. Η σύγκριση όλων αυτών αποτελεί αντικείμενο του έκτου κεφαλαίου.

5.1 Ανάλυση των αποτελεσμάτων της πρώτης γεωμετρίας

Η ανάλυση των επί μέρους σχημάτων όσον αφορά στην ανάλυση του πεδίου ροής του αέρα θα πραγματοποιηθεί με την ταυτόχρονη ανάλυση των σχημάτων 4.1 έως 4.9. Αυτό γίνεται γιατί η ανάλυση του πεδίου αποτελεί συνολικό αντικείμενο και σε καμία περίπτωση δεν θα μπορούσε να αξιολογηθεί μεμονωμένα δηλαδή να προκύψει κάποιο συμπέρασμα από μία τομή και μόνο του πεδίου την στιγμή που εξετάζεται τρισδιάστατη ροή.

Από το σχήμα 4.1 στο πρώτο διάδρομο φαίνεται ξεκάθαρα ότι η ροή στο κάθετο αυτό επίπεδο είναι κυρίως αλλά όχι ακριβώς παράλληλη με το πλαϊνό τοίχο του χώρου. Με δεδομένο ότι δίπλα στον τοίχο έχουμε τοποθετήσει τα μεγάλα μεγέθους Racks αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργείται μόνο ένα πέρασμα στο μέσο του τοίχου. Εκεί η ροή του αέρα φαίνεται να είναι σχεδόν κάθετη στο τοίχο και με κατεύθυνση να απομακρύνεται από αυτόν. Στο διάδρομο αυτό δεν υπάρχουν ούτε ανοίγματα εισόδου αλλά ούτε και εξόδου στους κάθετα δεξιά και αριστερά τοίχους. Στα μεγαλύτερο ύψος π.χ., μεγαλύτερο από εκείνο των Racks η ροή φαίνεται να έχει κατεύθυνση κάθετη προς τα επάνω και τάση να καλύψει από επάνω τα Racks. Στα πλάγια (μπρος και πίσω) φαίνεται η ροή να στρίβει και έχει την τάση να ακολουθήσει τα πλαϊνά τοιχώματα. Το μέτρο των διανυσμάτων σε γενικές γραμμές είναι χαμηλό το οποίο δηλώνει ότι οι ταχύτητες στον εν λόγω διάδρομο του αέρα είναι σχετικά χαμηλές.

Στο σχήμα 4.2, το προφίλ των ταχυτήτων του δεύτερου διαδρόμου παρουσιάζονται. Εδώ παρατηρούνται αρκετά διαφορετικά φαινόμενα καθώς βρίσκονται αρκετοί διαφορετικοί παράγοντες. Χαρακτηριστικό αυτού του κάθετου επιπέδου είναι οι υψηλές ταχύτητες ροής οι οποίες δημιουργούνται από τις οριακές συνθήκες εισόδου οι οποίες βρίσκονται στο δάπεδο με κατεύθυνση προς τα επάνω. Αυτή η ροή παρασέρνει διπλανά μόρια αέρα με αποτέλεσμα να δημιουργούνται οι ανακυκλοφορίες άλλοτε μεγαλύτερης ακτίνας και άλλοτε μικρότερης ανάλογα πάντα και με άλλες επιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε κοντινά/διπλανά σημεία του χώρου. Η ροή του αέρα η οποία εξέρχεται από την είσοδο του επιπέδου κάνει τα μόρια να κινηθούν προς τα επάνω και τελικά να φτάσουν σε ανώτερα ύψη του χώρου για να χτυπήσουν στο ταβάνι με σαφώς μικρότερη ταχύτητα. Εκεί παρατηρείται το φαινόμενο της πρόσκρουσης στο ταβάνι για να αλλάξουν κατεύθυνση και να κινηθούν πλέον οριζόντια και με τον τρόπο αυτό δημιουργείται μία δομή ροής γεωμετρίας ομπρέλας (σχήμα 4.8). Στο ίδιο σχήμα η ροή φαίνεται να επιταχύνει προς τα δεξιά και αριστερά στους πλαϊνούς (κάθετους) τοίχους αφού εκεί κοντά είναι και η συνθήκη

της εξόδου. Προφανώς, το προφίλ της ροής εδώ μπορεί να χαρακτηριστεί ιδιαίτερα σύνθετο αφού αυτά τα φαινόμενα που περιγράφονται παραπάνω συμβαίνουν ταυτόχρονα και σε σχετικά ευκρινή κλίμακα. Υπάρχουν και άλλα φαινόμενα τα οποία δεν είναι τόσο διαυγή αφού συμβαίνουν σε μικρότερη κλίμακα κινήσεις μορίων αέρα προς άλλες κατευθύνσεις οι οποίες μπορούν να εντοπιστούν αλλά σαφώς χαμηλότερης ευκρίνειας συνδυάζοντας τα προφίλ του σχήματος 4.2, 4.6, και 4.7. Η ροή φτάνοντας στα ανώτερα ύψη και περνώντας πάνω από τα Racks έχει την τάση να περάσει προς διπλανούς διαδρόμους όπως αποδεικνύεται από το σχήμα 4.8. Αλλά αυτό θα αναλυθεί παρακάτω.

