

بررسی، شبیه سازی و تحلیل گردش هوا در مراکز داده جهت کاهش مصرف انرژی

محمد خدابنده^۱

چکیده

مرکز داده به مکانی گفته می‌شود که گروه عظیمی از سرورهای کامپیوتری و تجهیزات شبکه با استفاده از امکانات زیرساختی و ارتباطی برای رایانش و میزبانی مجموعه بزرگی از داده‌ها، گرد هم آمده باشند. به بیان دیگر، دیتاسنتر محل استقرار تعداد زیادی از سرورهای کامپیوتری است که در کنار یکدیگر و بدون وقفه، امور مربوط به رایانش، ذخیره‌سازی و انتقال داده‌ها را انجام می‌دهند. ساختمان اغلب این مراکز، دارای سیستم‌های امنیتی پیشرفته، سیستم تهویه، اطفاء حریق و سیستم توزیع برق است که به سامانه برق اضطراری و دیزل ژنراتور مجهز شده‌اند. پیاده‌سازی یک دیتاسنتر، عموماً بر پایه شبکه عظیمی از منابع پردازشی و ذخیره‌سازی صورت می‌پذیرد. از آن جا که انتشار گرما در سرور رک‌ها دائماً در حال افزایش است، بنابراین طراحی مناسب سیستم تهویه هوا در مرکز داده برای جلوگیری از تخریب دستگاه‌ها ناشی از گرمای زیاد اهمیت دارد. بیش از نیمی از انرژی مصرفی یک مرکز داده‌ی معمول، در زیرساخت‌های فیزیکی صرف می‌شود، در این پژوهش به جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی در مراکز داده و افزایش راندمان ابتدا شاخص‌های دمایی معرفی و سپس بر روی مدل‌های شبیه‌سازی شده پیاده‌سازی می‌گردد و در پایان مدل بهینه معرفی می‌گردد.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۰/۰۴/۱۱

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۱/۰۹/۲۸

کلمات کلیدی:

مرکز داده

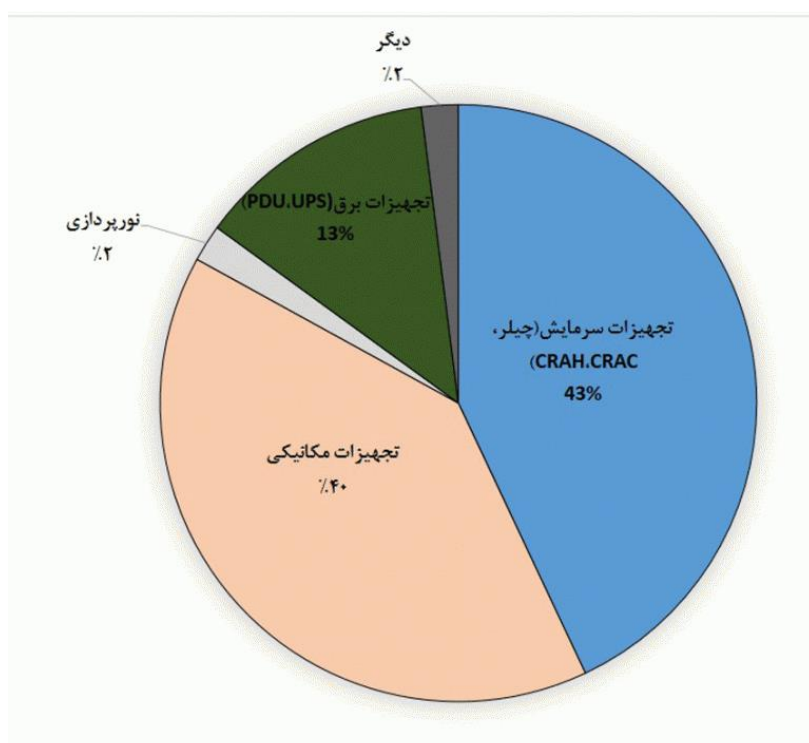
اتاق سرور

شبیه‌سازی

بهینه‌سازی

۱- مقدمه

دیتاسنتر^۲ یا مرکز داده به مکانی گفته می‌شود که گروه عظیمی از سرورهای کامپیوتری و تجهیزات شبکه با استفاده از امکانات زیرساختی و ارتباطی برای رایانش و میزبانی مجموعه بزرگی از داده‌ها، گرد هم آمده باشند. به بیان دیگر، دیتاسنتر محل استقرار تعداد زیادی از سرورهای کامپیوتری است که در کنار یکدیگر و بدون وقفه، امور مربوط به رایانش، ذخیره‌سازی و انتقال داده‌ها را انجام می‌دهند. ساختمان اغلب این مراکز، دارای سیستم‌های امنیتی پیشرفته، سیستم تهویه، اطفاء حریق و سیستم توزیع برق است که به سامانه برق اضطراری^۳ و دیزل ژنراتور مجهز شده‌اند. پیاده‌سازی یک دیتاسنتر، عموماً بر پایه شبکه عظیمی از منابع پردازشی و ذخیره‌سازی صورت می‌پذیرد. از آن جا که انتشار گرما در سرور رک‌ها دائماً در حال افزایش است، بنابراین طراحی مناسب سیستم تهویه هوا در مرکز داده برای جلوگیری از تخریب دستگاه‌ها ناشی از گرمای زیاد اهمیت دارد. بیش از نیمی از انرژی مصرفی یک مرکز داده‌ی معمول، در زیرساختهای فیزیکی صرف می‌شود.



شکل ۱. نمودار مصرف انرژی در مراکز داده

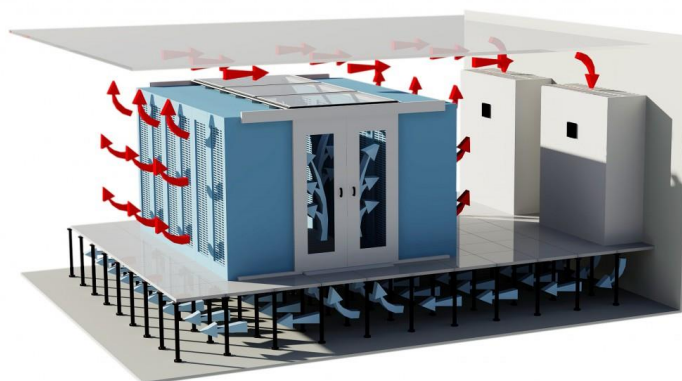
مدل‌سازی عددی و شبیه‌سازی چگونگی گردش هوا در تجهیزات موجود در مراکز داده و تحلیل چگونگی توزیع دمای داخل تجهیزات به جهت تخمین عملکرد گردش هوا در مراکز داده مورد نیاز است. با توجه به مصرف انرژی بالای تجهیزات زیرساختی در مراکز داده پژوهشگران به تحلیل مشکلات مراکز داده می‌پردازند و نهایتاً آن‌ها را منتشر می‌نمایند [۱]، در بررسی صورت گرفته ما بین سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۵، نگرانی ناشی از سرمایش مراکز داده در اولویت‌های اول پژوهشگران است [۶]. دفع حرارت ناشی از کارکرد تجهیزات در مراکز داده را می‌توان، یکی مصرف‌کنندگان منابع برق در سراسر جهان دانست. روش‌های سنتی که برای خنک‌سازی و دفع حرارت در مراکز داده و اتاقهای سرور (معروف به سیستم خنک‌کننده اتاق) مورد استفاده قرار می‌گیرد به این صورت است که هوای سرد بعد از طی مسیری

2 Data centers

3 UPS

طولانی در پلنوم ۴ کف کاذب به محفظه سرورها می‌رسد که این امر منجر به افت فشار زیاد (ΔP) به دلیل انسداد کابل‌ها و تلفات گرما (Q_{loss}) برای هوای تأمین شده میشود و از دیگر اشکالات و نقاط ضعف این روش گردش هوای گرم و بای پس ۵ هوای سرد در روش سنتی خنک‌سازی مراکز داده است. اخیراً پژوهشگران و محققان بر استفاده از استراتژی‌های نوین و تکنیک‌های متفاوت سیستم‌های خنک‌کننده برای دفع حرارت در مراکز داده متمرکز شده‌اند. سیستم‌های خنک‌کننده مراکز داده اخیراً توسعه یافته‌اند و از معماری ردیفی ۶ که در آن واحدهای CRAC به روش متناوب توزیع می‌شوند و در میان محفظه سرورها قرار می‌گیرند بهره می‌برند به سرعت در حال گسترش هستند. از مزایای این چیدمان می‌توان به کوتاه شدن مسیرهای هوایی و در نتیجه کاهش افت فشار و اتلاف گرما اشاره کرد.

