

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

محمد خدابنده<sup>۱</sup>

### چکیده

تاریخ دریافت:

۱۴۰۰/۰۴/۱۱

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۱/۰۹/۲۸

کلمات کلیدی:

مراکز داده

اتاق سرور

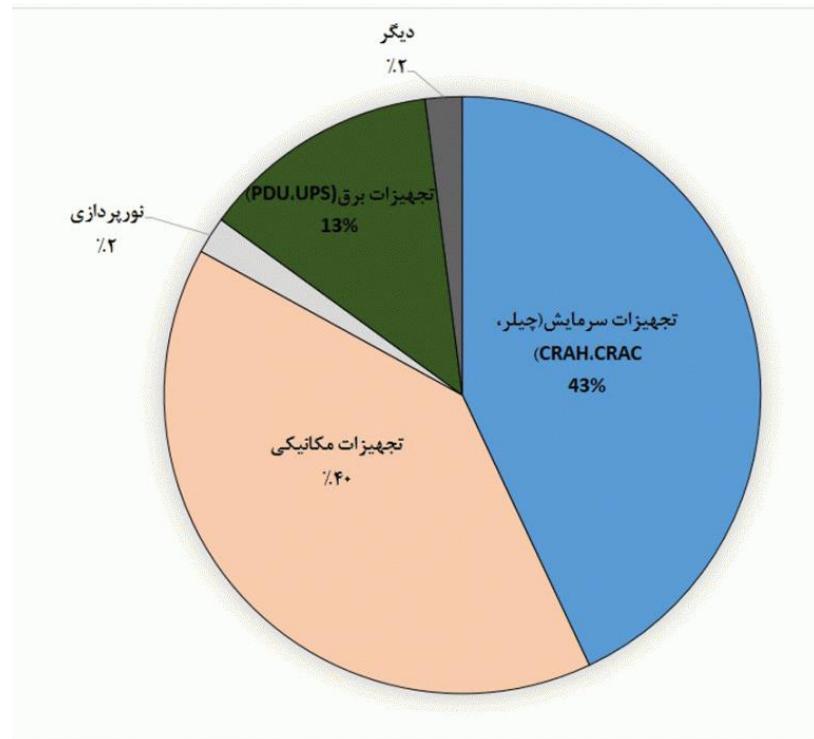
شبیه سازی

بهینه سازی

مراکز 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، دیتاباستر 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 دیتاباستر، 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 مراکز داده برای جلوگیری از تخریب دستگاه‌ها ناشی از گرمای زیاد اهمیت دارد. بیش از نیمی از لرزی مصرفی یک مرکز داده 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 شبیه سازی شده پیاده سازی می‌گردد و در پایان مدل بهینه معرفی می‌گردد.

## ۱- مقدمه

دیتاستر<sup>۲</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، دیتاستر محل استقرار تعداد زیادی از سرورهای کامپیوتری است که در کار 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. پیداهسازی یک دیتاستر، عموماً بر پایه شبکه عظیمی از منابع پردازشی و ذخیره‌سازی صورت می‌پذیرد. از آن جا که انتشار گرما در سرور رک‌ها دائم 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 داده معمول، در زیرساختهای فیزیکی صرف می‌شود.