Περνώντας στο τρίτο κάθετο προφίλ ταχυτήτων (τρίτος διάδρομος) του σχήματος 4.3, η κατανομή ταχυτήτων και εδώ μοιάζει περισσότερο με εκείνη του πρώτου διαδρόμου. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού δεν υπάρχει κάποια “πηγή” η οποία να επιταχύνει την ροή. Η μόνη διαφορά είναι ότι τώρα επειδή χρησιμοποιούνται Racks των μικρότερων διαστάσεων, υπάρχουν περισσότερα περάσματα για την ροή η οποία δημιουργεί περισσότερη τύρβη. Προχωρώντας προς τους πλαϊνούς τοίχους η ροή εξέρχεται από τον διάδρομο για να χτυπήσει με αρκετά χαμηλότερη ταχύτητα στους πλαϊνούς τοίχους και να αλλάξει κατεύθυνση είτε προς τα επάνω είτε προς δεξιά/αριστερά. Ένα άλλο φαινόμενο που παρατηρείται είναι ότι στα ανώτερα ύψη η ροή έχει χαμηλά διανύσματα ταχύτητας αλλά με κατεύθυνση προς τα κάτω. Η εξήγηση αυτού του φαινομένου γίνεται πάλι με αναφορά στο σχήμα 4.8.

Στο σχήμα 4.4 παρουσιάζεται το προφίλ των ταχυτήτων του κάθετου επιπέδου που διασχίζει τον τέταρτο διάδρομο. Το προφίλ αυτό παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με εκείνο του δεύτερου διαδρόμου αφού σε αυτούς τους δύο διαδρόμους έχουν τοποθετηθεί οι εισοδοί στο δάπεδο. Η ελάχιστες διαφορές που υπάρχουν μεταξύ των δύο ροών αποδίδονται στο γεγονός ότι στην δεύτερη περίπτωση έχουμε περισσότερα ανοίγματα αφού έχουν τοποθετηθεί μικρότερου μεγέθους Racks. Η ροή και εδώ είτε καταλήγει προς τα επάνω να χτυπάει στο ταβάνι, οπότε και αλλάζει κατεύθυνση, είτε χτυπάει στους πλαϊνούς τοίχους για να κινηθεί παράλληλα με αυτούς και να κινηθεί προς πλαϊνούς διαδρόμους.

Στο σχήμα 4.5 απεικονίζεται το προφίλ ταχυτήτων του τελευταίου διαδρόμου (5^{ος} διάδρομος). Και εδώ φαίνεται ότι η δυναμικότητα τα ροής έχει προέλθει από τον διπλανό διάδρομο για να κινηθεί προς τους πλαϊνούς τοίχους και να μετακινηθεί παράλληλα με αυτούς. Το γεγονός ότι έχουμε περισσότερα ανοίγματα αυτό δημιουργεί περαιτέρω διαρροή κινητικής ενέργειας από τον τέταρτο προς τον πέμπτο διάδρομο.

Στο σχήμα 4.8 απεικονίζεται το οριζόντιο προφίλ των ταχυτήτων σε μεγάλο ύψος (μεγαλύτερο από εκείνο των Racks). Εδώ η δομή της ροής έχει την μορφή πολλών “ομπρελών” αφού εδώ φαίνεται ξεκάθαρα το πέρασμα των ροών των μορίων του αέρα από την πάνω μεριά των Racks και έτσι αναμιγνύονται με άλλες ροές από διπλανούς διαδρόμους. Προφανώς, η ροές ανέρχονται στους διαδρόμους όπου έχουν τοποθετηθεί οι εισοδοί και κατέρχονται στους υπόλοιπους διαδρόμους. Αυτός άλλωστε είναι και ο στόχος σωστής σχεδίασης ενός datacenter, να δημιουργηθεί ροή ικανή να τραβήξει όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος του θερμικού φορτίου.

Στο σχήμα 4.9 παρουσιάζονται οι ροϊκές γραμμές των μορίων του αέρα τα οποία βρίσκονται στις εισόδους του χώρου.

