نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۶، شماره۱، بهار ۱۴۰۲، صفحه ۱-۱۸

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

محمد خدابنده[۱]

تاریخ دریافت:
۱۴۰۰/۰۴ / ۱۱
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۱ /۰۹/ ۲۸

کلمات کلیدی:
مرکز داده
اتاق سرور
شبیه سازی
بهینه سازی

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، عموما بر پایه شبکه عظیمی از منابع پردازشی و ذخیره‌سازی صورت می‌پذیرد. از آن جا که انتشار گرما در سرور رک ها دائما 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 شبیه سازی شده پیاده سازی می‌گردد و در پایان مدل بهینه معرفی می‌گردد.

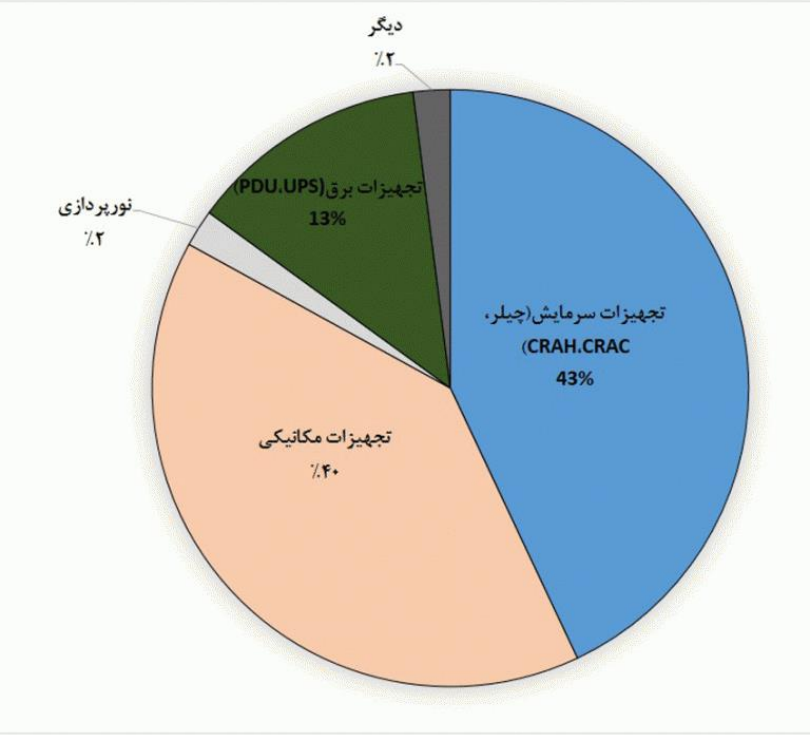
۱. دکتری مهندسی مکانیک تبدیل انرژی
m.khodabandeh@urmia.ac.ir

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۶، شماره۱، بهار ۱۴۰۲، صفحه ۱-۱۸

۱- مقدمه

دیتاسنتر[2]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 [3]و دیزل ژنراتور مجهز شده‌اند. پیاده‌سازی یک دیتاسنتر، عموما بر پایه شبکه عظیمی از منابع پردازشی و ذخیره‌سازی صورت می‌پذیرد. از آن جا که انتشار گرما در سرور رک ها دائما 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

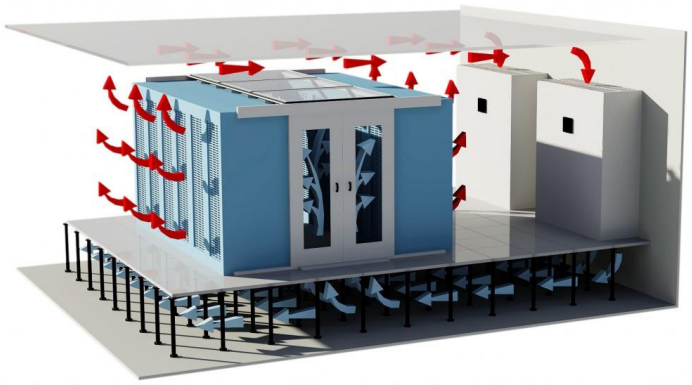
مدل‌سازی عددی و شبیه سازی چگونگی گردش هوا در تجهیزات موجود در مراکز داده و تحلیل چگونگی توزیع دمای داخل تجهیزات به جهت تخمین عملکرد گردش هوا در مراکز داده مورد نیاز است. با توجه به مصرف انرژی بالای تجهیزات زیرساختی در مراکز داده پژوهشگران به تحلیل مشکلات مراکز داده می‌پردازند و نهایتا آن‌ها را منتشر 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 مصرف‌کنندگان منابع برق در سراسر جهان دانست. روش‌های سُنّتی 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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

