نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)
دوره ۸، شماره ۱، بهار ۱۴۰۰

Journal Of Energy Conversion
Volume: 8, Issue: 1, 2021

بررسی روش های توزیع هوای سیستم سرمایش برای تجهیزات یک مراکز داده

محمد خدابنده[1*]، نادر پور محمود [2]، ایرج میرزائی[2]

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک ، دانشگاه ارومیه ، ارومیه، ایران
۲- استاد، گروه مهندسی مکانیک ، دانشگاه ارومیه ، ارومیه، ایران

دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۰۷، بازنگری: ۱۴۰۰/۰۳/۰۸، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۰

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-24]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.1.4.8]

چکیده

مراکز داده به اماکنی گفته میشود که سرور ها و تجهیـزات IT را در خـود جـای میدهـد. رک در شـبکه و IT، سخت افزاری است که ماژول های سخت افزاری مانند سرور، ذخیره ساز ، سوییچ و تجهیزات ارتبـاطی و UPS و دیگر تجهیزات شبکه را در خود جای می‌دهد. بدین ترتیب در فضایی مناسب و امن، طبقات منسـجمی بـرای نگهداری تجهیزات شبکه را فراهم می‌کند. با توجه به انتشار همیشگی گرما از رک هـا مـدیریت سیسـتم هـای توزیع هوا و سیستم سرمایشی در مراکز داده برای جلوگیری از تخریب بر اثر گرمای زیاد اهمیت ویـژه ای دارد. هدف از مدیریت سیستم های توزیع هوا، حل مشکلات موجود در سرمایش مراکز داده، از جمله حداقل نمـودن بازگشت هوای گرم، بای پس هوای سرد و حذف نقاط داغ است و همچنین می توان هزینه های زیـاد ناشـی از سیستم های سرمایش را کاهش و کارآیی آنها را بهبود بخشید در این خصوص پارامترهای مختلف برای تخمین جریان هوا و کارایی دمایی در یک مرکز داده در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت که در نتیجه بررسی هـای صورت گرفته مشخص شد که با محفظه بندی راهروهای سرد و گرم می توان دمای هوای ورودی را، از محدوده مجاز بالاتر برد و اتلاف انرژی کمتر و کار آیی بهتری را خواهیم داشت. کانال کشی هـوای بازگشـت و پارتیشـن بندی از کف کاذب به عنوان روش های تکمیلی استفاده می شوند که کانال کشی شرایط بهتری ایجاد می کنـد و با توجه به مجموع مقایسه های انجام شده ، مناسب ترین مدل برای مدل مورد بررسی، محفظه بندی راهروی سرد پیشنهاد گردید.

* **عهده‌دار مکاتبات:** M.khodabandeh@urmia.ac.ir

کلمات کلیدی: مرکز داده، مدیریت توزیع هوا، شبیه سازی عددی، شاخصهای دمایی.

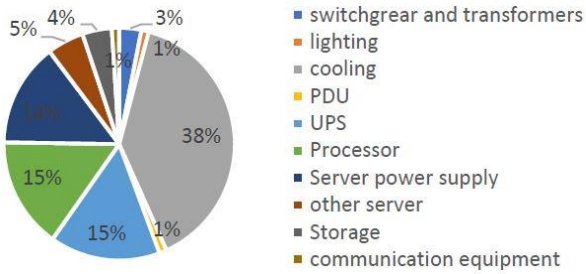
۱- مقدمه

مرکز داده شامل سیستم های پشتیبان برق و یا تجهیزات اضافی است که در صورت خرابی سیستم های اصلی، به عنوان پشتیبان مورداستفاده قرار می گیرد و همچنین شامل کنترل کننده های محیطی، مانند دستگاه های تهویه هوا و سیستم های آتش نشانی و ابزارهای کنترل دسترسی است [۱].

مهم ترین هدف سیستم سرمایش مرکز داده، جدایی هوای خروجی[1] تجهیزات از هوای ورودی[2] به آنها، در جهت جلوگیری از گرمایش زیاد تجهیزات است. به این دلیل، کانال کشی موضعی[3] و یا کامل[4] هوای رفت به ورودی تجهیزات با هوای برگشت از خروجی تجهیزات، با افزایش توان رکها به یک مسئله مهم تبدیل می شود [۲].

از آنجا که انتشار گرما در سرور رکها دائما در حال افزایش است، بنابراین طراحی مناسب سیستم تهویه هوا در مرکز داده، برای جلوگیری از تخریب دستگاه ها ناشی از گرمای زیاد اهمیت دارد [۳]. بعلاوه سیستم های سرمایش باید به صورت تمام وقت (۲۴ ساعت و ۷ روز هفته) کار کنند. هر سرور باید میزان مشخصی هوای سرد را با توجه به سرعت انتشار گرمای خود دریافت کند، بنابراین راه حل تضمین عملکرد مناسب این تجهیزات، این است که مطمئن باشیم هوای سرد به طور مناسبی در مرکز داده توزیع می شود و هوای سرد توزیع شده، نیازهای مرتبط با هر ناحیه را برآورده می کند [۴]. در این مطالعه فقط سیستم سرمایش مرکز داده یا هوا در نظر گرفته می شود.

سیستم های سرمایش ۳۸ درصد کل انرژی مورد نیاز در مراکز داده را مصرف می کنند [۵] که درصد بالایی از مصرف انرژی را به خود اختصاص می دهند. شکل ۱ توزیع انرژی مورد نیاز در بخش های مختلف یک مرکز داده را نشان میدهد.