شکل ۱. نمودار مصرف انرژی در مراکز داده

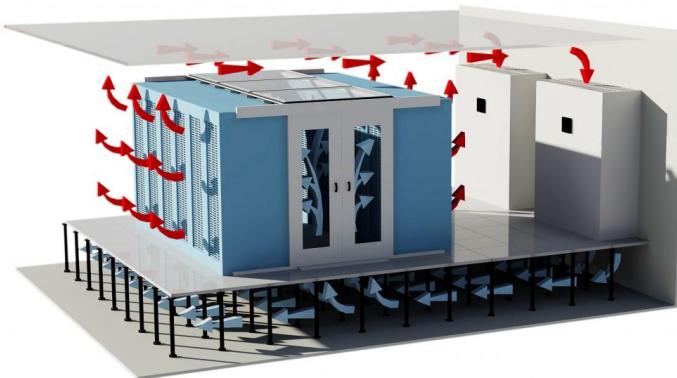
مدل‌سازی عددی و شبیه‌سازی چگونگی گردش هوا در تجهیزات موجود در مراکز داده و تحلیل چگونگی توزیع دمای داخل تجهیزات به جهت تخمین عملکرد گردش هوا در مراکز داده مورد نیاز است. با توجه به مصرف انرژی بالای تجهیزات زیرساختی در مراکز داده پژوهشگران به تحلیل مشکلات مراکز داده می‌پردازنند و نهایتاً آن‌ها را منتشر می‌نمایند [۱]، در بررسی صورت گرفته ما بین سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۵، نگرانی ناشی از سرمایش مراکز داده در اولویت‌های اول پژوهشگران است [۱]. دفع حرارت ناشی از کارکرد تجهیزات در مراکز داده را می‌توان، یکی مصرف کنندگان منابع برق در سراسر جهان دانست. روش‌های سُنتی 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<sup>۴</sup> کف کاذب به محفظه سروورها می‌رسد که این امر منجر به افت فشار زیاد ( $\Delta P$ ) به دلیل انسداد کابل‌ها و تلفات گرما (Q<sub>loss</sub>) برای هوای تأمین شده می‌شود و از دیگر اشکالات و نقاط ضعف این روش گردش هوای گرم و بای‌پس<sup>۵</sup> هوای سرد در روش سُنتی 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>۶</sup> که در آن واحدهای CRAC به روش متناوب توزیع می‌شوند و در میان محفظه سروورها 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 عمل 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 ایالات متحده<sup>۷</sup> در گزارش CANOVATE ۱۰۱ [۱] که سیستم خنک‌کننده ردیفی تازه توسعه یافته را با سیستم خنک‌کننده سُنتی مبتنی بر اتاق (خنک‌کننده محیطی) مقایسه نمود و واحدهای خنک‌کننده ردیفی (IRUs)<sup>۸</sup> 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 هوای در محفظه سروورها نشان داده شده است.



شکل ۲. چگونگی گردش هوای در محفظه رک‌ها

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

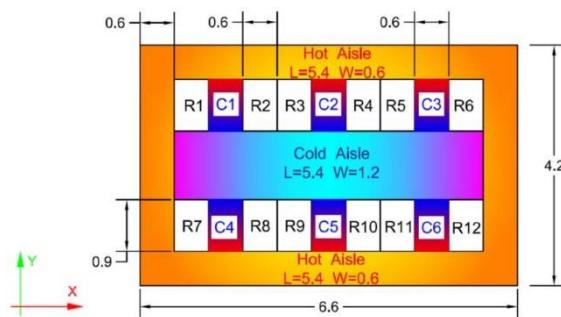
<sup>4</sup> plenum

<sup>5</sup> bypass

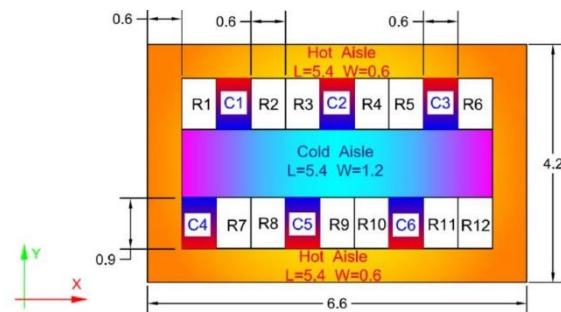
<sup>6</sup> in-row

<sup>7</sup> White paper

<sup>8</sup> In-Row Cooling Units



شکل ۳. پیکربندی‌های هم‌راستا<sup>۹</sup>



شکل ۴. پیکربندی‌های «پلکانی و نامتقابل»<sup>۱۰</sup>

مراکز داده در شرایطی طراحی می‌شوند که فضای عمومی اتاق تجهیزات ۱۱، شرایط مناسبی بر طبق استاندارهای موجود داشته باشد [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 جریان‌ها در مراکز داده نیست و جهت کاهش مصرف انرژی و کاهش هزینه‌های تجهیزات سرمایشی راه حل‌های ذیل پیشنهاد می‌شود:

افزایش دمای آب سرد شده

کاهش قدرت فن

بهبود عملکرد سیستم‌ها

مدیریت گردش هوای

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. به تدریج 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

9 Aligned

10 staggered

11 Server Room

تجدید پذیر مانند انرژی‌های خورشیدی، پیل‌های سوختی، استفاده از حالت‌های اکونومایزر<sup>۱۳</sup> و روش خنک‌کننده رایگان<sup>۱۴</sup> مدنظر قرار گرفت.

توزيع مناسب هوای سرد برای عملکرد مناسب سروورها ضروری است. دو عاملی که باعث کاهش راندمان سیستم سرمایشی می‌شوند جریان بازگشتی<sup>۱۵</sup> و جریان عبوری<sup>۱۶</sup> 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<sup>۱۷</sup> و همکاران [۹] دو پارامتر بی بعد شاخص گرمای تولیدی (SHI) و شاخص گرمای برگشتی (RHI) را برای ارزیابی عملکرد دمایی مراکز داده معرفی نمودند. از آنجاییکه راهروندی یکی از روش‌های بهبود توزیع هوا در مراکز داده می‌باشد در این مقاله ابتدا یک مرکز داده راکه توزیع هوا و رودی در آن از طریق کف کاذب تامین می‌شود مطالعه و بررسی قرار میدهیم و سپس با مدل راهروندی شده مورد مقایسه قرار میگیرد و با مدلسازی CFD به محاسبه کانتورهای دما در سه ارتفاع میپردازیم و در ادامه ابتدا مراکزیم 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 دونلاب و راسموسن [۲] انجام گردید، بین سه مدل سیستم خنک‌کننده در مرکز داده مقایسه انجام داده است: سیستم خنک‌کننده سطح اتاق<sup>۱۹</sup>، سیستم خنک‌کننده ردیفی<sup>۲۰</sup> و سیستم خنک‌کننده مستقل برای محفظه سرور<sup>۲۱</sup>. آن‌ها دریافتند که فرآیند خنکسازی در مدل ردیفی، منعطف ترین 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 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 آولار [۳] ایده خنکسازی ردیفی و علت مناسب بودن آن برای معادل کردن ظرفیت خنک سازی با بارهای حرارتی را ارائه کردند. استفاده از چیدمان ردیفی برای خنک سازی مراکز داده، به عنوان فناوری نسل بعد است که توسط رکهای سرور استرالیا (SRA) 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.

گُنگ و همکاران [۵] تحقیقات مربوط به خنک سازی 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.

جین 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 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 کمبودهای 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 خنک‌سازی اتاق، دارای مشکلاتی از قبیل: "گردش مجدد هوای داغ<sup>۲۳</sup> 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)<sup>۲۴</sup> برای خنک کردن عمومی مرکز داده انجام دادند. نادا و سعید [۹ و ۱۰] بر روی تأثیر اعمق 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. ماکو و همکاران [۱۶] در مطالعه موردی خود که برای بهبود پایداری<sup>۲۵</sup> 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<sup>۲۶</sup> برای کاشی‌های سوراخدار کف کاذب به منظور به دست آوردن توزیع دمای بهینه در نسبت سوراخکاری<sup>۲۷</sup> در صد 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 مقیاس شده به ترتیب برای بررسی تأثیر افروزن پارسیشن راهرو<sup>۲۸</sup> و سیستمهای مهار<sup>۲۹</sup> 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<sup>۳۰</sup> 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 اتفاقهای سرور را تحت شرایط نیروی مختلف انجام دادند. بیهوده و همکاران [۲۳] به بررسی تأثیر "اسدادهای زیر کف"<sup>۳۰</sup> مورد استفاده در معماری‌های خنک‌کننده سُنتی 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 محاری 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 رلنمان انرژی بین سیستمهای کف کاذب و مبتنی بر ردیف که برای خنک‌سازی مراکز داده مورد استفاده قرار می‌گیرند پرداختند. معظمی گودرزی و همکاران [۲۸] با مقایسه میزان دبی جریان هوا موردنیاز هر معماری در دمای ثابت هوا تأمین شده و دمای موردنیاز هوا تأمین شده در دبی‌های مختلف جریان هوا، تأثیر معماری خنک‌کننده را بر مرکز داده مورد مطالعه قرار دادند. معظمی گودرزی و همکاران [۲۹] برای مدل‌سازی توزیع دما در IT با معماری خنک‌کننده مبتنی بر ردیف از "اصل یادگیری ماشین"<sup>۳۱</sup> استفاده کردند. یوان و همکاران [۳۰] اعتبار طراحی برای جانمایی سرور کج<sup>۳۲</sup> 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"<sup>۳۳</sup> سرورها را بر مدیریت جریان هوا با توجه به گسترش مدل‌سازی‌های عددی [۳۲-۳۴] به منظور کاهش زمان و هزینه‌های طراحی بررسی کردند.