Εδώ φαίνεται πως η ροή του ρευστού που εξέρχεται από κάθε είσοδο καλύπτει σχετικά μεγάλο μέρος του χώρου αφού διαχέεται προς αρκετές κατευθύνσεις.

Περνώντας στα αποτελέσματα κατανομής των θερμικών φορτίων, στο σχήμα 4.10 φαίνεται ότι οι θερμοκρασιακές τιμές είναι υψηλές στα Racks ενώ σε μεγάλες αποστάσεις οι θερμοκρασιακές τιμές μειώνονται. Στο επίπεδο για $\gamma^*=0,20$ φαίνεται ότι υπάρχει πολύ μικρή επίδραση στη μετάδοση θερμικών φορτίων μεταξύ των Racks. Αυτό αποδεικνύει ότι το σύστημα ψύξης αποδίδει σε αρκετά καλό βαθμό. Αυτό είναι και αναμενόμενο αφού τα μεγάλα μεγέθους Racks είναι τοποθετημένα όσο το δυνατόν πιο μακριά μεταξύ τους, για το λόγο αυτό η απαγωγή των παραγόμενων θερμικών φορτίων γίνεται αρκετά αποδοτικά. Στην πρώτη διάταξη φαίνεται ότι ο R1 επηρεάζει θερμικά τον R4 στο χαμηλό επίπεδο. Σε υψηλότερο επίπεδο υπάρχουν περαιτέρω απευθείας ανταλλαγές μικρών όμως θερμικών ποσών όπως R1 με R4, R2 με R5 καθώς και R8 με R11 και R9 με R12. Στο ανώτατο ύψος έχουμε ελαφρώς μεγαλύτερη ανταλλαγή όπως ο R1 με τον R3 και R4, ο R2 με τους R5 και R6 καθώς και ο R11 με τους R7 και R8 και ο R12 με τον R10.

5.2 Ανάλυση των αποτελεσμάτων της δεύτερης γεωμετρίας

Στο σχήμα 4.14 φαίνεται το προφίλ ταχυτήτων της δεύτερης διάταξης για το κάθετο επίπεδο του πρώτου διαδρόμου. Και εδώ η ροή παρουσιάζει παρόμοια βασικά χαρακτηριστικά όπως και στη πρώτη διάταξη. Η ροή φαίνεται ότι έχει κατεύθυνση προς τα κάτω ενώ όταν φτάνει στις άκρες ακολουθεί την διεύθυνση των πλαϊνών τοίχων.

Στο σχήμα 4.15 φαίνεται το προφίλ ταχυτήτων του δεύτερου διαδρόμου με έντονες ανακυκλοφορίες. Η ροή καταλήγει στο ταβάνι όπου χτυπάει και αλλάζει κατεύθυνση για να αναμιχθεί με τις άλλες ροές των διπλανών διαδρόμων. Οι ταχύτητες παρουσιάζουν ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές με εκείνες της πρώτης διάταξης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα κάποια φαινόμενα που περιεγράφηκαν στη πρώτη διάταξη να λαμβάνουν χώρα σε μεγαλύτερη κλίμακα.

Στο σχήμα 4.15 απεικονίζεται το προφίλ των ταχυτήτων για το τρίτο διάδρομο. Λόγω της απώλειας των εισόδων στο δάπεδο και εδώ η ροή είναι χαμηλότερης δυναμικότητας. Οι ταχύτητες δεν διαφέρουν και πολύ σε σχέση με της πρώτης διάταξης αν και εδώ υπάρχουν λιγότερα περάσματα/ανοίγματα.

Στο σχήμα 4.17 παρουσιάζεται το προφίλ ταχυτήτων σε κάθετο επίπεδο του τέταρτου διαδρόμου, όπου διαφαίνεται η σχετικά υψηλή παραγόμενη κινητική ενέργεια δημιουργώντας μεγάλης κλίμακας ανακυκλοφορίες.

Στο σχήμα 4.18 παρατηρείται η μετακίνηση από το κέντρο του χώρου προς τις άκρες αφού περάσει από το ανοιχτά διαστήματα μεταξύ των μικρού μεγέθους Racks.

Στο σχήμα 4.19 παρουσιάζεται μία οριζόντια δομή της ροής του αέρα σε χαμηλό ύψος. Εδώ φαίνεται ο αέρας να κινείται παράλληλα με το έδαφος σε τροχιές παράλληλες των κάθετων πλαϊνών τοιχίων. Το φαινόμενο εδώ είναι λίγο πιο έντονο από την πρώτη διάταξη αφού τα συγκεκριμένα ανοίγματα φαίνεται να επηρεάζουν θετικά την μετακίνηση του αέρα χωρίς να παρατηρούνται έντονα φαινόμενα μπλοκαρίσματος της ροής.

