

## بررسی عددی تأثیر روش‌های توزیع هوا در میزان خنک‌سازی مرکز داده

محمد خدابنده<sup>۱\*</sup>، نادر پور محمود<sup>۲</sup> و ایرج میرزائی<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۱۸	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۱۸	
<b>واژگان کلیدی:</b>	
مقاله، مرکز داده، مدیریت توزیع هوا، مطالعه عددی، شاخص‌های دمایی.	مراکز داده به‌امکانی گفته می‌شود که سرورها و تجهیزات IT را در خود جای می‌دهد. رک در شبکه و IT، سخت‌افزاری است که ماژول‌های سخت‌افزاری مانند سرور، ذخیره‌ساز <sup>۴</sup> ، سویچ و تجهیزات ارتباطی و UPS و دیگر تجهیزات شبکه را در خود جای می‌دهد. با توجه به انتشار همیشگی گرما از رک‌ها <sup>۵</sup> مدیریت سیستم‌های توزیع هوا و سیستم سرمایشی در مراکز داده برای جلوگیری از تخریب بر اثر گرمای زیاد اهمیت ویژه‌ای دارد. هدف از مدیریت سیستم‌های توزیع هوا، حل مشکلات موجود در سرمایش مراکز داده، از جمله حداقل نمودن بازگشت هوای گرم، بای‌پس هوای سرد و حذف نقاط داغ است و همچنین می‌توان با رفع مشکلات گردش هوا هزینه‌های زیاد ناشی از سیستم‌های سرمایش را کاهش داد. در تحقیق حاضر پس از شبیه‌سازی و تحلیل حالت‌های مختلف طراحی سیستم سرمایش اتاق سرور مشخص گردید با محفظه بندی راهروهای سرد و گرم می‌توان دمای هوای ورودی را از محدوده مجاز بالاتر برد و اتلاف انرژی کمتر و کارایی بهتری را تجربه نمود و در ادامه کانال‌کشی هوای بازگشت و پارتیشن‌بندی از کف کاذب به‌عنوان روش‌های تکمیلی معرفی گردید. در مجموع مقایسه‌های انجام‌شده، با توجه به افزایش ۲۰ درصدی گرمای خارج شده از رکها در مدل شبیه‌سازی شده راهروی سرد این مدل پیشنهاد گردید.

### ۱- مقدمه

ذخیره‌سازی صورت می‌پذیرد. از آنجاکه 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 [۴۴].

مدل‌سازی عددی و شبیه‌سازی چگونگی گردش هوا در تجهیزات موجود در مراکز داده و تحلیل چگونگی توزیع دمای داخل تجهیزات به‌دلیل 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

دیتاسنتر<sup>۶</sup> 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<sup>۷</sup> و دیزل ژنراتور مجهز شده‌اند. پیاده‌سازی یک دیتاسنتر، عموماً بر پایه شبکه عظیمی از منابع پردازشی و

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.khodabandeh@urmia.ac.ir

۱. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۲. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۳. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

<sup>۴</sup> Data centers

<sup>۵</sup> Data centers

<sup>۶</sup> Data centers

<sup>۷</sup> UPS

به‌صورت ردیفی، بهترین گزینه خنک‌کننده برای مراکز داده با تراکم بالا است. در شکل (۱) در دو قسمت الف و ب چیدمان متفاوت IRUها، (یعنی هم‌راستا و پلکانی و نامتقابل) نشان داده شده‌است.

مراکز داده در شرایطی طراحی می‌شوند که فضای عمومی اتاق تجهیزات، 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. به‌همین 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

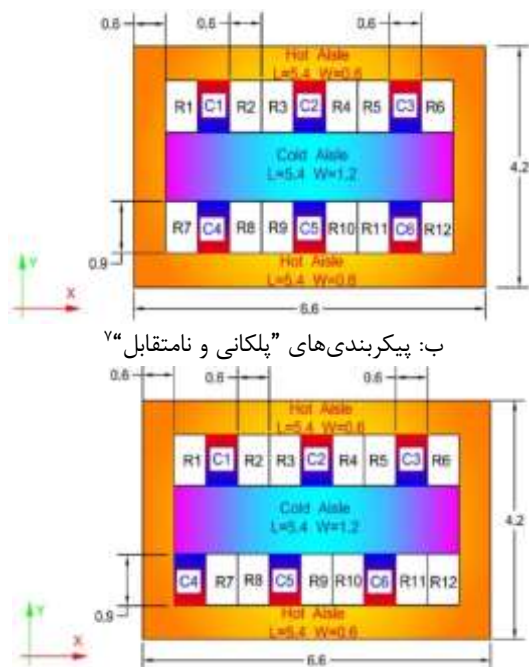
بهبود عملکرد سیستم‌ها

مدیریت گردش هوا

فناوری راه‌روی سرد و گرم اولین بار در سال ۱۹۹۲ معرفی شد [۵]، سپس فناوری‌های دیگری چون سرمایش ردیفی با

نهایتاً آن‌ها را منتشر می‌نمایند [۱]، در بررسی صورت گرفته مابین سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۲۱، نگرانی ناشی از سرمایش مراکز داده در اولویت‌های اول پژوهشگران است [۳، ۴، ۵، ۶، ۲۰، ۴۵]. 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 طولانی در پلنوم<sup>۱</sup> کف کاذب به محفظه سرورها می‌رسد که این امر منجر به افت فشار زیاد ( $\Delta P$ ) به دلیل انسداد کابلها و تلفات گرما ( $Q_{loss}$ ) برای هوای تأمین‌شده می‌شود و از دیگر اشکالات و نقاط ضعف این روش گردش هوای گرم و بای‌پس<sup>۲</sup> 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<sup>۳</sup> که در آن واحدهای CRAC به‌روش متناوب توزیع می‌شوند و در میان محفظه سرورها قرار می‌گیرند بهره می‌برند به‌سرعت 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 تولیدشده توسط تجهیزات فناوری اطلاعات (IT) به روشی کارآمد (از نظر) انرژی است. مراکز داده باید به‌گونه‌ای ساخته شوند که در آن‌ها هوای خنک کافی در ورودی رک‌ها وجود داشته باشد تا از گرم شدن بیش‌ازحد تجهیزات و ایجاد خسارات جلوگیری به‌عمل آید. از طرف دیگر در صورتی که دفع حرارت به‌صورت بهینه انجام شود در انرژی مصرفی مراکز داده صرفه‌جویی چشمگیری صورت خواهد گرفت، در همین خصوص ایلال در گزارش<sup>۴</sup> CANOVATE ۱۰۱ [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)<sup>۵</sup> را پیشنهاد داد. آن‌ها گزارش نمودند که سیستم خنک‌کننده



