



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

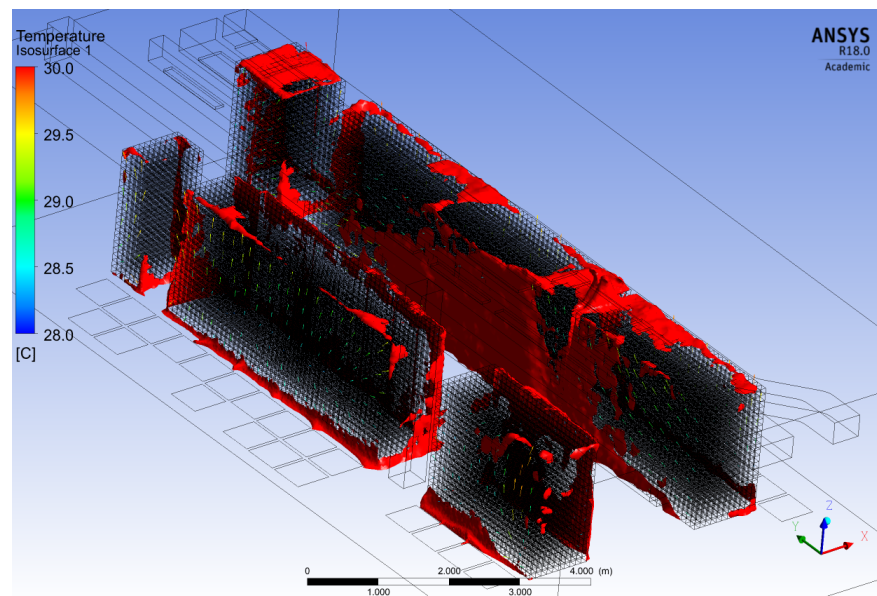
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Ρευστών - Εργαστήριο Τεχνολογικών Καινοτομιών Προστασίας Περιβάλλοντος

Διπλωματική εργασία:

Προσομοίωση διανομής κλιματιζόμενου αέρα σε μεγάλο υπολογιστικό κέντρο

Φουντούλης Β. Γιώργος



Επιβλέπων Καθηγητής: Μπούρης Δημήτριος

Αθήνα, Φεβρουάριος 2018

Abstract

The thesis investigates an implementation of Computational Fluid Dynamics approach in order to provide optimum cooling solutions for the IT equipment of a large operational Data Center in Greece. The work takes a systematic approach in order to model the Data Center's geometry, airflow, thermodynamics, and heat transfer characteristics. The thesis's method is to start a simplified model of a single Rack, with a small number of air flow tiles of cold air and one duct in order to get the data needed for the larger central area of the Data Center. The basic approach for the flow inside the rack is made through the concept that the rack is a porous media. Then the central area of the Data Center is modelled and a number of critical parameters for optimum cooling (temperature of the inlets' cold air, velocity of the inlets' cold air, rack's thermal distribution) is investigated.

The modelling solution was made using the ANSYS Fluent proprietary source code. Main target of the analysis is the computational model to be as close to the real conditions of the Data Center as possible, using the actual data of the geometry, power and cooling metrics and monitoring. The data of the fluid flow (velocities of inlet and outlet air and temperatures of inlet and outlet air) are collected with on-site measurements. The geometry of the model is produced making the as-build design plans 3-dimensional and the thermal loads are collected from the actual distribution electrical data.

The outcome of this work is the development of a tool that could be used for providing multiple insights through configurations, giving the engineers an assessment of the fluid flow, turbulence and heat transfer phenomena. The computational methods is a modern technique for optimum cooling and analyzing the "hot spots" phenomena that is useful both for the operations and maintenance management and the design/redesign of a Data Center. This strategy compared to the usual conventional techniques of trial and error engineering shows superior performance taking into consideration a holistic approach of the power and cooling related to Data Center infrastructure. So it could be a step towards the thermally-aware, energy efficient and cooling optimized Data Center.

Περίληψη

Η εργασία αυτή μελετά την εφαρμογή μεθόδων υπολογιστικής ρευστομηχανικής έτσι ώστε να πετύχει την προσομοίωση της διανομής κλιματιζόμενου αέρα σε μεγάλο, εν λειτουργία Υπολογιστικό Κέντρο, εφεξής “Data Center”. Στην εργασία εφαρμόζεται μια συστηματική προσέγγιση προκειμένου να μοντελοποιηθεί η γεωμετρία, η ροή του αέρα κλιματισμού και οι παράμετροι θερμοδυναμικής και μεταφοράς θερμότητας. Η μέθοδος που ακολουθήθηκε ήταν η εκκίνηση από ένα απλοποιημένο μοντέλο που περιλαμβάνει μια μόνο καμπίνα φιλοξενίας ηλεκτρονικού εξοπλισμού, εφεξής “Rack”, ένα περιορισμένο αριθμό στομίων εισόδου ψυχρού αέρα και στομίων απαγωγής αέρα, ώστε τα δεδομένα αυτά να χρησιμοποιηθούν στην μοντελοποίηση της μεγαλύτερης κεντρικής περιοχής του Data Center. Η βασική αρχή για την προσέγγιση των φαινομένων ροής και μεταφοράς θερμότητας διαμέσου των Racks, είναι αυτή που μοντελοποιεί τα Racks σαν πορώδη μέσα. Ακολούθως γίνεται μοντελοποίηση της κεντρικής περιοχής του Data Center και διερευνάται η επίδραση μια σειράς βασικών παραμέτρων για τη αποτελεσματικότητα της ψύξης στο χώρο του Data Center (όπως η θερμοκρασία εισόδου του ψυχρού αέρα ψύξης, η ταχύτητα εισόδου του αέρα ψύξης, η διανομή των θερμικών φορτίων στο χώρο από τα Racks).

Η επίλυση των εξισώσεων που διέπουν το μοντέλο έγινε με χρήση του κώδικα της ANSYS FLUENT. Προκειμένου να επιτευχθεί εγγύτητα με τις συνθήκες του χώρου του Data Center, αποκτήθηκαν τα δεδομένα των αρχικών συνθηκών με μετρήσεις στο χώρο για τα χαρακτηριστικά της ροής (θερμοκρασία εισόδου/εξόδου στομίων και ταχύτητα εισόδου/εξόδου στομίων). Επίσης τα στοιχεία της γεωμετρίας του χώρου έχουν εισαχθεί με την τρισδιάστατη απεικόνιση των σχεδίων του Data Center ενώ και η εισαγωγή των θερμικών φορτίων επίσης έγινε σύμφωνα με τα δεδομένα λειτουργίας από τον πίνακα της διανομής των καταναλώσεων.

Η επιδίωξη αυτής της εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός μοντέλου που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί, παρέχοντας πολλαπλές οπτικές ενός Data Center, ώστε να γίνεται αρτιότερα η ρύθμιση των παραμέτρων της λειτουργίας του, μέσω της αναπαράστασης και της κατανόησης των φαινομένων της ροής του πεδίου και της μεταφοράς θερμότητας. Οι μέθοδοι υπολογιστικής ρευστομηχανικής αποτελούν ένα σύγχρονο εργαλείο για την επίτευξη τεχνικών βέλτιστης ψύξης, και βοηθούν τους μηχανικούς τόσο κατά τον σχεδιασμό ενός Data Center, όσο και κατά τη λειτουργία του. Οι μέθοδοι αυτές πλεονεκτούν έναντι της συμβατικής τεχνικής «της δοκιμής και του λάθους» που συχνά εφαρμόζουν οι μηχανικοί εξασφαλίζοντας μια ολιστική θεώρηση της ψύξης και της κατανάλωσης ισχύος των Data Centers. Ελπίζουμε με την προσπάθεια αυτή, ότι συμβάλλουμε σε μια κατεύθυνση προς ενεργειακά αποδοτικότερα Data Centers με βέλτιστη ψύξη, μικρότερο κόστος και περιβαλλοντικό αποτύπωμα, καθώς αυτά εξυπηρετούν ολοένα και πιο αυξημένες ανάγκες της κοινωνίας.

Πρόλογος

Κατά την τελευταία δεκαετία, τα Υπολογιστικά Κέντρα, ή αλλιώς Data Centers, διαδραματίζουν ένα αυξανόμενο κεντρικό ρόλο στην ανάπτυξη δύο παράλληλων περιοχών τεχνολογίας παγκόσμιου κοινωνικού ενδιαφέροντος: Την ανάπτυξη του διαδικτύου, των εφαρμογών και υπηρεσιών του αλλά και των τηλεπικοινωνιών. Ο όρος Data Centers χρησιμοποιείται για να περιγράψει μεγάλες εγκαταστάσεις οι οποίες παρέχουν κάθε υποδομή απαραίτητη ώστε να εξασφαλίζεται η απρόσκοπτη λειτουργία εξοπλισμού υπολογιστών, αποθήκευσης δεδομένων και τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού (IT εξοπλισμός). Οι μεγάλες αυτές εγκαταστάσεις απαιτούν για την λειτουργία τους κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στην κλίμακα ακόμα και μερικών MW, τα οποία μετατρέπονται από τον εξοπλισμό IT σε θερμική ενέργεια. Η απαίτηση για τη διατήρηση της λειτουργικότητας και αξιοπιστίας των Data Centers δια μέσου των οποίων λειτουργούν εφαρμογές στην τραπεζική, στο ηλεκτρονικό εμπόριο, στην εμπορική, στις τηλεπικοινωνίες και αλλού είναι που κάνει τόσο μεγάλη τη σπουδαιότητα για παροχή αδιάλειπτης και ποιοτικής παροχής ηλεκτρικής ισχύος και ψύξης. Με την έννοια αυτή τα Data Centers είναι εγκαταστάσεις κρίσιμων εφαρμογών (mission critical facilities). Στα πλαίσια αυτά η διαχείριση των θερμικών φορτίων είναι ζωτικής σημασίας για την σωστή λειτουργία τους, ήδη από τον σχεδιασμό τέτοιων εγκαταστάσεων αλλά και κατά τη λειτουργία τους.

Με τη διαχείριση των θερμικών φορτίων κατά το βέλτιστο τρόπο, μέσω της μελέτης διανομής του αέρα καταπιάνεται η παρούσα εργασία. Καθώς οι υπολογιστικές δυνατότητες αυξάνουν, αυξάνουν αντίστοιχα και οι εκπομπές θερμότητας διαμέσου του ηλεκτρονικού εξοπλισμού οδηγώντας σε μια αύξηση εκπομπής θερμότητας ανά κριώμα φιλοξενίας υπολογιστικού εξοπλισμού (Rack Cabinet) από λίγα KW έως και 20 KW. Με βάση την πρόκληση για αποτελεσματική ψύξη, με χαμηλό ενεργειακό αποτύπωμα, αναπτύχθηκαν πολλές τεχνολογίες και τέτοια είναι και η εφαρμογή μεθόδων Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής για την αποτύπωση των μεγεθών και των παραγόντων της ψύξης. Έτσι η εργασία αυτή κάνει χρήση των παραπάνω μεθόδων σε ένα μεγάλο Υπολογιστικό Κέντρο σε λειτουργία, ώστε να κατανοηθούν τα ποικίλα και αλληλοεξαρτώμενα φαινόμενα της μηχανικής των ρευστών και των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας ώστε να βελτιστοποιηθεί η διανομή του ψυχρού αέρα και να μειωθεί το ενεργειακό αποτύπωμα της εγκατάστασης, χωρίς να αυτό να σημαίνει μείωση της αποτελεσματικότητας και αξιοπιστίας της ψύξης.

Η εργασία αυτή αποτυπώνει τη γεωμετρία και τις συνθήκες λειτουργίας ενός μεγάλου και εν λειτουργία Data Center στη Ελλάδα, και επιχειρεί να εξετάσει τους παράγοντες της διανομής του αέρα για την ψύξη του, με χρήση του εμπορικού κώδικα της ANSYS FLUENT. Προσπαθεί έτσι, με τη χρήση μεθόδων υπολογιστικής ρευστομηχανικής να κατανοήσει τα φαινόμενα στο πεδίο ροής και να επιλύσει πιθανές δυσλειτουργίες του.

Η γεωμετρία του πεδίου ροής έγινε με αποτύπωση στις τρεις διαστάσεις των σχεδίων as-built” του χώρου. Η αποτύπωση των συνθηκών λειτουργίας –οριακών συνθηκών- του πεδίου ροής έγινε με επιτόπου μετρήσεις με χρήση κατάλληλου εξοπλισμού μετρήσεων. Οι μετρήσεις αφορούν στην θερμοκρασία και στην ταχύτητα του αέρα ψύξης στην είσοδό του στο χώρο

(επιδαπέδια στόμια) και στην έξοδο αυτού (στόμιο απαγωγής αέρα). Στη συνέχεια γίνεται η μοντελοποίηση του πεδίου ροής με την θεώρηση των Racks, σαν πορώδη μέσα διαμέσου των οποίων διέρχεται ο αέρας ψύξης. Ο αέρας διέρχεται διαμέσου των Racks καθώς τοποθετείται η συνθήκη ανεμιστήρων αναρρόφησης εντός των Racks. Τα racks αποτελούν παράλληλα πηγές θερμότητας και συναλλάσσουν μέσω συναγωγής θερμότητα με τον αέρα ψύξης.

Αρχικά καταρτίζεται απλοποιημένο μοντέλο με ένα Rack, με περιορισμένο αριθμό στομιών εισόδου του ψυχρού αέρα (τρία στόμια εισόδου) και έναν αεραγωγό με έξι στόμια απαγωγής. Στη συνέχεια τα αποτελέσματα αυτής της απλοποιημένης μοντελοποίησης χρησιμοποιούνται στο μοντέλο που αφορά στην κεντρική περιοχή του Data Center. Αυτή είναι η πλέον πυκνή σε σχέση με τον αριθμό των Racks (30 Racks), ενώ για την απαγωγή του θερμού αέρα υπάρχουν τρεις αεραγωγοί. Στο μοντέλο αυτό επιχειρείται παραμετροποίηση με μεταβλητές τις κρίσιμες μεταβλητές της ψύξης του χώρου: την θερμοκρασία εισόδου του αέρα ψύξης, την παροχή του, την διανομή του θερμικού φορτίου που εκπέμπεται από τα Racks. Τα αποτελέσματα αυτής της παραμετροποίησης συγκρίνονται με το βασικό μοντέλο (base case model). Τα αποτελέσματα της σύγκρισης παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

Με την παρούσα εργασία φαίνεται καλύτερα ότι το διαδίκτυο και οι εφαρμογές του, αν και θεωρείται «άυλο», εντούτοις έχει αρκετές «υλικές» και αυστηρές προϋποθέσεις και προδιαγραφές για την ασφαλή λειτουργία του.

Ελπίζουμε ότι η εργασία αυτή θα φανεί ενδιαφέρουσα για τους ερευνητές και τους μηχανικούς που ασχολούνται με την λειτουργία και τον σχεδιασμό της θερμικής διαχείρισης του ηλεκτρονικού εξοπλισμού, τους διαχειριστές αντίστοιχων εγκαταστάσεων Data Center, τους σχεδιαστές αυτών και τους μηχανικούς.

Τέλος την εργασία αυτή συνοδεύουν τα ηλεκτρονικά αρχεία του μοντέλου του ANSYS Fluent τα οποία στοιχειοθετούν τα μοντέλα που μελετήθηκαν.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο καθηγητή Δημήτριο Μπούρη για την βοήθειά του, τις συστάσεις του, τις οδηγίες και κατευθύνσεις, για την επιστημονική υποστήριξή του σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Ακόμα ευχαριστώ τον κύριο Γιώργο Παντελίδη, μηχανολόγο μηχανικό ενεργειακών εφαρμογών, λειτουργίας και συντήρησης Data Center, για την καθοδήγηση, την παροχή δεδομένων από το χώρο μελέτης και τις εύστοχες παρατηρήσεις του.

Ακόμα οι ευχαριστίες μας πηγαινούν στον κύριο Κωνσταντίνο Αρβανίτη και στην κυρία Βασιλική Παπά, υποψήφιους διδάκτορες του τομέα Ρευστών, στο Εργαστήριο Τεχνολογικών Καινοτομιών Προστασίας Περιβάλλοντος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για τις επιστημονικές επισημάνσεις τους και την γενικότερη βοήθεια. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Δρ. Χριστόδουλο Φραγκουδάκη, βοηθό διευθυντή στο Κέντρο Δικτύων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την υποστήριξή του στην αδειοδότηση των λογισμικών που χρησιμοποιούνται στην εργασία.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή και βασικές έννοιες.....	9
1.1 Εισαγωγή στην διαχείριση ενέργειας και θερμικών φορτίων στα Data Centers.....	9
1.2 Ορισμός για τα Υπολογιστικά Κέντρα (Data Centers).....	10
1.3 Κατανάλωση ενέργειας και Data Centers.....	10
1.4 Η αυξητική τάση στην πυκνότητα ηλεκτρονικού εξοπλισμού και των θερμικών του φορτίων.....	11
1.5 Οι καλύτερες πρακτικές στην ενεργειακή διαχείριση Data Center.....	13
1.6 Η ροή ισχύος σε ένα Data Center.....	14
1.7 Οι κατευθυντήριες γραμμές για τις συνθήκες περιβάλλοντος που επικρατούν στα Data Centers.....	15
1.8 Οι προστάθειες της βιομηχανίας των Data Center για ενεργειακή εξοικονόμηση.....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Οι βασικές έννοιες γύρω από την διαχείριση του αέρα ψύξης σε Data Centers...	20
Εισαγωγή.....	20
2.1 Ιστορική αναδρομή.....	20
2.2 Ο στόχος της διαχείρισης θερμικών φορτίων.....	22
2.3 Επισκόπηση της διανομής αέρα ψύξης σε Data Center.....	22
2.4 Θεμελιώδεις πλευρές και παράγοντες που επηρεάζουν την διανομή του αέρα σε Data Center.....	25
2.4.1 Οι νόμοι για τους ανεμιστήρες προσαγωγής αέρα.....	27
2.4.2 Η επίδραση του ύψους της οροφής του χώρου.....	29
2.4.3 Η επίδραση της διαμόρφωσης διαμερισμάτων θερμού-ψυχρού (Hot-Cold Containments).....	29
2.4.4 Η επίδραση της άνωσης.....	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : Η ενεργειακή κατανάλωση σε Data Center, παρακολούθηση και δείκτες λειτουργίας.....	31
Εισαγωγή.....	31
3.1 Η κατανομή της ηλεκτρικής ενέργειας σε Data Center.....	31
3.2 Η παρακολούθηση δεδομένων σε ένα Data Center.....	32
3.3 Δείκτες ενέργειας και ψύξης σε Data Center.....	34
3.4 Οι δείκτες απόδοσης σε ένα Data Center.....	35
3.5 Μετρήσεις και δεδομένα σε ένα Data Center.....	37
3.5.1 Μετρήσεις και παρακολούθηση του συστήματος ψύξης.....	37
3.5.2 Μετρήσεις και παρακολούθηση της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του αέρα.....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Η αριθμητική μοντελοποίηση του Data Center της εργασίας.....	39
4.1 Εισαγωγή.....	39
4.2 Μοντελοποίηση με τη χρήση εργαλείων υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD Modelling).....	40
4.3 Σύνοψη βιβλιογραφικής έρευνας γύρω από την επίλυση προβλημάτων πεδίου ροής σε Data Centers με τη χρήση μεθόδων υπολογιστικής ρευστομηχανικής.....	43
4.4 Μοντελοποίηση με τη χρήση μεθόδων υπολογιστικής ρευστομηχανικής και το πρόγραμμα ANSYS.....	44
4.5 Οι βασικές εξισώσεις.....	44
4.6 Για την τύρβη και την μοντελοποίησή της.....	45
4.7 Η σύγκλιση της υπολογιστικής διαδικασίας.....	47
4.8 Μοντελοποίηση με θεώρηση του rack σαν πορώδες μέσο.....	48
4.8.1 Ο νόμος του Darcy.....	49
4.8.2 Ο συντελεστής αδράνειας και ιξώδους στο πορώδες μέσο.....	50
4.8.3 Η θεώρηση του Rack σαν πορώδες μέσο και το ANSYS.....	51

4.8.4 Οι εξισώσεις της ορμής για το πορώδες μέσο.....	52
4.9 Φαινόμενα μεταφορά θερμότητας σε ηλεκτρονικές συσκευές.....	52
4.9.1 Συναγωγή.....	53
4.9.2 Η επίλυση της εξίσωσης ενέργειας σε πορώδη μέσα στο ANSYS FLUENT.....	54
4.9.3 Η πραγματική αγωγιμότητα (effective conductivity) του πορώδους μέσου.....	55
4.9.4 Μοντέλα μειωμένης τάξης ή “compact” μοντέλα.....	55
4.9.5 Ο συντελεστής συναγωγής θερμότητας.....	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : Μετρήσεις και δεδομένα εισαγωγής στο μοντέλο.....	60
5.1 Βασικά στοιχεία για το μοντέλο.....	60
5.2 Στοιχεία της γεωμετρίας του χώρου.....	61
5.3 Το υπολογιστικό πλέγμα του μοντέλου.....	63
5.3.1 Μελέτη της επίδρασης του υπολογιστικού πλέγματος.....	64
5.4 Στοιχεία της ενεργειακής κατανάλωσης στο Data Center.....	70
5.5 Στοιχεία του ανεμιστήρα απαγωγής αέρα σε rack.....	71
5.6 Η μελέτη της πτώσης πίεσης σε πορώδη μέσα.....	73
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : Αποτελέσματα και συμπεράσματα.....	76
6.1 Ανάλυση μοντέλου ενός Rack και ενός αεραγωγού.....	76
6.1.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων στο επίπεδο ανάλυσης ενός Rack και ενός αεραγωγού απαγωγής αέρα.....	77
Πεδίο ταχυτήτων: κάτοψη-όψη-εμπρόσθια όψη.....	82
6.1.2 Παραμετρική ανάλυση επίδραση της τιμής του πορώδους και της τιμής της θερμικής αγωγιμότητας.....	85
6.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων στην κεντρική περιοχή του Data Center.....	90
6.2.1 Αρχικό μοντέλο – base Case model.....	90
Γενικά.....	90
Πεδίο ταχυτήτων.....	97
Συμπεράσματα:.....	102
6.2.2 Μοντέλο για την επίδραση της θερμοκρασίας εισόδου του ψυχρού αέρα.....	104
Συμπεράσματα:.....	109
6.2.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων στην κεντρική περιοχή του Data Center:.....	111
Η επίδραση της παροχής του ψυχρού αέρα. Η περίπτωση της μείωσης παροχής.....	111
Πεδίο θερμοκρασιών.....	112
Συμπεράσματα:.....	114
6.2.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων στην κεντρική περιοχή του Data Center:.....	115
Η επίδραση της διανομής των θερμικών φορτίων του Data Center. Η περίπτωση της ανομοιόμορφης κατανομής της ίδιας συνολικής ποσότητας θερμικού φορτίου.....	115
Συμπεράσματα.....	119
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Συμπεράσματα.....	120
7.1 Συζήτηση και τελικά συμπεράσματα.....	120
7.2 Πρακτικές προτάσεις και μέτρα εφαρμογής για εξοικονόμηση και καλή λειτουργία στο Data Center.....	121
7.3 Μελλοντική έρευνα και εμβάθυνση.....	122
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Βιβλιογραφία.....	125

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή και βασικές έννοιες

1.1 Εισαγωγή στην διαχείριση ενέργειας και θερμικών φορτίων στα Data Centers

Τα Data Centers αποτελούν εγκαταστάσεις υποδομών που φιλοξενούν και αναλαμβάνουν να υποστηρίξουν εξοπλισμό υπολογιστών και πληροφορικής (ή αλλιώς IT εξοπλισμό -IT: Information and Technology infrastructure). Ο εξοπλισμός αυτός χρησιμοποιείται προκειμένου να επεξεργάζεται, να αποθηκεύεται και να μεταδίδεται μεγάλος όγκος ψηφιακών δεδομένων. Ο εν λόγω εξοπλισμός είναι τοποθετημένος μέσα σε ειδικές «καμπίνες», καθορισμένων και τυποποιημένων διαστάσεων, τα λεγόμενα Racks. Οι εγκαταστάσεις των Data Centers συμπεριλαμβάνουν, πέρα από τον παραπάνω εξοπλισμό και εγκαταστάσεις για τον μετασχηματισμό ισχύος (υποσταθμοί Μέσης και Χαμηλής Τάσης και διατάξεις αδιάλειπτης παροχής ισχύος - “UPS”), αλλά και ηλεκτροπαραγωγές διατάξεις για να διατηρούν τη δυνατότητα αυτόνομης παροχής ηλεκτρικής ισχύος. Ακόμα οι εγκαταστάσεις των Data Centers περιλαμβάνουν εξοπλισμό παροχής ψυκτικής ικανότητας, καθώς είναι σημαντικό για την καλή λειτουργία των εγκαταστάσεων η λειτουργία του ηλεκτρονικού εξοπλισμού, να πραγματοποιείται υπό αυστηρά καθορισμένες και σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας. Μια γενική εικόνα μιας τυπικής εγκατάστασης Data Center φαίνεται παρακάτω:

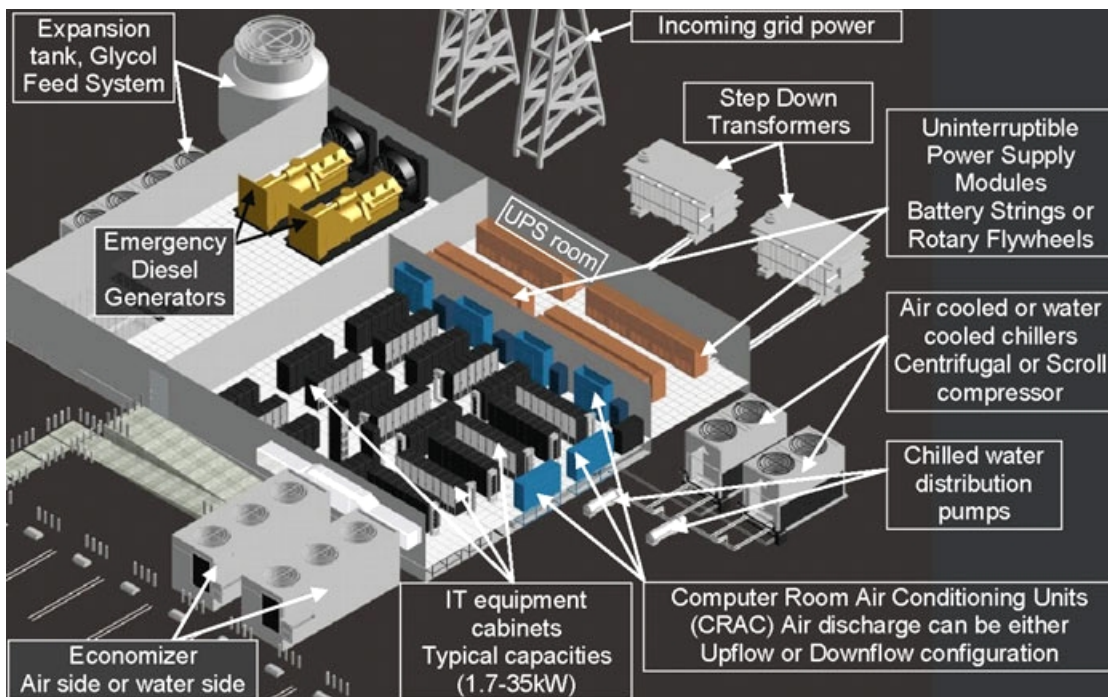


Figure 1.1 Γενική εικόνα εγκατάστασης ενός Data Center [1]

1.2 Ορισμός για τα Υπολογιστικά Κέντρα (Data Centers)

Καθώς ο όρος Data Center έχει διαφορετικές ερμηνείες από πολλές πλευρές και στην προσπάθεια να γίνει διάκριση από παραπλήσιους όρους, η Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (EPA: Environmental Protection Agency of the USA), προσδιόρισε τα Data Centers ως εξής [2]:

- είναι πρωταρχικά οι υποδομές και ο εξοπλισμός εκείνος που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία δεδομένων και την λειτουργία εφαρμογών λογισμικού (servers), για την αποθήκευση δεδομένων (δίσκοι αποθήκευσης) και για τις τηλεπικοινωνίες, ο οποίος λειτουργώντας συνδυαστικά πραγματοποιεί την επεξεργασία, αποθήκευση αλλά και μετάδοση των ψηφιακών δεδομένων
- είναι ο εξοπλισμός και οι υποδομές υποστήριξης για την μετατροπή και παροχή αξιόπιστης και ποιοτικής ηλεκτρικής ισχύος αλλά και ο εξοπλισμός που στόχο έχει να διατηρεί κατάλληλες συνθήκες περιβάλλοντος (θερμοκρασία και υγρασία). Οι παραπάνω συνθήκες είναι απαραίτητες για την καλή λειτουργία του ηλεκτρονικού και τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού των Data Center, καθώς αυτά αποτελούν χώρους ύψιστης σημασίας.

1.3 Κατανάλωση ενέργειας και Data Centers

Η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώθηκε το 2010 για την παγκόσμια λειτουργία των Data Centers υπολογίζεται μεταξύ του 1.1% και 1.5% της ολικής κατανάλωσης ενέργειας[1]. Βέβαια στις δυτικές χώρες το ποσοστό αυτό είναι μεγαλύτερο και ειδικά στις ΗΠΑ υπολογίζεται μεταξύ του 1.7% και 2.2% της ολικής κατανάλωσης της χώρας. Έρευνες που γίνονται από ινστιτούτα όπως το IDC IVIEW κάνουν την ακόλουθη πρόβλεψη ενδεικτική για την μελλοντική κατανάλωση ενέργειας που θα αφορά στα ψηφιακά δεδομένα: «Μέσα στην επόμενη δεκαετία ο αριθμός των servers (εικονικών και πραγματικών) αναμένεται να αυξηθεί κατά 10 φορές, ενώ η ποσότητα της πληροφορίας που θα διαχειρίζονται τα Data αναμένεται να αυξηθεί κατά 50 φορές» [1].

Ως προς την ποσότητα της πληροφορίας που διακινείται υπολογίζεται ότι το 2011, 1.8 Zettabytes δεδομένων παράχθηκαν και μεταδόθηκαν, ενώ το 2015 ο αριθμός αυτός υπολογίζεται σε 7.9 Zettabytes, πληροφορία που αναλογεί σε 18 βιβλιοθήκες του Κογκρέσου των ΗΠΑ [1].

1.4 Η αυξητική τάση στην πυκνότητα ηλεκτρονικού εξοπλισμού και των θερμικών του φορτίων

Είναι γεγονός ότι η ηλεκτρική ισχύς που παρέχεται για την λειτουργία του IT εξοπλισμού, μετασηματίζεται ολοκληρωτικά στην εκπομπή θερμότητας ή οποία και πρέπει να απαχθεί από το περιβάλλον λειτουργίας του εξοπλισμού. Η δυσκολία που χαρακτηρίζει την παρούσα εργασία είναι ότι η κλίμακα στην οποία λαμβάνουν χώρα τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας εκτείνεται από τα λίγα νανομέτρα των μικροτσιπ των υπολογιστικών μονάδων επεξεργασίας, έως τα δεκάδες ή και εκατοντάδες μέτρα που μπορεί να καλύπτει μια εγκατάσταση Data Center. Εξαιτίας αυτής της μεγάλης κλίμακας, ιστορικά η απαγωγή θερμότητας από ηλεκτρονικές συσκευές, όπως οι servers και τα racks, αποτελούσε αρμοδιότητα μηχανικών που ασχολούνταν με την παραγωγή τέτοιων συσκευών, ενώ οι διαχείριση των θερμικών φορτίων χώρων Data Center αποτελεί αρμοδιότητα μηχανολόγων μηχανικών με εξειδίκευση τον κλιματισμό και την ψύξη. Τα τελευταία χρόνια, λόγω των αλληλένδετων φαινομένων, υπάρχει η τάση για μια πιο ολιστική προσέγγιση κατά όλη την κλίμακα των φαινομένων.

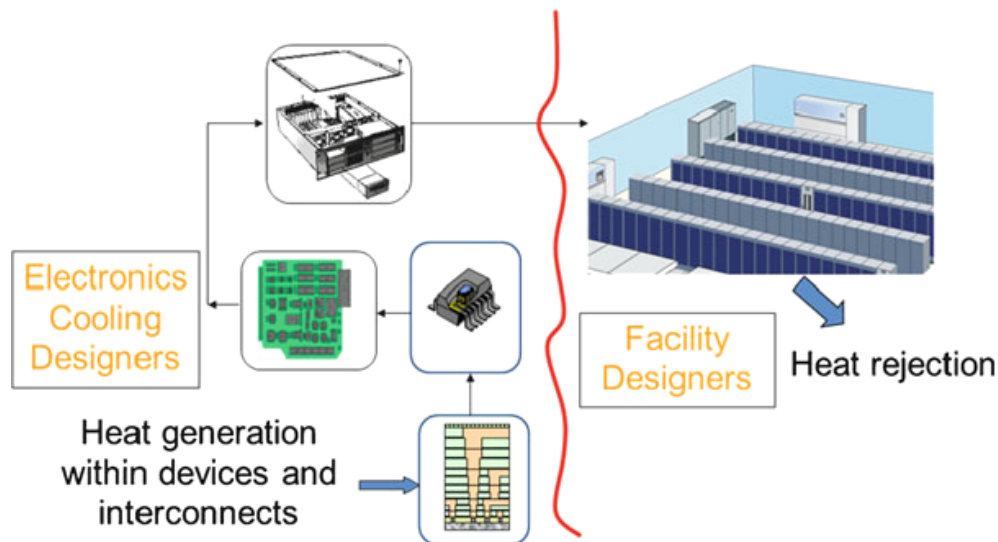


Figure 1.2: Η παραγωγή θερμότητας από την κλίμακα των νανομέτρων μέχρι την κλίμακα των μέτρων [1]

Μια δεύτερη παράμετρος, πλέον της ευρείας κλίμακας στην οποία εξελίσσονται τα φαινόμενα μεταφοράς, είναι η διαρκώς αυξητική τάση στο μέγεθος των θερμικών φορτίων που εκπέμπεται ανά ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Το γεγονός αυτό συνοδεύει την διαρκώς αυξητική τάση στην πυκνότητα του ηλεκτρονικού εξοπλισμού, ο οποίος παράγει τα αυξημένα θερμικά φορτία. Αυτή τάση απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα:

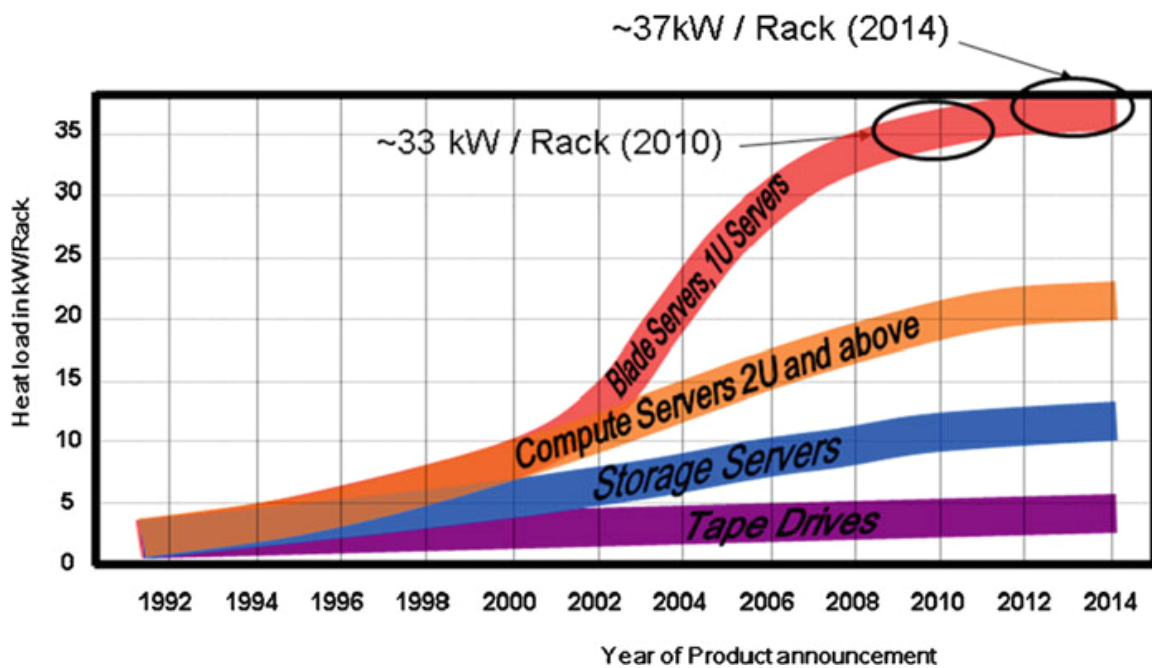


Figure 1.3: Η Αυξητική τάση στην εκπομπή θερμότητας ανά Rack [1]

Η μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας σε ένα Data Center, αποδίδεται στους μικροεπεξεργαστές των εξυπηρετητών (servers), αν και άλλες διατάξεις hardware, όπως η μνήμη και οι δίσκοι αποθήκευσης επίσης καταναλώνουν ενέργεια. Η μετάβαση που γίνεται, στα μέσα της δεκαετίας του ογδόντα από την τεχνολογία των δισθενών της σιλικόνης, στα ημιαγωγούς μεταλλικών οξειδίων, είναι αυτή που πυροδοτεί την ραγδαία ανάπτυξη των μικροεπεξεργαστών. Η τάση, κατά τη διάρκειά της δεκαετίας του 90 και του 2000, ήταν η αύξηση της ισχύος των μικροεπεξεργαστών, με την ενσωμάτωση ολοένα και περισσότερων κυκλωμάτων ανά chip, σε επιφάνειας του 1*1 cm. Σήμερα η αυξητική αυτή τάση συνεχίζεται με την παραγωγή μικροεπεξεργαστών 45 nm, που ενσωματώνουν 1 δισ. τρανζίστορ ανά ένα chip [1]. Οι εξελίξεις αυτές επικυρώνουν τον νόμο του Moore, ο οποίος προέβλεψε τον διπλασιασμό της απόδοσης ενός μικροεπεξεργαστή κάθε 18-24 μήνες.

Για να δείξουμε τα παραπάνω με νούμερα, πρέπει να σημειωθεί ότι το 2002 ένας υπέρ-υπολογιστής 3.7 Terra-flop, που τότε ήταν στη λίστα με τα είκοσι πλέον ισχυρά υπολογιστικά μηχανήματα στον κόσμο, κατανάλωνε 125 KW ηλεκτρικής ισχύος. Αποτελούνταν από 25 Racks, γεγονός που αναλογεί στο μέγεθος 5 KW ανά Rack. Το 2008 ένας τέτοιος υπολογιστής 3.7 Terra-flop φιλοξενούνταν σε ένα Rack, που καταναλώνει ισχύς 21 KW. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι τετραπλασιάστηκαν σε έξι χρόνια τα θερμικά φορτία ανά Rack [1]. Την ίδια ώρα οι ανάγκες στην υπολογιστική ισχύ αυξάνονταν εξίσου, πράγμα που τελικά ορίζει και την πρόκληση της διαχείρισης των θερμικών φορτίων που συνεχώς μεγαλώνουν ανά Rack.

1.5 Οι καλύτερες πρακτικές στην ενεργειακή διαχείριση Data Center

Μια πληθώρα από οργανισμούς, ερευνητικά κέντρα και φορείς έχουν καταρτίσει σειρά από πρακτικές, κατευθύνσεις και οδηγίες με στόχο την καλύτερη ενεργειακή διαχείριση των Data Centers. Ένας τέτοιος οργανισμός είναι η ASHRAE (American Society for Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers). Η ASHRAE έχει εκδώσει μια σειρά οδηγιών για πολλές από τις πλευρές της λειτουργίας των Data Center με στόχο τις καλύτερες πρακτικές για την διαχείριση αυτών των εγκαταστάσεων. Ενδεικτικά αναφέρουμε την έκδοση για τον σχεδιασμό των Data Center ([14]-Design Considerations for Datacom Equipment Centers), την έκδοση για το θερμικό περιβάλλον λειτουργίας των Data Center ([15] Thermal Guidelines for Data Processing Environmental), την έκδοση για τις καλές πρακτικές με στόχο την ενεργειακή εξοικονόμηση ([16] Best Practices for Datacom Facility Energy Efficiency), την έκδοση για τα θερμικά φορτία και την ψύξη στα Data Centers ([17]-Datacom Equipment Power Trends and Cooling Applications). Οι οδηγίες αυτές αποτελούν ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο ορθών πρακτικών για μια πληθώρα ζητημάτων γύρω από την λειτουργία, την ενεργειακή απόδοση και τον σχεδιασμό των Data Centers.

Το ινστιτούτο Uptime, το οποίο απαρτίζεται από έναν αριθμό εταιρειών με αντικείμενο τον χώρο των Data Centers, επίσης εκδίδει κατευθύνσεις για την λειτουργία των εγκαταστάσεων με αποδοτικό και αξιόπιστο τρόπο. Ακόμα το ινστιτούτο αυτό καθορίζει και πιστοποιεί την ποιοτική κατάταξη των Data Centers στις κατηγορίες Tier I, II, III και IV. Από αυτή την κατάταξη απορρέουν και οι κατευθύνσεις, οι οδηγίες και οι απαιτήσεις προκειμένου κάποιο Data Center να πάρει κάποια από τις παραπάνω κατατάξεις και πιστοποιήσεις. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι υπάρχουν απαιτήσεις ,αναλόγως της κατάταξης, για το προσωπικό (την διαθεσιμότητα του και τις ικανότητές του), το πρόγραμμα της προληπτικής και διορθωτικής του συντήρησης, τις πολιτικές που διέπουν την λειτουργία του, την εκπαίδευση του προσωπικού, τα θέματα ασφαλείας, το ποσοστό παύσης της λειτουργίας (Downtime), την τεχνολογία της ψύξης του Data Centers και πολλά άλλα[18], [19].

Τέλος συνεισφέρουν στον προσδιορισμό καλών πρακτικών οργανισμοί και forum όπως το Green Grid, το Data Center Dynamics, το Data Center World και άλλοι. Τέτοιοι οργανισμοί αποτελούν ένα σημείο συνάντησης της βιομηχανίας των Data Centers, ερευνητικών ινστιτούτων και ρυθμιστικών φορέων, που από κοινού καθορίζουν το πλαίσιο λειτουργίας αλλά και προδιαγράφουν τις μελλοντικές τάσεις σε αυτό τον χώρο.

1.6 Η ροή ισχύος σε ένα Data Center

Προκειμένου να κατανοήσουμε την κατανάλωση ενέργειας σε ένα Data Center, παραθέτουμε το παρακάτω διάγραμμα από μια τυπική εγκατάσταση Data Center, με τις διάφορες καταναλώσεις ισχύος σε αυτό. Η ηλεκτρική ισχύς από το δίκτυο, διέρχεται από τον υποσταθμό Μέσης Τάσης και των διατάξεων αυτής. Σε περίπτωση διακοπής παροχής ηλεκτρικής ισχύς από το δίκτυο υπάρχει η

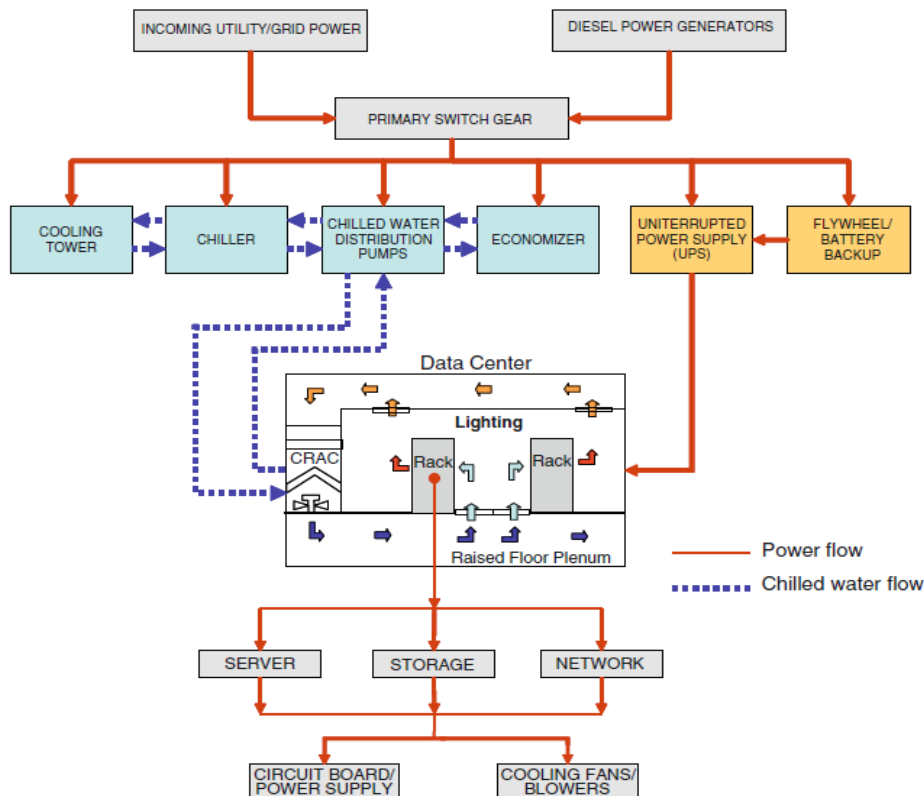


Figure 1.4: Η ροή ισχύος σε μια εγκατάσταση Data Center [2]

δυνατότητα αυτόνομης ηλεκτροπαραγωγής μέσω ηλεκτρογεννητριών πετρελαίου. Από εκεί η ισχύς διέρχεται από τα συστήματα αδιάλειπτης παροχής ενέργειας (UPS : Uninterrupted Power System). Τα μηχανήματα της ψύξης του χώρου, (αναγράφονται στη βιβλιογραφία ως CRAC: Computer Room Air Conditioning units) συνήθως ηλεκτροδοτούνται διαμέσου των συστημάτων αδιάλειπτης παροχής ενέργειας - UPS, καθώς είναι απαραίτητη η λειτουργία τους και σε περίπτωση διακοπής της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο. Στις σύγχρονες εγκαταστάσεις όλο το σύστημα ψύξης έχει δυνατότητα λειτουργίας σε περίπτωση διακοπής της ηλεκτροδότησης από το δημόσιο δίκτυο, καθώς σε αντίθετη περίπτωση μπορεί να συμβούν δυσλειτουργίες στο Data Center μη – αναστρέψιμες και κοστοβόρες. Στο διάγραμμα ροής ισχύος φαίνονται και οι κύριοι καταναλωτές ενέργειας σε μια τέτοια εγκατάσταση.

1.7 Οι κατευθυντήριες γραμμές για τις συνθήκες περιβάλλοντος που επικρατούν στα Data Centers

Οι κατευθυντήριες γραμμές για τα Data Centers που ψύχονται με αέρα, έχουν εκδοθεί από την επιτροπή TC 9.9 της ASHRAE και καθορίζουν τα επίπεδα της θερμοκρασίας ξηρού βολβού και υγρασίας στα οποία θα πρέπει να λειτουργεί ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός. Αυτές οι περιοχές λειτουργίας φαίνονται στον παρακάτω ψυχομετρικό χάρτη και χαρακτηρίζονται ως «επιτρεπόμενες» και οι «συνιστώμενες» περιοχές λειτουργίας. Οι οδηγίες αυτές της ASHRAE εκδόθηκαν αρχικά το 2004 και είχαν μια προφανή επίδραση στον τρόπο λειτουργίας των Data Centers. Οι οδηγίες του 2004 καθόρισαν τις περιοχές A1 και A2 του παρακάτω ψυχομετρικού χάρτη, σαν την «συνιστώμενη» και «επιτρεπόμενη» περιοχή λειτουργίας αντιστοίχως. Η «συνιστώμενη» περιοχή στον ψυχομετρικό χάρτη είναι αυτή που ορίζει την συνθήκες για την αξιόπιστη και ασφαλή λειτουργία του IT εξοπλισμού και σε αυτή η θερμοκρασία ξηρού βολβού, του αέρα ψύξης εισόδου στους servers κυμαίνεται από 18 έως 27 °C. Η «επιτρεπόμενη» περιοχή ορίζεται σαν η περιοχή όπου επιτρέπεται η λειτουργία του εξοπλισμού κατά τη διάρκεια χρονικών περιόδων κατά τις οποίες είναι εγγυημένη η ασφαλής λειτουργία.

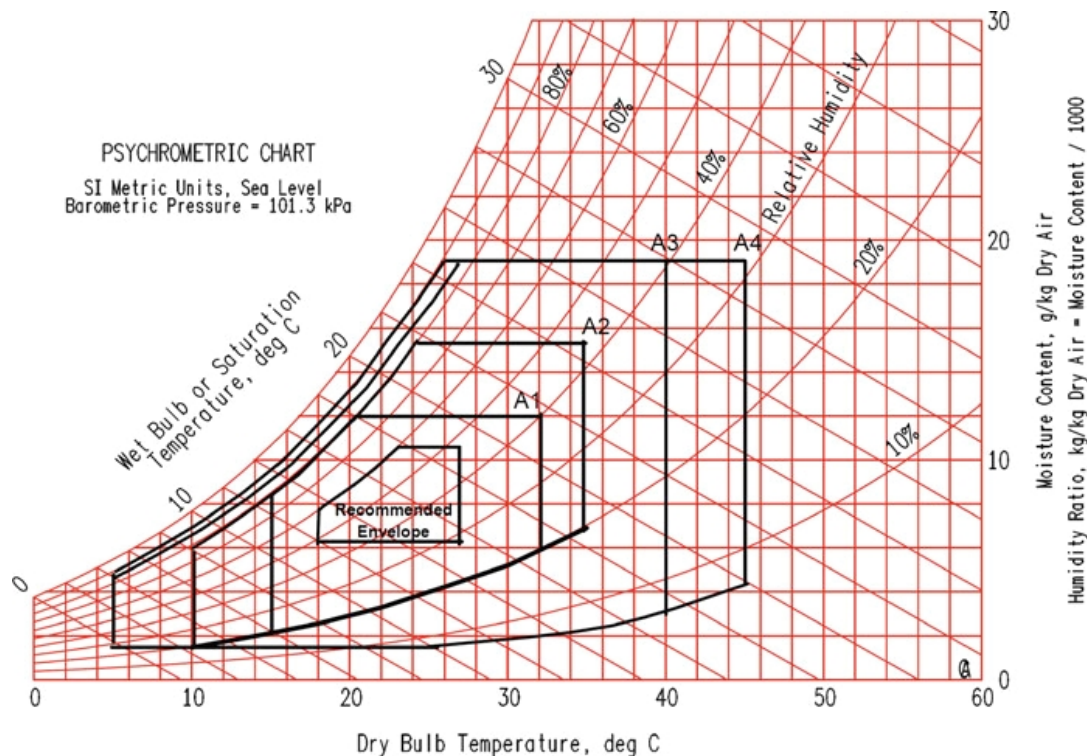


Figure 1.5: Ο ψυχομετρικός χάρτης με τις επιτρεπόμενες και συνιστώμενες περιοχές λειτουργίας ενός Data Center [15 – ASHRAE: Thermal Guidelines for Datacom Environment]

Ωστόσο το 2011 η ASHRAE ανανέωσε τις οδηγίες για τις συνθήκες περιβάλλοντος που μπορούν να λειτουργούν τα Data Center, διευρύνοντας την επιτρεπόμενη περιοχή παραμέτρων λειτουργίας A1 και εισάγοντας τις περιοχές λειτουργίας A3 και A4. Η λογική για αυτή την

διεύρυνση συνίσταται στην προσπάθεια για ενεργειακή εξοικονόμηση ως προς την ψύξη καθώς και στην λειτουργία και υιοθέτηση τεχνικών, όπως είναι η ελεύθερη ψύξη. Οι κλάσεις A3 και A4 χρησιμεύουν ώστε ορισμένες κατηγορίες IT εξοπλισμού να μπορούν να λειτουργούν σε ένα μεγαλύτερο εύρος περιβαλλοντικών συνθηκών, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι υποχρεώνεται κάθε εξοπλισμός IT να λειτουργεί υπό αυτές τις συνθήκες. Άλλωστε αυτή η απαίτηση θα οδηγούσε σε αυξημένο αρχικό ολικό κόστος για την προμήθεια αυτού του εξοπλισμού. Στην κλάση βλέπουμε ότι υπάρχει ένα εύρος λειτουργίας σε θερμοκρασία ξηρού βολβού από 4 έως και 45 °C.

Ως προς τα όρια της σχετικής υγρασίας του «συνιστώμενου» φακέλου αυτή κυμαίνεται από περίπου 30% στο χαμηλό όριο έως 60% στο υψηλό όριο. Η θέσπιση του άνω ορίου υγρασίας έχει το νόημα ότι πέρα από αυτό ευνοούνται στα ολοκληρωμένα κυκλώματα τα φαινόμενα βραχυκυκλωμάτων. Επίσης στην περιοχή αυτή γίνονται βλάβες στα μέσα αποθήκευσης. Από την άλλη το κάτω όριο τοποθετείται με την επιδίωξη να αυξάνονται οι ώρες χωρίς βλάβες, λόγω του ότι κάτω από το κάτω όριο ευνοούνται τα φαινόμενα ηλεκτροστατικών εκκενώσεων (ESD – Electrostatic Discharge) τα οποία συμβαίνουν ευκολότερα σε ξηρό αέρα. Επίσης η ύγρανση του αέρα είναι μια κοστοβόρα μεν, αλλά απαραίτητη επεξεργασία του αέρα της ψύξης.