شکل۱- توزیع انرژی در مراکز داده [۵]

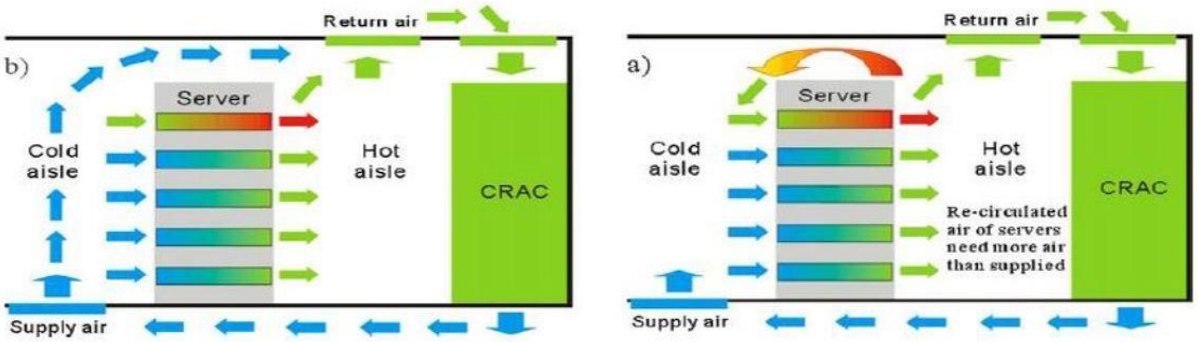
مراکز داده در شرایطی طراحی می شوند که محیط تجهیزات، شرایط مناسبی بر طبق استانداردهای موجود داشته باشند [۶]. هزینه انرژی در حال حاضر یکی از مسائل مهم در طراحی مراکز داده است. افزایش قابلیت های محاسباتی متناظر است با افزایش تعداد رکها و تراکم قدرت در مراکز داده [۷ ، ۸]. بنابراین باید در هنگام طراحی، کاهش مصرف انرژی را نیز در نظر گرفت. افزودن تعداد واحدهای سرمایش و توان آنها روش مناسبی برای بهبود و مدیریت جریان هوا در مراکز داده نیست. در ابتدا استقرار سرورها، نحوه چیدمان و روش های مختلف سرمایش و توزیع هوا اهمیت داشت. فناوری راهروی سرد و راهروی گرم اولین بار در سال ۱۹۹۲ معرفی شد [۹]. سپس فناوری های دیگری چون سرمایش ردیفی با محفظه بندی راهروی گرم [۱۰]، محفظه بندی راهروی سرد [۱۱] و سرمایش سقفی [۱۲] به منظور بهبود عملکرد سیستم ها معرفی گردید. به تدریج تمرکز بر مراکز داده با تراکم بالا و بهبود مصرف انرژی مراکز با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و روش های جدید در استفاده از انرژی های تجدید پذیر مانند انرژی های خورشیدی، پیل های سوختی، استفاده از حالت های اکونومایزر[5] و روش خنک کننده رایگان[6] مدنظر قرار گرفت. توزیع مناسب هوای سرد برای عملکرد مناسب سرورها ضروری است. دو عامل جریان بازگشتی[7] و جریان عبوری[1] باعث کاهش راندمان سیستم سرمایشی می شوند. به بازگشت هوای گرم به راهروی سرد، جریان

[1] Return air
[2] Supply air
[3] Locally ducted
[4] Fully ducted
[5] Economizer
[6] Free cooling
[7] Recirculation

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-24]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.1.4.8]

برگشتی و به جریان سردی که بدون خنک کاری رکها از راهروی سرد عبور کرده و به واحد سرمایش بر می گردد، جریان عبوری، گفته می شود (شکل ۲). استفاده از شاخص های دمایی به درک کار آیی و عملکرد توزیع هوا کمک می کنند.

شارما و همکاران [۱۳] دو پارامتر یی بعد شاخص گرمای تولیدی[۲] (SHI) و شاخص گرمای برگشتی[۳] (RHI) را برای ارزیابی عملکرد دمایی مراکز داده معرفی کردند. این شاخص ها، روشی را فراهم می کنند تا بتوان جریان همرفتی را در اتاق تجهیزات با کف کاذب[۴] بررسی کرد. هرلین [۱۴] میزان تأثیر سرمایش رکها را مطالعه کرد و شاخص سرمایش رک[۵] (RCI) را که نشان دهنده ی میزان خنک کاری تجهیزات رک است، معرفی نمود. این معیار همچنین می تواند به خوبی برای طراحی مراکز داده جدید استفاده شود. هرلین [۱۵] مطالعه ای را بر روی شاخص دمای برگشتی[۶] (RTI) انجام داد که مقیاسی از سطح پایه هوای عبوری یا برگشتی در مراکز داده است. هردوی این موارد تأثیر بدی بر روی انرژی کل و بازده دمایی فضا دارد و باعث ایجاد نقاط گرم[۷] می شود.



شکل ۲- هوای بازگشتی و هوای عبوری [۶]

محققان بسیاری در زمینه شرایط دمایی، این مراکز را مطالعه کرده اند. از جمله ناکائو و همکاران [۱۶] تحقیقاتی در خصوص پیکربندی های مختلف تجهیزات سرمایشی و مقایسه بین حالت های مختلف انجام دادند. این حالت ها عبارت بودند از: تأمین هوا از کف به همراه خروجی از سقف، تأمین هوا از کف به همراه خروجی های افقی، تأمین هوا از بالا و خروجی هوا از کف و تأمین هوا از بالا و خروجی های افقی نوه و همکاران [۱۷] از سه روش برای طراحی مراکز داده با رک هایی با ظرفیت ۵-۶ کیلووات استفاده کردند. آن ها در مراکز با تجهیزات ارتباطی، سه حالت: هوای ورودی از کف به همراه خروجی از سقف، هوای ورودی از بالا و خروجی از کف و هوای ورودی از بالا و خروجی از دیوارها را بررسی نمودند. هر دو این تحقیق ها نشان داد که حالت هوای ورودی از کف و خروجی از سقف عملکرد بهتری دارد.

اشمیت و اینگار [۱۸] نیز حالت های جریان هوا برای مراکز داده با تراکم بالا (شلوغ) را بررسی کردند. نتیجه این مطالعات این بود که بهترین حالت، تأمین هوا از کف کاذب و بازگشت هوا از سقف است. پاتل و همکاران [۱۹، ۲۰] جزو اولین کسانی بودند که از CFD برای مدل سازی و مطالعه جریان هوا و توزیع دما در مراکز داده با کف کاذب استفاده کردند. چو، یانگو و پارکا [۲۱] در مطالعه خود سعی کردند تا مصرف انرژی در مراکز داده با تراکم بالا[۸] را با بهبود کارآیی و بازدهی سرمایش و

---

[1] Bypass
[2] Supply heat index
[3] Return Heat Index
[4] Raised Floor
[5] Rack Cooling Index
[6] Return Temperature Index
[7] Hotspot
[8] High Density

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-24]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.1.4.8]

توزیع هوا کاهش دهند. چو و کیم [۳] سیستم پارتیشن بندی[1] عمودی راهرو را پیشنهاد دادند تا بازده سرمایش مرتبط با خروج گرمای سرورهای IT در مراکز داده را افزایش دهند.

