

مدلسازی سه بعدی دینامیک سیالات محاسباتی سیستم سرمایشی پایین زن در یک مرکز داده نمونه

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

اشکان جهانگیرامینی*
نادر پورمحمود
ایرج میرزایی

چکیده

از سال ۱۹۹۰ مراکز داده نقش مهمی در پیشرفت دو شاخه موازی سرویس های فناوری اطلاعات و ارتباطات مخابراتی داشته اند. سرمایش موثر مراکز داده برای عملکرد آنها بسیار مهم بوده و بخش کلیدی در طراحی اولیه این تاسیسات دارد. به میزان افزایش توان پردازشی، تولید گرما از سرورهای IT از مقادیر کم تولید حرارت بر حسب کیلووات به مقادیر حدود ۲۰ کیلووات در دهه های گذشته افزایش پیدا کرده است. این موضوع خصوصاً در خصوص رک های سرور بیشتر است. اتاق های سرور نیاز به پیشرفت های مهم در زمینه فناوری سرمایش داشته تا بتوانند بطور موثر با سخت افزارهای خود عمل کنند. این مطالعه در خصوص مدلسازی سه بعدی دینامیک سیالات محاسباتی یک مرکز داده نمونه با کلیه تجهیزات مربوطه می باشد. مطالعه عددی با داده های تجربی موجود مقایسه گردیده و تطابق خوبی مشاهده شده است. نتایج نشان می دهد که مدلسازی دینامیک سیالات محاسباتی الگوی سرمایشی مرکز داده به مهندسی تهویه و تبرید کمک می کنند که میزان سرمایش مورد نیاز مرکز را برآورد نمایند. مدلسازی پارامترهای فشار و سرعت نشان دهنده این امر است که آیا پدیده چرخش هوای گرم یا وجود هوای بازگشت شده به سیستم تولید سرمایش در اطراف راک های سرور وجود دارد یا خیر.
واژه های کلیدی: مرکز داده، سیستم سرمایش پایین زن، مدلسازی دینامیک سیالات محاسباتی.

3D CFD Modeling of UFAD Cooling System in a Sample Data Center

A. Jahangir Amini
N. Pourmahmoud
I. Mirzaee

Department of Mechanical Engineering, University of Urmia, Urmia, Iran
Department of Mechanical Engineering, University of Urmia, Urmia, Iran
Department of Mechanical Engineering, University of Urmia, Urmia, Iran

Abstract

Since 1990, data centers have taken on an increasingly central role in the progress of two parallel areas: Information technology (IT) services and telecommunications. Effective cooling of data centers is important for their proper operation and has a key part since the design of the earliest facilities. As computing capabilities advance, heat dissipations from IT servers have increased from a few kW to more than 20 kW within the past decade, particularly in high-performance server racks. Server rooms need significant advances in cooling technologies to enable the successful deployment of their hardware's. This approach is about three dimensional CFD modeling of under flow air distribution (UFAD) cooling system in a sample data center with its total instruments. CFD results have been compared with the available experimental data, shown good agreement. Results show, CFD modeling of cooling patterns in a data center can help HVAC designers to decide how much cooling capacity needs to cool data center. Modeling pressures and velocities leads to know if there is recirculation or by-pass air around server racks.

Keywords: Data center, UFAD cooling, telecommunications, CFD modeling.

مراکز اطلاعات نسبی داشته باشند. تمام انرژی الکتریکی که توسط تجهیزات ارتباطاتی مصرف می شود به انرژی گرمایی تبدیل شده و باید از مرکز داده به نحو مقتضی دفع گردد. در سده گذشته انجمن گرمایش، سرمایش و تهویه امریکا^۱ نقش اساسی در استاندارد سازی معیارهای شرایط محیطی و سرمایشی مراکز داده داشته است. تمامی این اطلاعات و شرایط فنی مورد نیاز در استاندارد مراکز داده تحت نگارش همین انجمن با عنوان T.C 9.9 منتشر شده است. در این استاندارد بر اساس تجهیزات منصوبه در مرکز داده شرایط دما و رطوبت به صورتی تعریف شده است که علاوه بر داشتن حداکثر راندمان برای ورودت سالن حداقل میزان مصرف انرژی نیز صورت گیرد. روند تولید

۱- مقدمه

مراکز داده، به مراکزی گفته می شود که در آنها حجم بالایی از پردازش، ذخیره سازی و انتقال اطلاعات دیجیتال با استفاده از حجم بالایی تجهیزات ارتباطاتی زیرساختی صورت می گیرد. تجهیزات منصوبه در سالن های داده عموماً با عنوان راک نامگذاری می گردند و دارای ابعاد استاندارد هستند. تجهیزات مراکز داده همان گونه که به قدرت الکتریکی بدون وقفه و قابل اعتماد برای عملکرد نیاز دارند به دستگاه های تامین سرمایش هم برای کنترل دما و رطوبت در این سالن ها نیاز دارند. تامین نیاز سرمایشی مراکز داده امروزه نیاز به مدیریت اثربخشی داشته بطوریکه مسئولین مراکز داده علاوه بر داشتن فنی کافی در حوزه کاری خود باید از نحوه مدیریت دما و انرژی در این

¹ ASHRAE

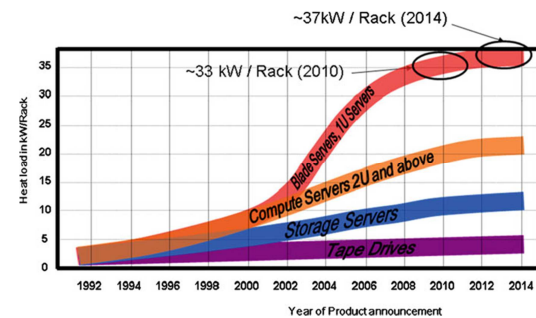
* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: n.pormahmod@urmia.ac.ir