شکل ۱ - نحوه چیدمان IRUها

<sup>۵</sup> In-Row Cooling Units

<sup>۷</sup> plenum

<sup>۶</sup> staggered

<sup>۱</sup> plenum

<sup>۲</sup> bypass

<sup>۳</sup> in-row

<sup>۴</sup> White paper

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 ردیف‌های رک‌ها با مسیرهای کوتاه‌تر جریان هوا همراه می‌باشند، 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، به‌عنوان فناوری نسل بعد است که توسط رک‌های سرور استرالیا (SRA) [۴] مورد توجه قرار گرفته است، آن‌ها اظهار داشتند که استفاده از سیستم‌های خنک‌کننده ردیفی، می‌تواند در مدت‌زمان ساخت مرکز داده صرفه‌جویی نمایند و در کاهش اختلاط هوا نیز مؤثر است.

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

(۱) مدیریت هوا

(۲) فناوری خنک‌سازی

(۳) سیستم‌های تهویه مطبوع

(۴) کار آبی انرژی.

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

(۱) استراتژی‌های مدیریت حرارتی

(۲) تکنیک‌های صرفه‌جویی در انرژی مانند خنک‌سازی

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 ونگ [۷] مدیریت جریان هوا در مراکز داده را مورد مطالعه مروری خود قرار دادند، و سپس جریان هوا در مرکز داده را به:

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 اکونومی‌زرها<sup>۱</sup> و روش خنک‌کننده رایگان<sup>۲</sup> مدنظر قرار گرفت [۴۵].

توزیع مناسب هوای سرد برای عملکرد مناسب سرورها ضروری است. دو عاملی که باعث کاهش راندمان سیستم سرمایشی می‌شوند جریان بازگشتی<sup>۳</sup> و جریان عبوری<sup>۴</sup> نام دارند. جریان برگشتی عبارت است از بازگشت هوای گرم به راهروی سرد و جریان عبوری به‌جریان سردی که بدون خنک کاری رک‌ها از راهروی سرد عبور کرده و به‌واحد سرمایش برمی‌گردد گفته می‌شود. استفاده از شاخص‌های دمایی به درک کار آبی و عملکرد توزیع هوا کمک می‌کند. شارما و همکاران [۳۶] دو پارامتر بی‌بعد شاخص گرمای تولیدی<sup>۵</sup> (SHI) و شاخص گرمای برگشتی<sup>۶</sup> (RHI) را برای ارزیابی عملکرد دمایی مراکز داده معرفی نمودند. از آنجاییکه راهرو بندی 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 تأمین می‌شود مورد مطالعه و بررسی قرار خواهد گرفت و سپس با مدل راهرو بندی شده مقایسه می‌گردد و با مدل‌سازی CFD کانتورهای دما در سه ارتفاع محاسبه خواهد شد و در ادامه ابتدا ماکزیمم و مینیمم دما که برای ما اهمیت دارند را بررسی و بعد از آن نتایج فوق و با حالت اولیه مقایسه خواهد شد. در پایان با کمک شاخص‌های دمایی به بهترین حالت از بین موارد پیشنهادی انتخاب می‌گردد.

## مبانی نظری

گزارش الکترونیکی ۱۳۰ شنایدر الکترونیک که توسط دونلاپ و راسموسن [۲] انجام گردید، بین سه مدل سیستم خنک‌کننده در مرکز داده مقایسه انجام داده‌است: سیستم خنک‌کننده سطح اتاق<sup>۷</sup>، سیستم خنک‌کننده ردیفی<sup>۸</sup> و سیستم خنک‌کننده مستقل برای محفظه سرور<sup>۹</sup>. آن‌ها

<sup>6</sup> Return Heat Index

<sup>7</sup> In Room

<sup>8</sup> In Row

<sup>9</sup> In Rack

<sup>10</sup> Server Racks Australia

<sup>1</sup> Economizer

<sup>2</sup> Free Cooling

<sup>3</sup> Recirculation

<sup>4</sup> Bypass

<sup>5</sup> Supply Heat Index

## (۱) مسیره‌های طولانی

## (۲) مسیره‌های کوتاه

طبقه‌بندی کردند و در ادامه گزارش دادند که روش مسیره‌های طولانی مانند خنک‌سازی اتاق، دارای مشکلاتی از قبیل: "گردش مجدد هوای داغ<sup>۱</sup> و بای پس هوای سرد می‌باشند. درحالی‌که روش مسیره‌های کوتاه جریان هوا به کاهش تلفات کمک می‌کند.

واتسون و ونکی‌تسواران [۸] یک آنالیز دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)<sup>۲</sup> 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 به صورت مقیاس پایین شبیه‌سازی 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. ماکدو و همکاران [۱۶] در مطالعه موردی خود که برای بهبود پایداری<sup>۳</sup> در مرکز داده واقعی انجام شده بود، جریان هوا و عملکرد حرارتی را به‌طور 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<sup>۴</sup> برای کاشی‌های سوراخ‌دار کف کاذب به‌منظور به دست آوردن توزیع دمای بهینه در نسبت سوراخ‌کاری ۲۵ درصد را به‌طور 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 مقیاس‌پذیر به‌ترتیب برای بررسی تأثیر افزودن پارتیشن راهرو<sup>۵</sup> و سیستم‌های مهار<sup>۶</sup> راهرو انجام دادند. منگ و همکاران [۲۰] تأثیر محیط حرارتی یک مرکز داده با مقیاس کوچک واقع در چین را به‌طور تجربی تحلیل نمودند. نادا و همکاران [۲۱ و ۲۲] یک مطالعه تجربی انجام دادند که مشکل ناهمگنی<sup>۷</sup> حرارتی معماری خنک‌کننده اتاق را حل می‌کند. در این مطالعات، آن‌ها تحقیقات تجربی را در مورد مدیریت حرارت در اتاق‌های سرور را تحت شرایط نیروی مختلف انجام دادند. بی‌هیت و همکاران [۲۳] به بررسی تأثیر "انسدادهای زیر کف"<sup>۸</sup> 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 به‌تازگی 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 به‌صورت 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 تأمین شده و دمای مورد نیاز هوای تأمین شده 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"<sup>۹</sup> استفاده کردند. یوان و همکاران [۳۰] اعتبار طراحی برای جانمایی سرور کج<sup>۱۰</sup> به‌منظور بهبود سیستم مدیریت جریان هوا در مرکز داده را نشان دادند.