Σε σχέση με την λειτουργία σε κάθε μια από τις κλάσεις συνθηκών περιβάλλοντος του ψυχομετρικού χάρτη, να σημειώσουμε ότι η κλάση των «συνιστώμενων» δεν σημαίνει ότι αυτά είναι τα απόλυτα όρια λειτουργίας του αέρα εισόδου στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Αναλόγως της κλάσης του ηλεκτρονικού εξοπλισμού αλλά και αναλόγως των λειτουργικών και τεχνικών αναγκών του χρήστη του Data Center, η «συνιστώμενη» περιοχή λειτουργία πρέπει να ιδωθεί σαν το σημείο σχεδιασμού της εγκατάστασης. Επιπλέον κάποιοι από τους κατασκευαστές IT εξοπλισμού συνιστούν για τα μηχανήματά τους μια μεγαλύτερη περιοχή λειτουργίας, εκτός των προδιαγραφών της ASHRAE. Βέβαια είναι σαφές ότι η λειτουργία μέσα στην «συνιστώμενη» περιοχή της ASHRAE δεν εξασφαλίζει την βέλτιστη ενεργειακή εξοικονόμηση στην λειτουργία του Data Center. Από την άλλη έχουν γίνει έρευνες που λένε ότι όταν η θερμοκρασία του αέρα εισόδου στον εξοπλισμό ξεπεράσει ένα άνω όριο, τότε έχουμε τελικά όχι εξοικονόμηση λόγω της μειωμένης απαίτησης για ψύξη του αέρα αυτού, αλλά αντίθετα έχουμε μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Το γεγονός αυτό συμβαίνει γιατί προκειμένου τα μηχανήματα να ανταποκριθούν στο πιο θερμό αέρα ψύξης, αυξάνουν την κατανάλωσή τους καθώς λειτουργούν σε υψηλές ταχύτητες οι ενσωματωμένες πτερωτές ψύξης που βρίσκονται στα chip, σε servers ή ακόμα και στα racks. Η ASHRAE ενσωμάτωσε αυτές τις έρευνες και το 2011 οι κατευθυντήριες οδηγίες της συνιστούν ότι μια αύξηση του εισερχόμενου αέρα ψύξης στον server από τους 15 στους 35 °C μπορεί να καταλήξει σε αύξηση της κατανάλωσης του IT εξοπλισμού από 7 έως 20%. Επιπλέον οι αυξημένες ταχύτητες περιστροφής των πτερωτών ψύξης οδηγούν σε υψηλά επίπεδα θορύβου στους χώρους, καθώς εμπειρική σχέση λέει πως τα επίπεδα θορύβου είναι ανάλογα της πέμπτης δύναμης της ταχύτητας περιστροφής των πτερωτών ψύξης.

1.8 Οι προσπάθειες της βιομηχανίας των Data Center για ενεργειακή εξοικονόμηση

Οι πρώτοι που ασχολούνται με την ενεργειακή βέλτιστη απόδοση του Ηλεκτρονικού εξοπλισμού, είναι οι ίδιες οι εταιρείες που σχεδιάζουν, κατασκευάζουν και προμηθεύουν τέτοιο εξοπλισμό. Οι servers βασίζουν την λειτουργία τους σε μικροεπεξεργαστές που κατασκευάζονται από εταιρείες σαν την Intel, την AMD και την IBM. Με τη σειρά τους άλλες εταιρείες αναλαμβάνουν, να κατασκευάσουν servers, βασιζόμενες σε αυτούς τους μικροεπεξεργαστές, όπως η Hewlett-Packard, η Dell και η Sun και άλλες. Όλες οι παραπάνω πλευρές εργάζονται προκειμένου να επιτύχουν αυξημένη ενεργειακή εξοικονόμηση, παρακολούθηση και έλεγχο των παραμέτρων της ψύξης προκειμένου να βελτιώσουν τα προϊόντα τους.

Η Hewlett-Packard σχημάτισε την τεχνολογία δυναμικής διαχείρισης θερμικών φορτίων (DTM: Dynamic Thermal Management), η οποία υπόσχεται την προσαρμογή της δραστηριότητας του επεξεργαστή ανάλογα με τα σήματα, κατάλληλα προσαρμοσμένων αισθητήρων θερμοκρασίας. Η καταναλισκόμενη ενέργεια στην περίπτωση αυτή είναι αντιστρόφως ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα εισόδου στο χώρο της εγκατάστασης και της θερμοκρασίας εξόδου από το εν λόγω ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Η δυναμική συμπεριφορά ηλεκτρονικού εξοπλισμού σε σχέση με τα θερμικά φορτία εξακολουθεί να είναι μια ενεργή περιοχή έρευνας.

Η IBM έχει αναπτύξει έναν εναλλάκτη υγρής-ψύξης (liquid cooling) στην πίσω πλευρά του server, οποίος απάγει τα θερμικά φορτία του αέρα ψύξης, πριν αυτός εισέλθει στον χώρο του θερμού διαμερίσματος του χώρου του Data Center. Έχει αναπτύξει τεχνολογία παρακολούθησης με χρήση αισθητήρων καθώς και διάφορα εργαλεία λογισμικού για ενεργειακή εξοικονόμηση.

Αντίστοιχα η Intel έχει πραγματοποιήσει προσπάθειες βελτίωσης της θερμικής συμπεριφοράς των μικροεπεξεργαστών της. Έχει καταλήξει σε συμπεράσματα που αναφέρουν ότι η μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος ανά m² εξασφαλίζει μεγαλύτερη εξοικονόμηση. Το όριο πάνω από το οποίο είναι περισσότερο συμφέρον για την αποδοτική λειτουργία ενός Data Center είναι τα 10 Kw/m². Επίσης η intel συνιστά τη χρήση εργαλείων υπολογιστικής ρευστομηχανικής για την βελτίωση της ροής του αέρα ψύξης.

Τέλος μια σειρά μεγάλων επιχειρήσεων όπως η Schneider Electric, η Oracle, η Fujitsu και άλλες ερευνούν το πεδίο της αρχιτεκτονικής των υπολογιστικών διατάξεων ώστε να εξελίσσονται στον τομέα της δυναμικής διαχείρισης των θερμικών φορτίων. Αυτές οι προσπάθειες αναμένεται να επηρεάσουν όλο το φάσμα των ηλεκτρονικών συσκευών από τα κινητά τηλέφωνα έως τους servers των Data Centers. Οι εταιρείες παροχής ηλεκτρονικών υπηρεσιών που κυριαρχούν παγκοσμίως όπως η Microsoft, η Google και άλλες διαθέτουν τεράστιες ιδιόκτητες εγκαταστάσεις Data Center και επίσης καταβάλουν μεγάλες προσπάθειες ώστε να λειτουργούν αυτές με έξυπνο τρόπο και με μικρό ενεργειακό αποτύπωμα.

1.9 Η θερμική διαχείριση φορτίων στη κλίμακα του μήκους

Η θερμική διαχείριση φορτίων απαιτεί να δώσει κανείς προσοχή σε όλη την κλίμακα του μήκους προκειμένου να κατανοήσει και να επιλύσει τα προβλήματα υπολογιστικής ρευστομηχανικής και μεταφοράς θερμότητας. Μπορούμε να δούμε έξι τουλάχιστον κλίμακες μήκους, οι οποίες αλληλοσυνδέονται προκειμένου κανείς να έχει μια ολιστική θεώρηση. Η πραγμάτευση ξεχωριστά των φαινομένων σε κάθε μια από αυτές τις κλίμακες εκτείνεται έξω από τα όρια αυτής της εργασίας. Επιγραμματικά αναφέρουμε ότι στην πρώτη κλίμακα βρίσκεται το μικροσίπ, το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει ανεμιστήρες ψύξης και διατάξεις για την απόρριψη θερμότητας. Η έρευνα γύρω από την ψύξη μικροηλεκτρονικών διατάξεων είναι στην κορυφή των προσπαθειών της επιστημονικής κοινότητας (βλέπε σχετικά [8]). Μια πληθώρα μελετών γίνεται προκειμένου να κατανοηθούν τα φαινόμενα της ρευστομηχανικής και της μεταφοράς θερμότητας. Επίσης γίνεται χρήση εργαλείων για την προσομοίωση των chip και την υπολογιστική επίλυση των πεδίων ροής τους. Οι πειραματικές μέθοδοι που γίνονται είναι δύσκολες, καθώς στην κλίμακα αυτή κάθε θερμοστοιχείο ή άλλο ηλεκτρόδιο μετρήσεων επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα. Ακόμα γίνεται μελέτη σε σχέση με τα υλικά τα οποία έχουν καλύτερες θερμικές ιδιότητες στην αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία προκειμένου να απαχθεί αποτελεσματικότερα η παραγόμενη θερμότητα από τα ηλεκτρονικά κυκλώματα

Στη συνέχεια μεταβαίνουμε στην κλίμακα του server, που έχει τις δικές του διατάξεις. Μετά έχουμε την κλίμακα μιας ομάδας servers. Στην παρούσα εργασία έχουν εισαχθεί παράμετροι που αφορούν στην αντίσταση της ροής των servers. Ασφαλώς και διεξάγεται έρευνα και τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και ρευστομηχανικής σε επίπεδο servers. Ακολουθεί η κλίμακα του Rack η οποία συνδέεται με την τελευταία κλίμακα αυτής του δωματίου στο οποίο φιλοξενούνται τα Racks. Στο τελευταίο αυτό επίπεδο εστιάζεται η εργασία.

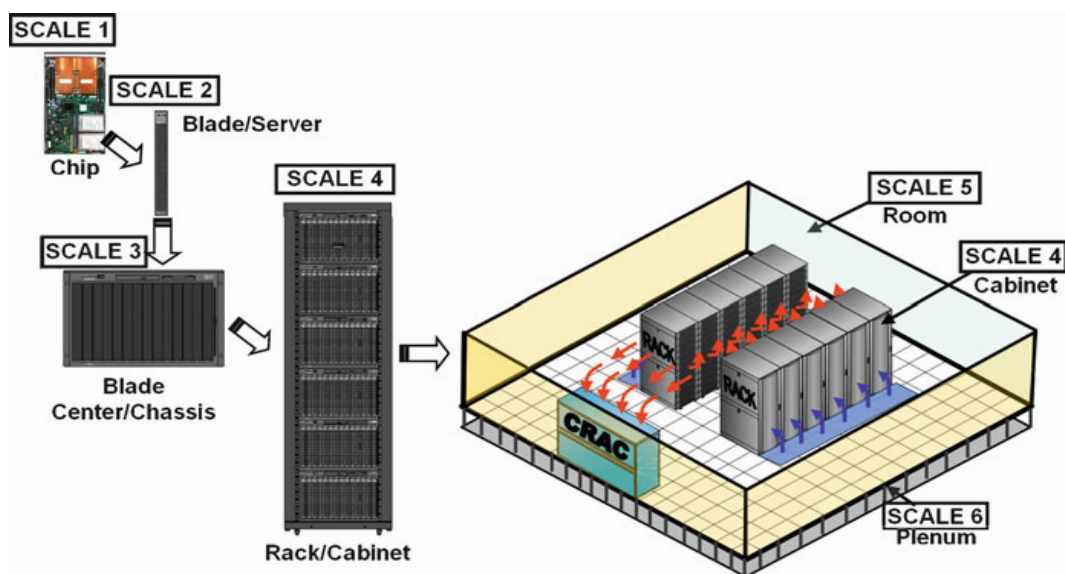


Figure 1.6: Η διάφορες κλίμακες από το chip έως το χώρο του Data Center [8]

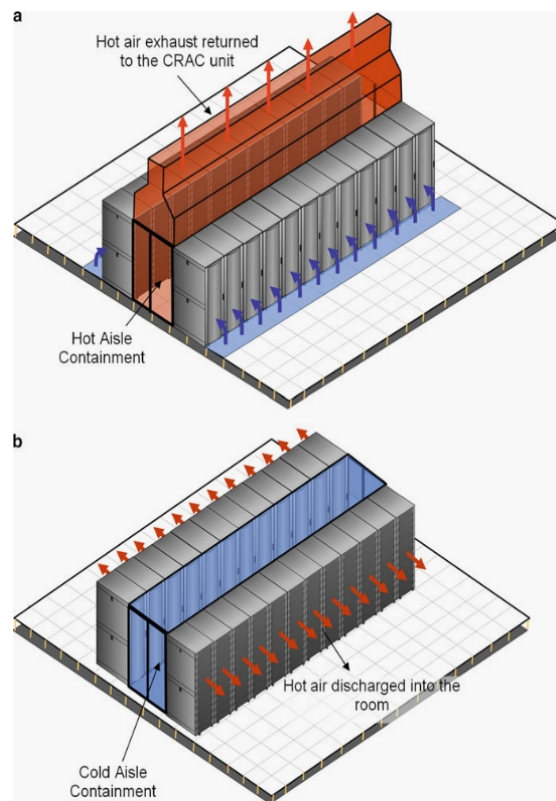


Figure 1.7: Η τυπική διάταξη θερμού-ψυχρού διαμερίσματος (Hot-Cold Aisle) ενός Data Center [8]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Οι βασικές έννοιες γύρω από την διαχείριση του αέρα ψύξης σε Data Centers

Εισαγωγή

Η διαχείριση του αέρα ψύξης, των ρευστομηχανικών και θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του, αποτελεί μια σημαντική παράμετρο στην ενεργειακή συμπεριφορά ενός Data Center. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται μια σειρά βασικών αλλά και κρίσιμων παραμέτρων ώστε να επιλυθεί με εργαλεία υπολογιστικής ρευστομηχανικής ένα τέτοιο πρόβλημα διανομής και θερμικής διαχείρισης των ρευμάτων αέρος σε ένα Data Center. Έτσι εισάγεται η έννοια της πτώσης πίεσης στο σύστημα και η επίδρασή αυτής στην ψύξη των μηχανημάτων. Επίσης περιγράφονται διάφοροι παράγοντες που συνεισφέρουν σε πτώσεις της στατικής πίεσης, όπως η διαμόρφωση των θερμών και ψυχρών διαμερισμάτων αέρα στον χώρο και η πτώση πίεσης από τα στόμια εισόδου αέρα ή η πτώση πίεσης καθώς ο αέρας διέρχεται μέσα από τα racks ψύχοντας τα. Επίσης αναφέρονται κάποια ιστορικά στοιχεία για την εξέλιξη των Data Centers και γίνεται επισκόπηση της βασικής γεωμετρίας και διάταξης του θερμού -ψυχρού διαμερίσματος (cold – hot aisle), που είναι κύρια διάταξη από όσες χρησιμοποιούνται και αποτελεί και τη διάταξη του υπό μελέτη χώρου. Τέλος γίνεται αναφορά στους νόμους που διέπουν τη λειτουργία των ανεμιστήρων του αέρα στις κλιματιστικές μονάδες, αλλά και παραγόντων όπως είναι η άνωση.

2.1 Ιστορική αναδρομή

Ο όρος Data Center, αναφέρεται στις εγκαταστάσεις εκείνες όπου στεγάζεται και υποστηρίζεται εξοπλισμός υπολογιστών, μέσων αποθήκευσης πληροφοριών και τηλεπικοινωνιακός εξοπλισμός (IT infrustructure) καθώς και κάθε υποδομή για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας και ψύξης του εξοπλισμού αυτού. Η επιτυχής λειτουργία μια τέτοιας εγκατάστασης έγκειται στο να καταστήσει κάθε πληροφορία ή υπηρεσία πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών η οποία λαμβάνει χώρο στο Data Center, παραδοτέα στον τελικό χρήστη με την αποφυγή κατά το δυνατόν κάθε δυσλειτουργίας.

Η ιδέα της δημιουργίας ενός τέτοιου «ειδικού» χώρου υποδομής γεννιέται ουσιαστικά με τον πρώτο μεγάλο υπολογιστή, τον ENIAC του πανεπιστημίου της Πενσυλβάνια [1]. Έτσι τα πρώτα Data Centers ήταν περιορισμένα σε αριθμό και υπηρετούσαν ανάγκες της άμυνας, της διαστημικής τεχνολογίας και άλλων κρατικών αναγκών των ΗΠΑ. Μόνο από την δεκαετία του 90 και μετά τα Data Centers δημιουργούνται σε πιο μαζική κλίμακα λόγω της άνθισης της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών σε μια σειρά από τομείς της οικονομίας. Η φωτογραφία

2.1 δείχνει ένα Data Center της δεκαετίας του 60, που ανήκει στο εθνικό κέντρο για την κλιματική αλλαγή των ΗΠΑ.

Οι δύο παράγοντες που συνεισφέρουν περισσότερο στην επιτυχή λειτουργία ενός Data Center είναι: Η παροχή αξιόπιστης ηλεκτρικής ενέργειας και η παροχή αξιόπιστης ψύξης των εγκατεστημένων ηλεκτρονικών μηχανημάτων. Για αρκετές δεκαετίες το πρωταρχικό μέλημα των μηχανικών ήταν η παροχή αξιόπιστης, αδιάλειπτης και ποιοτικής ηλεκτρικής ισχύος στις εγκαταστάσεις. Σήμερα η πρόκληση αυτή, έχει επαρκώς εκπληρωθεί και κατανοηθεί. Έτσι επειδή η επάρκεια στην ηλεκτροδότηση δεν εξασφαλίζει σωστή και μη κοστοβόρα ψύξη, η περιοχή της βέλτιστης ψύξης εξακολουθεί να απασχολεί εντατικά τους ερευνητές.

Τα Data Centers της δεκαετίας του 60 και του 70 επρόκειτο να διαχειριστούν πολύ μικρότερες πυκνότητες θερμικών φορτίων σε σχέση με σήμερα. Έτσι για να διαχειριστούν θερμικά φορτία μεταξύ 200 και 750 W/m², οι περισσότερες τέτοιες εγκαταστάσεις συστεγάζονταν στους ίδιους χώρους τυπικών γραφείων. Έτσι ο τυπικός κλιματισμός για την ανθρώπινη άνεση επαρκούσε και τον υπολογιστικό εξοπλισμό. Τα παραπάνω εξηγούν γιατί σε αυτό το πρώτο στάδιο, η ψύξη δεν αποτελούσε μεγάλη ανησυχία.



Figure 2.1: Τα πρώτα Data Center δεν αποτελούσαν «ειδικούς χώρους» για IT εξοπλισμό [1]

Όσο περνούν τα χρόνια, και ειδικά από την δεκαετία του 90, σημειώνεται μια εκθετική αύξηση των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια και ψύξη και καθώς τα ολοκληρωμένα κυκλώματα των υπολογιστών μειώνονται σε όγκο αλλά αυξάνεται η ισχύς τους, έχουμε μεγαλύτερες πυκνότητες θερμικών φορτίων. Πλέον αυτό το θερμικό φορτίο ξεπερνά πολλές φορές το θερμικό φορτίο από κάθε άλλη δραστηριότητα σε ολόκληρο το κτίριο. Μεγαλύτεροι ψύκτες, συμπιεστές, συμπυκνωτές και ανεμιστήρες απαγωγής τοποθετούνται και ο προκαλούμενος θόρυβος κάνει τους ανθρώπους που πριν βρίσκονταν στον ίδιο χώρο με τα μηχανήματα, τώρα να θέλουν να βρεθούν σε άλλο κτίριο. Έτσι σήμερα τα μεγάλα Data Centers είναι εγκαταστάσεις που μόνο

στόχο έχουν να στεγάσουν τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό και την υποδομή για την υποστήριξη αυτού.

2.2 Ο στόχος της διαχείρισης θερμικών φορτίων

Η διαχείριση των θερμικών φορτίων που παράγονται κατά την λειτουργία των υπολογιστικών μηχανημάτων σε ένα Data Center, στοχεύει στο: να ενισχύσει την αξιοπιστία της λειτουργίας, να μειώσει το χρόνο που τα μηχανήματα δυσλειτουργούν ή παύουν να λειτουργούν και να αυξήσει το χρόνο ζωής αυτών. Επίσης είναι προφανές ότι η επιτυχημένη διαχείριση των θερμικών φορτίων συμβάλει στην εξοικονόμηση και μειώνει το κόστος λειτουργίας σε ένα Data Center. Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες [19-Uptime Institute] το κόστος για την ηλεκτρική ενέργεια ενός server, μπορεί να ξεπεράσει το κόστος απόκτησης του ίδιου server μέσα σε τέσσερα χρόνια. Επιπλέον αν αθροιστεί το κόστος για την ηλεκτρική ενέργεια και την ψύξη ενός server, τότε αυτό το λειτουργικό κόστος για ένα server 1500 δολαρίων θα ξεπεραστεί πέντε φορές κατά την διάρκεια της ζωής του.

Αυτό που κάνει δύσκολη την διαχείριση των θερμικών φορτίων σε ένα Data Center, και επιβάλλει την χρήση μεθόδων υπολογιστικής ρευστομηχανικής είναι η δυναμική, απρόβλεπτη και πολυπαραγοντική φύση αυτών των φορτίων. Είναι γνωστό ότι στις περισσότερες εγκαταστάσεις χρησιμοποιούνται racks και servers διαφορετικών κατασκευαστών δημιουργώντας ένα ετερογενές πεδίο ροής με πολλές διαφορετικές παραμέτρους. Αυτή η ανομοιομορφία στο πεδίο ροής, που πηγαίνει μαζί με την διαφορετικότητα της αλληλεπίδρασης με τις επιφάνειες συναλλαγής θερμότητας, είναι που δυσκολεύει την επίτευξη του στόχου της ορθής διαχείρισης των θερμικών φορτίων. Αντίθετα με τις ροές της ηλεκτρικής ισχύος, που είναι καλά ορισμένες διαμέσου των καλωδίων μεταφοράς, οι ροές του αέρα, οι ανακυκλοφορίες του, τα φαινόμενα τύρβης, η δημιουργία και ο προσδιορισμός «θερμών σημείων ή hot -spots» στο πεδίο ροής, οι διαφορές σε κάθε είσοδο και έξοδο του αέρα, δυσκολεύουν την επίλυση και αποτελούν και δυσκολίες που βρέθηκαν μπροστά μας και σε αυτή την εργασία. Επομένως στόχος της διαχείρισης των θερμικών φορτίων σε Data Centers, είναι η μετάβαση με τη βοήθεια υπολογιστικών εργαλείων από την διαίσθηση ή την εμπειρία στην τεκμηριωμένη πρόβλεψη και σωστή διαχείριση κάτω από όλες τις λειτουργικές συνθήκες.

2.3 Επισκόπηση της διανομής αέρα ψύξης σε Data Center

Ο κύριος λόγος της ανεπάρκειας της ψύξης σε ένα Data Center είναι η ανάμειξη των ψυχρών και των θερμών ρευμάτων αέρα. Ο φυσικός διαχωρισμός μεταξύ του θερμού και του ψυχρού ρεύματος αέρα, πραγματοποιείται κυρίως μέσω της τοποθέτησης του IT εξοπλισμού σε επάλληλες εναλλασσόμενες σειρές θερμών και ψυχρών περιοχών, όπως φαίνεται στην εικόνα.

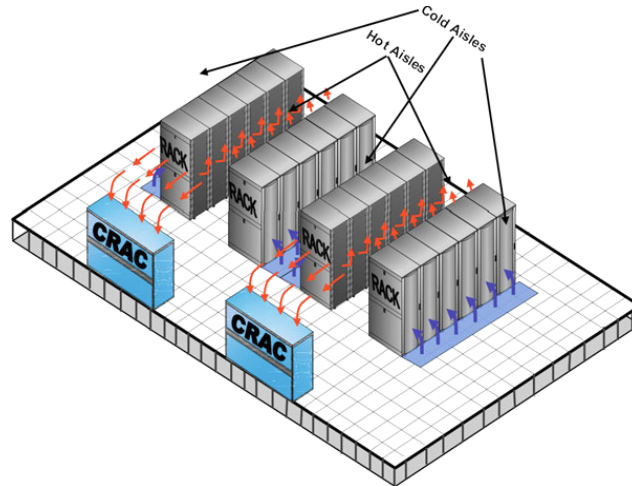


Figure 2.2: Τυπική διάταξη Θερμού-Ψυχρού διαμερίσματος της ψύξης Data Center [2]

Με τον τρόπο αυτό τα racks στα οποία περιέχεται ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός λειτουργούν σαν το φυσικό εμπόδιο για το διαχωρισμό μεταξύ του θερμού και του ψυχρού αέρα. Έτσι εφόσον ο φυσικός διαχωρισμός έχει επιτευχθεί το επόμενο ζήτημα είναι η κατάλληλη παροχή ψυχρού αέρα και αντίστοιχα η σωστή απαγωγή του θερμού αέρα με την κατά το δυνατόν ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. Στα συστήματα αυτά η ψύξη παρέχεται από ψύκτες κατάλληλους για μηχανήματα υπολογιστών (CRACs – Computer Room Air Conditioning units).

Ως προς τον τρόπο παροχής του ψυχρού αέρα και απαγωγής του θερμού, υπάρχουν μια σειρά από εναλλακτικές που έχουν υλοποιηθεί: Ο ψυχρός αέρα μπορεί να διανέμεται κατευθείαν εξερχόμενος από τον ψυκτική μονάδα, να διανέμεται από αεραγωγούς στο ταβάνι στο χώρο(overhead cooling) ή να χρησιμοποιείται η αρκετά συνηθισμένη πρακτική της παροχής διαμέσου ψευδοπατώματος που φέρει επιδαπέδια στόμια από τα οποία παρέχεται ο ψυχρός αέρας (Under-floor Air Distribution). Σε κάθε περίπτωση ο θερμός αέρας που εξέρχεται από τα racks, συγκεντρώνεται στο θερμό διαμέρισμα (hot aisle στο σχήμα) και απάγεται από στόμια που οδηγούν τον αέρα πίσω στις ψυκτικές μονάδες. Μια τυπική αναπαράσταση του πλήρους κυκλώματος ψύξης, με χρήση πύργου ψύξης φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Να σημειώσουμε ότι ο πύργος ψύξης μπορεί να αντικαθίσταται από σύστημα άμεσης εκτόνωσης (DX: Direct Expansion).

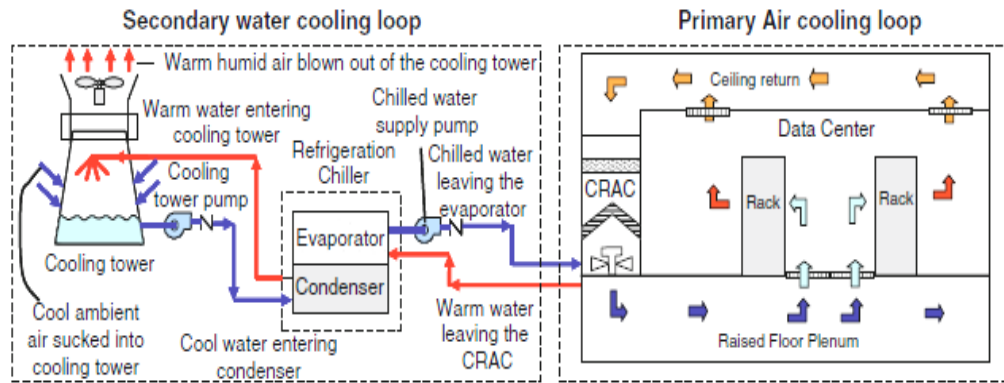


Figure 2.3: Πρωτεύων και δευτερεύων κύκλωμα Ψύξης ενός Data Center [3]

Στο σχήμα φαίνεται τόσο το πρωτεύων κύκλωμα με μέσο τον αέρα, όσο και το δευτερεύων με μέσο το νερό. Επίσης βλέπουμε την διάταξη, το συμπυκνωτή και τον εξατμιστή, τους ανεμιστήρες και τις αντλίες. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να κατανοήσουμε την ενέργεια που απαιτείται προκειμένου τόσο να ψυχθεί ο θερμός αέρας που απάγει τα θερμικά φορτία από τα racks, όσο και την ενέργεια για την λειτουργία των ανεμιστήρων, των αντλιών κ.α.

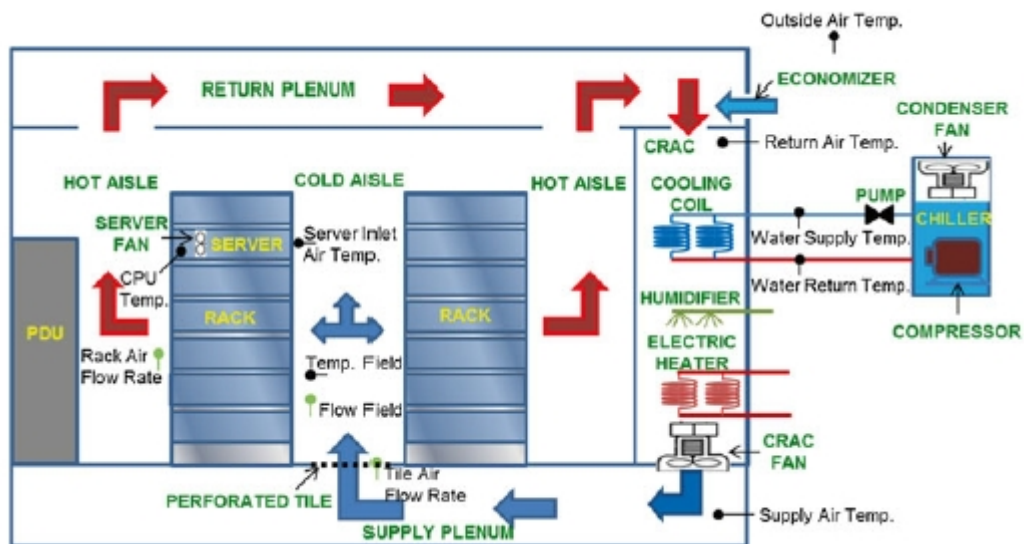


Figure 2.4: Βασικά στοιχεία ψυκτικού κυκλώματος σε Data Center [2]

Η ενέργεια που απαιτείται για την προώθηση του ψυχρού αέρα καθορίζεται από μια σειρά αλληλοεξαρτώμενων παραγόντων όπως: η γεωμετρία του χώρου (αεραγωγοί, δομικά στοιχεία, καλωδιώσεις), ο τύπος της παροχής και της απαγωγής ψυχρού και θερμού αέρα αντίστοιχα, η τοποθέτηση των ψυκτικών μηχανημάτων, οι διαφοροποιήσεις της πίεσης στο χώρο, οι πτώσεις της πίεσης κατά μήκος της διανομής των ρευμάτων αέρα και κατά τη διέλευση του αέρα από τα racks, το πεδίο των ταχυτήτων, τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας, τα φαινόμενα της τύρβης. Η πολύπλοκη αλληλεξάρτηση αυτών των παραγόντων είναι που

συναντήθηκε στην πράξη σε αυτή την εργασία και παρήγαγε δυσκολίες στην κατανόηση και στην επίλυση του προβλήματος της θερμικής διαχείρισης ενός Data Center.

2.4 Θεμελιώδεις πλευρές και παράγοντες που επηρεάζουν την διανομή του αέρα σε Data Center

Γνωρίζουμε ότι η στατική πίεση επηρεάζει την διανομή του αέρα. Η στατική πίεση ποικίλει στο πεδίο ροής και μπορεί να υπολογιστεί είτε με εξοπλισμό μέτρησης (πχ σωλήνα Pitot) είτε να βρεθεί υπολογιστικά. Οι ψυκτικές μονάδες σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να υπερνικήσουν την στατική πίεση που προκαλείται από το σύστημα (γεωμετρία, πτώση πίεσης κατά τη διέλευση αέρα από τα racks). Οι ανεμιστήρες που φέρουν οι μονάδες ψύξης προκαλούν μια πτώση πίεσης στα στόμια απαγωγής του θερμού αέρα, έτσι ώστε αυτός να απάγεται ενώ στην έξοδο των μονάδων έχουμε αύξηση της στατικής πίεσης λόγω της λειτουργίας των ανεμιστήρων.

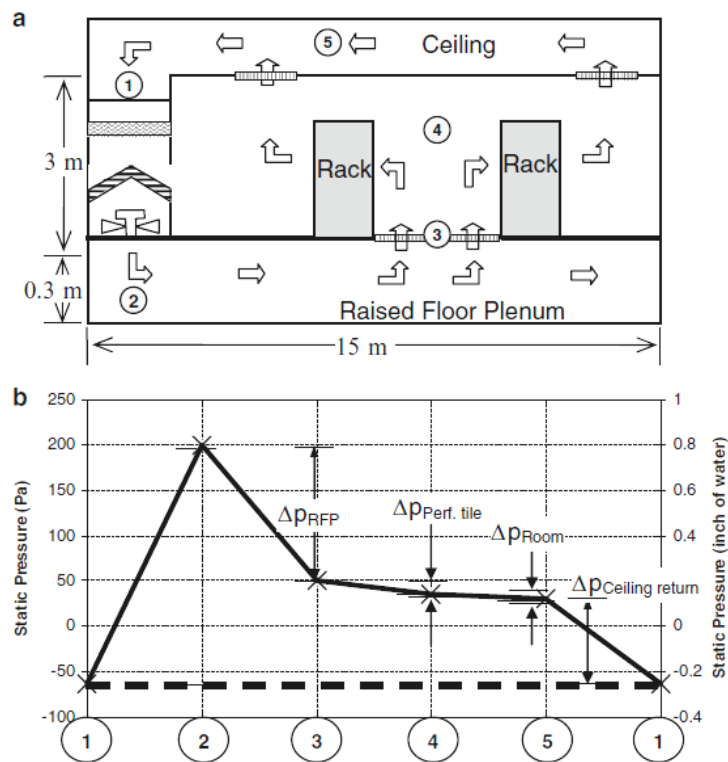


Figure 2.5: Οι διακυμάνσεις της στατικής πίεσης σε μια τυπική γεωμετρία ενός Data Center [1]

Ακόμα βλέπουμε πως υπάρχουν πτώσεις πίεσης λόγω του υπερυψωμένου δαπέδου (Raised Floor Plenum), λόγω των στομιών παροχής στο ψευδοδάπεδο, λόγω της γεωμετρίας του χώρου, και λόγω της επιστροφής του αέρα από τα στόμια απαγωγής. Καθώς η δυναμική πίεση είναι σταθερή κατά μήκος κλειστής γραμμής ροής και καθώς η ολική πίεση κατά μήκος κλειστής

γραμμής ροής οριακά μόνο μειώνεται λόγω τριβών, συμπεραίνουμε και η στατική πίεση (εφόσον μαζί με την δυναμική είναι ο άλλος προσθετός ώστε το άθροισμα να είναι η ολική) κατά μήκος κλειστής ροής θα είναι και αυτή σταθερή. Εάν αθροίσουμε την πτώση πίεσης από κάθε στοιχείο του συστήματος τότε έχουμε το μέγεθος της αντίστασης του συστήματος. Η αντίσταση του συστήματος αποτελεί εμπόδιο στην ροή του ρευστού προκαλώντας πτώση πίεσης. Αναφέροντας τον όρο αντίσταση του συστήματος αναφερόμαστε σε κάθε στοιχείο του data center που εμποδίζει τη ροή, δηλαδή στα racks, σε ψυκτικές μονάδες που βρίσκονται στο χώρο, σε τυχόν άλλα στερεά (αεραγωγούς κα). Τυπικά μπορούμε να υπολογίσουμε είτε με μετρήσεις είτε από τον κατασκευαστή (πχ δίνεται από τον κατασκευαστή η πτώση πίεσης σε στόμια απαγωγής/εισαγωγής αέρα) για κάθε ένα στοιχείο και άρα να γνωρίζουμε την αντίσταση του συστήματος.

Η επίδραση της αντίστασης του συστήματος είναι καθοριστική ως προς την επάρκεια και την αποτελεσματικότητα της διανομής του αέρα ψύξης μέσα στο χώρο του Data Center. Γενικά η αντίσταση του συστήματος είναι συνάρτηση του τετραγώνου της ογκομετρικής παροχής αέρα. Παρατηρώντας το διάγραμμα της στατικής πίεσης (ΔP_{Static}) ως προς την παροχή αέρα φαίνεται η επίδραση της αντίστασης του συστήματος. Ας υποθέσουμε ότι γνωρίζουμε την αντίσταση του συστήματος και την χαρακτηριστική των ανεμιστήρων και επομένως το σημείο λειτουργίας της εγκατάστασης. Έτσι αν για παράδειγμα αυξηθεί η αντίσταση του συστήματος, διότι παραδείγματος χάριν αυξήθηκε ο αριθμός των rack που φιλοξενούνται στο χώρο, ή είναι βουλωμένα τα φίλτρα της κλιματιστικής μονάδας, τότε έχουμε αντίστοιχα μείωση της παροχής αέρα με συνέπεια αυτός να μην επαρκεί για την καλή ψύξη του IT εξοπλισμού. Βλέπουμε τότε ότι το σημείο λειτουργίας (το σημείο που τέμνεται η συνολική αντίσταση με την χαρακτηριστική των ανεμιστήρων) θα μετατοπιστεί προς το σημείο B.

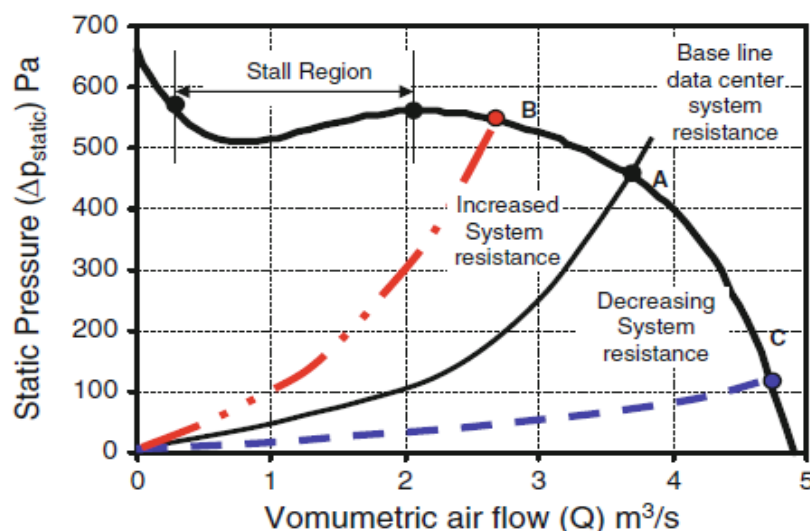


Figure 2.6: Χαρακτηριστική λειτουργίας ανεμιστήρα και σημείο λειτουργίας του στο σημείο τομής με την συνολική αντίσταση του συστήματος [1]

Αντίθετα εάν έχουμε μειωμένο αριθμό racks από ότι είχαμε, ή έχουμε μεγαλύτερο άνοιγμα στα στόμια εισαγωγής του ψυχρού αέρα (και επομένως εκεί μικρότερη πτώση στατικής πίεσης) ή αν καθαρίσουμε τα επιβαρυμένα φίλτρα της κλιματιστικής τότε η καμπύλη θα μετατοπιστεί προς τα δεξιά όπως βλέπουμε, και το σημείο λειτουργίας του συστήματος θα είναι πλέον το C. Επομένως θα έχουμε μικρότερη στατική πίεση του συστήματος γεγονός που μεταφράζεται σε αυξημένη παροχή αέρα ψύξης. Άρα έχουμε εξοικονόμηση δαπάνης ενέργειας καθώς οι ανεμιστήρες είναι δυνατόν να ρυθμίσουν την λειτουργία τους σε μικρότερη ταχύτητα περιστροφής. Οι βασικοί νόμοι για τους ανεμιστήρες εισάγονται στη συνέχεια, καθώς η λειτουργία τους με στόχο την εξοικονόμηση αποτελεί ένα από τα θέματα προβληματισμού της εργασίας.

2.4.1 Οι νόμοι για τους ανεμιστήρες προσαγωγής αέρα

Η λειτουργία κάθε ανεμιστήρα, υπάγεται σε νόμους γνωστούς από την θεωρία για τις στροβιλομηχανές [13], οι οποίοι καθορίζουν την ισχύ τους, την ταχύτητα περιστροφής και την πίεση στο ρευστό. Από την πρακτική εμπειρία μπορεί κανείς να γνωρίζει ότι ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία ενός ανεμιστήρα είναι η ταχύτητα περιστροφής του, συνήθως σε περιστροφές ανά λεπτό (rpm – rounds per minute). Μια μεταβολή στην ταχύτητα περιστροφής, αλλάζει την στατική πίεση που επιτυγχάνει ο ανεμιστήρας αλλά και την ισχύ που καταναλώνεται, καθώς και την παροχή του αέρα. Γενικά ο ρυθμός της παροχής αέρα αυξάνεται καθώς αυξάνει η ταχύτητα περιστροφής του ανεμιστήρα και αυτό εκφράζει ο πρώτος νόμος, ως

$$\text{εξής: } Q_{n_2} = Q_{n_1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (2.1),$$

όπου n_1 : η ταχύτητα περιστροφής του ανεμιστήρα (rpm)

n_2 : η νέα ταχύτητα περιστροφής

Q_{n_1} : ο ρυθμός παροχής του ρευστού (m^3/sec)

Q_{n_2} : ο νέος ρυθμός παροχής του ρευστού (m^3/sec)

Έτσι αν για παράδειγμα μειώσουμε για λόγους εξοικονόμησης την ταχύτητα περιστροφής των ανεμιστήρων των κλιματιστικών κατά πχ 20%, θα έχουμε και μείωση αντίστοιχα της παροχής αέρα κατά 20%. Σε κάθε περίπτωση δεν θα πρέπει να “πέσουμε” σε περίπτωση ασταθούς λειτουργίας (βλέπε [13] - Σημειώσεις Θερμικών Στροβιλομηχανών) και θα πρέπει να γνωρίζουμε την περιοχή λειτουργίας των αξονικών ανεμιστήρων

Ο δεύτερος νόμος, μας δίνει την σχέση για την σύνδεση της στατικής πίεσης με την ταχύτητα περιστροφής του ανεμιστήρα. Ως γνωστόν ο αέρας, στο Data Center που μελετάμε, καθώς διέρχεται από τα πτερύγια του ανεμιστήρα υφίσταται άνοδο της ολικής πίεσης του και της στατικής του πίεσης. Η γενική εξίσωση είναι:

$$\Delta p(\text{fantotal}) = (P_{\text{faninlet,static}} - P_{\text{fanoutlet,static}}) + \frac{1}{2} * \rho_{\text{air}} * (V_{\text{faninlet}}^2 - V_{\text{fanoutlet}}^2) \quad (2.2)$$

Αυτό το Δp είναι εξαρτώμενο από το τετράγωνο της ταχύτητας περιστροφής του ανεμιστήρα, γεγονός που μεταφράζεται μαθηματικά στον δεύτερο νόμο, ο οποίος είναι:

$$\Delta p_{n2} = \Delta p_{n1} * \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \quad (2.3),$$

όπου Δp_{n2} : η αύξηση της στατικής πίεσης στις n_2 στροφές

όπου Δp_{n1} : η αύξηση της στατικής πίεσης στις n_1 στροφές

και n_2 και n_1 οι στροφές περιστροφής (rpm) για το σημείο λειτουργίας 1 και 2 αντίστοιχα.

Άρα μια αύξηση των στροφών λειτουργίας επηρεάζει, αυξάνοντας στην δεύτερη δύναμη την διαφορά της στατικής πίεσης που επιτυγχάνεται.

Τέλος χρειαζόμαστε, προκειμένου να ρυθμίζουμε την λειτουργία των ανεμιστήρων μια σχέση για την ισχύ των ανεμιστήρων. Αυτή η σχέση αποτελεί τον τρίτο νόμο των ανεμιστήρων ο οποίος είναι:

$$W_{n2} = W_{n1} * \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \quad (2.4)$$

Επομένως βλέπουμε ότι η ισχύς είναι εξαρτώμενη με την τρίτη δύναμη του λόγου των ταχυτήτων περιστροφής. Το αποτέλεσμα είναι ότι μια μείωση 10% στην ταχύτητα περιστροφής καταλήγει σε εξοικονόμηση κατά 27% ($0.9^3 = 0.73$ ή $W_{n2} = 0.73 W_{n1}$).

Σε τελική ανάλυση η γνώση των περιβαλλοντικών συνθηκών που πρέπει να εξασφαλίζονται μέσα στο Data Center, σε συνάρτηση με τη γνώση των παραμέτρων του πεδίου ροής και των νόμων που διέπουν την ισχύς που καταναλώνεται (και) από τους ανεμιστήρες, είναι δυνατόν να οδηγήσει σε βελτιωμένες και ενεργειακά αποδοτικές συνθήκες ψύξης.

2.4.2 Η επίδραση του ύψους της οροφής του χώρου

Υπάρχουν επιχειρήματα τα οποία τοποθετούνται τόσο υπέρ όσο και κατά του μεγάλου ύψους της οροφής. Οι διαφωνίες της ερευνητικής κοινότητας εστιάζονται στην εξέταση του ζητήματος της στρωμάτωσης των αέριων μαζών. Η στρωμάτωση αυτή επηρεάζεται από το αν απάγεται αποτελεσματικά ο θερμός αέρας που εξέρχεται από τα racks, από τη θέση των αεραγωγών και των στομιών απαγωγής, από την θέση των ψυκτικών μονάδων (σε περίπτωση που βρίσκονται στον ίδιο χώρο με τα racks). Έτσι κάποιοι ερευνητικές υποστηρίζουν ότι το μεγάλο ύψος τη οροφής συμβάλει στην άνοδο των θερμών μαζών αέρα λόγω της δύναμης της άνωσης, γεγονός που συμβάλει ώστε να μην έχουμε οριζόντια ανάμειξη θερμού και ψυχρού αέρα. Από την άλλη άλλες έρευνες υποστηρίζουν ότι χώροι μεγάλου ύψους επιφέρουν μεγαλύτερη κατανάλωση ψυκτικής ισχύος διότι η υψηλή οροφή δεν βοηθά στην σωστή απαγωγή του θερμού αέρα. Γενικότερα συνιστάται το ελάχιστο ύψος της οροφής να είναι 270 cm. Στην περίπτωση που μελετάμε, το ύψος της οροφής είναι 315 cm.

Σε κάθε περίπτωση, καθώς ο σχεδιασμός κάθε Data Center είναι μοναδικός, κάθε γεωμετρική παράμετρος, όπως αυτή του ύψους της οροφής είναι δυνατόν να προσδιορισθεί με βέλτιστο τρόπο, με τη χρήση μεθόδων υπολογιστικής ρευστομηχανικής.

2.4.3 Η επίδραση της διαμόρφωσης διαμερισμάτων θερμού-ψυχρού (Hot-Cold Containments)

Τα διαμερίσματα θερμού και ψυχρού, συνιστούν φυσικά όρια ή εμπόδια τα οποία εξασφαλίζουν τον διαχωρισμό των θερμών από τις ψυχρές περιοχές σε ένα Data Center. Αυτή η αρχιτεκτονική συναντάται με το να τοποθετηθούν φυσικά όρια είτε για την θερμή είτε για την ψυχρή περιοχή. Η απομόνωση του ψυχρού διαμερίσματος οδηγεί καλύτερα τις ψυχρές μάζες αέρα προς τον IT εξοπλισμό. Εφόσον στον ίδιο χώρο μπορεί να υπάρχει εξοπλισμός όπως UPS ή άλλος εξοπλισμός, και αυτός είναι εκτός της ψυχρής περιοχής τότε πρέπει να ληφθεί μέριμνα για την ψύξη του. Έπειτα έχουμε την απομόνωση του θερμού διαμερίσματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την καλύτερη απαγωγή του θερμού αέρα και την μη-ανάμειξή του. Την ίδια στιγμή ο υπόλοιπος χώρος λειτουργεί σαν δεξαμενή ψυχρού αέρα προς χρήση.

Αυτές οι δύο λύσεις χρησιμοποιούνται εξίσου, αλλά η διαμόρφωση και η απομόνωση του θερμού θεωρείται πιο αποτελεσματική. Γενικά μπορεί κανείς να πει ότι σωστά σχεδιασμένα και απομονωμένα διαμερίσματα χωρίς διαρροές εξαλείφουν τα φαινόμενα της ανάμειξης. Κάποιοι κατασκευαστές τέτοιων διατάξεων ισχυρίζονται ότι η εγκατάστασή τους μπορεί να επιφέρει βελτίωση της ψυκτικής απόδοσης ακόμα και κατά 25-30%. Παρόλα αυτά η εγκατάστασή τους μπορεί να επιφέρει και αρνητικές επιδράσεις. Πιο συγκεκριμένα η τοποθέτηση των διαμερισμάτων θα έχει σαν συνέπεια μεγαλύτερη πτώση πίεσης. Το

αποτέλεσμα είναι να λειτουργούν οι ανεμιστήρες των ψυκτικών μηχανημάτων σε μεγαλύτερες ταχύτητες προκειμένου να αντισταθμίσουν αυτήν την πτώση πίεσης. Έτσι έχουμε μεγαλύτερη ενεργειακή κατανάλωση. Καταλαβαίνει κανείς ότι η κατανάλωση αυξάνει σημαντικά, διότι η νέα ισχύς αυξάνεται καθώς αυξάνονται οι στροφές περιστροφές του ανεμιστήρα στην τρίτη δύναμη. Κάποιο ερευνητές προσπάθησαν κατέληξαν στο συμπέρασμα πως έχουμε βέλτιστη εξοικονόμηση με τοποθέτηση διαμερισμάτων θερμού-ψυχρού όταν υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας $\Delta t_{\text{racks}} = 20,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

2.4.4 Η επίδραση της άνωσης

Οι θερμοκρασιακές βαθμίδες μέσα σε ένα Data Center προκαλούνται και από την επίδραση της άνωσης, η επίδραση της οποίας έχει σαν αποτέλεσμα την ανάμειξη των θερμών και ψυχρών μαζών στο χώρο. Η επίδραση της άνωσης ποσοτικοποιείται μέσω του αριθμού του Αρχιμήδη (Ar).

$$Ar = \frac{\beta * g * \Delta T_{\text{rack}} * H_{\text{rack}}}{V_{\text{στομίουεισαγωγήςαέρα}}^2} \quad (2.5)$$

,

όπου β : σταθερά της θερμικής διόγκωσης του αέρα

g : Η επιτάχυνση της βαρύτητας

Δt_{rack} : Η αύξηση της θερμοκρασία κατά μήκος του rack από την ψυχρή προς τη θερμή περιοχή.

H_{rack} = το ύψος του rack

Ο αριθμός του Αρχιμήδη εκφράζει την ένταση των δυνάμεων της άνωσης ως προς τις δυνάμεις αδράνειας: Όταν ο αριθμός είναι κοντά στην μονάδα, τότε οι δυνάμεις της άνωσης και της αδράνειας είναι της ίδιας τάξης. Μεγάλοι αριθμοί Ar δείχνουν ότι έχουμε την άνωση σαν την κύρια δύναμη της ροής του αέρα. Από την παραπάνω εξίσωση καταλαβαίνει κανείς ότι η επίδραση του αριθμού Ar είναι μεγάλη όταν έχουμε μεγάλη πυκνότητα θερμικών φορτίων από τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό, δηλαδή μεγάλο Δt_{racks} . Η άνωση εκτός από την ανεπιθύμητη ανάμειξη θερμών και ψυχρών μαζών αέρα, έχει σαν συνέπεια την αποτελεσματικότερη απαγωγή του θερμού αέρα, καθώς συμβάλει στην άνοδο του προς την οροφή και τα στόμια απαγωγής του θερμού αέρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : Η ενεργειακή κατανάλωση σε Data Center, παρακολούθηση και δείκτες λειτουργίας

Εισαγωγή

Καθώς κατασκευάζονται ολοένα και περισσότερα Data Centers, προκειμένου να καλύψουν τις αυξανόμενες διαδικτυακές και τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες και προϊόντα, το θέμα της ενεργειακής κατανάλωσης σε αυτά έρχεται στο προσκήνιο. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στις ΗΠΑ το 1.5 % της ενεργειακής κατανάλωσης το 2006 της χώρας προορίζονταν στην κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης Data Center [1]. Άλλο ένα στοιχείο που δείχνει πιο γλαφυρά την ενεργειακή κατανάλωση των servers είναι ότι μια μόνο εφαρμογή δημοφιλούς διαδικτυακού παιχνιδιού (World of Warcraft) απαιτεί περίπου 13.000 servers με 75.000 πυρήνες επεξεργασίας προκειμένου να είναι σε λειτουργία, γεγονός που μεταφράζεται σε εκατομμύρια τον μήνα για δαπάνες ηλεκτρικής ενέργειας [1]. Ακόμα οι συναλλαγές κρυπτονομισμάτων σαν το Bitcoin κοστίζουν όσο το κόστος ηλεκτροδότησης χωρών, εξαιτίας του ηλεκτρονικού τρόπου (αποκλειστικά) με τον οποίο πραγματοποιούνται οι συναλλαγές αυτές. Έτσι το βασικό ερώτημα σε αυτό το κεφάλαιο είναι «που πηγαίνει όλη αυτή η ενεργειακή κατανάλωση»; Επίσης γίνεται μια αναφορά σε βασικές παραμέτρους αποτίμησης και ελέγχου της ενεργειακής κατανάλωσης, του ελέγχου αυτών. Με την γενική αυτή επισκόπηση καταδεικνύεται η σημασία που έχει στην ενεργειακή εξοικονόμηση η βελτιστοποίηση των παραμέτρων της ψύξης.

3.1 Η κατανομή της ηλεκτρικής ενέργειας σε Data Center

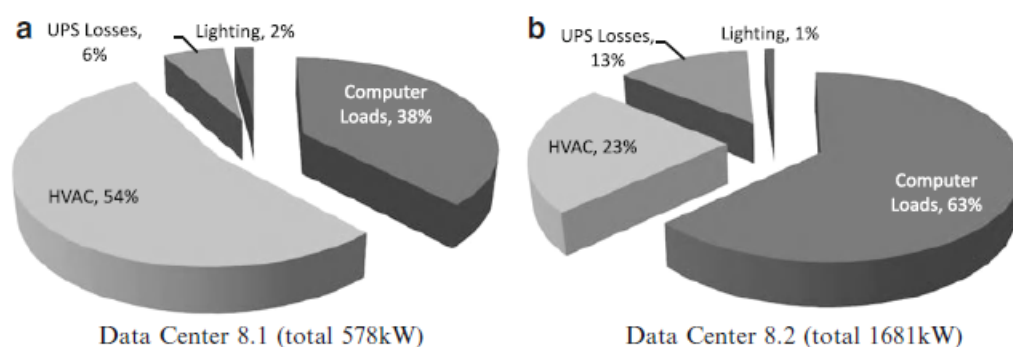


Figure 3.1: Συγκριτικό διάγραμμα: Δύο διαφορετικές κατανομές ενεργειακής κατανάλωσης Data Center [3]

Οι δύο κύριες κατηγορίες εξοπλισμού που καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια, όπως προειπώθηκε, είναι: η ενέργεια για τον υπολογιστικό εξοπλισμό αφενός και καθώς ο ίδιος εξοπλισμός μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε υποβαθμισμένη θερμική ενέργεια, η ενέργεια

για την ψύξη αυτού του εξοπλισμού. Επιπρόσθετα σε ένα Data Center υπάρχουν οι υποδομές υποστήριξης όπως τα συστήματα αδιάλειπτης παροχής ενέργειας (UPS: Uninterrupted Power Systems) που επίσης έχουν κατανάλωση και θερμικές εκπομπές, ο φωτισμός των χώρων. Τα παραπάνω απεικονίζονται στο ακόλουθο σχήμα, όπου γίνεται μια κατανομή της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε δύο διαφορετικά Data Center. Παρατηρεί κανείς ότι οι δύο αυτές περιπτώσεις Data Center, έχουν διαφορετικές κατανομές, με πλέον ενεργειακά αποδοτικό το Data Center 8.2 το οποίο καταναλώνει το μεγαλύτερο μέρος σε υπολογιστικές ανάγκες (63%) και μόνο το υπόλοιπο 37% καταναλώνεται για τις ανάγκες της ψύξης, των UPS, του φωτισμού κτλ.