طولانی در پلنوم۴ 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 تأمین‌شده میشود و از دیگر اِشکالات و نقاط ضعف این روش گردش هوای گرم و بای‌پس۵ هوای سرد در روش سُنّتی 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 ردیفی۶ 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[۷] CANOVATE ۱۰۱[۱] که سیستم خنک‌کننده ردیفی تازه توسعه یافته را با سیستم خنک‌کننده سُنّتی 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.

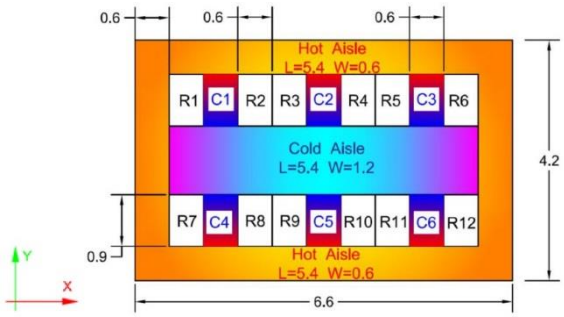


شکل ۲. چگونگی گردش هوا در محفظه رک ها

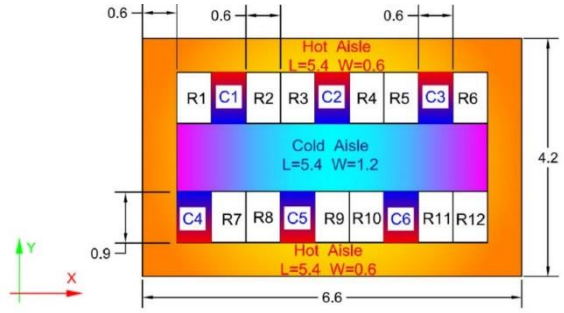
در شکل‌های ۳ و ۴ چیدمان متفاوت IRUها، (یعنی هم‌راستا و پلکانی و نامتقابل) نشان داده شده است.

4 plenum
5 bypass
6 in-row
7 White paper
8 In-Row Cooling Units

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]



شکل ۳. پیکربندی‌های هم‌راستا[9]



شکل ۴. پیکربندی‌های "پلکانی و نامتقابل"[10]

مراکز داده در شرایطی طراحی می‌شوند که فضای عمومی اتاق تجهیزات[11]، 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 انرژِی 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

9 Aligned
10 staggered
11 Server Room

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

تجدید پذیر مانند انرژی‌های خورشـــیدی، پیل‌های ســـوختی، اســـتفاده 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. شـارما۱۶ و همکاران [۹] دو پارامتر بی‌بعد شـاخص گرمای تولیدی[۱۷] (SHI) و شـاخص گرمای برگشـــتی[۱۸] (RHI) را برای ارزیابی عملکرد دمایی مراکز داده معرفی نمودند. از آنجاییکه راهروبندی یکی از روشـــهای بهبود توزیع هوا در مراکز داده می باشـــد در این مقاله ابتدا یک مرکز داده راکه توزیع هوای ورودی در آن از طریق کف کاذب تامین میشـــود مورد مطالعه و بررسی قرار میدهیم و سپس با مدل راهروبندی شده مورد مقایسه قرار میگیرد و با مدلسازی CFD به محاسبه کانتورهای دما در سه ارتفاع میپردازیمته و در ادامه ابتدا ماکزیم و مینیم دما که برای ما اهمیت دارند را بررسی و سپس نتایج فوق و با حالت اولیه مقایسه می نماییم. در پایان با کمک شاخصهای دمایی به انتخاب بهترین حالت از بین موارد پیشنهادی می پردازیم.