<sup>6</sup> containment

<sup>7</sup> Heterogeneity

<sup>8</sup> Under-floor blockages

<sup>9</sup> Machine learning principle

Tilted

<sup>1</sup> hot air recirculation

<sup>2</sup> Computational Fluid Dynamics

<sup>3</sup> Sustainability

<sup>4</sup> perforation

<sup>5</sup> aisle

برای اندازه‌گیری درصد مخلوط شدن هوای سرد و گرم استفاده می‌شود. هرچه مقدار ضریب استفاده از انرژی ( $\eta_r$ ) بیشتر باشد، مدیریت حرارتی مراکز داده بهتر خواهد بود. تیان و همکاران [۴۱] شاخص اختلاط (IOM)<sup>۹</sup> را ارائه کردند که برای نشان دادن عملکرد حرارتی مرکز داده مورداستفاده 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 کار آیی 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)<sup>۱۰</sup> و شاخص گردش مجدد (RI)<sup>۱۱</sup> را پیشنهاد دادند. جدول ۱ تعریف و توضیح معیارهای مختلف محیط حرارتی مورداستفاده برای ارزیابی عملکرد حرارتی مراکز داده را نشان می‌دهد.

جدول ۱- شاخص‌های ارزیابی عملکرد حرارتی مرکز داده

شاخص	معادلات
$\beta$	$\beta = \frac{T_{in} - T_{ref}}{T_{out} - T_{in}}$
$\eta_r$	$\eta_r = \frac{T_{out} - T_{ref}}{\frac{T_{out} + T_{in}}{2} - T_{ref}}$
IOM	$IOM = \frac{T_{i,max} - T_{i,min}}{T_o - T_i}$
CI	$CI = \frac{\text{mass of species}}{\text{total mass of fluid}}$
RI	جرم نمونه‌ها تقسیم بر جرم کل سیال $RI = 1 - CI$

### هدف انجام مطالعه حاضر

با بررسی تحقیقات حاضر می‌توان نتیجه گرفت که معماری‌های جدید مورداستفاده برای خنک‌سازی مراکز داده، تحت عنوان خنک‌کننده ردیفی، در مقایسه با سایر سیستم‌های سنتی خنک‌کننده مرکز داده عملکرد بهتری دارند. باین وجود، تحقیقات در مورد ارتقای عملکرد حرارتی و انرژی معماری‌های خنک‌کننده ردیفی با استفاده از نحوه توزیع دما، به‌طور کامل بررسی نشده‌اند. هدف این پژوهش، بررسی مدیریت سیستم توزیع دما در واحد خنک‌کننده در رک‌های

یوان و همکاران [۳۱] در مطالعه تجربی و عددی خود، اثرات "موجگیرهای ترمینال سمت پایین‌تر<sup>۱</sup> سرورها را بر مدیریت جریان هوا با توجه به گسترش مدل‌سازی‌های عددی [۳۲-۳۳] به‌منظور کاهش زمان و هزینه‌های طراحی بررسی کرده‌اند.

### معیارهای ارزیابی حرارتی

برای ارزیابی کار آیی 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 رک‌ها است. جین و همکاران [۳۵] بیشتر معیارهای ارزیابی حرارتی را با توجه به هر یک از پارامترهای نشانگر<sup>۲</sup>، عملکرد پایش رفتار حرارتی و راندمان نیروی سیستم خنک‌کننده مورداستفاده برای مراکز داده، در شاخص‌های گروه‌بندی‌شده، فهرست و گروه‌بندی کردند. شارما و همکاران [۳۶] برای تحلیل و ارزیابی میزان انحراف از وضعیت ایده آل اتاق‌های سرور<sup>۳</sup> 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 به‌صورت کمی بیان کرد. هرلین [۳۷ و ۳۸] شاخص خنک‌کننده رک (RCI)<sup>۴</sup> و شاخص دمای بازگشت (RTI)<sup>۵</sup> را به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۰۷ مطرح کرد. این معیارها مستقیماً به این موضوع می‌پردازند که آیا CRAC می‌تواند به‌طور مؤثری تجهیزات IT را خنک کند یا خیر. مقدار بهینه برای شاخص RTI، ۱۰۰ درصد است. RTI بالاتر از ۱۰۰ درصد برگردش مجدد دلالت دارد و RTI کمتر از ۱۰۰ درصد به معنای بای پس هوا است. برای به دست آوردن عملکرد الگوی جریان هوا، شاخص بتا ( $\beta$ ) توسط اشمیت و همکاران [۳۹] تعریف گردید. دامنه مقادیر  $\beta$  بین صفر تا ۱ است. اگر مقدار  $\beta$  صفر باشد به معنای عدم "گردش مجدد<sup>۶</sup> هواست، درحالی‌که اگر مقدار  $\beta$  بالاتر از ۱ باشد نشان‌دهنده "خود گرم شدن<sup>۷</sup> است. ژو [۴۰] "ضریب استفاده از انرژی<sup>۸</sup> ( $\eta_r$ ) را تعریف نمود که برای محاسبه راندمان حرارتی جریان هوا در مراکز داده مورداستفاده قرار می‌گیرد. از این پارامتر به‌عنوان مرجعی

<sup>7</sup> self-heating

<sup>8</sup> Energy Utilization Coefficient

<sup>9</sup> Index of Mixing

<sup>10</sup> Capture Index

<sup>11</sup> Recirculation Index

<sup>1</sup> Lower side terminal baffles

<sup>2</sup> Indication

<sup>3</sup> Server Room

<sup>4</sup> Rack cooling index

<sup>5</sup> Return temperature index

<sup>6</sup> recirculation

که در این معادلات  $G_k$  نشان‌دهنده تولید انرژی جنبشی توربولانس به علت گرادیان سرعت میانگین<sup>۲</sup>،  $G_b$  نشان‌دهنده تولید انرژی جنبشی توربولانس در اثر نیروی شناوری و  $Y_M$  نشان‌دهنده سهم نوسانات سرعت در جریان آشفته تراکم پذیر می‌باشد. همچنین  $C_{1\varepsilon}$ ،  $C_{2\varepsilon}$  و  $C_{3\varepsilon}$  ضرایب ثابتی هستند که با توجه به راهنمای برنامه فلونت به صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92$$