قرار می دهند. تغییرات دائم در نحوه چینش تجهیزات و نیز تاثیر هر یک از راک ها بر راک های همسایه و نیز تغییرات موجود در سیستم های توزیع انرژی الکتریکی نظیر کابل کشی و غیره می توانند بر توزیع دما و سرمایش در مراکز داده تاثیر بگذارند که پیش بینی اثر آنها بر راحتی با استفاده از روش های شبیه سازی سیالاتی امکان پذیر می باشد. پاتل و همکاران [۳ و ۴] جزو اولین کسانی بودند که از CFD برای مدل سازی و مطالعه جریان هوا و توزیع دما در مراکز داده کف کاذب استفاده کردند. شبیه سازی های تقریبی ای با کمتر از ۶۰۰۰۰ سلول انجام شد و راک ها به عنوان جعبه هایی مدل شدند که جریان هوا و تولید گرمای یکنواختی داشتند. اشمیت و کروزر [۵ و ۶] هم به صورت عددی و هم به صورت تجربی، جریان هوای درون کاشی های سوراخ دار را به عنوان مهمترین عاملی شناسایی کردند که باعث توزیع غیر یکنواخت جریان شده و در نهایت باعث تغییرات در دمای راک ها می شود. آنها همچنین توزیع هوای رفت دستگاه تولید برودت را از میان کاشی های سوراخدار با شبیه سازی های دو بعدی و سه بعدی CFD، مطالعه کردند و با استفاده از کلاهی جریان، نرخ جریان را از میان کاشی های سوراخ دار اندازه گرفتند و نتایج آزمایشات و شبیه سازی را با هم مقایسه کردند. راد مهر و همکاران [۷] عامل دیگری را برای توزیع غیر یکنواخت جریان، بررسی کردند یعنی نشت هوا از گوشه و کنار کاشی ها و همچنین نشت به بیرون مرکز داده. آنها از نتایج تجربی برای یافتن روابط همبستگی به منظور پیش بینی نتایج مدل دو بعدی CFD بهره گرفتند. اشمیت و همکاران [۸] آنالیزی سه بعدی بر روی فضای خالی زیر کف انجام دادند و تاثیرات بر روی یکنواختی توزیع جریان از میان شبکه ای کاشی های سوراخ دار را به عنوان تابعی از عمق فضای خالی زیر کف و نسبت سطوح باز سوراخ های کاشی ها، پیش بینی کردند. این کار برای مراکز داده با چیدمان های مختلفی صورت گرفت که بعضی از نتایج به صورت تجربی نیز اعتبار سنجی شدند. پس از آن کارهای متعددی با در نظر گرفتن تولید گرما در کل سالن و یا برای هر یک از راک ها صورت گرفته است که بصورت کلی نتایج حاصل را می توان به بخش های زیر تقسیم بندی کرد [۹]:

- مدلسازی جریان هوای زیر کف کاذب مراکز داده برای پیش بینی نحوه خروج هوا از داخل کف کاذب
- نحوه جانمایی سیستم تولید برودت و نیز قرارگیری راک ها
- جریان هوای اضافی و نیز نحوه برگشت هوا
- مقایسه میزان راندمان انرژی

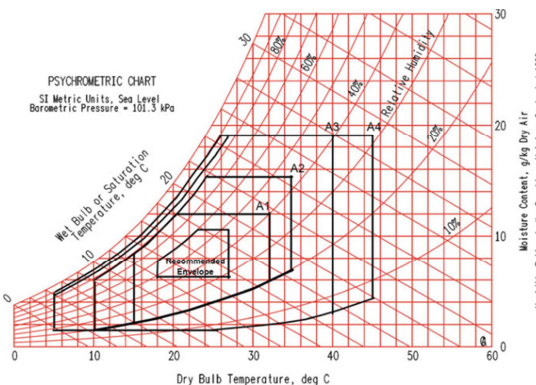
عدم مدیریت مطلوب دمای مرکز داده می تواند به مشکلات متعددی منجر گردد که از جمله آنها می توان به افزایش خرابی سرورها، افزایش زمان قطعی ها و در نهایت افزایش هزینه های نگهداری و ارزش افزوده اشاره کرد. به همین دلیل مدیریت بهینه دمای مرکز داده می توان هزینه های عملیاتی را بسیار پایین بیاورد. آنچه مدیریت دمای یک مرکز داده را دشوار می سازد طبیعت دینامیکی بودن و لذا غیر قابل پیش بینی بودن عملکرد تجهیزات ارتباطاتی می باشد. بعنوان مثال مراکز داده عموماً دارای راک های با نیاز جریان هوای خنک متفاوتی نظیر از جلو به عقب، از بغل به بالا و یا از پایین به بالا هستند. این عدم یکسان بودن نحوه دریافت هوای خنک در راک های داخل مرکز به همراه متفاوت بودن نوع و ظرفیت تجهیزات سرور

گرمایی تجهیزات ارتباطاتی در طی سالیان اخیر توسط این انجمن بررسی گردیده و نتیجه آن در شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل میزان تولید گرما برای انواع سرورهای مختلف از سال ۱۹۹۲ الی سال ۲۰۱۴ گزارش شده بطوریکه مشاهده می شود تولید گرما در سرورها از مقادیر کم کیلووات برای هر راک به مقادیر بسیار زیادی گسترش پیدا کرده است.