مبانی نظری

گزارش الکترونیکی ۱۳۰ اشنایدر الکترونیک که توسط دونلاپ و راسموسِن [۲] انجام گردید، بین سه مدل سیستم خنک‌کننده در مرکز داده مقایسه انجام داده است: سیستم خنک‌کننده سطح اتاق[۱۹]، سیستم خنک کننده ردیفی [۲۰]و سیستم خنک کننده مستقل برای محفظه سـرور[۲۱]. آن‌ها دریافتند که فرآیند خنک‌سازی در مدل ردیفی، منعطف ترین حالت اسـت، آن‌ها گزارش دادند که خنک‌سازی مبتنی بر اتاق برای خنک کردن کل اتاق است و سیستمهای خنک‌کننده ردیفی واحدهای CRAC با خنک‌سازی ردیفهای رک ها 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 آوِلار [۳] ایده خنکسـازی ردیفی و علت مناسـب بودن آن برای متعادل کردن ظرفیت خنک سـازی 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)[۲۲] مورد توجه قرار گرفته اسـت [۴]، آن‌ها اظهار داشـتند که اسـتفاده از سـیسـتمهای خنک کننده ردیفی، می‌تواند در مدت زمان سـاخت 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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

(۴) کارایی انرژی.

جین و همکاران [۶] در مورد پیشـــرفت اخیر در ارزیابی مدیریت حرارتی برای مراکز داده یک مطالعه مروری ارائه کردلند، 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 مسـیرهای طولانی مانند خنک سـازی اتاق، دارای مشـکلاتی از قبیل : "گردش مجدد هوای داغ[۲۳]و بای پس هوای سرد می‌باشند. در حالی که روش مسیرهای کوتاه جریان هوا به کاهش تلفات کمک می‌کند.

واتسون و ونکیتِسواران [۸] یک آنالیز دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)[۲۴] برای خنک کردن عمومی مرکز داده انجام دادند. نادا و سـعید [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، مقایسـه‌ای بین قرارگیری واحدهای CRAC در راسـتای ردیف رک ها و قرارگیری آن‌ها عمود بر ردیف رک‌ها انجام گردید. نادا و همکاران [۱۱ و ۱۲] تأثیر اسـتفاده از پیکربندی‌های مختلف CRAC و تأثیر تغییر فضـای بین CRACها و محفظه سـرور ها را مورد مطالعه قرار دادند. فرناندو و همکاران [۱۳] نشـان دادند جریان گرمای مرکز داده چگونه می‌تواند بصـورت مقیاس پایین شـبیه سـازی شـود. هوانگ و همکاران [۱۴] شـبیه‌سـازی عددی و تحلیل مقایسـه‌ای توزیعهای مختلف جریان هوا را در مراکز داده انجام دادند. حسـن و همکاران [۱۵] برای پایش توزیع دما در مرکز داده، تحلیل CFD انجام دادند. ماکِدو و همکاران [۱۶] در مطالعه موردی خود که برای بهبود پایداری[۲۵] در مرکز داده واقعی انجام شـده بود، جریان هوا و عملکرد حرارتی را بطور عددی مورد مطالعه قرار دادند. نادا و همکاران [۱۷] با اسـتفاده از زوایای مختلف تأمین هوای سـرد از کاشـی‌های 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[۲۶] 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 اِلفکی [۱۹] یک تحقیق تجربی از مراکز داده با تراکم نیروی بالا را با اسـتفاده از یک مدل فیزیکی مقیاس‌شـده به ترتیب برای بررسـی تأثیر افزودن پارتیشـن راهرو[۲۷] و سـیسـتمهای مهار[۲۸] راهرو انجام دادند. مِنگ 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 مشـکل ناهمگنی[۲۹] حرارتی معماری خنک‌کننده اتاق را

23 hot air recirculation
24 Computational Fluid Dynamics
25 Sustainability
26 perforation
27 aisle
28 containment
29 Heterogeneity