هدف اصلی هر سیستم خنک‌کننده در مرکز داده، دفع حرارت تولید شده توسط تجهیزات فناوری اطلاعات (IT) به روشی کارآمد (از نظر) انرژی است. مراکز داده باید بگونه‌ای ساخته شوند که در آن‌ها هوای خنک کافی در ورودی رک‌ها وجود داشته باشد تا از گرم شدن بیش از حد تجهیزات و ایجاد خسارات جلوگیری بعمل آید از طرف دیگر در صورتیکه دفع حرارت بصورت بهینه انجام شود در انرژی مصرفی مراکز داده صرفه جویی چشمگیری صورت خواهد گرفت، در همین خصوص ایلال در گزارش^۶ CANOVATE [۱] که سیستم خنک‌کننده ردیفی تازه توسعه یافته را با سیستم خنک‌کننده سنتی مبتنی بر اتاق (خنک‌کننده محیطی) مقایسه نمود و واحدهای خنک‌کننده ردیفی (IRUs)^۸ را پیشنهاد داد. آن‌ها گزارش نمودند که سیستم خنک‌کننده بصورت ردیفی، بهترین گزینه خنک‌کننده برای مراکز داده با تراکم بالا است. در شکل ۲، یک نمونه آرایش و گردش هوا در محفظه سرورها نشان داده شده است.



شکل ۲. چگونگی گردش هوا در محفظه رک‌ها

در شکل‌های ۳ و ۴ چیدمان متفاوت IRUها، (یعنی هم‌راستا و پلکانی و نامتقابل) نشان داده شده است.

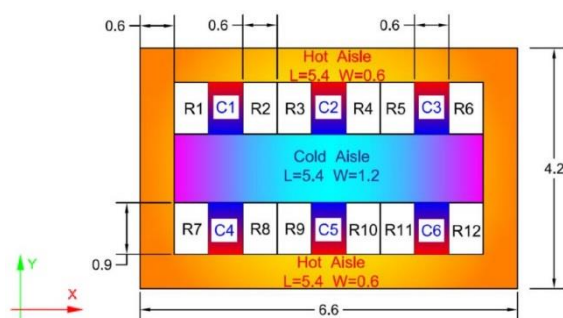
4 plenum

5 bypass

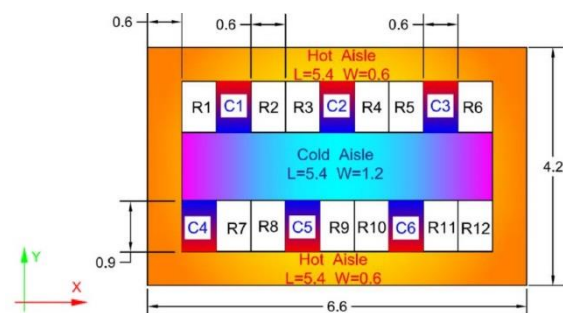
6 in-row

7 White paper

8 In-Row Cooling Units



شکل ۳. پیکربندی‌های هم‌راستا^۹



شکل ۴. پیکربندی‌های «پلکانی و نامتقابل»^{۱۰}

مراکز داده در شرایطی طراحی می‌شوند که فضای عمومی اتاق تجهیزات^{۱۱}، شرایط مناسبی بر طبق استانداردهای موجود داشته باشند [۲]، افزایش قابلیت‌های محاسباتی با افزایش تعداد رک‌ها و تراکم قدرت در مراکز داده [۳،۴] متناظر است، بنابراین باید در هنگام طراحی، کاهش مصرف انرژی را نیز در نظر داشت به همین جهت افزایش تعداد تجهیزات سرمایشی و توان آن‌ها روش مناسبی برای بهبود و مدیریت جریان هوا در مراکز داده نیست و جهت کاهش مصرف انرژی و کاهش هزینه‌های تجهیزات سرمایشی راه‌حل‌های ذیل پیشنهاد میشود:

افزایش دمای آب سرد شده

کاهش قدرت فن

بهبود عملکرد سیستم‌ها

مدیریت گردش هوا

فناوری راهروی سرد و گرم اولین بار در سال ۱۹۹۲ معرفی شد [۵]، سپس فناوری‌های دیگری چون سرمایش ردیفی با محفظه بندی راهروی گرم [۶]، محفظه بندی راهروی سرد [۷] و سرمایش سقفی [۸] به‌منظور بهبود عملکرد سیستم‌ها معرفی شد. به‌تدریج تمرکز بر مراکز داده با تراکم بالا و بهبود مصرف انرژی مراکز با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و روش‌های جدید در استفاده از انرژی‌های

تجدید پذیر مانند انرژی‌های خورشیدی، پیل‌های سوختی، استفاده از حالت‌های اکونومایزر^{۱۲} و روش خنک‌کننده رایگان^{۱۳} مدنظر قرار گرفت.

توزیع مناسب هوای سرد برای عملکرد مناسب سرورها ضروری است. دو عاملی که باعث کاهش راندمان سیستم سرمایشی می‌شوند جریان بازگشتی^{۱۴} و جریان عبوری^{۱۵} نام دارند. جریان برگشتی عبارتست از بازگشت هوای گرم به راهروی سرد و جریان عبوری به جریان سردی که بدون خنک کاری رک‌ها از راهروی سرد عبور کرده و به واحد سرمایش برمی‌گردد گفته می‌شود. استفاده از شاخص‌های دمایی به درک کارایی و عملکرد توزیع هوا کمک می‌کند. شارما^{۱۶} و همکاران [۹] دو پارامتر بی‌بعد شاخص گرمای تولیدی^{۱۷} (SHI) و شاخص گرمای برگشتی^{۱۸} (RHI) را برای ارزیابی عملکرد دمایی مراکز داده معرفی نمودند. از آنجاییکه راهروبنندی یکی از روش‌های بهبود توزیع هوا در مراکز داده می‌باشد در این مقاله ابتدا یک مرکز داده را که توزیع هوای ورودی در آن از طریق کف کاذب تامین می‌شود مورد مطالعه و بررسی قرار می‌دهیم و سپس با مدل راهروبنندی شده مورد مقایسه قرار می‌گیرد و با مدلسازی CFD به محاسبه کانتورهای دما در سه ارتفاع می‌پردازیم و در ادامه ابتدا ماکزیم و مینیم دما که برای ما اهمیت دارند را بررسی و سپس نتایج فوق و با حالت اولیه مقایسه می‌نماییم. در پایان با کمک شاخص‌های دمایی به انتخاب بهترین حالت از بین موارد پیشنهادی می‌پردازیم.

مبانی نظری

گزارش الکترونیکی ۱۳۰ اشنایدر الکترونیک که توسط دونلاپ و راسموسین [۲] انجام گردید، بین سه مدل سیستم خنک‌کننده در مرکز داده مقایسه انجام داده است: سیستم خنک‌کننده سطح اتاق^{۱۹}، سیستم خنک‌کننده ردیفی^{۲۰} و سیستم خنک‌کننده مستقل برای محفظه سرور^{۲۱}. آن‌ها دریافتند که فرآیند خنک‌سازی در مدل ردیفی، منعطف‌ترین حالت است، آن‌ها گزارش دادند که خنک‌سازی مبتنی بر اتاق برای خنک کردن کل اتاق است و سیستم‌های خنک‌کننده ردیفی واحدهای CRAC با خنک‌سازی ردیفی رک‌ها با مسیرهای کوتاه تر جریان هوا همراه اند، در حالیکه خنک‌کننده مبتنی بر رک برای خنک کردن یک رک با حداقل مقدار حجم هوا و ظرفیت خنک‌سازی است. لین و اولار [۳] ایده خنک‌سازی ردیفی و علت مناسب بودن آن برای متعادل کردن ظرفیت خنک‌سازی با بارهای حرارتی را ارائه کردند. استفاده از چیدمان ردیفی برای خنک‌سازی مراکز داده، به عنوان فناوری نسل بعد است که توسط رک‌های سرور استرالیا (SRA)^{۲۲} مورد توجه قرار گرفته است [۴]، آن‌ها اظهار داشتند که استفاده از سیستم‌های خنک‌کننده ردیفی، می‌تواند در مدت زمان ساخت مرکز داده صرفه جویی نمایند و در کاهش اختلاط هوا نیز موثر است.