همچنین  $k\sigma$  و  $\varepsilon\sigma$  نمایانگر عدد پراوتل توربولانس به ترتیب برای  $k$  و  $\varepsilon$  می‌باشند که مطابق زیر در نظر گرفته شده‌اند:

$$\sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$$

ویسکوزیته توربولانس  $\mu_t$  نیز با توجه به مقادیر  $k$  و  $\varepsilon$  به ترتیب زیر محاسبه می‌گردد:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (14)$$

$C_\mu$  ثابتی است که به صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$C_\mu = 0.09$$

قابل ذکر است که در این شبیه‌سازی عددی، برای حل معادلات حاکم از روش حجم محدود<sup>۴</sup> استفاده شده‌است. برای دقت بالای محاسبات، گسسته‌سازی ترم‌های جابجایی و پخش با استفاده از روش مرتبه دوم انجام گرفته و چون سیال عامل تراکم ناپذیر در نظر گرفته شده، برای وابسته کردن میدان سرعت و فشار، از الگوریتم معروف SIMPLE استفاده شده‌است. در واقع باید گفت، برای کوپل کردن سرعت و فشار در روش حل تفکیکی، در محاسبات حالت پایدار، از این الگوریتم استفاده می‌شود که از رابطه بین اصلاحات فشار و سرعت استفاده می‌کند تا قانون بقای چرم را برآورده کند و میدان فشار را به دست آورد.

سایر معادلاتی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند در جدول ۲ آورده شده‌است. شاخص‌های عمومی برای عملکرد بهتر توزیع هوا در مراکز داده عبارت‌اند از: RCI, SHI, RHI, RTI. مهم‌ترین شاخص که ابتدا بررسی می‌شود و بیانگر سرمایه‌گذاری RCI است و اگر مقدار آن در محدوده قابل قبول باشد، سایر شاخص‌ها بررسی می‌گردد.

مراکز داده‌است، به نحوی که بتوان بهینه‌ترین حالت را معرفی نمود. به عبارتی در این مطالعه، تلاش می‌شود دستورالعمل‌ها و رهنمودهایی برای توزیع جریان هوا تعیین گردد که نهایتاً منجر به بهبود عملکرد محیط‌های حرارتی و راندمان انرژی شود.

### معادلات حاکم بر مسئله

مدل عددی مرکز داده شبیه‌سازی شده، با استفاده از بسته نرم‌افزاری 6SIGMADCX مدل‌سازی شده‌است و معادلات بنیادی در وضعیت پایدار<sup>۱</sup> در یک میدان سه‌بعدی تراکم ناپذیر و توربولانس حل گردیده‌اند. با توجه به اینکه جریان در مرکز داده مغشوش است، برای مدل‌سازی عددی جریان تراکم ناپذیر در سالن مرکز داده، علاوه بر معادلات بقای جرم، مومنتم و انرژی، بایستی یک مدل توربولانس نیز برای ایجاد اثر اغتشاش به کار رود. معادلات سه‌بعدی میدان جریان، برای بقای جرم، بقای مومنتم و بقای انرژی به صورت زیر هستند:

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \hat{u}_i \hat{u}_j) \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[ u_i \rho \left( h + \frac{1}{\gamma} u_j u_j \right) \right] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right] \quad (10)$$

$$k_{eff} = K + \frac{C_p \mu_t}{Pr_t} \quad (11)$$

معادلات مربوط به مدل توربولانس  $k$ - $\varepsilon$  در معادلات ۱۲ و ۱۳ ارائه شده‌اند. در این معادلات  $k$  نشان‌دهنده انرژی جنبشی توربولانس<sup>۲</sup> و  $\varepsilon$  نیز نشان‌دهنده نرخ اتلاف آن می‌باشد. لذا  $k$  و  $\varepsilon$  از معادلات انتقالی زیر محاسبه خواهند شد:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (13)$$

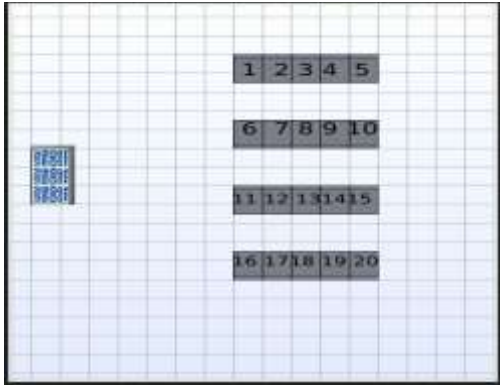
<sup>3</sup> Generation of Turbulence Kinetic Energy Due to the Mean Velocity Gradients

<sup>4</sup> Finite Volume

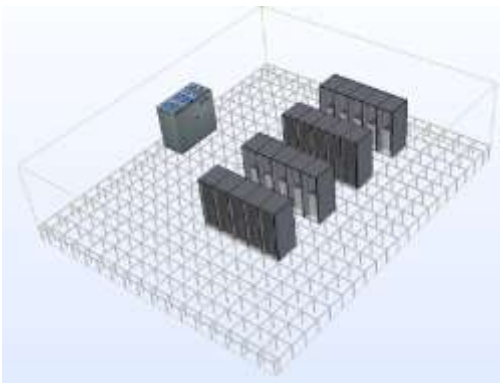
<sup>1</sup> Steady state

<sup>2</sup> Turbulence Kinetic Energy

- حالت پایه + سپر حرارتی در کف کاذب
- حالت پایه + راهروی گرم
- حالت پایه + راهروی سرد
- حالت پایه + راهروی سرد به همراه کانال هوای برگشتی



شکل ۲- نمای سالن دیتای مورد مطالعه



شکل ۳ - فضا و محل قرارگیری تجهیزات

### 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 و می تواند اندازه گیری شود. در هر کاشی مشبک، با استفاده از یک جریان هود و یا جریان خروجی از مدل های پلنوم شبیه سازی عددی، سرعت جریان مشخص است.
۲. محل و مقدار بازگشت جریان به هر واحد سرمایش، از شرایط حالت پایدار پیروی می کند. (به عنوان 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 رک ها، همراه با بار حرارتی در هر یک از آن ها، مشخص است و با توجه به بار حرارتی به دست آمده، پکیج با

جدول ۲- شاخص های ارزیابی حرارتی مرکز داده

شاخص	معادلات
SHI	$SHI = \frac{\delta Q}{Q + \delta Q}$ <p>افزایش آنتالپی ناشی از نفوذ در راهروی سرد تقسیم بر افزایش آنتالپی کل در خروجی رک</p>
RHI	$RHI = \frac{Q}{Q + \delta Q}$ <p>کل گرمای خارج شده به وسیله واحدهای CRAC تقسیم بر افزایش آنتالپی کل در خروجی رک</p>
RCI	$RCI_{HIGH} = \left[ 1 - \frac{\text{Total Over Temperature}}{\text{Max Allowable Over Temperature}} \right] 100\%$
RTI	$RCI_{LOW} = \left[ 1 - \frac{\text{Total Under Temperature}}{\text{Max Allowable Under Temperature}} \right] 100\%$ $RTI = \left[ \frac{T_{return} - T_{supply}}{\Delta T_{equipment}} \right] \times 100\%$

### شبیه سازی مرکز داده نمونه

فضای نمونه مورد بررسی یک سایت مرکز داده در اتاقی با ابعاد ۳،۴۴ × ۱۰ × ۱۲ مترمکعب می باشد که در شکل های (۲) و (۳) نشان داده شده است.