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

حل میکند. در این مطالعات، آن‌ها تحقیقات تجربی را در مورد مدیریت حرارت در اتاقهای سرور را تحت شرایط نیروی مختلف انجام دادند. بیهُپت و همکاران [۲۳] به بررسی تأثیر "انسدادهای زیر کف[۳۰] مورد استفاده در معماری‌های خنک‌کننده سُنّتی 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 کُره، 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 Tشکل 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 رلندمان انرژی بین سیستمهای کف کاذب و مبتنی بر ردیف که برای خنک‌سازی مراکز داده مورد استفاده قرار می‌گیرند پرداختند. معظّمیِ‌گودرزی و همکاران [۲۸] با مقایسه میزان دبی جریان هوای موردنیاز هر معماری در دمای ثابت هوای تأمین‌شده و دمای موردنیاز هوای تأمین‌شده در دبی‌های مختلف جریان هوا، تأثیر معماری خنک‌کننده را بر مرکز داده مورد مطالعه قرار دادند. معظّمیِ‌گودرزی و همکاران [۲۹] برای مدلسازی توزیع دما در IT با معماری خنک‌کننده مبتنی بر ردیف از "اصل یادگیری ماشین[۳۱] استفاده کردند. یوان و همکاران [۳۰] اعتبار طراحی برای جانمایی سرور کج[۳۲] 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 پایین‌تر[۳۳] سرورها را بر مدیریت جریان هوا با توجه به گسترش مدلسازیهای عددی [۳۴-۳۲] 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 ایده‌آلِ 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 کمّی بیان کرد. هِرلین [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 βصفر 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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

گرم شدن[۳۹] است. ژو [۴۰] "ضریب استفاده از انرژی[۴۰] (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] 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.

$$SHI = \frac{\delta Q}{Q + \delta Q} \quad (۱)$$

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

$$RHI = \frac{Q}{Q + \delta Q} \quad (۲)$$

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

$$RCI_{HI} = \left[1 - \frac{Total\ Over\ Temperature}{Max\ Allowable\ Over\ Temperature}\right] 100\% \quad (۳)$$

$$RCI_{lo} = \left[1 - \frac{Total\ Under\ Temperature}{Max\ Allowable\ Under\ Temperature}\right] 100\% \quad (۴)$$

$$RTI = \left[\frac{T_{return} - T_{supply}}{\Delta T_{equipment}}\right] \times 100\% \quad (۵)$$

$$\beta = \frac{T_{in} - T_{ref}}{T_{out} - T_{in}} \quad (۶)$$

$$\eta_r = \frac{T_{out} - T_{ref}}{\frac{T_{out} + T_{in}}{2} - T_{ref}} \quad (۷)$$

$$IOM = \frac{T_{i,max} - T_{i,min}}{T_o - T_i} \quad (۸)$$

$$CI = \frac{mass\ of\ species}{total\ mass\ of\ fluid} \quad (۹)$$

(جرم نمونه‌ها تقسیم بر جرم کل سیال)

$$RI = 1 - CI \quad (۱۰)$$

[39] self-heating
[40] Energy Utilization Coefficient
[41] Index of Mixing
[42] Capture Index
[43] Recirculation Index

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

با بررسی تحقیقات فوق می‌توان نتیجه گرفت سیستم خنک‌کننده ردیفی، در مقایسه با سایر سیستم‌های سُنّتی 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 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:

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \qquad (۱۱)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right]\right] + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(-\rho\overline{\hat{u}_i\hat{u}_j}\right) \qquad (۱۲)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left[u_i\rho\left(h + \frac{1}{2}u_j u_j\right)\right] = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[k_{eff}\frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i(\tau_{ij})_{eff}\right] \qquad (۱۳)$$

$$k_{eff} = K + \frac{c_p\mu_t}{Pr_t} \qquad (۱۴)$$

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:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k})\frac{\partial k}{\partial x_j}] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M \qquad (۱۵)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon})\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \qquad (۱۶)$$