Στο σχήμα 4.20 παρουσιάζεται το προφίλ της ροής του αέρα μέσα στο χώρο σε οριζόντιο επίπεδο σε μεσαίο ύψος. Εδώ φαίνεται ξεκάθαρα η ροή του αέρα η οποία εκτελεί δύο επίπεδες ανακυκλοφορίες, οι οποίες λόγω της μη συμμετρικότητας δημιουργούνται φαινόμενα μπλοκαρίσματος της μίας ροής ως προς την άλλη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην μεταφέρονται τόσο αποδοτικά τα θερμικά φορτία μακριά από την πηγή δημιουργίας τους.

Όσον αφορά στη μεταφορά των θερμικών φορτίων, στην δεύτερη διάταξη παρατηρούνται έντονες θερμικές εναλλαγές όπως στο χαμηλό επίπεδο ο R1 με τον R4, ο R7 με τους R9 και R10 και ο R9 με τον R11. Σε υψηλότερο επίπεδο τα φαινόμενα αυτά παρατηρούνται πιο έντονα και συγκεκριμένα ο R1 με τους R3 και R4, ο R2 με τους R5 και R6, ο R7 με τους R9 και R10 και ο R8 με τους R11 και R12.

5.3 Ανάλυση των αποτελεσμάτων της τρίτης γεωμετρίας

Στο σχήμα 4.27 παρουσιάζεται το προφίλ ταχυτήτων για το πρώτο διάδρομο σε κάθετο επίπεδο. Η ροή του αέρα φαίνεται να έρχεται από τους πλάγιους κάθετους τοίχους και από επάνω και να κινείται προς τα κάτω, οπότε εδώ δημιουργείται δύο μεγάλες ανακυκλοφορίες. Στον δεύτερο διάδρομο όπως φαίνεται στο σχήμα 4.28 παρατηρείται έντονη κινητικότητα των μορίων του αέρα λόγω της ενέργειας που προσδίδεται από τα σημεία εισόδου στο δάπεδο. Στην περίπτωση αυτή και με δεδομένο ότι έχουμε ροή μεταξύ των μεγάλων Racks δεν υπάρχουν αρκετά περάσματα όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις. Για το λόγο αυτό η ροή είναι πιο συμπαγής. Στο σχήμα 4.29 το προφίλ της ροής έχει χαμηλή δυναμικότητα με δομές ελαφρώς διαφορετικές από εκείνες των προηγούμενων δύο περιπτώσεων.

Η δομή του προφίλ ταχυτήτων του σχήματος 4.30 αν και διαθέτει υψηλή δυναμικότητα δημιουργεί αρκετή αστάθεια στη ροή αφού στον κομμάτι εκείνο του χώρου έχουν τοποθετηθεί τα μικρότερου μεγέθους Racks. Στο προφίλ ταχυτήτων του τελευταίου διαδρόμου οι τιμές ταχυτήτων είναι χαμηλές. Και εδώ η ροή περνάει γύρω από τα Racks για να κινηθεί παράλληλα με τον τοίχο πριν φτάσει στις γωνίες και αναγκαστικά θα αλλάξει κατεύθυνση.

Σε επίπεδο μεταφοράς θερμικών φορτίων η τρίτη διάταξη φαίνεται ότι προκαλείται έντονο φαινόμενο θερμικής μεταφοράς και πλέον ή θα πρέπει να αυξήσουμε σημαντικά το ψυκτικό φορτίο ή θα πρέπει να αλλάξουμε συνολικά σχέδιο ψύξης.

6. Συμπεράσματα και Προτάσεις

Αυτή η ερευνητική εργασία επικεντρώθηκε στο εσωτερικό πεδίο ροής και τη μεταφορά θερμότητας των Data Centers. Η ανάλυση ενός τέτοιου προβλήματος είναι πολύ-παραγοντική διαχωρίζοντας σε δύο βασικές κατηγορίες. Πρόκειται για τους παράγοντες οι οποίοι είναι σχεδιαστικού χαρακτήρα και μπορούν να μελετηθούν και εκείνους που σχετίζονται με άλλα φαινόμενα όπως π.χ. περιβαλλοντικοί. Η εν λόγω ερευνητική εργασία έχει να κάνει με σχεδιαστικού τύπου παράγοντα και αφορά στο αποδοτικότερο σχεδιασμό τοποθέτησης των racks στο χώρο.