شکل ۱- روند تولید گرما در تجهیزات ارتباطاتی [۱]

تعیین شرایط دمایی از جمله دمای حباب خشک هوا و میزان رطوبت نسبی هوای مراکز داده از جمله فعالیت های اساسی این انجمن و استاندارد می باشد. در سال ۲۰۱۱ این انجمن شرایط قابل قبول و نیز قابل توصیه را برای محدوده عملکردی این مراکز اعلام کرده است. این افزایش محدوده عملکردی برای استفاده در شرایطی نظیر سیستم سرمایش آزاد طراحی شده و توصیه می گردد. (شکل ۲)



شکل ۲- محدوده دمایی تعیین شده از سوی انجمن گرمایش، سرمایش و تهویه امریکا برای هوای ورودی به راک ها [۲]

ورود به مراکز داده در حال کار برای بررسی نحوه مدیریت دمای مرکز با توجه به دلایل امنیتی عموماً امکان پذیر نمی باشد. علاوه بر این تنوع تجهیزات و نیز گستردگی نهادر مراکز داده فعالیت در داخل این مراکز را دشوار ساخته است. بنابراین استفاده از روش های دینامیک سیالات محاسباتی و انتقال گرما به کمک مهندسی برای تخمین جریان هوای داخل مراکز و مدیریت دمای آنها آمده است. استفاده از این روش ها به مهندسی کمک می کند نقاط حساس به تغییرات دمایی را شناسایی و امکان گرم شدن زیاد این نقاط و نحوه اتخاذ تدابیر مناسب برای سیستم های سرمایشی را در اختیار طراحان

نرم افزار Fluent و نیز مدل سازی سه بعدی و حل آن در این نرم افزار با دشواری های خاص خود روبرو بوده که از جنبه های نوآوری این تحقیق می باشد.

۲- معادلات اساسی

معادلات سه بعدی میدان جریان به صورت زیر هستند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \tilde{u}_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \tilde{u}_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[u_i \rho \left(h + \frac{1}{2} \tilde{u}_j \tilde{u}_j \right) \right] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right] \quad (3)$$

$$k_{eff} = K + \frac{C_p \mu_t}{Pr_t} \quad (4)$$

$$p = \rho RT$$

که به ترتیب قانون بقای جرم، بقای مومنتم، معادله انرژی و معادله حالت نام گذاری شده و هر یک دارای جملات تغییرات زمانی و مکانی بر حسب پارامترهای سرعت، چگالی، فشار و تنش ها هستند. افزایش سریع دمای حاصل از سرورها منجر به افزایش جریان خنک کننده خروجی از دستگاه تولید برودت می گردد. این افزایش جریان نیز منجر به ایجاد تغییرات شدید سرعت و آن هم منجر به ایجاد جریان آشفته می گردد. برای مدل سازی جریان های آشفته روش های متعددی وجود دارد که روش رایج در خصوص مدل سازی عددی جریان هوای داخل مراکز داده مدل k-ε می باشد. در این تحقیق از مدل جریان های آشفته استفاده شده است [۱۲].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

که در این معادلات G_k نشان دهنده تولید انرژی جنبشی آشفته به علت گرادیان سرعت میانگین، G_b نشان دهنده تولید انرژی جنبشی آشفته در اثر نیروی شناوری و Y_M نشان دهنده سهم نوسانات سرعت در جریان آشفته تراکم پذیر می باشد. σ_k و σ_ϵ نمایانگر عدد پراختل آشفته به ترتیب برای k و ϵ می باشند. $C_{1\epsilon}$ ، $C_{2\epsilon}$ و $C_{3\epsilon}$ نیز ثابت می باشند که برابرند با:

$$C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, C_{3\epsilon} = 0.09$$

$$\sigma_k = 1, \sigma_\epsilon = 1.3$$

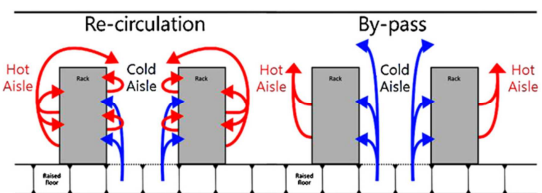
لزجت آشفتهگی (μ_t) نیز با توجه به مقادیر k و ϵ به ترتیب زیر محاسبه می گردد:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (7)$$

روش حجم محدود با مش سه بعدی به معادلات حاکم اشاره شده در فوق اعمال می گردد. هوا نیز در محاسبات به عنوان گاز ایده آل در نظر گرفته شده است. برای حل از الگوریتم SIMPLE استفاده شده

از دشواری های مدیریت دمای مرکز داده می باشد. مدیریت بهینه دمای مرکز داده شامل تامین هوای خنک مناسب برای کلیه راک های منصوبه در داخل مرکز بدون هیچ گونه گرم شدگی در هیچ یک از راک ها می باشد.