[44] Steady state
[45] Turbulence Kinetic Energy

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

که در این معادلات Gk نشـان دهنده تولید انرژی جنبشـی توربولانس به علت گرادیان سـرعت میانگین[۴۶]، Gb نشـان دهنده تولید انرژی جنبشی توربولانس در اثر نیروی شناوری و YM نشان دهنده سهم نوسانات سرعت در جریان آشفته تراکم پذیر می‌باشد. همچنین C1ε، C2ε و C3ε ضرایب ثابتی هستند که با توجه به راهنمای برنامه فلوئنت به‌صورت زیر تعیین می‌شوند:

C1ε = ۱/۴۴

C2ε = ۱/۹۲

همچنین kσ و εσ نمایانگر عدد پرانتل توربولانس به‌ترتیب برای k و ε می‌باشند که مطابق زیر در نظر گرفته شده‌اند:

σk = ۱

σε = ۱/۳

ویسکوزیته توربولانس μt نیز با توجه به مقادیر k و ε به‌ترتیب زیر محاسبه می‌گردد:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \qquad (۱۷)$$

Cμ ثابتی است که به‌صورت زیر تعیین می‌گردد:

Cμ = ۰/۰۹

قابل ذکر اسـت که در این شـبیه سـازی، برای حل معادلات حاکم از روش حجم محدود[۴۷] اسـتفاده گردید که برای دقت بالای محاسـبات، گسـسـته سـازی ترمهای جابجایی و پخش با اسـتفاده از روش مرتبه دوم انجام گرفته و چون سـیال عامل تراکم ناپذیر در نظر گرفته شـده اسـت، برای وابسـته کردن میدان سـرعت و فشـار، از الگوریتم معروف SIMPLE اسـتفاده شـده اسـت. 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 لند در روابط ۱۸-۲۲ آورده شـــده اســـت. شـــاخص‌های عمومی برای عملکرد بهتر توزیع هوا در مراکز داده عبارت لند از: RCI, SHI, RHI,RTI. مهم ترین شـاخص که ابتدا بررسـی می شـود و بیانگر سـرمایش رک هاسـت RCI اسـت و اگر مقدار آن در محدوده قابل قبول باشد، سایر شاخص‌ها بررسی می گردد.

$$\boldsymbol{SHI = \frac{\delta Q}{Q + \delta Q}} \qquad (۱۸)$$

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

46 Generation of Turbulence Kinetic Energy Due to the Mean Velocity Gradients

47 Finite Volume

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

$$RHI = \frac{Q}{Q + \delta Q} \quad (۱۹)$$

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

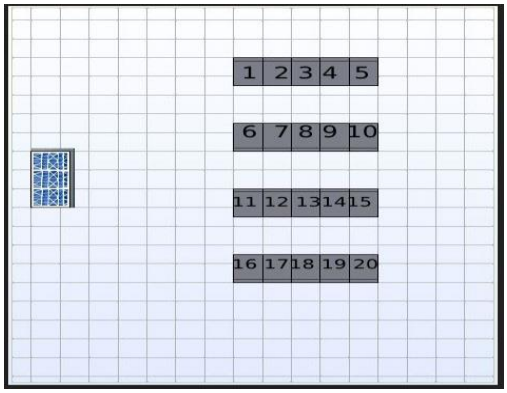
$$RCI_{HIGH} = \left[1 - \frac{Total\ Over\ Temperature}{Max\ Allowable\ Over\ Temperature}\right] 100\% \quad (۲۰)$$

$$RCI_{LOW} = \left[1 - \frac{Total\ Under\ Temperature}{Max\ Allowable\ Under\ Temperature}\right] 100\% \quad (۲۱)$$

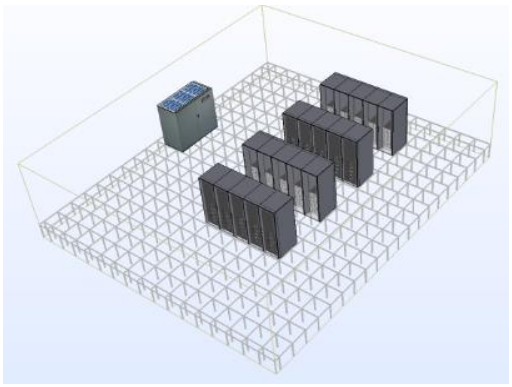
$$RTI = \left[\frac{T_{return} - T_{supply}}{\Delta T_{equipment}}\right] \times 100\% \quad (۲۲)$$