## 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 تأمین شده 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<sup>۳۴</sup>، 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<sup>۳۵</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 هوا گرم اطراف، قبل از ورود به سرور IT بصورت کمی بیان کرد. هرلین [۳۷] و [۳۸] شاخص خنک‌کننده رک (RCI)<sup>۳۶</sup> و شاخص دمای بازگشت (RTI)<sup>۳۷</sup> 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 با 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>۳۸</sup> هواست، در حالی که اگر مقدار  $\beta$  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<sup>۳۹</sup> است. ژو [۴۰] "ضریب استفاده از انرژی"<sup>۴۰</sup> (ηr) 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 (ηr) بیشتر باشد، مدیریت حرارتی مراکز داده بهتر خواهد بود. تیان و همکاران [۴۱]<sup>۴۱</sup> شاخص اختلاط (IOM)<sup>۴۲</sup> 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. ون گیلدر و شریوستاوا [۴۲]<sup>۴۲</sup> برای گرفتن کارایی و عملکرد خنک‌سازی فقط بر اساس جریان هوا همراه با تأمین هوای خنک‌کننده به یک رک یا حذف هوای گرم از بک رک، شاخص گرفتن (CI)<sup>۴۳</sup> و شاخص گردش مجدد (RI)<sup>۴۴</sup> را پیشنهاد دادند. تعریف و توضیح معیارهای مختلف محیط حرارتی مورد استفاده برای ارزیابی عملکرد حرارتی مراکز داده در روابط زیر نشان داده 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)

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

<sup>39</sup> self-heating

<sup>40</sup> Energy Utilization Coefficient

<sup>41</sup> Index of Mixing

<sup>42</sup> Capture Index

<sup>43</sup> Recirculation Index

با بررسی تحقیقات فوق می‌توان نتیجه گرفت سیستم خنک‌کننده ردیفی، در مقایسه با سایر سیستم‌های سُنتی خنک‌کننده مرکز داده عملکرد بهتری دارد. با این وجود، تحقیقات در مورد ارتقای عملکرد حرارتی و بهینه سازی 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 میدهیم و سپس با مدل راهروندی شده مورد مقایسه قرار می‌گیرد و با مدلسازی CFD به محاسبه کاتورهای دما در سه ارتفاع میپردازیم و شاخصهای 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<sup>۴۴</sup> در یک میدان سه بعدی تراکم ناپذیر و توربولانس حل می‌شود. با توجه به اینکه جریان در مرکز داده مغلوظ 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:

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

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

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

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

معادلات مربوط به مدل توربولانس  $k$ - $\epsilon$  در معادلات ۱۵ و ۱۶ ارائه شده‌اند. در این معادلات  $k$  نشان دهنده انرژی جنبشی توربولانس<sup>۴۵</sup> و  $\epsilon$  نیز نشان دهنده نرخ اتلاف آن می‌باشد. لذا  $k$  و  $\epsilon$  از معادلات انتقالی زیر محاسبه خواهند شد:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] \\ &+ G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}] + \\ &C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (16)$$