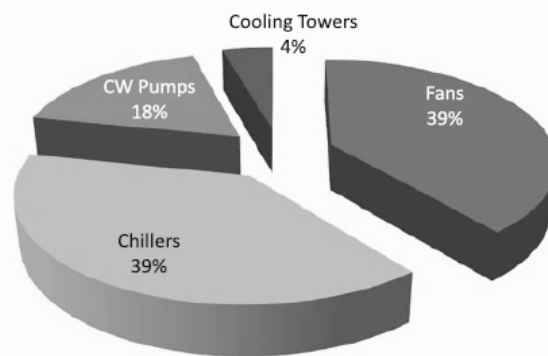


Fig. 3.3 HVAC power breakdown

Figure 3.2: Ο διαμερισμός της ενεργειακής κατανάλωσης ως προς την ψύξη [3]

Επίσης έχει ενδιαφέρον η παραπάνω ανάλυση της κατανομής κατανάλωσης ενέργειας. Μπορούμε να δούμε ανά κατηγορία που εικονίζεται παραπάνω (υπολογιστικά φορτία, ψύξη, κτλ) πως κατανέμεται η κατανάλωση. Αυτή η γνώση έχει σημασία στο βαθμό που υπάρχει ανάγκη να μειώσει κάποιος την κατανάλωση να γνωρίζει από θα ξεκινήσει. Όσον αφορά στην ψύξη, στατιστικά η μεγαλύτερη κατανάλωση συμβαίνει στους συμπυκνωτές (chillers) και στους ανεμιστήρες των ψυκτών, ενώ ακολουθούν οι αντλίες.

3.2 Η παρακολούθηση δεδομένων σε ένα Data Center

Η παρακολούθηση των δεδομένων που παράγονται κατά τη λειτουργία ενός Data Center αποτελεί σημαντική πλευρά για την καλή λειτουργία του. Η παρακολούθηση (monitoring) των δεδομένων είναι ένα πεδίο αρκετά εξελιγμένο με μεγάλες εταιρείες της πληροφορικής να παρέχουν πακέτα προϊόντων αισθητήρων και λογισμικού επεξεργασίας δεδομένων. Είναι επίσης γεγονός ότι η συνέργεια μεταξύ της παρακολούθησης ηλεκτρονικών και ψηφιακών παραμέτρων (IT παραμέτρων γενικά) και παραμέτρων μηχανολογικής υφής από τον χώρο, θα έλυσε πολλά

προβλήματα και για τις δύο αυτές πλευρές. Μια συνεργασία δηλαδή μεταξύ των μηχανικών της λειτουργίας και συντήρησης του χώρου και των μηχανικών της πληροφορικής θα ήταν ευκαία αλλά και αναγκαία. Παρόλα αυτά αυτό σπάνια συμβαίνει (και η παρούσα εργασία επιβεβαιώνει αυτόν τον κανόνα). Κάποια από τα κέρδη της παρακολούθησης δεδομένων και δεικτών σε ένα Data Center αναφέρονται επιγραμματικά παρακάτω:

1. Υπάρχει η δυνατότητα για τοποθέτηση του ηλεκτρονικού εξοπλισμού με ένα ολιστικό τρόπο και με γνώμονα την εξοικονόμηση και επάρκεια σε ηλεκτρική παροχή και ψύξη. Συνήθως οι ανάγκες επέκτασης των μηχανημάτων που φιλοξενούνται στο Data Center επιβάλλουν απλώς οι αλλαγές να γίνονται γρήγορα. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα, εφόσον παρακολουθούνται δεδομένα, να γίνεται προγραμματισμός της χωρητικότητας (capacity planning) για την εγκατάσταση μηχανημάτων σε ένα Data Center. Ακόμα δίνεται η δυνατότητα για μια καλύτερη χρήση της δυναμικότητας (capacity utilization) του Data Center. Αν και συνήθως κυριαρχεί το να υπάρχει μεγαλύτερη δυνατότητα για ηλεκτρική παροχή και ψύξη, η οποία όμως παραμένει αδρανής προκειμένου να χρησιμοποιηθεί στο μέλλον. Παρόλα αυτά η παραπάνω πρακτική οδηγεί σε μεγαλύτερα κόστη λειτουργίας.

2. Υπάρχει σήμερα η δυνατότητα της χρήσης προγραμμάτων πληροφορικής (ή CMMS: Computerized Maintenance Management Systems) με στόχο τη βέλτιστη λειτουργία και συντήρηση των Data Centers. Με δεδομένο ότι τα Data Centers αποτελούν κρίσιμους χώρους η τήρηση δεδομένων και δεικτών και η παρακολούθησή τους δίνουν την δυνατότητα για τη μετάβαση από τη συντήρηση βάση χρονικού προγραμματισμού ή στην επεμβατική συντήρηση για την άρση βλάβης, σε ένα ανώτερο μοντέλο προληπτικής συντήρησης βάσει συγκεκριμένων δεικτών (condition based maintenance).

3. Μια από τις προφανείς διαδικασίες ελέγχου και τήρησης δεδομένων σε ένα Data Center είναι αυτή που έχει να κάνει με τον έλεγχο της καλής λειτουργίας του έναντι βλαβών και πτώσης της λειτουργίας του (Downtime). Για τον λόγο αυτό γίνεται σε πραγματικό χρόνο ο έλεγχος του εξοπλισμού και της υποδομής αυτού από εξειδικευμένο προσωπικό. Πέρα όμως από τον έλεγχο των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο είναι αναγκαία η επεξεργασία σε δεύτερο επίπεδο, από όπου μπορούν να αντληθούν συμπεράσματα κρίσιμα και ικανά να μειώσουν τόσο τις βλάβες όσο και τα κόστη που αυτές συνεπάγονται.

4. Τέλος σημαντικό κέρδος αποκτάται σε σχέση με την ενεργειακή αποδοτικότητα. Η συνήθης προσέγγιση για τα Data Centers (ιδιαίτερα αυτά παλιότερης γενιάς), είναι να παρέχεται υπερψύξη 24 ώρες την ημέρα, 7 ημέρες την εβδομάδα ώστε να αποφευχθεί η πιθανότητα υπερθέρμανσης κάποιου εξοπλισμού. Σήμερα απαιτείται η λειτουργία “έξυπνων Data Centers”, με ψύξη ανάλογη με την απαίτηση κάθε ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Για να γίνει κάτι τέτοιο απαιτείται η καταγραφή, ανάκτηση και επεξεργασία δεδομένων, με τη χρήση κατάλληλων αλγορίθμων υπολογιστικής ρευστομηχανικής και η εγκατάσταση υψηλού επιπέδου αισθητήρων και αυτοματισμού.

3.3 Δείκτες ενέργειας και ψύξης σε Data Center

Ο βασικός δείκτης για την ενεργειακή αποδοτικότητα ενός Data Center είναι ο δείκτης PUE ή Power Usage Effectiveness. Ο ορισμός του δείκτη είναι ως εξής:

$$PUE = \frac{\text{Ολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας}}{\text{Ετήσια κατανάλωση ενέργειας του ηλεκτρονικού (IT) εξοπλισμού}} \quad (3.1)$$

Ο δείκτης PUE, δείχνει με έναν άμεσο τρόπο την χρήση του εξοπλισμού υποδομής και επομένως πόσο ενεργειακά κοστοβόρο είναι ένα Data Center. Για παράδειγμα μια εγκατάσταση με PUE 2.0 σημαίνει πως η ολική ενέργεια που χρησιμοποιείται είναι διπλάσια της ενέργειας που καταναλώνει ο IT εξοπλισμός. Ο δείκτης PUE χρησιμοποιείται ευρέως για την ενεργειακή κατάταξη της εγκατάστασης.

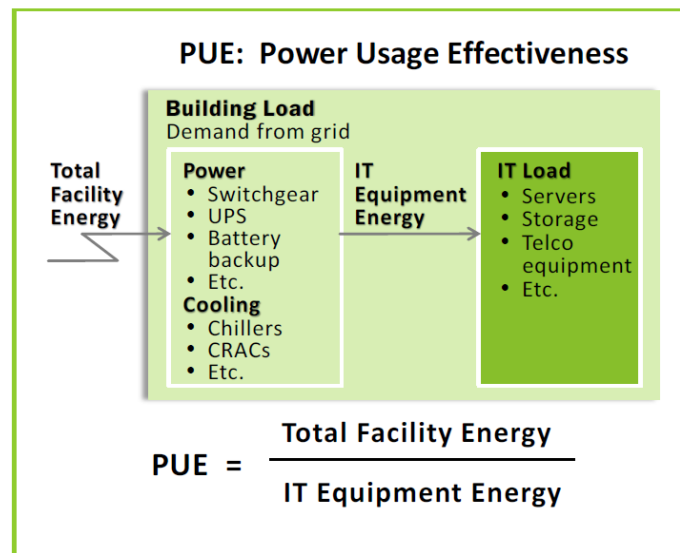


Figure 3.3: PUE: Ο βασικός δείκτης της ενεργειακής απόδοσης ενός Data Center [26]

Για την διαμόρφωση του δείκτη PUE είναι απαραίτητη η ενεργειακή καταγραφή των καταναλώσεων στο Data Center (δηλαδή των διατάξεων μετασχηματισμού τάσης, της κατανάλωσης στα συστήματα αδιάλειπτης παροχής – UPS, της κατανάλωσης των μονάδων ψύξης, των ιδιοκαταναλώσεων της εγκατάστασης) αλλά και των καταναλώσεων του ηλεκτρονικού εξοπλισμού (servers, μέσα αποθήκευσης δεδομένων). Απαιτείται δηλαδή η εγκατάσταση ενεργειακών μετρητικών εγκαταστάσεων [26]. Περισσότερες πληροφορίες για τον τρόπο εφαρμογής και χρήσης του δείκτη PUE, τον τρόπο αναφοράς του, τις παραλλαγές του παρέχει ο οργανισμός The Green Grid [26].

3.4 Οι δείκτες απόδοσης σε ένα Data Center

- **Δείκτης COP**

Ο δείκτης Coefficient Of Performance (Power/power) είναι κρίσιμος για την αποτύπωση της επάρκειας ή όχι των εγκατεστημένων ψυκτικών μονάδων. Ένας υψηλός δείκτης COP φανερώνει ότι οι ψυκτικές μονάδες μπορούν να απάγουν μεγάλο θερμικό φορτίο (ή να παράγουν μεγάλη ψυκτική ισχύ) ενώ απαιτούν μικρή κατανάλωση ενέργειας. Ο COP αποτελεί μια παράμετρο χρήσιμη για τους μηχανικούς που έχουν αναλάβει την λειτουργία της εγκατάστασης. Η επίτευξη μεγαλύτερων τιμών COP αποτελεί ένα συνεχή στόχο για την επίτευξη ενεργειακής εξοικονόμησης.

- **Δείκτης Rack Cooling Index - RCI**

Ο δείκτης Rack Cooling Index - RCI παρέχει ένα απλό τρόπο ώστε να αποδοθεί ποσοτικά η διανομή του ψυχρού αέρα σε ένα Data Center σε επίπεδο Rack ή και servers που είναι τοποθετημένοι σε ένα rack. Είναι:

$$RCI = \left(1 - \frac{\text{Total Over Temperature}_{\square}}{\text{Max Allowable Over Temperature}} \right) * 100\% \quad (3.2)$$

Ο δείκτης RCI είναι μέτρο της ανομοιομορφίας της ψύξης ανά rack ή ανά servers μέσα στον ίδιο χώρο. Δηλαδή ενώ ιδανικά θα είχαμε την ίδια βέλτιστη θερμοκρασία στην έξοδο ενός rack ή server, στην πράξη αυτό δεν συμβαίνει. Για το που συμβαίνει αυτή η αστοχία μας κατατοπίζει ο δείκτης RCI. Η βέλτιστη τιμή προφανώς είναι αυτή για την οποία δεν έχουμε υπέρβαση της επιτρεπόμενης ανά εξοπλισμό θερμοκρασίας, δηλαδή RCI=100%.

- **Δείκτης αποδοτικότητας ψυκτικών μονάδων (παροχή αέρα/καταναλισκόμενη ισχύς – (m³/s) /kW)**

Οι μονάδες ψύξης (Computer Room Air Condition units - CRACs) είναι υπεύθυνες για τη διανομή και την παραγωγή του ψυχρού αέρα προς τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό του Data Center. Η αποδοτικότητα των μονάδων κατά την παραπάνω διαδικασία ποσοτικοποιείται μέσω αυτού του δείκτη. Ο δείκτης πρέπει να τηρείται και να παρακολουθείται στο χρόνο ώστε να φαίνεται η αποδοτικότητα κάθε μονάδας. Εάν για παράδειγμα ένα φίλτρο στην έξοδο της μονάδας έχει φράξει, ο δείκτης θα είναι πιο χαμηλός καθώς και η αποδοτικότητα της μονάδας.

- **Δείκτης απόδοσης airflow supplied/ air needed ($m^3/s/ m^3/s$)**

Ο δείκτης airflow/airflow χρησιμοποιείται κατά τον σχεδιασμό και παρέχει ένα μέτρο της δυνατότητας ενός Data Center να φιλοξενεί ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Ο δείκτης αυτός είναι δυναμικός και η τιμή του μάλλον θα έχει διακυμάνσεις. Ο δείκτης έχει στον αριθμητή την παροχή που εισέρχεται στον χώρο του Data Center και στον παρανομαστή την παροχή που χρειάζεται ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός. Η παροχή αυτή είναι προσδιορισμένη από τον κατασκευαστή. Η ιδανική τιμή του δείκτη είναι η μονάδα. Στην πράξη πολλά Data Centers καταγράφουν τιμές του δείκτη αρκετά πάνω της μονάδας, μέχρι και την τιμή 5. Στην περίπτωση που έχουμε δείκτη κάτω της μονάδας είτε έχουμε βλάβη σε κάποια ψυκτική μονάδα είτε έχουμε έντονη ανακυκλοφορία αέρος. Έτσι ενώ η παροχή που εισάγεται είναι σωστή, αυτή δεν καταλήγει στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό προκειμένου να γίνει η ψύξη του. Το αποτέλεσμα είναι οι ψυκτικές μονάδες να διοχετεύουν ακόμα πιο ψυχρό αέρα ή να λειτουργούν τους ανεμιστήρες πιο γρήγορα. Οι επεμβάσεις αυτές δεν βελτιώνουν το πρόβλημα ενώ την ίδια στιγμή αυξάνουν το κόστος λειτουργίας. Οι διαρροές του ψυχρού αέρα (από το ψευδοδάπεδο ή αλλού) επίσης μειώνουν την τιμή του. Σε περίπτωση που έχουμε μεγάλες τιμές του παραπάνω δείκτη διοχετεύεται περίσσεια αέρα. Η περίπτωση αυτή είναι πολύ συνηθισμένη όταν δεν έχουμε διατάξεις θερμού-ψυχρού στο χώρο, οπότε έχουμε μεγάλες τιμές παροχής αέρα χωρίς όμως και αποτελεσματικότητα στην ψύξη

- **Δείκτης Rack Temperature Index - RTI**

Ο δείκτης αυτός κάνει χρήση των διαφορών της θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου στις ψυκτικές μονάδες και στα racks. Στην περίπτωση και αυτού του δείκτη η ιδανική τιμή είναι αυτή της μονάδας. Σε περίπτωση που ο δείκτης RTI έχει τιμή μικρότερη της μονάδας, έχουμε και εδώ μη αναποτελεσματική ψύξη, ανάμειξη θερμού και ψυχρού αέρα και ανακυκλοφορία της ροής του αέρα.

$$RTI = \left(\frac{\Delta T_{\text{servers}_{\text{racks}}}}{\Delta T_{\text{cracs}}} \right) * 100\% \quad (3.3)$$

Μια αποτύπωση συνδυαστικά του δείκτη RCI και RTI μπορεί να δώσει μια καλή εικόνα της διαχείρισης του ψυχρού αέρα στο χώρο του Data Center: ο δείκτης RCI δείχνει την απόδοση σε επίπεδο κάθε rack, ενώ ο δείκτης RTI αναφέρεται στην απόδοση της ψύξης ανά rack, αλλά με βάση αναφοράς την λειτουργία των ψυκτικών μονάδων.

3.5 Μετρήσεις και δεδομένα σε ένα Data Center

Για την καλή λειτουργία ενός Data Center καταγράφονται και αναλύονται ένα πλήθος δεδομένων που αφορούν σε μια σειρά παραμέτρων όπως είναι οι ενεργειακές καταναλώσεις, η θερμοκρασία σε διάφορα σημεία στο χώρο του Data Center, η ταχύτητα του αέρα της ψύξης, η υγρασία. Όλα τα δεδομένα αυτά καταγράφονται, συχνά και σε πραγματικό χρόνο. Επίσης υπάρχει η ανάγκη της ανάλυσής τους και τη συνδυαστικής τους χρήσης από τους μηχανικούς της εγκατάστασης. Τις περισσότερες φορές οι μετρήσεις αυτές καταλήγουν από τις μετρητικές διατάξεις (μετατροπείς) μέσω ψηφιακών σημάτων σε κεντρικές εγκαταστάσεις ελέγχου και αναπαράστασης. Τα πλέον σύγχρονα Data Centers, μέσω των σημάτων αυτών έχουν τη δυνατότητα με τον αυτόματο έλεγχο να αλλάξουν παράγοντες της λειτουργίας της ψύξης όπως είναι η παροχή και η θερμοκρασία εισόδου του αέρα της ψύξης.

3.5.1 Μετρήσεις και παρακολούθηση του συστήματος ψύξης

Το σύστημα ψύξης απαιτεί να λαμβάνονται μια σειρά μετρήσεων, με στόχο την ενεργειακή εξοικονόμηση αλλά και την αξιοπιστία και ασφαλή λειτουργία της εγκατάστασης (καθώς αστοχία των ψυκτικών μονάδων μπορεί να προκαλέσει παύση λειτουργίας του IT εξοπλισμού). Στόχος των μετρήσεων και της παρακολούθησης είναι η διαμόρφωση της κανονικής κατάστασης της λειτουργίας των ψυκτών (baseline performance), της θερμοκρασία του χώρου και της ενεργειακής κατανάλωσης, έτσι ώστε οι μηχανικοί να προλαμβάνουν τυχόν δυσλειτουργίες. Προκειμένου να γίνει αυτό χρειάζεται ο συνδυασμός και η σύγκριση των ιστορικών δεδομένων της λειτουργίας με τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. Οι συνήθεις μετρήσεις στην ψύξη αφορούν στα παρακάτω μεγέθη:

- Κατανάλωση ισχύος της μονάδας ψύξης
- Πίεση ψυκτικού μέσου στον συμπιεστή και στον ατμοποιητή
- Θερμοκρασία νερού και ψυκτικού μέσου στην είσοδο και την έξοδο του ατμοποιητή και συμπυκνωτή
- Κατανάλωση νερού και σκληρότητα στον ατμοποιητή και στον συμπυκνωτή
- Πτώση πίεσης στα φίλτρα.

3.5.2 Μετρήσεις και παρακολούθηση της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του αέρα

Εξαιτίας της σπουδαιότητας της επαρκούς ψύξης τοποθετούνται μετρητικές διατάξεις σε επιλεγμένα σημεία στην είσοδο και στην έξοδο των servers και του υπόλοιπου ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Οι μετρητικές διατάξεις τοποθετούνται σε τρία ύψη (στην κορυφή των racks, στη μέση και στη βάση τους) και ανά τέσσερα μέτρα περίπου πλάτος[19]. Οι διατάξεις αυτές μπορούν να μετρούν την ταχύτητα και τη θερμοκρασία του αέρα που διέρχεται από τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Επίσης τοποθετούνται εξίσου στο ψυχρό και στο θερμό διαμέρισμα. Με τον τρόπο αυτό μπορεί κανείς να υπολογίσει, γνωρίζοντας το θερμικό φορτίο που εκπέμπει ο εξοπλισμός και την παροχή του αέρα, την ποσότητα της θερμότητας που μεταφέρεται σε κάθε σημείο και στη συνέχεια να κάνει τις κατάλληλες ρυθμίσεις. Εάν για παράδειγμα ο μηχανικός “βλέπει” υψηλή θερμοκρασία του αέρα ψύξης στην είσοδο τότε είναι πολύ πιθανό να μην επιτυγχάνεται ικανοποιητική ψύξη. Επίσης όταν “βλέπει” υψηλή χαμηλή θερμοκρασία στην έξοδο ενός server είναι πολύ πιθανό να καταναλώνεται άσκοπα θερμική ισχύς σε ένα σημείο που πιθανά θα αρκούσε λιγότερη παροχή αέρα ή υψηλότερη θερμοκρασία του αέρα ψύξης. Με δεδομένη την δυναμική συμπεριφορά των θερμικών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Η αριθμητική μοντελοποίηση του Data Center της εργασίας

4.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό ασχολείται με τις βασικές αρχές, συνθήκες και εξισώσεις που διέπουν το Data Center που εξετάζεται. Έτσι δίνονται οι βασικές εξισώσεις που χαρακτηρίζουν την μεταφορά μάζας, ορμής, ενέργειας και τύρβης, παρουσιάζονται οι μέθοδοι για την διακριτοποίηση των εξισώσεων και παρουσιάζεται η μέθοδος για την επίλυσή τους. Αναπτύσσεται στο πλαίσιο αυτό η διαδικασία που ακολουθήθηκε για όλα τα εισαγόμενα δεδομένα στο μοντέλο, όπως είναι η γεωμετρία αυτού, οι μέθοδοι για την δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος, ο προσδιορισμός των οριακών συνθηκών και των συνθηκών στα ενδιάμεσα κελιά. Ακόμα παρουσιάζονται οι απλοποιήσεις, οι αβεβαιότητες και οι υποθέσεις που εισήχθησαν και επιδρούν στο μοντέλο. Τέλος αναφέρεται η μοντελοποίηση των παραμέτρων της τύρβης. Στην εργασία απαιτήθηκε ιδιαίτερη προσπάθεια για τον προσδιορισμό των αρχικών παραμέτρων καθώς αν εισαχθούν με λάθος τρόπο δημιουργείται απόκλιση (divergence) κατά την εκτέλεση της υπολογιστικής διαδικασίας γεγονός που συνεπάγεται δυσκολίες για την σύγκλιση και τελική επίλυση του μοντέλου.

Το Data Center, προκειμένου να μοντελοποιηθεί αναλύθηκε σε δύο κύρια επίπεδα. Στο πρώτο επίπεδο έχουμε την ανάλυση κατά rack. Εκεί επιχειρήθηκε να υπολογιστούν οι παράμετροι του πεδίου ροής καθώς με τον τρόπο αυτό πραγματοποιείται υπολογιστική εξοικονόμηση. Στο επίπεδο αυτό, το rack μοντελοποιείται με την υπόθεση του πορώδους μέσου (porous media) καθώς έτσι αποτυπώνεται καλύτερα η πραγματικότητα της διέλευσης του ψυχρού αέρα διαμέσου των servers που φιλοξενούνται σε ένα rack. Στο σημείο αυτό εισάγονται οι παράμετροι για το πορώδες μέσο, όπως οι σταθερές της αντίστασης ιξώδους και αντίστασης αδράνειας που εισέρχονται στους υπολογισμούς. Για την μοντελοποίηση χρησιμοποιείται το μοντέλο τύρβης $k-\epsilon$, καθώς από την βιβλιογραφία τεκμηριώνεται σαν το πλέον κατάλληλο για τέτοιου είδους προσομοιώσεις ψύξης βιομηχανικού τύπου. Η εξίσωση ενέργειας επιλύεται σε όλο το πεδίο αλλά και στον όγκο του rack, ο οποίος αποτελεί πηγή εκπομπής θερμότητας και συναλλάσσει θερμότητα με τον αέρα της ψύξης. Στους υπολογισμούς έχει εισαχθεί ο παράγοντας της βαρύτητας στο πεδίο ροής. Ο ορισμός των κατάλληλων οριακών συνθηκών, πρέπει να γίνεται με τρόπο που να οριοθετείται σωστά το προς επίλυση πεδίο ροής. Επομένως απασχόλησε την παρούσα εργασία το θέμα αυτό του ορισμού των αρχικών συνθηκών οι οποίες αποκτήθηκαν με μετρήσεις στον υπό εξέταση χώρο. Ο εμπορικός κώδικας ANSYS FLUENT χρησιμοποιήθηκε για την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων.

4.2 Μοντελοποίηση με τη χρήση εργαλείων υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD Modelling)

Η ανάλυση του πεδίου ροής με την χρήση μοντέλων προσομοίωσης και η επίλυση αυτών με μεθόδους υπολογιστικής ρευστομηχανικής είναι η μέθοδος που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία. Η ανάλυση αυτή χρησιμοποιείται ώστε να επιλυθούν αριθμητικά οι εξισώσεις συνέχειας, ορμής και ενέργειας που διέπουν το υπό μελέτη πεδίο ροής. Η λύση βασίζεται στην μέθοδο πεπερασμένων όγκων ώστε να διακριτοποιηθούν οι μερικές διαφορικές εξισώσεις του πεδίου ροής. Στη μέθοδο αυτή οι εξισώσεις ολοκληρώνονται στον όγκο ελέγχου, προκειμένου να αποκτηθεί η διακριτοποιημένη λύση της εξίσωσης σε κάθε κόμβο. Το σύνολο των κόμβων (nodes) και των κελιών (cells) αποτελεί το πλέγμα (mesh) του πεδίου.

Οι υπολογιστικοί κώδικες ρευστομηχανικής (Computational Fluid Dynamics methods) είναι κώδικες που κάνουν χρήση αριθμητικών μεθόδων προκειμένου να επιλύσουν προβλήματα ρευστομηχανικής. Κάποιοι από αυτούς τους κώδικες είναι οι εξής: OPENFOAM, ANSYS FLUENT, Six Sigma, PHOENICS κτλ. Στην παρούσα εργασία ο υπολογιστικός κώδικας που χρησιμοποιείται είναι της ANSYS FLUENT. Ο κώδικας αυτός, αλλά και κάθε τέτοιος κώδικας, αποτελείται από τα παρακάτω κύρια μέρη:

1. **Προεπεξεργαστής (Pre-processor):** Σε αυτό το στάδιο γίνεται η διαδικασία της προεπεξεργασίας των δεδομένων του μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα αφού έχει παραχθεί η γεωμετρία του μοντέλου με προγράμματα CAD (στην παρούσα εργασία με το πρόγραμμα AUTOCAD της AUTODESK), η γεωμετρία του μοντέλου εισάγεται προς περαιτέρω επεξεργασία σε κατάλληλη σουίτα. Στην εργασία, για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα SpaceClaim (www.spaceclaim.com). Στο σημείο αυτό, της επεξεργασίας της γεωμετρίας, εξάγονται από το πεδίο ροής όλα τα στερεά σώματα και παράγεται το υπό μελέτη ρευστό πεδίο (Fluid Domain). Επίσης γίνεται επεξεργασία των γεωμετρικών δεδομένων εισόδου.

Από εκεί η γεωμετρία του μοντέλου μπορεί πλέον να εισαχθεί στην σουίτα για την κατασκευή του υπολογιστικού πλέγματος (meshing editor – <http://www.ansys.com/products/platform/ansys-meshing>). Το στάδιο αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς η ποιότητα του υπολογιστικού πλέγματος επηρεάζει τόσο την επίτευξη σύγκλισης της λύσης (ένα κακής ποιότητας πλέγμα δεν εξασφαλίζει σύγκλιση), όσο και την ακρίβεια της λύσης. Ακριβώς επειδή η ποιότητα του υπολογιστικού πλέγματος επηρεάζει τη τελική λύση, διεξάγονται διαδοχικές προσομοιώσεις προκειμένου να διαπιστωθεί η ανεξαρτησία του πλέγματος ως προς την τελική λύση.

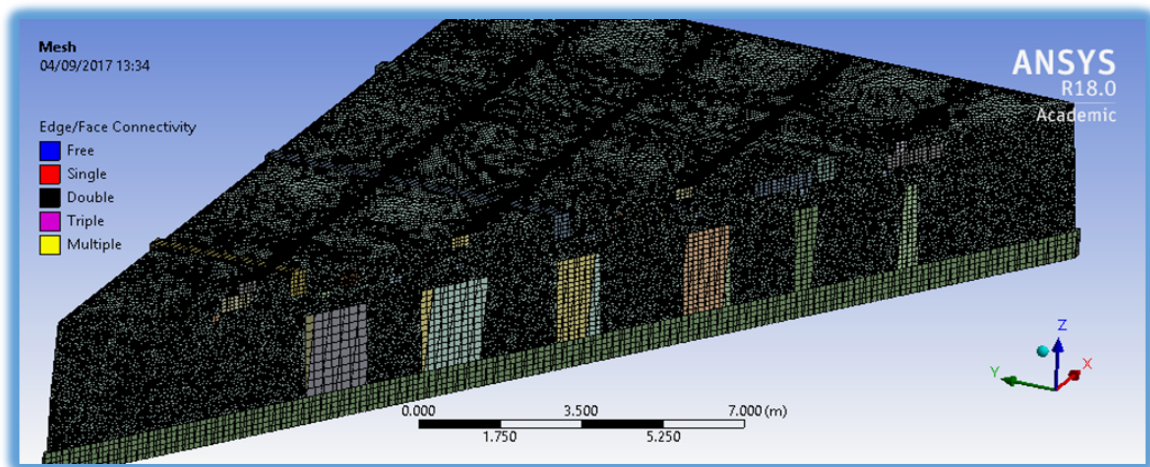


Figure 4.1: Τομή από την υπολογιστικό πλέγμα (mesh) όλης της εγκατάστασης

Pressure-Based Segregated Algorithm

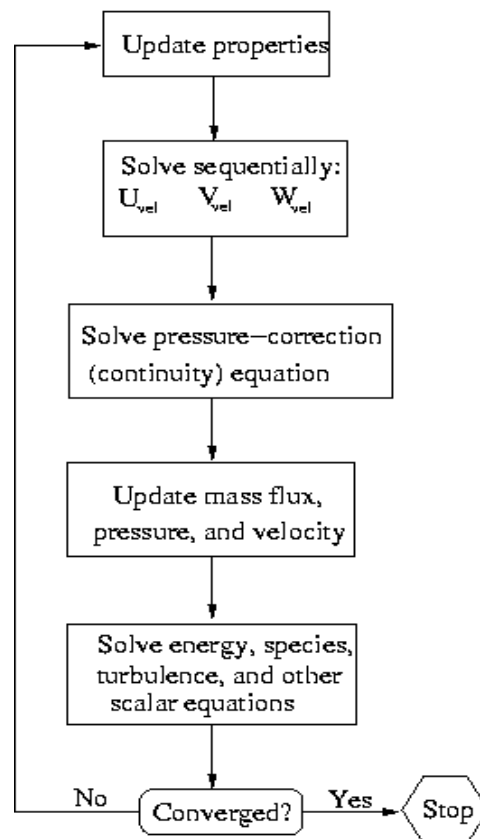


Figure 4.2: Η υπολογιστική διαδικασία που υλοποιεί ο αλγόριθμος του ANSYS [20]

Η ποιότητα του πλέγματος καθορίζεται με δείκτες όπως είναι η λοξότητα των στοιχείων (skewness) και η ορθότητα των πλευρών του στοιχείου του πλέγματος (orthogonal quality). Η επίτευξη πλέγματος καλής ποιότητας απαιτεί την κατανάλωση μεγαλύτερης υπολογιστικής ισχύος από τον προ-επεξεργαστή καθώς και μεγαλύτερο χρόνο για την παραγωγή του. Είναι σαφές ότι η πολυπλοκότητα της γεωμετρίας του υπό-μελέτη χώρου επηρεάζει αρνητικά την

παραγωγή καλού υπολογιστικού πλέγματος, με αποτέλεσμα την δυσκολία της εργασίας ως προς το συγκεκριμένο σημείο. Να σημειώσουμε ότι η παραγωγή του υπολογιστικού πλέγματος (mesh) και η επίλυση των διακριτοποιημένων εξισώσεων σε κάθε κόμβο αυτού είναι οι πλέον χρονοβόρες διαδικασίες για τα μοντέλα.

2. Επιλύτης (solver). Ο επιλύτης αναλαμβάνει να εκτελέσει την υπολογιστική διαδικασία, σύμφωνα με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων ώστε να επιλυθούν οι εξισώσεις συνέχειας, ορμής και ενέργειας που διέπουν το πρόβλημά μας. Ο επιλύτης του ANSYS που χρησιμοποιούμε, είναι ο SIMPLE, στον οποίο βασίζεται πληθώρα αντίστοιχων επιλύσεων και ακολουθεί την παρακάτω λογική:

Πρώτο βήμα: Καθορίζονται οι οριακές συνθήκες και γίνεται υπόθεση (ή για μεγαλύτερη ακρίβεια πειραματική μέτρηση) των αρχικών μεγεθών. Ο σωστός καθορισμός των οριακών συνθηκών είναι κρίσιμη παράμετρος για την ορθότητα του μοντέλου και θα παρουσιαστεί αναλυτικότερα στη συνέχεια. Στις αρχικές συνθήκες επιλέγονται επίσης τιμές και για την τύρβη στις οριακές συνθήκες. Ακόμα πριν ξεκινήσει η επίλυση καθορίζονται παράμετροι στα ενδιάμεσα κελιά του πλέγματος, όπως το είδος των κελιών (εάν είναι στερεά ή ρευστά), εάν υπάρχουν πηγές εκπομπής θερμότητας, αν τα κελιά είναι συζευγμένα με το ρευστό, παράμετροι όπως η θερμική αγωγιμότητα κτλ. Επίσης στην περίπτωση μας έχουν συμπληρωθεί οι εξισώσεις της ορμής με το παράγοντα της βαρύτητας.

Δεύτερο βήμα: Ακολούθως επιλύονται διαδοχικά οι εξισώσεις συνέχειας χρησιμοποιώντας τις προηγούμενα ανανεωμένες αρχικές τιμές.

Τρίτο βήμα: Έπειτα στο τρίτο βήμα επιλύεται η εξίσωση διόρθωσης της πίεσης χρησιμοποιώντας τις προηγούμενες τιμές του πεδίου ταχυτήτων.

Τέταρτο βήμα: Ακολούθως στο τέταρτο βήμα γίνεται διόρθωση με τις τιμές του τρίτου βήματος των υπολογισμών για τη παροχή μάζας, το πεδίο των ταχυτήτων και πιέσεων.

Πέμπτο βήμα: Στο βήμα αυτό επιλύεται η εξίσωση της ενέργειας (στην περίπτωσή μας) με βάση τις τιμές που έχουν αποκτηθεί από τα προηγούμενα στάδια.

Έκτο βήμα: Στο τέλος γίνεται έλεγχος από τον αλγόριθμο επίλυσης για το εάν στο συγκεκριμένο σημείο της υπολογιστικής διαδικασίας έχει επιτευχθεί η σύγκλιση, δηλαδή για το εάν τα υπόλοιπα (residuals) της διαδικασίας έχουν φτάσει σε μια τόσο μικρή ποσότητα στους κόμβους ώστε να έχει επιλυθεί επαρκώς το πρόβλημα. Σε περίπτωση που αυτό δεν έχει γίνει, ο αλγόριθμος εκτελεί νέο βήμα (iteration). Η διαδικασία ακολουθείται μέχρι την τελική σύγκλιση.

3. Μετά- επεξεργαστής (post-processor). Στο σημείο αυτό η ANSYS προσφέρει το περιβάλλον εκείνο, ώστε να γίνει η ανάλυση των αποτελεσμάτων που έχουν παραχθεί από τον solver. Εκεί γίνεται γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων και σε τρισδιάστατη μορφή και

παρουσιάζονται εύληπτα όλα τα βασικά μεγέθη (θερμοκρασία, πίεση, ταχύτητα, τύρβη) του μοντέλου. Επίσης είναι δυνατή η δημιουργία γραφικών παραστάσεων των μεγεθών.

4.3 Σύνοψη βιβλιογραφικής έρευνας γύρω από την επίλυση προβλημάτων πεδίου ροής σε Data Centers με τη χρήση μεθόδων υπολογιστικής ρευστομηχανικής.

Στο σημείο αυτό γίνεται μια επισκόπηση γύρω από την έρευνα που αφορά στην προσομοίωση και υπολογιστική επίλυση των πεδίων ροής σε Data Centers. Η επισκόπηση αυτή είναι ενδεικτική και καθόλου δεν εξαντλεί αυτό το πεδίο. Άλλωστε στο πεδίο αυτό εξελίσσονται συνεχώς νέες ερευνητικές προσπάθειες [23] Προσπαθώντας να κατηγοριοποιήσει κανείς τις προσπάθειες αυτές, προκύπτουν οι παρακάτω κατηγορίες ερευνητικού έργου:

1. Υπολογιστικές εφαρμογές προσομοίωσης και αριθμητικής επίλυσης. Οι προσπάθειες αυτές εφαρμόζονται στα παρακάτω πεδία:

Στη γεωμετρία του χώρου του Data Center, στην τοποθέτηση των rack και στη διανομή του θερμικού τους φορτίου.

Στη διαμόρφωση της παροχής του ψυχρού αέρα και της απαγωγής του.

Στην ενεργειακή αποδοτικότητα και στη διαμόρφωση δεικτών της θερμικής συμπεριφοράς του Data Center.

Στην ανάλυση της θερμικής συμπεριφοράς σε επίπεδο Rack.

Στην δυναμική συμπεριφορά του πεδίου ροής.

2. Έρευνα με πειραματικές μετρήσεις πεδίου και επικύρωση μοντέλων

3. Έρευνα για την ανάπτυξη μοντέλων μειωμένης τάξης και μοντέλων πρόβλεψης της συμπεριφοράς Data Center.

4. Έρευνα για την ενεργειακή αποδοτικότητα και εξοικονόμηση.

5. Έρευνα για εναλλακτικές μεθόδους ψύξης

4.4 Μοντελοποίηση με τη χρήση μεθόδων υπολογιστικής ρευστομηχανικής και το πρόγραμμα ANSYS

Στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση των μεθόδων υπολογιστικής ρευστομηχανικής, καθώς σε αυτό - και σε άλλα πρακτικά προβλήματα της ρευστομηχανικής, δεν είναι δυνατή η εύρεση ακριβούς λύσης. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στην φύση των διαφορικών εξισώσεων που διέπουν τα προβλήματα είτε στις δυσκολίες που υπάρχουν στις παραμέτρους του προβλήματος (πχ τις αρχικές συνθήκες, τα φαινόμενα που συμβαίνουν ενδιάμεσα ενός πεδίου ροής, κα). Έτσι ενώ με τις αναλυτικές λύσεις έχουμε την ακριβή συμπεριφορά ενός συστήματος σε κάθε σημείο του, οι μέθοδοι υπολογιστικής ρευστομηχανικής προσεγγίζουν μεν τις αναλυτικές λύσεις αλλά μόνο σε διακριτά σημεία ενός κατασκευασμένου υπολογιστικού πλέγματος. Τα διακριτά αυτά σημεία ονομάζονται κόμβοι. Επομένως το πρώτο βήμα κάθε υπολογιστικής διαδικασίας είναι η διακριτοποίηση του πεδίου ροής σε έναν αριθμό υποπεριοχών (ή στοιχείων) και κόμβων. Στην περίπτωση μας χρησιμοποιείται η μέθοδος πεπερασμένων όγκων, όπου χρησιμοποιούνται οι ολοκληρωματικές εκφράσεις των εξισώσεων με όρια τα όρια του στοιχείου, προκειμένου να δημιουργηθεί επιλύσιμο σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων. Έτσι για κάθε στοιχείο υποθέτουμε ότι μια συνεχής συνάρτηση παριστάνει την κατά προσέγγιση λύση. Η πλήρης λύση παράγεται από την σύνδεση όλων των επιμέρους εξισώσεων με την προϋπόθεση ότι εξασφαλίζεται η συνέχεια στα κοινά “σύνορα” των επιμέρους στοιχείων.

Το ANSYS, τον κώδικα του οποίου χρησιμοποιούμε (πιο συγκεκριμένα το ANSYS 18 που παρέχεται από το ΕΜΠ για ακαδημαϊκές ανάγκες), είναι ένα λογισμικό με περισσότερες από περίπου 100.000 γραμμές κώδικα [5], ικανό να βρίσκει εφαρμογή σε προβλήματα στατικής, δυναμικής, μεταφοράς θερμότητας και ηλεκτρομαγνητισμού. Το ANSYS έχει το πλεονέκτημα του πλέον δοκιμασμένου λογισμικού υπολογιστικής ρευστομηχανικής αλλά και το μειονέκτημα ότι ο κώδικας του αποτελεί εμπορικό προϊόν στο οποίο δεν μπορεί κάποιος χωρίς άδεια να παρέμβει. Με τη χρήση του ANSYS ένα πλήθος μελετών και δημοσιεύσεων πραγματοποιείται, ίσως μεγαλύτερο σε σύγκριση με κάθε άλλο αντίστοιχο λογισμικό. Παρόλα αυτά, όπως και αυτή η εργασία αποδεικνύει, το ANSYS απαιτεί γνώση της θεωρίας και των πεπερασμένων στοιχείων, της ρευστομηχανικής και των φαινομένων μεταφοράς προκειμένου με επιτυχία να επιλύσει τα προς μελέτη μηχανικά προβλήματα.

4.5 Οι βασικές εξισώσεις

Οι βασικές εξισώσεις που χρησιμοποιεί δεν είναι άλλες από τις κλασσικές εξισώσεις της μηχανικής των ρευστών για τη διατήρηση της μάζας, της ορμής και της ενέργειας. Η διακριτοποίηση των εξισώσεων αυτών και η επίλυσή τους με τις κατάλληλες αρχικές συνθήκες και τον αντίστοιχο αλγόριθμο επίλυσης είναι που μας δίνει σε κάθε σημείο του υπολογιστικού

πλέγματος τις επιθυμητές τιμές που καθορίζουν τα βασικά χαρακτηριστικά του πεδίου ροής: την ταχύτητα, την θερμοκρασία, την πίεση στο χώρο που μελετάμε.

Διατήρηση της μάζας :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (4.1)$$

Διατήρηση της ορμής :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (4.2)$$

Διατήρηση της ενέργειας :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{\tau}_{\text{eff}} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (4.3)$$

Ο όρος k_{eff} ονομάζεται πραγματική αγωγιμότητα (effective conductivity) και καθώς έχουμε αλληλεπίδραση ρευστού – στερεού, ο k_{eff} καθορίζεται τόσο από τις ιδιότητες του ρευστού όσο και του στερεού. για το όρο k_{eff} θα δοθεί ο ορισμός και θα γίνει ειδική αναφορά στη συνέχεια.

Ο όρος S_h αναφέρεται στην ενέργεια που προκύπτει από τις χημικές αντιδράσεις και δεν μας αφορά στην παρούσα εργασία

Ο όρος J_j αναφέρεται στην μοριακή διάχυση της χημικής ουσίας j .

Ο όρος E είναι η γνωστή μας ενθαλπία

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (4.4)$$

4.6 Για την τύρβη και την μοντελοποίησή της

Η τύρβη και η μοντελοποίησή της αποτέλεσαν μια πρόκληση και για την παρούσα εργασία. Καταλαβαίνει κανείς τη δυσκολία, καθώς τα φαινόμενα τύρβης έχουν εξαρχής πολυπλοκότητα και εφόσον μια ολοκληρωμένη προσέγγιση δεν θα μπορούσε να γίνει με απαλοιφή των εξισώσεων της τύρβης. Οι τυρβώδεις ροές είναι μη μόνιμες ροές που έχουν ακανόνιστες διακυμάνσεις της ταχύτητας στις τρεις κατευθύνσεις. Οι διακυμάνσεις αυτές είναι ακανόνιστες αλλά Η τύρβη είναι φαινόμενο που μελετάται σε κάθε βιομηχανική εφαρμογή και

συνίσταται στην συνεχή ανάμειξη γειτονικών στρωμάτων του ρευστού με διαφορετικές μέσες ταχύτητες, που συμβάλει στην μεταφορά ορμής και είναι συνυφασμένη με μέση διάτμηση (οριακά στρώματα, δέσμες, ομόρρους). Σύμφωνα με την προσέγγιση του Reynolds, προσπαθούμε να υπολογίσουμε χρονικά μέσες τιμές των βασικών μεγεθών της τύρβης. Έτσι ο Reynolds διέσπασε την ταχύτητα και τα υπόλοιπα βασικά μεγέθη στην μέση χρονικά τιμή U_i (mean) και στη διακύμανση της u_i' (fluctuating). Οπότε τα βασικά μεγέθη της ταχύτητας, της θερμοκρασίας και της πίεσης μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$\tilde{u}_i = U_i (\text{mean}) + u_i' (\text{fluctuating}) \quad (4.5)$$

$$\tilde{p} = P (\text{mean}) + p (\text{fluctuating}) \quad (4.6)$$

$$\tilde{T} = \bar{T} (\text{mean}) + T' (\text{fluctuating}) \quad (4.7)$$

Και γνωρίζουμε εξ' ορισμού ότι ενώ η μέση τιμή της διακύμανσης είναι μηδέν: $u' = p' = T' = 0$ το γινόμενο των μέσω τιμών είναι διάφορο του μηδενός : $u' \cdot v' \neq 0$.

Το μοντέλο k-ε

Το μοντέλο k-ε είναι το πλέον χρησιμοποιούμενο μοντέλο και χρησιμοποιείται ειδικά για την περίπτωση υπολογιστικών μεθόδων ρευστομηχανικής με εφαρμογή σε Data Center, αλλά και άλλες εφαρμογές. Οι εξισώσεις που επιλύει το ANSYS είναι οι παρακάτω [20 – Ansys User's Manual], προκειμένου να βρεθεί η τυρβώδης κινητική ενέργεια k, και ο ρυθμός καταστροφής κινητικής ενέργειας ε, είναι οι παρακάτω:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (4.8)$$

και

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (4.9)$$

όπου στις παραπάνω εξισώσεις ο όρος G_k αντιστοιχεί στην δημιουργία τυρβώδους κινητικής ενέργειας λόγω των διαφορών στις μέσες ταχύτητες, ο όρος G_b αντιστοιχεί στην δημιουργία κινητικής ενέργειας λόγω άνωσης.

Ο όρος Y_M έχει να κάνει με τη συνεισφορά της διακύμανσης της ταχύτητας στην συμπιεστή ροή.

Οι όροι $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ και $C_{3\varepsilon}$ είναι σταθεροί όροι.

Οι όροι σ_k και σ_ε είναι οι αριθμοί Prandtl της τυρβώδους ροής για το k και το ε αντιστοίχως

Τέλος οι όροι S_k και S_ε είναι όροι πηγής που ορίζονται από τον χρήστη αναλόγως με το πρόβλημα.

Η Τυρβώδης (ή Eddy) συνεκτικότητα, υπολογίζεται αφού έχουν υπολογιστεί τα k και ε από την σχέση:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.10), \quad \text{όπου ο όρος } C_\mu \text{ είναι σταθερά.}$$

Για τις τιμές των σταθερών $C_{1\varepsilon}$ και $C_{2\varepsilon}$, C_μ και σ_k και σ_ε έχουν ορισθεί οι default παρακάτω τιμές:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, \quad C_{2\varepsilon} = 1.92, \quad C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0 \quad \text{και} \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

οι οποίες έχουν καθοριστεί μετά από πειράματα για στοιχειώδης τυρβώδεις ροές και έχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα [20]. Παρά την καλή πειραματική επιβεβαίωση η μελέτη των φαινομένων της τύρβης σε ηλεκτρονικό εξοπλισμό θα μπορούσε να γίνει εκτενέστερα και θα μπορούσε να αποτελεί μελλοντικό πεδίο έρευνας.

4.7 Η σύγκλιση της υπολογιστικής διαδικασίας

Σύγκλιση της υπολογιστικής διαδικασίας είναι εκείνο το σημείο των υπολογισμών όπου δεν απαιτείται άλλη επανάληψη καθώς έχουμε προσεγγίσει ικανοποιητικά την τελική λύση. Πιο συγκεκριμένα στο τέλος κάθε επανάληψης το υπόλοιπο κάθε μεταβλητής προς επίλυση υπολογίζεται και αποθηκεύεται για την επόμενη επανάληψη. Στην ιδανική περίπτωση που η υπολογιστική διαδικασία συνεχίζεται στο άπειρο και ο υπολογιστής έχει άπειρη ακρίβεια αυτά τα υπόλοιπα θα τείνουν στο μηδέν. Στην πράξη τα υπόλοιπα αυτά μειώνονται μέχρι του σημείου να φθάσουν σε μια ελάχιστη προκαθορισμένη τιμή. Τότε σταματάει η υπολογιστική διαδικασία.

Μετά τη διακριτοποίηση η εξίσωση συνέχειας για μια γενική μεταβλητή, έστω την μεταβλητή ϕ , μπορεί να γραφτεί ως:

$$a_P \phi_P = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (4.11)$$

όπου a_P = η κεντρική σταθερά, a_{nb} = οι σταθερές επιρροής από τα γειτονικά κελιά και b : η συνεισφορά της σταθεράς του όρου πηγής S_c της εξίσωσης $S = S_c + S_{p\phi}$.

$$a_P = \sum_{nb} a_{nb} - S_P \quad (4.12)$$

Στην πρώτη εξίσωση ο όρος a_P είναι ίσος με

Το υπόλοιπο R^ϕ που υπολογίζει το ANSYS Fluent [20] είναι η ανισορροπία της πρώτης εξίσωσης, που υπολογίζεται στο σύνολο των κελιών

$$R^\phi = \sum_{\text{cells } P} \left| \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b - a_P \phi_P \right| \quad (4.13)$$

Επειδή ο παραπάνω ορισμός για τα υπόλοιπα είναι ο μη-ανηγμένος στο σύνολο των κελιών, το ανηγμένο υπόλοιπο (residual) ορίζεται ως:

$$R^\phi = \frac{\sum_{\text{cells } P} \left| \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b - a_P \phi_P \right|}{\sum_{\text{cells } P} |a_P \phi_P|} \quad (4.14)$$

Κριτήρια σύγκλισης

Στην περίπτωση μας επιτεύχθηκε σύγκλιση με κριτήρια σύγκλισης τα παρακάτω:

Να φθάσει το υπόλοιπο της εξίσωσης ενέργειας στο 10^{-6} , ενώ η εξίσωση συνέχειας και οι ταχύτητες καθώς όπως και η εξίσωση της τύρβης να φθάσουν να έχουν υπόλοιπο 10^{-3} .

4.8 Μοντελοποίηση με θεώρηση του rack σαν πορώδες μέσο

Στην εργασία αυτή εφαρμόστηκε η θεώρηση του rack σαν αυτό να είναι πορώδες μέσο, προκειμένου να μοντελοποιηθούν καλύτερα τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και ροής. Η

υπόθεση αυτή έγινε προκειμένου να αποτυπωθεί η ροή του αέρα της ψύξης διαμέσου των servers των racks. Επιπλέον στην πράξη η ροή του αέρα εμποδίζεται από τα στερεά μέρη των servers. Οι παράμετροι που αποτυπώνουν αυτή την παρεμπόδιση του αέρα είναι ο συντελεστής αντίστασης του ιξώδους (viscous resistance) και ο συντελεστής αντίστασης αδρανείας (inertia resistance). Οι παράμετροι αυτοί στις τρεις διαστάσεις καθορίζουν το είδος του πορώδους μέσου και ζητούνται από το υπολογιστικό πακέτο ANSYS FLUENT.

Το πορώδες μέσο (porous media) είναι το μέσο εκείνο που αποτελείται από στερεά μέρη που μεταξύ τους παρεμβάλλονται κενά. Διαμέσου των κενών αυτών διέρχεται το ρευστό, δηλαδή ο αέρας ψύξης. Προφανώς όσο πιο πυκνά είναι τα στερεά μέρη του πορώδους μέσου τόσο πιο μεγάλοι είναι οι δύο παραπάνω συντελεστές. Επίσης κατά μήκος του πορώδους μέσου, έχουμε πτώση πίεσης που εμφανίζεται λόγω των δυνάμεων τριβής μεταξύ του ρευστού και των στερεών μερών του πορώδους.

Σε περίπτωση που δεν επιλέγαμε τη θεώρηση του rack σαν πορώδες μέσο, τότε θα είχαμε απλώς το μοντέλο ενός σώματος οι επιφάνειες του οποίου θα συνάλλασαν θερμότητα με τον αέρα ψύξης. Η θεώρηση αυτή εφαρμόστηκε στα πρώτα στάδια της εργασίας. Κρίνεται όμως αρκετά απλουστευτική. Επιπλέον υποβαθμίζει τη εκπομπή θερμότητας προς τον αέρα, αλλά έχει και σαν συνέπεια να αποτυπώνονται μεγάλες θερμοκρασίες μέσα στα στερεά σώματα των Racks.

4.8.1 Ο νόμος του Darcy

Ο νόμος του Darcy, από την ρευστομηχανική, έχει διατυπωθεί για να ποσοτικοποιήσει την πτώση πίεσης σε πορώδη μέσα και είναι:

$$\Delta P = \frac{\mu}{\alpha} * V * \Delta x \quad (4.15)$$

όπου μ = ιξώδες ρευστού (kg/m * s)

α = διαπερατότητα του πορώδους μέσου (m²)

V = η κατά μήκος ταχύτητα (m/s)

Δx = το πάχος του πορώδους μέσου κατά την x-κατεύθυνση

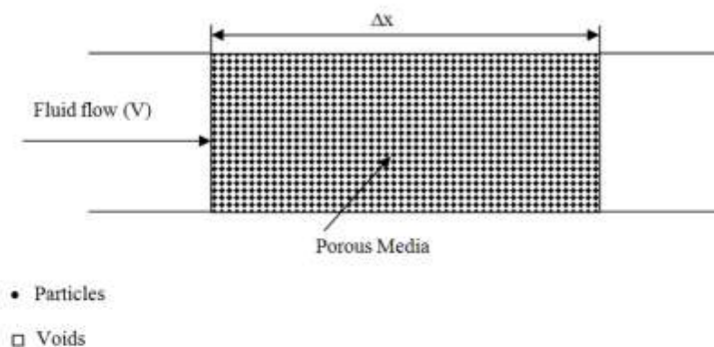


Figure 4.3: Η μοντελοποίηση του Rack με τη θεώρησή του σαν πορώδες μέσο [6]

Στην περίπτωση μας, υποθέτουμε στρωτή ροή (μικρούς αριθμούς reynolds κατά μήκος του πορώδους) και επομένως έχουμε εξίσου τους συντελεστές ιξώδους (viscous resistance) που και τους συντελεστές αδράνειας (inertial resistance) Μέσω του προσδιορισμού της πτώσης πίεσης από το νόμο του Darcy, επιδιώκουμε να υπολογίσουμε την επίδραση της διαπερατότητας α του πορώδους του νόμου του Darcy. Το πορώδες ορίζεται σαν το πηλίκο που στον αριθμητή έχει τον όγκο των διάκενων του ρευστού, ενώ στον παρονομαστή έχει το άθροισμα του όγκου του ρευστού και του στερεού:

$$\text{porosity} = \frac{\text{volume of voids}}{\text{volume of solids} + \text{volume of voids}} \quad (4.16)$$

Καταλαβαίνει κανείς ότι σε μια ηλεκτρονική διάταξη (servers και racks) υπάρχει δυσκολία για τον προσδιορισμό του πορώδους, λόγω της ανομοιομορφίας στη γεωμετρία και στις ιδιότητες των υλικών . Στη συνέχεια γίνεται μελέτη της επίδρασης αυτού του παράγοντα καθώς υπάρχει η παραπάνω αβεβαιότητα. Ο προσδιορισμός του θα μπορούσε να γίνει πειραματικά και η έρευνα αυτή, θα μπορούσε να αποτελέσει μια επέκταση αυτής της εργασίας.