این مرکز شامل ۲۰ رک می باشد که بار حرارتی هر رک ۳ کیلووات است. سیستم توزیع هوای زیرسطحی 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. به عبارت دیگر پکیج سرمایشی در نظر گرفته شده باید در بهترین حالت جانمایی تجهیزات قرار بگیرد که جوابگوی نیاز سرمایشی مرکز داده باشد. در این پروژه، سیستم توزیع هوا از کف کاذب (زیرسطحی) و بازگشت هوا بدون کانال کشی به عنوان مدل پایه در نظر گرفته شده است. به طور کلی شاخص های سرمایشی معرفی شده در حالت های ذیل مورد بررسی قرار می گیرد:

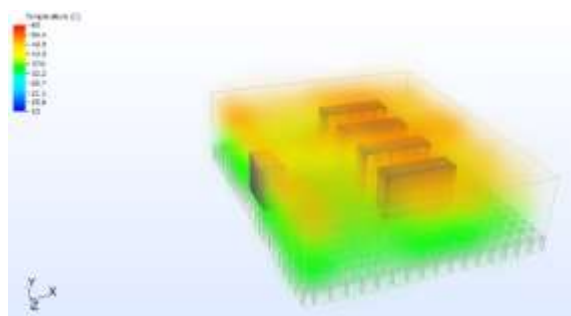
حالت پایه

حالت پایه + کانال هوای برگشتی به پکیج برودتی

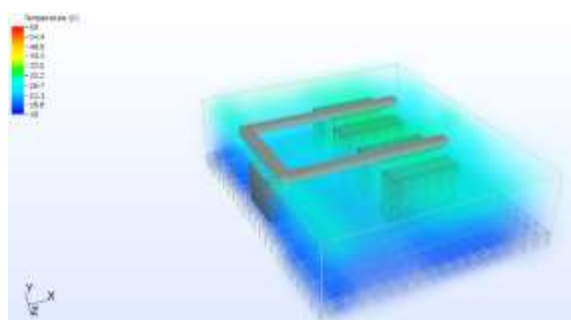
دارای صحت قابل‌قبولی با داده‌های تجربی می‌باشند، زیرا کمتر از ده درصد با داده‌های تجربی اختلاف دارند؛ بنابراین این مدل مناسب برای ادامه کار انتخاب می‌گردد.

### نتایج

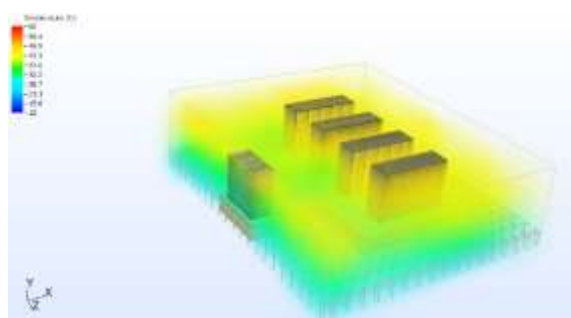
با توجه به بهره‌گیری از مدل‌سازی سه‌بعدی و ارائه کانتورهای سه‌بعدی دما، کف کاذب به صورت کم‌رنگ در تصاویر به‌نمایش درآمده‌است. کانتورهای دمایی در شکل‌های (۶) تا (۱۱) نشان داده شده‌اند. لازم به ذکر است به جهت مقایسه بهتر مقیاس نمایش کانتورهای زیر همگی در بازه دمایی ۱۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد ترسیم شده‌است. همان‌گونه که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، 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 می‌باشد. لذا باید مطمئن بود که هیچ‌گونه افزونگی دما در کل سالن وجود ندارد [۴۳].



شکل ۶ - کانتور توزیع دما در حالت اول



شکل ۷ - کانتور توزیع دما در حالت دوم



شکل ۸ - کانتور توزیع دما در حالت سوم

ظرفیت مناسب انتخاب می‌گردد.

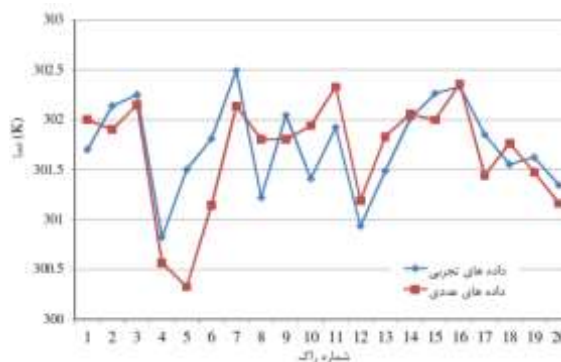
۴. به علت ایزوله بودن سالن مرکز داده، دیوارها آدیاباتیکی فرض شده و از اثرات تشعشع صرف‌نظر گردیده است.

### اعتبارسنجی حل عددی

در تحقیق حاضر برای اطمینان از صحت حل معادلات جریان و حرارت سیال توسط نرم‌افزار SIGMADCX۶، مدل‌سازی یک مرکز داده واقعی که چیدمان تجهیزات مشابه شکل (۳) می‌باشد، توسط نرم‌افزار صورت پذیرفت و سپس توزیع دمایی حاصل از شبیه‌سازی فضای نمونه موردنظر با این نرم‌افزار توسط داده‌های تجربی در یک راستا مورد مقایسه قرار گرفته‌است. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده‌است رک‌ها را شماره‌گذاری کرده و ورودی رک‌ها به‌عنوان نقطه موردنظر انتخاب می‌گردد. حال دمایی ورودی به رک موردنظر را با دماسنج در ارتفاع ۱ متر خوانده و با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در شکل (۵) مقایسه می‌شود.