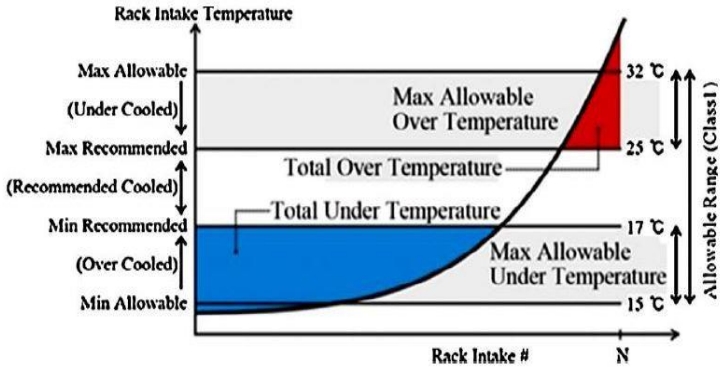
یکی از مهمترین دماهای مورد بررسی در مراکز داده دمای ورودی و خروجی از رکها است که در تأمین امنیت دمائی آنها نقش عمده ای دارد. هدف از این پروژه مطالعه سیستم های مختلف سرمایش و توزیع هوا (۵AD) در مراکز داده و مقایسه دماهای ورودی و خروجی رک ها در حالت های مختلف است. در این پروژه شاخص های دمایی معرفی شده است که توزیع هوا در مراکز داده را آنالیز می کند. سپس به شبیه سازی یک مرکز داده نمونه با سیستم توزیع هوای زیرسطحی به وسیله نرم افزار SIGMADCX۶ پرداخته و با تغییر پارامترهای مختلف از جمله، محفظه بندی راهروهای سرد، سپر حرارتی در کف کاذب و کانال کشی هوای برگشت، شاخص های دمایی در آنها را محاسبه و سپس با معرفی ۱۸ نقطه در مرکز داده نمونه دماهای ورودی و خروجی از رکها که به عنوان یک پارامتر مهم در طراحی به شمار می رود محاسبه و با هم مقایسه می گردند و در نهایت حالت های مختلف از لحاظ عملکرد دسته بندی شده و بهترین حالت معرفی می شوند.

۲- معرفی شاخص های دمایی

۲-۱- شاخص سرمایش رک (RCI)

توصیف کامل شاخص سرمایش رک توسط هرلین [۱۴] انجام شد. این شاخص معیاری است که دمای ورودی به رک را نشان میدهد و برای عملکرد پیوسته مرکز داده بسیار اهمیت دارد. محدوده ی دمای مجاز و دمای حداکثر ورودی به رک (شکل ۳) شرایط طراحی را نشان میدهد. شرایط دمای بیش از حد، هنگامی رخ می دهد که یک یا چند دمای ورودی بیشتر از حد مجاز باشند. دمای بیش از حد کلی بیانگر مجموع دماهای ورودی به همه رکها است. به طور مشابه، دمای کمتر از حد مجاز، بیانگر دمای ورودی به رک هایی است که بیش از حد مجاز سرد شده اند. مقادیر این مرزها، به استاندار مورد استفاده بستگی دارد. این مقیاس برای قابل درک بودن از ۱۰ تا ۱۰۰٪ تعریف شده است که ۱۰۰٪ بیانگر این است که تمام رکها بر طبق استاندارد موردنظر خنک می شوند. شاخص ها باید مستقل از واحد اندازه گیری باشند بنابراین می تواند بر اساس استانداردهای مختلف مورداستفاده قرار بگیرند. شاخصه RCI شامل دو رابطه است، یک رابطه محدوده ی مجاز برای حداکثر دمای رک (RCI_{HIGH}) و یک رابطه محدوده ی مجاز برای حداقل دمای رک (RCI_{Low}) را نشان میدهد [۱۴].

در شکل ۳ محدوده های دمایی مجاز و حداکثر و در جدول ۱ محدوده ی مناسب برای شاخص RCI طبق استاندارد اشری نشان داده شده است [۶]. طبق این استاندارد مقدار RCL_{HIGH} برابر ۹۵ درصد مناسب است.



شکل ۳- محدوده ی دمایی مجاز و حداکثر طبق استاندار اشری [۶]

[1] Partition

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-24]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.1.4.8]

جدول۱- نرخ سرمایش رک [۶]

ایده آل	٪۱۰۰
خوب	≤۹۶٪
قابل قبول	۹۱٪-۹۵٪
ضعیف	≥۹۰٪

شاخص RCI_{HIGH} بصورت زیر تعریف میگردد [۶] :

$$\begin{aligned} \mathrm{RCI_{HIGH}} &= \left[1 - \frac{\text{total overtemperature}}{\text{Max Allowable Overtemperature}}\right] \times ٪۱۰۰ \\ &= ۱۰۰ \times \left[1 - \frac{\sum (T_i - T_{max-\mathrm{rec}})_{Ti>\mathrm{Tmax-rec}}}{n \times (T_{max-\mathrm{all}} - T_{max-\mathrm{rec}})}\right] \end{aligned} \quad (۱)$$

این شاخص اختلاف دماهای بالا را اندازه گیری می کند، ٪۱۰۰ نشانگر این است که هیچ دمایی بالاتر از حد مجاز وجود ندارد. هر چه میزان آن از ٪۱۰۰ کمتر باشد، احتمال اینکه رکها، دمایی بالاتر از دمای حداکثر را تجربه کنند بیشتر می شود. یکی از روش های بهبود عملکرد این شاخص، افزایش نرخ حجم هوای ورودی به رکها است که از معایب این امر نیز افزایش مصرف انرژی است [۴]. شاخص (RCILaw) نیز مطابق رابطه زیر تعریف می شود :

$$\begin{aligned} RCI_{LOW} &= \left[1 - \frac{total\ \text{Undertemperature}}{\text{Max Allowable undertemperature}}\right] \times ٪۱۰۰ \\ &= \left[1 - \frac{\sum (T_{min-\mathrm{rec}} - T_i)_{T<\mathrm{Tmin-rec}}}{n \times (T_{min-\mathrm{rec}} - T_{min-all})}\right] \times ٪۱۰۰ \end{aligned} \quad (۲)$$