4.8.2 Ο συντελεστής αδράνειας και ιξώδους στο πορώδες μέσο

Ο νόμος του Darcy με την προσθήκη των όρων των απωλειών αδράνειας είναι:

$$\Delta P = -\frac{\mu}{\alpha} V * \Delta x + \frac{1}{2} C * \rho * \Delta x * V \quad (4.17)$$

όπου ο πρώτος όρος εκφράζει τις απώλειες λόγω των φαινομένων του ιξώδους (viscous resistance) και ο δεύτερος όρος εκφράζει τις απώλειες λόγω των δυνάμεων αδράνειας (inertial resistance),

όπου μ = ιξώδες ρευστού ($\text{kg/m} \cdot \text{s}$)

α = διαπερατότητα του πορώδους μέσου (m^2)

V = η κατά μήκος ταχύτητα (m/s)

Δx = το πάχος του πορώδους μέσου κατά την x-κατεύθυνση

C =ο συντελεστής αντίστασης ιξώδους (inertial resistance)

και ρ =η πυκνότητα (kg/m^3)

Οι παραπάνω όροι αντίστασης, που εκφράζονται μέσω των συντελεστών της αδράνειας και του ιξώδους, προσδιορίστηκαν βιβλιογραφικά και θα υπάρξει αναφορά στο επόμενο κεφάλαιο, όπου αναλύονται τα δεδομένα που εισήχθησαν, για την επίλυση του μοντέλου.

4.8.3 Η θεώρηση του Rack σαν πορώδες μέσο και το ANSYS

Αντιμετωπίζοντας την πρόκληση της κατά το δυνατόν συνεπούς προσομοίωσης της ροής στο υπό μελέτη Data Center, προχωρήσαμε στην θεώρησή του Rack σαν πορώδες μέσο [20 – porous media]. Χρησιμοποιώντας τη θεώρηση αυτή του μοντέλου, χρειάστηκε επίσης να τοποθετηθεί και ένας ανεμιστήρας αναρρόφησης ώστε να υπερνικηθεί η πτώση πίεσης λόγω του πορώδους. Την ίδια στιγμή στον όγκο του πορώδους μέσου γίνεται μεταφορά θερμότητας μεταξύ του μέσου και της ροής του ρευστού.

Ενώ η παραπάνω θεώρηση είναι κοντά στην πραγματικότητα των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στο χώρο που μελετάμε, την ίδια στιγμή υπάρχουν μια σειρά από περιορισμοί, υποθέσεις και αβεβαιότητες. Πιο συγκεκριμένα το μοντέλο του πορώδους μέσου ενσωματώνει όρους για την αντίσταση της ροής. Στην ουσία το μοντέλο του πορώδους προσθέτει μια πηγή ορμής στις διακριτοποιημένες εξισώσεις ορμής. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι οι παρακάτω υποθέσεις που αναφέρονται επιγραμματικά:

- Καθώς έχουμε στην πράξη φραγή της ροής λόγω του πορώδους, το ANSYS για προσεγγίσει αυτή την πραγματικότητα χρησιμοποιεί μια επιφανειακή ταχύτητα μέσα στο πορώδες, που βασίζεται στην παροχή έτσι ώστε να εξασφαλίσει την συνέχεια της ταχύτητας κατά μήκος της διεπιφάνειας του πορώδους μέσου.
- Η επίδραση του πορώδους μέσα στα φαινόμενα της τύρβης γίνεται μόνο κατά προσέγγιση
- Υπάρχει η υπόθεση ότι το πορώδες μέσο είναι ιστροπικό μέσο. Η υπόθεση αυτή είναι μεν αναγκαία καθώς μόνο στον όγκο του Rack, προστίθεται ο όρος της ορμής, αλλά

σίγουρα αυτό απέχει από την ανισοτροπική φύση των στοιχείων σε έναν server και τελικά στα Rack που μελετάμε.

- Ο όρος της ορμής που προστίθεται και η αντίσταση στην ορμή λόγω αυτού υπολογίζεται ξεχωριστά από την επίλυση των εξισώσεων της συνέχειας

4.8.4 Οι εξισώσεις της ορμής για το πορώδες μέσο

Το πορώδες μέσο μοντελοποιείται μέσω της προσθήκης στις καθιερωμένες εξισώσεις ορμής ενός όρου ορμής. Αυτός ο όρος πηγής ορμής αποτελείται από δύο διακριτούς όρους που έχουν φυσική σημασία για το είδος των απωλειών ορμής που εκφράζουν. Η εξίσωση είναι :

$$S_i = \sum_{[j=1]}^3 D_{ij} \mu u_j + \sum_{[j=1]}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho (u) u_j \quad (4.18)$$

Ο πρώτος όρος είναι ο όρος των απωλειών λόγω του ιξώδους (viscous resistance term). Ο όρος αυτός εξαρτάται από την ένταση της ταχύτητας u , την δυναμική συνεκτικότητα μ και τον όρο D_{ij} , που αποτελεί σταθερά.

Ο δεύτερος όρος είναι ο όρος των απωλειών λόγω αδράνειας (inertial resistance term). Επίσης αυτός εξαρτάται από το τετράγωνο της ταχύτητας, την πυκνότητα του ρευστού ρ και το συντελεστή C_{ij}

4.9 Φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας σε ηλεκτρονικές συσκευές

Γενικά

Η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή είναι το κύριο φαινόμενο μεταφοράς θερμότητας που μελετάται στην παρούσα εργασία. Παρά το γεγονός ότι στην πραγματικότητα υπάρχουν και οι δύο άλλοι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας (αγωγή και ακτινοβολία) για λόγους μοντελοποίησης καταπιανόμαστε με τον πλέον κυρίαρχο μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας, αυτόν της συναγωγής. Η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή είναι ένα σύνθετο φαινόμενο καθώς η κίνηση του ρευστού επηρεάζει την πτώση πίεσης, την αντίσταση ροής και τελικά τη μεταφορά θερμότητας ενώ για τον προσδιορισμό τους πρέπει να είναι γνωστή η κατανομή της ταχύτητας και της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του σώματος [10].

Μια βασική πρόκληση της παρούσας εργασίας είναι η κατανόηση των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό που φιλοξενείται στο χώρο του Data

Center. Ο ηλεκτρονικός και μικροηλεκτρονικός εξοπλισμός είναι αυτός που εκπέμπει τα θερμικά φορτία και τέτοιος είναι τα κυρίως τα chip, οι χώροι αποθήκευσης αλλά και κάθε ηλεκτρονικό κύκλωμα σε λειτουργία.

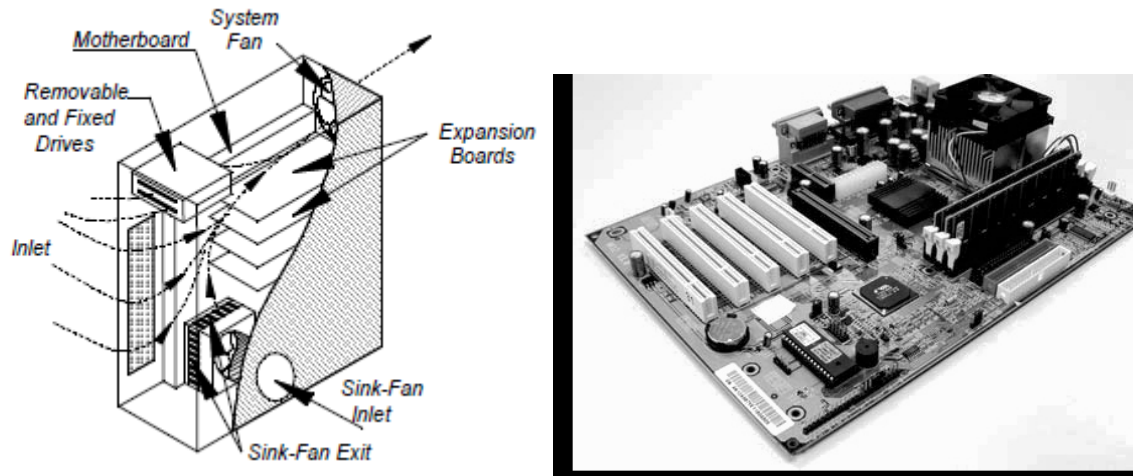


Figure 4.4 και 4.5: Μεταφορά θερμότητας σε ηλεκτρονικές συσκευές-ένα σύγχρονο ερευνητικό πεδίο [8]

4.9.1 Συναγωγή

Η συναγωγή αποτελεί τον μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας που εφαρμόζεται στην παρούσα εργασία. Η συναγωγή (convection) είναι μια διαδικασία μεταφοράς θερμότητας η οποία προϋποθέτει την επίδραση ρευστού δια μέσου του οποίου πραγματοποιείται η μεταφορά θερμότητας από το στερεό στο ρευστό. Εφόσον το ρευστό παραλαμβάνει τη θερμότητα, πραγματοποιείται αύξηση της ενθαλπίας του μέσω της αποθήκευσης ενέργειας από τα κινούμενα μόριά του. Καθώς η συναγωγή είναι άμεσα συνδεδεμένη με το ρευστό, είναι να ανάγκη να γνωρίζουμε την κίνηση του ρευστού και τα χαρακτηριστικά του. Στην περίπτωση μας θεωρούμε στρωτή ροή του ρευστού, διαμέσου του πορώδους μέσου (τα Racks προσομοιώνονται σαν πορώδη μέσα). Στην στρωτή ροή τα σωματίδια του ρευστού ακολουθούν ομαλές και συνεχής γραμμές ροής. Καθώς τα σωματίδια κινούνται κατά τις γραμμές της ροής η μεταφορά θερμότητας λαμβάνει χώρα ως μοριακή συναγωγή μεταξύ της διεπιφάνειας του ρευστού και του στερεού. Από την άλλη μεριά η τυρβώδεις δίνες ακανόνιστων γραμμών ροής έχουν σαν αποτέλεσμα την μεγαλύτερη ανάμειξη του ρευστού και άρα τον μεγαλύτερο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας από το στερεό στο ρευστό.

Στην περίπτωση η συναγωγή είναι εξαναγκασμένη λόγω της λειτουργίας των ανεμιστήρων που βρίσκονται είτε στα επιμέρους ηλεκτρονικά στοιχεία (chips, servers, μέσα αποθήκευσης) είτε στην έξοδο των Racks (π.χ. back door cooler fan). Παρακάτω θα αναλυθεί το μοντέλο για την εισαγωγή ανεμιστήρα αναρρόφησης ο οποίος προσομοιώνει τους εν λειτουργία ανεμιστήρες είτε κάθε server είτε ολόκληρου του rack.

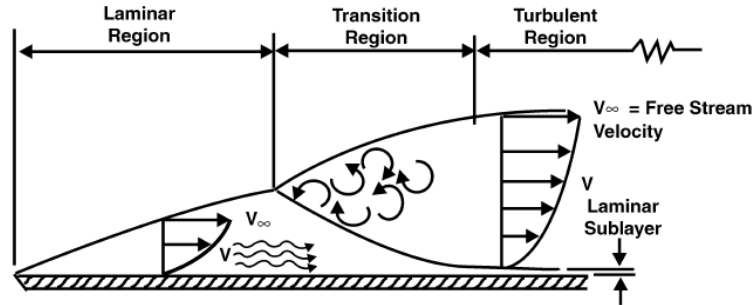


Figure 4.6: Τα φαινόμενα της συναγωγής σε επίπεδη πλάκα [8]

4.9.2 Η επίλυση της εξίσωσης ενέργειας σε πορώδη μέσα στο ANSYS FLUENT

Το ANSYS FLUENT επιλύει την γνωστή εξίσωση ενέργειας στην περιοχή που έχουμε ορίσει ως πορώδες μέσο (τα racks στην περίπτωση μας) με κάποιες τροποποιήσεις σε αυτήν: Αρχικά εισάγει τον όρο της πραγματικής αγωγιμότητας (effective conductivity) της οποίας ο ορισμός θα δοθεί παρακάτω. Ακόμα έχει τροποποιήσεις ως προς τους όρους με μεταβάλλονται με τον χρόνο. Πιο συγκεκριμένα η εξίσωση είναι:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma\rho_f E_f + (1-\gamma)\rho_s E_s) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho_f E_f + p)) = \nabla \cdot \left[k_{\text{eff}} \nabla T - \left(\sum_i h_i J_i \right) + (\bar{\tau} \cdot \vec{v}) \right] + S_f^h \quad (4.19)$$

όπου E_f = η ολική ενέργεια του αέρα

E_s = η ολική ενέργεια του στερεού

γ = το πορώδες του μέσου

k_{eff} =η πραγματική θερμική αγωγιμότητα του μέσου

S_f^h = η πηγή ενθαλπίας του ρευστού

4.9.3 Η πραγματική αγωγιμότητα (effective conductivity) του πορώδους μέσου

Για τον υπολογισμό των φαινομένων μεταφοράς στο πορώδες μέσο, το ANSYS FLUENT εισάγει και υπολογίζει τον όρο της πραγματικής αγωγιμότητας (effective conductivity). Αυτός ορίζεται ως:

$$k_{\text{eff}} = \gamma k_f + (1 - \gamma) k_s \quad (4.20)$$

όπου:

γ = το πορώδες του μέσου

k_f = η θερμική αγωγιμότητα του ρευστού μέσου

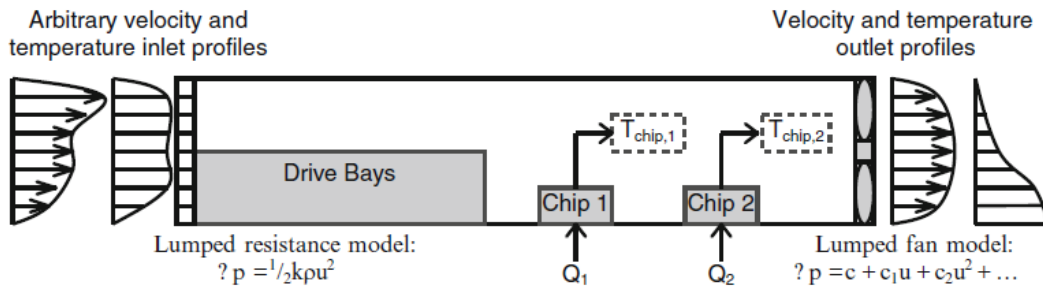
k_s = η θερμική αγωγιμότητα του στερεού μέσου

Παρατηρούμε από την παραπάνω σχέση ότι όσο αυξάνει το πορώδες προς τη μονάδα, δηλαδή έχουμε λιγότερο όγκο στερεού και περισσότερο όγκο ρευστού, τόσο μειώνεται αντιστοίχως η συνεισφορά του k_s και αυξάνεται η συνεισφορά του k_f , στον υπολογισμό του k_{eff} .

Κατά τους αριθμητικούς υπολογισμούς εισάγουμε τα k_f του αέρα και του στερεού και το ANSYS υπολογίζει για την επίλυση της εξίσωσης ενέργειας το k_{eff} .

4.9.4 Μοντέλα μειωμένης τάξης ή “compact” μοντέλα

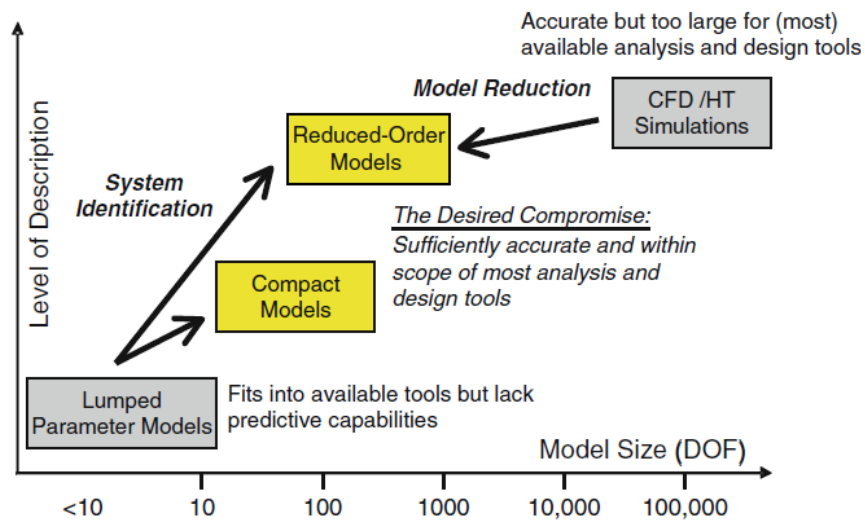
Τα μοντέλα υπολογιστικής ρευστομηχανικής και μεταφοράς θερμότητας για Data Centers, όπως και το δικό μας, απαιτούν πολύ μεγάλη υπολογιστική ισχύ παρέχοντας βέβαια χρήσιμες πληροφορίες. Μια λύση για το πρόβλημα αυτό είναι τα μοντέλα που διαμορφώνονται με μια σειρά απλοποιήσεων ή αλλιώς “compact” μοντέλα. Τα μοντέλα αυτά εξασφαλίζουν ένα καλό συμβιβασμό μεταξύ λεπτομέρειας στα αποτελέσματα και υπολογιστικής ισχύος που καταναλώνουν. Το μοντέλο “compact” είναι εκείνο που χρησιμοποιεί έναν αριθμό εσωτερικών παραμέτρων και αρχικών οριακών συνθηκών ώστε να καταλήξει σε αποτελέσματα στην έξοδο. Οι εσωτερικές αυτές παράμετροι ορίζουν και τη διαφορά ανάμεσα στα συγκεντρωμένα (ή “lumped” μοντέλα) και στα “compact” μοντέλα. Τα συγκεντρωμένα ή lumped μοντέλα μπορεί να προκύπτουν από πειραματικά δεδομένα. Για παράδειγμα η μαθηματική σχέση πτώσης πίεσης και ταχύτητας (ή η χαρακτηριστική ενός ανεμιστήρα) αποτελεί ένα σύνηθες συγκεντρωμένο μοντέλο.



Εικόνα 4.7: Ένα “compact” μοντέλο μελέτης της θερμικής συμπεριφοράς ηλεκτρονικού εξοπλισμού (server) [8]

Τα “compact” μοντέλα έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για το σχεδιασμό ηλεκτρονικών συσκευών και τη μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς τους. Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούν λιγότερους βαθμούς ελευθερίας (πχ αναλύονται σε μια διάσταση) και χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό κρίσιμων παραμέτρων (πχ συντελεστής συναγωγής). Η ακρίβεια του μοντέλου είναι εξαρτώμενη από την ακρίβεια της προσέγγισης παραμέτρων όπως η γεωμετρία, οι παράμετροι των υλικών, η θερμική αντίσταση, η εκπομπή της θερμότητας, τα προφίλ της ταχύτητας κ.α.

Ο τελικός στόχος των “compact” μοντέλων είναι η ενσωμάτωση των αποτελεσμάτων του στο μοντέλο του Data Center. Η διαδικασία κατά την οποία κανείς παίρνει ένα μοντέλο με ένα μεγάλο αριθμό βαθμών ελευθερίας και καταλήγει σε ένα μικρότερο αριθμό, λέγεται παραγωγή μοντέλου «μειωμένης τάξης». Παρακάτω παρουσιάζονται οι διαβαθμίσεις των μοντέλων σε σχέση με τον αριθμό των βαθμών ελευθερίας (DOF – Degrees of Freedom) που εισέρχονται στα μοντέλα.



Εικόνα 4.8: Τα μοντέλα μελέτης σε σχέση με τους βαθμούς ελευθερίας [1]

4.9.5 Ο συντελεστής συναγωγής θερμότητας

Το πρακτικό πρόβλημα που αντιμετωπίσαμε είναι ο προσδιορισμός της τιμής για τον συντελεστή συναγωγής της θερμότητας. Ως γνωστόν η εξίσωση που διέπει την συναγωγή είναι

$$q = h * A * (T_w - T_{ref}) \quad (4.21)$$

όπου q : ο ρυθμός μεταφοράς της θερμότητας

h : ο συντελεστής της συναγωγής

A : η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας

T_w : η θερμοκρασία στο τοίχωμα

T_{ref} : η θερμοκρασία αναφοράς του ρευστού

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας είναι ένας συντελεστής που εξαρτάται από το είδος της ροής του ρευστού, τις ιδιότητες του ρευστού και την όλη γεωμετρία του πεδίου ροής. Ο συντελεστής συναγωγής συχνά εκφράζεται στην αδιάστατη μορφή του, που καλείται αριθμός Nusselt ,

$$Nu = \frac{h L_c}{k} \quad (4.22)$$

,ο οποίος αριθμός Nusselt είναι με τη σειρά συνάρτηση των παρακάτω αδιάστατων αριθμών Re και Pr . Στην περίπτωση της εξαναγκασμένης ροής, έχουμε:

$$Nu = F_1(Nu) = F_2(Re) * F_3(Pr) ,$$

όπου Re = ο αριθμός Reynolds

Pr = ο αριθμός Prandtl

Το χαρακτηριστικό μήκος L_c προσδιορίζει πως ο αριθμός Nusselt μπορεί να έχει διαφορετικές τιμές για διαφορετικές περιπτώσεις γεωμετρίας. Επομένως έχει διαφορετική τιμή στην περίπτωση ροής σε κανάλι (εκεί έχουμε την υδραυλική διάμετρο του καναλιού) και διαφορετική τιμή για ροή πάνω από στερεή πλάκα.

Στην περίπτωσή μας έχουμε ροή ρευστού γύρω από μια πολύπλοκη γεωμετρία (servers, chips, δίσκοι), και επομένως μια περιοχή περαιτέρω μελέτης θα μπορούσε να είναι ο προσδιορισμός του συντελεστή συναγωγής.

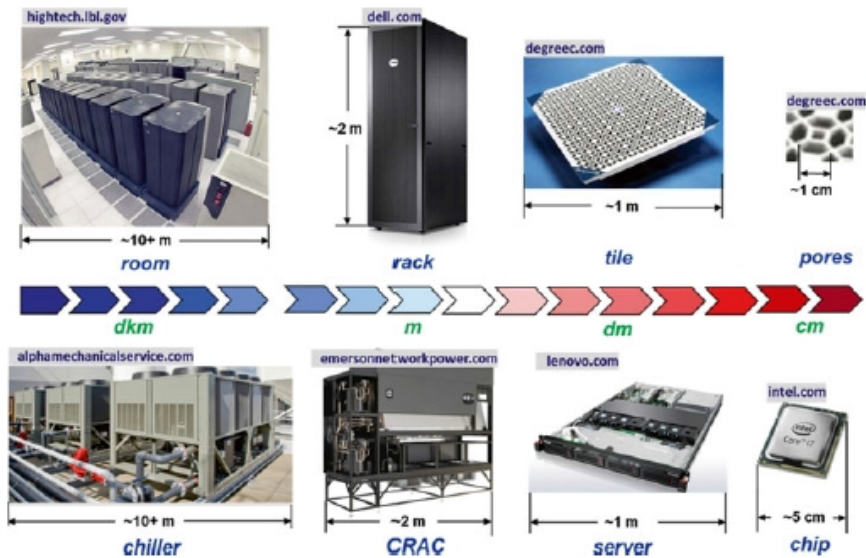


Figure 4.9: Ο προσδιορισμός των παραμέτρων της συναγωγής: σύνθετο πρόβλημα καθώς η κλίμακα των φαινομένων είναι μεγάλη [3]

Ο συντελεστής συναγωγής θα μπορούσε να προσδιοριστεί είτε πειραματικά είτε και με μαθηματικό τρόπο γνωρίζοντας τις κατανομές της θερμοκρασίας του ρευστού. Καθώς αυτό είναι σχεδόν ακατόρθωτο οι αναλυτικές μαθηματικές λύσεις δεν μπορούν να εφαρμοστούν και μόνο οι υπολογιστικές λύσεις με τη χρήση μοντέλων υπολογιστικής ρευστομηχανικής είναι δυνατόν να καταλήξουν σε αποδεκτά αποτελέσματα. Ο πειραματικός προσδιορισμός θα μπορούσε να καταλήξει σε μια μέση τιμή του συντελεστή συναγωγής μετρώντας την διαφορά θερμοκρασίας ανάντι και κατάντι της ηλεκτρονικής συσκευής ή του Rack και υπολογίζοντας την τιμή της διεπιφάνειας ρευστού στερεού. Στην περίπτωση μας χρησιμοποιούμε βιβλιογραφική τιμή για συναγωγή με ρευστό τον αέρα πάνω από υλικό αλουμίνιο, που προσομοιώνει κατά κύριο λόγο επιφάνειες ηλεκτρονικού εξοπλισμού.

Η επίδραση του αριθμού Reynolds

Στην περίπτωση μας, αυτή της εξαναγκασμένης συναγωγής αέρα, ο αριθμός Nusselt, ο οποίος όπως είπαμε αποτελεί άλλη έκφραση του συντελεστή συναγωγής, εξαρτάται από τις τιμές του αριθμού Reynolds, ο οποίος ως γνωστόν είναι:

$$\Re = \frac{\rho V L_c}{\mu} \quad (4.23)$$

όπου ρ : η πυκνότητα του ρευστού

V : η ταχύτητα του ρευστού

L_c = το χαρακτηριστικό μήκος της ροής και μ η συνεκτικότητα του ρευστού

Καθώς ο αριθμός Reynolds εκφράζει επίσης το λόγο των δυνάμεων αδράνειας προς τις δυνάμεις τριβής (ή τις δυνάμεις λόγω ιξώδους), στην δική μας περίπτωση της ροής διαμέσου πορώδους μέσου, σύμφωνα με την προσομοίωση των Racks σαν πορώδη μέσα, έχουμε $Re < 1$ και μικρότερη την επίδραση των δυνάμεων λόγω τριβής σε σχέση με τις δυνάμεις αδράνειας στο ρευστό. Ο παράγοντας που κυριαρχεί, στην περίπτωσή μας, είναι αυτός της αντίστασης λόγω του ιξώδους (viscous resistance).

Η επίδραση του αριθμού Prandtl

Ο αριθμός Nusselt εξαρτάται πέρα από τον αριθμό Re και από τον αριθμό Pr. Ο αριθμός Prandtl εκφράζει το λόγο του κινηματικού ιξώδους του ρευστού (ν) προς τη θερμική διάχυση του ρευστού:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu c_p}{k} \quad (4.24)$$

Η κινηματική συνεκτικότητα $\nu = \mu/\rho$ αναφέρεται και ως μοριακή διάχυση και αποτελεί ένα μέτρο της ροής της ορμής των σωματιδίων του ρευστού. Από την άλλη ο όρος της θερμικής διάχυσης

$$a = \frac{k}{\rho c_p} \quad (4.25)$$

αποτελεί μέτρο της μεταφοράς θερμότητας και ενέργειας στα μόρια του ρευστού. Έτσι αν έχουμε $Pr > 1$ θα έχει αναπτυχθεί το προφίλ της ταχύτητας γρηγορότερα από ότι το προφίλ της θερμοκρασία στο ρευστό και ανάποδα εάν έχουμε $Pr < 1$. Στην περίπτωση μας, όπου αέρα μπορούμε να υποθέσουμε Pr περίπου ίσο με την μονάδα

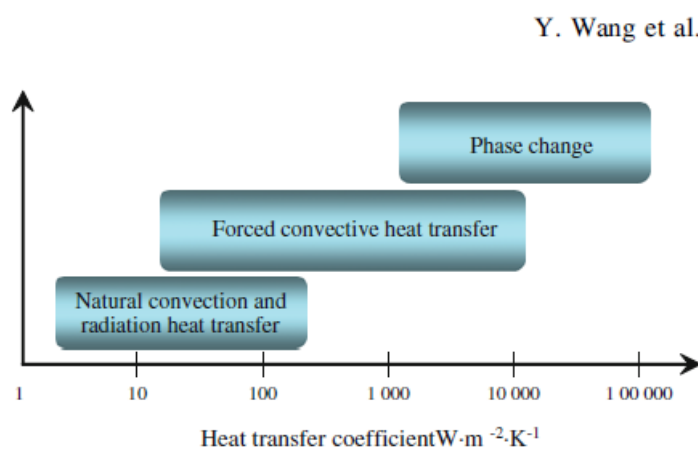


Figure 4.10: Το εύρος του συντελεστή συναγωγής για την εξαναγκασμένη συναγωγή [3]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : Μετρήσεις και δεδομένα εισαγωγής στο μοντέλο

Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό αναγράφονται τα δεδομένα που εισήχθησαν στο υπολογιστικό μοντέλο. Έτσι αναπτύσσονται τα στοιχεία της γεωμετρίας του μοντέλου και τα δεδομένα των μετρήσεων. Τα τελευταία ορίζουν και τις αρχικές συνθήκες του μοντέλου. Στο σημείο αυτό είναι σκόπιμο να πούμε για το σκεπτικό του ορισμού των αρχικών συνθηκών. Αυτές πρέπει να ορίζονται με τρόπο που να μην επηρεάζουν με λανθασμένο τρόπο την τελική λύση. Δηλαδή αν για παράδειγμα ορίζαμε το πεδίο ταχυτήτων π.χ. στην έξοδο των racks καταλαβαίνει κανείς ότι επεμβαίναμε και στα τελικά αποτελέσματα. Οπότε η αρχή που ακολουθείται είναι ο ορισμός αρχικών συνθηκών ακριβώς εκεί που εισέρχεται και εξέρχεται ο αέρας για την ψύξη. Ακόμα δεδομένο εισαγωγής αποτελεί το μοντέλο για τους ανεμιστήρες αναρρόφησης, όπου εκεί χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από εμπορικό ανεμιστήρα. Τέλος εισήχθησαν δεδομένα για την θερμική εκπομπή, τα οποία προέκυψαν από τις καταναλώσεις του πίνακα διανομής της ισχύος, που βρίσκεται στο χώρο.

5.1 Βασικά στοιχεία για το μοντέλο

Η υπό μελέτη περίπτωση αφορά σε πραγματικό, εν λειτουργία Data Center μεγάλου χρηματοπιστωτικού φορέα. Το Data Center φιλοξενεί τον υπολογιστικό εξοπλισμό για την αποθήκευση όλων των δεδομένων και των υπηρεσιών του φορέα, σε Ελλάδα και εξωτερικό, λειτουργώντας σαν ο «εγκέφαλος» της επιχείρησης. Η διαρρύθμιση του κυρίως χώρου του Data Center, είναι η συνήθης διαρρύθμιση «ψυχρού-θερμού διαμερίσματος» ή “HACA: Hot Aisle – Cold Aisle”. Για την απαγωγή του θερμού αέρα χρησιμοποιούνται διατάξεις αεραγωγών στην οροφή του χώρου. Τα racks που είσαι σε χρήση, είναι διαφορετικών κατασκευαστών, έχουν τοποθετηθεί σε διαφορετικές περιόδους και έχουν δυναμική και μεταβαλλόμενη κατανάλωση ισχύος. Για την ψύξη του χώρου είναι σε χρήση επτά (7) μονάδες ψύξης που είναι τοποθετημένες σε γειτνιαζοντα χώρο, εκτός του χώρου στον οποίο είναι εγκατεστημένα τα rack. Η ροή του ψυχρού αέρα εξέρχεται από τις μονάδες ψύξης, διέρχεται από ψευδοδάπεδο ύψους 0,60 cm και εισέρχεται στο χώρο από επιδαπέδια στόμια με αποκλίσεις στην ταχύτητα και κατά δεύτερο λόγο στην θερμοκρασία του αέρα. Στην συνέχεια ο αέρας ψύξης διέρχεται από τις θερμές επιφάνειες του ηλεκτρονικού εξοπλισμού του χώρου και συναλλάσει θερμότητα με αυτές. Ο θερμός πλέον αέρας, απάγεται από τα στόμια των αεραγωγών που είναι εγκατεστημένοι στην οροφή, στα θερμά διαμερίσματα του χώρου.

Για την επίλυση του σύνθετου αυτού πεδίου ροής και των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας σε αυτό χρησιμοποιούνται μέθοδοι υπολογιστικής ρευστομηχανικής.

5.2 Στοιχεία της γεωμετρίας του χώρου

Η γεωμετρία του χώρου στηρίχθηκε στα “as build” μηχανολογικά σχέδια του χώρου του Data Center. Από την κάτοψη των σχεδίων αυτών εμείς προχωρήσαμε στην τρισδιάστατη απεικόνιση όλων των στοιχείων, από τις δοσμένες διαστάσεις κάθε αντικειμένου του χώρου. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η τρισδιάστατη απεικόνιση του χώρου χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα AUTOCAD της AUTODESK που παρέχεται από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Στην διαδικασία αυτή δεν παραλήφθηκε κανένα από τα στοιχεία της γεωμετρίας, καθώς αυτά επηρεάζουν το πεδίο ροής. Έτσι πέρα από την ακριβή θέση των racks, των αεραγωγών, των στομιών εισαγωγής του ψυχρού αέρα και απαγωγής του θερμού, μπορεί κανείς να δει κάθε γεωμετρική λεπτομέρεια, όπως το δίκτυο οπτικών ινών στην οροφή, τα δομικά στοιχεία (κολώνες, δοκάρια). Βέβαια δεν έχει αποτυπωθεί η γεωμετρία των όσων υπάρχουν εντός του ψευδοδαπέδου (καλωδιώσεις, στηρίξεις) όμως δεν επηρεάζει το μοντέλο μιας και η μελέτη του μοντέλου γίνεται με τα στοιχεία του αέρα όπως αυτός εξέρχεται από το ψευδοδάπεδο. Συγκεκριμένα αναφέρουμε ότι έχουν αποτυπωθεί στην ακριβή τους θέση 81 racks, 8 αεραγωγοί απαγωγής θερμού αέρα με στόμια απαγωγής θερμού, και στόμια εισαγωγής θερμού στο ψευδοδάπεδο. Ως προς τις απλοποιήσεις της γεωμετρίας του χώρου, θα πρέπει να πούμε ότι οι απλοποιήσεις αφορούν στα κενά μεταξύ των racks, που ενώ στην πράξη είναι κενά των 5 cm, στο μοντέλο (αλλά και στα “as build” σχέδια) για λόγους εξοικονόμησης υπολογιστικής ισχύος έχουν απαλειφθεί. Για τα στοιχεία της γεωμετρίας να αναφέρουμε ότι σε χώρο εκτός του κύριου χώρου του Data Center βρίσκονται εγκατεστημένοι οι επτά ψυκτικές μονάδες ακριβείας (CRAC: Computer Room Air Conditioning unit), οι οποίοι και προσάγουν με τους ανεμιστήρες τους τον ψυχρό αέρα στο ψευδοδάπεδο και αναρροφούν λόγω της μικρότερης πίεσης στα στόμια απαγωγής τον θερμό αέρα.

Οι διαστάσεις του χώρου είναι : εμβαδόν: $23,5 \text{ m} \times 14 \text{ m} = 329 \text{ m}^2$, ύψος: 3,15 m. Οπότε ο συνολικός όγκος του υπό μελέτη χώρου είναι: $329 \text{ m}^2 \times 3,15 \text{ m} = 1036,35 \text{ m}^3$.

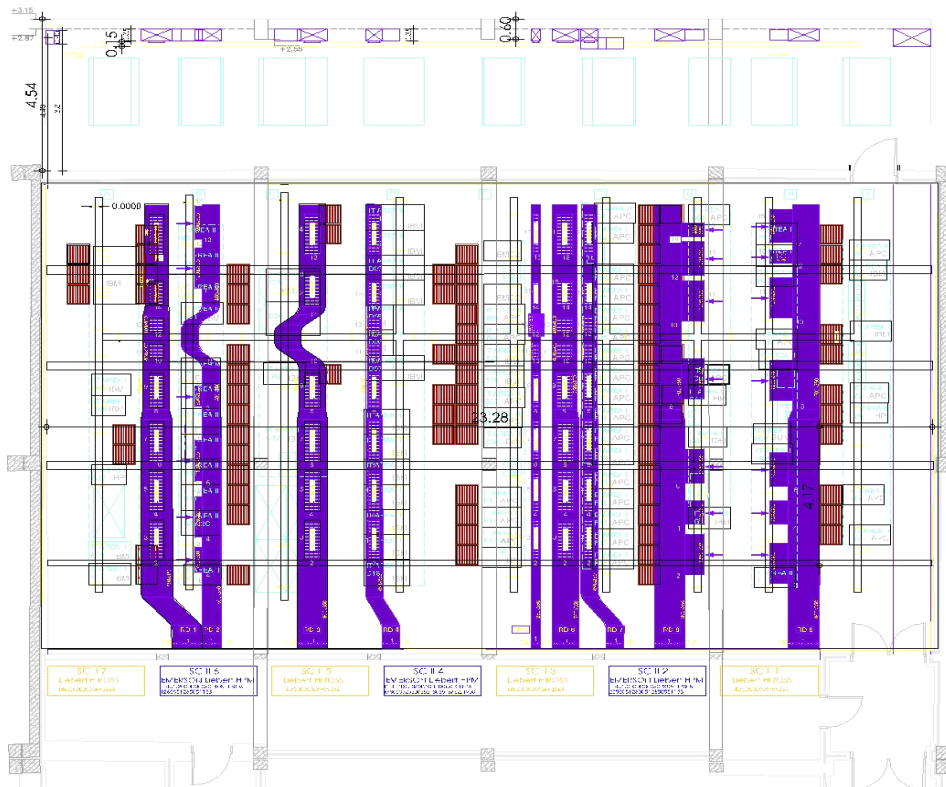


Figure 5.1: Τα σχέδια «ως κατασκευασθεί- as built» από τα οποία έγινε η τρισδιάστατη απεικόνιση του μοντέλου της εργασίας. Το μοντέλο εργασίας επιβεβαιώθηκε και από επισκέψεις το χώρο του Data Center.

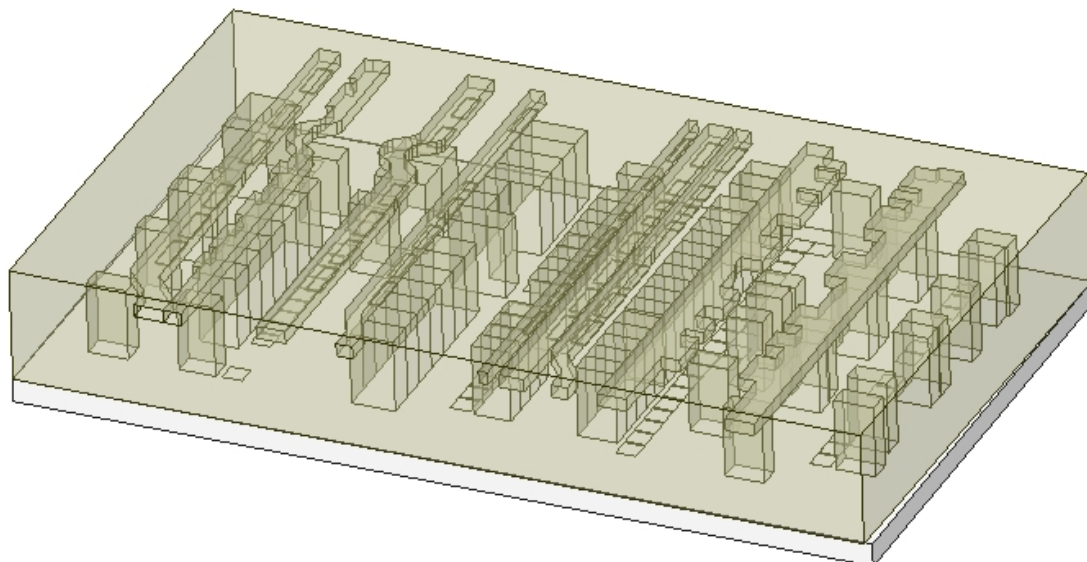


Figure 5.2: Το τρισδιάστατο μοντέλο της γεωμετρίας του χώρου του Data Center σχεδιάστηκε με το πρόγραμμα AUTOCAD της AUTODESK.

5.3 Το υπολογιστικό πλέγμα του μοντέλου

Η παραγωγή του υπολογιστικού πλέγματος αποτελεί βασική διαδικασία στην επίλυση του πεδίου ροής. Το υπολογιστικό πλέγμα δημιουργήθηκε με χρήση του ANSYS Meshing προγράμματος. Το τελευταίο αποτελεί εσωτερικό στοιχείο του ANSYS Fluent. Η παραγωγή του υπολογιστικού πλέγματος επηρεάζει την ακρίβεια, την σύγκλιση αλλά και την ταχύτητα προκειμένου να επιτευχθεί τελική λύση. Επιπλέον στην εργασία, αλλά αυτό είναι και ο κανόνας, ο χρόνος που απαιτήθηκε προκειμένου να παραχθεί το πλέγμα του μοντέλου, αποτελεί ένα σημαντικό ποσοστό του συνολικού χρόνου της επίλυσης. Ακόμα όσο καλύτερη είναι η ποιότητα και η ακρίβεια του πλέγματος, η προσαρμογή του στη γεωμετρία και στις συνθήκες του πεδίου ροής, τόσο καλύτερα θα γίνει η πιστοποίηση των αποτελεσμάτων του μοντέλου.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής: Εισήχθησαν τα γεωμετρικά στοιχεία του μοντέλου. Αυτά αποτελούνται από το πεδίο ροής του ρευστού και τα στερεά σώματα (αεραγωγοί, racks, κτλ). Σημειώνουμε ότι για την παραγωγή του πεδίου του ρευστού έχει προηγηθεί διαδικασία αφαίρεσης από αυτό του όγκου των στερεών σωμάτων. Επομένως το πεδίο του ρευστού αφενός έχει τον μεγαλύτερο όγκο, αφετέρου έχει γεωμετρικές ιδιαιτερότητες. Επιπλέον για το στοιχείο του πεδίου ροής απαιτήθηκε και το μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος. Συγκεκριμένα εκεί εφαρμόστηκε η μέθοδος κατασκευής μη-δομημένου (unstructured) πλέγματος με χρήση τετράεδρων στοιχείων. Βασικές παράμετροι της ποιότητας του πλέγματος είναι η λοξότητα (skewness) ή/και η ποιότητα των ορθογωνίων στοιχείων (orthogonal quality). Ο έλεγχος της ποιότητας γίνεται πρώτα μέσω των παραμέτρων αλλά και μέσω πειραμάτων για την ανεξαρτησία του πλέγματος. Ακόμα μια παράμετρος που συνδέεται και με την ποιότητα του πλέγματος είναι η παράμετρος γ^{plus} .

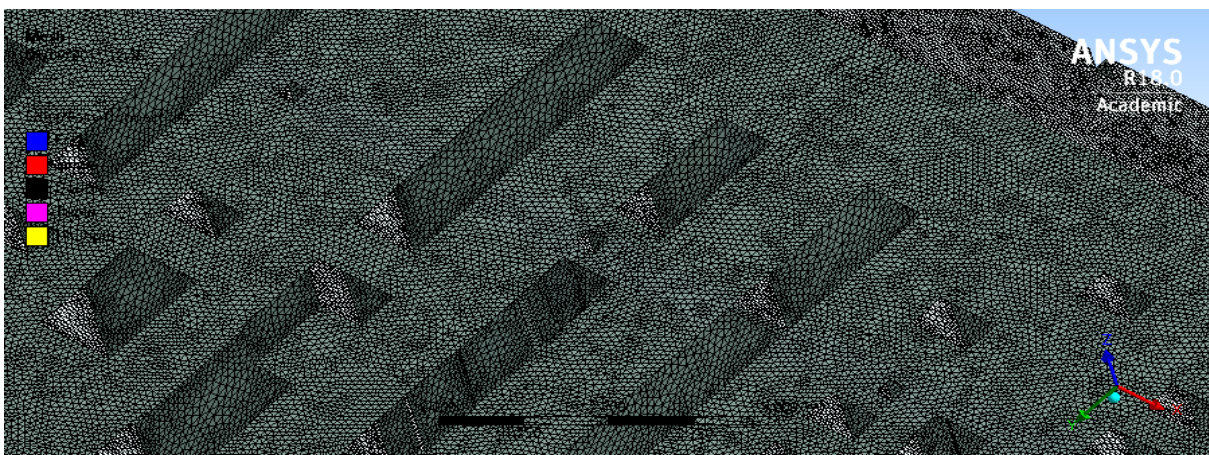


Figure 5.3: Πλευρά του πλέγματος του ρευστού από το οποίο έχουν αφαιρεθεί οι όγκοι των στερεών

5.3.1 Μελέτη της επίδρασης του υπολογιστικού πλέγματος

Η παραγωγή του υπολογιστικού πλέγματος αποτελεί, όπως αναφέρθηκε κρίσιμη διαδικασία για την επίλυση του πεδίου ροής. Η ποιότητα του πλέγματος αποτιμάται από παράγοντες που χαρακτηρίζουν την ποιότητα του πλέγματος, όπως είναι η λοξότητα (skewness) των στοιχείων ή/και η ποιότητα των ορθογωνίων πλευρών των στοιχείων (orthogonal quality). Η ποιότητα του πλέγματος βελτιώνεται, όσο μειώνεται το ελάχιστο μέγεθος των στοιχείων του πλέγματος. Όμως όσο μικρότερο είναι το ελάχιστο μέγεθος των στοιχείων, τόσο αυξάνει η απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς που απαιτείται για το μοντέλο. Σε περίπτωση που δεν είναι ποιοτικό το υπολογιστικό πλέγμα δεν επιτυγχάνεται καθόλου σύγκλιση (convergence) και δεν είναι εφικτή η επίλυση του μοντέλου. Επομένως χρειάζεται να επιτύχουμε ένα καλό συμβιβασμό μεταξύ της ποιότητας του πλέγματος και των υπολογιστικών πόρων που διαθέτουμε.

Σημαντική διαδικασία είναι να διαπιστώσουμε το βαθμό εξάρτησης των αποτελεσμάτων από το υπολογιστικό πλέγμα. Καταλαβαίνει κανείς ότι εφόσον στην υπολογιστική ρευστομηχανική έχουμε προσέγγιση των ακριβών λύσεων στα διακριτά σημεία (λέγονται κόμβοι ή nodes), θα έχουμε και εξάρτηση των αποτελεσμάτων από το πλέγμα των κόμβων και των στοιχείων.

Η διαδικασία με την οποία διαπιστώνουμε την εξάρτηση ή μη των τελικών λύσεων από το πλέγμα λέγεται μελέτη ανεξαρτησίας του υπολογιστικού πλέγματος. Αυτή πραγματοποιείται ως εξής:

Δίνουμε σαν μεταβλητή εισόδου για την δημιουργία του πλέγματος το μήκος του ελάχιστου στοιχείου (min element size). Βάση αυτής της μεταβλητής προχωράμε στην δημιουργία πλέγματος. Κάθε φορά έχουμε λοιπόν ένα πλέγμα που έχει περισσότερους κόμβους και στοιχεία, όσο μικραίνουμε το μήκος του ελάχιστου στοιχείου. Για κάθε τέτοιο πλέγμα προχωράμε στην επίλυση του πεδίου, με τις ίδιες οριακές συνθήκες. Όταν διαπιστώσουμε πως οι παράμετροι εξόδου που έχουμε ορίσει παύουν να μεταβάλλονται σημαντικά, τότε καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως το υπολογιστικό πλέγμα δεν επηρεάζει την τελική λύση. Σαν παραμέτρους εξόδου έχουμε ορίσει τις μέγιστες θερμοκρασίας του πεδίου ροής, του όγκου του rack και της διεπιφάνειας μεταξύ ρευστού-στερεού. Στο πρώτο μοντέλο (1 rack) έχουμε πλέγμα με 7.237.188 κόμβους ενώ στο δεύτερο μοντέλο (30 racks) έχουμε πλέγμα με 17.722.849 κόμβους.

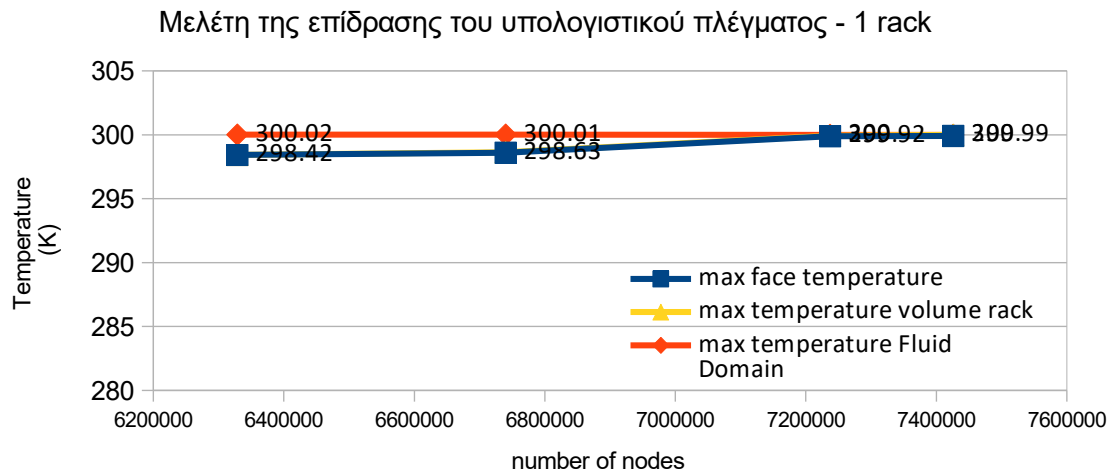


Figure 5.4: η επίδραση του υπολογιστικού πλέγματος – 1 rack

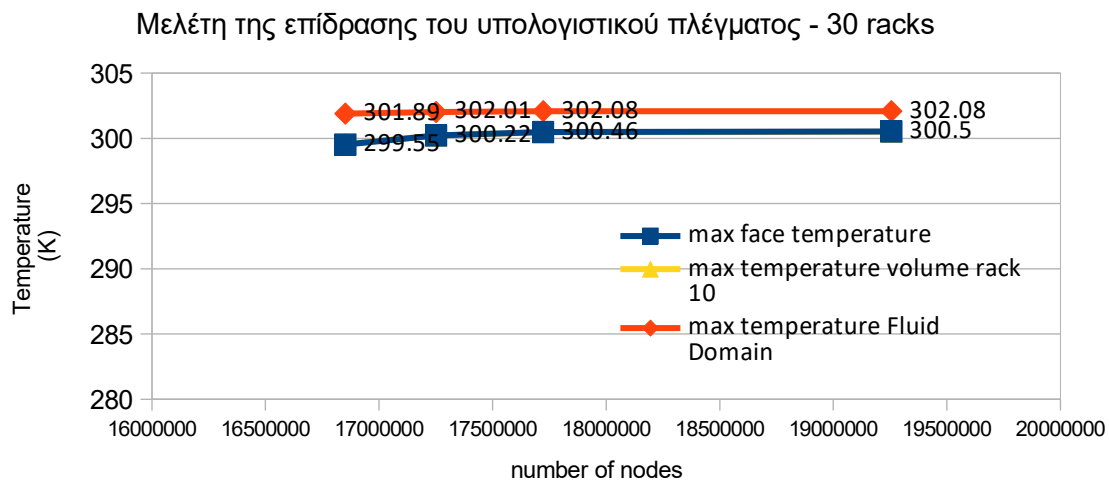


Figure 5.5: η επίδραση του υπολογιστικού πλέγματος – 30 racks

Στα παραπάνω διαγράμματα βλέπουμε ότι υπάρχουν μικρές διαφοροποιήσεις στις μέγιστες θερμοκρασίες στο/στα racks και επομένως και στη διεπιφάνεια στερεού ρευστού. Αυτές οι διαφορές δεν είναι μεγάλες, αλλά και μετά από έναν αριθμό κόμβων και μετά γίνονται αμελητέες. Όταν διαπιστώσουμε την ανεξαρτησία του πλέγματος ως προς τα αποτελέσματα, μπορούμε να διαπιστώσουμε ποιο είναι το βέλτιστο εκείνο πλέγμα που παράγει ακριβές αποτέλεσμα με τους λιγότερους υπολογιστικούς πόρους.

5.4 Στοιχεία για την ποιότητα του μοντέλου κοντά στα στερεά όρια – η τιμή y^+

Όπως γνωρίζουμε από τη ρευστομηχανική [25], προκειμένου να αποδοθεί αποτελεσματικά η ροή του οριακού στρώματος κοντά στα στερεά όρια είναι ανάγκη να παρουσιάσουμε τις τιμές της μεταβλητής y^+ . Επειδή ισχύει ότι:

$$y^{\text{plus}} = \frac{y}{\frac{\nu}{u^{\text{star}}}} \quad (5.5)$$

$$\text{και } u^{\text{star}} = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (5.6), \quad \text{άρα τελικά προκύπτει ότι } (5.7) \quad y^{\text{plus}} = \frac{y}{\nu} \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$$

βλέπουμε ότι η το μέγεθος που θα πάρει η τιμή y^{plus} εξαρτάται από το ύψος y του πρώτου κόμβου από το στερεό όριο. Επίσης βέβαια εξαρτάται και από την ένταση των διατμητικών δυνάμεων τ_w . Εμείς ιδανικά θα θέλαμε μικρές τιμές της τιμής y^{plus} , μικρότερες του 300, έτσι ώστε το πλέγμα μας να είναι ικανό να αποδώσει τα φαινόμενα του οριακού στρώματος.

Το ANSYS Fluent μπορεί να μας δώσει διαγράμματα της τιμής y^{plus} . Τα διαγράμματα αυτά τα παραθέτουμε εδώ καθώς είναι ενδεικτικά της ποιότητας του πλέγματος και συνεπώς αποτελούν μαζί με το πλέγμα σημαντικό στοιχείο εισόδου του προβλήματος.