۴- مدلسازی و شبیه سازی

فضای نمونه مورد بررسی یک سایت مرکز داده در اتاقی با ابعاد ۳.۴۴×۱۰×۱۲ 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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

باشد. در این پژوهش سیستم توزیع هوا از کف کاذب (زیر سطحی) و بازگشت هوا بدون کانال 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 کانال هوای برگشتی

۵- شرایط مرزی

با توجّه به معماری حرارتی سالن مرکز داده، فرضیات زیر در تعریف سیستم از مدل حاضر در نظر گرفته‌شده است:

۱. محل و مقدار جریان ورودی مشخص است که می‌تواند اندازه‌گیری شود. در هر کاشی مشبّک، 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 SIGMADCX۶، توزیع دمای حاصل از شبیه سازی 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 رک ها به عنوان نقطه موردنظر انتخاب می گردد. حال دمای ورودی به رک موردنظر را با دماسنج در ارتفاع ۱ متر خوانده و با نتایج حاصل از شبیه سازی عددی در شکل ۷ مقایسه می شود.



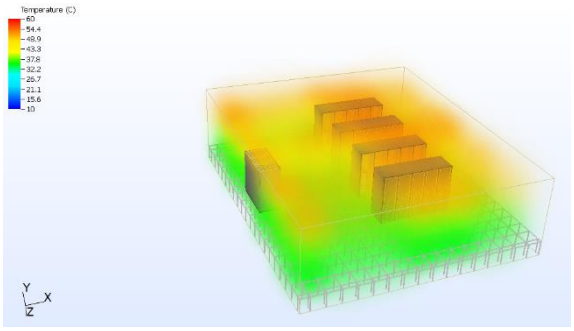
شکل ۷. مقایسه نتایج تجربی و عددی با همدیگر در کار حاضر

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

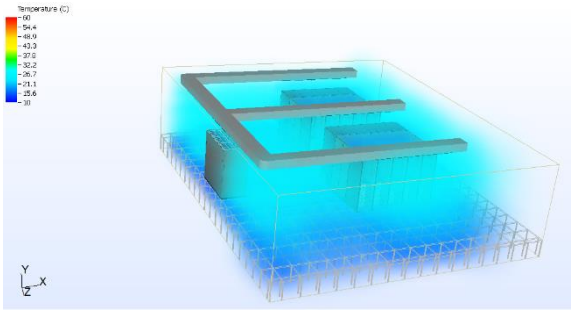
همان طور که انتظار می رفت با توجه به توزیع دما در شکل ۷ نتایج حاصل از شبیه سازی با استفاده از نرم افزار موردنظر دارای صحت قابل قبولی با دادههای تجربی می باشند زیرا کمتر از ده درصد با دادههای تجربی اختلاف دارند؛ بنابراین این مدل مناسب برای ادامه کار انتخاب می گردد.

۷- نتایج

در همه مدل‌ها 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 شکلهای 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