Από την υφιστάμενη βιβλιογραφία προκύπτει ότι οι περισσότεροι ερευνητές που αναλύουν παρόμοια θέματα δεν δίνουν βαρύτητα μεγάλη σε αυτό το παράγοντα δηλαδή του κατάλληλου σχεδιασμού της διαρρύθμισης. Ως εκ τούτου, η παρούσα ερευνητική εργασία αποτελεί μία ιδιαίτερη προσέγγιση επίλυσης του προβλήματος.

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα συμπεράσματα ενώ η εργασία ολοκληρώνεται με προτάσεις για περαιτέρω συνέχιση της έρευνας.

6.1 Γενικά συμπεράσματα

Η πραγματοποίηση της ερευνητικής εργασίας ανέδειξε ορισμένα ενδιαφέροντα αποτελέσματα σχετικά με τη ενεργειακή απόδοση και βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των Data centers. Η επιλογή της κατάλληλης διάταξης μπορεί να επιφέρει σημαντική μείωση του ενεργειακού κόστους ψύξης στα Data Centers.

Στην παρούσα ερευνητική εργασία, πραγματοποιήθηκαν τα απαιτούμενα runs τα οποία οδήγησαν αρχικά στον υπολογισμό του πεδίου ροής και εν συνεχεία στην ανάλυση εναλλαγών των θερμικών φορτίων ώστε να αποδοθούν οι θερμοκρασιακές κατανομές. Το σύνολο των αποτελεσμάτων συγκρίθηκε για συνολικά τρεις διαφορετικές διατάξεις των οποίων κύριο χαρακτηριστικό ήταν η διακύμανση των παραγόμενων θερμικών φορτίων στο χώρο.

Στις τρεις διαφορετικές γεωμετρίες που δημιουργήθηκαν, η πρώτη είχε το χαρακτηριστικό ότι τα μεγάλα παραγόμενα θερμικά φορτία τοποθετήθηκαν σχετικά σε μακρινές αποστάσεις. Στην δεύτερη διάταξη τα μεγάλα φορτία τοποθετήθηκαν πιο κοντά, ενώ στη τρίτη διάταξη τα εν λόγω φορτία τοποθετήθηκαν δίπλα.

Παρατηρήθηκε ότι στην πρώτη διάταξη υπάρχει ιδιαίτερα αποδοτική κάλυψη των θερμικών φορτίων.

Η δεύτερη διάταξη καλύπτει τις θερμικές απαιτήσεις αλλά με μικρότερο βαθμό απόδοσης

Η Τρίτη διάταξη κρίνεται μη επαρκής για την κάλυψη των θερμικών απαιτήσεων.

Η τοποθέτηση σε κοντινή απόσταση πηγών παραγωγής μεγάλων θερμικών φορτίων έχει σαν αποτέλεσμα την ευρύτερη αύξηση της θερμοκρασίας στον περιβάλλοντα χώρο.

Πιο συγκεκριμένα παρατηρήθηκε ότι στη πρώτη διάταξη η ροή αναπτύσσεται με χαμηλή θερμοκρασία για αυτό και έχουμε χαμηλότερες θερμοκρασίες ενώ φαίνεται ότι υπάρχει μεγάλος βαθμός διάχυσης στο χώρο.

Στη Τρίτη διάταξη η ψύξη η οποία βγαίνει σε σημεία όπου παράγονται υψηλά θερμικά φορτία έχει σαν αποτέλεσμα να εκμηδενίζει την παραγόμενη ψύξη και έτσι επί της ουσίας τα λειτουργικά σημεία από τα οποία παράγεται αποδοτικά η ψύξη στο χώρο να είναι πολύ λιγότερα. Στη δεύτερη διάταξη έχουμε μία μέση κατάσταση, αλλά και εκεί υπάρχει αισθητή διαφορά σε σχέση πάντα με την πρώτη διάταξη.

Είναι σημαντικό το πόσο κοντά είναι τοποθετημένες οι μεγάλες σειρές των Racks μεταξύ τους. Στη 3η περίπτωση επειδή είναι κοντά, παράγεται αυτόματα μεγάλο θερμικό τοπικό φορτίο που έχει σαν αποτέλεσμα να χαλάει την αποδοτική ροή του ψυκτικού φορτίου. Σε αυτό συντελεί και η θερμική περιοριστική τάση που δημιουργούν τα Racks στην είσοδο των ψυκτικών φορτίων. Στην πρώτη διάταξη οι χαμηλές θερμοκρασίες δηλώνουν ότι υπάρχει περιθώριο είτε να τοποθετηθούν επιπλέον μηχανήματα στο χώρο (εάν δεν υπάρχει άλλο θέμα όπως π.χ. ασφάλειας) είτε να μειωθεί η το ψυκτικό φορτίο αφού επί της ουσίας δεν απαιτείται το σύνολο της παραγόμενης ψύξης.