در یک سیستم سرمایشی پایین زن هوای گرم تولید شده توسط راک ها یا از طریق کانال کشی و یا بدون آن به داخل سیستم تولید هوای خنک^۱ یا دستگاه تولید برودت بازگردانیده می شود. هوای خنک تولید شده توسط دستگاه تولید برودت پس از عبور از کف کاذب و یا کانال کشی به داخل راهروی سرد دمیده شده و پس از آن جهت خنک کاری سرورهای منصوبه داخل راک ها به داخل آنها مکیده می شود. از جنبه های بسیار مهم مدیریت دما و هوای سرد در مراکز داده بررسی میزان هوای سرد اضافی و نیز چرخش هوای گرم در حول راک ها می باشد که هر دو می تواند ناشی از عدم طراحی پارامترهای جریان هوای سرد تولید شده بوده و در صورت عدم کنترل به شدت راندمان مرکز داده را تحت تاثیر قرار خواهند داد. (شکل ۳)



شکل ۳- چرخش هوای گرم و برگشت هوای سرد [۱۰]

از راهکارهای جلوگیری از این حالت می توان به محدود سازی راهروهای سرد و گرم اشاره نمود که از جنبه های جدید تحقیق در خصوص مدیریت دمای مراکز داده به شمار می آید. [۱۱]

در این مقاله از یک فرایند مدل سازی سه بعدی با استفاده از روش های دینامیک سیالات محاسباتی برای یک مرکز داده نمونه استفاده شده است. در تحلیل مدیریت دمای یک مرکز داده نمونه قطعاً باید به استاندارد های جهانی نصب و بهره برداری از تجهیزات ارتباطاتی توجه نمود. نحوه چرخش هوای مرکز داده در مسیر های رفت از جمله کف کاذب و یا در مسیر های برگشت نظیر کانال کشی، نحوه قرارگیری راهروهای سرد و گرم و سایر موارد دیگر باید بررسی گردند. در این تحقیق وضعیت موجود مرکز داده با شرایط فیزیکی موجود آن مورد بررسی قرار گرفته است. داده های تجربی مرکز بعنوان اطلاعات اولیه مدل سازی تعیین شده و مدل شبیه سازی شده جریان هوای مرکز بعنوان خروجی در نظر گرفته شده است. نتایج این مدل با داده های تجربی موجود بررسی و تطبیق داده شده و از آنها برای بررسی رفتار هوای و نحوه چرخش آن و عیوب فیزیکی مرکز داده استفاده شده است. انطباق داده ها نتیجه قابل قبولی ارائه نموده است. امروزه غول های بزرگ فناوری اطلاعات جهت بهینه سازی سالن های داده خود از نرم افزارهای تجاری و یا اختصاصی خود استفاده می کنند. استفاده از

^۱ CRAC: Computer room air conditioner

است.

۳- اطلاعات مدل تجربی مورد مطالعه

تولید گرما بطور متوسط برای مراکز داده با تعداد راک متوسط به بالا حدود ۱.۵ کیلووات در هر متر مربع فضا یا ۷-۵ کیلووات برای هر راک می باشد. [۱۳]. سالن داده مورد مطالعه دارای دو راهروی سرد و یک راهروی گرم بوده و ابعاد آن بطور دقیق برابر ۱۷/۸۲ متر * ۷/۴۶ متر با مساحت حدود ۱۳۰ مترمربع می باشد. شکل (۴). تولید گرما از هر راک در این تحقیق بر اساس کاتالوگ سازنده تجهیزات ان حدود ۵ کیلووات برای هر راک در نظر گرفته شده و تعداد راک های منصوبه در سالن برابر ۲۰ دستگاه می باشد. لذا تولید گرما به ازای هر مترمربع از فضای این مرکز ۰/۷۷ کیلووات خواهد بود.



شکل ۴- تصویر فضای مرکز داده و راک های منصوبه

جدول ۱ مشخصات سیستم سرمایشی مورد نیاز را در این مطالعه بر اساس تولید گرمای ۵ کیلووات برای هر راک نشان می دهد.

جدول ۱- مشخصات سیستم مکانیکی تولید سرمای مورد نیاز

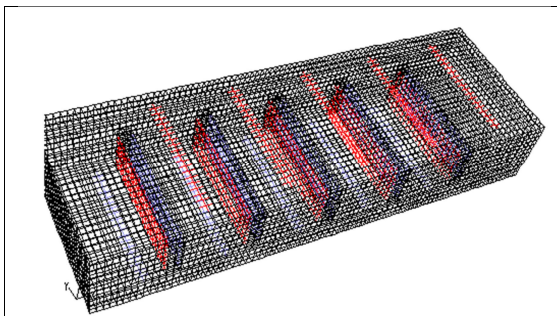
جریان هوای کل	تولید گرمای کل	تعداد	تولید گرما	سرور
۹۰۰ مترمکعب	۴/۵ کیلووات	۳۹	۹۵ وات	سرور
۱۸۰۰۰ مترمکعب	۹۰ کیلووات	۲۰	۴/۵ کیلووات	راک

لذا برای تامین سرمایش مورد نیاز برای راک های منصوبه در مرکز و سرورهای داخل آنها به مجموع ۹۰ کیلووات دفع گرما توسط جریان هوایی معادل ۱۸۰۰۰ مترمکعب در ساعت برای کل مرکز نیاز داریم. برای تامین این میزان سرمایش از دو دستگاه تولید برودت از نوع پایین زن استفاده می شود. جریان هوای خنک تولیدی توسط این دو دستگاه از طریق کف کاذبی به عمق ۳۰ سانتیمتر به داخل راهروهای سرد هدایت می گردد و در این راهرو ها از طریق کف های مشبک تعیین شده خارج و وارد چرخه سرمایش سالن خواهد شد. سالن دارای ۴ ردیف متشکل از ۵ راک می باشد. روبروی راک ها برای ورود هوای سرد به داخل آنها بصورت مشبک بوده و فرض می شود که فن منصوبه داخل راک ها جریان هوا را بصورت مستقیم و در راستای جلو به عقب به داخل راک مکش می کند. بر اساس اصول چیدمان راک ها در داخل مرکز داده این تجهیزات را اصطلاحاً بصورت پشت به پشت نصب می

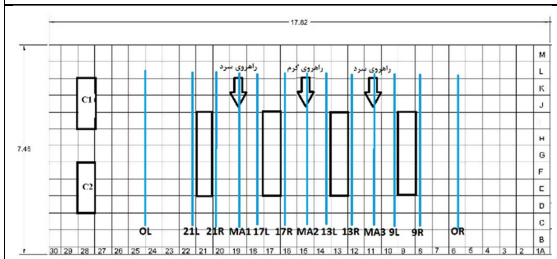
نمایند.