۲-۲- شاخص دمای برگشتی (RTI)

این شاخص بیانگر نرخ جریان هوای خروجی از پکیج های سرمایشی به تجهیزات از جمله رکها است. به عبارتی این شاخص، هوای خروجی از تجهیزات سرمایشی به رکها را مدیریت می کند. همچنین شاخص دمای برگشتی، وجود جریان برگشتی و یا جریان عبوری را نشان میدهد. این شاخص طبق رابطه ی زیر تعریف می شود [۲۱]

$$RTI = \left[1 - \frac{T_{\mathrm{return}} - T_{\mathrm{supply}}}{\Delta T_{\mathrm{equipment}}}\right] \times ۱۰۰ \quad (۳)$$

اگر مقدار شاخص RTI بیشتر از ٪۱۰۰ باشد به معنای وجود جریان برگشتی و اگر کمتر از ٪۱۰۰ باشد به معنای وجود جریان عبوری است [۲۱]، بنابراین ایده آل ترین مقدار برای این شاخص ٪۱۰۰ است. در عمل تنها وقتی این شاخص ٪۱۰۰ می شود که محفظه راهروها بسته باشند.

۲-۳- شاخص گرمای برگشتی (RHI) و شاخص گرمای تولیدی (SHI)

این دو شاخص بی بعد، که میزان اختلاط دو جریان هوای سرد ورودی به رک و جریان گرم خروجی از رک را نشان می دهند، به صورت زیر تعریف می شوند [۱۳] و می توان از آنها برای مقایسه ی دو مرکز استفاده نمود:

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-24]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.1.4.8]

$$SHI = \left(\frac{\delta Q}{Q + \delta Q}\right) \quad (۴)$$

$$RHI = \left(\frac{Q}{Q + \delta Q}\right) \quad (۵)$$

در روابط فوق Q مقدار حرارت کل منتشر شده از رکها است و میزان افزایش آنتالپی هوای سرد، قبل از وارد شدن به رکها را نشان میدهد [۱۳].

$$Q = \sum_{j} \sum_{i} m_{ij^r}\, \mathrm{Cp}\left(\left((T^r_{\mathrm{out}})_{ij}\right) - (T^r_{\mathrm{in}})_{ij}\right) \quad (۶)$$

در روابط فوق m_{ij^r} دبی هوای ورودی به رک iام در ردیف jام است $(T^r_{\mathrm{out}})_{ij}$ و $(T^r_{\mathrm{in}})_{ij}$ دمای متوسط خروجی و ورودی از رک i ام در ردیف jام است . این دو شاخص ، با رابطه ی زیر به هم مربوط می شوند [۱۳]

$$SHI + RHI = 1 \quad (۷)$$

اگرSHI زیاد باشد، بیانگر این است که دمای ورودی بالاست که ممکن است به خاطر بازگشت مجدد یا اختلاط هوا قبل از ورود به رک باشد. کم بودن RHI نشانگر اختلاط هوای گرم خروجی از رک، با هوای سرد داخل راهرو، سقف و یا بین رک و دیوار است. هر چه میزان RHI زیاد وSHI کم باشد به حالت ایده آل طراحی سیستم سرمایش برای مرکز داده نزدیک شده ایم. این حالت نشان دهنده ی میزان اختلاط کم هوای سرد با هوای گرم خروجی از رکها است. میزان این شاخصه ها بین ۰ و۱ است.

۳- معادلات حاکم بر مسئله

مدل عددی مرکز داده شبیه سازی شده، با استفاده از بسته نرم افزاری SIGMADCX۶ مدل سازی شده است و معادلات بنیادی در وضعیت پایدار[1] در یک میدان سه بعدی تراکم ناپذیر و توربولانس حل گردیده اند. با توجه به اینکه جریان در مرکز داده مغشوش است، برای مدل سازی 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 سه بعدی میدان جریان، برای بقای جرم، بقای مومنتم و بقای انرژی به صورت زیر هستند:

$$\frac{\partial\left(\rho u_j\right)}{\partial x_j} = ۰ \quad (۸)$$

$$\frac{\partial\left(\rho u_i u_j\right)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{۲}{۳}\delta_{ij}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right]\right] + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(-\rho\overline{\hat{u}_i\hat{u}_j}\right) \quad (۹)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left[u_i\rho\left(h + \frac{۱}{۲}u_j u_j\right)\right] = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[k_{eff}\frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i\left(\tau_{ij}\right)_{eff}\right] \quad (۱۰)$$

[1] Steady state

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-24]

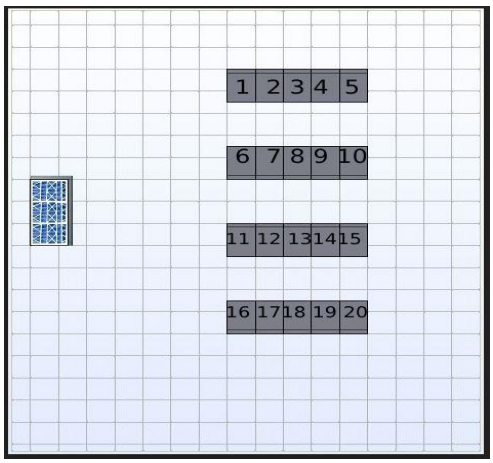
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.1.4.8]

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

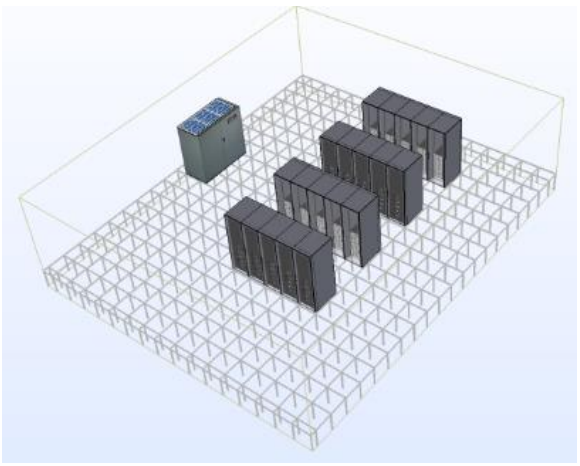
قابل ذکر است که در این شبیه سازی عددی، برای حل معادلات حاکم از روش حجم محدود[1] استفاده شده است. برای دقت بالای محاسبات، گسسته سازی ترمهای جابجایی و پخش با استفاده از روش مرتبه دوم انجام گرفته و چون سیال عامل تراکم ناپذیر در نظر گرفته شده، برای وابسته کردن میدان سرعت و فشار، از الگوریتم معروف SIMPLE استفاده شده است. در واقع باید گفت، برای کوپل کردن سرعت و فشار در روش حل تفکیکی، در محاسبات حالت پایدار، از این الگوریتم استفاده می شود که از رابطه بین اصلاحات فشار و سرعت استفاده می کند تا قانون بقای چرم را برآورده کند و میدان فشار را به دست آورد.