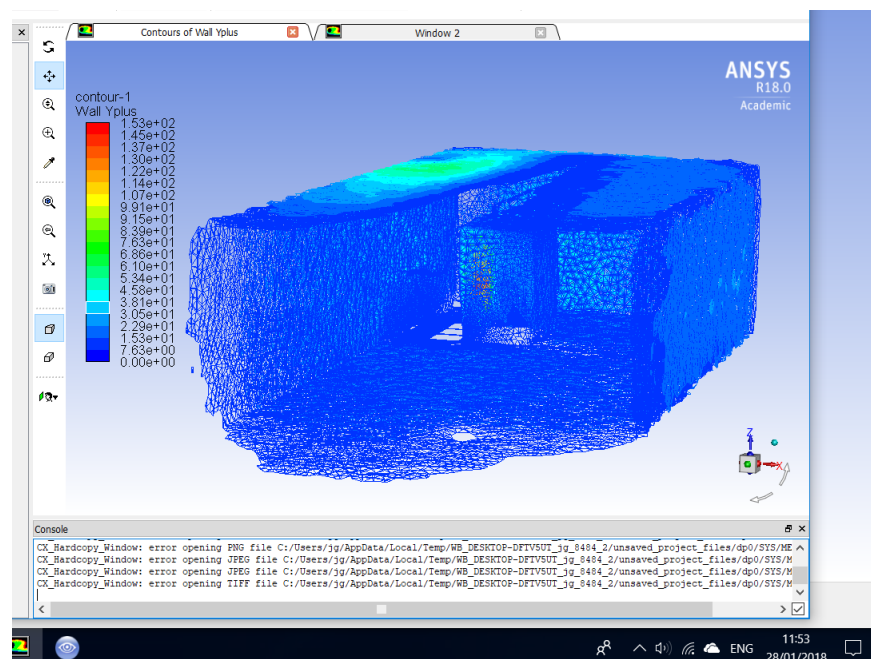


Figure 5.5: Αποτύπωση της παραμέτρου y^{plus} η οποία παίρνει την τιμή 150 στην μπροστινή όψη του Rack

Παρατηρούμε ότι οι τιμές του γ^{plus} φθάνουν στην τιμή 150. Το σημείο εκείνο είναι στην όψη του rack, όπου έχουμε έντονη τη ροή από το στόμιο εισόδου και άρα έχουμε μεγάλη τιμή τ_w . Επομένως μόνο στο σημείο αυτό βρισκόμαστε κοντά στην εξωτερική περιοχή του οριακού στρώματος και στο σημείο αυτό χρειαζόταν να εφαρμόσουμε πυκνότερο υπολογιστικό πλέγμα. Ωστόσο η περιοχή είναι μικρή και έχει μικρή επίδραση στην επίλυση του πεδίου

5.5 Οι μετρήσεις των οριακών συνθηκών του Data Center

Μια βασική παράμετρος που καθορίζει την πιστότητα της προσομοίωσης που επιχειρείται, είναι οι οριακές συνθήκες που επικρατούν. Βέβαια και οι υπόλοιποι παράγοντες παίζουν ρόλο όπως η γεωμετρία του μοντέλου, η φύση των φαινομένων στο πεδίο ροής (αν είναι μεταβατικά ή όχι τα φαινόμενα της ροής, η τύρβη) αλλά οι οριακές συνθήκες καθορίζουν την αριθμητική επίλυση.

Προκειμένου η αβεβαιότητα αυτού του παράγοντα να περιοριστεί, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ταχύτητας και θερμοκρασίας του ψυχρού αέρα που εξέρχεται από τα επιδαπέδια στόμια εισόδου. Επίσης πραγματοποιήθηκαν αντίστοιχες μετρήσεις στο στόμιο απαγωγής του θερμού αέρα των αεραγωγών στο ταβάνι του χώρου του Data Center. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε κατάλληλος εξοπλισμός μετρήσεων του Εργαστηρίου Τεχνολογικών Καινοτομιών Προστασίας Περιβάλλοντος: Το ανεμόμετρο AM-4204 της Lutron, το οποίο είναι ανεμόμετρο που κάνει χρήση ηλεκτροδίου θερμού σύρματος και είναι κατάλληλο για μετρήσεις ροής αέρα σε χαμηλές ταχύτητες, έως 0.2 m/sec.



figure 5.6: Η διαδικασία των μετρήσεων, το όργανο μέτρησης της Lutron και ο «ψυχρός διάδρομος»

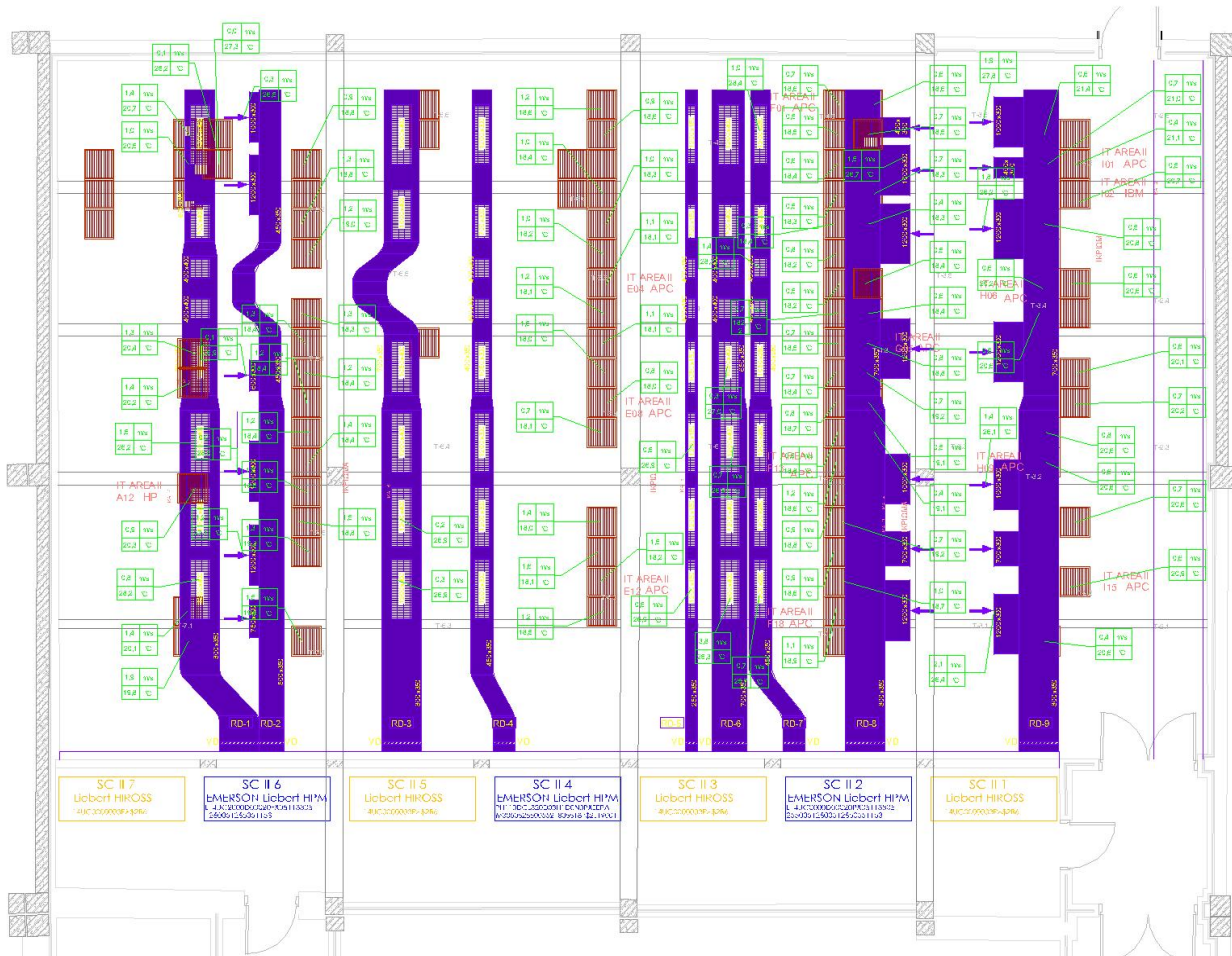


Figure 5.7: Ο «χάρτης» μετρήσεων ταχύτητας και θερμοκρασίας στα στόμια εισόδου και εξόδου

Από τις μετρήσεις έγινε δυνατόν να εξαχθεί ένας “χάρτης” με κάθε στόμιο εισαγωγής και απαγωγής με τα μεγέθη της ταχύτητας του αέρα και της θερμοκρασίας αυτού. Προκειμένου να γίνεται ευκολότερα αντιληπτό το πεδίο των ταχυτήτων εισόδου του ψυχρού αέρα, φτιάξαμε τον χάρτη της εικόνας 5.8, όπου μπορεί κανείς να δει με βάση την κλίμακα στα δεξιά τις ταχύτητες εισόδου. Εκεί παρατηρούμε ότι στα δεξιά της κάτοψης, όπως την βλέπουμε έχουμε υψηλότερες ταχύτητες (περισσότερα κόκκινα στόμια), ενώ η πυκνότητα των racks, είναι μικρότερη, συγκρινόμενη με την κεντρική περιοχή του χώρου. Ακόμα στα δεξιά της κάτοψης όπως τη βλέπουμε έχουμε μικρότερες ταχύτητες, ενώ στην κεντρική περιοχή έχουμε μια μεγάλη ποικιλία ταχυτήτων. Για την ανομοιογένεια αυτή πιθανά αίτια είναι: το μπλοκάρισμα της ροής του αέρα στο ψευδοδάπεδο (πχ λόγω της διέλευσης καλωδιώσεων, σωληνώσεων ή/και άχρηστων υλικών) η διαφορετική απόδοση των κλιματιστικών, οι απώλειες αέρα.

Ως προς τις μετρήσεις της θερμοκρασίας, βλέπουμε ότι η θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 18 °C και 19 °C, ενώ σε λίγες περιπτώσεις φτάνει και στους 20 °C. Επειδή μέσα στο ψευδοδάπεδο (plenum) γίνεται ανάμιξη των ρευμάτων αέρα που εξέρχονται των επτά (7)

κλιματιστικών μονάδων, που βρίσκονται στο διπλανό χώρο όπως αυτός φαίνεται στην κάτοψη, η παρατήρηση της διακύμανσης των θερμοκρασιών που εξέρχονται από τα στόμια, ίσως σχετίζεται με την διαφορετική απόδοση των κλιματιστικών. Επίσης άλλη μια παράμετρος είναι αυτή της δαιδαλώδους γεωμετρίας του ψευδοδαπέδου: εκεί επειδή υπάρχουν μια σειρά από καλωδιώσεις, σωληνώσεις ύδρευσης, πυρόσβεσης και άλλος εξοπλισμός, όπως πυραυλιχενεύσεις, είναι αναμενόμενο να μην πραγματοποιείται η ανάμιξη των ρευμάτων του αέρα πριν την είσοδό του στο χώρο του Data Center. Βέβαια η παραπάνω γεωμετρία είναι ανεπιθύμητη και συμβάλει στην μετατροπή της δυναμικής ενέργειας που προσδίδουν οι ανεμιστήρες των μονάδων σε ενέργεια που καταναλώνεται ασκόπως σε αντιστάσεις. Μια επιπλέον παράμετρος της ανομοιομορφίας είναι οι ποικίλες απώλειες λόγω διαρροών του ψευδοδαπέδου..

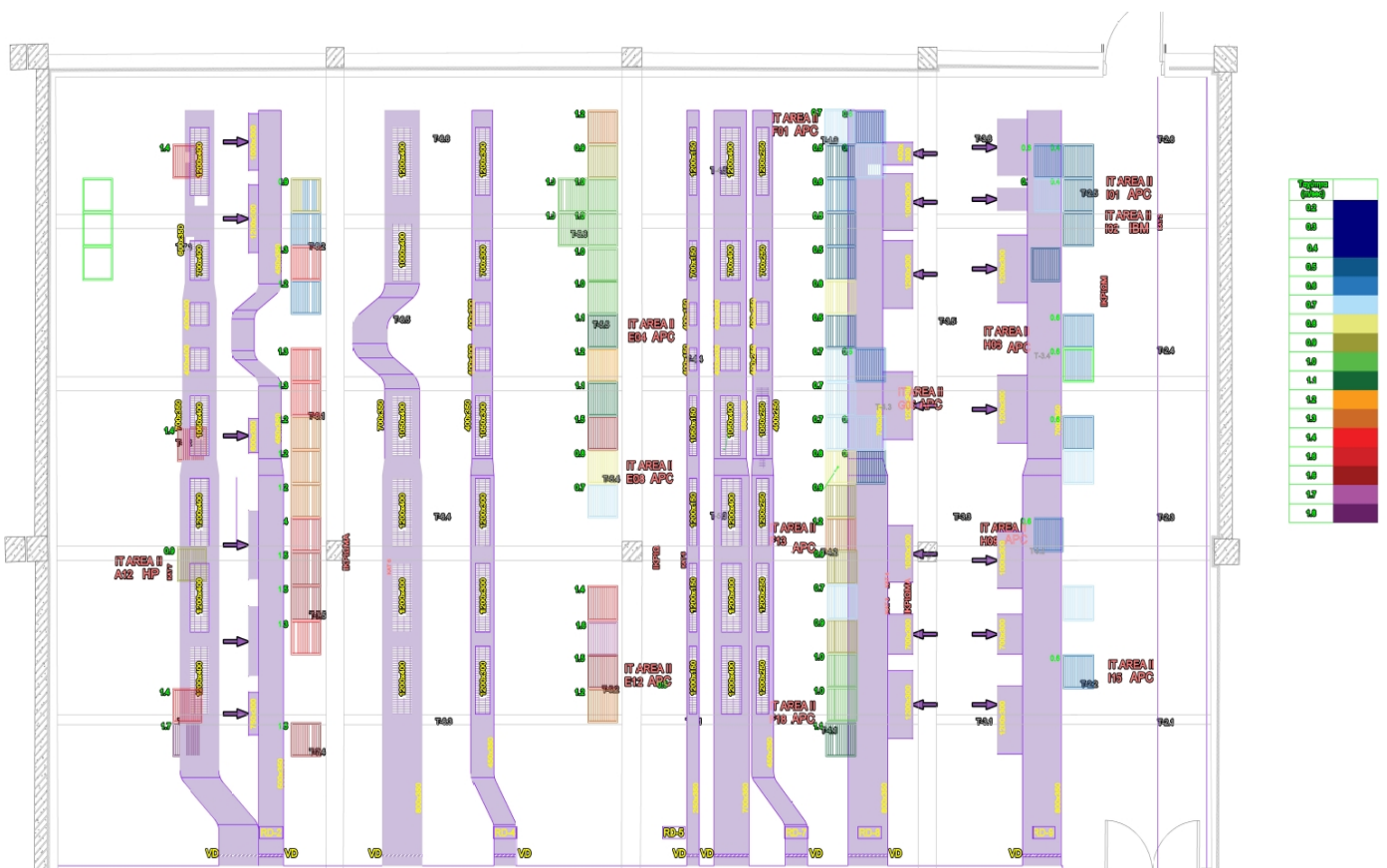
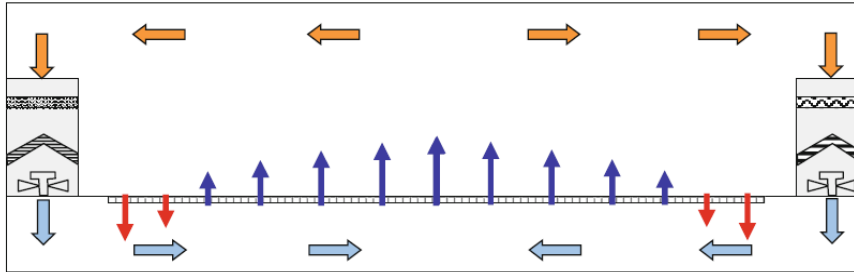


Figure 5.8: Ο οπτικοποιημένος «χάρτης» μετρήσεων ταχύτητας και θερμοκρασίας στα στόμια εισόδου

Ως προς τις μετρήσεις της ταχύτητας εδώ έχουμε αποκλίσεις μέσα σε ένα φάσμα από 0,5 m/sec έως και 1,9 m/sec. Εδώ ισχύουν όλες οι παραπάνω αιτίες που αναφέρθηκαν και μάλιστα επηρεάζουν την ταχύτητα περισσότερο – κάτι που αναμένονταν- σε σχέση με τη θερμοκρασία.



Εικόνα 5.9: η ανομοιογένεια στο μέτρο της ταχύτητας εισόδου, λόγω των συνθηκών που επικρατούν στο ψευδοδάπεδο (plenum) [1]

5.4 Στοιχεία της ενεργειακής κατανάλωσης στο Data Center

Βασική παράμετρος για την εξαγωγή συμπερασμάτων στο υπό μελέτη Data Center είναι η ενεργειακή κατανάλωση του IT εξοπλισμού που φιλοξενείται στο χώρο. Όμως αν και στα σύγχρονα υπολογιστικά κέντρα, υπάρχει συνεχής μέτρηση των καταναλώσεων ανά Rack, τόσο μέσω κατάλληλων συσκευών μέτρησης ηλεκτρικών μεγεθών όσο και μέσω κατάλληλου λογισμικού, στην περίπτωσή μας δεν έχουμε την πληροφορία για την ανά Rack κατανάλωση ή η πληροφορία αυτή δεν είναι προς διάθεση. Παρόλα αυτά, με την πολύτιμη βοήθεια των μηχανικών της εγκατάστασης και μέσω των πινάκων κατανομής ισχύος του χώρου, έχουμε την κατανάλωση ανά κύκλωμα διανομής ισχύος, επομένως έχουμε την συνολική κατανάλωση η οποία με δεδομένο ότι υπάρχουν 81 racks που έχουν αποτυπωθεί στο χώρο μας δίνει με αναγωγή την κατανάλωση ανά rack. Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζουν μικρές διαφοροποιήσεις, αναλόγως του υπολογιστικού φόρτου που εξυπηρετούν, ωστόσο μας δίνουν μια ενδεικτική εικόνα για την κατανάλωση στο Data Center. Επίσης λόγω μετασκευών είναι δυνατόν από ένα κύκλωμα ισχύος από τα παρακάτω να τροφοδοτείται και ένα rack το οποίο είναι σε άλλη σειρά. Το αποτέλεσμα είναι να μην μπορούμε να εξάγουμε ανά σειρά και ανά κύκλωμα ισχύος την ισχύ ανά rack. Τα στοιχεία αυτά που μας δόθηκαν από τους μηχανικούς συντήρησης και λειτουργίας του Data Center, παρουσιάζονται παρακάτω:

α/α	Κύκλωμα κατανομής ισχύος	kW
1	A1	26,6
2	B1	2,9
3	A2	10,3
4	B2	23

5	A3	3,7
6	B3	20,5
7	A4	18
8	B4	19,8
9	A5	4,1
10	B5	20,2
ΣΥΝΟΛΟ		149,1
Ανά Rack κατανάλωση		1,84

Πίνακας 5.1: Πίνακας κατανομής ισχύος από τους ηλεκτρικούς πίνακες διανομής

Επομένως το μέγεθος αυτό, προσαυξημένο στα 2 kW/ rack χρησιμοποιείται προκειμένου κάθε rack να αποτελεί πηγή ενέργειας στο πεδίο ροής που μελετάται.

5.5 Στοιχεία του ανεμιστήρα απαγωγής αέρα σε rack

Οι οριακές συνθήκες του ανεμιστήρα των Racks (Fan Boundary Conditions)

Το μοντέλο του ανεμιστήρα εισάγεται σαν μια συγκεντρωμένη παράμετρος, η οποία χρησιμοποιείται για να καθορίσει την επίδραση ενός ανεμιστήρα σε ένα ευρύτερο πεδίο ροής. Η οριακή συνθήκη του ανεμιστήρα χρησιμοποιείται, ώστε να μπορεί κανείς να εισάγει τα δεδομένα από την χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας από ένα εμπορικό ανεμιστήρα η οποία και καθορίζει τη σχέση μεταξύ της αύξησης της πίεσης και της παροχής (ή ταχύτητας) του ανεμιστήρα. Καθώς το μοντέλο αυτό του ανεμιστήρα είναι συγκεντρωμένο προφανώς δεν παρέχει μια περιγραφή της ροής κατά μήκος των πτερυγίων του ανεμιστήρα. Παρόλα αυτά δεν μας ενδιαφέρει αυτό καθώς ο ανεμιστήρας είναι τοποθετημένος εντός του rack και η εργασία δεν καταπιάνεται με τα φαινόμενα της ροής εντός του πορώδους του rack. Αυτό που ενδιαφέρει είναι η απότομη άνοδος της πίεσης που πετυχαίνει ο ανεμιστήρας (pressure jump).

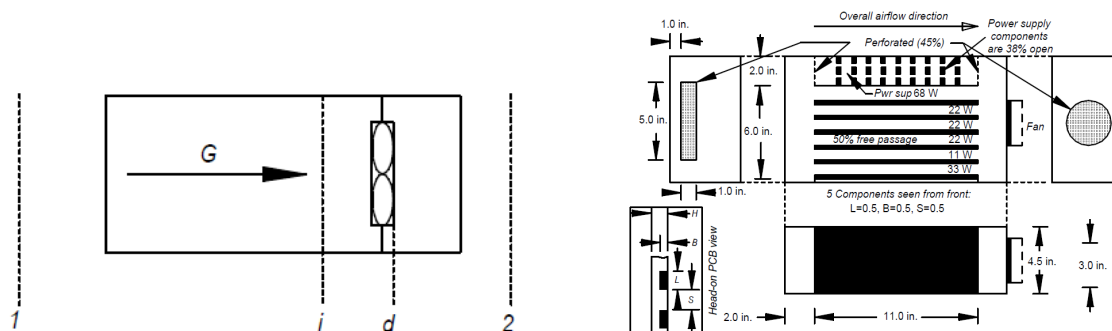


Figure 5.10: Ο τρόπος που εισάγεται ο ανεμιστήρας των racks και η πραγματική κατάσταση του ανεμιστήρα σε servers [8]

Οι εξισώσεις του ανεμιστήρα

Ο ανεμιστήρας θεωρείται να είναι απείρως λεπτός (χωρίς διαστάσεις) και επιφέρει με τρόπο ασυνεχή μια άνοδο της πίεσης. Η σχέση που διέπει αυτή τη διαφορά πίεσης ΔP είναι μια πολυωνμική σχέση που έχει αποκτηθεί από τη χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας ($\Delta P-v$) ενός εμπορικού ανεμιστήρα (back door cooler fan).

Στην περίπτωση αυτή, της πολυωνμικής σχέσης $\Delta P-v$ του ανεμιστήρα η σχέση που εισάγεται είναι:

$$\Delta p = \sum_{n=1}^N f_n u^{n-1} \quad (5.1)$$

Όπου Δp είναι η άνοδος της πίεσης

f_n είναι οι n σταθεροί όροι του πολυωνύμου και

u είναι το μέτρο της ταχύτητας του πεδίου ροής

Η ταχύτητα u μπορεί να είναι και αρνητική και θετική, έτσι ώστε να δημιουργείται με αρνητική πίεση ανάντι και θετική κατάντι του ορίου στο οποίο έχει τοποθετηθεί ο ανεμιστήρας.

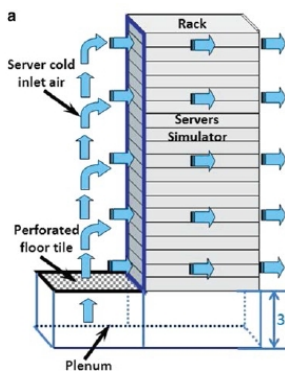


Figure 5.11: Η ροή του αέρα σε ένα Rack [3]

Velocity (m/s)	Pressure (Pa)
0,00	4350,00
9,20	2746,90
15,10	1847,90
20,50	849,00
22,50	0,00

Πίνακας 5.2: Στοιχεία ανεμιστήρα της Airedale [27]

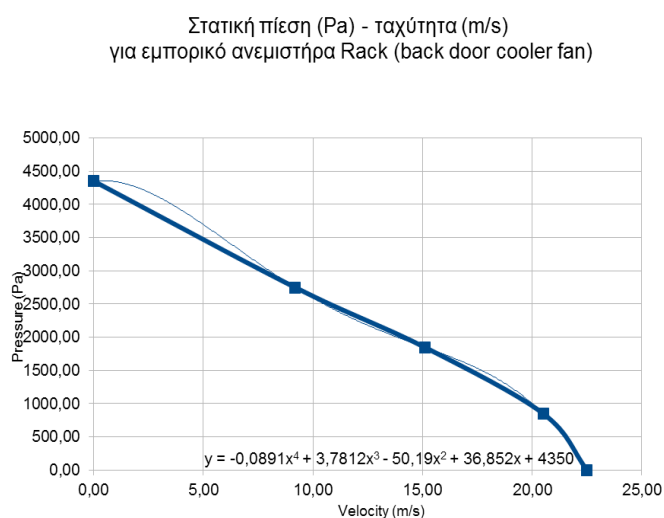


Figure 5.12: Η χαρακτηριστική του ανεμιστήρα του εμπορικού μοντέλου της Airedale

5.6 Η μελέτη της πτώσης πίεσης σε πορώδη μέσα

Στην εργασία αυτή προκειμένου να προσομοιωθεί η ροή διαμέσου των racks, αυτά θεωρήθηκαν σαν πορώδη μέσα. Στα racks γίνεται η παραδοχή της ομοιογένειας των γεωμετρικών και θερμοδυναμικών παραμέτρων, παρά το γεγονός ότι στην πράξη έχουμε έντονη ανομοιογένεια των παραμέτρων αυτών. Η ανομοιογένεια αυτή προκύπτει καθώς κατά μήκος ενός server που βρίσκεται σε ένα rack, υπάρχουν διατάξεις όπως ηλεκτρικά κυκλώματα, αποθηκευτικά μέσα, ολοκληρωμένα κυκλώματα, διατάξεις μνήμης και ανεμιστήρες.

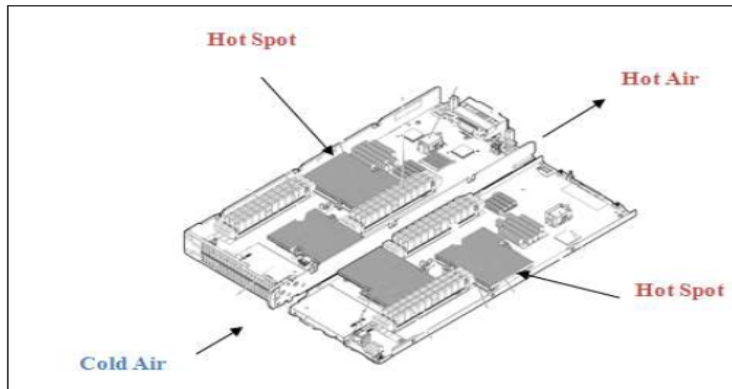


Figure 5.13: Διάταξη server HP g7, όπου φαίνονται οι θερμές περιοχές και η είσοδος και έξοδος του αέρα ψύξης: Ανομοιόμορφο το πεδίο ροής

Παρόλα αυτά υπάρχει η ανάγκη για ένα “compact” μοντέλο που κατά το δυνατόν να μειώνει επιτυχώς όλες τις παραμέτρους σε έναν μικρότερο αριθμό που να είναι αντιπροσωπευτικός των φαινομένων. Την ίδια ώρα η διαδικασία αυτή δεν θα πρέπει να μειώνει την αξία των αποτελεσμάτων της επίλυσης του μοντέλου.

Στην παρούσα εργασία μεταφέρονται τα δεδομένα από άλλες έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί ώστε να προσδιοριστούν κρίσιμες παράμετροι. Μια τέτοια είναι η πορώδης των racks. Πιο συγκεκριμένα ανάλυση με χρήση μεθόδων υπολογιστικής ρευστομηχανικής αλλά και πειραματικών δεδομένων έχει γίνει ώστε να βρεθεί συσχέτιση μεταξύ της γεωμετρίας, των προφίλ πτώσης πίεσης και ταχύτητας αλλά και του θερμικού προφίλ ενός server. Εδώ μπορεί κανείς να ανατρέξει στις εργασίες των Arularasn και Velraj [21], με στόχο την εξέταση και την βελτιστοποίηση διάταξης απαγωγής θερμότητας (ή heat sink ή δεξαμενή θερμότητας). Ακόμα ενδεικτική είναι η εργασία του Remigiusz Nowak [22]. Ο τελευταίος σημειώνει ότι με δεδομένη την πολύπλοκη γεωμετρία των διατάξεων απαγωγής θερμότητας από ηλεκτρονικές συσκευές (heat sinks) είναι αναγκαία η διαδικασία μελέτης τους σαν μοντέλα πορώδους μέσου. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να εισαχθεί σε ένα μεγαλύτερο μοντέλο (στην κλίμακα του rack ή του Data Center). Ο Remigiusz [22] προσδιορίζει την αντίσταση λόγω ιξώδους με την τιμές: $1/\alpha$ ($1/m^2$) $\sim 10^5$ και 10^6 , ανάλογα με τις τιμές που σχετίζονται με τη γεωμετρία της διάταξης απαγωγής της θερμότητας.

Η πτώση της πίεσης, σχετίζεται με την θεώρηση των racks σαν πορώδη μέσα και μελετήθηκε από τον Michael et al [23]. Στην εργασία αυτή επιχειρείται η εξομοίωση και σύγκριση της ροής σε πορώδες μέσο και της ροής σε κανάλι πολύ μικρών διαστάσεων. Εκεί συγκρίνεται η ροή σε ένα άδειο τέτοιο κανάλι και σε ένα κανάλι με φυσαλίδα αέρα.

Εκεί προσδιορίζεται η πτώση πίεσης ως:

$$\Delta P = \frac{b * \mu * Q * L}{W * H^3} \quad (5.2)$$

όπου: Q: η παροχή (m^3/sec)

μ : η δυναμική συνεκτικότητα του αέρα ($kg/m \cdot sec$)

α : αδιάστατη σταθερά που εξαρτάται από τη γεωμετρία,

$$\text{όπου } b = \frac{12}{1 - \frac{192 H}{\pi^5 H} * \tanh\left(\frac{\pi W}{2H}\right)} \quad (5.3)$$

W: το πλάτος του καναλιού (m)

L: το μήκος του καναλιού (m)

H: το ύψος του καναλιού (m)

Από την άλλη έχουμε το γνωστό νόμου του Darcy σύμφωνα με τον οποίο:

$$\Delta P = \frac{M}{a} * v * l \quad (5.4)$$

Από την επίλυση των δύο παραπάνω εξισώσεων για το ΔP και σύμφωνα με τις παραδοχές, οι ερευνητές προσδιορίζουν την διαπερατότητα a του νόμου του Darcy, $\alpha_x = 2.9 * 10^{-6} \text{ m}^2$.

Η διαπερατότητα είναι το αντίστροφο του πορώδους, που αποτελεί παράμετρο εισόδου στο προς επίλυση μοντέλο (μονάδες πορώδους: $1/\text{m}^2$).

Σύμφωνα με την ίδια εργασία ορίζονται οι τιμές της διαπερατότητας και για τις διαστάσεις y (η διάσταση καθ' ύψος) και z (διάσταση κατά το πλάτος), όπου έχουμε

$$\alpha_y = 2.9 * 10^{-20} \text{ m}^2 \quad \text{και}$$

$$\alpha_z = 2.9 * 10^{-20} \text{ m}^2.$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : Αποτελέσματα και συμπεράσματα

6.1 Ανάλυση μοντέλου ενός Rack και ενός αεραγωγού

Γενικά

Προκειμένου να επιλυθεί το μοντέλο στο επίπεδο ενός Data Center εισέρχονται σε αυτό ένα πλήθος παραγόντων. Τέτοιοι είναι οι οριακές συνθήκες με το πλήθος των εισόδων και εξόδων του αέρα, το πλήθος των Racks αλλά και η ποιότητα της μοντελοποίησης των συνθηκών ροής στον όγκο των Racks, οι πηγές εκπομπής θερμότητας, τα υλικά των στερεών και οι ιδιότητές τους. Έτσι λόγω αυτής της πολυπλοκότητας επιχειρούμε να ξεκινήσουμε την προσπάθεια της μοντελοποίησης με μια απλοποίηση: Θέτοντας ένα Rack προς μελέτη, ένα περιορισμένο πλήθος στομιών αέρα (τρία στόμιο εισόδου ψυχρού αέρα) και ένα περιορισμένο πλήθος στομιών απαγωγής αέρα (έξι στόμια απαγωγής) που φέρει ένας αεραγωγός. Με τον τρόπο αυτό γίνεται ευκολότερη ανάλυση των παραμέτρων του πεδίου ροής αλλά και οικονομία υπολογιστικών πόρων. Στην παρούσα ενότητα επιχειρείται μια διερεύνηση παραμέτρων όπως το πορώδες που χαρακτηρίζει το Rack, σύμφωνα με τη θεώρησή του Rack σαν πορώδες μέσο. Οι εισοδοί των δεδομένων στο μοντέλο συνοψίζονται στον πίνακα της επόμενης ενότητας. Για την μοντελοποίηση του ανεμιστήρα χρησιμοποιήθηκε πολυωνυμική καμπύλη Δρ-U από εμπορικό ανεμιστήρα (back-door cooler fan), ο οποίος όπως αναφέρθηκε προσομοιώνει το πλήθος των ανεμιστήρων που λειτουργούν αναρροφώντας αέρα ψύξης σε ένα Rack. Τα συμπεράσματα που εξάγονται σε αυτό το απλοποιημένο μοντέλο, εισάγονται στη συνέχεια στην αριθμητική επίλυση των κεντρικής περιοχής του Data Center.

Προκειμένου να γίνεται καλύτερα αντιληπτή η διαδικασία της δημιουργίας του υπολογιστικού μοντέλου και της επίλυσής του ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία παρουσίασης των αποτελεσμάτων:

- Παρουσίαση της γεωμετρίας του μοντέλου
- Παράθεση των γενικών δεδομένων του μοντέλου: Οριακές συνθήκες και παράμετροι εισόδου
- Παρουσίαση της ροής του αέρα της ψύξης (streamlines)
- Παρουσίαση των κύριων θερμοδυναμικών μεγεθών (ταχύτητες πεδίου ροής, θερμοκρασία του πεδίου ροής και του rack)

6.1.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων στο επίπεδο ανάλυσης ενός Rack και ενός αεραγωγού απαγωγής αέρα

Γεωμετρία του μοντέλου

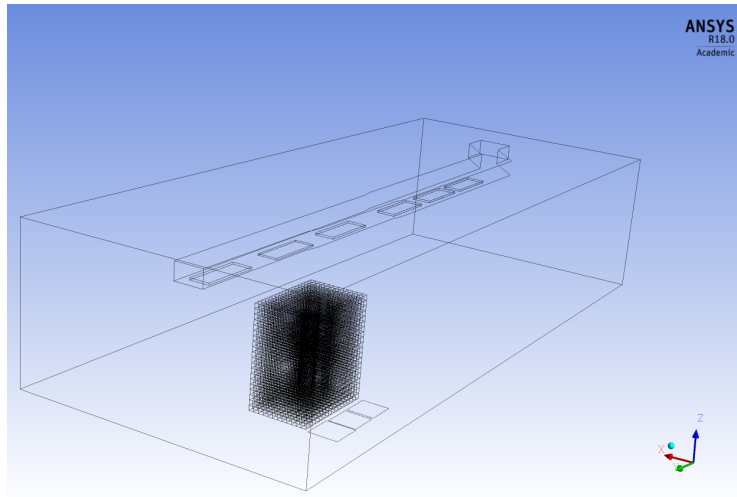


Figure 6.1: Το τρισδιάστατο μοντέλο της γεωμετρίας

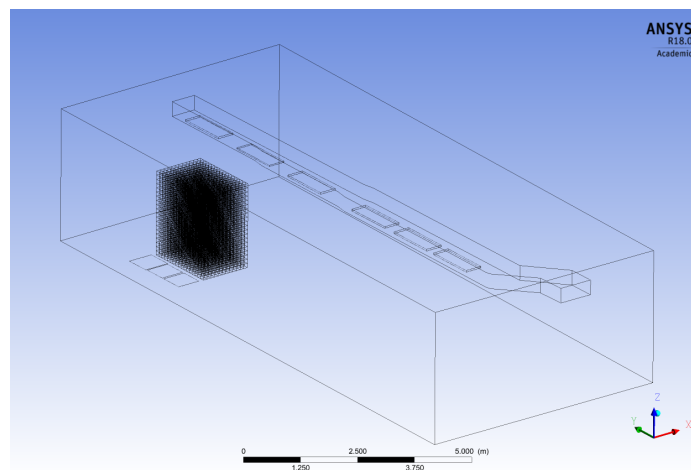


Figure 6.2: Το τρισδιάστατο μοντέλο της γεωμετρίας-άλλη γωνία

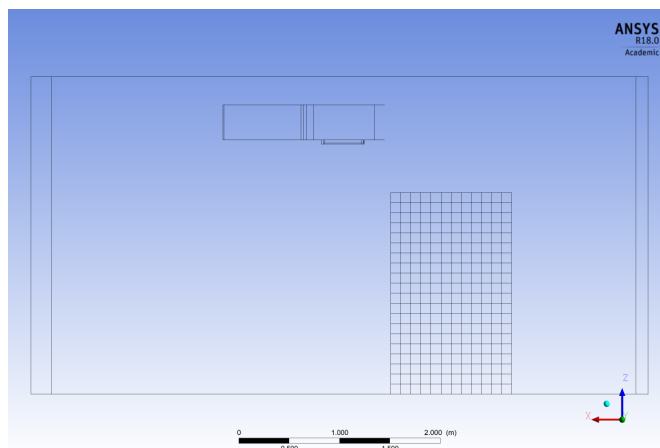


Figure 6.3: Το τρισδιάστατο μοντέλο της γεωμετρίας- Όψη

Πληροφορίες Μοντέλου :

Ένα (1) rack – Ένας(1) αεραγωγός με έξι (6) στόμια απαγωγής αέρα – Τρία (3) στόμια εισόδου αέρα

	Οριακές συνθήκες μοντέλου	Οριακές συνθήκες στο Fluent
1	Στόμια εισόδου ψυχρού αέρα στο δάπεδο	Velocity inlet: 1 m/sec
2	Στόμια απαγωγής αέρα	Pressure Outlets (Pout=101325 Pa)
3	Είσοδος του Rack	Interior
4	Έξοδος του Rack	Interior
5	Rack	Πηγή θερμότητας : 2000 W/m ³ ανά Rack
6	Rack	Interior: fan type (πολυωνυμική σχέση για την πτώση πίεσης Δρ ως προς την ταχύτητα
7	Rack	Πορώδες Μέσο (Porous media), porosity:0.5, Viscous resistance-x :2.111e+06 Viscous resistance-y :2.111e+20 Viscous resistance-z :2.111e+20 Inertia resistance(x,y,z):20 Solid: Aluminum, Density 2719 kg/m ³ : Cp: 871 j/kg K , Thermal Conductivity:202,4 W/mK
8	Στοιχεία του υπολογιστικού πλέγματος	Κόμβοι: 7.237.188 Στοιχεία : 5.261.916 Μέθοδος: Tetrahedrons (Patch Conforming Method for the fluid domain)
9	Διαστάσεις του πλέγματος	Length x: 6.1321 m Length y: 14.002 m Length z: 3.15 m

Πίνακας 6.1: δεδομένα του μοντέλου

Γραμμές Ροής (Streamlines)

Οι γραμμές ροής (streamlines) αποδίδουν τις τροχιές των στοιχείων του ρευστού στο πεδίο ροής. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα οι γραμμές ροής αναπαριστούν την ροή του ρευστού και βοηθούν στην βασική κατανόησή του πεδίου ροής και των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας σε αυτό. Έτσι έχουμε είσοδο του ψυχρού αέρα από τα στόμια στο δάπεδο με ταχύτητα 1 m/sec. Στη συνέχεια οι γραμμές ροής διέρχονται διαμέσου του rack συντελώντας στην ψύξη του. Ακόμα κάποιες γραμμές ροής δεν διέρχονται από το rack αλλά καταλήγουν κατευθείαν στα στόμια των αεραγωγών της κορυφής.

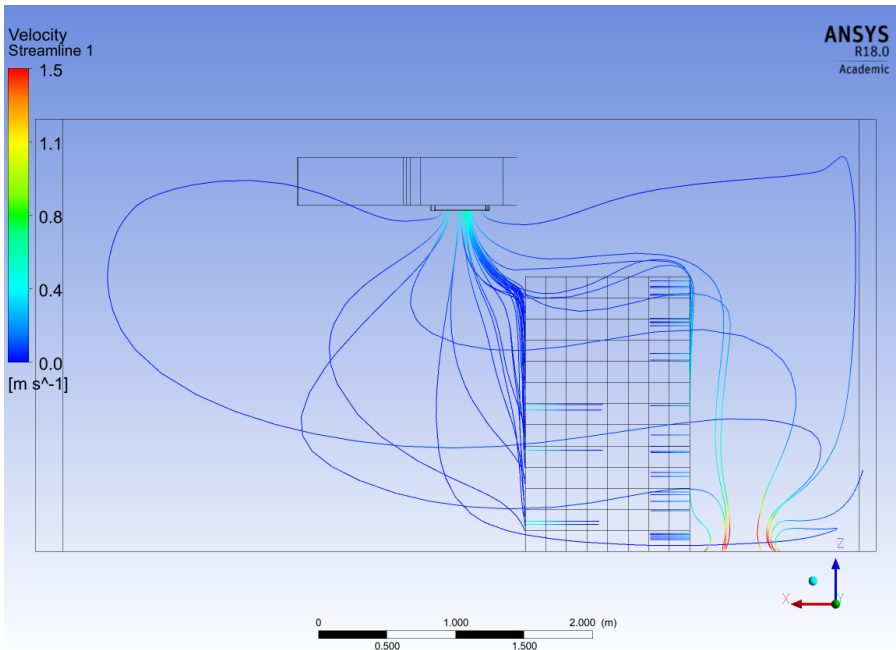


Figure 6.4: Οι γραμμές ροής και η ταχύτητα τους. Εξέρχονται από το στόμιο, διέρχονται από το rack και καταλήγουν στο στόμιο απαγωγής του αεραγωγού στην οροφή.

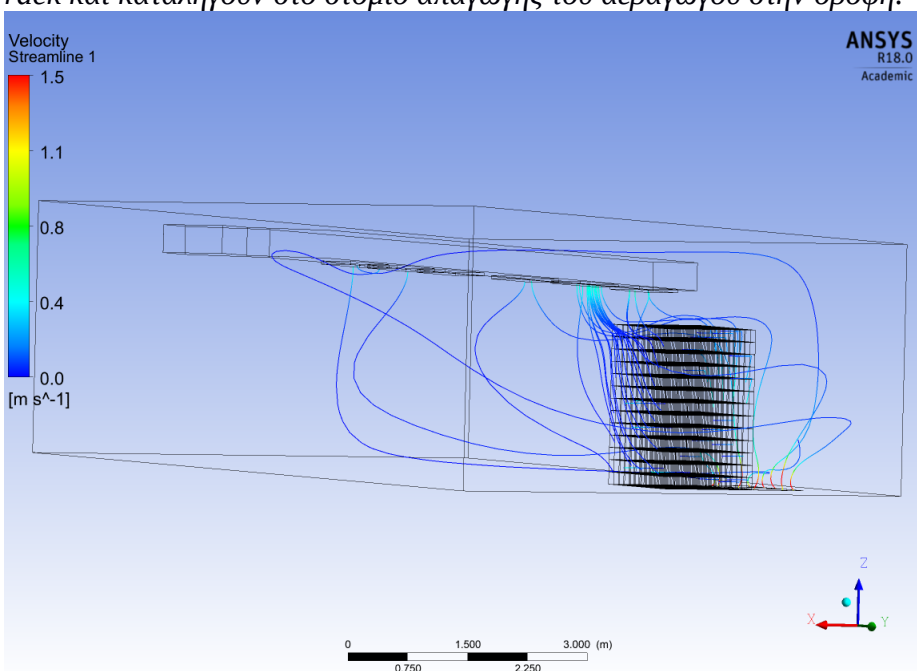


Figure 6.5: Όψη των γραμμών ροής. Εξέρχονται από το στόμιο, διέρχονται από το rack και καταλήγουν στο στόμιο απαγωγής του αεραγωγού στην οροφή.

Πεδίο θερμοκρασιών:

Στις παρακάτω φωτογραφίες φαίνεται η κλιμάκωση των θερμοκρασιών και στο πεδίο και αυτές αναπαρίστανται σε τομές. Πρόκειται για τρεις τομές, πάνω στις οποίες αποδίδονται διαδοχικά οι γραφικές παραστάσεις (contours) της θερμοκρασίας και της ταχύτητας. Για τις τομές δίνονται οι παρακάτω πληροφορίες: Η πρώτη τομή (figure 6.6) είναι στο επίπεδο x-y (κάτοψη) και σε ύψος 1m από το δάπεδο, όπου βρίσκονται τα στόμια. Με τον τρόπο αυτό κανείς βλέπει την θερμοκρασία στην είσοδο του αέρα στο rack και αντίστοιχα στην έξοδο. Φαίνεται η κλιμάκωση των θερμοκρασιών από τους 19°C έως τους 30°C στο πεδίο ροής, ενώ η θερμοκρασία στο rack είναι μεγαλύτερη και δεν μελετάται σε αυτό το σημείο.

Η δεύτερη τομή (figure 6.7) γίνεται στο επίπεδο z-x και σε απόσταση y, που αντιστοιχεί σε συντεταγμένες του μεσαίου στομίου εισόδου του αέρα ψύξης. Εδώ φαίνεται ότι όσο πηγαίνουμε ψηλότερα στο rack έχουμε και μειωμένη τη θερμοκρασία εισόδου στο rack. Τέλος έχουμε την τομή στο επίπεδο z-y, το οποίο έχει το μικρότερο ενδιαφέρον, εφόσον στο επίπεδο αυτό έχουμε κατά βάση τις μικρότερες αλλαγές στις θερμοκρασίες. Η τομή αυτή γίνεται σε x διάσταση που αντιστοιχεί στο μέσον της x διάστασης του rack.

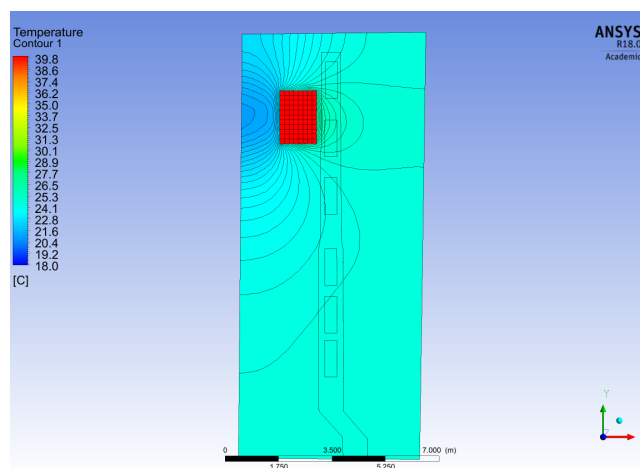


Figure 6.6: Κάτοψη του πεδίου θερμοκρασιών.

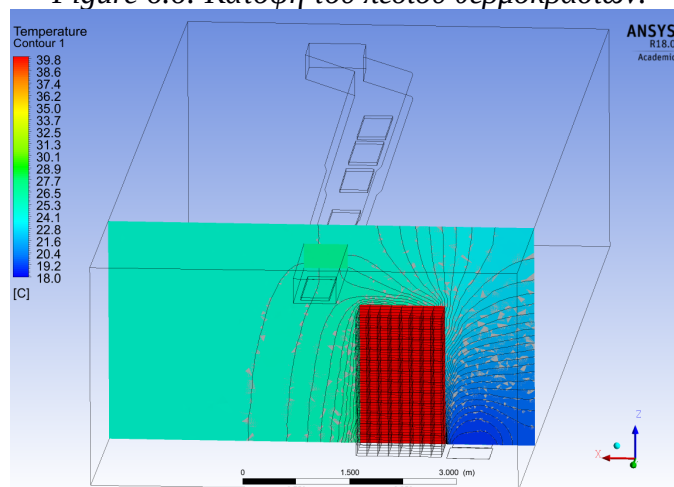


Figure 6.7: όψη του πεδίου θερμοκρασιών. Φαίνεται η κλιμάκωση των θερμοκρασιών από τους 19°C έως τους 30°C

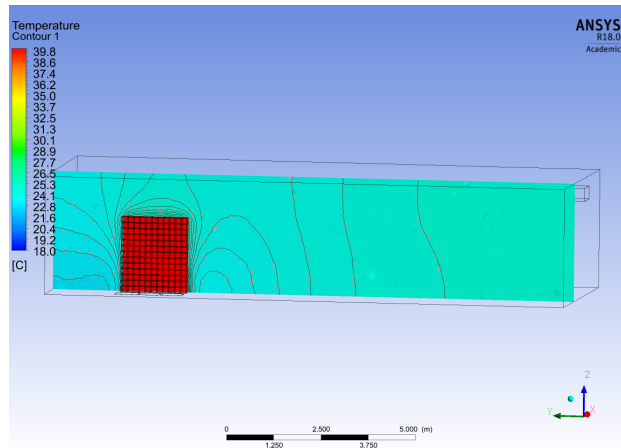


Figure 6.8: όψη του πεδίου θερμοκρασιών. Μικρότερη η κλιμάκωση της θερμοκρασίας στο z-x επίπεδο

Πεδίο θερμοκρασιών στις διεπιφάνειες του πεδίου ροής

Στα παρακάτω σχήματα έχουμε τις θερμοκρασίες στις διεπιφάνειες (mesh interfaces) μεταξύ του πεδίου ροής του ρευστού και των στερεών. Βλέπουμε στην εικόνα 6.9-αριστερά την εμπρόσθια πλευρά (ψυχρό διαμέρισμα) και στην εικόνα 6.9-δεξιά την πίσω πλευρά (θερμό διαμέρισμα) Μπορεί κανείς να παρατηρήσει αρχικά τις διαφορές θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου του αέρα. Ακόμα μπορεί κανείς να δει, ότι είναι δυνατόν ο ψυχρός αέρας να μην φθάνει στα πιο ψηλά σημεία των racks, γεγονός που έχει να κυρίως να κάνει με την ταχύτητα της δέσμης του αέρα που εξέρχεται από τα στόμια του δαπέδου. Βλέπουμε ότι έχουμε μέση θερμοκρασία αέρα στην είσοδο 22,5°C και μέση θερμοκρασία αέρα εξόδου 27°C.

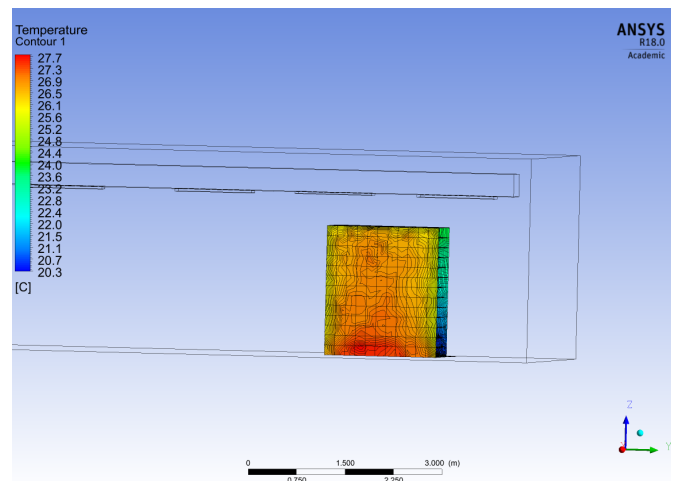
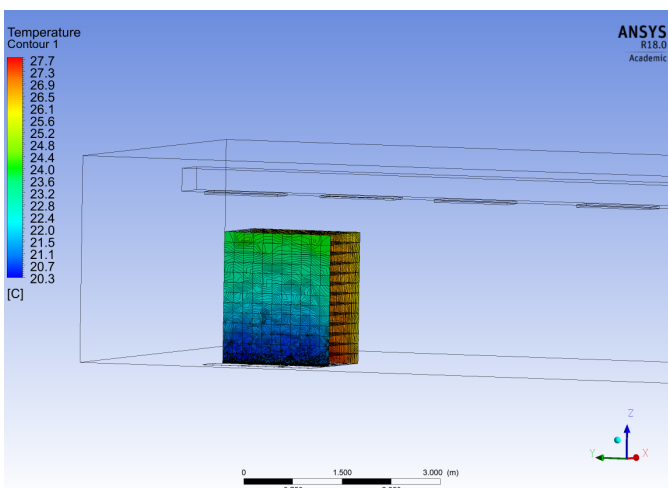


Figure 6.9: όψη του πεδίου θερμοκρασιών στην επιφάνεια επαφής στην είσοδο και έξοδο του αέρα με το rack.

Πεδίο ταχυτήτων: κάτοψη-όψη-εμπρόσθια όψη

Παρακάτω έχουμε τις αναπαραστάσεις του πεδίου ταχυτήτων στις ίδιες τομές, όπως αυτές που παρουσιάστηκαν στο πεδίο των θερμοκρασιών: Η πρώτη τομή (figure 6.11) είναι στο επίπεδο x-y (κάτοψη) και σε ύψος 1m από το δάπεδο όπου βρίσκονται τα στόμια, η δεύτερη τομή (figure 6.12) γίνεται στο επίπεδο z-x και σε απόσταση y, που αντιστοιχεί σε συντεταγμένες του μεσαίου στομίου εισόδου του αέρα ψύξης, τέλος έχουμε την τομή στο επίπεδο z-y σε x διάσταση που αντιστοιχεί στο μέσον της x διάστασης του rack. Προσοχή θέλει στο εύρος που έχουμε στις κλίμακες. Στην πρώτη τομή (figure 6.11, επίπεδο x-y) έχουμε κλίμακα από 0 έως 0.5 m/sec και στο ύψος του 1 από το δάπεδο καταγράφεται ταχύτητα που έχει μειωθεί στο μισό της αρχικής 0.5 m/sec. Στην δεύτερη τομή (figure 6.12, επίπεδο z-x) έχουμε την πλέον μεγάλη κλίμακα, 0 έως 1 m/sec, και φαίνονται η ταχύτητες εισόδου στο rack που βαίνουν μειούμενες κατά το ύψος αλλά και η ταχύτητα εξόδου από το στόμιο του δαπέδου που είναι 1 m/sec. Τέλος στην τρίτη τομή (figure 6.13, επίπεδο z-y) έχουμε πολύ μικρή κλίμακα, 0 έως 0.1 m/sec, γεγονός αναμενόμενο στο επίπεδο αυτό.