گنگ و همکاران [۵] تحقیقات مربوط به خنک‌سازی مراکز داده را به چهار گروه طبقه‌بندی کردند که عبارتند از:

(۱) مدیریت هوا

(۲) فناوری خنک‌سازی

(۳) سیستم‌های تهویه مطبوع

12 Economizer
13 Free Cooling
14 Recirculation
15 Bypass
16 Sharma
17 Supply Heat Index
18 Return Heat Index
19 In Room
20 In Row
21 In Rack
22 Server Racks Australia

(۴) کارایی انرژی.

چین و همکاران [۶] در مورد پیشرفت اخیر در ارزیابی مدیریت حرارتی برای مراکز داده یک مطالعه مروری ارائه کردند، آن‌ها نتایج خود را در سه بخش کلی طبقه‌بندی کردند که عبارتند از:

(۱) استراتژیهای مدیریت حرارتی

(۲) تکنیکهای صرفه جویی در انرژی مانند خنک سازی آزاد و بازیابی گرما

(۳) بررسی معیارهای ارزیابی حرارتی

آن‌ها در ادامه گزارش دادند که مطالعات آماری روی مدیریت حرارتی و ارزیابی سیستم‌های خنک‌کننده مربوط برای مراکز داده هنوز کمبودهایی وجود دارد. چو و همکارانش [۷] مدیریت جریان هوا در مراکز داده را مورد مطالعه مروری خود قرار دادند، و سپس جریان هوا در مرکز داده را به

(۱) مسیرهای طولانی

(۲) مسیرهای کوتاه

طبقه‌بندی کردند و در ادامه گزارش دادند که روش مسیرهای طولانی مانند خنک سازی اتاق، دارای مشکلاتی از قبیل: "گردش مجدد هوای داغ^{۳۳} و بای پس هوای سرد می‌باشند. در حالی که روش مسیرهای کوتاه جریان هوا به کاهش تلفات کمک می‌کند. واتسون و ونکی‌تسواران [۸] یک آنالیز دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)^{۳۴} برای خنک کردن عمومی مرکز داده انجام دادند. نادا و سعید [۹ و ۱۰] بر روی تأثیر اعماق پلنوم بر مدیریت حرارتی جریان هوا در داخل مراکز داده و تأثیر طرح و جانمایی واحدهای CRAC بر مدیریت حرارتی مرکز داده پرداختند و تحقیقات عددی انجام دادند که در این مطالعه، مقایسه‌ای بین قرارگیری واحدهای CRAC در راستای ردیف رک‌ها و قرارگیری آن‌ها عمود بر ردیف رک‌ها انجام گردید. نادا و همکاران [۱۱ و ۱۲] تأثیر استفاده از پیکربندی‌های مختلف CRAC و تأثیر تغییر فضای بین CRAC‌ها و محفظه سرور‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. فرناندو و همکاران [۱۳] نشان دادند جریان گرمای مرکز داده چگونه می‌تواند بصورت مقیاس پایین شبیه سازی شود. هوانگ و همکاران [۱۴] شبیه‌سازی عددی و تحلیل مقایسه‌ای توزیع‌های مختلف جریان هوا را در مراکز داده انجام دادند. حسن و همکاران [۱۵] برای پایش توزیع دما در مرکز داده، تحلیل CFD انجام دادند. ماگدو و همکاران [۱۶] در مطالعه موردی خود که برای بهبود پایداری^{۳۵} در مرکز داده واقعی انجام شده بود، جریان هوا و عملکرد حرارتی را بطور عددی مورد مطالعه قرار دادند. نادا و همکاران [۱۷] با استفاده از زوایای مختلف تأمین هوای سرد از کاشی‌های سوراخ‌دار و شبیه‌سازی عددی توزیع جریان هوا و راندمان انرژی در سیستم تهویه مطبوع کف کاذب را انجام دادند.

نادا و همکاران [۱۸] تأثیر استفاده از نسبت‌های مختلف سوراخکاری^{۳۶} برای کاشی‌های سوراخ‌دار کف کاذب به منظور به دست آوردن توزیع دمای بهینه در نسبت سوراخکاری ۲۵ درصد را بطور تجربی مورد مطالعه قرار دادند. همچنین نادا و الفکی [۱۹] یک تحقیق تجربی از مراکز داده با تراکم نیروی بالا را با استفاده از یک مدل فیزیکی مقیاس‌شده به ترتیب برای بررسی تأثیر افزودن پارتیشن راهرو^{۳۷} و سیستم‌های مهار^{۳۸} راهرو انجام دادند. منگ و همکاران [۲۰] تأثیر محیط حرارتی یک مرکز داده با مقیاس کوچک واقع در چین را بطور تجربی تحلیل نمودند. نادا و همکاران [۲۱ و ۲۲] یک مطالعه تجربی انجام دادند که مشکل ناهمگنی^{۳۹} حرارتی معماری خنک‌کننده اتاق را

23 hot air recirculation

24 Computational Fluid Dynamics

25 Sustainability

26 perforation

27 aisle

28 containment

29 Heterogeneity

حل میکند. در این مطالعات، آن‌ها تحقیقات تجربی را در مورد مدیریت حرارت در اتاقهای سرور را تحت شرایط نیروی مختلف انجام دادند. بیهت و همکاران [۲۳] به بررسی تأثیر "انسدادهای زیر کف" مورد استفاده در معماری‌های خنک‌کننده سنتی بر عملکرد مراکز داده پرداختند. چو و همکاران [۲۴] برای جایگزینی یک سیستم خنک‌کننده مبتنی بر اتاق با یک سیستم خنک‌کننده مبتنی بر ردیف در گره، یک مطالعه تجربی انجام دادند که در آن از شش شاخص عملکردی برای مقایسه بین دو سیستم مذکور استفاده شده است. چو و وو [۲۵] برای بهبود عملکرد حرارتی مرکز داده، یک مطالعه تجربی بر روی سیستم خنک‌کننده مبتنی بر ردیف که به تازگی توسعه یافته است انجام دادند. ژانگ و همکاران [۲۶] اثرات استفاده از مجاری هوای زیر کف T شکل بر یکنواختی جریان هوا و بهینه‌سازی آن در داخل مرکز داده مدولار را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند.

اخیراً جین و همکاران [۲۷] به مقایسه مدیریت حرارتی و راندمان انرژی بین سیستمهای کف کاذب و مبتنی بر ردیف که برای خنک‌سازی مراکز داده مورد استفاده قرار می‌گیرند پرداختند. معظمی‌گودرزی و همکاران [۲۸] با مقایسه میزان دبی جریان هوای مورد نیاز هر معماری در دمای ثابت هوای تأمین‌شده و دمای مورد نیاز هوای تأمین‌شده در دبی‌های مختلف جریان هوا، تأثیر معماری خنک‌کننده را بر مرکز داده مورد مطالعه قرار دادند. معظمی‌گودرزی و همکاران [۲۹] برای مدلسازی توزیع دما در IT با معماری خنک‌کننده مبتنی بر ردیف از "اصل یادگیری ماشین" استفاده کردند. یوان و همکاران [۳۰] اعتبار طراحی برای جانمایی سرور کج^{۳۳} به منظور بهبود سیستم مدیریت جریان هوا در مرکز داده را نشان دادند. یوان و همکاران [۳۱] در مطالعه تجربی و عددی خود، اثرات "موجگیرهای ترمینال سمت پایین تر"^{۳۳} سرورها را بر مدیریت جریان هوا با توجه به گسترش مدلسازیهای عددی [۳۲-۳۴] به منظور کاهش زمان و هزینه‌های طراحی بررسی کرده‌اند.