<sup>44</sup> Steady state

<sup>45</sup> Turbulence Kinetic Energy

که در این معادلات  $G_k$  نشان دهنده تولید انرژی جنبشی توربولنس به علت گرادیان سرعت میانگین<sup>۴۶</sup>،  $G_b$  نشان دهنده تولید انرژی جنبشی توربولنس در اثر نیروی شناوری و  $Y_M$  نشان دهنده سهم نوسانات سرعت در جریان آشفته تراکم پذیر می‌باشد. همچنین  $C_{1\epsilon}$  و  $C_{3\epsilon}$  ضرایب ثابتی هستند که با توجه به راهنمای برنامه فلوئنت به صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$C_{1\epsilon} = 1/44$$

$$C_{2\epsilon} = 1/92$$

همچنین  $k\sigma$  و  $\epsilon\sigma$  نمایانگر عدد پرانتل توربولنس به ترتیب برای  $k$  و  $\epsilon$  می‌باشند که مطابق زیر در نظر گرفته شده‌اند:

$$\sigma_k = 1$$

$$\sigma_\epsilon = 1/3$$

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

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

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

$$C_\mu = +0.9$$

قابل ذکر است که در این شبیه سازی، برای حل معادلات حاکم از روش حجم محدود<sup>۴۷</sup> استفاده گردید که برای دقت بالای محاسبات، گسسته سازی ترمehای 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 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 پژوهش مورد استفاده قرار گرفته لند در روابط ۲۲-۱۸ آورده شده است. شاخص‌های عمومی برای عملکرد بهتر توزیع هوا در مراکز داده عبارت لند از: RCI، SHI، RHI، RTI. مهم ترین شاخص که ابتدا بررسی می‌شود و بیانگر سرمایش رک هاست RCI است و اگر مقدار آن در محدوده قابل قبول باشد، سایر شاخص‌ها بررسی می‌گردد.

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

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

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

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

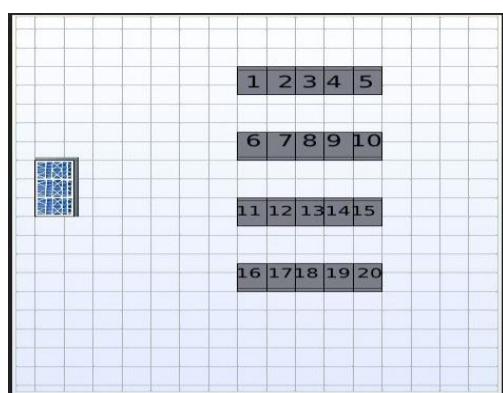
$$RCI_{HIGH} = \left[ 1 - \frac{\text{Total Over Temperature}}{\text{Max Allowable Over Temperature}} \right] 100\% \quad (20)$$

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

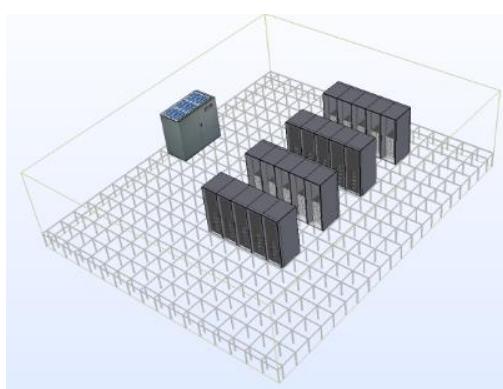
$$RTI = \left[ \frac{T_{return} - T_{supply}}{\Delta T_{equipment}} \right] \times 100\% \quad (22)$$

#### 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 شکل های 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 هوا 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. 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 پژوهش سیستم توزیع هوا از کف کاذب (زیر سطحی) و بازگشت هوا بدون کanal کشی 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 کanal هوای برگشتی