۴- مدلسازی هندسی

برای مدلسازی دینامیک سیالات محاسباتی از نرم افزار FLUENT و برای ساخت مدل فیزیکی آن از نرم افزار GAMBIT استفاده می شود. شکل ۵ مدل عددی ساخته شده برای این مساله را نشان می دهد. نوع شبکه بندی بصورت ترکیبی بصورت با سازمان در اطراف راک ها و در نزدیک دیواره و مرز های جامد و نیز نوع بی سازمان در فضای گردش هوای داخل مرکز انتخاب شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۵- مدل سه بعدی ساخته شده توسط

GAMBIT - نرم افزار (الف)

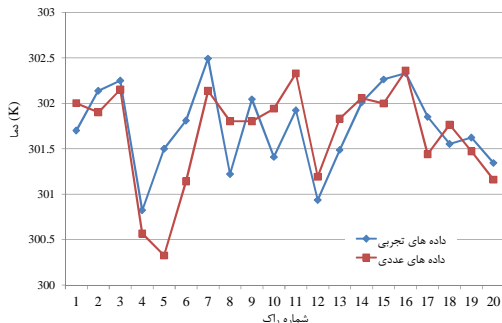
(ب) - نقشه دوبعدی ابعاد، چیدمان و قرارگیری راهرو ها و راک ها

خطوط نشان داده شده در شکل ۵- ب بعنوان راهنمای محاسبات برای بیان نتایج عددی در بخش های بعدی می باشد. شرط مرزی عدم لغزش برای دیواره های سالن، کف کاذب و کلیه سطوح جامد نظیر چهار بعد راک ها (به غیر از بعد های متقابل به راهروهای سرد و گرم مطابق شکل ۵ - ب) بکار رفته است.

جریان خروجی از پکیج های برودتی بعنوان شرط مرزی دبی جرمی ورودی^۱ و جریان برگشتی به دستگاه تولید برودت بعنوان شرط مرزی خروجی فشار^۲ انتخاب شده است. در خروجی دستگاه تولید برودت فرض می شود که جریان با سرعت کاملاً عمودی نسبت به کف کاذب وارد کف می شود و مولفه سرعت افقی در هنگام خروج از دستگاه تولید برودت صفر است. با توجه به استفاده از مقادیر مختلف شرایط مرزی و نیز تعیین پارامترهای جریان آشفتنه و تنظیم شدت آشفتگی و نیز تعداد مش ها جهت دست یابی به بهینه ترین مدل

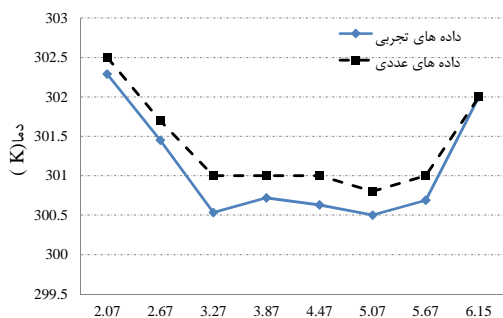
^۱Mass flow inlet

^۲Pressure outlet



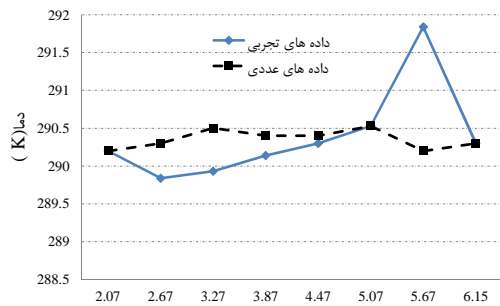
شکل ۷- نتایج مطالعه عددی و نتایج تجربی

اختلاف دما در خط نشانه MA1 & Z=0.9



شکل ۸- نتایج مطالعه عددی و نتایج تجربی

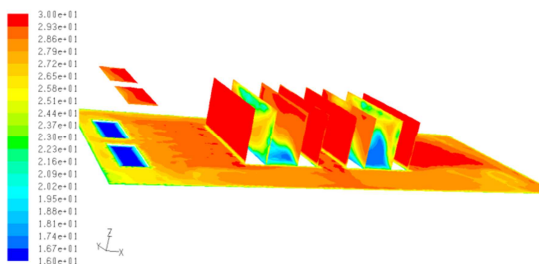
اختلاف دما در خط MA2 & Z=0.3



شکل ۹- نتایج مطالعه عددی و نتایج تجربی

۷- نتایج تحلیل عددی

پروفیل های دمایی حاصل از بررسی عددی در صفحات برش افقی راک ها و کل فضای مرکز داده در شکل های ۱۰ تا ۱۶ نشان داده شده است. شکل ۱۰ کانتور دمایی مدل عددی ساخته شده را برای دستگاه تولید برودت ، راک ها و کف کاذب نشان می دهد.