۲- معیارهای ارزیابی حرارتی

برای ارزیابی کارایی و عملکرد حرارتی یک مرکز داده باید از پارامترهای مختلفی استفاده شود. بیشتر این پارامترها مربوط به دمای تأمین‌شده و برگشت CRAC ها و واحدهای رک ها است. جین و همکاران [۳۵] بیشتر معیارهای ارزیابی حرارتی را با توجه به هر یک از پارامترهای نشانگر^{۳۴} عملکرد پایش رفتار حرارتی و راندمان نیروی سیستم خنک‌کننده مورد استفاده برای مراکز داده، در شاخص‌های گروه‌بندی شده، فهرست و گروه‌بندی کردند. شارما و همکاران [۳۶] برای تحلیل و ارزیابی میزان انحراف از وضعیت ایده‌آل اتاق‌های سرور^{۳۵} واقعی، دو پارامتر بدون بُعد تعریف کردند. پارامترهای آن‌ها SHI و RHI نامگذاری شدند، با استفاده از آن‌ها می‌توان درجه مخلوط شدن منبع هوا در راهروی سرد را با هوای گرم اطراف، قبل از ورود به سرور IT بصورت کمی بیان کرد. هرلین [۳۷ و ۳۸] شاخص خنک‌کننده رک (RCI)^{۳۶} و شاخص دمای بازگشت (RTI)^{۳۷} را به ترتیب در سالهای ۲۰۰۵ و ۲۰۰۷ مطرح کرد. این معیارها مستقیماً به این موضوع می‌پردازند که آیا CRAC می‌تواند به طور مؤثری تجهیزات IT را خنک کند یا خیر. مقدار بهینه برای شاخص RTI، ۱۰۰ درصد است. RTI بالاتر از ۱۰۰ درصد بر گردش مجدد دلالت دارد و RTI کمتر از ۱۰۰ درصد به معنای بای‌پس هوا است.

برای به دست آوردن عملکرد الگوی جریان هوا، شاخص بتا (β) توسط اشمیت و همکاران [۳۹] تعریف گردید. دامنه مقادیر β بین صفر تا ۱ است. اگر مقدار β صفر باشد به معنای عدم "گردش مجدد"^{۳۸} هواست، در حالی که اگر مقدار β بالاتر از ۱ باشد نشان دهنده "خود

30 Under-floor blockages

31 Machine learning principle

32 Tilted

33 Lower side terminal baffles

34 Indication

35 Server Room

36 Rack cooling index

37 Return temperature index

38 recirculation

گرم شدن^{۳۹} است. ژو [۴۰] "ضریب استفاده از انرژی^{۴۰} (η_r) را تعریف نمود که برای محاسبه راندمان حرارتی جریان هوا در مراکز داده مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این پارامتر بعنوان مرجعی برای اندازه‌گیری درصد مخلوط شدن هوای سرد و گرم استفاده می‌شود. هرچه مقدار ضریب استفاده از انرژی (η_r) بیشتر باشد، مدیریت حرارتی مراکز داده بهتر خواهد بود. تیان و همکاران [۴۱] شاخص اختلاط (IOM)^{۴۱} را ارائه کردند که برای نشان دادن عملکرد حرارتی مرکز داده مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقادیر پایینتر IOM نشانگر محیط گرمایی بهتری می‌باشد. مقدار بالاتر IOM نشان‌دهنده احتمال بالاتر وجود یک نقطه داغ موضعی در محل رک می‌باشد. ون‌گیلدر و شریواستاوا [۴۲] برای گرفتن کارایی و عملکرد خنک‌سازی فقط بر اساس جریان هوا همراه با تأمین هوای خنک‌کننده به یک رک یا حذف هوای گرم از یک رک، شاخص گرفتن (CI)^{۴۲} و شاخص گردش مجدد (RI)^{۴۳} را پیشنهاد دادند. تعریف و توضیح معیارهای مختلف محیط حرارتی مورد استفاده برای ارزیابی عملکرد حرارتی مراکز داده در روابط زیر نشان داده شده است.

$$SHI = \frac{\delta Q}{Q + \delta Q} \quad (1)$$

(افزایش آنتالپی ناشی از نفوذ در راهروی سرد تقسیم بر افزایش آنتالپی کل در خروجی رک)

$$RHI = \frac{Q}{Q + \delta Q} \quad (2)$$

(کل گرمای خارج شده بوسیله واحدهای CRAC تقسیم بر افزایش آنتالپی کل در خروجی رک)

$$RCI_{HI} = \left[1 - \frac{\text{Total Over Temperature}}{\text{Max Allowable Over Temperature}} \right] 100\% \quad (3)$$

$$RCI_{LO} = \left[1 - \frac{\text{Total Under Temperature}}{\text{Max Allowable Under Temperature}} \right] 100\% \quad (4)$$

$$RTI = \left[\frac{T_{return} - T_{supply}}{\Delta T_{equipment}} \right] \times 100\% \quad (5)$$

$$\beta = \frac{T_{in} - T_{ref}}{T_{out} - T_{in}} \quad (6)$$

$$\eta_r = \frac{T_{out} - T_{ref}}{\frac{T_{out} + T_{in}}{2} - T_{ref}} \quad (7)$$

$$IOM = \frac{T_{i,max} - T_{i,min}}{T_o - T_i} \quad (8)$$

$$CI = \frac{\text{mass of species}}{\text{total mass of fluid}} \quad (9)$$

(جرم نمونه‌ها تقسیم بر جرم کل سیال)

$$RI = 1 - CI \quad (10)$$

³⁹ self-heating

⁴⁰ Energy Utilization Coefficient

⁴¹ Index of Mixing

⁴² Capture Index

⁴³ Recirculation Index

با بررسی تحقیقات فوق می‌توان نتیجه گرفت سیستم خنک‌کننده ردیفی، در مقایسه با سایر سیستم‌های ستی خنک‌کننده مرکز داده عملکرد بهتری دارد. با این وجود، تحقیقات در مورد ارتقای عملکرد حرارتی و بهینه‌سازی سیستم خنک‌کننده ردیفی با استفاده از نحوه توزیع دما، به طور کامل بررسی نشده‌اند. به همین جهت در این مقاله ابتدا یک مرکز داده راکه توزیع هوای ورودی در آن از طریق کف کاذب تامین میشود مورد مطالعه و بررسی قرار میدهم و سپس با مدل راهروبندی شده مورد مقایسه قرار میگیرد و با مدلسازی CFD به محاسبه کانتورهای دما در سه ارتفاع میپردازیم و شاخصه‌های دمایی و معیارهای ارزیابی عملکرد حرارتی مرکز داده نمونه را بررسی میکنیم.

۳- معادلات حاکم بر مسئله

مدل عددی مرکز داده با استفاده از بسته نرم افزاری 6SIGMADCX مدل سازی شده است و معادلات بنیادی در وضعیت پایدار^{۴۴} در یک میدان سه بعدی تراکم ناپذیر و توربولانس حل میشود. با توجه به اینکه جریان در مرکز داده مغشوش است، برای مدل سازی عددی جریان تراکم ناپذیر در این مرکز داده، علاوه بر معادلات بقای جرم، مومنتم و انرژی، بایستی یک مدل توربولانس نیز برای ایجاد اثر اغتشاش به کار گرفته شود. معادلات سه بعدی میدان جریان، بقای جرم، بقای مومنتم و بقای انرژی به صورت زیر هستند:

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[u_i \rho \left(h + \frac{1}{2} u_j u_j \right) \right] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right] \quad (13)$$

$$k_{eff} = K + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \quad (14)$$

معادلات مربوط به مدل توربولانس k-ε در معادلات ۱۵ و ۱۶ ارائه شده‌اند. در این معادلات k نشان دهنده انرژی جنبشی توربولانس^{۴۵} و ε نیز نشان دهنده نرخ اتلاف آن می‌باشد. لذا k و ε از معادلات انتقالی زیر محاسبه خواهند شد:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (15)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (16)$$

⁴⁴ Steady state

⁴⁵ Turbulence Kinetic Energy

که در این معادلات Gk نشان دهنده تولید انرژی جنبشی توربولانس به علت گرادیان سرعت میانگین^{۴۶}، Gb نشان دهنده تولید انرژی جنبشی توربولانس در اثر نیروی شناوری و YM نشان دهنده سهم نوسانات سرعت در جریان آشفته تراکم پذیر می باشد. همچنین $C1\varepsilon$ ، $C2\varepsilon$ و $C3\varepsilon$ ضرایب ثابتی هستند که با توجه به راهنمای برنامه فلونتت به صورت زیر تعیین می شوند:

$$C1\varepsilon = 1/44$$

$$C2\varepsilon = 1/92$$

همچنین $k\sigma$ و $\varepsilon\sigma$ نمایانگر عدد پراتل توربولانس به ترتیب برای k و ε می باشند که مطابق زیر در نظر گرفته شده اند:

$$\sigma k = 1$$

$$\sigma\varepsilon = 1/3$$

ویسکوزیته توربولانس μ_t نیز با توجه به مقادیر k و ε به ترتیب زیر محاسبه می گردد:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (17)$$