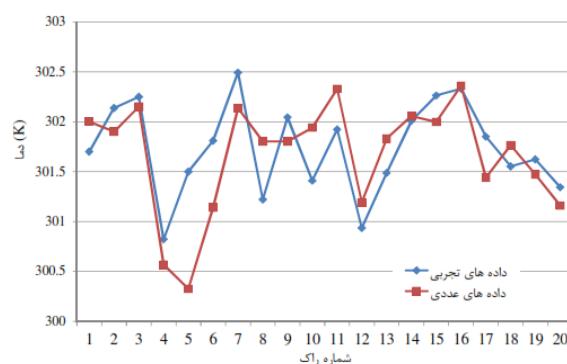
## ۵- شرایط مرزی

با توجه به معناری 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. (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 رک‌ها، همراه با بار حرارتی در هر یک از آن‌ها، مشخص است و با توجه به بار حرارتی به دست‌آمده، پکیج با ظرفیت مناسب انتخاب می‌گردد.
۴. به علت ایزوله بودن سالن مرکز داده، دیوارها آدیاباتیک فرض شده و از اثرات تشبع صرف نظر 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. همان‌طور 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 دماسنجه در ارتفاع ۱ متر خوانده و با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در شکل ۷ مقایسه می‌شود.

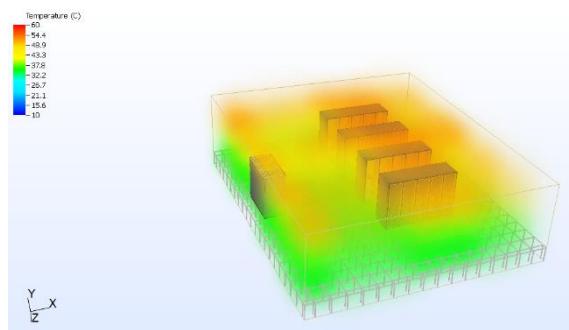


شکل ۷. مقایسه نتایج تجربی و عددی با همیگر در کار حاضر

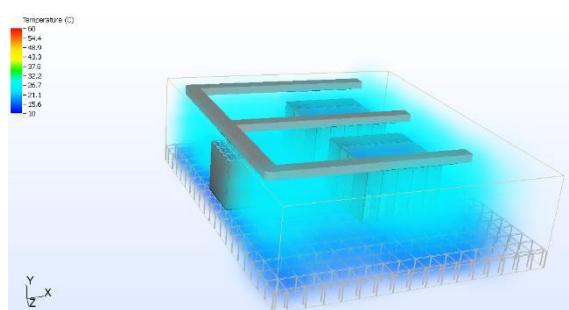
همان طور که انتظار می رفت با توجه به توزیع دما در شکل ۷ نتایج حاصل از شبیه سازی با استفاده از نرم افزار موردنظر دارای صحت قابل قبولی با داده های تجربی می باشدند زیرا کمتر از ده درصد با داده های تجربی اختلاف دارند؛ بنابراین این مدل مناسب برای ادامه کار انتخاب می گردد.

## ۷- نتایج

در همه مدل ها یک صفحه برش در کف کاذب، ارتفاع یک متری از کف کاذب و ارتفاع  $1/8$  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  $10$  تا  $40$  درجه سانتی گراد 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].