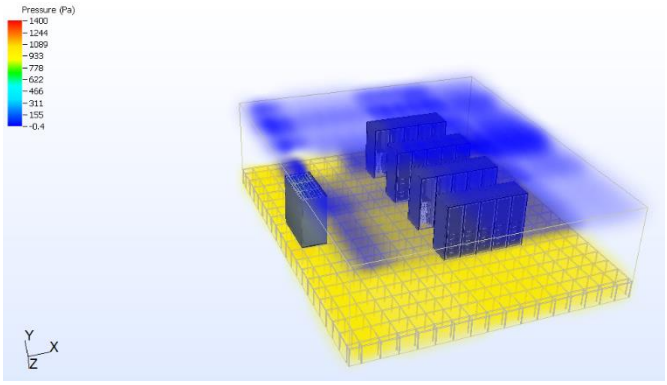


شکل ۹ . کانتور توزیع دما در حالت دوم

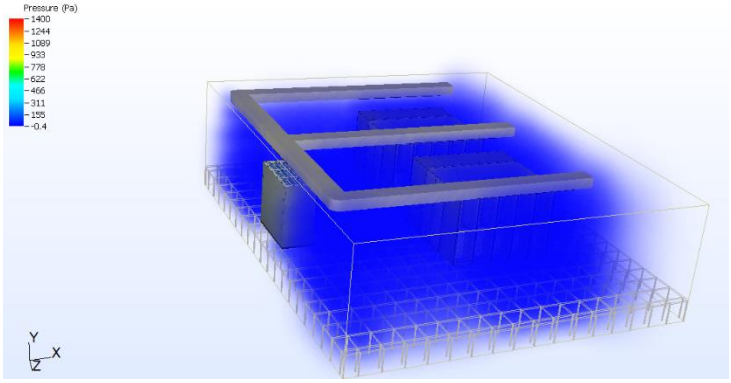
مطابق شکلهای فوق مشاهده می شود که در حالت اول که حالت پایه می باشد، دمای عمومی تجهیزات بسیار بالاست. حالت دوم که حالت پایه به همراه راهرو سرد و کانال هوای برگشتی است، سایت و تجهیزات منصوبه در رک ها در وضعیت ایده آل قرار دارند. با توجه به کانتورهای دمایی در حالت دوم تجهیزات کمترین دما را تجربه میکنند 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 می‌توان 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 می‌تواند یک حالت بهینه برای سرمایش رک ها باشد. با

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

مقایشه حالتهای اول و دوم می‌توان مشاهده نمود که ایجاد کانال 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.

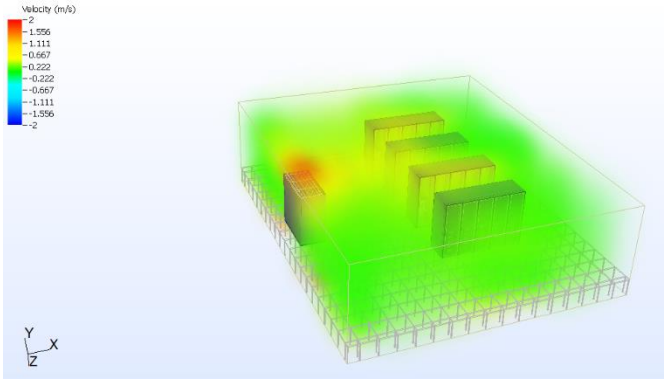


شکل ۱۰ . کانتور توزیع فشار استاتیک در حالت اول



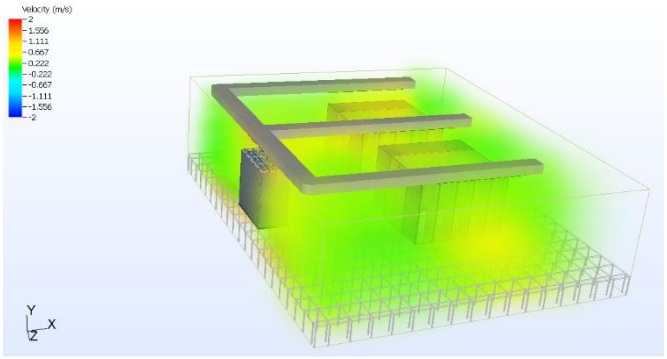
شکل ۱۱ . کانتور توزیع فشار استاتیک در حالت دوم

همانطورکه مشاهده می شود، فشار استاتیکی تولید شده توسط فن‌های دستگاه برودت در خروجی این دستگاه ها به فشار دینامیکی تبدیل شـده و جریان هوا بصـورت عمودی از دسـتگاه تولید برودت خارج گردیده و بصـورت افقی در داخل کف کاذب جریان پیدا می کند و دبی جریان در عبور از کف کاذب با پیشـرفت در طول آن کاهش یافته لذا فشـار آن افزایش پیدا خواهد کرد در تصـاویر ذیل کانتور سـرعت در حالتهای اول و دوم را مشاهده می‌نمایید :