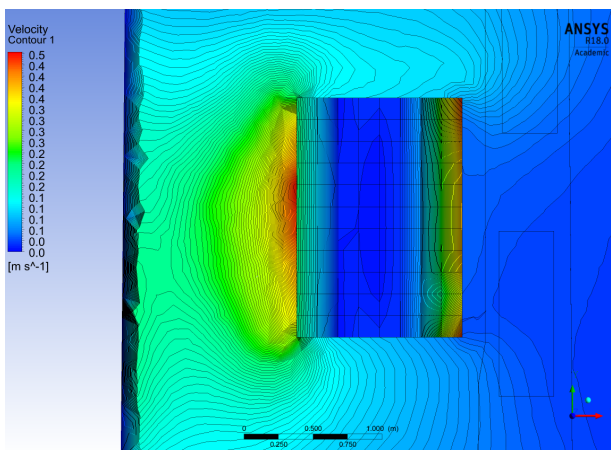


Figure 6.11 Κάτοψη πεδίου ταχυτήτων
6.12: Όψη πεδίου ταχυτήτων

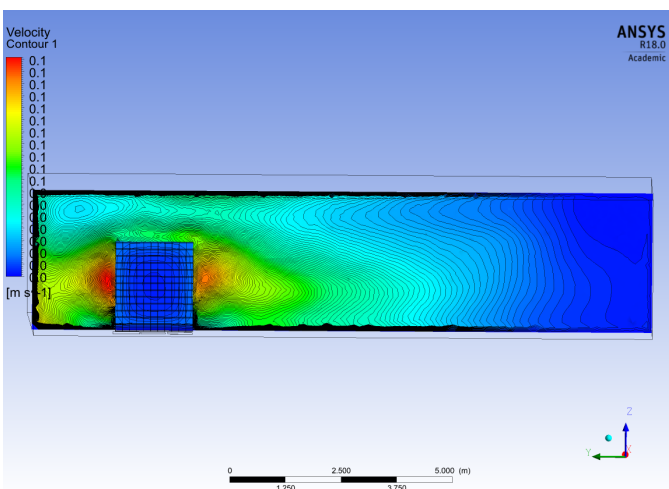
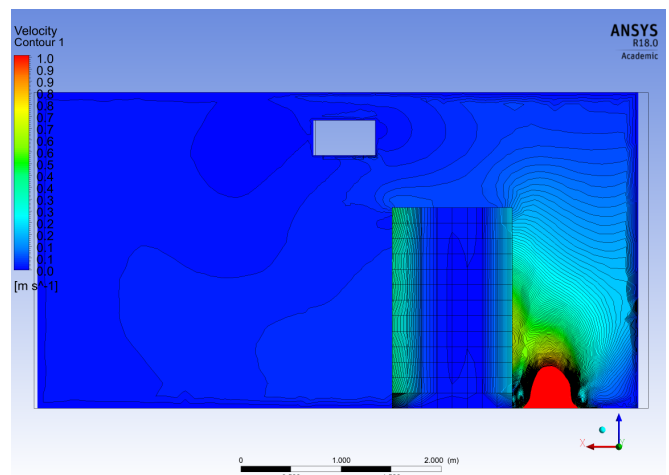


Figure 6.13 όψη του πεδίου ταχυτήτων. Μικρότερη η κλίμακα των ταχυτήτων στο επίπεδο z-y

Πεδίο πιέσεων

Παρακάτω έχουμε το πεδίο της πίεσης που εξάγεται στο εσωτερικό του όγκου του rack. Εδώ δεν έχουμε συμπεριλάβει όλες τις τομές με τον τρόπο που αυτές παρουσιάστηκαν για την θερμοκρασία και την ταχύτητα, καθώς δεν υπάρχουν μόνο μικρές διαφοροποιήσεις της ταχύτητας στο πεδίο ροής, ενώ αντίθετα έχουμε μεγάλη διαφοροποίηση στις πιέσεις στο rack, λόγω της τοποθέτησης σε αυτό του ανεμιστήρα που αναρροφά τον αέρα της ψύξης. Στην εικόνα 6.14 φαίνεται ότι έχουμε αρνητικές πιέσεις αλλά και θετικές που εξαναγκάζουν τον αέρα να κινηθεί διαμέσου του rack. Η εικόνα Η ανομοιογένεια του πεδίου της πίεσης έχει να κάνει με τον ανομοιογενή τρόπο που έχει ορισθεί η αντίσταση του ιξώδους ώστε να διευκολύνεται η ροή περισσότερο κατά την x-κατεύθυνση και να δυσχεραίνεται στις διαστάσεις z και y (viscous resistance-x :2.111e+06, viscous resistance-y :2.111e+20, viscous resistance-z :2.111e+20).Επίσης επηρεάζει η θέση των στομιών απαγωγής που «τραβούν» τη ροή κατά την γ-κατεύθυνση. Στην εικόνα 6.15 φαίνεται στην τομή στο επίπεδο z-x, όπου φαίνεται ότι εξαναγκάζεται να κινηθεί ο αέρα ψύξης κατά την x-κατεύθυνση

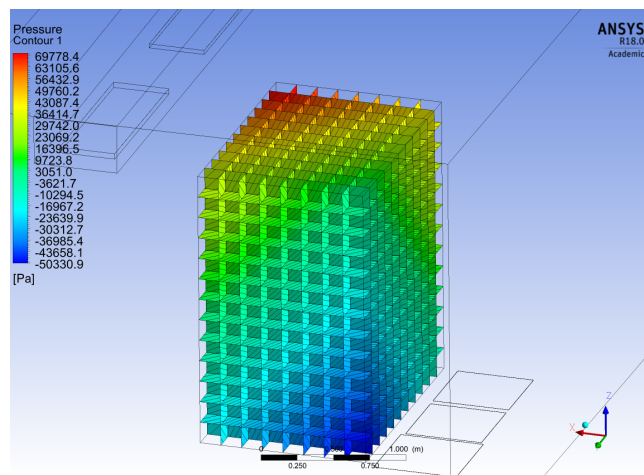


Figure 6.14: Πεδίο πιέσεων μέσα στο Rack. Πίεση αναρρόφησης και κατάθλιψης του αέρα

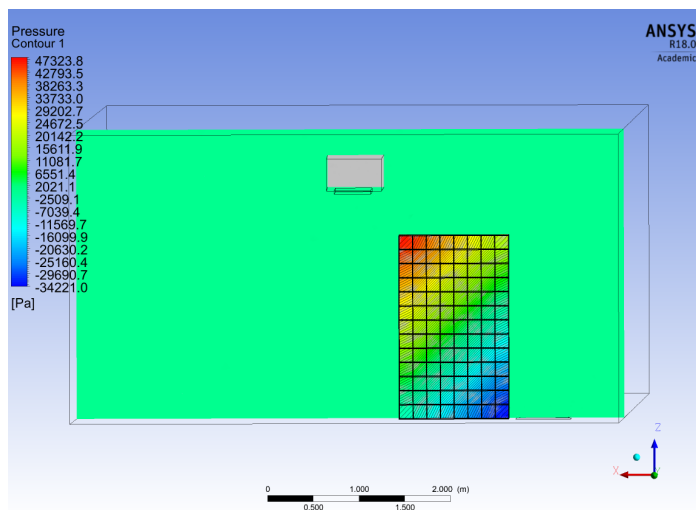


Figure 6.15: Πεδίο πιέσεων μέσα στο Rack στην όψη. Πίεση αναρρόφησης και κατάθλιψης του αέρα

Ισοθερμοκρασιακές επιφάνειες: 23,24, 25° C

Στις παρακάτω εικόνες έχουμε την αναπαράσταση ισοθερμοκρασιών επιφανειών που μπορεί να εξάγει στο ANSYS Fluent μετά από την επίλυση των εξισώσεων που διέπουν το πεδίο. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να γνωρίζουμε σε ποια σημεία του πεδίου ροής έχουμε την θερμοκρασία που επιλέγουμε προς αναπαράσταση. Στις παρακάτω εικόνες έχουμε την αναπαράσταση της εξέλιξης των θερμικών φαινομένων: το ρεύμα του αέρα καθώς κινείται από τα στόμια εισόδου του ψυχρού προς το rack αρχικά και τον αεραγωγό στη συνέχεια βλέπουμε πως μεταβαίνει από την θερμοκρασία των 23°C στη θερμοκρασία των 25°C.

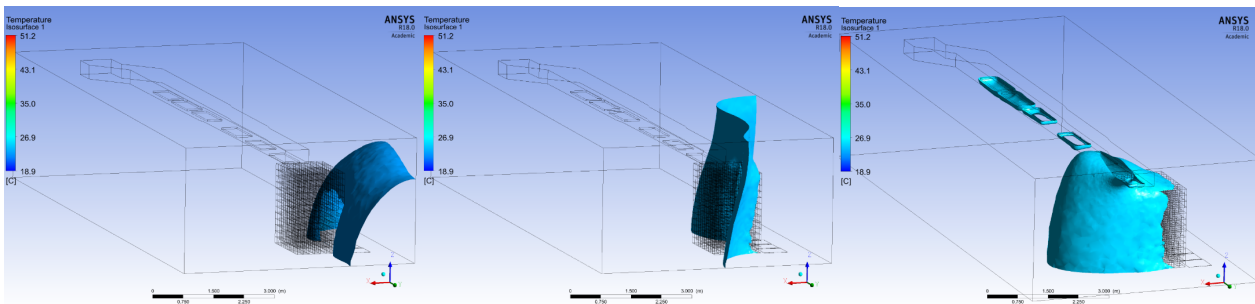


Figure 6.16: η εξέλιξη του ρεύματος του ψυχρού αέρα από 23°C στους 25°C.

6.1.2 Παραμετρική ανάλυση επίδραση της τιμής του πορώδους και της τιμής της θερμικής αγωγιμότητας

Τα παρακάτω αποτελέσματα έχουν εξαχθεί προκειμένου να γίνει προσπάθεια να αποτυπωθεί η επίδραση παραμέτρων που έχουν εισαχθεί στο προς επίλυση μοντέλο. Πιο συγκριμένα εισάγονται στο μοντέλο οι παράμετροι της θερμικής αγωγιμότητας ($W/m K$) και του πορώδους του rack.

- **Η παράμετρος της θερμικής αγωγιμότητας**

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας που εισάγουμε, χρησιμοποιείται προκειμένου το ANSYS FLUENT, να υπολογίσει τον συντελεστή k_{eff} (βλέπε παράγραφο 4.12.3). Μέσω της δυνατότητας του ANSYS FLUENT, αφού εισάγουμε παραμετρικά δεδομένα εισαγωγής (τα ονομάζει Design Points - εν προκειμένω την θερμική αγωγιμότητα) να υπολογίζει τις αντίστοιχες παράμετρούς εξαγωγής (output parameters), προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα. Έτσι δοκιμάζουμε μοντέλα με τις τιμές αγωγιμότητας 100,200 και 300 $W/m K$. Η τιμή 220 W/mK αποτελεί σύμφωνα με τους Yogendra και Joshi, μια μέση τιμή της θερμικής αγωγιμότητας σε περίπτωση που το rack θεωρηθεί μια μείξη από χαλκό και ασάλι.

Table 8.1 Server thermo-physical properties and thermal mass

	Conductivity (W/m K)	Density (kg/m ³)	Specific heat (J/kg K)	Thermal mass per server (J/°C)
Copper	385	8,930	385	377,497
Steel	55.4	7,850	490	422,345
Mix (50% copper/ 50% steel)	220	8,390	438	403,495
10% of Mix	220	839	43.8	4,035
100% of Mix	220	8,390	438	403,495

Πίνακας 6.2: Μέσες τιμές παραμέτρων θερμικής αγωγιμότητας, πυκνότητας και ειδικής θερμότητας για racks [1]

Parameter Input 1 : thermal conductivity (W/m K)	Parameter Output 2 : Max temperature-volume rack(K)	Parameter Output 3 : Max temperature fluid domain (K)	Parameter Output 4 : Total-heat transfer rate-outlets (W)
100	325,33681	301,01749	3229,8279
200	322,20904	300,50344	3247,744
300	321,14499	300,33006	3250,2718

Πίνακας 6.3: Εξαγόμενες παράμετροι που αποκτήθηκαν υπολογιστικά από το ANSYS FLUENT με παράμετρο εισόδου την θερμική αγωγιμότητα

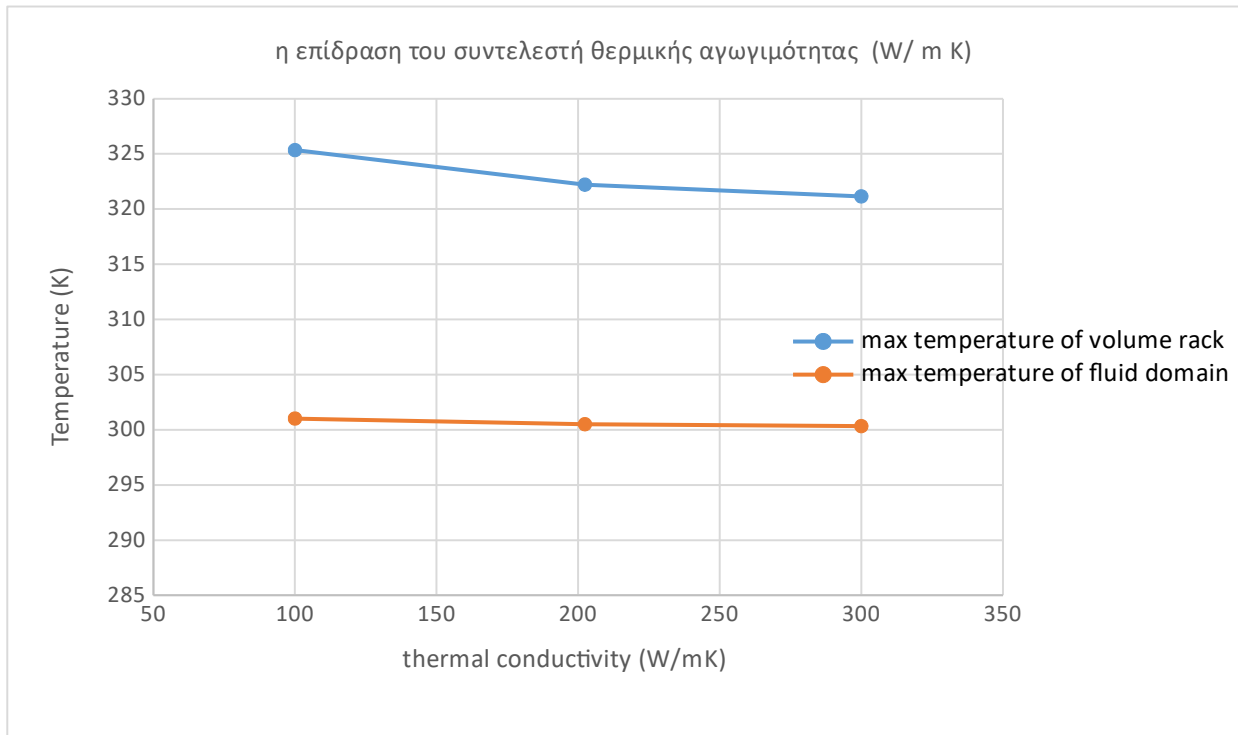


Figure 6.17: Η επίδραση της θερμικής αγωγιμότητας (W/mK) του στερεού στην μέγιστη θερμοκρασία (K) στον όγκο του rack και στο πεδίο του ρευστού (ή fluid domain)

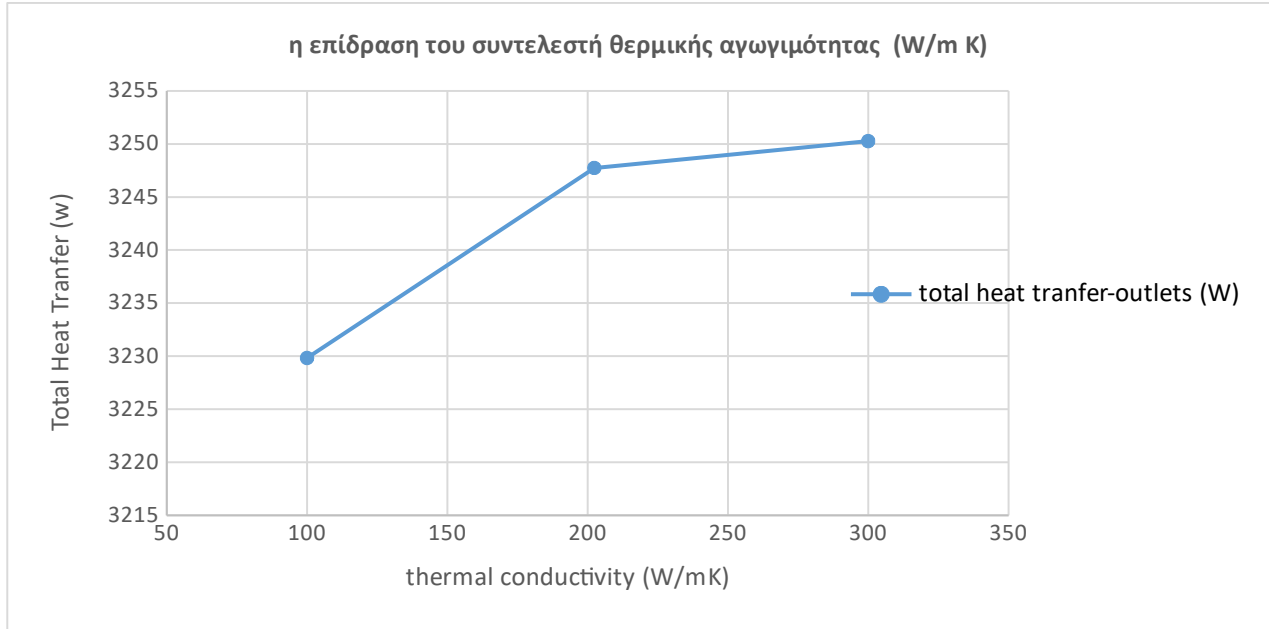


Figure 6.18: Η επίδραση της θερμικής αγωγιμότητας (W/mK) του στερεού στην ολική ροή θερμότητας (W) στα στόμια απαγωγής του αεραγωγού

Συμπεράσματα

Στα παραπάνω φαίνεται εύληπτα ότι η παράμετρος της θερμικής αγωγιμότητας παίζει ένα καθοριστικό ρόλο στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων της θερμοκρασίας του μοντέλου. Αυτό που βλέπουμε είναι ότι όσο μεγαλώνει η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας τόσο μειώνεται η τιμή της μέγιστης θερμοκρασίας στο rack, γεγονός που είναι και αναμενόμενο. Την ίδια στιγμή η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας του πεδίου ροής παραμένει σχεδόν σταθερή, λόγω της μεγάλης θερμοχωρητικότητας του πεδίου στο χώρο. Επίσης βλέπουμε να αυξάνει η ροή της θερμικής ενέργειας όσο αυξάνει η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας, καθώς τα φαινόμενα συναλλαγής θερμότητας στερεού και ρευστού είναι πιο έντονα όσο αυξάνει

Γενικά θα πρέπει να τονίσουμε ότι εφόσον γίνεται η υπόθεση της ομοιογένειας των χαρακτηριστικών του rack, υπάρχει και η υπόθεση της μέσης τιμής της θερμικής αγωγιμότητας. Στην πράξη έχουμε να κάνουμε με ανομοιογενή παράμετρο. Ο καθορισμός της τιμής αυτής αποτελεί αντικείμενο μεγαλύτερης έρευνας. Επίσης η παράμετρος αυτή θα μπορούσε να καθοριστεί και στις τρεις διαστάσεις του μοντέλου με αντίστοιχη πειραματική διάταξη.

- **Η παράμετρος του πορώδους**

Η παράμετρος του πορώδους καθορίζει την αναλογία του ρευστού στους πόρους του μέσου ως προς τον συνολικό όγκο (ρευστό συν στερεό) του πορώδους μέσου. Όσο αυξάνεται το πορώδες (προς τη μονάδα που είναι το μέγιστο και αντιστοιχεί σε ρευστό χωρίς καθόλου στερεό) αυξάνει το ποσοστό του ρευστού στο πορώδες μέσο, σε σχέση με το στερεό. Πιο συγκεκριμένα εάν φανταστούμε ένα rack που φιλοξενεί το μέγιστο αριθμό από servers, τότε θα πρέπει να έχουμε μικρό πορώδες, εφόσον ο όγκος του στερεού είναι αυξημένος

Parameter Input 1: Porosity	Parameter Output 2 : Max temperature-volume rack(K)	Parameter Output 3 : Max temperature fluid domain (K)	Parameter Output 4 : Total-heat transfer rate-outlets (W)
0,2	322,20904	300,50344	3247,744
0,4	323,27611	300,67445	3240,6573
0,6	325,2568	300,99463	3232,9301
0,8	330,94948	301,85683	3208,7363

Πίνακας 6.4: Εξαγόμενες παράμετροι που αποκτήθηκαν υπολογιστικά από το ANSYS FLUENT με παράμετρο εισόδου το πορώδες του rack

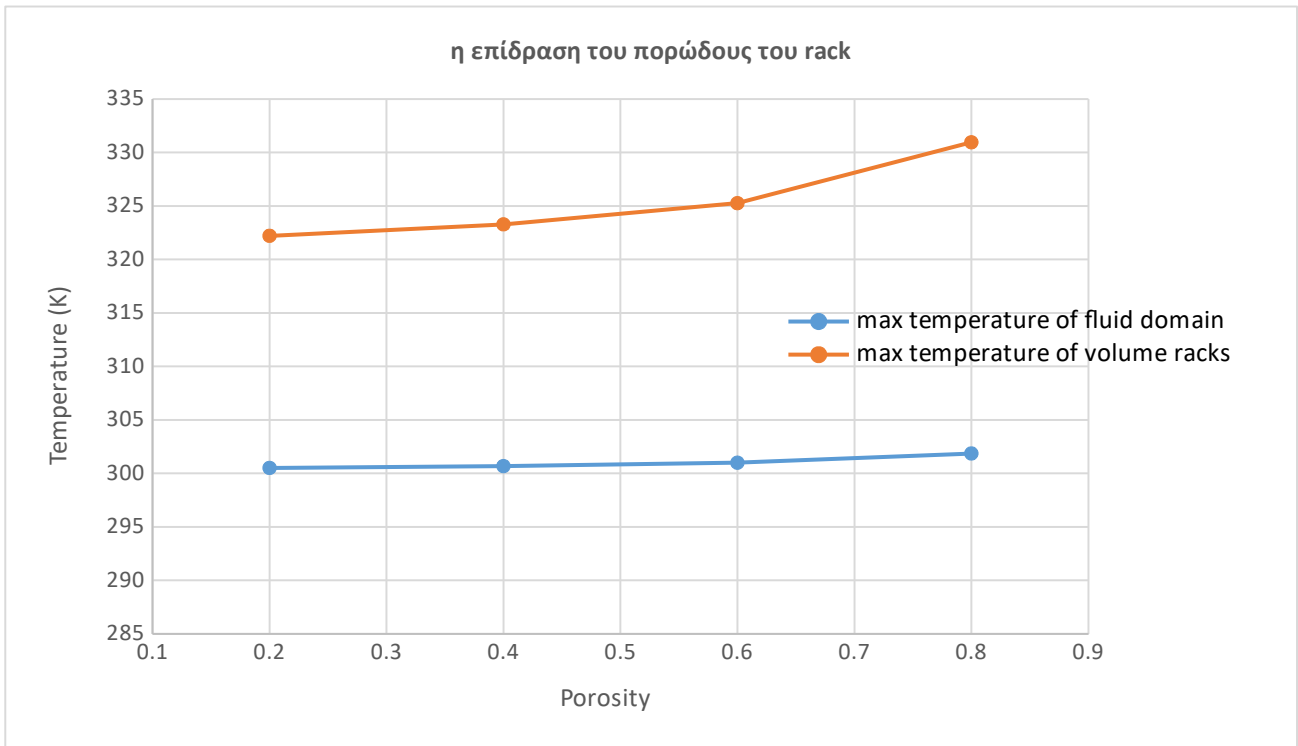


Figure 6.19: Η επίδραση του πορώδους του rack στην μέγιστη θερμοκρασία (K) στον όγκο του rack και στο πεδίο του ρευστού (ή fluid domain)

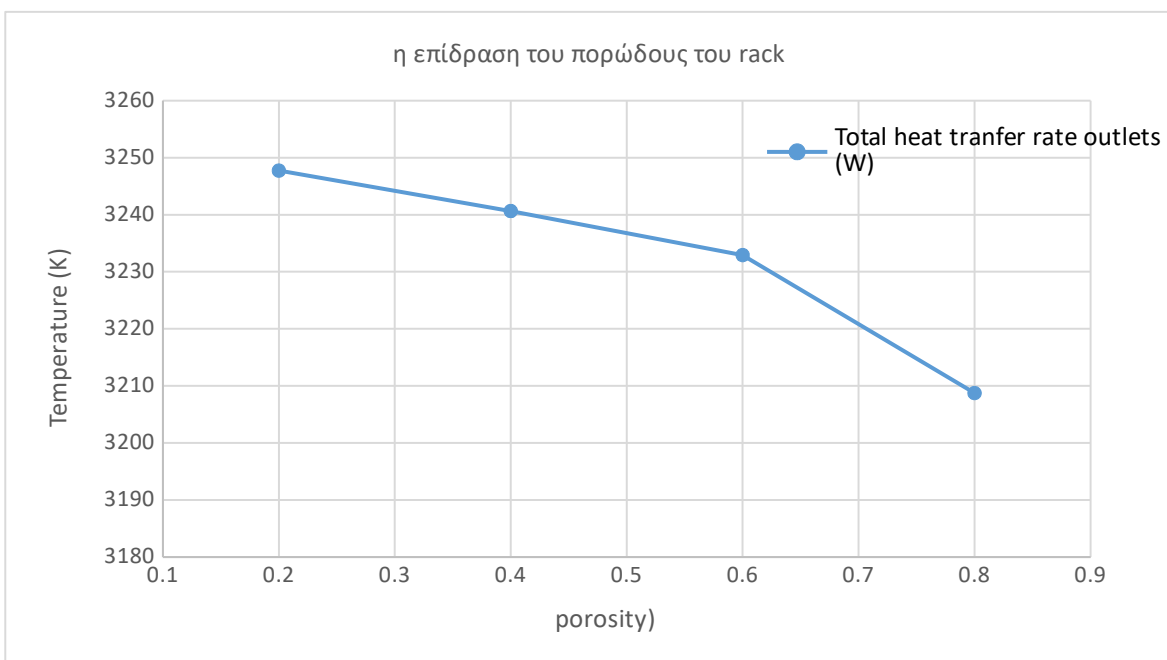


Figure 6.20: Η επίδραση του πορώδους του rack, στην ολική ροή θερμότητας (W) στα στόμια απαγωγής του αεραγωγού

Συμπεράσματα

Από τα παραπάνω βλέπουμε ότι όσο αυξάνει το πορώδες, έχουμε και αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας που υπολογίζεται από το ANSYS FLUENT. Αυτό συνιστά ένα εκ πρώτης όψεως «παράδοξο» και μια αστοχία της παραμετρικής ανάλυσης του μοντέλου, που όμως εξηγείται. Αυτό γιατί κανείς περιμένει, όσο αυξάνει το πορώδες να έχει και λιγότερους servers που φιλοξενούνται στο rack, άρα να έχει λιγότερη εκπομπή θερμότητας και την ίδια στιγμή ευκολότερη και αποτελεσματικότερη ροή αέρα διαμέσου του όγκου του rack. Εμείς όμως διατηρήσαμε σταθερή την εκπομπή θερμότητας (2000 W/m³ στον όγκο του rack) προκειμένου να κάνουμε παραμετρική ανάλυση, ενώ συνεχίσαμε τα αυξάνουμε την τιμή του πορώδους. Αυτό συνιστά ένα ασυμβίβαστο μεταξύ των μεγεθών του πορώδους και της εκπομπής θερμότητας. Δηλαδή αυξάνοντας το πορώδες στην πραγματικότητα θα είχαμε και μείωση της εκπομπής θερμότητας, καθώς η θερμότητα εκπέμπεται από τα στερεά τμήμα του ηλεκτρονικού εξοπλισμού.

Ένας επιπλέον λόγος που έχουμε αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας στο rack όσο αυξάνει η θερμότητα είναι ο τρόπος υπολογισμού της παραμέτρου k_{eff} . Από το κεφάλαιο 4 έχουμε:

$$k_{\text{eff}} = \gamma k_f + (1 - \gamma) k_s \quad (4.21)$$

όπου:

γ = το πορώδες του μέσου

k_f = η θερμική αγωγιμότητα του ρευστού μέσου

k_s = η θερμική αγωγιμότητα του στερεού μέσου

Από τα παραπάνω βλέπουμε ότι εφόσον ισχύει ότι $k_s > k_f$, τότε εφόσον αυξάνει το γ έχουμε και ένα πιο μικρό k_{eff} . Το αποτέλεσμα είναι ότι το μικρό k_{eff} που έχουμε σε μεγάλες τιμές του πορώδους έχει σαν συνέπεια να μην μεταφέρεται θερμότητα από το rack στο ρευστό με την ίδια αποδοτικότητα και τελικά να έχουμε μια αυξανόμενη μέγιστη θερμοκρασία στον όγκο του rack.

Επομένως δεν είναι μια αστοχία του μοντέλου, αλλά υπάρχει εξήγηση για τα αποτελέσματα των παραπάνω διαγραμμάτων λόγω και της φυσικής ασυνέπειας που έχουμε όταν αλλάζουμε το πορώδες χωρίς να αλλάζουμε αντίστοιχα την εκπομπή θερμικών φορτίων αλλά και λόγω των υπολογισμών του k_{eff} στην επίλυση της εξίσωσης ενέργειας.

6.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων στην κεντρική περιοχή του Data Center

6.2.1 Αρχικό μοντέλο – base Case model

Γενικά

Με το αρχικό αυτό μοντέλο επιδιώκουμε να διαμορφώσουμε την αρχική βάση για την απεικόνιση του πεδίου ροής. Η γεωμετρία του μοντέλου είναι η ακριβής γεωμετρία όπως αυτή αποτυπώθηκε και έγινε τρισδιάστατη από τα σχέδια «ως κατασκευασθεί» της εγκατάστασης. Ως προς τη γεωμετρία πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχει η απλοποίηση αυτής καθώς αυτό το σημείο «αποκόπηκε» από το συνολικό χώρο του Data Center. Έτσι λοιπόν η θεώρηση των ορίων του μοντέλου σαν τοίχων («walls») αποτελεί μια απλούστευση. Επιπλέον τυχόν ανακυκλοφορία ρευστού (ψυχρού ή θερμού) από άλλες γειτονικές περιοχές δεν μπορεί να αποτυπωθεί. Από την άλλη καθώς η περιοχή συγκεντρώνει τη μεγαλύτερη πυκνότητα θερμικής ισχύος καθώς και την μεγαλύτερη πυκνότητα racks, μπορεί κανείς να καταλάβει ότι η περιοχή αυτή είναι σημαντική για την όλη κατάσταση του πεδίου ροής, αλλά και αντιπροσωπευτική για τις ανάγκες αυτής της εργασίας. Τα δεδομένα εισόδου (ταχύτητες και θερμοκρασίες) έχουν ληφθεί από τις επιτόπου μετρήσεις.

Προκειμένου να γίνεται καλύτερα αντιληπτή η διαδικασία της δημιουργίας του υπολογιστικού μοντέλου και της επίλυσής του ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία παρουσίασης:

- Παρουσίαση της γεωμετρίας του μοντέλου
- Παράθεση των γενικών δεδομένων του μοντέλου: Οριακές συνθήκες και παράμετροι εισόδου
- Παρουσίαση της ροής του αέρα της ψύξης (streamlines)
- Παρουσίαση των κύριων θερμοδυναμικών μεγεθών (ταχύτητες πεδίου ροής, θερμοκρασία του πεδίου ροής και του rack)

Γεωμετρία του μοντέλου

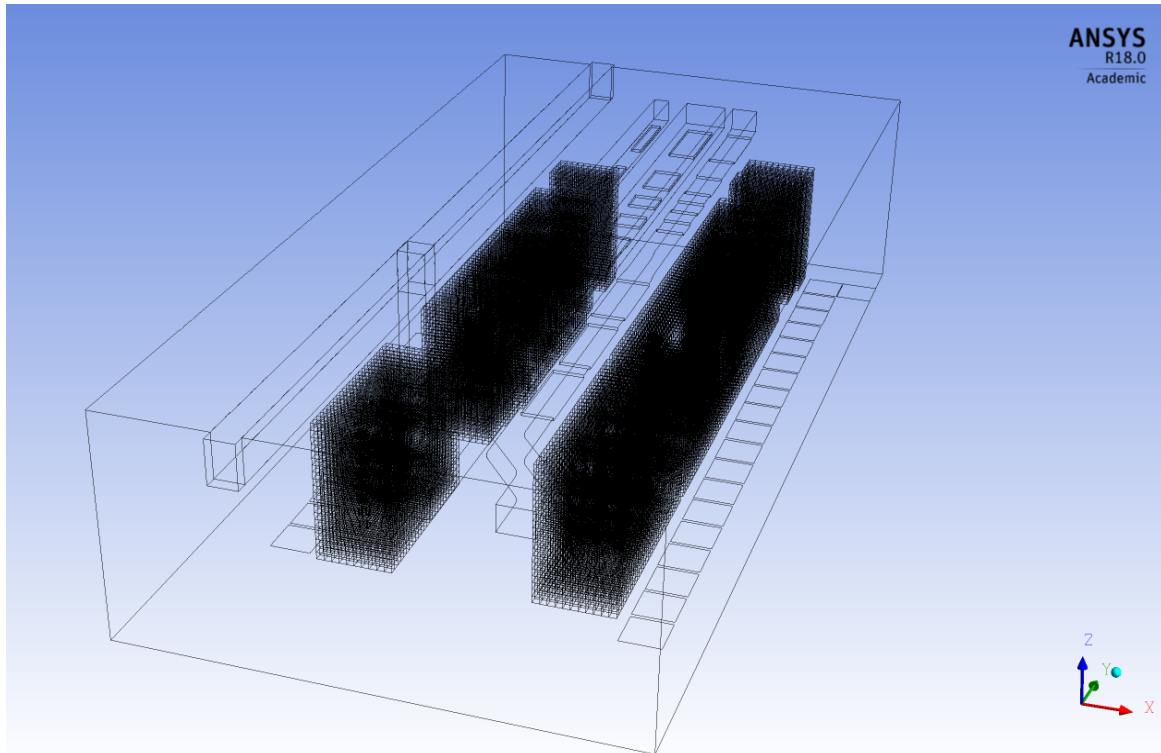


Figure 6.21: Το τρισδιάστατο μοντέλο της γεωμετρίας της κεντρικής περιοχής του Data Center

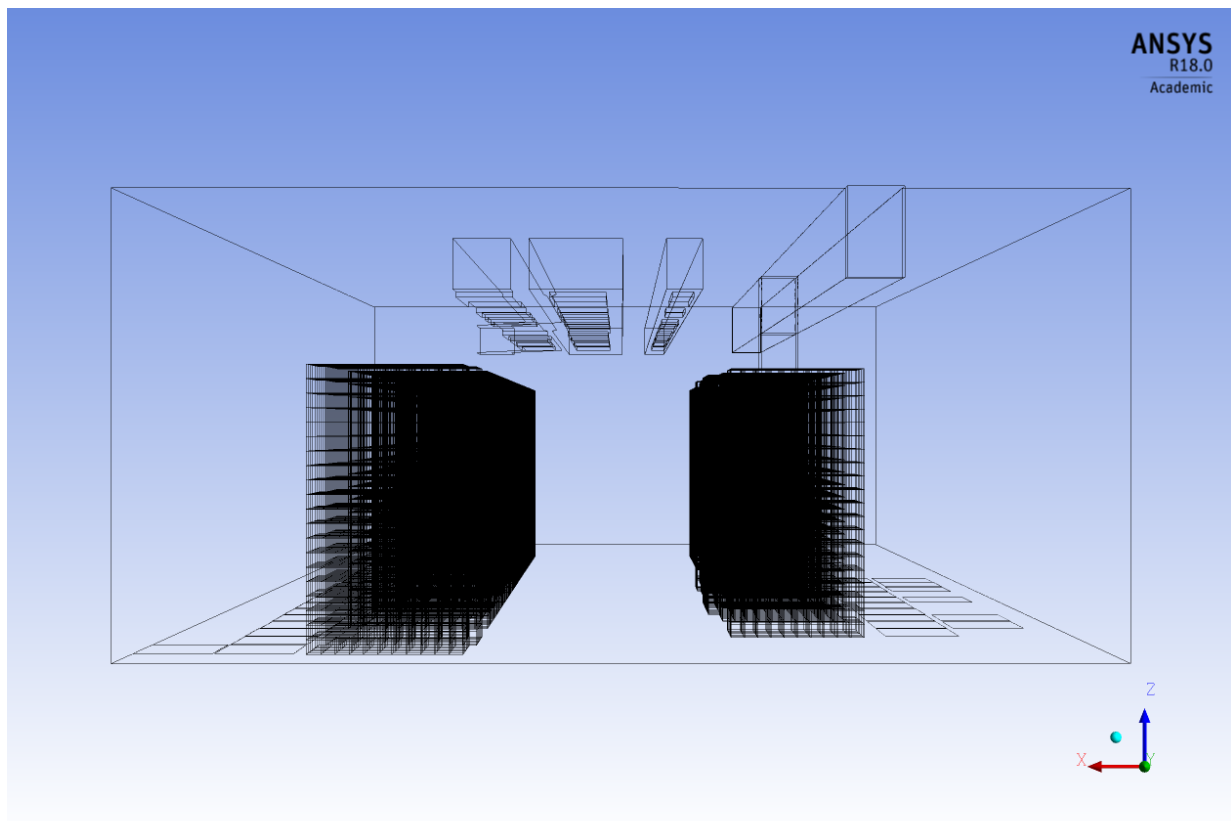


Figure 6.22: Το τρισδιάστατο μοντέλο της γεωμετρίας της κεντρικής περιοχής του Data Center

Πληροφορίες Μοντέλου :

Τριάντα (30) rack – Τρεις (3) αεραγωγοί με είκοσι τρία (23) στόμια απαγωγής αέρα – Σαράντα (40) στόμια εισόδου αέρα

	Οριακές συνθήκες	Οριακές συνθήκες στο Fluent
1	Στόμια εισόδου ψυχρού αέρα στο δάπεδο	Velocity inlet (0.8 m/sec ~1.1 m/sec): (average): 1 m/sec Temperature : (average)292 K
2	Στόμια απαγωγής αέρα	Pressure Outlets (Pout=101325 Pa)
3	Είσοδος του Rack	Interior
4	Έξοδος του Rack	Interior
5	Rack	Πηγή θερμότητας : 2000 W/m ³ ανά Rack
6	Rack	Interior: fan type (πολυωνυμική σχέση για την πτώση πίεσης Δρ ως προς την ταχύτητα
7	Rack	Πορώδες Μέσο (Porous media), porosity:0.5 , Viscous resistance-x :2.111e+06 Viscous resistance-y :2.111e+20 Viscous resistance-z :2.111e+20 Inertia resistance(x,y,z):20 Solid: Aluminum, Density 2719 kg/m ³ : Cp: 871 j/kg K , Thermal Conductivity:202,4 W/mK
8	Στοιχεία του υπολογιστικού πλέγματος	Κόμβοι: 17.722.849 Στοιχεία :12.626.681 Μέθοδος: Tetrahedrons (Patch Conforming Method for the fluid domain)
9	Διαστάσεις του πλέγματος	Length x: 6.7581 m Length y: 14.215 m m Length z: 3.15 m

Πίνακας 6.5: δεδομένα εισαγωγής του μοντέλου

Γραμμές ροής

Οι γραμμές ροής (streamlines) παρέχουν μια επισκόπηση των τροχιών που ακολουθούν τα στοιχεία του ρευστού στο πεδίο που μελετάται. Ο ψυχρός αέρας εξέρχεται από τα στόμια του δαπέδου με ταχύτητες κοντά στο 1 m/sec. Στη συνέχεια ένα πλήθος γραμμών ροής φαίνεται να περνούν πάνω από τα racks, μέχρι να καταλήξουν στα στόμια απαγωγής των τριών αεραγωγών στην οροφή του χώρου. Επίσης γραμμές διέρχονται και διαμέσου των racks. Μέσα στα racks, λόγω των πολύ μικρών ταχυτήτων δεν μπορούν να αποδοθούν γραφικά. Οι γραμμές ροής με πολύ μικρή ταχύτητα εξέρχονται από τα racks προκειμένου να καταλήξουν στα στόμια οροφής.

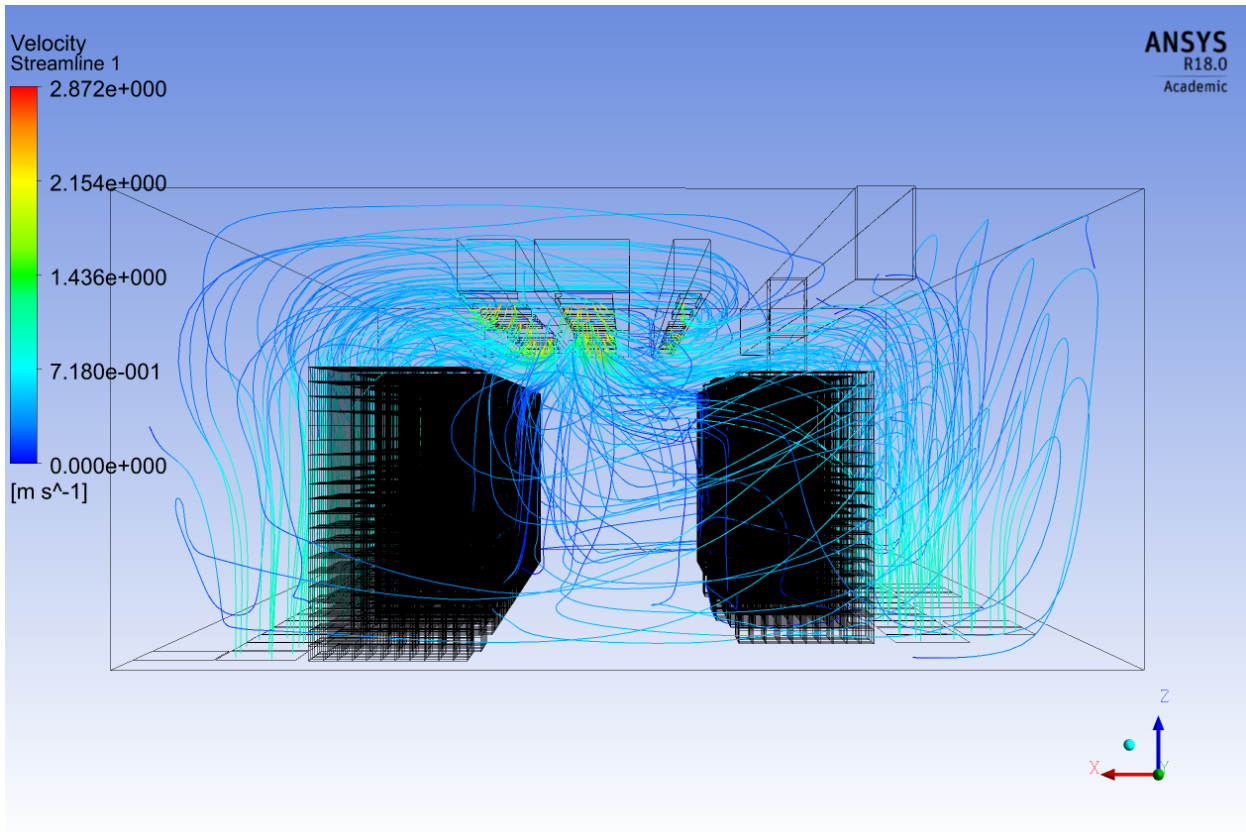


Figure 6.23: Το τρισδιάστατο μοντέλο της γεωμετρίας της κεντρικής περιοχής του Data Center με τις γραμμές ροής

Πεδίο Θερμοκρασιών

Βλέπουμε την απεικόνιση της τομής x-y που είναι σε ύψος $z=1\text{m}$ από το δάπεδο (στο μέσον των racks) και παρίσταται το πεδίο των θερμοκρασιών. Στο πεδίο αυτό βλέπουμε εκ πρώτης όψεως την κατάσταση των θερμοκρασιών που διαφοροποιείται σημαντικά μεταξύ του θερμού και του ψυχρού διαμερίσματος του χώρου. Επίσης να πούμε ότι οι ταχύτητες εισόδου στα στόμια στο σχήμα 6.24, δεξιά όπως κοιτάμε την κάτοψη, είναι υψηλότερες από αυτές συγκριτικά με αυτές στην αριστερή πλευρά του σχήματος, ενώ οι θερμοκρασίες εισόδου έχουν μικρότερες διακυμάνσεις (βλέπε και Figure 5.6). Αυτό που επίσης μπορεί να παίζει κάποιο ρόλο

είναι ότι δεξιά στο σχήμα δεν έχουμε ασυνέχειες στα racks και κενές θέσεις (ενώ αριστερά φαίνεται και η παρεμβολή μιας κολώνας), με αποτέλεσμα να μην εισχωρεί το θερμό ρεύμα στο ψυχρό, γεγονός που θέλουμε να αποφύγουμε.

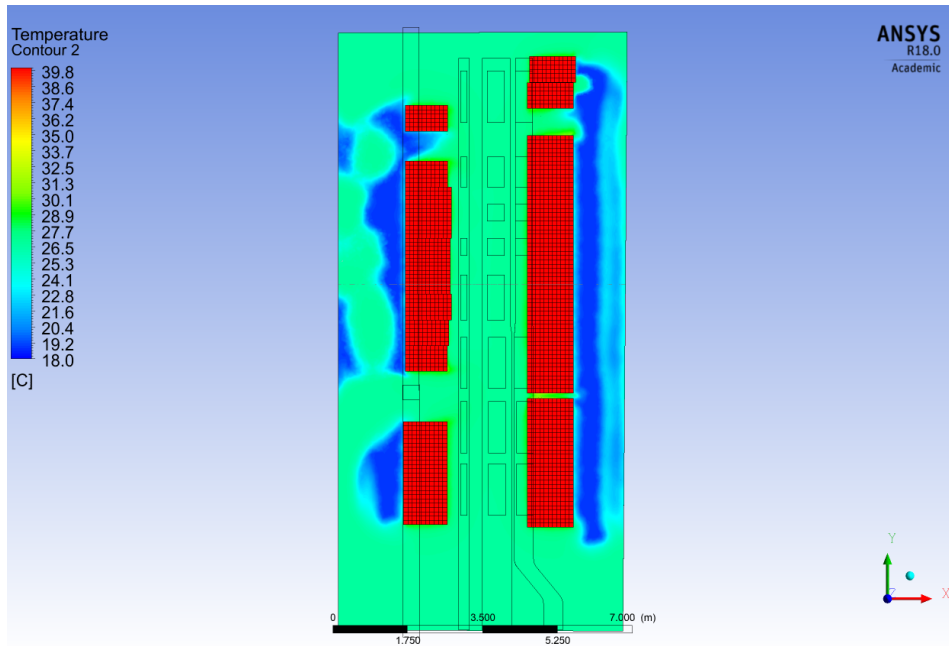


Figure 6.24: Κάτοψη της κατανομής των θερμοκρασιών. Φαίνεται το θερμό και το ψυχρό διαμέρισμα

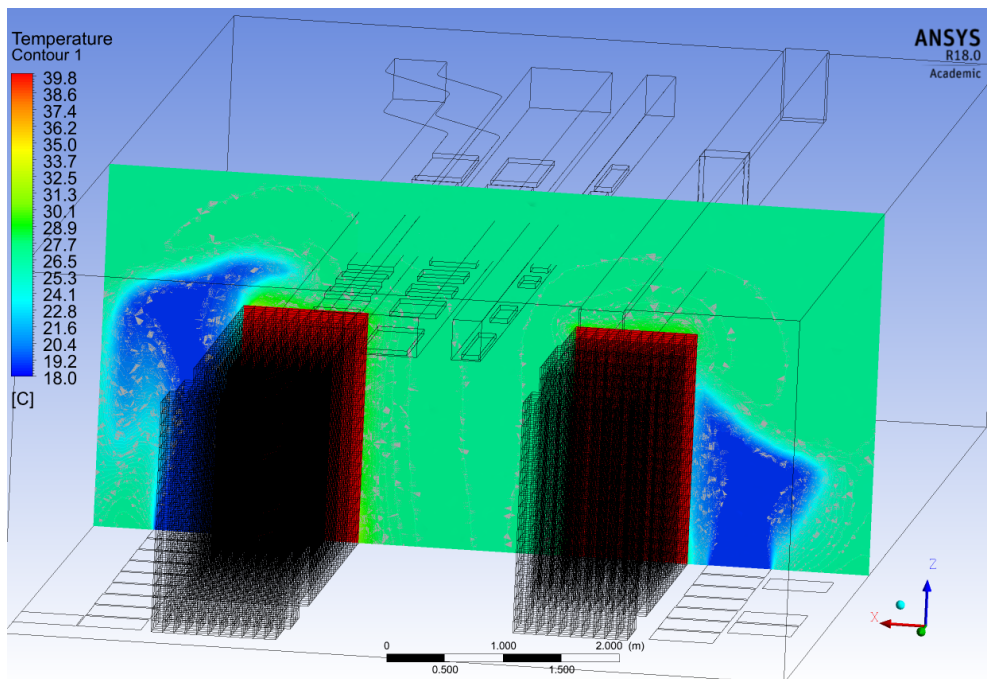


Figure 6.25: Κάτοψη της κατανομής των θερμοκρασιών. Φαίνεται το θερμό και το ψυχρό διαμέρισμα

Πεδίο Θερμοκρασιών στις διεπιφάνειες

Στα παρακάτω σχήματα έχουμε τις θερμοκρασίες στις διεπιφάνειες (mesh interfaces) μεταξύ του πεδίου ροής του ρευστού και των στερεών. Μπορεί κανείς να παρατηρήσει αρχικά τις διαφορές θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου του αέρα. Ακόμα μπορεί κανείς να δει, ότι είναι δυνατόν ο ψυχρός αέρας να μην φθάνει στα πιο ψηλά σημεία των racks, γεγονός που δικαιολογείται καθώς μπορεί να μην επαρκεί η παροχή του ψυχρού αέρα που απαιτεί ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός των racks, με δυσμενείς επιπτώσεις για την καλή λειτουργία του εξοπλισμού. Έχουμε στις παρακάτω εικόνες: θερμοκρασία αέρα εισόδου (μέση τιμή) 24°C και θερμοκρασία εξόδου (μέση τιμή) 30°C

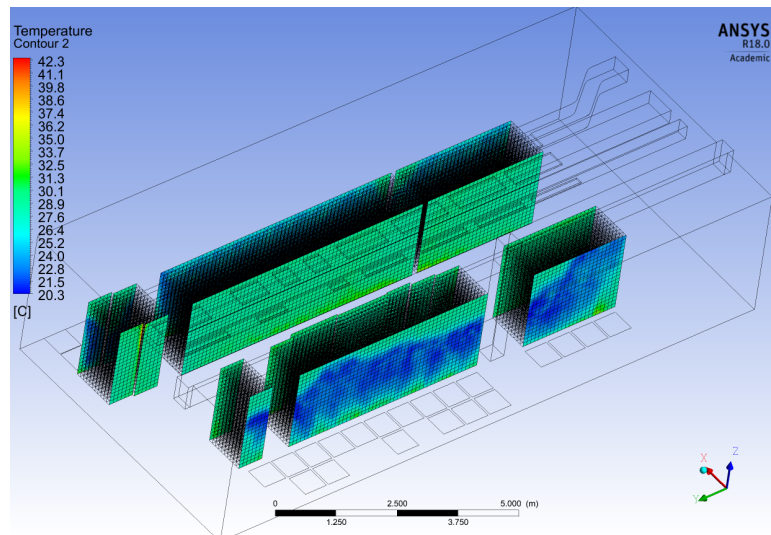


Figure 6.26: Όψη του πεδίου θερμοκρασιών στις επιφάνειες επαφής (είσοδος και έξοδος) του αέρα με τα racks.

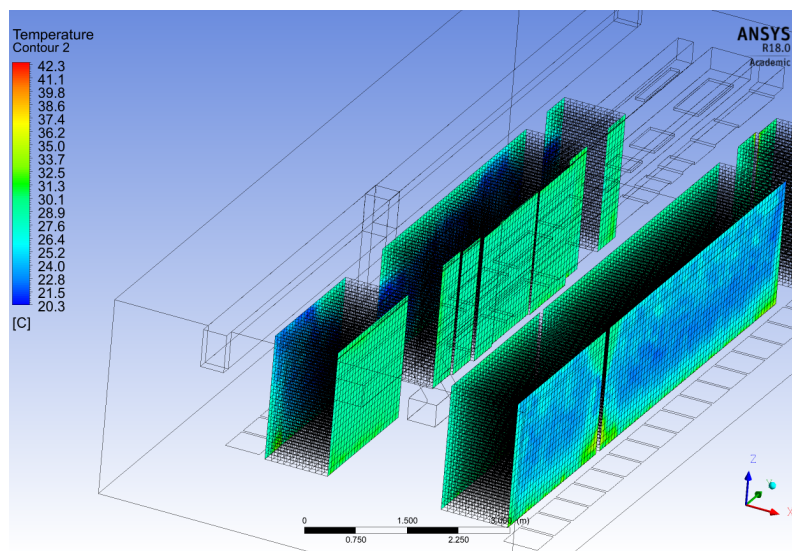


Figure 6.27: Όψη του πεδίου θερμοκρασιών στις επιφάνειες επαφής (είσοδος και έξοδος) του αέρα με τα racks.

Πεδίο Θερμοκρασιών στα racks

Στις παρακάτω εικόνες έχουμε τις θερμοκρασίες που εξάγονται στον όγκο των racks. Για τις παρακάτω εικόνες πρέπει να γίνει κατανοητή η επίδραση που έχει η συνθήκη της ομοιογενούς εκπομπής θερμότητας από όλο τον όγκο του rack. Άρα καταλαβαίνει κανείς ότι μέσα σε ένα rack θα υπάρχει ένα πολύ ανομοιογενές πεδίο θερμοκρασιών, διαφορετικό από αυτό που βλέπουμε εδώ. Ακόμα παρατηρεί κανείς την ανομοιογένεια των θερμοκρασιών από rack σε rack (figure 6.28). Αρχικά μπορεί να γίνει η παρατήρηση ότι τα racks που δεν γειτνιάζουν με άλλα έχουν χαμηλότερες θερμοκρασίες. Αυτή η παρατήρηση τεκμηριώνεται καλύτερα από την κάτοψη στην οποία φαίνεται το πεδίο των οριζόντιων ταχυτήτων (βλ. Figure 6.31), οι οποίες γίνονται πιο μεγάλες καθώς εισέρχεται η θερμή στην ψυχρή περιοχή. Όμως βλέπουμε ότι σημαντικό ρόλο παίζει και η παροχή του ψυχρού αέρα: πιο συγκεκριμένα φαίνεται εκεί που υπάρχει διπλή σειρά στομίων και έχουμε διπλάσια παροχή, εκεί τα racks που είναι δίπλα στην διπλή σειρά έχουν μικρότερες θερμοκρασίες.