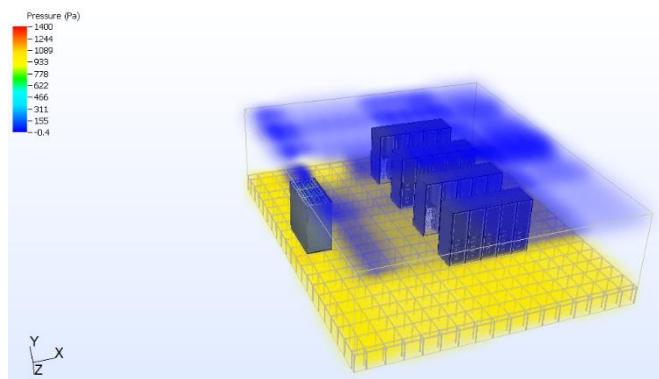
شکل ۸. کانتور توزیع دما در حالت اول



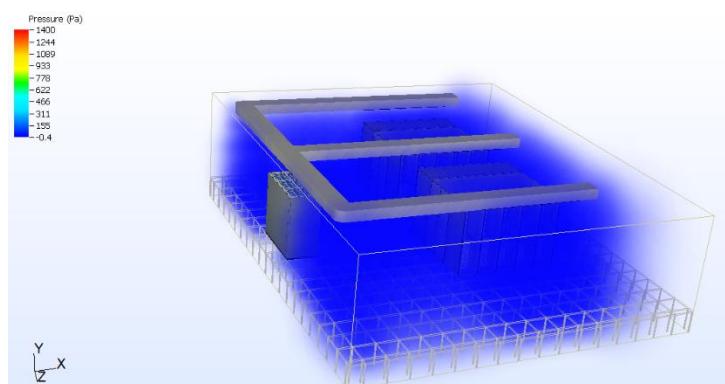
شکل ۹. کانتور توزیع دما در حالت دوم

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 کanal 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 می کنند 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 می شود که نیازی به سرمایش ندارند. در حالت دوم به نظر می رسد 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 ای بسته در راهرو سرد مشاهده می شود که می تواند یک حالت بهینه برای سرمایش رک ها باشد. با

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

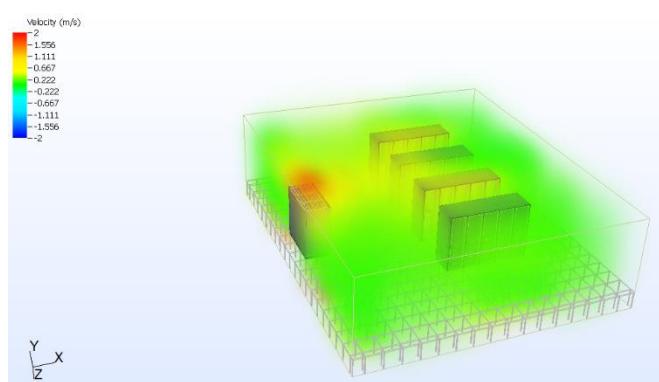


شکل ۱۰ . کانتور توزیع فشار استاتیک در حالت اول

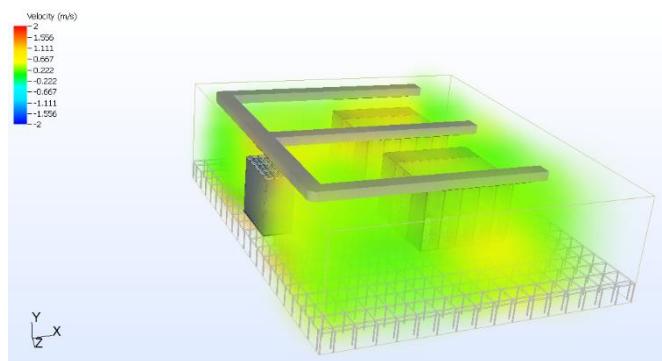


شکل ۱۱ . کانتور توزیع فشار استاتیک در حالت دوم

همانطورکه مشاهده می‌شود، فشار استاتیکی تولید شده توسط فن‌های دستگاه برودت در خروجی این دستگاه 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

همانطورکه مشاهده می شود، دبی جریان در عبور از کف کاذب با پیشرفت در طول آن کاهش یافته و متاخر 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 Hallenhای 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.