شکل ۴ - دمای اندازه‌گیری شده با دماسنج در ورودی به یکی از رک‌ها در ارتفاع ۱ متر از کف کاذب



شکل ۵ - مقایسه نتایج تجربی و عددی با همدیگر در کار حاضر همان‌طور که انتظار می‌رفت با توجه به توزیع دما در شکل (۶) نتایج حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار موردنظر



پایه اضافه شده است؛ مشاهده می‌شود که دمای عمومی سایت در حد مطلوب قرار دارد ولی تجهیزات موجود در رک‌ها گرمای بالایی را تجربه می‌کنند. در حالت پنجم هم که حالت پایه به همراه راهرو سرد می‌باشد؛ مشاهده می‌شود که دمای عمومی سایت و تجهیزات در وضعیت نرمال قرار دارند. در نهایت حالت ششم که حالت پایه به همراه راهرو سرد و کانال هوای برگشتی است؛ سایت و تجهیزات منصوبه در رک‌ها در وضعیت ایده‌آل قرار دارند.

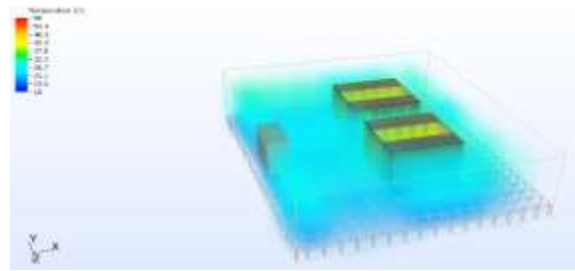
با توجه به کانتور های دمایی حالت‌های دوم، پنجم و ششم دارای کمترین دما هستند که علاوه بر محیط رک‌ها فضای عمومی سایت را نیز خنک می‌کنند. در این حالت‌ها انرژی مصرف شده به جای خنک کاری رک‌ها صرف سرمایه‌گذاری مناطقی می‌شود که نیازی به سرمایه‌گذاری ندارند. به نظر می‌رسد در این حالت‌ها می‌توان تعداد سرورها و بار حرارتی را افزایش داد. در حالت‌های پنجم و ششم که به صورت راهرو سرد هستند؛ مینیمم دما در درون محفظه‌ی بسته در راهرو سرد مشاهده می‌شود که می‌تواند یک حالت بهینه برای سرمایه‌گذاری رک‌ها باشد. با مقایسه حالت‌های اول و دوم می‌توان مشاهده نمود که ایجاد کانال برگشت هوا راهکار خوبی برای سرمایه‌گذاری رک‌ها می‌باشد و ایجاد سپر حرارتی در کف کاذب تا حدودی می‌تواند دما را نسبت به حالت پایه کاهش دهد.

### نتایج تخمین شاخص‌های دمایی

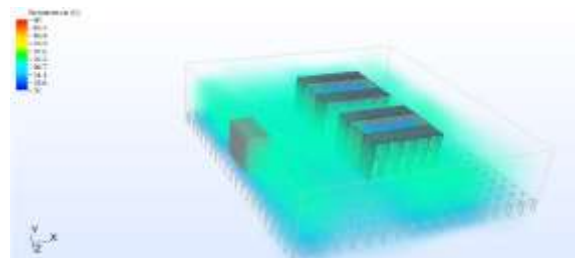
بعد از شبیه‌سازی عددی حالت‌های موردنظر، شاخص‌های دمایی که پارامترهای مهمی در توزیع هوا در مراکز داده می‌باشند، بر اساس محاسبات فوق‌الذکر استخراج می‌گردد که با توجه به مقدار شاخص‌ها می‌توان در مورد وضعیت کلی هر حالت، اظهار نظر نمود. در جدول ۳ نتایج حاصل از تخمین شاخص‌ها نشان داده شده است.

جدول ۳- نتایج حاصل از تخمین شاخص‌ها

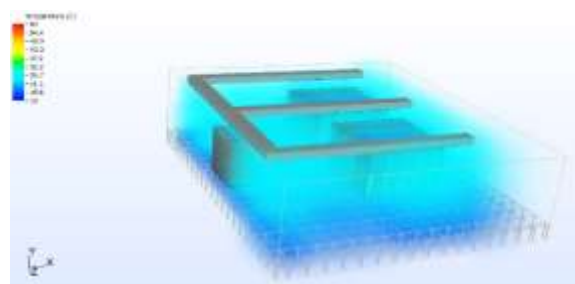
RHI	SHI	RTI	$RCI_{LOW}$	$RCI_{HIGH}$	توضیحات	حالت
۰,۷۸۹۶	۰,۲۰۷۴	٪۸۰,۳۲	٪۱۰۰	-٪۱۳۱,۸	توزیع هوا از کف کاذب، برگشت هوا شناور	۱
۰,۶۶۵۲	۰,۲۲۳۵	٪۶۹,۰۷	٪۵۰,۸۱	٪۱۰۰	کانال برگشتی هوا	۲
۰,۷۴۸۶	۰,۲۴۷۸	٪۸۰,۲۴	٪۱۰۰	-٪۸۶,۸	سپر حرارتی در کف کاذب	۳
۰,۶۵۷۳	۰,۳۴	٪۸۰,۰۳	٪۱۰۰	٪۹۷,۱۴	محفظه بندی راهرو گرم	۴
۰,۹۸۸۷	۰,۰۰۷۵	٪۸۱,۹۴	٪۱۰۰	٪۱۰۰	محفظه بندی راهرو سرد	۵
۰,۸۹۲۷	۰,۰۱۰۳	٪۷۴,۰۷	-٪۲۳	٪۱۰۰	محفظه راهرو بندی سرد با برگشت هوا	۶



شکل ۹ - کانتور توزیع دما در حالت چهارم



شکل ۱۰ - کانتور توزیع دما در حالت پنجم



شکل ۱۱ - کانتور توزیع دما در حالت ششم

مطابق شکل‌های (۶) تا (۱۱) مشاهده می‌شود که در حالت اول که حالت پایه می‌باشد، دمای عمومی تجهیزات بسیار بالاست. در حالت دوم که کانال هوای برگشتی به حالت پایه اضافه شده است؛ دمای عمومی سایت و تجهیزات در حد مطلوب قرار دارد. در حالت سوم که حالت پایه به همراه سپر حرارتی در کف کاذب می‌باشد؛ ملاحظه می‌شود که دمای عمومی سایت و تجهیزات بالاست ولی نسبت به حالت پایه مطلوب‌تر است. در حالت چهارم که راهروی گرم به حالت

### ارزیابی مدل‌های مسئله

برای تحلیل بهتر دمایی مدل‌های مسئله، نمودار مقایسه‌ای میانگین دمای ورودی و خروجی در حالت‌های دوم، چهارم و پنجم بر اساس شماره رک در نمودار شکل ۱۳ قابل مشاهده است. با توجه به جدول شماره ۳ می‌توان مشاهده نمود حالت‌های دوم و پنجم در محدوده دمایی پائینتری قرار گرفته‌اند و شرایط مطلوبتری دارند.