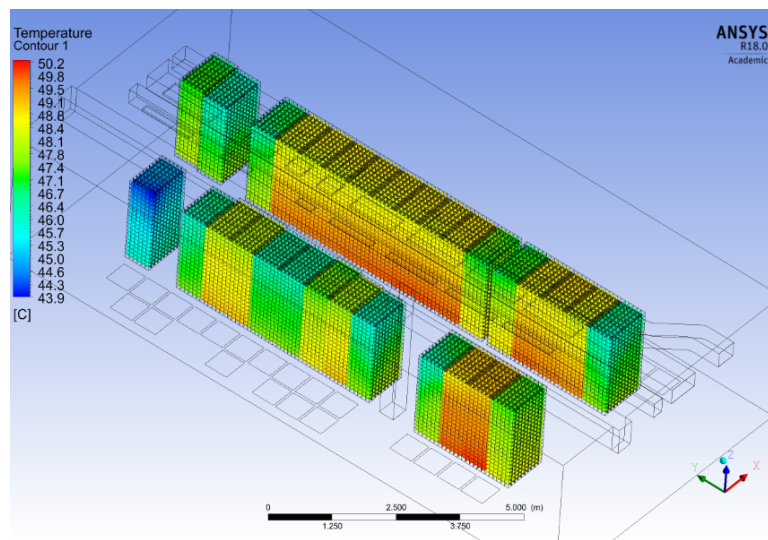


Figure 6.28: Η κατατομή των θερμοκρασιών των racks

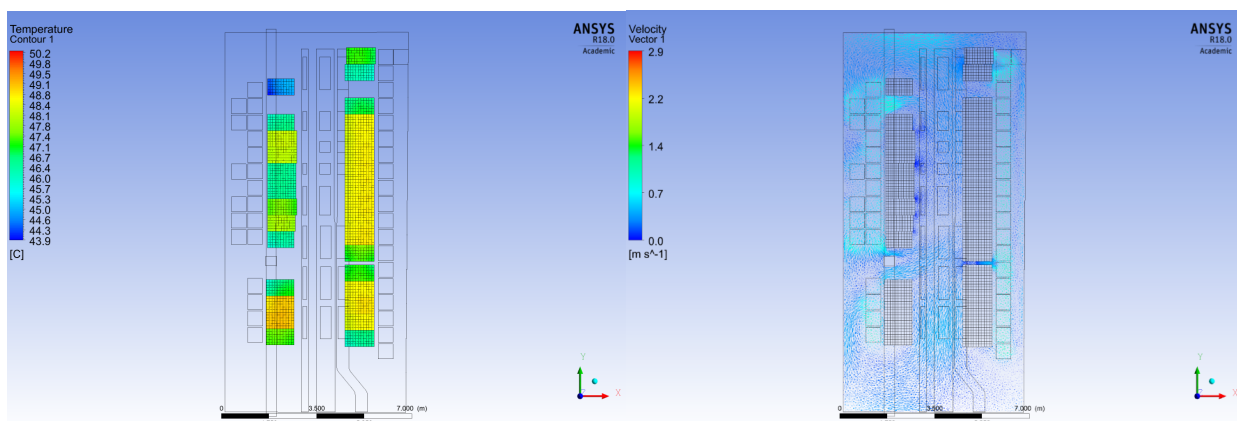


Figure 6.29: Η κάτοψη της κατατομής των θερμοκρασιών των racks μαζί με την κάτοψη των οριζόντιων ταχυτήτων

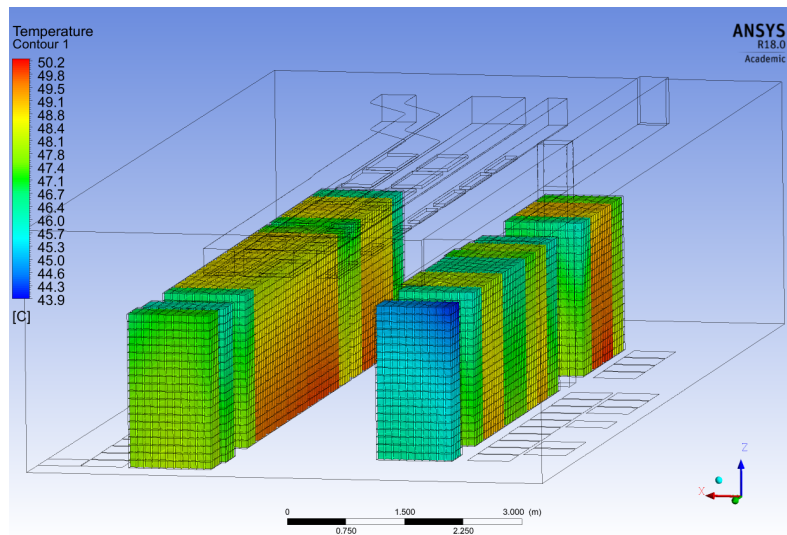


Figure 6.30: Η κατατομή των θερμοκρασιών των racks

Πεδίο ταχυτήτων

Βλέπουμε στην εικόνα 6.31, την απεικόνιση της τομής x-y που είναι σε ύψος $z=1\text{m}$ από το δάπεδο (στο μέσον των racks) και παρίσταται σε αυτή το πεδίο των ταχυτήτων. Στο πεδίο αυτό βλέπουμε εκ πρώτης όψews την κατάσταση των ταχυτήτων που διαφοροποιείται σημαντικά μεταξύ του θερμού και του ψυχρού διαμερίσματος του χώρου. Επίσης να πούμε ότι οι ταχύτητες εισόδου στα στόμια στο σχήμα 6.31, δεξιά όπως κοιτάμε την κάτοψη, φαίνονται να είναι υψηλότερες από αυτές συγκριτικά με αυτές στην αριστερή πλευρά του σχήματος, (ενώ οι θερμοκρασίες εισόδου έχουν μικρότερες διακυμάνσεις (βλέπε και Figure 5.6). Αυτό που επίσης μπορεί να παίζει κάποιο ρόλο είναι ότι δεξιά στο σχήμα δεν έχουμε ασυνέχειες στα racks και κενές θέσεις (ενώ αριστερά φαίνεται και η παρεμβολή μιας κολώνας), με αποτέλεσμα να μην εισχωρεί το θερμό ρεύμα στο ψυχρό, γεγονός που θέλουμε να αποφύγουμε.

Ακόμα στην εικόνα 6.33 έχουμε ταχύτητες στην τομή z-x. Εκεί μπορούμε να δούμε ότι έχουμε υψηλότερες ταχύτητες κοντά στα στόμια εισόδου αλλά και αύξηση των ταχυτήτων στα στόμια εξόδου. Τέλος οι ταχύτητες όσο ανεβαίνουμε καθ' ύψος τα racks, έχουμε μείωση των ταχυτήτων, γεγονός που σημαίνει ότι υπάρχει κίνδυνος να μην έχουμε καλή ψύξη στα ψηλότερα σημεία των racks.

Στην εικόνα 6.34, στην ίδια τομή (x-y επίπεδο σε ύψος $z=1\text{m}$) βλέπουμε τα διανύσματα των ταχυτήτων στο x-y επίπεδο, από όπου παρατηρείται να εισχωρεί το ρεύμα του ψυχρού στο θερμό διαμέρισμα. Τέλος στην εικόνα 6.32 που είναι στην τομή στο επίπεδο z-x, παρατηρείται ότι το πεδίο των ταχυτήτων είναι πολύ ασθενές στην περιοχή πάνω από τα racks. Το γεγονός αυτό εξηγεί ίσως το φαινόμενο κάποιες θερμές περιοχές (hot spot) να παρατηρούνται πέρα από την θερμή πλευρά των rack, στην έξοδο του αέρα από αυτά και ακριβώς πάνω από τα racks (βλέπε και εικόνα 6.40)

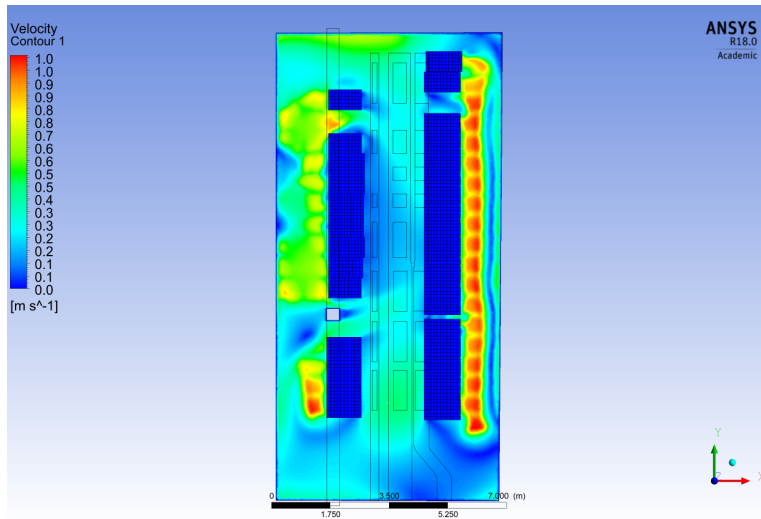


Figure 6.31: Κάτοψη σε ύψος 1 m από το δάπεδο. Το πεδίο ταχυτήτων. Ταχύτητες εισόδου στα στόμια ~ 1 m/sec

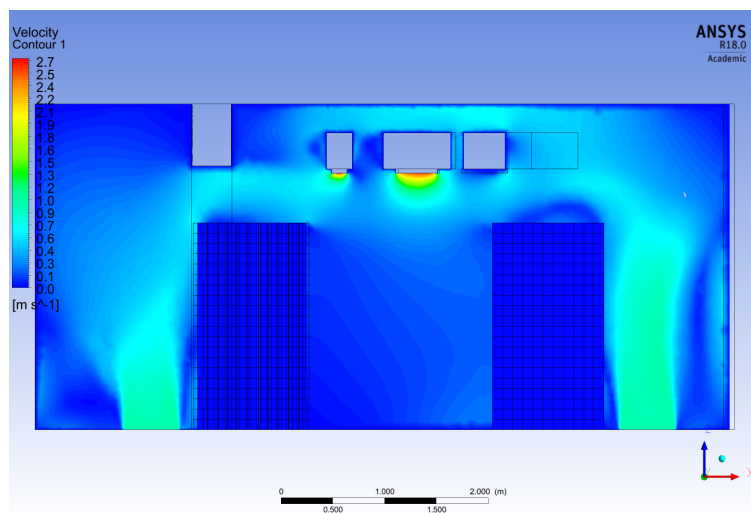


Figure 6.32: Όψη. Το πεδίο ταχυτήτων. Ταχύτητες εισόδου στα στόμια ~ 1 m/sec

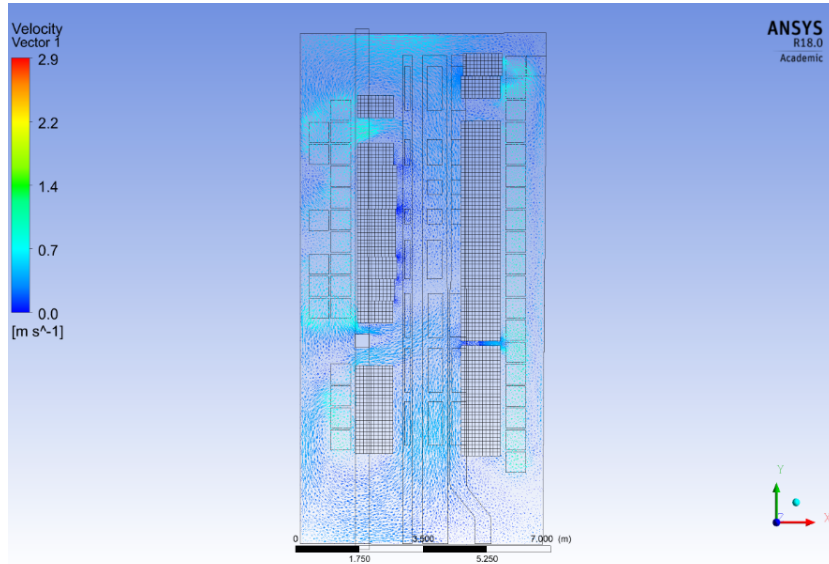


Figure 6.33: Διανύσματα ταχύτητας. Κάτοψη στην τομή στο x-y επίπεδο, σε ύψος 1 m από το δάπεδο

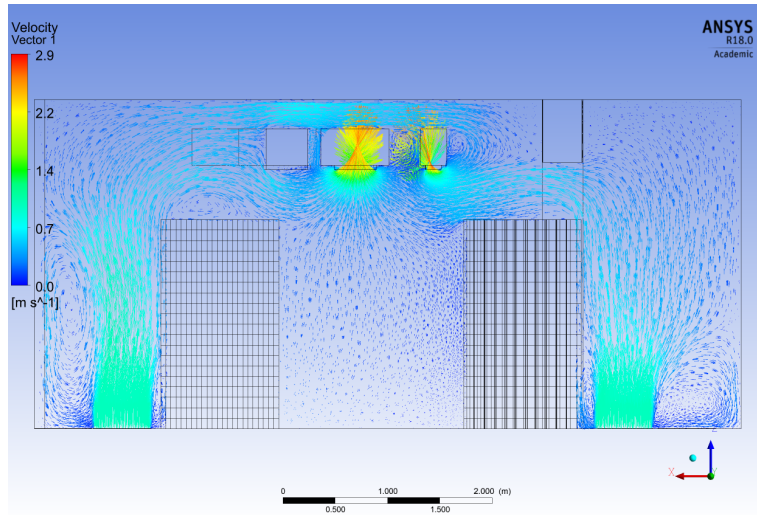


Figure 6.34: Διανύσματα ταχύτητας Όψη. Μέσα στον όγκο των racks καθώς οι ταχύτητες είναι πολύ μικρές δεν φαίνονται τα διανύσματα της ταχύτητας

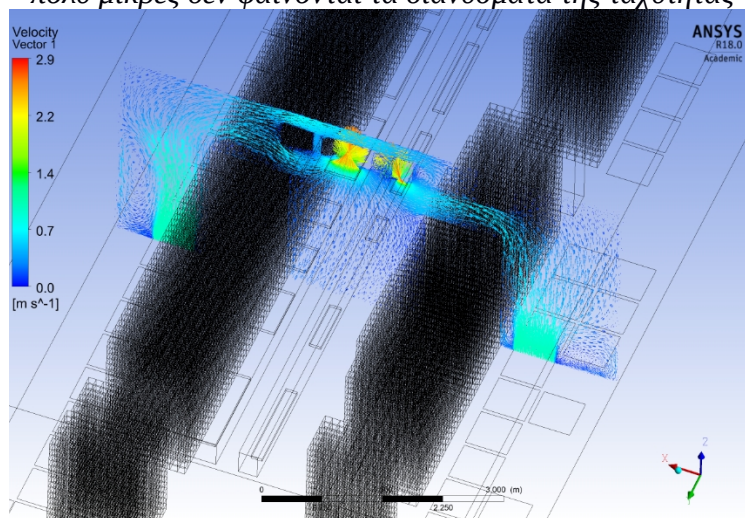


Figure 6.35: Διανύσματα ταχύτητας

Ισοθερμοκρασιακές επιφάνειες

Στις παρακάτω εικόνες έχουμε την αναπαράσταση ισοθερμοκρασιών επιφανειών που μπορεί να εξάγει στο ANSYS Fluent. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να γνωρίζουμε σε ποια σημεία του πεδίου ροής έχουμε την θερμοκρασία που επιλέγουμε προς αναπαράσταση. Στις παρακάτω εικόνες βλέπουμε την εξέλιξη της ψύξης: Αρχικά αναπαρίστανται οι επιφάνειες των 25°C. Αυτές βρίσκονται στο ψυχρό μόνο διαμέρισμα. Ακόμα παρατηρείται στο δεξιό μέρος του ψυχρού διαμερίσματος οι σχετικά ψυχρές αυτές μάζες να φθάνουν μέχρι και πάνω από τα racks καλύπτοντας, δείχνοντας έτσι ότι ο ψυχρός αέρας φθάνει και μέχρι το ύψος των 2 m (figure 6.36). Αντίθετα στο αριστερό μέρος της εικόνας 6.36. Όπως είπαμε υπάρχουν μεγαλύτερες ταχύτητες εισόδου του αέρα, στα στόμια που φαίνονται αριστερά στην εικόνα. Ακόμα για την εξήγηση του φαινομένου πρέπει να δει κανείς το πεδίο ταχυτήτων (figure 6.31) όπου φαίνεται ότι έχουμε μεγαλύτερη ανάμειξη στο δεξί μέρος, λόγω των κενών που εκεί υπάρχουν. Στην εικόνα 6.38 φαίνεται η εισχώρηση των ψυχρών μαζών αέρα στα κενά όπου δεν έχουμε τα racks για να λειτουργούν ως φυσικό εμπόδιο στην ανεπιθύμητη ανάμειξη ψυχρού με θερμό αέρα.

Στην εικόνα 6.38 έχουμε την απόδοση των ισοθερμοκρασιακών επιφανειών των 28°C. Οι επιφάνειες αυτές συναντώνται πλέον μόνο στη θερμή περιοχή και σχηματίζουν ένα κλοιό γύρω και πάνω από τα racks.

Στην εικόνα 6.39 έχουμε τις ισοθερμοκρασιακές επιφάνειες των 30°C. Αυτές καταγράφονται μόνο πάνω και κατά δεύτερο λόγω μπροστά από τα racks. Το γεγονός αυτό είναι ενδεικτικό ότι το πρόβλημά μας εδώ είναι η λίγη παροχή στο δεξί τμήμα της εικόνας 6.40, με αποτέλεσμα να μην φθάνει ικανή ποσότητα ψύξης ψηλά και πάνω από τα racks. Το συμπέρασμα αυτό πρέπει να το δούμε και σε συνδυασμό με την εικόνα 6.30 όπου έχουμε στην περιοχή με ισοθερμοκρασιακές του αέρα των 30°C, αντίστοιχα υψηλές θερμοκρασίες στα racks. Να πούμε ότι δεν καταγράφηκαν επιφάνειες με θερμοκρασία μεγαλύτερη των 30°C.

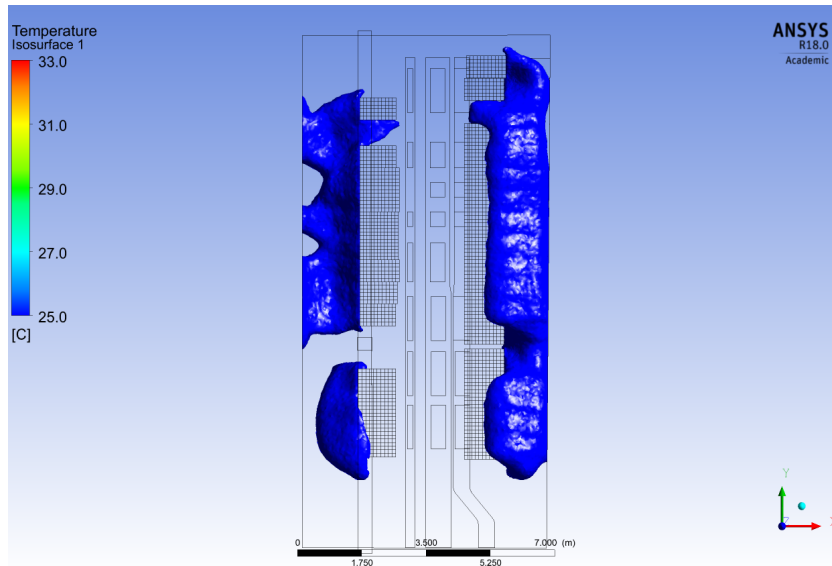


Figure 6.36: Κάτοψη. Ισοθερμοκρασιακές επιφάνειες θερμοκρασίας: 25 °C.

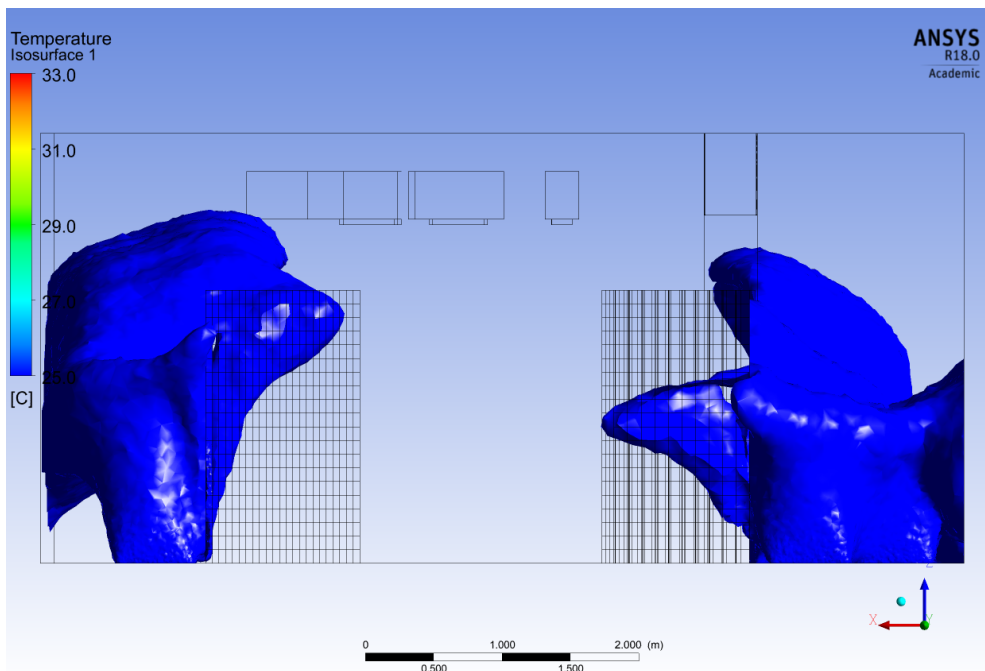


Figure 6.37: Όψη. Ισοθερμοκρασιακές επιφάνειες θερμοκρασίας: 25 °C. Θερμοκρασία αέρα εξόδου από τα στόμια 19 °C

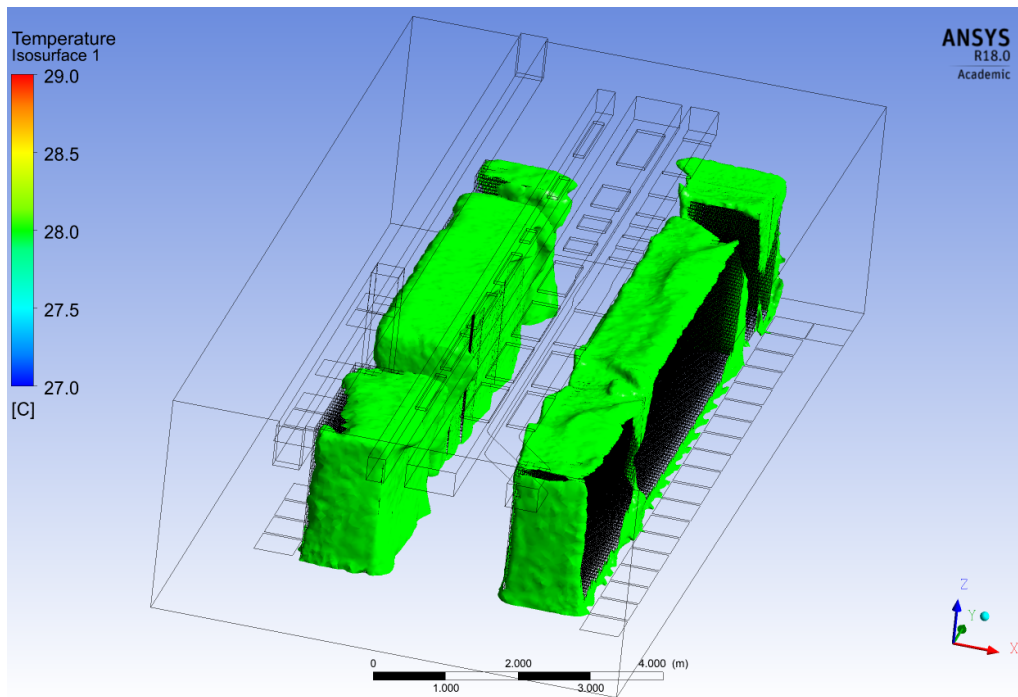


Figure 6.38: Ισοθερμοκρασιακές επιφάνειες θερμοκρασίας: 28 °C.

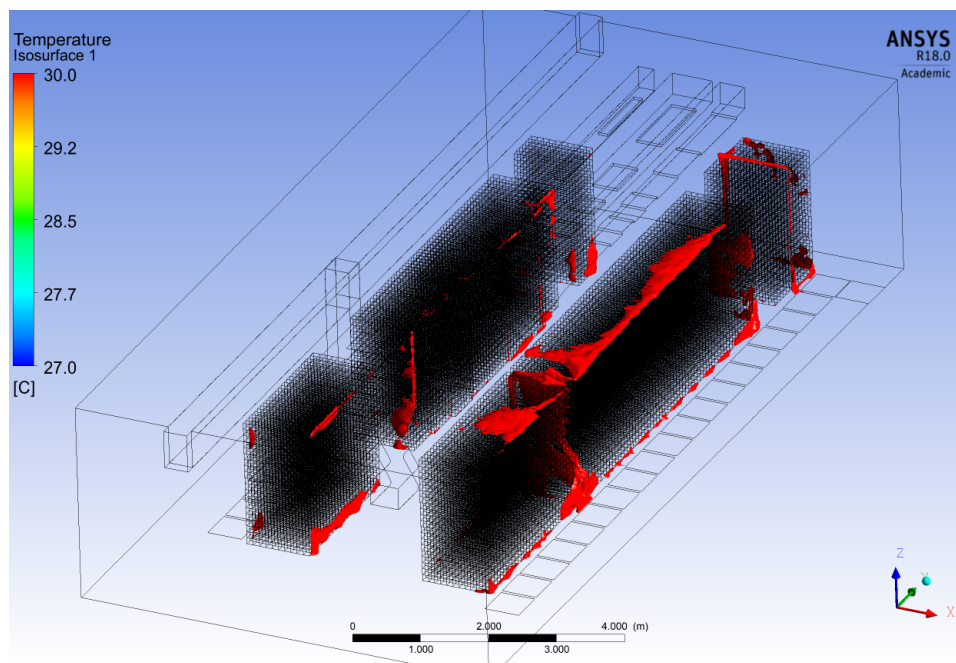


Figure 6.39: Ισοθερμοκρασιακές επιφάνειες θερμοκρασίας: 30 °C.

Συμπεράσματα:

Με το μοντέλο αυτό επιχειρήθηκε να διαμορφωθεί ένα μοντέλο βάσης (base case model) το οποίο να είναι κοντά στην πραγματική κατάσταση του Data Center. Για το λόγο αυτό οι

οριακές συνθήκες είναι αυτές που μετρήθηκαν και καταγράφηκαν στο πεδίο. Όπως έχει αναφερθεί η κεντρική περιοχή του Data Center, έχει την μεγαλύτερη πυκνότητα θερμικού φορτίου και με κάποιες παραδοχές μπορεί να θεωρηθεί χαρακτηριστική περιοχή για όλο το Data Center. Οι αβεβαιότητες αφορούν σε πρώτη ανάλυση στην γεωμετρία του μοντέλου, που τώρα έχει αποκοπεί από τον συνολικό χώρο του Data Center. Το αποτέλεσμα είναι να μην επηρεάζεται (αρνητικά) το πεδίο μελέτης, από τυχόν ανακυκλοφορίες των ρευμάτων αέρα και ανάμειξη του θερμού με το ψυχρό ρεύμα.

Στο μοντέλο αυτό φαίνεται να υπάρχει επάρκεια της ψύξης, αν και καταγράφονται σημαντικές διαφοροποιήσεις στις θερμοκρασίες των racks. Ακόμα ρόλο φαίνεται να διαδραματίζει το μέγεθος της παροχής του αέρα. Έτσι φαίνονται καλύτερα αποτελέσματα στα racks που στο ψυχρό διαμέρισμα έχουν διπλή σειρά στομίων και επομένως διπλάσια παροχή ψυχρού αέρα. Ακόμα φαίνεται αρνητικό ρόλο να παίζει το γεγονός της απουσίας διατάξεων που θα απομόνωναν το ψυχρό από το θερμό διαμέρισμα. Έτσι φαίνονται γραμμές ροής να διέρχονται πάνω και έξω από τα racks προκειμένου να καταλήξουν στα στόμια απαγωγής. Επίσης από την αναπαράσταση των διανυσμάτων της ταχύτητας στην κάτοψη φαίνεται το ψυχρό ρεύμα να εισέρχεται στο θερμό εκεί όπου υπάρχουν κενά και δεν παρεμβάλλεται κάποιο rack μεταξύ του ψυχρού και του θερμού διαμερίσματος. Το αποτέλεσμα είναι να έχουμε ανάμειξη του ψυχρού με το θερμό ρεύμα σπαταλώντας έτσι άσκοπα το θερμικό έργο που θα έπρεπε να καταναλώνεται για την ψύξη.

Η προηγούμενη παρατήρηση μας οδηγεί και σε αυτό το συμπέρασμα ως προς τις θερμοκρασίες των racks: είναι εμφανές ότι τα racks που είναι στα άκρα των σειρών, είναι αυτά που φαίνεται να έχουν και τις μικρότερες θερμοκρασίες. Αυτό είναι λογικό εφόσον δεν έχουν επιφάνειες επαφής με τα γειτνιάζοντα αλλά και επειδή στις τρεις πλευρές τους διαρρέονται από το ρεύμα του ψυχρού αέρα. Ωστόσο ειδικά στα σημεία που τα rack είναι στο μέσον της σειράς χωρίς να γειτνιάζουν με άλλα, η καλύτερη ψύξη τους σημαίνει και άσκοπη είσοδο και ανάμειξη του ψυχρού με το θερμό ρεύμα

Τέλος θα πρέπει να σημειώσουμε ότι στο μοντέλο δεν σημειώνονται μεγάλες θερμοκρασίες (πάνω από 30 °C). Εντούτοις θερμές περιοχές των 30°C καταγράφονται ακριβώς πάνω από τα racks.

6.2.2 Μοντέλο για την επίδραση της θερμοκρασίας εισόδου του ψυχρού αέρα

Γενικά

Με το μοντέλο αυτό γίνεται διερεύνηση της κατάστασης που προκύπτει στην κεντρική περιοχή του Data Center σε περίπτωση που οι μηχανικοί της εγκατάστασης επιλέξουν να αυξήσουν την θερμοκρασία εισόδου από τα στόμια στο δάπεδο, από τους 19°C στους 22°C. Η ενέργεια που στοχεύει στην ενεργειακή εξοικονόμηση του χώρου, έχει τα παρακάτω αποτελέσματα όπως αυτά φαίνονται από την γραφική αναπαράσταση της επίλυσης του μοντέλου. Αυτό που προκύπτει είναι η άνοδος της θερμοκρασίας στους 32°C στην έξοδο των racks, γεγονός που συνιστά κίνδυνο για την απρόσκοπτη λειτουργία του ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Καθώς η γεωμετρία του μοντέλου και το πεδίο ταχυτήτων και γραμμών ροής δεν σημειώνει σημαντικές μεταβολές, δεν παρουσιάζεται εδώ, αλλά μπορεί κανείς να ανατρέξει στο προηγούμενο μοντέλο προς βοήθεια και καλύτερη κατανόηση.

Πληροφορίες Μοντέλου :

Τριάντα (30) rack – Τρεις (3) αεραγωγοί με είκοσι τρία (23) στόμια απαγωγής αέρα – Σαράντα (40) στόμια εισόδου αέρα

	Οριακές συνθήκες	Οριακές συνθήκες στο Fluent
1	Στόμια εισόδου ψυχρού αέρα στο δάπεδο	Velocity inlet: 1 m/sec – Temperature:295 K
2	Στόμια απαγωγής αέρα	Pressure Outlets (Pout=101325 Pa)
3	Είσοδος του Rack	Interior
4	Έξοδος του Rack	Interior
5	Rack	Πηγή θερμότητας : 2000 W/m ³ ανά Rack
6	Rack	Interior: fan type (πολυωνυμική σχέση για την πτώση πίεσης Δρ ως προς την ταχύτητα
7	Rack	Πορώδες Μέσο (Porous media), porosity:0.5 , Viscous resistance-x :2.111e+06 Viscous resistance-y :2.111e+20 Viscous resistance-z :2.111e+20 Inertia resistance(x,y,z):20 Solid: Aluminum, Density 2719 kg/m ³ : Cp: 871 j/kg K , Thermal Conductivity:202,4 W/mK
8	Στοιχεία του υπολογιστικού	Κόμβοι: 17.722.849

	πλέγματος	Στοιχεία :12.626.681 Μέθοδος: Tetrahedrons (Patch Conforming Method for the fluid domain)
9	Διαστάσεις του πλέγματος	Length x: 6.7581 m Length y: 14.215 m m Length z: 3.15 m

Πίνακας 6.6: δεδομένα εισαγωγής του μοντέλου

Πεδίο Θερμοκρασιών

Στις παρακάτω εικόνες έχουμε τις θερμοκρασίες που εξάγονται στον όγκο των racks. Και εδώ ισχύει η συνθήκη της ομοιογενούς εκπομπής θερμότητας από όλο τον όγκο του rack. Άρα καταλαβαίνει κανείς ότι μέσα σε ένα rack θα υπάρχει ένα πολύ ανομοιογενές πεδίο θερμοκρασιών, διαφορετικό από αυτό που βλέπουμε εδώ. Ακόμα παρατηρεί κανείς σε σύγκριση με το πρώτο μοντέλο (βλέπε figure 6.30) ότι αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα έχει οδηγήσει σε πολύ θερμότερες θερμοκρασίες στα racks που φθάνουν μέχρι και τους 55οC. Τα racks στην άκρη του διαδρόμου καταγράφονται με μικρότερες θερμοκρασίες, για τους λόγους που αναφέρθηκαν και στο προηγούμενο μοντέλο, στην παράγραφο που περιγράφεται το πεδίο ταχυτήτων. Επίσης μεγαλώνει τώρα η μέγιστη θερμοκρασία που καταγράφεται στα racks (φθάνει στους 54,9°C , ενώ στο βασικό μοντέλο η μέγιστη θερμοκρασία είναι 50,2 °C). Ακόμα βλέπουμε στην εικόνα 6.41, όπου έχουμε όψη της κατανομής των θερμοκρασιών σε τομή στο επίπεδο z-x στο μέσον της y διάστασης, ότι έχουμε ψυχρό αέρα πάνω από τον αεραγωγό γεγονός που δεν ιδανικά δεν θα το επιθυμούσαμε, καθώς θέλουμε αυτός να διέρχεται από τα racks, παράγοντας ψύξη.

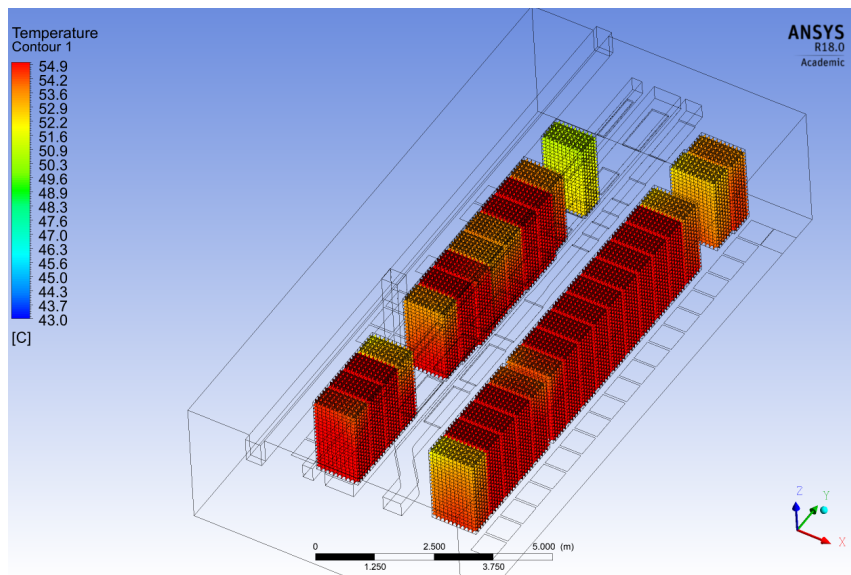


Figure 6.40: Μια όψη της κατανομής των θερμοκρασιών των racks.

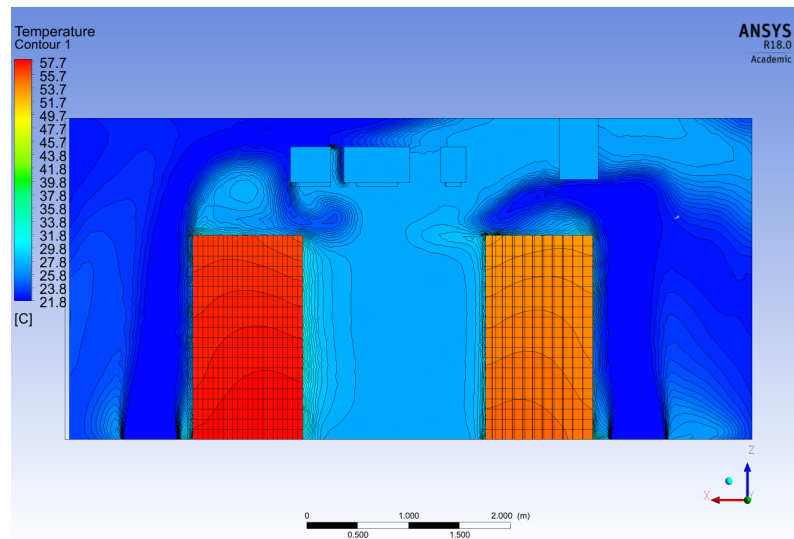


Figure 6.41: Όψη της κατανομής των θερμοκρασιών: Τομή στο επίπεδο z-x στο μέσον της y διάστασης

Πεδίο θερμοκρασιών στις διεπιφάνειες

Στα παρακάτω σχήματα έχουμε τις θερμοκρασίες στις διεπιφάνειες (mesh interfaces) μεταξύ του πεδίου ροής του ρευστού και των στερεών. Μπορεί κανείς να παρατηρήσει αρχικά τις διαφορές θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου του αέρα με θερμοκρασία αέρα εισόδου (μέση τιμή) 27°C και θερμοκρασία εξόδου (μέση τιμή) 31°C . Ακόμα μπορεί κανείς να δει, ότι ο αέρας γενικά αν και έχει υψηλότερες θερμοκρασίες όσο πάμε πιο ψηλά στα racks, εντούτοις είναι αρκετά θερμός σε σύγκριση και με την εικόνα 6.26 και 6.27 ώστε να επιτύχει ικανοποιητική ψύξη.

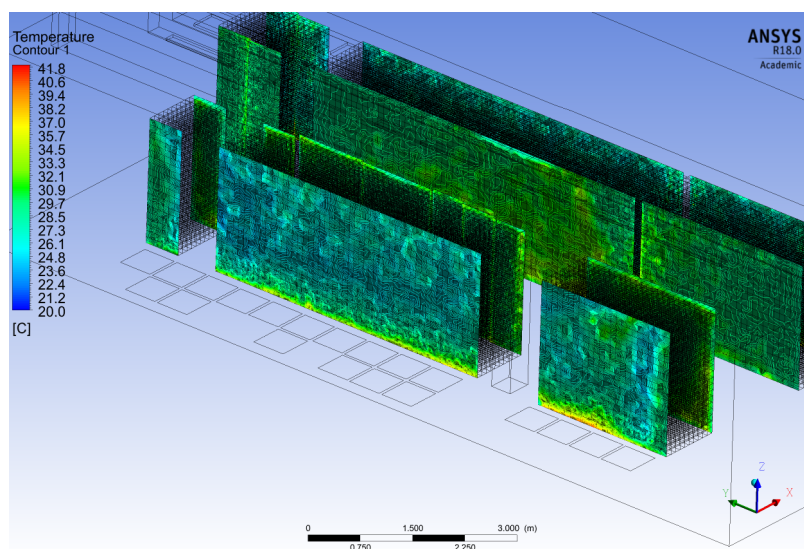


Figure 6.42: Όψη του πεδίου θερμοκρασιών στις επιφάνειες επαφής (είσοδος και έξοδος) του αέρα με τα racks.

Ισοθερμοκρασιακές επιφάνειες

Στις παρακάτω εικόνες έχουμε την αναπαράσταση ισοθερμοκρασιών επιφανειών που μπορεί να εξάγει στο ANSYS Fluent. Αρχικά αναπαρίστανται οι επιφάνειες των 27° C. Αυτές βρίσκονται κυρίως στο ψυχρό διαμέρισμα και πάνω από τα racks και σε μικρό βαθμό και πάνω από τους αεραγωγούς. Ακόμα παρατηρείται στο δεξί μέρος του ψυχρού διαμερίσματος οι σχετικά ψυχρές αυτές μάζες να καλύπτουν πιο ομοιόμορφα τα racks, ενώ και στο αριστερό μέρος έχουμε καλή τέτοια εικόνα αν και εκεί φαίνεται να έχουμε και ανάμειξη ψυχρού με τον θερμό αέρα. Ακόμα για την εξήγηση του φαινομένου πρέπει να δει κανείς το πεδίο ταχυτήτων (figure 6.34) όπου φαίνεται ότι έχουμε μεγαλύτερη ανάμειξη στο δεξί μέρος, λόγω των κενών που εκεί υπάρχουν. Στη συνέχεια στην εικόνα 6.44 και 6.45 έχουμε τις ισοθερμοκρασιακές επιφάνειες θερμοκρασίας 28 °C. που πλέον είναι μόνο στο θερμό διαμέρισμα. Στη συνέχεια έχουμε τις ισοθερμοκρασιακές επιφάνειες θερμοκρασίας 30°C αλλά και 32°C. Οι ισοθερμοκρασιακές επιφάνειες θερμοκρασίας 30°C της εικόνας 6.46 είναι πλέον πιο εκτεταμένες σε σύγκριση με το βασικό μοντέλο (βλέπε εικόνα 6.40) καθώς έχουν αυξηθεί οι επιφάνειες αυτές, κυρίως τώρα μπροστά από τα racks. Αυτή η εικόνα μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως αυτή η υψηλότερη θερμοκρασία αέρα είναι που κρίνεται αρνητικά και όχι η παροχή, μιας και τώρα η σχετικά υψηλή θερμοκρασία του αέρα ψύξης εξέρχεται ακόμα πιο ψηλά από την έξοδο των racks. Για το λόγο αυτό καταγράφονται πλέον και θερμοκρασίες των 32°C που είναι αρκετά ψηλές για την καλή λειτουργία του ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Αυτές όπως βλέπουμε στην εικόνα 6.47 βρίσκονται μπροστά από τα racks, στη θερμή περιοχή, πάνω από τα racks αλλά και ενδιάμεσα σε σημεία όπου εγκλωβίζεται πιθανά θερμή μάζα αέρα καθώς δεν υπάρχει στα σημεία αυτά ροή του αέρα ψύξης.

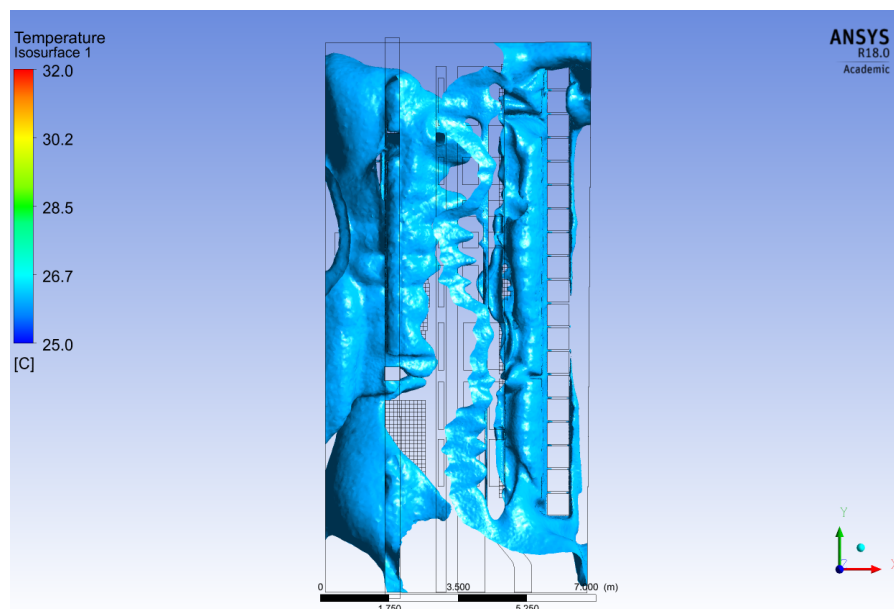


Figure 6.43: Ισοθερμοκρασιακές επιφάνειες θερμοκρασίας: 27 °C. Κάτωψη

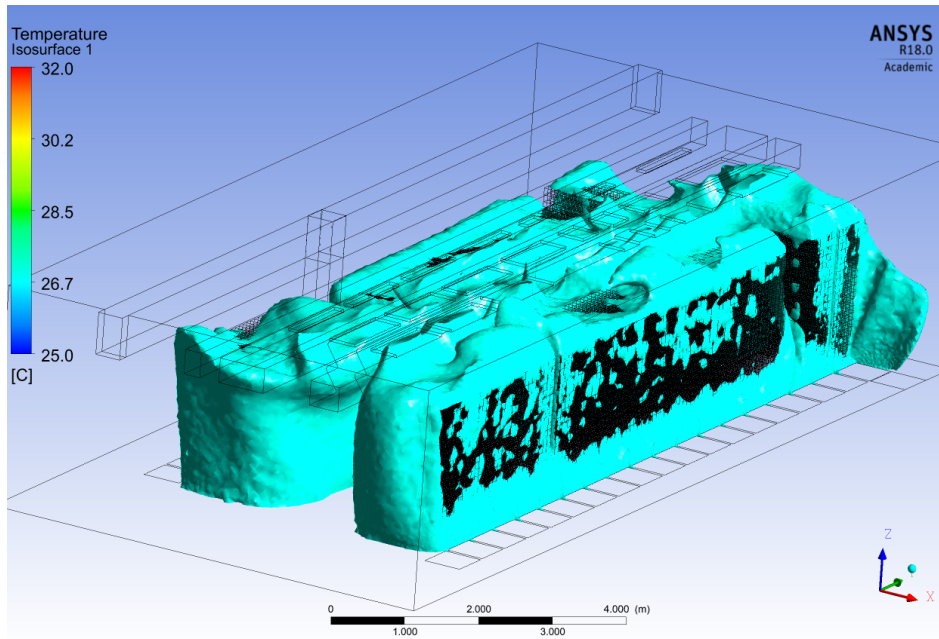


Figure 6.44: Ισοθερμοκρασιακές επιφάνειες θερμοκρασίας: 28 °C.

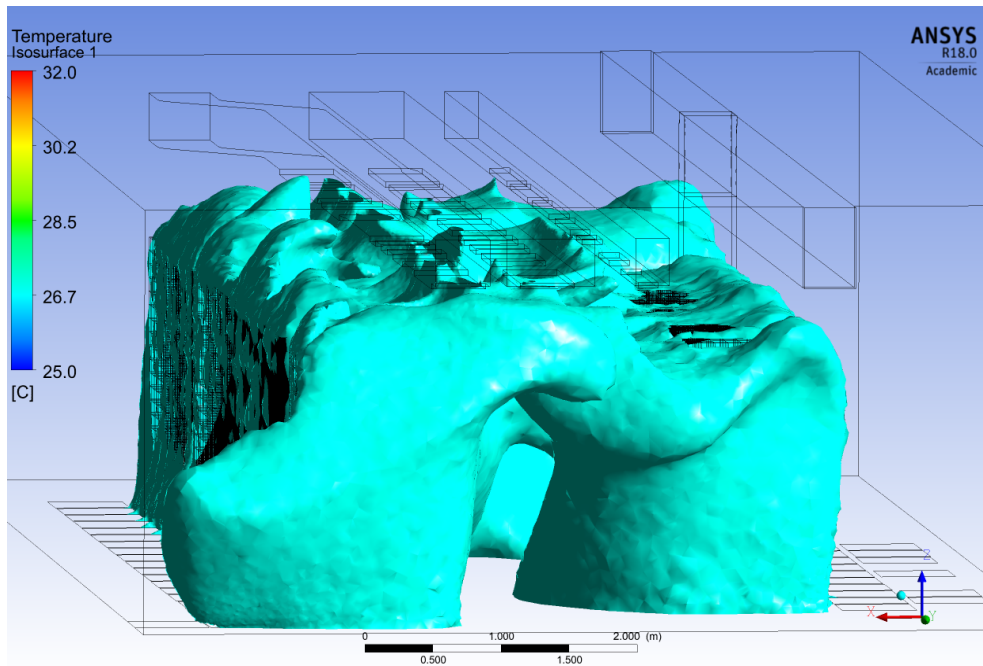


Figure 6.45: Ισοθερμοκρασιακές επιφάνειες θερμοκρασίας: 28 °C.

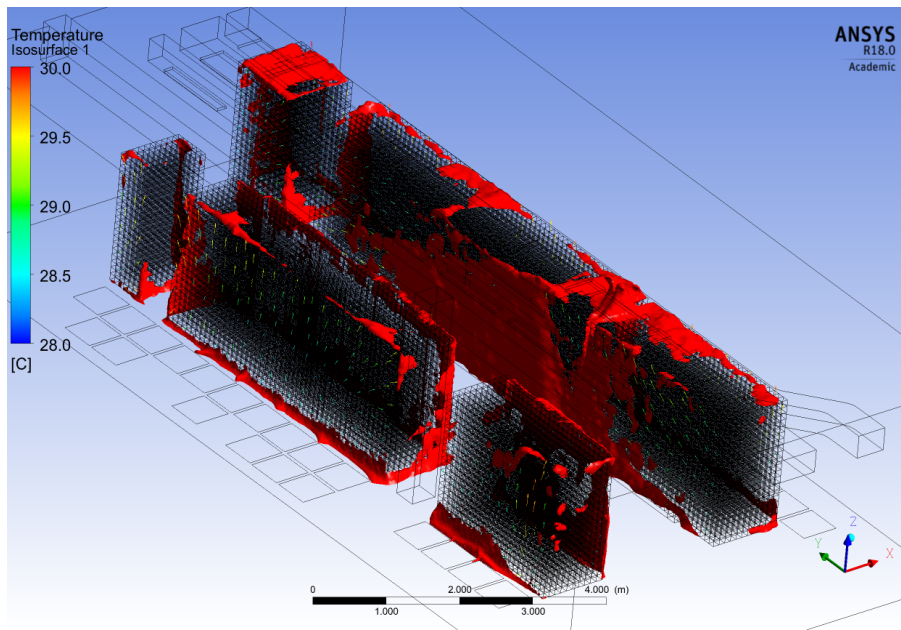


Figure 6.46: Ισοθερμοκρασιακές επιφάνειες θερμοκρασίας: 30°C.

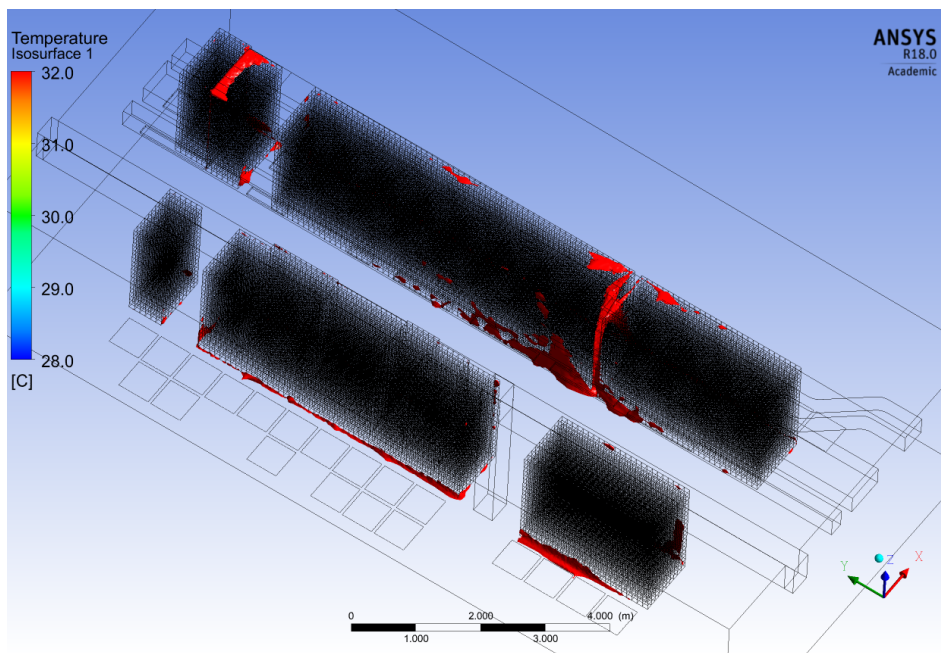


Figure 6.47: Ισοθερμοκρασιακές επιφάνειες θερμοκρασίας: 32 °C.

Συμπεράσματα:

Στο μοντέλο επιχειρήθηκε να γίνει διερεύνηση της επίδραση της θερμοκρασίας εισόδου του ψυχρού αέρα στα στόμια του δαπέδου. Πιο συγκεκριμένα προκειμένου να υπάρχει ενεργειακή εξοικονόμηση εξετάστηκε το ενδεχόμενο ο ψυχρός αέρα να εισέρχεται με την υψηλότερη θερμοκρασία των 22°C. Με αυτή τη ρύθμιση του ψυχρού αέρα βλέπουμε από τις

ισοθερμοκρασιακές επιφάνειες πως μεγάλωσαν οι επιφάνειες του αέρα των 30°C σε σύγκριση με το αρχικό μοντέλο σύγκρισης. Μάλιστα αυτές οι επιφάνειες φαίνονται στην έξοδο του αέρα από τα racks, καταδεικνύοντας πως αυτή η θερμοκρασία είναι υψηλή προκειμένου να πετύχει αποτελεσματική ψύξη του ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Ακόμα παρατηρούνται θερμοκρασίες που φτάνουν στους 32°C, θέτοντας σε κίνδυνο την καλή λειτουργία του εξοπλισμού. Οι επιφάνειες αυτές φαίνονται πάλι να είναι μπροστά και χαμηλά από τα racks και σε μικρότερο βαθμό σε σημεία όπου δεν έχουμε καλή ροή του αέρα ή και πάνω από τα rack. Παρόλα αυτά οι υπερβάσεις αν και υπάρχουν δεν είναι εκτεταμένες.

Από τα παραπάνω καταλαβαίνει κανείς πόσο κρίσιμη παράμετρος είναι αυτή της θερμοκρασίας του ψυχρού αέρα και πόσο επηρεάζει τα θερμικά φαινόμενα. Την ίδια στιγμή όμως καταλαβαίνουμε πως θα μπορούσε να υπάρχει εξοικονόμηση εάν καταφέρναμε μια βέλτιστη ρύθμιση αυτής της παραμέτρου καθώς ακόμα και αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1°C, (με δεδομένο ότι δεν θα έχουμε υπερβάσεις και δυσλειτουργίες) σημαίνει μεγάλη εξοικονόμηση για τον εξεταζόμενο χώρο.