6.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Από την παρούσα ερευνητική εργασία, αποδεικνύεται ως βέλτιστη λύση εκείνη η οποία καλύπτοντας το σύνολο των ψυκτικών ενεργειακών αναγκών πετυχαίνεται η ελάχιστη δυνατή παραγωγή εκπομπών CO₂, κρατώντας πάντα το κόστος σε εύλογα επίπεδα, ενώ θα πρέπει διατηρούνται και οι συνθήκες βιωσιμότητας της επένδυσης.

Μία πρόταση για περαιτέρω έρευνα θα μπορούσε να αποτελέσει η επιλογή και άλλων διατάξεων των Racks, ώστε να επιτευχθούν συγκεκριμένοι στόχοι στο σχεδιασμό της ψύξης. Προφανώς, εάν δεν δημιουργούνται θερμικές γέφυρες μεταξύ των κουτιών των Racks θα μπορούσαν να τοποθετηθούν ακόμα πιο κοντά εξοικονομώντας περαιτέρω χώρο ώστε να τοποθετηθούν πρόσθετα κουτιά διακομιστών.

Μία άλλη πρόταση θα ήταν να πραγματοποιηθεί συνδυαστική ανάλυση, δηλαδή να μελετηθεί ταυτόχρονα και ο παράγοντας τόσο της ταχύτητας όσο και η κλίση/γωνία εισόδου στον χώρο. Με τον τρόπο αυτό αναμένεται να δημιουργηθούν τελείως διαφορετικές δομές του πεδίου ροής το οποίο αποτελεί βασικό παράγοντα στην ανάλυση της μεταφοράς των θερμικών φορτίων.

Στη διαμόρφωση του πεδίου ροής σημαντικό ρόλο παίζει και το ύψος του ταβανιού. Σε αυτή τη περίπτωση αναμένεται να αποτελέσει πεδίο ερευνητικό η τοποθέτησή του σε μεγαλύτερη ή μικρότερη απόσταση από το υψηλότερο σημείο των Racks.

Οι οριακές συνθήκες καθώς και τα σημεία στα οποία έχουν τοποθετηθεί μπορεί να αποτελέσει σημαντικό ερευνητικό πεδίο. Έτσι, στην παρούσα εργασία έχουν χρησιμοποιηθεί οκτώ επιδαπέδιες εισοδοί και τέσσερις θύρες εξόδου στους πλαϊνούς τοίχους. Αυτό που θα άξιζε να ερευνηθεί είναι κατά πόσο η εν λόγω οριακές συνθήκες θα μπορούσαν να επηρεάσουν σημαντικά το αποτέλεσμα της έρευνας. Επιπροσθέτως, θα μπορούσε ίσως να επιφέρει σημαντικές αλλαγές η τοποθέτηση περισσότερων σημείων εξόδου ή/και εισόδου στον υπολογιστικό χώρο?

Οι παραπάνω διατυπώσεις για περαιτέρω έρευνα είναι μόνο κάποιες από τις πολυάριθμες προτάσεις οι οποίες θα μπορούσαν να ερευνηθούν αφού όπως έχει τονιστεί σε προηγούμενη παράγραφο το πρόβλημα που αναφερόμαστε είναι πολυπαραγοντικό.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ASHRAE Standard 90.4-2016 – Energy Standard for Data Centers, <https://www.techstreet.com/ashrae/standards/ashrae-90-4-2016>
2. Jonathan G. Koomey, Growth in Data Center Electricity Use 2005 TO 2010 (Oakland, CA: Analytics Press, 2011), <http://analyticspress.com/datacenters.html>.
3. John M. Jordan, Information, Technology and Innovation: Resources for Growth in a Connected World (New York: Wiley, 2012).
4. W. V. Heddeghem et al., Trends in worldwide ICT electricity consumption from 2007 to 2012, *Comput. Commun.*, vol. 50, pp. 64–76, Sep. 2014
5. Top 10 energy-saving tips for a greener data center, Info-Tech Research Group, London, ON, Canada, Apr. 2010, http://static.infotech.com/downloads/samples/070411_premium_oo_greendc_top_10.pdf
6. Mukhar N., "HP Updates Data Center Transformation Solutions," Archived from the original on August 12, 2012. Retrieved September 9, 2011, August 17, 2011".
7. Forbes.com, "Sperling, Ed. "Next-Generation Data Centers," Forbes, March 15. 2010". Retrieved 2013-08-30.
8. "IDC white paper, sponsored by Seagate" (PDF).
9. Cloud Computing Brings Sprawling Centers, but Few Jobs". The New York Times. August 27, 2016. data center .. a giant .. facility .. 15 of these buildings, and six more .. under construction
10. Glanz J., "Power, Pollution and the Internet.", The New York Times, 2012.
11. Data centres & networks". IEA. Retrieved 2023-10-07.
12. Maysteel Industries, LLC, "Types of Data Centers - How do you Choose the Right Data Center?". Retrieved 2023-10-07.
13. Markoff J., "Microsoft Plumbs Ocean's Depths to Test Underwater Data Center.", New York Times, 2016.
14. Cellan J.R., "Microsoft's underwater data center resurfaces after two years", BBC News, 2020.
15. Bungler R., Donovan P., "Specifying Data Center IT Pod Architectures", White Paper 260, Revision 0, Schneider Electric – Data Center Science Center.