C_μ ثابتی است که به صورت زیر تعیین می گردد:

$$C_\mu = 0.09$$

قابل ذکر است که در این شبیه سازی، برای حل معادلات حاکم از روش حجم محدود^{۴۷} استفاده گردید که برای دقت بالای محاسبات، گسسته سازی ترمهای جابجایی و پخش با استفاده از روش مرتبه دوم انجام گرفته و چون سیال عامل تراکم ناپذیر در نظر گرفته شده است، برای وابسته کردن میدان سرعت و فشار، از الگوریتم معروف SIMPLE استفاده شده است. در واقع باید گفت، برای کوپل کردن سرعت و فشار در روش حل تفکیکی، در محاسبات حالت پایدار، از این الگوریتم استفاده می شود که از رابطه بین اصلاحات فشار و سرعت استفاده می کند تا قانون بقای چرم را برآورده کند و میدان فشار را به دست آورد. سایر معادلاتی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته اند در روابط ۱۸-۲۲ آورده شده است. شاخص های عمومی برای عملکرد بهتر توزیع هوا در مراکز داده عبارتند از: RCI, SHI, RHI, RTI. مهم ترین شاخص که ابتدا بررسی می شود و بیانگر سرمایه راک هاست RCI است و اگر مقدار آن در محدوده قابل قبول باشد، سایر شاخص ها بررسی می گردد.

$$SHI = \frac{\delta Q}{Q + \delta Q} \quad (18)$$

افزایش آنتالپی ناشی از نفوذ در راهروی سرد تقسیم بر افزایش آنتالپی کل در خروجی راک

$$RHI = \frac{Q}{Q + \delta Q} \quad (19)$$

کل گرمای خارج شده بوسیله واحدهای CRAC تقسیم بر افزایش آنتالپی کل در خروجی رک

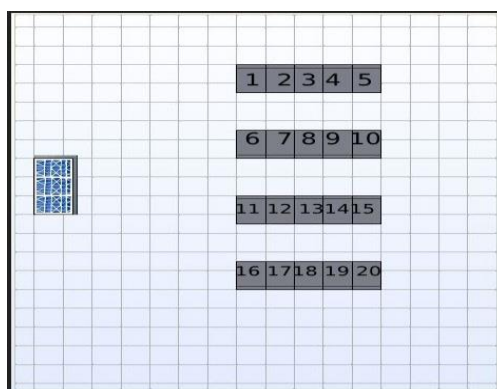
$$RCI_{HIGH} = \left[1 - \frac{\text{Total Over Temperature}}{\text{Max Allowable Over Temperature}} \right] 100\% \quad (20)$$

$$RCI_{LOW} = \left[1 - \frac{\text{Total Under Temperature}}{\text{Max Allowable Under Temperature}} \right] 100\% \quad (21)$$

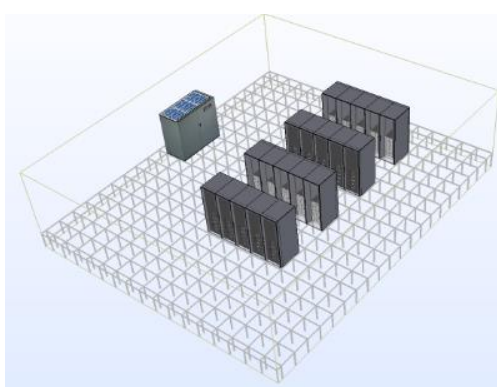
$$RTI = \left[\frac{T_{return} - T_{supply}}{\Delta T_{equipment}} \right] \times 100\% \quad (22)$$

۴- مدل‌سازی و شبیه سازی

فضای نمونه مورد بررسی یک سایت مرکز داده در اتاقی با ابعاد $12 \times 10 \times 3.44$ متر مکعب می باشد که در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است.



شکل ۵. نمای سالن دیتای مورد مطالعه



شکل ۶. فضا و محل قرار گیری تجهیزات

این مرکز داده با ۲۰ رک تجهیز شده است که بار حرارتی هر رک ۳ کیلو وات است. سیستم توزیع هوای زیر سطحی با ارتفاع کف کاذب ۰.۶۴ متر برای سرمایش رک ها در نظر گرفته شده است. بار حرارتی کل مرکز داده ۸۹.۶ کیلووات محاسبه شده است. بعد از اعتبار سنجی حل عددی به جهت انتخاب بهترین حالت جانمایی و بیشترین راندمان از یک واحد سرمایش با ظرفیت ۶۰ کیلووات استفاده شده است. بعبارت دیگر پکیج سرمایشی در نظر گرفته شده باید در بهترین حالت جانمایی تجهیزات قرار بگیرد که جوابگوی نیاز سرمایشی مرکز داده

باشد. در این پژوهش سیستم توزیع هوا از کف کاذب (زیر سطحی) و بازگشت هوا بدون کانال کنشی به عنوان مدل پایه در نظر گرفته شده است. به طور کلی شاخصهای سرمایشی معرفی شده در حالت‌های ذیل مورد بررسی قرار می‌گیرد:

- حالت پایه
- حالت پایه + راهروی سرد به‌مراه کانال هوای برگشتی

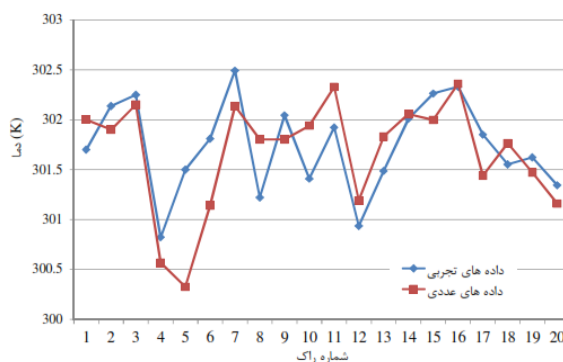
۵- شرایط مرزی

با توجه به معماری حرارتی سالن مرکز داده، فرضیات زیر در تعریف سیستم از مدل حاضر در نظر گرفته شده است:

۱. محل و مقدار جریان ورودی مشخص است که می‌تواند اندازه‌گیری شود. در هر کاشی مشبک، با استفاده از یک جریان هود و یا جریان خروجی از مدل‌های پلنوم شبیه‌سازی عددی، سرعت جریان مشخص است.
۲. محل و مقدار بازگشت جریان به هر واحد سرمایش، از شرایط حالت پایدار پیروی می‌کند. (به‌عنوان مثال، کل جریان بازگشتی به واحد سرمایش، باید با جریان خروجی از هر واحد مطابقت داشته باشد).
۳. محل و مقدار بار حرارتی در سراسر اتاق مشخص و قابل محاسبه است. به عبارتی عمق، عرض، طول و ارتفاع هر ردیف از رک‌ها، همراه با بار حرارتی در هر یک از آن‌ها، مشخص است و با توجه به بار حرارتی به‌دست‌آمده، پکیج با ظرفیت مناسب انتخاب می‌گردد.
۴. به علت ایزوله بودن سالن مرکز داده، دیوارها آدیاباتیک فرض شده و از اثرات تشعشع صرف‌نظر گردیده است.

۶- اعتبارسنجی حل عددی

در این پژوهش به جهت اطمینان از صحت حل معادلات جریان و حرارت سیال توسط نرم افزار SIGMADCX6، توزیع دمای حاصل از شبیه‌سازی فضای نمونه مورد نظر با این نرم افزار توسط داده‌های تجربی در یک راستا مورد مقایسه قرار گرفته است. همان طور که در شکل ۷ نشان داده شده است رکها را شماره گذاری کرده و ورودی رک‌ها به عنوان نقطه موردنظر انتخاب می‌گردد. حال دمای ورودی به رک موردنظر را با دماسنج در ارتفاع ۱ متر خوانده و با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در شکل ۷ مقایسه می‌شود.