۴- شبیه سازی مرکز داده نمونه

فضای نمونه مورد بررسی یک سایت مرکز داده در اتاقی با ابعاد ۳,۴۴*۱۰*۱۲ متر مکعب می باشد که در شکل های ۴ و ۵ نشان داده شده است.



شکل۴- نمای سالن دیتای مورد مطالعه



شکل۵– فضا و محل قرار گیری تجهیزات

این مرکز شامل ۲۰ رک می باشد که بار حرارتی هر رک ۳ کیلو وات است. سیستم توزیع هوای زیر سطحی با ارتفاع کف کاذب ۰,۶۴ متر برای سرمایش رک ها در نظر گرفته شده است. بار حرارتی کل مرکز داده ۸۹,۶ کیلووات محاسبه شده است. بعد از اعتبار سنجی حل عددی به جهت انتخاب بهترین حالت جانمایی و بیشترین راندمان از یک واحد سرمایش با ظرفیت ۶۰ کیلووات استفاده شده است. بعبارت دیگر پکیج سرمایشی در نظر گرفته شده باید در بهترین حالت جانمایی تجهیزات قرار بگیرد که جوابگوی نیاز سرمایشی مرکز داده باشد. در این پروژه، 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 شاخص های سرمایشی معرفی شده در حالت های ذیل مورد بررسی قرار میگیرد:

حالت پایه

حالت پایه + کانال هوای برگشتی به پکیج برودتی

حالت پایه + سپر حرارتی در کف کاذب

[1] Finite Volume

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-24]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.1.4.8]

حالت پایه + راهروی گرم
حالت پایه + راهروی سرد
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 [۱۰]:

۱. محل و مقدار جریان ورودی مشخص است و 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 تحقیق حاضر برای اطمینان از صحت حل معادلات جریان و حرارت سیال توسط نرم افزار SIGMADCX۶، توزیع دمای حاصل از شبیه سازی فضای نمونه موردنظر با این نرم افزار توسط داده های تجربی در یک راستا مورد مقایسه قرار گرفته است. همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده است رکها را شماره گذاری کرده و ورودی رک شماره ۱۰ به عنوان نقطه موردنظر انتخاب می گردد. حال دمای ورودی به رک موردنظر را در سه ارتفاع ۰/۵ متر، ۱ متر و ۱/۵ متر از کف کاذب، با دماسنج خوانده و با نتایج حاصل از شبیه سازی عددی در جدول مقایسه می شود.

جدول۲- مقایسه تجربی و عددی دماهای ورودی به رک شماره ۱۰

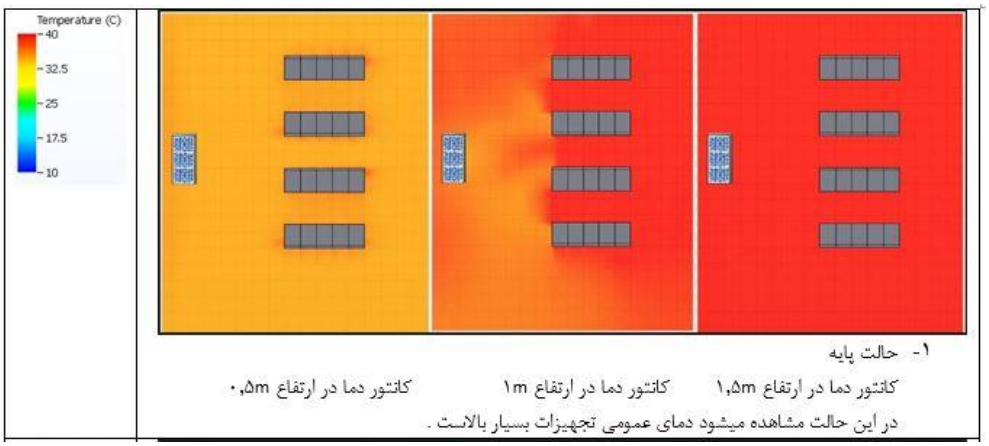
	اندازه گیری تجربی دما (^oC)	اندازه گیری عددی دما (^oC)
ارتفاع ۰,۵ متر از کف کاذب	۱۸,۴	۱۸,۱۵
ارتفاع ۱ متر از کف کاذب	۱۹,۱	۲۰
ارتفاع ۱,۵ متر از کف کاذب	۲۲,۳	۲۱,۸

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

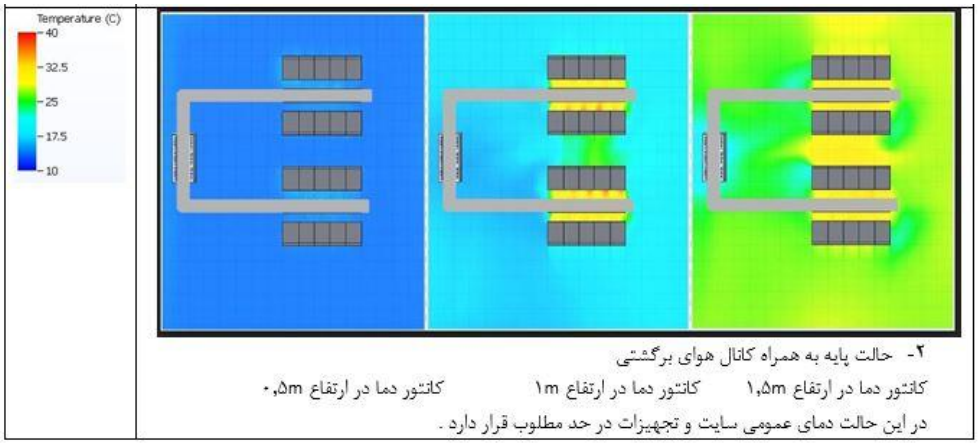
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-24]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.1.4.8]