16. Rosendo D., Gomes D., Leoni G., Estacio Gonçalves G., “A methodology to assess the availability of next-generation data centers.”, *The Journal of Supercomputing* 75(11), 2019.
17. Tien-Fu Yanga, Yu-Chun Chena, Bo-Lin Chena, Chun-Han Lia, Wei-Mon Yana, «Numerical study of fluid flow and temperature distributions in a data center», *Case Studies in Thermal Engineering*, 28 (2021) 101405
18. Sundaralingam V., Arghode V.K., Joshi Y., “Experimental characterization of cold aisle containment for data centers.”, 29th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, San Jose, CA, 2013.
19. Arghode V.K., Sundaralingam V., Joshi Y., Phelps W., “Thermal characteristics of open and contained data center cold aisle.”, *J. Heat Tran.* 135, 061901, 2013.
20. Arghode V.K., Sundaralingam V., Joshi Y., Phelps W., “Experimental characterization of various cold aisle containment configurations for data centers.”, *J. Electron. Packag.* 137, 011007, 2014.
21. Erden H.S., Koz M., Yildirim M.T., Khalifa H.E., “Optimization of enclosed aisle data centers with induced CRAH bypass.”, *IEEE Trans. Compon. Packag. Technol.* 7, 1981–1989, 2017.
22. Erden H.S., Koz M., Yildirim M.T., Khalifa H.E., “Experimental demonstration and flow network model verification of induced CRAH bypass for cooling optimization of enclosed-aisle data centers.”, *IEEE Trans. Compon. Packag. Technol.* 7, 1795–1803, 2017.
23. Breen T.J., Walsh E.J., Punch J., Shah A.J., Bash C.E., Rubenstein B., Heath S., Kumari N., “From chip to cooling tower data center modeling: influence of air-stream containment on operating efficiency.”, *J. Electron. Packag.* 134, 041006, 2012.
24. Tatchell-Evans M., Kapur N., Summers J., Thompson H., Oldham D., “An experimental and theoretical investigation of the extent of bypass air within data centres employing aisle containment, and its impact on power consumption.”, *Appl. Energy* 186, 457–469, 2017.
25. Ghosh R., Sundaralingam V., Joshi Y., “Effect of rack server population on temperatures in data centers.”, *Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, San Diego, CA, USA, 2012.
26. Yuan X., Zhou X., Liu J., Wang Y., Xu X., “Experimental and numerical investigation of an airflow management system in data center with lower-side terminal baffles for servers.”, *Build. Environ.* 155, 308–319, 2019.
27. Fulpagare Y., Bhargav A., Joshi Y., “Dynamic thermal characterization of raised floor plenum data centers.”, *Experiments and CFD, Journal of Building Engineering* 25, 100783, 2019.
28. Zhang K., Zhang Y., Liu J., Niu X., “Recent advancements on thermal management and evaluation for data centers.”, *Alexandria Engineering Journal* 142, 215–231, 2018.