شکل ۱۲ . کانتور سرعت در حالت اول

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]



شکل ۱۳ . کانتور سرعت در حالت دوم

همانطورکه مشـاهده می شـود، دبی جریان در عبور از کف کاذب با پیشـرفت در طول آن کاهش یافته و متناظر با آن سـرعت 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 حالتهای موردنظر، شاخصهای دمایی که پارامترهای مهمی در توزیع هوا در مراکز داده می باشند، بر اساس محاسبات فوق الذکر استخراج می‌گردد 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

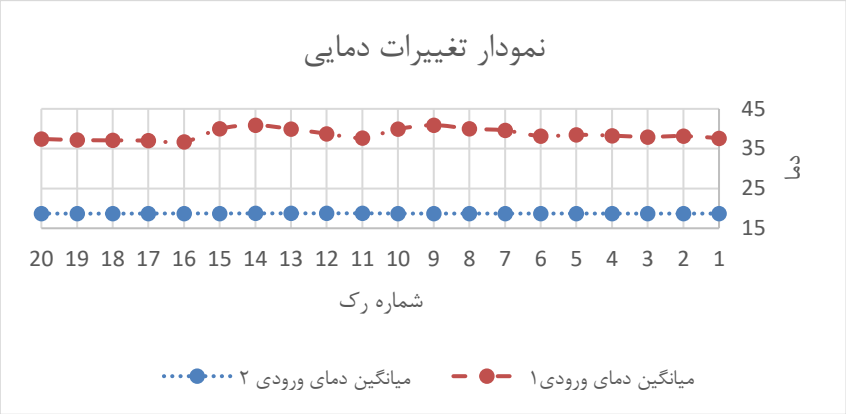
حالت	توضیحات	RCI_{HIGH}	RCI_{LOW}	RTI	SHI	RHI
۱	توزیع هوا از کف کاذب، برگشت هوا شناور	-۱۳۱/۸٪	۱۰۰٪	۸۰/۳۲٪	۰/۲۰۷۴	۰/۷۸۹۶
۲	محفظه راهرو بندی سرد با برگشت هوا	۱۰۰٪	-۲۳٪	۷۴/۰۷٪	۰/۰۱۰۳	۰/۸۹۲۷

بر اساس شاخصهای تعریف شده مشاهده می‌شود 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 دمای برگشتی نیز حالت دوم وضعیت بهتری دارد

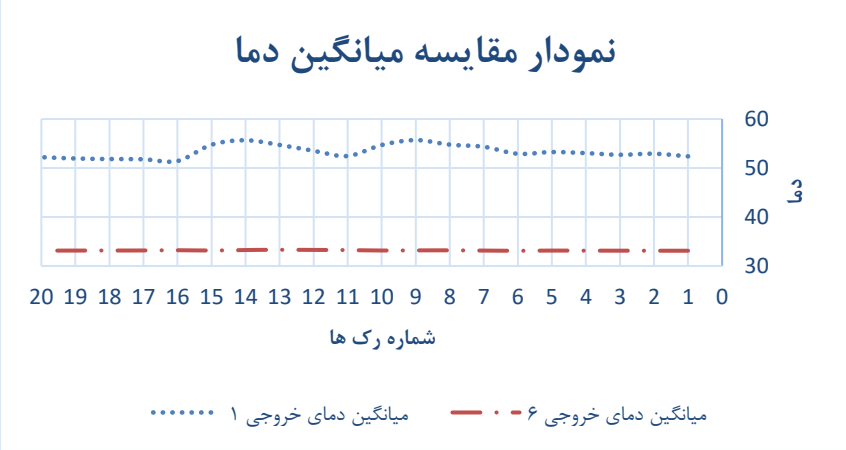
۸- ارزیابی مدلهای مسئله

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]



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 شاخص ها 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 می باشند 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 می‌توان دمای هوای ورودی را از محدوده مجاز بالاتر برد و اتلاف انرژی کمتر و کار آیی 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

مراجع

[1] ıvanc 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, andRack-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] Xiongzhuang 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

[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 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 آقایی، 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 پرشده دوّار 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 پورمحمود، 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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]