۷- نتایج

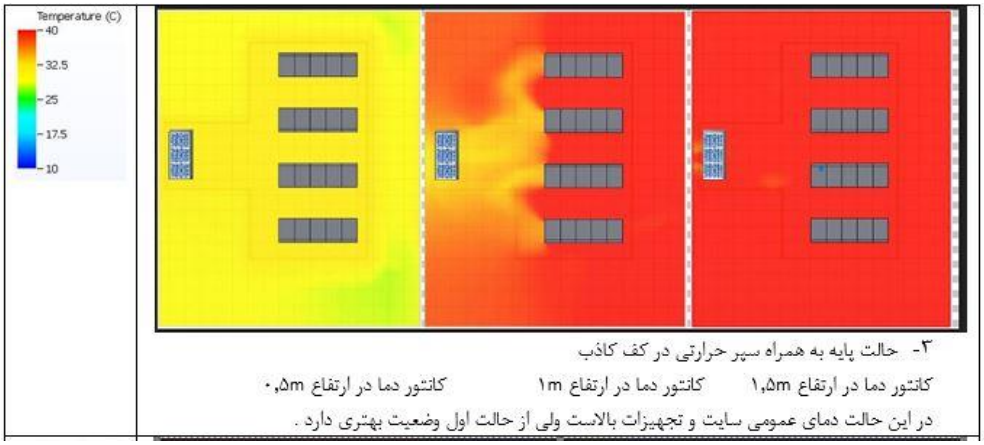
در همه مدل ها یک صفحه برش در کف کاذب، ارتفاع یک متری از کف کاذب و ارتفاع ۱/۸ متری از کف کاذب در نظر گرفته شده که کانتور های دمایی در این صفحات در شکل های ۶ تا ۱۱ نشان داده شده اند. لازم به ذکر است به جهت مقایسه بهتر مقیاس نمایش کانتور های زیر همگی در بازه دمایی ۱۰ تا۴۰ درجه سانتیگراد ترسیم شده است:



شکل۶– نتیجه حالت اول



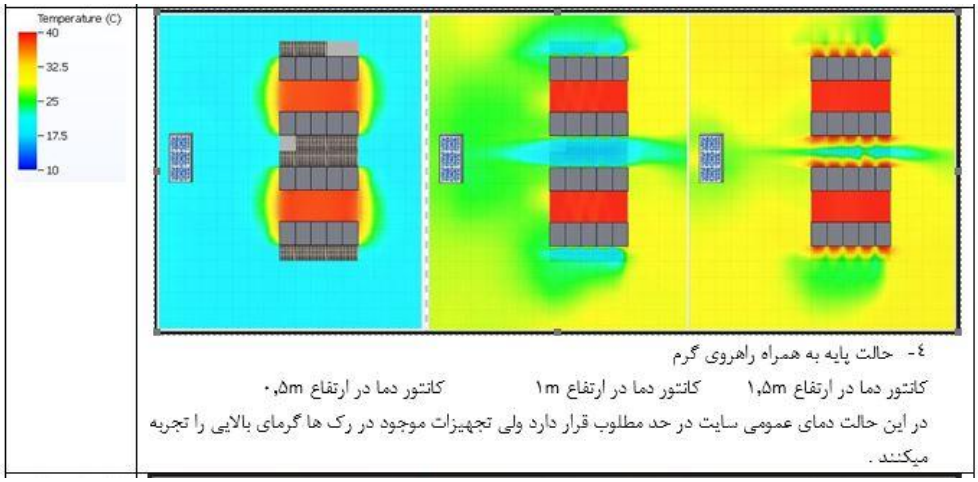
شکل۷– نتیجه حالت دوم



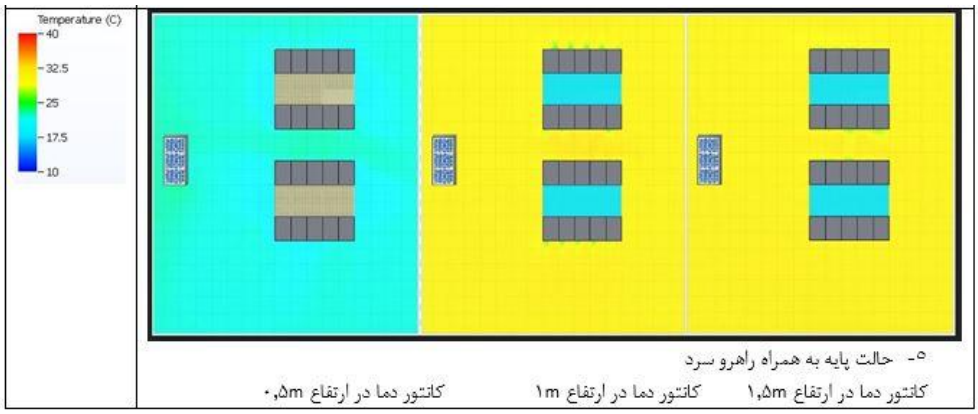
شکل۸– نتیجه حالت سوم

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-24]

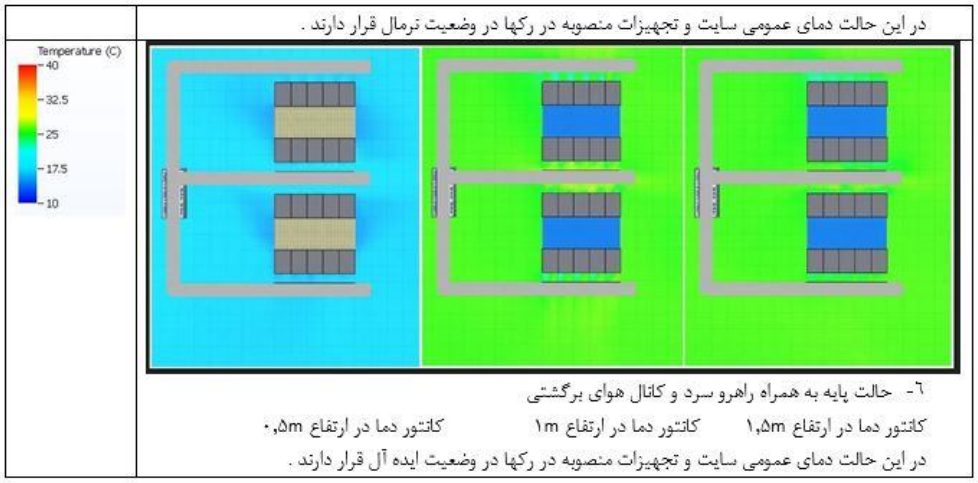
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.1.4.8]