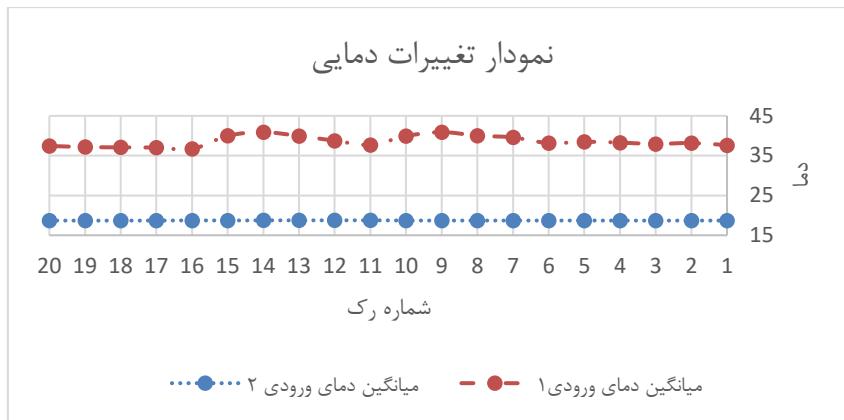
جدول ۱ . نتایج حاصل از تخمین شاخص ها

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

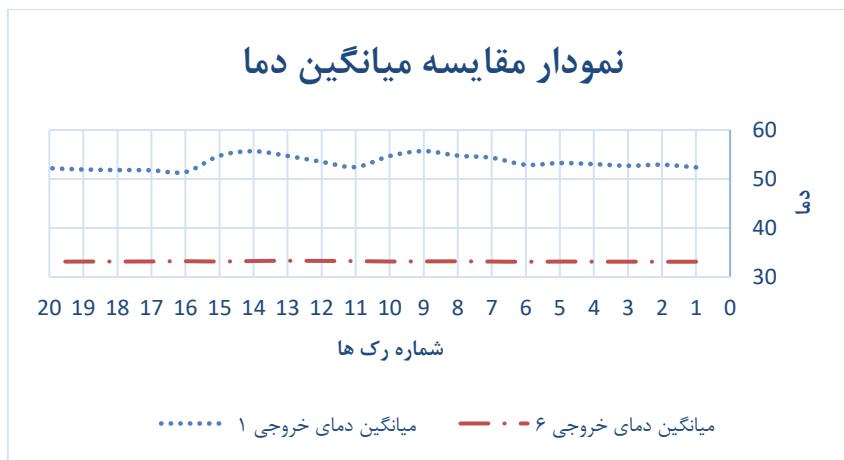
بر اساس شاخصهای تعریف شده مشاهده می شود که در حالت اول شاخص RCI منفی است و این عدد بیانگر این است که رکها دمای بالایی را تجربه میکنند در حالت دوم شاخص سرمایش رک ۱۰۰٪ است که به مقدار ایده آل رسیده است. در خصوص شاخص RTI در همه حالت ها مقدار زیر ۱۰۰٪ است و این میزان بیانگر اینست که جریان بازگشتی وجود ندارد 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 دمای ورودی و خروجی در حالت های اول و دوم بر اساس شماره رکها در شکل های 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 کارآیی سیستم سرمایش، توجه به پیکربندی اتاق سرور در طراحی اولیه ضروری است. قرار گرفتن سایر شاخص‌ها در محدوده‌های قبل 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 شده، عبارت بودند از: محفظه بندی راهروی سرد و کanal کشی هوای برگشت با محفظه بندی راهروهای سرد و گرم می‌توان دمای هوای ورودی را از محدوده مجاز بالاتر برد و اتلاف انرژی کمتر و کارآیی بهتری را خواهیم داشت. کanal کشی هوای بازگشت و پارتبیشن بندی از کف کاذب به عنوان روش‌های تکمیلی استفاده می‌شوند که کanal 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, Peiying 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, Peiying 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 توربولنس 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 آقایی، حمیدرضا احترام "اثر مدل توربولنس بر شبیه‌سازی عددی جریان آشفته نانوسیال در یک لوله افقی"، مجله مدلسازی مهندسی، سال چهاردهم، شماره ۴۷، زمستان ۱۳۹۵، صفحه ۲۰۱
- [۳۴] علیرضا میر اولایی، شمس الدین قوره جیلی "بررسی پارامترهای مؤثر بر هیدرودینامیک بستر پرشده دوار به کمک دینامیک سیالت 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 پورمحمدی، 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 ۹۳ زیارتی ۱۳۹۹، صفحه ۶۱-۶۸