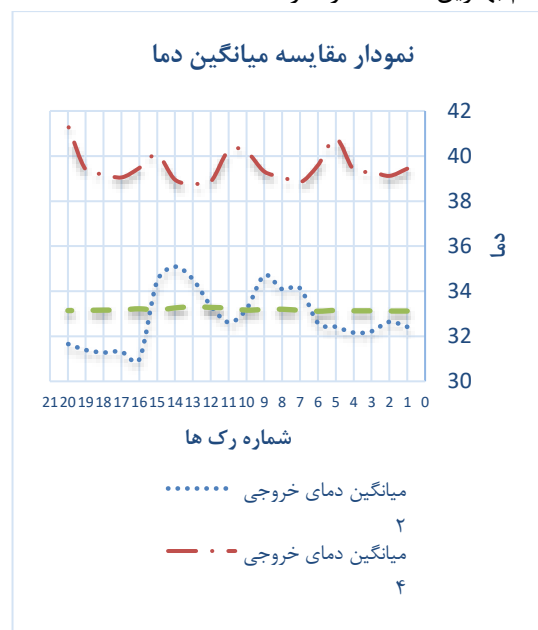
### نتیجه‌گیری

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، پارتیشن‌بندی کف کاذب و کانال‌کشی هوای برگشت.

با محفظه بندی راهروهای سرد و گرم می‌توان دمای هوای ورودی را، از محدوده مجاز بالاتر برد و اتلاف انرژی کمتر و کارایی بهتری را خواهیم داشت. کانال‌کشی هوای بازگشت و پارتیشن‌بندی از کف کاذب به عنوان روش‌های تکمیلی استفاده می‌شوند که کانال‌کشی شرایط بهتری ایجاد می‌کند و با توجه به مجموع مقایسه‌های انجام شده، مناسب‌ترین مدل برای مدل مورد بررسی، حالت ۵ یعنی محفظه بندی راهروی سرد پیشنهاد می‌گردد.

بر اساس شاخص‌های تعریف شده مشاهده می‌شود که در حالت اول و سوم شاخص RCI منفی است و این عدد بیانگر این است که رکها دمای بالایی را تجربه می‌کنند در حالت‌های دوم، پنجم و ششم شاخص سرمایش رک ۱۰۰٪ است که به مقدار ایده‌آل رسیده است ولی در حالت ۴ شاخص سرمایش رک به حد ایده‌آل نرسیده است. در خصوص شاخص RTI در همه حالت‌ها مقدار زیر ۱۰۰٪ است و این میزان بیانگر اینست که جریان بازگشتی وجود ندارد و جریان‌های موجود در مدل‌سازی‌های انجام شده به صورت عبوری است. بنا به تعاریف صورت گرفته هرچه میزان RHI زیاد و SHI کم باشد به حالت ایده‌آل طراحی سیستم سرمایش برای مرکز داده نزدیک شده‌ایم از این رو به ترتیب حالت‌های پنجم، ششم، دوم و چهارم ایده‌آل‌ترین حالت‌ها را از این حیث برخوردارند. در خصوص شاخص دمای برگشتی نیز به ترتیب حالت‌های چهارم، اول، پنجم و ششم بهترین حالت‌ها را دارا هستند.



شکل ۱۳ - نمودار مقایسه میانگین دما

### مراجع

- [1] Kıvanc ILAL, "Advantages of in Row Cooling Systems against Perimeter (CRAC&CRAH) Cooling Systems", APC White Paper, No. 130, 2006.
- [2] K. Dunlap, and N. Rasmussen, "Choosing between Room, Row, and Rack-Based Cooling for Data Centers", Schneider Electric White Paper, No.130, 2019
- [3] P. Lin, and V. Avelar, "How Row-Based Data Center Cooling Works", Schneider Electric White Paper, No. 208, 2019.
- [4] Server Racks Australia (SRA), "Server Rack Heat Dissipation in Next Generation In-Row Architectures", Vol. 1.2, No. 4, 2018, pp. 7-12