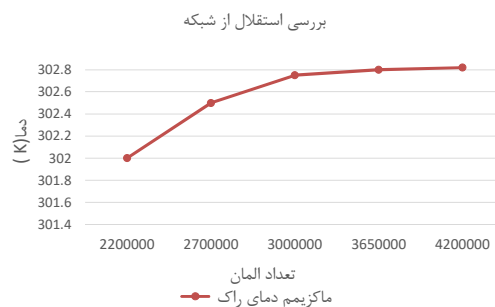


شکل ۱۰- کانتور دمایی کل

انطباق با داده های تجربی مقدار γ^+ نهایی که برابر میزان ۵ می باشد انتخاب گردیده است. پارامترهای آشفتنگی بر اساس روش $k-\epsilon$ انتخاب گردیده و در مراحل حل نرم افزار و با در نظر گرفتن دقیق ترین مدل برای همگرایی و صحت سنجی داده های عددی با داده های تجربی بصورت شاخص شدت آشفتنگی و قطر هیدرولیکی و بصورت ثابت انتخاب شده اند.

۵- بررسی استقلال نتایج عددی از مش بندی

برای زدودن و کاهش هر گونه خطا به علت درشتی یا ابعاد نامناسب مش بندی میدان سیال و استقلال نتایج تحلیل از تأثیرات مش بندی مدل عددی، مدل سازی با تعداد مش بندی متفاوت برای بررسی تأثیر تعداد مش ها انجام گرفت. بیشینه دمای ایجاد شده در بین کل راک ها بعنوان شاخص اندازه گیری انتخاب شده و در تعداد مش متفاوت از کل شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. (شکل ۶)



شکل ۶- بررسی استقلال از مش بندی

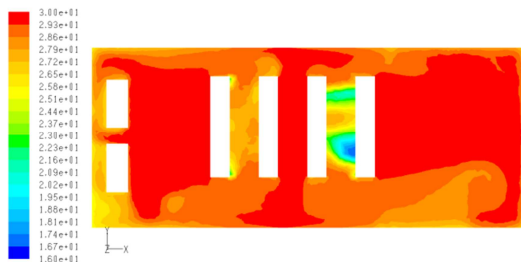
همان گونه که از نمودار فوق مشخص است تعداد مش ۳۶۵۰۰۰۰ عدد بهترین میزان تعداد مش برای شبکه ساخته شده و برای تعداد بیشتر از آن روند قابل توجهی در تغییرات نمودار حاصل نشده است و لذا برای کاهش زمان حل از همین تعداد مش برای سایر مراحل تحلیل و بررسی استفاده شده است.

۶- اعتبارسنجی نتایج

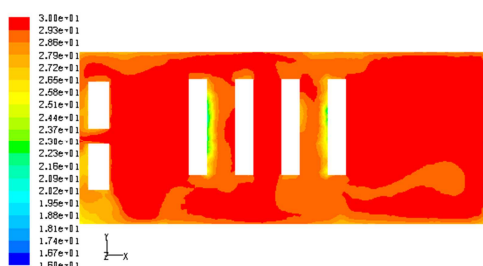
بررسی صحت نتایج عددی حاصل، به دو صورت انجام شده است. در روش اول بیشترین دمای ایجاد شده در بین راک ها بر اساس داده های تجربی حاصل از اندازه گیری در مرکز داده و نیز مدل عددی ساخته شده با یکدیگر مقایسه شده است. (شکل ۷)

در روش دوم که به عنوان نمونه دو نمودار آن در شکل های ۸ و ۹ نشان داده شده است از طریق بررسی دمای نقطه به نقطه در هر یک از خطوط نشانه که در شکل ۵ - ب از O.L تا O.R مشخص شده اند استفاده شده است. بررسی نمودار انطباق نتایج نشان می دهد که استفاده از مدل عددی می تواند داده های قابل اعتمادی از روند توزیع دمای سالن ارائه داده و برای سایر موارد مورد بررسی از این مدل عددی استفاده نمود.

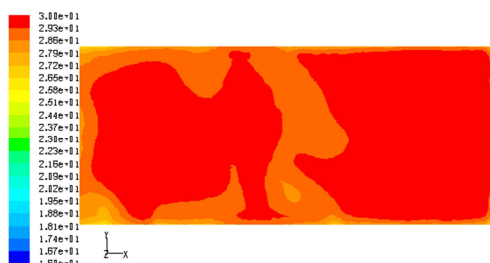
در این پژوهش جهت مطالعه میزان خنک شوندگی و یا گرم شوندگی راک ها و نیز بررسی جریان هوای داخل سالن از برش های عمودی و افقی در مقاطع مختلف استفاده شده است. شکل ۱۴ پروفیل های دمایی در مقاطع افقی ایجاد شده در ارتفاع های ۳، ۲، ۱ متری از کف کاذب نشان می دهد.



(الف)



(ب)



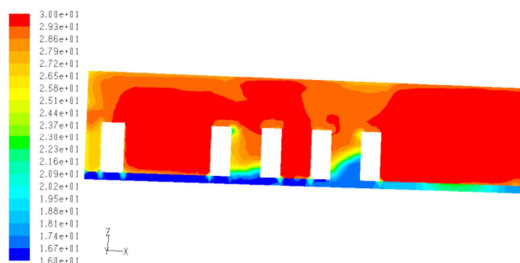
(ج)