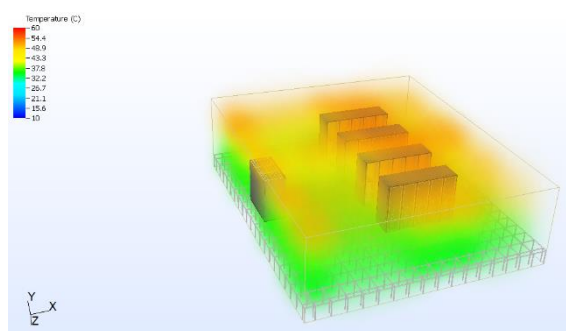


شکل ۷. مقایسه نتایج تجربی و عددی با همدیگر در کار حاضر

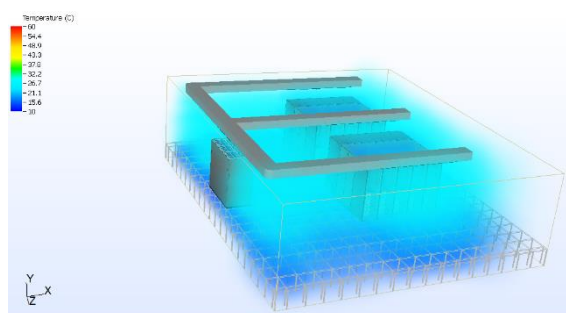
همان طور که انتظار می رفت با توجه به توزیع دما در شکل ۷ نتایج حاصل از شبیه سازی با استفاده از نرم افزار موردنظر دارای صحت قابل قبولی با دادههای تجربی می باشند زیرا کمتر از ده درصد با دادههای تجربی اختلاف دارند؛ بنابراین این مدل مناسب برای ادامه کار انتخاب می گردد.

۷- نتایج

در همه مدل ها یک صفحه برش در کف کاذب، ارتفاع یک متری از کف کاذب و ارتفاع ۱/۸ متری از کف کاذب در نظر گرفته شده که کانتورهای دمایی در این صفحات در شکل های ۸ تا ۱۳ نشان داده شده اند. لازم به ذکر است به جهت مقایسه بهتر مقیاس نمایش کانتورهای زیر همگی در بازه دمایی ۱۰ تا ۴۰ درجه سانتیگراد ترسیم شده است. همانگونه که در شکل ها مشاهده می شود، هوای خنک توانایی جاری شدن در ارتفاعهای بالاتر را ندارد. با توجه به اینکه وظیفه اصلی سیستم سرمایش یک مرکز داده جلوگیری از افزایش دما در هر یک از راکهای داده می باشد لذا باید مطمئن بود که هیچ گونه افزونگی دما در کل سالن وجود ندارد [۴۳].



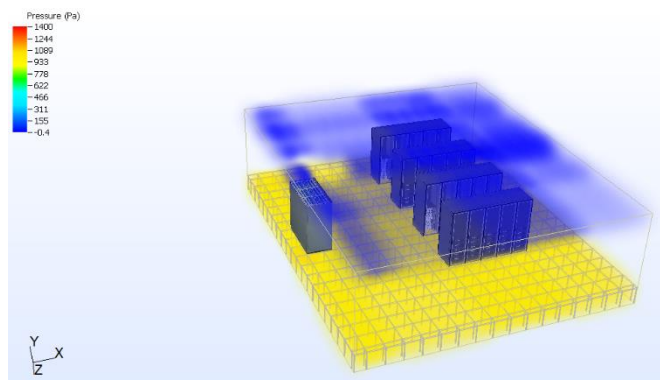
شکل ۸. کانتور توزیع دما در حالت اول



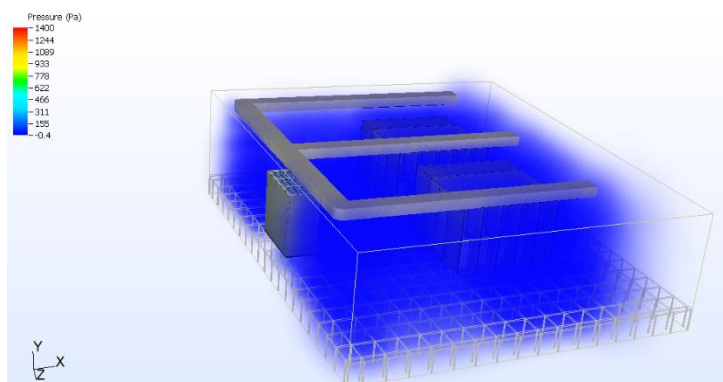
شکل ۹. کانتور توزیع دما در حالت دوم

مطابق شکل های فوق مشاهده می شود که در حالت اول که حالت پایه می باشد، دمای عمومی تجهیزات بسیار بالاست. حالت دوم که حالت پایه به همراه راهرو سرد و کانال هوای برگشتی است، سایت و تجهیزات منصوبه در رک ها در وضعیت ایده آل قرار دارند. با توجه به کانتورهای دمایی در حالت دوم تجهیزات کمترین دما را تجربه میکنند و علاوه بر محیط رک ها، فضای عمومی سایت نیز دمای پایین تری دارد. در این حالت اول انرژی مصرف شده به جای خنک کاری رک ها صرف سرمایش مناطقی میشود که نیازی به سرمایش ندارند. در حالت دوم به نظر میرسد که می توان تعداد سرورها و بار حرارتی را افزایش داد. در حالت دوم که مرکز داده مجهز به بصورت راهرو سرد میباشد: مینیمم دما در درون محفظه ی بسته در راهرو سرد مشاهده میشود که می تواند یک حالت بهینه برای سرمایش رک ها باشد. با

مقایسه حالت‌های اول و دوم می‌توان مشاهده نمود که ایجاد کانال برگشت هوا راهکار خوبی برای سرمایه‌ش رک‌ها می‌باشد. همچنین برای درک توزیع فشار، کانتور فشار استاتیکی مربوط به حالت اول را در شکل ۱۰ و ۱۱ نشان داده‌ایم.

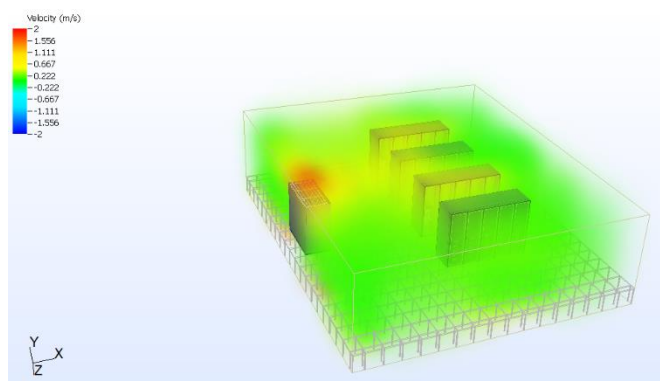


شکل ۱۰. کانتور توزیع فشار استاتیک در حالت اول

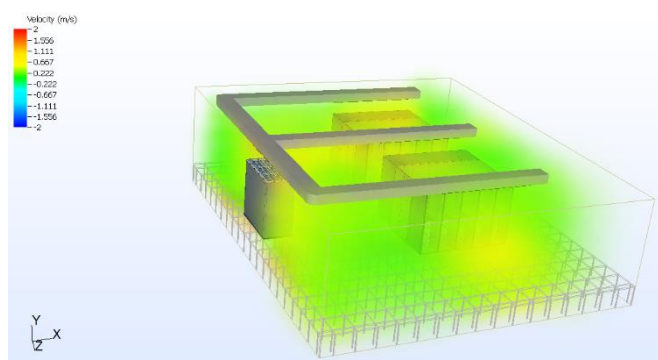


شکل ۱۱. کانتور توزیع فشار استاتیک در حالت دوم

همانطور که مشاهده می‌شود، فشار استاتیکی تولید شده توسط فن‌های دستگاه برودت در خروجی این دستگاه‌ها 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 می‌کند و دبی جریان در عبور از کف کاذب با پیشرفت در طول آن کاهش یافته لذا فشار آن افزایش پیدا خواهد کرد در تصاویر ذیل کانتور سرعت در حالت‌های اول و دوم را مشاهده می‌نمایید:



شکل ۱۲. کانتور سرعت در حالت اول



شکل ۱۳. کانتور سرعت در حالت دوم

همانطور که مشاهده می شود، دبی جریان در عبور از کف کاذب با پیشرفت در طول آن کاهش یافته و متناظر با آن سرعت جریان نیز کاهش می یابد. بنابراین جریان هوای خالص در عبور از کف کاذب دورتر از دستگاه تولید برودت بیشتر خواهد بود. نتایج تخمین شاخصهای دمایی بعد از شبیه سازی عددی حالتی موردنظر، شاخصهای دمایی که پارامترهای مهمی در توزیع هوا در مراکز داده می باشند، بر اساس محاسبات فوق الذکر استخراج می گردد که با توجه به مقدار شاخصها می توان در مورد وضعیت کلی هر حالت، اظهار نظر نمود. در جدول ۱ نتایج حاصل از تخمین شاخص ها نشان داده شده است.