شکل۹– نتیجه حالت چهارم



شکل۱۰– نتیجه حالت پنجم



شکل۱۱– نتیجه حالت ششم

با توجه به کانتور های دمایی حالتهای دوم، پنجم و ششم دارای کمترین دما هستند که علاوه بر محیط رک ها فضای عمومی سایت را نیز خنک میکنند. در این حالتها انرژی مصرف شده به جای خنک کاری رک ها صرف سرمایش مناطقی

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-24]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.1.4.8]

میشود که نیازی به سرمایش ندارند. به نظر میرسد در این حالتها میتوان تعداد سرورها و بار حرارتی را افزایش داد. در حالت های پنجم و ششم که بصورت راهرو سرد هستند؛ مینیمم دما در درون محفظه ی بسته در راهرو سرد مشاهده میشود که میتواند یک حالت بهینه برای سرمایش رک ها باشد. با مقایشه حالت های اول و دوم میتوان مشاهده نمود که ایجاد کانال برگشت هوا راهکار خوبی برای سرمایش رک ها می باشد و ایجاد سپر حرارتی در کف کاذب تا حدودی میتواند دما را نسبت به حالت پایه کاهش دهد.

۸- نتایج تخمین شاخص های دمایی

بعد از شبیه سازی عددی حالت های موردنظر، شاخص های 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 جداول ۳ و ۴ نتایج حاصل از تخمین شاخص ها نشان داده شده است.

جدول۳- 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	کانال برگشتی هوا	٪۱۰۰	٪۵۰,۸۱	٪۶۹,۰۷	۰,۲۲۳۵	۰,۶۶۵۲
۳	سپر حرارتی در کف کاذب	-٪۸۶,۸	٪۱۰۰	٪۸۰,۲۴	۰,۲۴۷۸	۰,۷۴۸۶
۴	محفظه بندی راهرو گرم	٪۹۷,۱۴	٪۱۰۰	٪۸۰,۰۳	۰,۳۴	۰,۶۵۷۳
۵	محفظه بندی راهرو سرد	٪۱۰۰	٪۱۰۰	٪۸۱,۹۴	۰,۰۰۷۵	۰,۹۸۸۷
۶	محفظه راهرو بندی سرد با برگشت هوا	٪۱۰۰	-٪۲۳	٪۷۴,۰۷	۰,۰۱۰۳	۰,۸۹۲۷

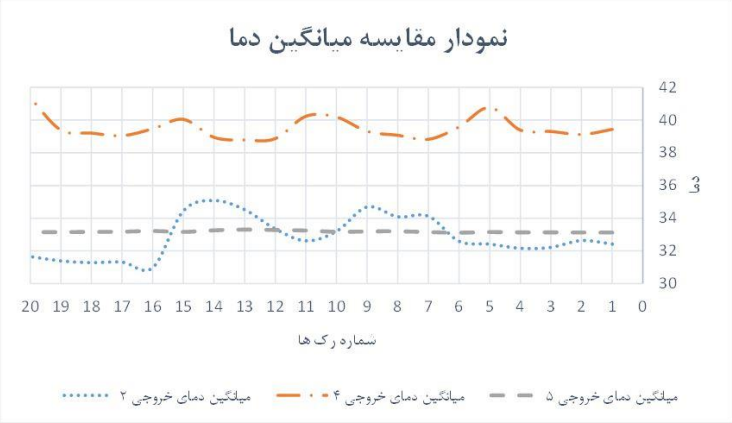
بر اساس شاخص های تعریف شده مشاهده می‌شود که در حالت اول و سوم شاخص RCI_{HIGH} منفی است و این عدد بیانگر اینست که رکها دمای بالایی را تجربه میکنند در حالت های دوم، پنجم و ششم شاخص سرمایش رک ۱۰۰٪ است که به مقدار ایده آل رسیده است ولی در حالت ۴ شاخص سرمایش رک به حد ایده آل نرسیده است. در خصوص شاخص RTI در همه حالت ها مقدار زیر ۱۰۰٪ است و این میزان بیانگر اینست که جریان بازگشتی وجود ندارد و جریان های موجود در مدلسازی های 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 به ترتیب حالتهای پنجم، ششم، دوم و چهارم ایده آل ترین حالت ها را از این حیث برخوردارند. در خصوص شاخص دمای برگشتی نیز به ترتیب حالت های چهارم، اول، پنجم و ششم بهترین حالت ها را دار هستند.

۸-۱- ارزیابی مدل های مسئله

برای تحلیل بهتر دمایی مدل های مسئله، نمودار مقایسه ای میانگین دمای ورودی و خروجی در حالت های دوم، چهارم و پنجم بر اساس شماره رک در نمودار شکل ۱۲ قابل مشاهده است. با توجه به جدول شماره ۳ میتوان مشاهده نمود حالتهای دوم و پنجم در محدوده دمایی پائینتری قرار گرفته اند و شرایط مطلوبتری دارند.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-24]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.1.4.8]



شکل (۱۲) –نمودار مقایسه میانگین دما

نتیجه گیری

برای کاهش هزینه های انرژی، تخمین جریان هوا و کارآیی سیستم سرمایش، توجه به پیکربندی اتاق سرور در طراحی اولیه ضروری است. شاخص های عمومی برای عملکرد بهتر توزیع هوا در مراکز داده عبارت اند از: RCI , SHI , RHI,RTI. مهم ترین شاخص که ابتدا بررسی می شود و بیانگر سرمایش رک هاست RCI_{HIGH} است و اگر مقدار آن در محدوده قابل قبول باشد، سایر شاخصها بررسی می گردد. قرار گرفتن سایر شاخص ها در محدوده های قابل قبول، بر عملکرد کلی مرکز داده اثر می گذارد. با توجه به اهمیت دماهای ورودی و خروجی از رکها، برای طراحی مراکز داده، با استفاده از متوسط گیری این دماها، به مقایسه حالت های 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 شاخص های دمایی در آن ها 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، پارتیشن بندی کف کاذب و کانال کشی هوای برگشت.