- [5] X. Gong, Z. Zhang, S. Gan, B. Niu, Y. Liu, H. Xu, and M. Gao, "A review on evaluation metrics of thermal performance in data centers", *Building and Environment*, Vol. 177, 2020
- [6] C. Jin, X. Bai, Ya'. An, J. Ni, and J. Shen, "Case Study Regarding the Thermal Environment and Energy Efficiency of Raised-Floor and Row-Based Cooling", *building and environment*, Vol. 182, No. 107110, 2020,
- [7] W.-X. Chu, and C.-C. Wang, "A review on airflow management in data centers", *applied energy*, Vol 240, 2019, pp. 84–119.
- [8] B. Watson, and 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, and M. A. Said, "Comprehensive study on the effects of plenum depths on air flow and thermal managements in data centers", *international journal of thermal energy*, Vol. 122, 2017, pp. 302–312.
- [10] S. A. Nada, and M. A. Said, "Effect of CRAC units layout on thermal management of data center", *applied thermal engineering*, Vol. 118, 2017, pp. 339–344.
- [11] S. A. Nada, M. A. Said, and M. A. Rady, "CFD investigations of data centers' thermal performance for different configurations of CRACs units and aisles separation", *alexandria engineering journal*, Vol. 55, 2016, pp. 959–971.
- [12] S. A. Nada, M. A. Said, and M. A. Rady, "Numerical investigation and parametric study for thermal and energy management enhancements in data centers buildings", *Applied thermal engineering*, Vol. 98, 2016, pp. 110–128.
- [13] H. Fernando, J. Siriwardana, and 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] Huang, K. Dong, Q. Sun, L. Su, and T. Liu, "Numerical simulation and comparative analysis of different airflow distributions in data centers", *Procedia Engineering*, Vol. 205, 2017, pp. 2378–2385
- [15] N. M. S. Hassan, M. M. K. Khan, and M. G. Rasul, "Temperature monitoring and CFD analysis of data center", *Procedia Engineering*, Vol.56, 2013, pp. 551–559
- [16] D. Macedo, R. Godina, P. Dinis Gaspar, P. D. da Silva, and M. Trigueiros Covas, "A parametric numerical study of the airflow and thermal performance in a real data center for improving sustainability", *Applied sciences*, Vol. 9, 2019, pp. 3850.
- [17] S. A. Nada, H. M. El-Batsh, H. F. Elattar, and N. M. Ali, "CFD investigation of airflow pattern, temperature distribution and thermal comfort of UFAD system for theater buildings applications", *Journal of building engineering*, Vol. 6, 2016, pp. 274–300.
- [18] S. A. Nada, K. E. Elfeky, A. M. A. Attia, and W. G. Alshaer," Experimental parametric study of servers cooling management in data centers buildings", *Heat Mass Transfer*, Vol. 53, No. 6, 2017, pp.2083–2097.
- [19] S. A. Nada, and K. E. Elfeky, "Experimental investigations of thermal managements solutions in data centers buildings for different arrangements of cold aisles containments", *Journal of building engineering*, Vol. 5, 2016, pp. 41.
- [20] X. Meng, J. Zhou, X. Zhang, Z. Luo, H. Gong, and T. Gan," Optimization of the thermal environment of a small-scale data center in China", *Energy*, Vol. 196, 2020
- [21] S. A. Nada, A. M. A. Attia, and K. E. Elfeky, "Experimental study of solving thermal heterogeneity problem of data center servers", *Applied thermal engineering*, Vol. 109, 2016, pp. 466–474.
- [22] S. A. Nada, K. E. Elfeky, A. M. A. Attia, and W.G. Alshaer, "Thermal management of electronic servers under different power conditions", *International Journal on Emerging Technologies*, Vol .11, No. 4, 2015, pp. 145–150.
- [23] S. Bhopte, B. Sammakia, R. Schmidt, M.K. Iyengar, and D. Agonafer," Effect of under floor blockages on data center performance", *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronics Systems*, 2006, pp. 426–433.
- [24] J. Cho, J. Yang, and W. Park, "Evaluation of air distribution system's airflow performance for cooling energy savings in high-density data centers", *Energy and Buildings*, Vol. 68, 2014, pp. 270–279.
- [25] J. Cho, and J. Woo," Development and experimental study of an independent row-based cooling system for improving thermal performance of a data center", *Applied thermal engineering*, Vol. 169, 2019, No. 114857

- [26] Y. Zhang, K. Zhang, J. Liu, R. Kosonen, and X. Yuan, "Airflow uniformity optimization for modular data center based on the constructal T-shaped underfloor air ducts", *Applied thermal engineering*, Vol. 155, 2019, pp. 489–500.
- [27] C. Jin, X. Bai, Ya'. An, J. Ni, and J. Shen, "Case Study Regarding the Thermal Environment and Energy Efficiency of Raised-Floor and Row-Based Cooling", *Building and Environment*, Vol. 182, 2020.
- [28] H. Moazamigoodarzi, P. J. Tsai, S. Pal, S. Ghosh, and I. K. Puri, "Influence of cooling architecture on data center power consumption", *Energy*, Vol.183, 2019, pp. 525–535.
- [29] H. Moazami goodarzi, R. Gupta, S. Pal, P. J. Tsai, S. Ghosh, and I. K. Puri, "Modeling temperature distribution and power consumption in IT server enclosures with row-based cooling architectures", *Applied Energy*, Vol. 261 , No. 114355, 2020.
- [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", *Applied thermal engineering*, Vol. 164, No. 114444, 2020.
- [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", *Buildings Environment Times*, Vol. 155, 2019, pp. 308–319.
- [۳۳] سجاد اسلامی و 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 ۲۷۹–۲۹۳.
- [۳۴] حسین خراسانی زاده، علیرضا آقایی و 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
- [۳۵] علیرضا میر اولیایی و شمس‌الدین قوره جیلی، "بررسی پارامترهای مؤثر بر هیدرودینامیک بستر پرشده دوآر به کمک دینامیک سیالات محاسباتی"، *مجله مدل‌سازی مهندسی*، سال هفدهم، شماره ۵۹، زمستان ۱۳۹۸، صفحه ۳۵–۴۵.
- [36] C. Jin, X. Bai, and C. Yang, "Effects of airflow on the thermal environment and energy efficiency in raised-floor data centers: a review", *Science of the Total Environment*, Vol. 695, 2019, No.133801.
- [37] R. K. Sharma, C. E. Bash, and C. D. Patel, "Dimensionless parameters for evaluation of thermal design and performance of large scale data centers", *Aiaa/asme joint thermophysics and heat transfer conference*, Vol. 8, 2002.
- [38] M.K. Herrlin, "Rack cooling effectiveness in data centers and telecom central offices: the rack cooling index (RCI)", *ASHRAE Transactions*, Vol. 111, 2005, pp. 725–731.
- [39] 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*, Vol. 114, 2008
- [40] R. R. Schmidt, E. E. Cruz, and M. K. Iyengar, "Challenges of data center thermal management", *Ibm Journal of Research and Development*, Vol. 49, 2005, pp. 709–723
- [41] Q. Xu, "Energy Consumption and Air Distribution Simulation of a Substation Data Room", *Master's Thesis*, Zhejiang University, Hangzhou, China, 2015
- [42] H. Tian, Z. Li, X. Liu, and X. Qian, "Study on thermal environment evaluation in data centers", *Journal of Refrigeration*, Vol. 33, 2012, pp. 5–9.
- [43] J. W. VanGilder, S. K. Shrivastava, "Capture index: an airflow-based rack cooling performance metric, ASHRAE Transactions, Vol. 113, 2007, pp. 126-136
- [۴۴] اشکان جهانگیرامینی، نادر پورمحمود و ایرج میرزایی، "مدل‌سازی سه‌بعدی دینامیک سیالات محاسباتی سیستم سرمایشی پایین‌زن در یک مرکز داده نمونه"، *مجله علمی پژوهشی مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، دوره ۵۰، شماره ۴ – شماره ژیاژی ۹۳، زمستان ۱۳۹۹، صفحه ۶۱–۶۸.
- [45] Energy Logic, "Reducing datacenter energy consumption by creating saving that cascade across systems", 2007
- [46] Q. Pan, J. Peng, and R. Wang, "Application analysis of adsorption refrigeration system for solar and data center waste heat utilization", *Energy Conversion and Management*, Vol. 228, 2021, pp. 113564