29. Nada S.A., Said M.A., Rady M.A., "CFD investigations of data centers' thermal performance for different configurations of CRACs units and aisles separation.", Alexandria Engineering Journal 55, 959–971, 2016.
30. Nada S.A., Said M.A., "Effect of CRAC units layout on thermal management of data center.", Appl. Therm. Eng. 117, 339–344, 2018.
31. Nada S.A., Attia A.M.A., Elfeky K.E., "Experimental study of solving thermal heterogeneity problem of data center servers.", Appl. Therm. Eng. 109, 466–474, 2016.
32. Nada S.A., Elfeky K.E., "Effects of servers racks location and power loading configurations on the thermal management of data centers racks array.", J. Therm. Sci. Eng. Appl. 9, 044501, 2017.
33. Nada S.A., Elfeky K.E., Attia A.M.A., Alshaer W.G., "Experimental parametric study of servers cooling management in data centers buildings.", Heat Mass Tran. 53, 2083–2097, 2017.
34. Han X., Tian W., VanGilder J., Zuo W., Faulkner C., "An open source fast fluid dynamics model for data center thermal management.", Energy Build. 230, 110599, 2021.
35. Nada X.S.A., Said M.A., "Comprehensive study on the effects of plenum depths on air flow and thermal managements in data centers.", Int. J. Therm. Sci. 122, 302–312, 2017.
36. Report to Congress on Server and Data Center Energy Efficiency, Public Law, 109-431, U.S. Environmental Protection Agency, ENERGY STAR Program August 2, 2007
37. Wang Y., Edmondson J., "Thermal Management for Data Centers 2023-2033: Technologies, Markets and Opportunities Air Cooling, Liquid Cooling, Direct-to-Chip/Cold Plate Cooling, Immersion Cooling, Single-Phase and Two-Phase Cooling, Coolant Distribution Units (CDU), Pumps, and Hyperscale Data Centers.", ISBN 9781915514721, 2023.
38. "Data Center Energy Consumption Trends". U.S. Department of Energy. Retrieved 2010-06-10
39. Koomey J., Belady C., Patterson M., Santos A., Lange K.D., "Assessing Trends Over Time in Performance, Costs, and Energy Use for Servers.", 2009.
40. "Report to Congress on Server and Data Center Energy Efficiency" (PDF). U.S. Environmental Protection Agency ENERGY STAR Program.
41. "Data Center Energy Forecast" (PDF). Silicon Valley Leadership Group. Archived from the original (PDF) on 2011-07-07. Retrieved 2010-06-10.
42. Bashroush R., Woods E., "Architectural Principles for Energy-Aware Internet-Scale Applications.", IEEE Software. 34 (3): 14–17, 2017.
43. Xu S., Zhang H., Wang Z., "Thermal Management and Energy Consumption in Air, Liquid, and Free Cooling Systems for Data Centers: A Review.", Energies , 16, 1279, 2023.

44. Zhang, K.; Zhang, Y.; Liu, J.; Niu, X., “Recent Advancements on Thermal Management and Evaluation for Data Centers.” Appl. Therm. Eng. 142, 215–231, 2018.
45. Zhang M., Zhang Z., Hu Y., Geng Y., Huang H., Huang Y., “Effect of Raised Floor Height on Different Arrangement of Under-Floor Air Distribution Performance in Data Center.”, Procedia Eng. 205, 556–564, 2017.
46. Wang I.N., Tsui Y.Y., Wang C.C., “Improvements of Airflow Distribution in a Container Data Center.”, Energy Procedia 75, 1819–1824, 2015.
47. Oró E., Garcia A., Salom J., “ Experimental and Numerical Analysis of the Air Management in a Data Centre in Spain.”, Energy Build. 116, 553–561, 2016.
48. Patankar S.V., “Airflow and Cooling in a Data Center.”, J. Heat Transfer. 132, 073001, 2010.
49. Schmidt R., Cruz E., “Cluster of High-Powered Racks Within a Raised-Floor Computer Data Center: Effect of Perforated Tile Flow Distribution on Rack Inlet Air Temperatures.”, J. Electron. Packag., 126, 510–518, 2004.
50. Dimensionless Parameters for Evaluation of Thermal Design and Performance of Large-Scale Data Centers. 2002. Available online: <https://www.docin.com/p-87101381.html> (accessed on 20 November 2022).
51. Fulpagare Y., Bhargav, “A. Advances in data center thermal management.”, Renew. Sustain. Energy Rev. 43, 981–996, 2015.
52. Larsson I.A.S, Lindmark E.M, Lundström T.S., Nathan, G.J., “Secondary Flow in Semi-Circular Ducts.”, J. Fluids Eng. 133, 2011.
53. Cruz E., Joshi Y., “Inviscid and Viscous Numerical Models Compared to Experimental Data in a Small Data Center Test Cell.”, J. Electron. Packag. 135, 2013.
54. <http://iet.jrc.ec.europa.eu/energyefficiency/ict-codes-conduct/data-centres-energy-efficiency>
55. <https://newatlas.com/fjord-cooled-data-center/20938/>
56. 42U, Solutions for the next generation data center. <https://www.42u.com/data-center-containment.htm>.
57. [source: <https://www.statista.com/statistics/1228433/data-centers-worldwide-by-country/>]
58. [source: <https://www.statista.com/statistics/878621/european-data-centers-by-country/>]
59. https://en.wikipedia.org/wiki/Data_center