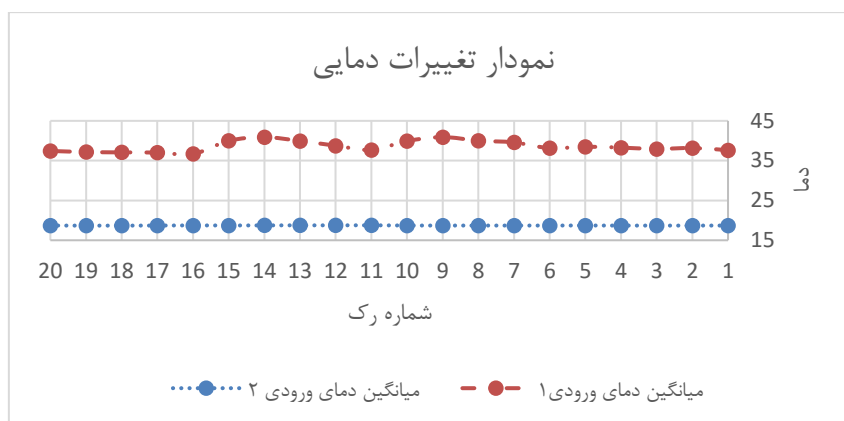
جدول ۱. نتایج حاصل از تخمین شاخص ها

RHI	SHI	RTI	RCI_{LOW}	RCI_{HIGH}	توضیحات	حالت
۰/۷۸۹۶	۰/۲۰۷۴	۸۰/۳۲٪	۱۰۰٪	-۱۳۱/۸٪	توزیع هوا از کف کاذب، برگشت هوا شناور	۱
۰/۸۹۲۷	۰/۰۱۰۳	۷۴/۰۷٪	-۲۳٪	۱۰۰٪	محفظه راهرو بندی سرد با برگشت هوا	۲

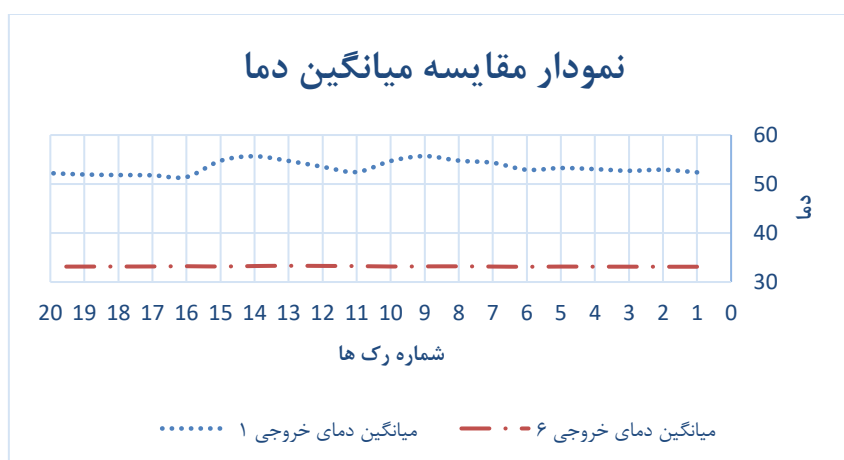
بر اساس شاخصهای تعریف شده مشاهده می شود که در حالت اول شاخص RCI منفی است و این عدد بیانگر این است که رکها دمایی بالایی را تجربه میکنند در حالت دوم شاخص سرمایش رک ۱۰۰٪ است که به مقدار ایده آل رسیده است. در خصوص شاخص RTI در همه حالت ها مقدار زیر ۱۰۰٪ است و این میزان بیانگر اینست که جریان بازگشتی وجود ندارد و جریانهای موجود در مدلسازیهای انجام شده بصورت عبوری است. بنا به تعاریف صورت گرفته هرچه میزان RHI زیاد و SHI کم باشد به حالت ایده آل طراحی سیستم سرمایش برای مرکز داده نزدیک شده ایم از این رو بر اساس تحلیلهای صورت گرفته حالت دوم ایده آل ترین حالت از حیث شاخصهای دمایی است. در خصوص شاخص دمایی برگشتی نیز حالت دوم وضعیت بهتری دارد

۸- ارزیابی مدل‌های مسئله

برای تحلیل بهتر دمایی مدل‌های مسئله، نمودار مقایسه ای میانگین دمایی ورودی و خروجی در حالت‌های اول و دوم بر اساس شماره رکها در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ قابل مشاهده است.



شکل ۱۴. نمودار مقایسه میانگین دمای ورودی به رکها



شکل ۱۵. نمودار مقایسه میانگین دمای خروجی از رکها

۹- نتیجه گیری

برای کاهش هزینه‌های انرژی، تخمین جریان هوا و کارایی سیستم سرمایش، توجه به پیکربندی اتاق سرور در طراحی اولیه ضروری است. قرار گرفتن سایر شاخص‌ها در محدوده‌های قابل قبول، بر عملکرد کلی مرکز داده اثر می‌گذارد. با توجه به اهمیت دماهای ورودی و خروجی از رکها، برای طراحی مراکز داده، با استفاده از متوسط‌گیری این دماها، به مقایسه حالت‌های مختلف پرداخته شد. در این پژوهش، با تغییر پارامترهای مختلف که در طراحی یک مرکز داده با سیستم توزیع هوا مؤثر می‌باشند و مقایسه شاخص‌های دمایی در آن‌ها نتایج به صورت زیر به دست آمدند:

پارامترهای مختلف برای تخمین جریان هوا و کارایی دمایی در یک مرکز داده که در این پژوهش از آن‌ها استفاده شد، عبارت بودند از: محفظه بندی راهروی سرد و کانال کشی هوای برگشت با محفظه بندی راهروهای سرد و گرم می‌تواند دمای هوای ورودی را از محدوده مجاز بالاتر برد و اتلاف انرژی کمتر و کارایی بهتری را خواهیم داشت. کانال کشی هوای بازگشت و پارتیشن بندی از کف کاذب به عنوان روش‌های تکمیلی استفاده می‌شوند که کانال کشی شرایط بهتری ایجاد می‌کند و با توجه به مجموع مقایسه‌های انجام شده، مناسب‌ترین مدل برای مدل مورد بررسی، حالت دوم یعنی محفظه بندی راهروی سرد می‌باشد.