6.2.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων στην κεντρική περιοχή του Data Center:

Η επίδραση της παροχής του ψυχρού αέρα. Η περίπτωση της μείωσης παροχής.

Γενικά

Με το υπολογιστικό αυτό μοντέλο αυτό γίνεται διερεύνηση της κατάστασης που προκύπτει στην κεντρική περιοχή του Data Center σε περίπτωση που οι μηχανικοί της εγκατάστασης επιλέξουν να μειώσουν την εισερχόμενη παροχή του αέρα ψύξης κατά 30% (ή αν εκδηλωθεί βλάβη σε κάποια/ες κλιματιστική μονάδα), γεγονός που μεταφράζεται σε μείωση της ταχύτητας εισόδου του ψυχρού αέρα, από την τιμή του **1 m/sec** στο **0,7 m/sec**. Η ενέργεια αυτή στοχεύει στην ενεργειακή εξοικονόμηση του χώρου, καθώς όπως έχουμε πει μια μείωση της τάξης του 30% θα σημαίνει εξοικονόμηση ισχύος 34,3% ($W_2=W_1 * (N_2/N_1)^3$). Η νέα αυτή κατάσταση αρχικών συνθηκών θα έχει τα παρακάτω αποτελέσματα όπως αυτά φαίνονται από την γραφική αναπαράσταση της επίλυσης του μοντέλου, που παρουσιάζεται παρακάτω.

Πληροφορίες Μοντέλου :

Τριάντα (30) rack – Τρεις (3) αεραγωγοί με είκοσι τρία (23) στόμια απαγωγής αέρα – Σαράντα (40) στόμια εισόδου αέρα

	Οριακές συνθήκες	Οριακές συνθήκες στο Fluent
1	Στόμια εισόδου ψυχρού αέρα στο δάπεδο	Velocity inlet: 0.7 m/sec – Temperature:292 K
2	Στόμια απαγωγής αέρα	Pressure Outlets (Pout=101325 Pa)
3	Είσοδος του Rack	Interior
4	Έξοδος του Rack	Interior
5	Rack	Πηγή θερμότητας : 2000 W/m ³ ανά Rack
6	Rack	Interior: fan type (πολυωνυμική σχέση για την πτώση πίεσης Δρ ως προς την ταχύτητα
7	Rack	Πορώδες Μέσο (Porous media), porosity:0.5 , Viscous resistance-x :2.111e+06 Viscous resistance-y :2.111e+20 Viscous resistance-z :2.111e+20 Inertia resistance(x,y,z):20 Solid: Aluminum, Density 2719 kg/m ³ : Cp: 871 j/kg K , Thermal Conductivity:202,4 W/mK

8	Στοιχεία του υπολογιστικού πλέγματος	Κόμβοι: 17.722.849 Στοιχεία :12.626.681 Μέθοδος: Tetrahedrons (Patch Conforming Method for the fluid domain)
9	Διαστάσεις του πλέγματος	Length x: 6.7581 m Length y: 14.215 m m Length z: 3.15 m

Πίνακας 6.7: δεδομένα εισαγωγής του μοντέλου

Πεδίο Θερμοκρασιών

Στις παρακάτω εικόνες έχουμε τις θερμοκρασίες που εξάγονται στον όγκο των racks. Και εδώ ισχύει η συνθήκη της ομοιογενούς εκπομπής θερμότητας από όλο τον όγκο του rack. Άρα καταλαβαίνει κανείς ότι μέσα σε ένα rack θα υπάρχει ένα πολύ ανομοιογενές πεδίο θερμοκρασιών, διαφορετικό από αυτό που βλέπουμε εδώ. Ακόμα παρατηρεί κανείς σε σύγκριση με το πρώτο μοντέλο (βλέπε figure 6.30 και 6.32) ότι η μείωση της παροχής αέρα έχει οδηγήσει σε πολύ θερμότερες θερμοκρασίες στα racks που φθάνουν μέχρι και τους 59.8°C. Η θερμοκρασία αυτή είναι μεγαλύτερη και αν συγκρίνει κανείς με τη μέγιστη θερμοκρασία των 54,9 °C του μοντέλου με την αυξημένη (στους 22°C) θερμοκρασία εισόδου(βλέπε εικόνα 6.41) .Τα racks στην άκρη του διαδρόμου καταγράφονται με μικρότερες θερμοκρασίες, για του λόγους που αναφέρθηκαν στην και στο προηγούμενο μοντέλο, στην παράγραφο που περιγράφεται το πεδίο ταχυτήτων.

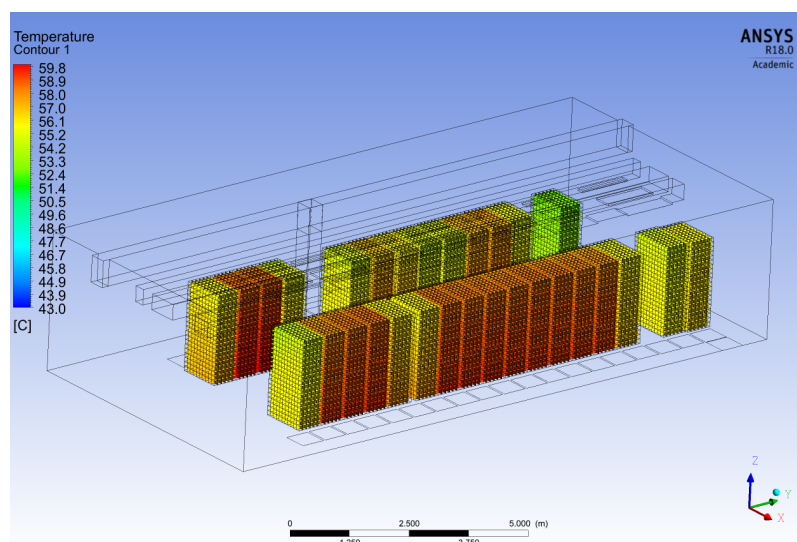


Figure 6.48: Η κάτοψη της κατατομής των θερμοκρασιών των racks.

Ισοθερμοκρασιακές επιφάνειες

Στις παρακάτω εικόνες έχουμε την αναπαράσταση ισοθερμοκρασιών επιφανειών που μπορεί να εξάγει στο ANSYS Fluent. Αρχικά αναπαρίστανται οι επιφάνειες των 32° C. Αυτές βρίσκονται στο θερμό διαμέρισμα και πάνω από τα racks και σε μικρό βαθμό και καθώς και σε σημεία ενδιάμεσα στα racks. Ακόμα παρατηρείται για πρώτη φορά να καταγράφονται και θερμοκρασίες (όχι σε μεγάλο βαθμό) που φθάνουν ακόμα και στους 34°C. Επομένως το μοντέλο δείχνει να επηρεάζεται αρνητικά πιο έντονα σε αυτό το σημείο λειτουργίας με την παροχή μειωμένη στο 0.7 m/sec στα στόμια εισόδου. Τέλος στην περίπτωση που εξετάζουμε, της μειωμένης παροχής εισόδου, φαίνεται ακόμα πιο καθαρά η ευεργετική επίδραση της περίπτωσης που μπροστά από τα racks έχουμε για την ψύξη τους, διπλή σειρά στομίων. Αυτή η παρατήρηση θα μπορούσε να καταλήξει σε μια χρήσιμη οδηγία για την μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης στο Data Center: να καταγράψουμε τα περισσότερο ενεργοβόρα racks, να τοποθετήσουμε για την καλύτερη ψύξη τους διπλή σειρά στομίων και να επιχειρήσουμε να έχουμε σημείο λειτουργίας με υψηλότερη θερμοκρασία εισόδου στα στόμια του δαπέδου για όλη την εγκατάσταση.

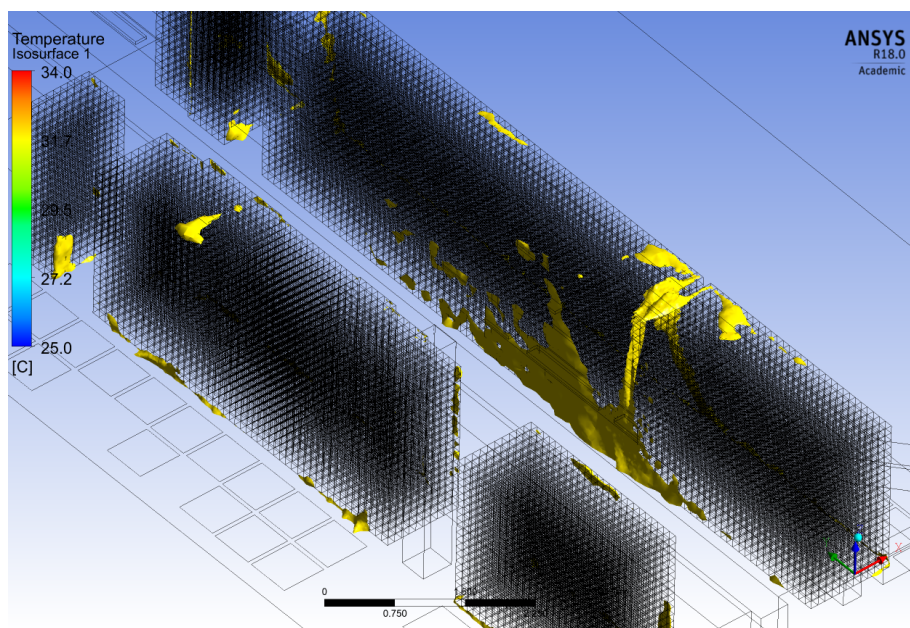


Figure 6.49: Ισοθερμοκρασιακές επιφάνειες θερμοκρασίας: 32 °C

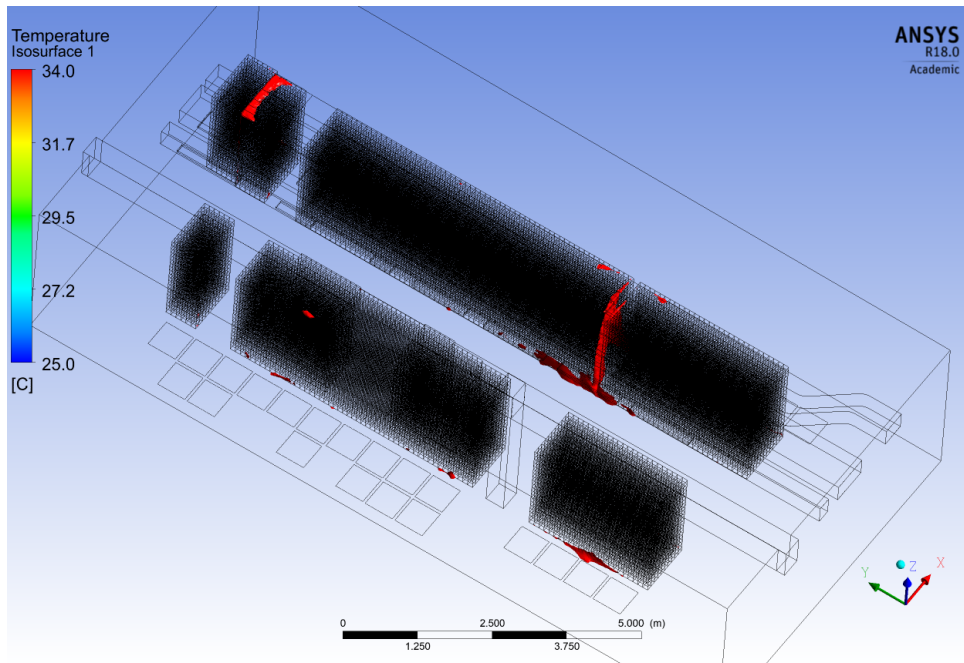


Figure 6.50 : Ισοθερμοκρασιακές επιφάνειες θερμοκρασίας: 34 °C

Συμπεράσματα:

Στο μοντέλο αυτό εξετάζεται η επίδραση της παραμέτρου της παροχής του ψυχρού αέρα, μέσω της μείωσης της ταχύτητας εισόδου από το 1m/sec περίπου, που είναι στο πρώτο μοντέλο στο 0.7 m/sec σε όλα τα στόμια εισόδου στο ψευδοδάπεδο. Εδώ φαίνεται να υπάρχουν πιο δυσμενή αποτελέσματα και σε σύγκριση με το μοντέλο όπου αυξάνουμε την θερμοκρασία εισόδου του αέρα στους 22°C από τους 19°C. Εδώ βλέπουμε οι επιφάνειες των 32°C να είναι πιο εκτεταμένες σε σχέση πάντα με το μοντέλο 6.2.2. Οι επιφάνειες αυτές και πάλι βρίσκονται μπροστά από τα racks στην θερμή περιοχή, ενώ οι μέγιστες εκεί θερμοκρασίες φθάνουν ακόμα και στους 34°C. Αυτό που επίσης παρατηρείται είναι στην περίπτωση που υπάρχουν διπλή γραμμή στομίων στο ψευδοδάπεδο, η μείωση της παροχής εκεί να μην επιφέρει αύξηση της θερμοκρασίας. Ακόμα φαίνεται τα racks που δεν γειτνιάζουν με άλλα να έχουν μικρότερες θερμοκρασίες σε σχέση με αυτά που γειτνιάζουν. Τα αποτελέσματα αυτού του μοντέλου συνδυαστικά με αυτά του μοντέλου 6.2.2 μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι για ένα “έξυπνο” και ενεργειακά αποδοτικό Data Center απαιτείται η προσεκτική ρύθμιση των παραμέτρων της θερμοκρασίας εισόδου και της παροχής του αέρα ψύξης. Για να γίνει αυτό απαιτούνται διατάξεις μετρήσεων, αυτόματου ελέγχου με απώτερο στόχο την κατά εξοπλισμό παροχή ψύξης.

6.2.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων στην κεντρική περιοχή του Data Center:

Η επίδραση της διανομής των θερμικών φορτίων του Data Center. Η περίπτωση της ανομοιόμορφης κατανομής της ίδιας συνολικής ποσότητας θερμικού φορτίου.

Γενικά

Με το υπολογιστικό αυτό μοντέλο αυτό, γίνεται διερεύνηση της κατάστασης που προκύπτει στην κεντρική περιοχή του Data Center, σε περίπτωση που οι μηχανικοί της εγκατάστασης επιλέξουν να καταναείμουν τα θερμικά φορτία με ανομοιογενή τρόπο στο πεδίο ροής. Αυτό επιτυγχάνεται επιλέγοντας τυχαία πέντε (5) από τα τριάντα(30) Racks στα οποία η εκπομπή θερμότητας είναι 4 KW/m^3 . Την ίδια στιγμή το συνολικό φορτίο των 30 Racks $\cdot 2 \text{ KW/m}^3 = 60 \text{ KW/m}^3$ διατηρείται σταθερό, οπότε στα υπόλοιπα racks έχουμε θερμικό φορτίο $1,6 \text{ KW/m}^3$. Η νέα αυτή κατάσταση συνθηκών θα έχει τα παρακάτω αποτελέσματα όπως αυτά φαίνονται από την γραφική αναπαράσταση της επίλυσης του μοντέλου στις παρακάτω εικόνες.

Πληροφορίες Μοντέλου :

Τριάντα (30) rack – Τρεις (3) αεραγωγοί με είκοσι τρία (23) στόμια απαγωγής αέρα – Σαράντα (40) στόμια εισόδου αέρα

	Οριακές συνθήκες	Οριακές συνθήκες στο Fluent
1	Στόμια εισόδου ψυχρού αέρα στο δάπεδο	Velocity inlet: $0,6 \sim 1,1 \text{ m/sec}$ Temperature: 292 K
2	Στόμια απαγωγής αέρα	Pressure Outlets ($P_{out}=101.315 \text{ Pa}$) Temperature: 300 K
3	Είσοδος του Rack	Interior
4	Έξοδος του Rack	Interior
5	Rack	Πηγή θερμότητας : 4000 W/m^3 ανά Rack για πέντε (5) rack και : 1600 W/m^3 για τα υπόλοιπα 25 Racks
6	Rack	Interior: fan type (πολυωνυμική σχέση για την πτώση πίεσης Δp ως προς την ταχύτητα
7	Rack	Πορώδες Μέσο (Porous media), porosity: 0.5 , Viscous resistance-x : $2.111e+06$ Viscous resistance-y : $2.111e+20$

		Viscous resistance-z :2.111e+20 Inertia resistance(x,y,z):20 Solid: Aluminum, Density 2719 kg/m ³ : Cp: 871 j/kgK , Thermal Conductivity:202,4 W/mK
8	Στοιχεία του υπολογιστικού πλέγματος	Κόμβοι: 17.722.849 Στοιχεία :12.626.681 Μέθοδος: Tetrahedrons (Patch Conforming Method for the fluid domain)
9	Διαστάσεις του πλέγματος	Length x: 6.7581 m Length y: 14.215 m m Length z: 3.15 m

Πίνακας 6.8: δεδομένα εισαγωγής του μοντέλου

Πεδίο Θερμοκρασιών

Στις παρακάτω εικόνες έχουμε τις θερμοκρασίες στον όγκο των racks. Καταλαβαίνει κανείς τα racks που εκπέμπουν την αυξημένη ποσότητα θερμικής ενέργειας (4 KW/m³), καθώς αυτά παρουσιάζουν πολύ μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας σε σχέση με τα υπόλοιπα. Είναι σαφές ότι η αύξηση αυτή είναι αρκετά μεγάλη. Ακόμα η επιλογή των racks που εκπέμπουν τα αυξημένα ποσά θερμότητας έχει γίνει τυχαία και δεν έχουν επιλεγεί τα rack που δεν γειτνιάζουν με άλλα racks. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν να εξαχθούν γενικότερα συμπεράσματα, καθώς εάν με την ανομοιόμορφη κατανομή, έχουμε μικρότερες θερμοκρασίες στον αέρα και δεν έχουμε θερμές περιοχές (ή hot-spots), τότε θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε όλο το χώρο η ανομοιόμορφη κατανομή του θερμικού φορτίου των racks. Κάνοντας την σύγκριση με το βασικό μοντέλο όπου η μέγιστη θερμοκρασία των racks είναι 50,2°C, βλέπουμε εδώ ότι τα racks που έχουν μειωμένο θερμικό φορτίο η θερμοκρασία είναι στους 44°C, ενώ στα rack που έχουν αυξημένο θερμικό φορτίο η θερμοκρασία φθάνει περίπου στους 90°C.

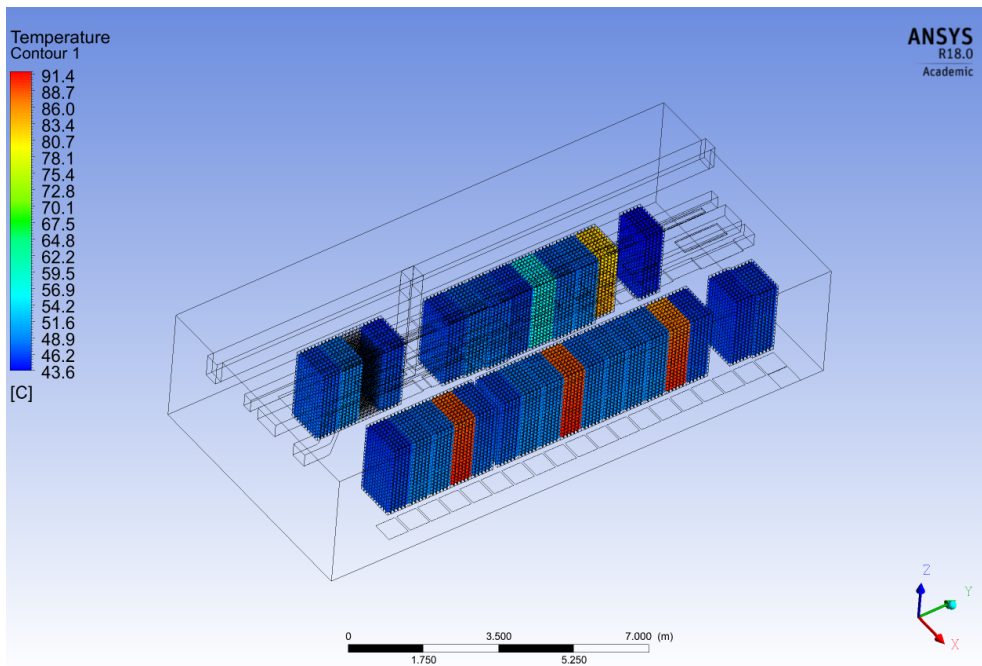
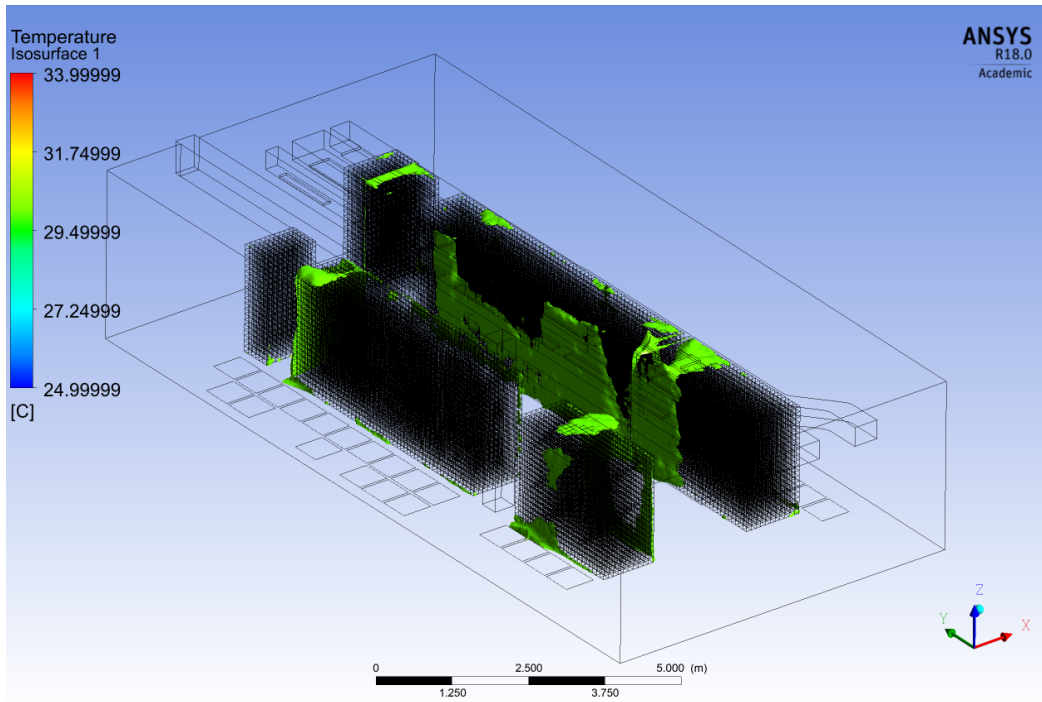


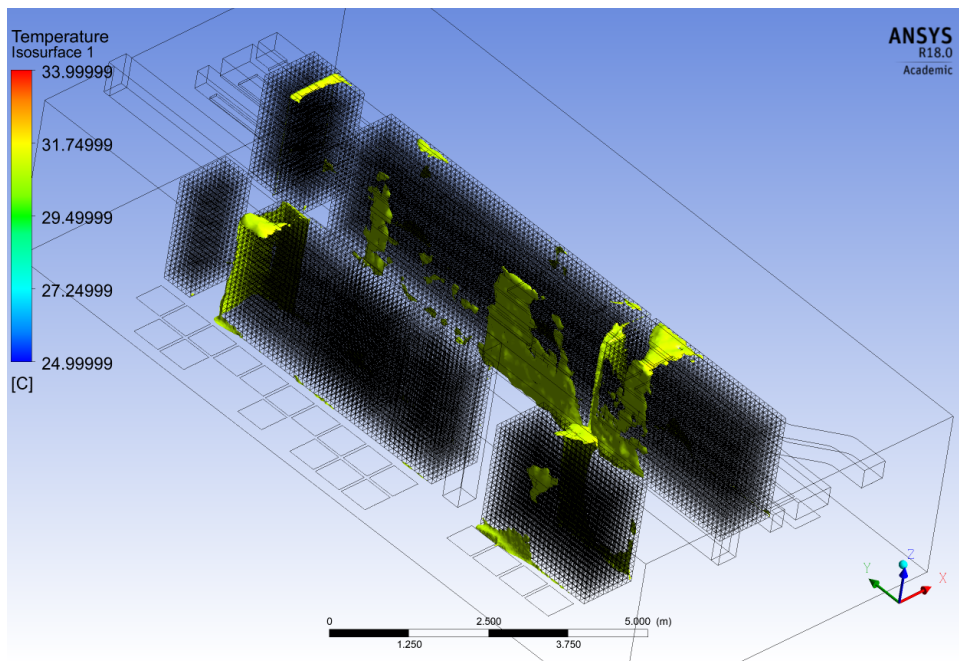
Figure 6.51: Φαίνονται τα racks τα οποία εκπέμπουν φορτία 4000 W/m^3 , τα οποία έχουν θερμοκρασίες έως και 90°C

Ισοθερμοκρασιακές επιφάνειες

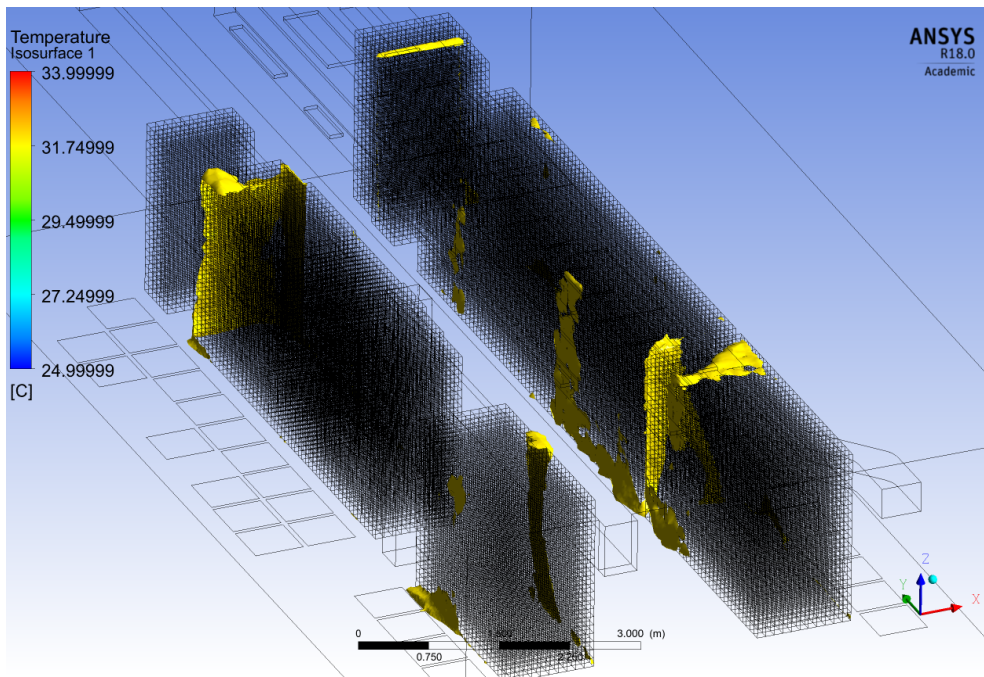
Στις παρακάτω εικόνες έχουμε την αναπαράσταση ισοθερμοκρασιών επιφανειών που μπορεί να εξάγει στο ANSYS Fluent μετά την επίλυση των διακριτοποιημένων εξισώσεων. Αρχικά αναπαρίστανται οι επιφάνειες των 30°C . Αυτές βρίσκονται στο θερμό διαμέρισμα και πάνω από τα racks. Ακόμα δεν παρατηρείται βελτίωση σε σύγκριση με το βασικό μοντέλο που μελετάμε, καθώς μεγάλωσαν οι επιφάνειες των 30°C . Ακόμα καταγράφονται επιφάνειες των 31°C και των 32°C οι οποίες επίσης δεν φαίνεται να είναι βελτιωμένες σε σχέση με τις αντίστοιχες του βασικού μοντέλου (βλέπε και εικόνα 6.47). Φαίνεται ότι οι επιφάνειες των 30°C , 31°C και 32°C συνδέονται με τα rack που εκπέμπουν μεγαλύτερα ποσά θερμότητας.



Εικόνα 6.52: Ισοθερμοκρασιακές επιφάνειες θερμοκρασίας: 30 °C



Εικόνα 6.53: Ισοθερμοκρασιακές επιφάνειες θερμοκρασίας: 31 °C



Εικόνα 6.54: Ισοθερμοκρασιακές επιφάνειες θερμοκρασίας: 32 °C

Συμπεράσματα

Με το μοντέλο αυτό διατυπώθηκε το ερώτημα που έχει να κάνει με τη δυνατότητα να διαμορφώνει κανείς τα θερμικά φορτία των racks με ανομοιογενή τρόπο και αν αυτή η δυνατότητα έχει οφέλη ή όχι για το πεδίο θερμοκρασιών στο χώρο. Έτσι στο μοντέλο αυτό ενώ το συνολικό θερμικό φορτίο των racks παραμένει σταθερό, επιλέγονται τυχαία 5 racks των οποίων το φορτίο διπλασιάζεται. Την ίδια στιγμή το υπόλοιπο (χαμηλότερο) φορτίο διανέμεται στα υπόλοιπα 25 racks. Το πρώτο που παρατηρεί κανείς είναι ότι η επιλογή των racks, εφόσον ήταν τυχαία και δεν επιλέχθηκαν racks που να μην γειτνιάζουν με άλλα, οδήγησαν όπως περιμέναμε σε αυξημένες θερμοκρασίες στον όγκο των racks. Επιπλέον οι ισοθερμοκρασιακές επιφάνειες των 32 °C δείχνουν ότι η ανομοιογένεια που επιλέχθηκε δεν είχε τα επιθυμητά αποτελέσματα. Δηλαδή θα περιμέναμε να μην υπάρχουν οι εν λόγω επιφάνειες των 32 °C. Ακόμα τα racks στα οποία αυξήθηκε το θερμικό φορτίο δεν έχουν μπροστά τους, στην ψυχρή επιφάνεια διπλή σειρά από στόμιο εισόδου του ψυχρού αέρα, γεγονός που θα μπορούσε να αντισταθμίσει αυτή την αύξηση. Παρόλα αυτά η επιλογή και η δυνατότητα να κατανέμουν οι μηχανικοί τα θερμικά φορτία, θα μπορούσε να λειτουργήσει ευεργετικά ρυθμίζοντας αναλόγως τους υπόλοιπους παράγοντες της ψύξης και πιο εύκολα στην περίπτωση μας την παροχή του ψυχρού αέρα της ψύξης. Θα είχε ενδιαφέρον να μελετηθεί μοντέλο όπου να εφαρμόζεται αναλογική ψύξη αντίστοιχη με τις καταναλώσεις ισχύος και τα αντίστοιχα εκπεμπόμενα θερμικά φορτία του ηλεκτρονικού εξοπλισμού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Συμπεράσματα

7.1 Συζήτηση και τελικά συμπεράσματα

Στόχος της εργασίας ήταν η ανάπτυξη ενός εργαλείου που με χρήση μεθόδων της υπολογιστικής μηχανικής να μπορεί να δώσει στα χέρια των μηχανικών μια δυνατότητα να καταλάβουν καλύτερα τις παραμέτρους που επηρεάζουν την ψύξη σε ένα Data Center. Η προσπάθεια αυτή, στο βαθμό που επιλύονται οι αβεβαιότητες των μοντέλων και αυτά πιστοποιούνται και βελτιώνονται συνεχώς, είναι δυνατόν να δώσει χρήσιμη βοήθεια στους μηχανικούς λειτουργίας και συντήρησης του χώρου. Η διαδικασία αυτή μπορεί να καταλήξει σε ευεργετικά συμπεράσματα και αποτελέσματα τόσο για την καλή λειτουργία του ηλεκτρονικού εξοπλισμού, όσο και για το ενεργειακό αποτύπωμα όλης της εγκατάστασης. Ιδανικά ένα τέτοιο μοντέλο θα μπορούσε να «τρέχει» συνεχώς στην προσπάθεια να αποτυπώνονται και τα μεταβατικά φαινόμενα της εγκατάστασης. Επίσης θα μπορούσε να επιβεβαιώνει ή όχι τις αλλαγές στις παραμέτρους λειτουργίας της εγκατάστασης, χωρίς να τεθεί σε κίνδυνο ο εξοπλισμός.

Κρίσιμη πλευρά για τα παραπάνω είναι η πιστοποίηση του μοντέλου που βασίζεται στην μοντελοποίηση βάση της θεώρησης του πορώδους ως προς τα racks. Αν και η θεώρηση αυτή έχει αβεβαιότητες, εντούτοις είναι μια αναγκαία διαδικασία καθώς σε ένα μεγάλο Data Center απαιτείται η κατάρτιση ενός “compact” μοντέλου, ώστε να εξασφαλίζεται αφενός παραγωγή αποτελεσμάτων στον λιγότερο κατά το δυνατόν χρόνο, αφετέρου να διατηρείται η ακρίβεια αυτών των αποτελεσμάτων.

Αναμφισβήτητα υπάρχει μια πληθώρα παραμέτρων που επηρεάζουν τη διανομή του αέρα σε ένα Data Center και καθορίζουν ψύξη του εξοπλισμού. Ξεχωρίζουμε ιδιαίτερα δύο παραμέτρους που μελετώνται επιτυχώς και με γρήγορο και αποτελεσματικό τρόπο στην εργασία, αφενός γιατί έχουν μεγάλη επίδραση στην ψύξη αφετέρου γιατί αποτελούν μεταβλητές ρύθμισης σε ένα Data Center που είναι ήδη σε λειτουργία. Αυτές είναι η παροχή εισόδου του αέρα της ψύξης και η θερμοκρασία εισόδου του αέρα της ψύξης. Επιπλέον οι παράμετροι αυτοί συνδέονται με την ενεργειακή απόδοση του χώρου: η παραπάνω παροχή σημαίνει κατανάλωση ενέργειας από τους ανεμιστήρες της εγκατάστασης και αύξηση της κατανάλωσης ανάλογη της τρίτης δύναμης του λόγου των ταχυτήτων περιστροφής των ανεμιστήρων. Επίσης μείωση της θερμοκρασίας εισόδου του αέρα ψύξης σημαίνει μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας στις ψυκτικές μονάδες (υψηλότερη κατανάλωση στον συμπιεστή και στον ανεμιστήρα του ατμοποιητή). Οπότε αυτό που ιδανικά θέλουμε είναι να βρεθεί η βέλτιστη ρύθμιση αυτών των παραμέτρων ώστε να εξασφαλίζεται καλή ψύξη, σύμφωνα με τις οδηγίες της ASHRAE και τις προδιαγραφές του ηλεκτρονικού εξοπλισμού αλλά και της πλέον αποδοτικής ενεργειακής εξοικονόμησης.

7.2 Πρακτικές προτάσεις και μέτρα εφαρμογής για εξοικονόμηση και καλή λειτουργία στο Data Center

Τα συμπεράσματα από την παρούσα εργασία είναι σκόπιμο και αναγκαίο να καταλήγουν σε πρακτικές προτάσεις και μέτρα άμεσης εφαρμογής που μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στην καλή λειτουργία και στην ενεργειακή εξοικονόμηση στο Data Center. Οι προτάσεις βασίζονται στην εικόνα που έχουμε από μετρήσεις στο χώρο, τα δεδομένα που ήταν διαθέσιμα και από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Για την εφαρμογή αυτών των προτάσεων είναι επιβεβλημένη η συνεργασία μεταξύ των μηχανικών της λειτουργίας και συντήρησης των εγκαταστάσεων και των μηχανικών IT. Αυτή η συνεργασία καθορίζεται από τη φύση του χώρου του Data Center και του εξοπλισμού του, που ενώ έχει να κάνει με την εκτέλεση πληροφοριακού έργου και υπηρεσιών, ταυτόχρονα έχει απαιτήσεις λειτουργίας ως προς την ψύξη και την παροχή ηλεκτρικής ισχύος.

Τα πρώτα μέτρα αφορούν στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό ως προς την λειτουργία του, την μέγιστη αξιοποίησή του και την ενεργειακή του απόδοση. Πιο συγκεκριμένα διαδικασίες μπορούν να εφαρμοστούν για την καταγραφή των ανενεργών servers ή των servers που χρησιμοποιούν ένα μικρό μέρος της υπολογιστικής τους ισχύος. Αυτοί οι servers μπορεί να αποτελούν μέχρι και το 30% των servers της εγκατάστασης [Uptime Institute]. Ο εξοπλισμός αυτός ενώ δεν αξιοποιείται υπολογιστικά καταναλώνει ισχύ, ψυκτικό έργο αλλά και χώρο. Για την κατανάλωση της ισχύος ανά servers, σε περισσότερους νέους servers υπάρχει εφαρμογή για την μέτρηση της κατανάλωσης ήδη από το λειτουργικό τους. Ακόμα και αν δεν υπάρχει τέτοια δυνατότητα υπάρχει ένα πλήθος εφαρμογών που μπορούν να αποδώσουν την ενεργειακή κατανάλωση στους servers. Επιπλέον υπάρχουν εργαλεία για την αναπαράσταση (virtualization) των εφαρμογών που τρέχουν σε ένα server. Με τον τρόπο αυτό δίνεται η δυνατότητα να κλείσει ένας server και να φιλοξενοούνται οι εν λόγω εφαρμογές, σε ένα άλλο server ώστε να αξιοποιούνται με καλύτερο τρόπο οι υπολογιστικές του δυνατότητες. Επιπλέον πολλά μπορούν να γίνουν για την προμήθεια servers με μικρότερο ενεργειακό αποτύπωμα. Στην κατεύθυνση αυτή το τμήμα προμηθειών σε συνεργασία με το τμήμα των μηχανικών και της πληροφορικής μπορούν να εκτελέσουν μελέτες σκοπιμότητας για την αντικατάσταση του ηλεκτρονικού εξοπλισμού με νέο. Στόχος της μελέτης αυτής είναι να προσδιοριστεί το κόστος συντήρησης του παρόντος εξοπλισμού, το οριακό κόστος πέραν του οποίου δεν είναι συμφέρουσα η διατήρηση του παρόντος εξοπλισμού, τα ενεργειακά οφέλη του καινούργιου εξοπλισμού και ο χρόνος απόσβεσής της νέας προμήθειας.

Μια δεύτερη δέσμη μέτρων αφορά στον πυρήνα της εργασίας και έχει να κάνει με τη βέλτιστη ψύξη. Τα μέτρα αυτά αφορούν στη διαχείριση του αέρα της ψύξης. Η προσπάθεια είναι, όπως ειπώθηκε να εισέρχεται ο αέρας της ψύξης στο χώρο, στα άνω όρια θερμοκρασίας όπως αυτά ορίζονται από την ASHRAE, εξασφαλίζοντας παράλληλα την καλή λειτουργία του εξοπλισμού. Επίσης στα μέτρα αυτά εντάσσεται η είσοδος κατάλληλης παροχής του αέρα της ψύξης. Για τις δυο αυτές μεταβλητές, καθώς ερευνήθηκαν προηγουμένως εκτενώς στα μοντέλα

του κεντρικού τμήματος του Data center δεν θα γίνει εδώ άλλη αναφορά. Γίνεται όμως με τη χρήση της υπολογιστικής ρευστομηχανικής να βρεθεί το βέλτιστο σημείο των παραπάνω παραμέτρων. Στη δέσμη των μέτρων για την επίτευξη βέλτιστης λύσης ανήκει και η πρόταση για την δημιουργία διαχωριστικών εμποδίων (containmets) μεταξύ ψυχρού και θερμού διαμερίσματος. Η πρόταση αυτή σχετίζεται με την αποφυγή των ανακυκλοφοριών του ψυχρού αέρα με το θερμό αέρα που απάγεται από τους αεραγωγούς. Επιπλέον σαν άμεση πρόταση ενεργειακής βελτίωσης φαίνεται να είναι η τακτοποίηση και ο καθαρισμός του ψευδοδαπέδου από τυχόν υλικά, ώστε να βελτιωθεί η διανομή του ψυχρού αέρα.

Μια τρίτη δέσμη μέτρων έχει να κάνει με την ευρύτερη ενεργειακή διαχείριση. Πιο συγκεκριμένα χρειάζεται η εγκατάσταση αισθητήρων θερμοκρασίας, ταχύτητας και υγρασίας στο χώρο του Data Center, σύμφωνα με τα πρότυπα της ASHRAE, αλλά και η παρακολούθηση των αναφορών που βασίζονται σε αυτούς τους αισθητήρες. Επιπλέον χρειάζεται η κατάρτιση, παρακολούθηση και βελτίωση δεικτών της ενεργειακής απόδοσης της εγκατάστασης. Στη βάση αυτή είναι αναγκαία η εκπόνηση ενός σχεδίου ενεργειακής διαχείρισης, από κατάλληλους μηχανικούς. Στο σχέδιο αυτό μπορεί να εντάσσεται η ορθή λειτουργία των ψυκτικών μονάδων, οι διαδικασίες για την προληπτική και προβλεπτική συντήρηση των μονάδων αυτών. Επιπλέον θα πρέπει να εξεταστούν προτάσεις νέων τεχνολογιών ψύξης όπως είναι η ψύξη με εργαζόμενο μέσο το νερό (liquid cooling).

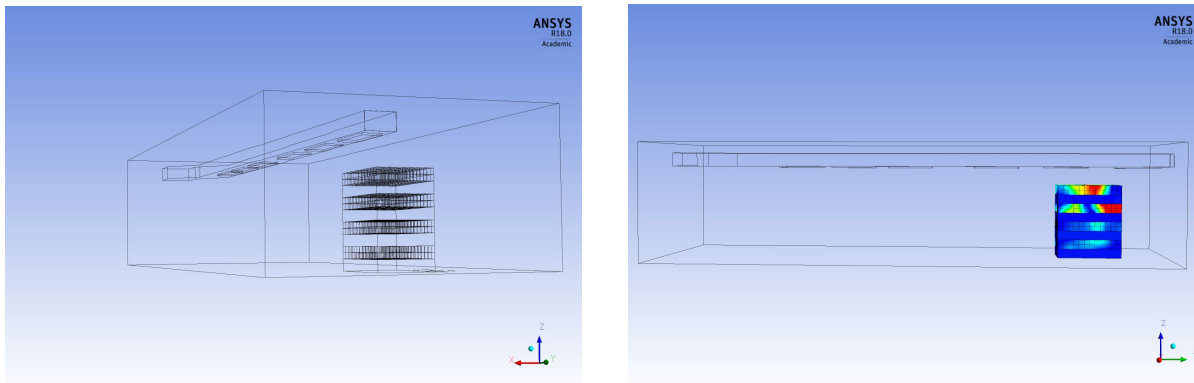
Ο συνδυασμός των παραπάνω προτάσεων και μέτρων θα μπορούσε να καταλήξει σε μια πιο έξυπνη, αποτελεσματική, αναλογική σε κάθε rack, λιγότερο ενεργοβόρα και κοστοβόρα παροχή διανομής του αέρα και ψύξης του ηλεκτρονικού εξοπλισμού.

7.3 Μελλοντική έρευνα και εμπάθυση

Η εργασία αυτή καταπιάστηκε με μια σειρά από πρωτότυπα προβλήματα σχετικά με την υπολογιστική ρευστομηχανική και τα φαινόμενα γύρω από αυτή, όπως αυτά προκειμένου να πραγματοποιείται η ψύξη του χώρου ενός μεγάλου υπολογιστικού κέντρου. Ωστόσο σε αυτήν υπάρχουν μια σειρά παραμέτρων και αντίστοιχων αβεβαιοτήτων που χρήζουν μελλοντικής έρευνας, εμπάθυσης και πειραματικής επιβεβαίωσης. Δύο περιοχές μελέτης όπως είναι τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας με εφαρμογή στις ηλεκτρονικές συσκευές και τα φαινόμενα μεταφοράς σε πορώδη μέσα είναι περιοχές με έντονο ενδιαφέρον και επίκαιρη την ανάγκη εμπάθυσης. Οι περιοχές αυτές με σχετικά μικρό βάθος αναλύονται στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

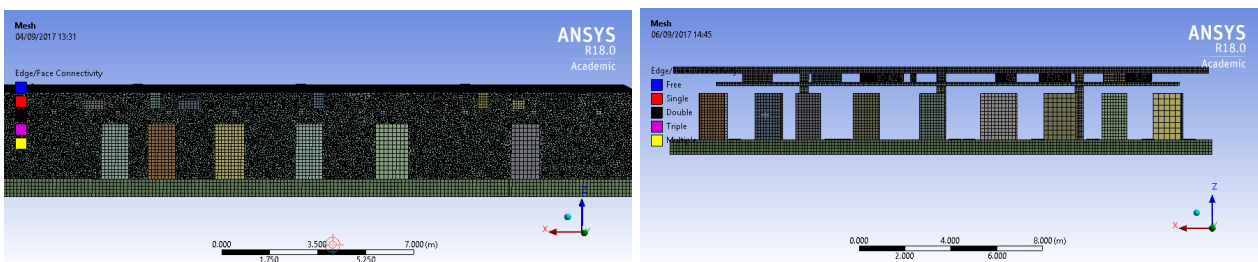
Αρχικά εργασία αυτή έχει να καταπιαστεί με την αναλυτικότερη μελέτη των ιδιοτήτων της μεταφοράς θερμότητας ανά server και στη συνέχεια ανά rack. Έχουμε ήδη ξεκινήσει με την μοντελοποίηση των racks (βλέπε εικόνες 7.1), ορίζοντας σε αυτά έναν συγκεκριμένο αριθμό servers αλλά δεν έχει ολοκληρωθεί η προσπάθεια σε αυτήν την εργασία. Με τον τρόπο αυτό

μπορούν να οριστούν οι ιδιότητες (π.χ της εκπομπής θερμότητας και του πορώδους) με έναν μη-ομοιογενή τρόπο και να μελετηθεί η μεταφορά της θερμότητας.



Εικόνα 7.1: Μοντελοποίηση rack με συγκεκριμένο αριθμό servers και ανομοιογενείς ιδιότητες

Στην κατεύθυνση προσπαθειών που έχουν ξεκινήσει αλλά δεν έχουν ολοκληρωθεί στην παρούσα εργασία είναι και αυτή της μοντελοποίησης και επίλυσης όλου του πεδίου του Data Center. Εκεί θα έχουμε μια πλήρη εικόνα του πεδίου ροής των ταχυτήτων και των θερμοκρασιών, των πιθανών ανακυκλοφοριών και αναμειξεων των ρευμάτων του αέρα αλλά και τη δυνατότητα να μεταβάλουμε παράγοντες της ψύξης και να δούμε σε όλο το χώρο τις επιδράσεις των αλλαγών αυτών. Εδώ να αναφέρουμε ότι έχει ολοκληρωθεί η γεωμετρική τρισδιάστατη απόδοση του χώρου και έχουν γίνει προσπάθειες παραγωγής του πλέγματος. Όμως με τους διαθέσιμους υπολογιστικούς πόρους η ποιότητα του πλέγματος δεν μας έχει επιτρέψει την σύγκλιση της υπολογιστικής διαδικασίας και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 7.2 παραγωγή υπολογιστικού πλέγματος του χώρου του Data Center

Επιπρόσθετα προς μελλοντική έρευνα και προσδιορισμό είναι παράμετροι όπως το πορώδες και η διαπερατότητα των στερεών κατά μήκος των οποίων διέρχεται ο ψυχρός αέρα ψύξης. Το πορώδες θα μπορούσε να προσδιοριστεί πειραματικά και ανά server και να χρησιμοποιηθεί στην μετέπειτα μοντελοποίηση του rack, αναλόγως του αριθμού των servers που φέρει ένα rack. Η παράμετρος αυτή έχει, όπως είδαμε, χρησιμοποιηθεί στην προσέγγιση των racks σαν πορώδη

μέσα και έχει προσδιοριστεί μετά από σχετικές επιστημονικές εργασίες. Όμως δεν έχει επιβεβαιωθεί και επικαιροποιηθεί πειραματικά σε αυτήν την εργασία. Βέβαια η μελλοντική έρευνα μπορεί να επεκταθεί και σε μικρότερες κλίμακες μεγέθους, όπως αυτές των μικροσίπ, και το πεδίο αυτό αποτελεί μια μεγάλη περιοχή έρευνας. Αυτό συμβαίνει καθώς ένα πλήθος συσκευών (όπως για παράδειγμα τα κινητά τηλέφωνα) ερευνώνται προκειμένου να αναλυθούν τα φαινόμενα της θέρμανσης και υπερθέρμανσής τους κατά την λειτουργία τους και την ψύξης τους.

Επιπλέον η μελέτη των φαινομένων μεταφοράς στα πορώδη μέσα είναι μια μελλοντική πρόταση για την επέκταση αυτή της εργασίας. Καθώς η κλίμακα των μικροσίπ θα πηγαίνει ολοένα και σε μικρότερα μεγέθη, αντιστοίχως η θεώρηση του πορώδους και των φαινομένων γύρω από αυτά θα αποκτά μεγαλύτερη σημασία (και) στον τομέα της ψύξης των ηλεκτρονικών. Η ανάγκη αυτή τεκμηριώνεται και από τον ρόλο που όντως φάνηκε να παίζει στα τελικά αποτελέσματα η θερμική αγωγιμότητα των υλικών στα ηλεκτρονικά.

Ακόμα περισσότερη έρευνα μπορεί να γίνει γύρω από τους μηχανισμούς των φαινομένων της τύρβης, και ακολούθως των μοντέλων της τύρβης. Έτσι θα μπορούσαν να εξαχθούν συμπεράσματα για το πιο μοντέλο τύρβης είναι το πλέον κατάλληλο αλλά και για να μελετηθεί καλύτερα το δύσκολο ούτως ή άλλως αυτό πεδίο.

Στο επίπεδο της ανάλυσης σε ένα rack μελλοντικά θα μπορούσε να μελετηθούν μια σειρά από παράγοντες όπως οι διαδρομές του αέρα ψύξης (πχ front-to-back air cooling, front-to-top air cooling, bottom-to-top air cooling). Επίσης όλα τα αποτελέσματα θα έπρεπε να επιβεβαιωθούν και πειραματικά. Να σημειώσουμε ότι και στο πεδίο αυτό γίνεται σημαντική έρευνα, που περιλαμβάνει χρησιμοποίηση μεθόδων υπολογιστικής ρευστομηχανικής, μελέτη των servers και των rack με πειραματικά δεδομένα, μελέτη των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών τους.

Τέλος στο επίπεδο ενός Data Center μπορεί να γίνει εξίσου σημαντική έρευνα. Εκεί μπορεί τα μοντέλα ρευστομηχανικής να καθορίσουν, από τον σχεδιασμό ήδη της εγκατάστασης, μια σειρά παραγόντων της λειτουργίας αλλά και της γεωμετρίας του χώρου του πεδίου ροής. Σημαντικός παράγοντας στην ερευνητική προσπάθεια είναι αφενός να χρησιμοποιούνται αποδοτικότερα υπολογιστικά μοντέλα (που βασίζονται σε πρότερη έρευνα σε μικρότερες κλίμακες έρευνας), αλλά και η χρήση δεδομένων από μετρητικές διατάξεις.

Επίσης θα μπορούσε να γίνει μελέτη για τα μεταβατικά φαινόμενα στο πεδίο ροής ενός Data Center, καθώς αλλάζουν τα θερμικά φορτία του IT εξοπλισμού στο χώρο, αλλά και της “έξυπνης λειτουργίας” των Data Center με την αναλογική χρήση του αέρα ψύξης ανά rack.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Βιβλιογραφία

- [1] Yogendra Joshi, Pramod Kumar. Energy Efficient Thermal Management of Data Centes. Springer. 2012
- [2] Hwaiyo Geng, P.E. Data Center Handbook. Wiley. 2015
- [3] Vaibhav K. Arghode, Yodendra Joshi. Air Flow Management in Raised Floor Data Centers. Springer. 2016
- [4] Σωκράτης Τσαγγάρης, Μηχανική των Ρευστών. Εκδόσεις Συμewών, Αθήνα, 2015
- [5] Saeed Moaveni. Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων, Θεωρία και Εφαρμογές με το ANSYS
- [6] Ali M A S Almoli. Air Flow Management inside Data Centres. The University of Leeds, School of Mechanical Engineering, phd thesis. 2013
- [7] Jorge Marx Gómez, Manuel Mora, Mahesh S. Raisinghani • Wolfgang Nebel
Rory V. O'Connor. Engineering and management of Data Centers. Springer. 2017
- [8] Gordon N. Ellison. Thermal Computations for Electronics- Conductive, Radiative and Convective Air Cooling. CRC press. 2011
- [9] J.M.P.Q Delgado. Heat and Mass Transfer in Porous Media. Springer. 2012
- [10] Ξενοφών Κακάτσιος. Αρχές Μεταφοράς Θερμότητας και Μάζας. Εκδόσεις Συμewών
- [11] Hose Luis Acosta, Andres Felipe Camacho. Porous Media. Nova Science Publishers. 2009
- [12] Γεώργιος Μπεργελές. Υπολογιστική Ρευστομηχανική. Εκδόσεις Συμewών. 2006
- [13] Γιαννάκογλου Κυριάκος. Θερμικές Στροβιλομηχανές. 2006
- [14] ASHRAE -Design Considerations for Datacom Equipment Centers
- [15] ASHRAE - Thermal Guidelines for Data Processing Environmental
- [16] ASHRAE- Best Practices for Datacom Facility Energy Efficiency
- [17] ASHRAE -Datacom Equipment Power Trends and Cooling Applications
- [18] Accredited Tier Designer Technical Paper Series: Continuous Cooling
- [19] Uptime Institute Data Center Site Infrastructure. Tier Standard: Operational Sustainability
- [20] ANSYS Fluent: User's manual
- [21] Arularasan R. and Velraj R. CFD analysis in a heat sink for cooling of electronic devices. International Journal of the Computer, the Internet and the Management, Vol 16

- [22] Remigiusz Nowak, Estimation of viscous and inertial resistance coefficients for various heat sink configurations, ABB Corporate Research Center
- [23] Michael J. Fuerstman, Ann Lai, Meghan E. Thurlow, Sergey S Shevkoplyas, Howard A. Stone and George M. Whitesides. The pressure drop along rectangular microchannels containing bubbles. The Royal Society of Chemistry
- [24] Ali Habibi Khalaj, Saman K. Halgamuge. A Review on efficient thermal management of air- and liquid-cooled data centers: From chip to the cooling system
- [25] Μηχανική Ρευστών II, Σημειώσεις. Μαθιουλάκης Δημήτριος, Αθήνα 2006
- [26] PUE™: A COMPREHENSIVE EXAMINATION OF THE METRIC
- [27] Airedale Ltd. Backdoor active cooler. OnRac™. User's Manual.