با محفظه بندی راهروهای سرد و گرم می توان 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 روش های تکمیلی استفاده می شوند که کانال کشی شرایط بهتری ایجاد می کند و با توجه به مجموع مقایسه های انجام شده، مناسب ترین مدل برای مدل مورد بررسی، حالت ۵ یعنی محفظه بندی راهروی سرد پیشنهاد می گردد.

مراجع

[1] C. Kurkjian, J. Glass, Meeting the needs of 24/7 data centers, ASHRAE Journal, 49(2) (2007) 24-35.

[2] Emerson, Reducing data center energy consumption by creating saving that cascade across systems, Energy Logic, (2007).

[3] Cho, J., kim, B.S., "Evaluation of air management systems thermal performance for superior cooling efficiency in high-density datacenters", Journal of the energy and buildings, 2003.

[4] N.M.S. Hassan, M.M.K. Khan, M.G. Rasul, Temperature Monitoring, and CFD Analysis of Data Centre, Procedia Engineering, 56 (2013) 551-559.

[5] R. Schmidt, M. Iyengar, Comparison between underfloor supply and overhead supply ventilation designs for data center high-density clusters, ASHRAE Transactions, 113 (Part 1) (2005).

[6] J. Cho, B.S. Kim, Evaluation of air management system's thermal performance for superior cooling efficiency in high-density data centers, Energy and Buildings, 43(9) (2011) 2145-2155.

[7] Y. Jiao, Y. Li, Thermal Analysis for Underground Data Centres in the Tropics, in Energy Procedia, World Engineers Summit – Applied Energy Symposium & Forum: Low Carbon Cities & Urban Energy Joint Conference, Singapore, (2017) 19-21.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-24]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.1.4.8]

[8] Z. Huang, K. Dong, Q. Sun, L. Su, T. Liu, Numerical Simulation and Comparative Analysis of Different Airflow Distributions in Data Centers, Procedia Engineering, 205 (2017) 2378-2385.

[9] S.A. Nada, K.E. Elfeky, Experimental investigations of thermal management solutions in data centers buildings for different arrangements of cold aisles containments, Journal of Building Engineering, 5 (2016) 41-49.

[10] C. Lyua, G. Chen, Y. Liu, Enclosed aisle effect on cooling efficiency in small scale data center, in Procedia Engineering, (2017) 3789-3796.

[11] Z. Song, Numerical investigation for performance indices and categorical designs of a fan-assisted data center cooling system, Applied Thermal Engineering, 118 (2017) 714-723.

[12] J. Cho, J. Woo, Development and experimental study of an independent row-based cooling system for improving the thermal performance of a data center, Applied Thermal Engineering, (2019) 114857.

[13] Sharma R.K., Bash C.E., Patel C.D.,"Dimensionless Parameters for Evaluation of Thermal Design and Performance of Large scale Data Centers"*American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA)*, 2002, pp. 3091–3101.

[14] M.K. Herrlin, Rack cooling effectiveness in data centers and telecom central offices: the rack cooling index (RCI), ASHRAE Transactions, 111(2) (2005) 1-11.

[15] M.K. Herrlin, Improved data center energy efficiency and thermal performance by advanced airflow analysis, in Proceedings of Digital Power Forum, (2007) 10-12.

[16] Nakao, M., Hayama, H., Nishioka, M, "Which cooling air supply system is better for a high heat density room:Under floor or overhead", Proceedings of international telecommunications energy conference (INTELEC), 12 (4),393-400, 1991.

[17] Noh, H., Song, K., Chun, S. K., "The cooling characteristic on the air supply and return flow system in the telecommunication cabinet room", Proceedings of international telecommunications energy conference (INTELEC),33(2), 777-84, 1998.

[18] Schmidt, R., Iyengar, M., "Comparison between underfloor supply and overhead supply ventilation designs for data center high-density clusters", ASHRAE Transactions, 113 (Part 1), 2005.

[19] Patel, C.D., Bash, C., Belady, L., Stahl, D. Sullivan, "Computational fluid dynamics modeling of high compute density data centers to assure system inlet air specifications", The pacific rim/ASME international electronics packaging technical conference and exhibition, IPACK2001-15622, 2001.

[20] Patel, C.D., Sharma, R., Bash, C., Beitelmal, M., "Thermal considerations in cooling of large scale high compute density data centers", Intersociety conference on thermal and thermomechanical phenomena in electronic systems, 767-776, 2002.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-24]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.1.4.8]

چکیده انگلیسی:

Investigation of air distribution methods of cooling system for equipments of a data center

Mohammad Khodabandeh*, Nader Pourmahmoud, Iraj Mirzaie

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

Received: February 2021, Accepted: May 2021

Abstract

Data centers are places that house servers and IT equipment. Network and IT rack is hardware that houses hardware modules such as servers, storage, switches and communications equipment, and UPS and other network equipment. Thus, in a suitable and safe environment, it provides coherent floors for storing network equipment. Due to the constant release of heat from the racks, the management of air distribution systems and cooling systems in data centers to prevent damage due to high heat is of particular importance. The purpose of managing air distribution systems is to solve problems in data center cooling, including minimizing the return of hot air, cold air bypassing, and eliminating hotspots, as well as reducing the high costs of cooling systems and their efficiency. In this regard, various parameters for estimating air flow and temperature efficiency in a data center were investigated in this study. As a result of the studies, it was found that by enclosing hot and cold corridors, the inlet air temperature can be increased. We will go higher than the allowed limit and we will have less energy loss and better efficiency. Return air ducting and partitioning of false floor are used as complementary methods that create better ducting conditions and according to all the comparisons made, the most suitable model for the model under study, cold corridor enclosure was suggested.

Key words: Data center, Air distribution management, Numerical simulation, Temperature indicators.

*corresponding author: **M.khodabandeh@urmia.ac.ir**

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-24]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.1.4.8]