مراجع

- [1] Ivanc ILAL, "Advantages of in Row Cooling Systems against Perimeter (CRAC&CRAH) Cooling Systems", White Paper 101, CTO Canovate Group, 2019
- [2] Kevin Dunlap and Neil Rasmussen, "Choosing between Room, Row, and Rack-Based Cooling for Data Centers", Schneider Electric White Paper 130, 2019
- [3] P. Lin and V. Avelar, "How Row-Based Data Center Cooling Works", Schneider Electric White Paper 208, 2019
- [4] Server Racks Australia (SRA), "Server Rack Heat Dissipation in Next Generation In-Row Architectures", V1.2 White Paper #4, 2018
- [5] Xiaoming Gong, Zhongbin Zhang, Sixuan Gan, Baolian Niu, Yang Liu, Haijin Xu, Manfang Gao, "A review on evaluation metrics of thermal performance in data centers", Build. Environ. 177, 2020
- [6] C. Jin, X. Bai, Ya' An, J. Ni, J. Shen, "Case Study Regarding the Thermal Environment and Energy Efficiency of Raised-Floor and Row-Based Cooling, Building and Environment", 2020
- [7] Wen-Xiao Chu, Chi-Chuan Wang, "A review on airflow management in data centers", Appl. Energy 240, 2019, 84-119.
- [8] B. Watson, V. Kumar Venkiteswaran, "Universal Cooling of Data Centres: A CFD Analysis", 9th International Conference on Applied Energy, ICAE. 2017, August 2017, pp. 21-24.
- [9] S.A. Nada, M.A. Said, "Comprehensive study on the effects of plenum depths on air flow and thermal managements in data centers", Int. J. Therm. Sci. 122, 2017, 302-312.
- [10] S.A. Nada, M.A. Said, "Effect of CRAC units layout on thermal management of data center", Appl. Therm. Eng. 118, 2017, 339-344.
- [11] S.A. Nada, M.A. Said, M.A. Rady, "CFD investigations of data centers' thermal performance for different configurations of CRACs units and aisles separation", Alex. Eng. J. 55, 2016, 959-971.
- [12] S.A. Nada, M.A. Said, M.A. Rady, "Numerical investigation and parametric study for thermal and energy management enhancements in data centers buildings", Appl. Therm. Eng. 98, 2016, 110-128.
- [13] H. Fernando, J. Siriwardana, S. Halgamuge, "Can a data center heat-flow model be scaled down", in: Proceedings of the IEEE Information and Automation for Sustainability ICIAfS, 2012, pp. 273-278.
- [14] Zhilin Huang, Kaijun Dong, Qin Sun, Lin Su, Tengqing Liu, "Numerical simulation and comparative analysis of different airflow distributions in data centers", Procedia Engineering 205, 2017, 2378-2385
- [15] N.M.S. Hassan, M.M.K. Khan, M.G. Rasul, "Temperature monitoring and CFD analysis of data center", Procedia Engineering 56, 2013, 551-559
- [16] D. Macedo, R. Godina, P. Dinis Gaspar, P.D. da Silva, M. Trigueiros Covas, "A parametric numerical study of the airflow and thermal performance in a real data center for improving sustainability", Appl. Sci. 9, 2019, 3850.
- [17] S.A. Nada, H.M. El-Batsh, H.F. Elattar, N.M. Ali, "CFD investigation of airflow pattern, temperature distribution and thermal comfort of UFAD system for theater buildings applications", J. Build. Eng. 6, 2016, 274-300.
- [18] S.A. Nada, K.E. Elfeky, Ali M.A. Attia, W.G. Alshaer, "Experimental parametric study of servers cooling management in data centers buildings", Heat Mass Tran. 53 (6), 2017, 2083-2097.
- [19] S.A. Nada, K.E. Elfeky, "Experimental investigations of thermal managements solutions in data centers buildings for different arrangements of cold aisles containments", J. Build. Eng. vol. 5, 2016, 41.
- [20] Xiongzhuan Meng, Junli Zhou, Xuejiao Zhang, Zhiwen Luo, Hui Gong, Ting Gan, "Optimization of the thermal environment of a small-scale data center in China", in: Energy, vol. 196, Elsevier, 2020.
- [21] S.A. Nada, A.M.A. Attia, K.E. Elfeky, "Experimental study of solving thermal heterogeneity problem of data center servers", Appl. Therm. Eng. 109, 2016, 466-474.
- [22] S.A. Nada, K.E. Elfeky, Ali M.A. Attia, W.G. Alshaer, "Thermal management of electronic servers under different power conditions", Int. J. Emerg. Trends Electr. (IJETEE) 11 (4), 2015, 145-150.
- [23] S. Bhopte, B. Sammakia, R. Schmidt, M.K. Iyengar, D. Agonafer, "Effect of under floor blockages on data center performance", in: Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronics Systems, 2006 May, pp. 426-433.
- [24] J. Cho, J. Yang, W. Park, "Evaluation of air distribution system's airflow performance for cooling energy savings in high-density data centers", Energy Build. 68, 2014, 270-279.
- [25] Jinkyun Cho, Jesang Woo, "Development and experimental study of an independent row-based cooling system for improving thermal performance of a data center", Appl. Therm. Eng. 169, 2019, 114857.
- [26] Yiwen Zhang, Kai Zhang, Jinxiang Liu, Risto Kosonen, Xiaolei Yuan, "Airflow uniformity optimization for modular data center based on the constructal T-shaped underfloor air ducts", Appl. Therm. Eng. 155, 2019, 489-500.

- [27] C. Jin, X. Bai, Ya' An, J. Ni, J. Shen, "Case Study Regarding the Thermal Environment and Energy Efficiency of Raised-Floor and Row-Based Cooling", *Building and Environment*, 2020.
- [28] Hosein Moazamigoodarzi, Peiyang Jennifer Tsai, Souvik Pal, Suvojit Ghosh, Ishwar K. Puri, "Influence of cooling architecture on data center power consumption", *Energy* 183 (C) , 2019, 525-535.
- [29] Hosein Moazami goodarzi, Rohit Gupta, Souvik Pal, Peiyang Jennifer Tsai, Suvojit Ghosh, K. Ishwar, Puri, "Modeling temperature distribution and power consumption in IT server enclosures with row-based cooling architectures", *Appl. Energy* 261 , 2020 , 114355.
- [30] X. Yuan, X. Xu, Yu Wang, J. Liu, R. Kosonen, H. Cai, "Design and validation of an airflow management system in data center with tilted server placement", *Appl. Therm. Eng.* 164 , 2020, 114444.
- [31] X. Yuan, X. Zhou, J. Liu, Y. Wang, R. Kosonen, X. Xu, "Experimental and numerical investigation of an airflow management system in data center with lower-side terminal baffles for servers", *Build Environ. Times* 155, 2019, 308-319.
- [۳۲] سجاد اسلامی، مهدی حسنی "اثر مدل توربوالنس بر شبیهسازی عددی جریان آشفته نانوسیال در یک لوله افقی"، *مجله مدلسازی مهندسی، سال هفدهم، شماره ۵۸، پائیز ۱۳۹۸، صفحه ۲۷۹*
- [۳۳] حسین خراسانی زاده، علیرضا آقای، حمیدرضا احترام "اثر مدل توربوالنس بر شبیهسازی عددی جریان آشفته نانوسیال در یک لوله افقی"، *مجله مدلسازی مهندسی، سال چهاردهم، شماره ۴۷، زمستان ۱۳۹۵، صفحه ۲۰۱*
- [۳۴] علیرضا میر اولیایی، شمس الدین قوره جیلی " بررسی پارامترهای مؤثر بر هیدرودینامیک بستر پر شده دوار به کمک دینامیک سیالات محاسباتی"، *مجله مدلسازی مهندسی، سال هفدهم، شماره ۵۹، زمستان ۱۳۹۸، صفحه ۳۶*
- [35] Chaoqiang Jin, Xuelian Bai, Chao Yang, "Effects of airflow on the thermal environment and energy efficiency in raised-floor data centers: a review", *Sci. Total Environ.* 695, 2019, 133801.
- [36] R.K. Sharma, C.E. Bash, C.D. Patel, "Dimensionless parameters for evaluation of thermal design and performance of large scale data centers", in: *Proceedings of the AIAA2002-3091, American Institute of Aeronautics and Astronautics Conference*, 2002.
- [37] M.K. Herrlin, "Rack cooling effectiveness in data centers and telecom central offices: the rack cooling index (RCI)", *Build. Eng.* 111 (Pt 2 111), 2005, 725-731.
- [38] M.K. Herrlin, "Airflow and cooling performance of data centers: two performance metrics, in: *ASHRAE Transactions*", American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers Inc. Atlanta GA, 2008, vol. 114
- [39] R.R. Schmidt, E.E. Cruz, M.K. Iyengar, "Challenges of data center thermal management", *IBM J. Res. Dev.* 49 (4/5) , 2005, 709-723
- [40] Q. Xu, "Energy Consumption and Air Distribution Simulation of a Substation Data Room", *Master's Thesis*, Zhejiang University, Hangzhou, China, 2015
- [41] H. Tian, Z. Li, X. Liu, X. Qian, "Study on thermal environment evaluation in data centers", *Journal of Refrigeration* 33 , 2012 , 5-9.
- [42] J.W. VanGilder, S.K. Shrivastava, "Capture index: an airflow-based rack cooling performance metric", *Build. Eng.* , Volume 113 (1) ,2007.

[۴۳] اشکان جهانگیرامینی، نادر پورمحمد، ایرج میرزایی "مدلسازی سه بعدی دینامیک سیالات محاسباتی سیستم سرمایشی پایین زن در یک مرکز داده نمونه"، *مجله علمی پژوهشی مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، دوره ۵۰، شماره ۴ - شماره ژیاژی ۹۳، زمستان ۱۳۹۹، صفحه ۶۱-۶۸*