شکل ۱۴- پروفیل دمای کل در برش افقی در ارتفاع های
الف- ۱ متر ب- ۲ متر ج- ۳ متر

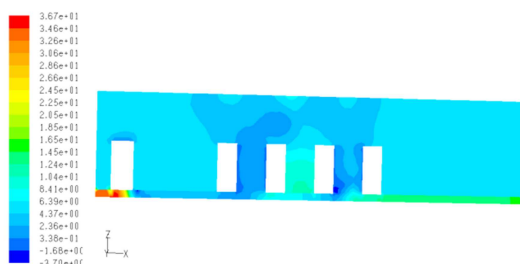
همان گونه که در شکل های فوق مشاهده می شود راهروی سرد دوم میزان هوای خنک بیشتری در مقایسه با راهروی سرد اول دریافت می کند لذا میانگین دمای کل در راهروی سرد دوم پایین تر از راهروی سرد اول خواهد بود. مشاهده می شود هوای خنک توانایی جاری شدن در ارتفاع های بالاتر را ندارد. با توجه به اینکه وظیفه اصلی سیستم سرمایش یک مرکز داده جلوگیری از افزایش دما در هریک از راک های داده می باشد لذا باید مطمئن بود که هیچ گونه افزونگی دما در کل سالن وجود نداشته باشد.

از عوامل افزایش دمای راک ها اختلاط هوای گرم خروجی راک ها با هوای ورودی به راک ها می باشد. بطوریکه بخشی از هوای گرم خروجی از راک ها به علت عدم تناسب فشار و سرعت در هر یک از راهروهای سرد و گرم مجدداً در ارتفاع های بالاتر از کف کاذب به داخل

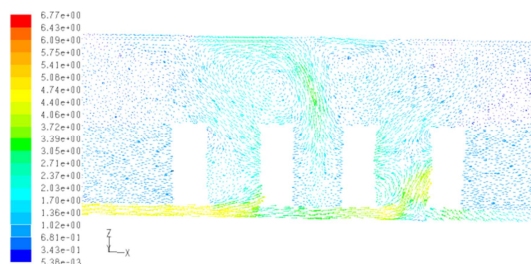
فشار استاتیکی تولید شده توسط فن های دستگاه تولید برودت در خروجی این دستگاه ها به فشار دینامیکی تبدیل شده و جریان هوا بصورت عمودی از دستگاه تولید برودت خارج گردیده و بصورت افقی در داخل کف کاذب جریان پیدا می کند. این تغییر جهت ناگهانی باعث گرادیان فشار زیادی شده و جریان خروجی از کف کاذب را تحت تاثیر قرار می دهد. دبی جریان در عبور از کف کاذب با پیشرفت در طول آن کاهش یافته و متناظر با آن سرعت جریان نیز کاهش خواهد یافت و لذا فشار آن افزایش پیدا خواهد کرد. بنابراین جریان هوای خالص در عبور از کف کاذب دورتر از دستگاه تولید برودت بیشتر خواهد بود. همانگونه که در شکل های ۱۱ الی ۱۳ مشاهده میشود بدلیل تغییرات فشار استاتیک جریان هوای خروجی در خروجی راهروی سرد اول کمتر از راهروی سرد دوم بوده و لذا راک های منصوبه در راهروی سرد دوم بیشترین میزان خنک شوندگی را خواهند داشت. همان گونه که مشاهده شد تغییرات فشار استاتیک تحت تاثیر عوامل مختلفی نظیر ارتفاع کف کاذب، محل قرارگیری پکیج های برودتی، موانع موجود در کف کاذب و نیز مساحت سطح آزاد دریچه های کف کاذب می تواند در خنک شوندگی و راندمان سرمایشی مرکز داده تاثیر قابل ملاحظه ای داشته باشد.



شکل ۱۱- پروفیل دمایی در برش عمودی در طول مرکز داده



شکل ۱۲- پروفیل فشار کل در برش عمودی در طول مرکز داده



شکل ۱۳- پروفیل سرعت کل در برش عمودی در طول مرکز داده

مطالعه می باشد. بطوریکه می توان در کارهای آتی با انجام بررسی در خصوص مدل های متفاوت جاگیری دستگاه های تولید برودت و راک ها و نیز اصلاح پارامترهای فیزیکی سالن نظیر ابعاد و ارتفاع به خصوص کف کاذب دمای افزونه ایجاد شده در راک ها را کاهش داد. استفاده از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی نشان داد که با استفاده از آن می توان بدون انجام سعی و خطا و نیز صرف هزینه های سربار نصب و برچیدن چندین باره تجهیزات وضعیت سرمایش سالن را مشاهده و در خصوص نقاط ضعف و قدرت آن تصمیم گیری نمود.

۹- نمادها

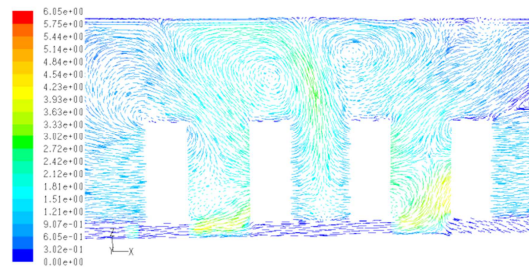
نمادها در صورت نیاز، در داخل یک جدول دوستونه بدون خط آورده می شوند. در ستون اول، مماس به گوشه راست جدول، نماد و در ستون دوم، مماس به گوشه راست جدول، توضیحات آن نوشته می شود. ذکر واحد الزامی است.

T	دما (K)
n	تعداد کل راک ها
R	Rack
ρ	چگالی (kg/m^3)
ε	نرخ انتشار آشفتنگی [$\text{m}^2 \text{s}^{-3}$]
μ	لزجت دینامیکی [$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$]
μ_t	لزجت آشفتنگی [$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$]
i, j	بردار جهت
P	فشار (Pa)
t	زمان (s)
x	مختصه مکانی (متر)
u	مولفه سرعت (m/s)
Cp	گرمای ویژه هوا در فشار ثابت
g	شتاب گرانشی (m/s^2)

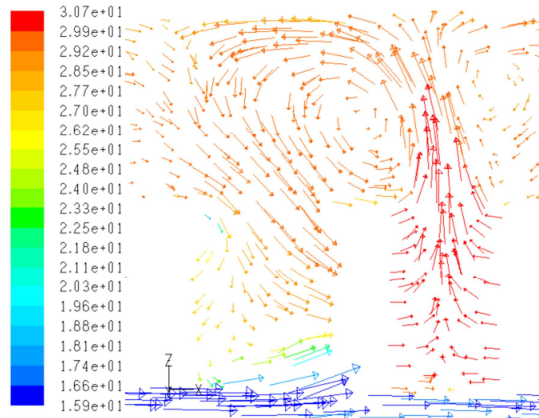
۱۰- مراجع

- [1] American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), *Datacom Equipment Power Trends and Cooling Applications*, TC 9.9 Committee, Atlanta, GA, 2005.
- [2] American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), *Thermal guidelines for data processing environments expanded datacenter classes and usage guidance*, American Society for Heating, Refrigeration and Air Conditioning, Atlanta, Georgia.
- [3] Patel C.D., Bash C., Belady C., Stahl L., Sullivan D, Computational fluid dynamics modeling of high compute density data centers to assure system inlet air specifications, *The Pacific Rim/ASME International Electronics Packaging Technical Conference and Exhibition, IPACK2001-15622*, 2001.
- [4] Patel C.D., Sharma R., Bash C., Beitelmal M, Thermal considerations in cooling of large scale high compute density data centers, *Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, pp. 767e776, 2002.
- [5] Schmidt R., Karki K.C., Patankar S.V, Raised data center: Perforated tile flow rates for various tile layouts, 9th *Intersociety Conference on Thermal and Thermo mechanical Phenomena in Electronic Systems*, 2004.
- [6] Schmidt R., Karki K.C., Kelkar K.M., Radmehr A., Patankar S.V, Measurements and predictions of the flow distribution

راک مکیده شده و مانع خنک کاری مناسب سرورهای منصوبه در بالای راک ها می گردد. به این پدیده چرخش هوای گرم^۱ گفته می شود. شکل های ۱۵ و ۱۶ نشان دهنده پدیده چرخش هوای گرم در اطراف راک ها و در کل سالن می باشد. از دیگر مشکلات رایج در تامین سرمایش مراکز داده افزونگی سرمایش بوده بطوریکه بخشی از هوای سرد تولیدی توسط دستگاه تولید برودت پس از خروج از کف کاذب بدون اینکه وارد فرایند خنک کاری راک ها گردد مستقیماً به داخل دستگاه تولید برودت بازگردانیده می شود. به این پدیده میانبرزدن^۲ هوای سرد گفته می شود که به شدت راندمان سیستم سرمایشی را کاهش می دهد. میانبرزدن هوای سرد می تواند باعث چرخش هوای گرم در راک ها گردد.



شکل ۱۵- نمایش الگوی جریان از سیستم توزیع هوای مرکز براساس خطوط جریان



شکل ۱۶- بردارهای سرعت بر اساس دمای کل در محدوده راهروی گرم نشان دهنده پدیده چرخش هوای گرم اطراف راک

۸- نتیجه گیری

شبیه سازی سه بعدی نحوه چرخش هوای سرد خنک کننده داخل مرکز داده و همچنین نقاط گرم موجود در سالن را به خوبی نشان می دهد. نتایج محاسبات عددی انجام شده در این مطالعه نشان داده که داده های عددی حاصل انطباق قابل قبولی با داده های اندازه گیری شده موجود دارد. با استفاده از این نتایج به خوبی می توان مشاهده کرد که وجود پدیده چرخش هوای گرم عامل اصلی گرمایش راک های منصوبه در این سالن بوده و این مهمترین دست آورد این

¹ Recirculation

² By-Pass

- through perforated tiles in raised floor data centers, *The Pacific Rim/ASME International Electronics Packaging Technical Conference and Exhibition*, 2001, IPACK2001-15728.
- [7] Radmehr A., Schmidt R., Karki K.C., Patankar S.V., Distributed leakage flow in raised-floor data centers, *The Pacific Rim/ASME International Electronics Packaging Technical Conference and Exhibition*, IPACK2005-73273, 2005.
- [8] Van Gilder J.W., Schmidt R., Airflow uniformity through perforated tiles in a raised-floor data center, *The Pacific Rim/ASME International Electronics Packaging Technical Conference and Exhibition*, IPACK2005-73375, 2005.
- [9] Rambo J, Joshi Y., Modeling of data center airflow and heat transfer: state of the art and future trends. *Distributed and parallel database, special issue on high density data centers*, Vol. 21, pp 193–22, 2007
- [10] U.S. Department of Energy, U.S. Data Centers save Energy Now, *Industrial Technologies Program, DOE-Energy Efficiency and Renewable Energy*, 2009.
- [11] Chao Lyu, Guangming Chen, Shuiquan Ye, Yueqin Liu, *Enclosed aisle effect on cooling efficiency in small scale data center*, 0th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, *ISHVAC2017*, Jinan, China, 19-22 October 2017.
- [12] Yogendra Joshi, Pramod Kumar, *Energy efficiency Thermal management of Data Centers*, chapter 8, pp 335-382, springer, ISBN 978-1-4419-7123-
- [13] Cho J., Shin S., Power and heat load of IT equipment projections for new data center's HVAC system design, *Journal of the Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea* , Vol.24 (3), pp 212–217, 2013.