J. Energy Conversion
Volume: 10, Issue: 4, 2024: 59-75

نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)

دوره ۱۰، شماره ۴، زمستان۱۴۰۲، ص: ۵۹-۷۵

ارزیابی جریان هوا و توزیع دمای یک مرکز داده با تراکم حرارتی بالا با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

نگین معلمی خیاوی[۱]، عسگر مینایی[۲و*]

۱- دانش‌آموخته دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، negin.moallemi93@gmail.com
*۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، a.minaei@uma.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۱، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۱۱، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۸

چکیده

در مقاله حاضر، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی الگوی جریان هوا و توزیع دما برای یک مرکز داده با تراکم حرارتی بالا ارائه شده است. مرکز داده توسط نرم‌افزار انسیس ایرپک به منظور ارزیابی سیستم خنک‌کاری به‌کاررفته در این مرکز، شبیه‌سازی شده است. سالن مرکز داده در نظر گرفته شده، یک مرکز با تراکم حرارتی نسبتاً بالا است به‌طوری‌که تولید حرارت کلی ایجاد شده در آن برابر ۲۲۷/۲ کیلووات است. چیدمان در نظر گرفته شده برای این مرکز داده به‌صورت پیکربندی راهرو سرد و گرم بوده و دو واحد تهویه‌مطبوع برای تولید هوای سرد در آن تعبیه شده است. در این شبیه‌سازی یک آنالیز سه‌بعدی از جریان هوای سرد و گرم در داخل مرکز داده ارائه شده است و سپس نواحی دما بالا و نواحی برگشت هوای گرم پیش‌بینی شده است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که در قسمت ورودی رک سرورهای با تراکم حرارتی بالاتر، ناحیه‌هایی با دمای ۳۲/۷ درجه سلسیوس تشکیل شده است که بالاتر از حد مجاز تعیین شده توسط استاندارد اشری (محدوده دمای بین ۱۸ تا ۲۷ درجه سانتی‌گراد) است. اما توزیع دمای رک سرورهای با تراکم حرارتی پایین‌تر کاملاً منطبق با محدوده دمای مجاز است. همچنین در راهروهای سرد، هوای داغ خروجی در حال چرخش مجدد بوده و با هوای سرد عرضه شده مخلوط می‌شود. مدل ارائه شده در پژوهش حاضر دارای توانایی ارزیابی الگوی جریان هوا، توزیع دما و بارهای حرارتی به‌منظور طراحی مراکز داده جدید و یا بهینه‌سازی مراکز داده موجود به‌منظور کاهش مشکلات موجود در زمینه خنک‌سازی مراکز داده از جمله برگشت هوای گرم و پس‌خوراند هوای سرد است.

***عهده‌دار مکاتبات** : a.minaei@uma.ac.ir

کلمات کلیدی: سرمایش مرکز داده، دینامیک سیالات محاسباتی، کاهش مصرف انرژی، نواحی دما بالا

۱- مقدمه

مرکز داده یک مخزن متمرکز شامل تجهیزات الکترونیکی، زیرساخت‌های ارتباطی/امنیتی و سرویس گرها است که برای ذخیره، پردازش، مدیریت و انتشار داده‌ها و اطلاعات سازماندهی شده در یک مجموعه‌ی خاص یا مربوط به یک تجارت و کسب‌وکار خاص به کار گماشته می‌شود [۱]. در جهان امروزی، باتوجه‌به پیشرفت‌های روزافزون در تکنولوژی سخت‌افزارها و نرم‌افزارهای کامپیوتری، لازم است که تجهیزات پیشرفته پردازشگر و ذخیره‌ساز موجود در مراکز داده با حداکثر توان و پتانسیل به عملکرد خود ادامه دهند. از طرف دیگر فرایند خنک‌سازی مراکز داده به دلیل تولید حرارت بیش از حد در این مراکز، اغلب نیازمند مصرف انرژی زیادی است [۲]. در واقع مدیریت حرارتی تجهیزات مراکز داده به‌شدت به چگونگی توزیع

نحوه استناد به این مقاله: نگین معلمی خیاوی، عسگر مینایی. ارزیابی جریان هوا و توزیع دمای یک مرکز داده با تراکم حرارتی بالا با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی.
مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۲; ۱۰ (۴) : ۵۹- ۷۵

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

هوای خنک وابسته است؛ بنابراین در این مراکز نیاز به ابزاری برای ارزیابی و طراحی محیط حرارتی به‌منظور اطمینان از خنک‌کاری مؤثر تجهیزات الکترونیکی بدون نیاز به مصرف بیش از حد انرژی احساس می‌شود [۳]. شبیه‌سازی عددی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، یک ابزار مهم برای بهینه‌سازی عملکرد کلی تجهیزات الکترونیکی به شمار می‌رود که دارای قابلیت شبیه‌سازی انتقال حرارت و جریان هوا در این مراکز است؛ بنابراین می‌توان با به‌کارگیری دینامیک سیالات محاسباتی و با پیش‌بینی نواحی دما بالا و مطالعه تأثیر پارامترهای مختلف روی عملکرد فرایند سرمایش، از افزایش بیش از حد دما در مراکز داده جلوگیری کرد [۴]. در سال‌های اخیر پژوهش‌های زیادی در زمینه مدیریت حرارت تولیدشده در مراکز داده و ارزیابی سیستم‌های خنک‌کننده در این مراکز انجام شده است که نشان‌دهنده اهمیت توزیع مناسب هوای سرد برای عملکرد مناسب سرورها است. باتوجه‌به پژوهش انجام شده توسط گنگ و همکاران [۵] می‌توان اظهار داشت که پژوهش‌های مربوط به سرمایش مراکز داده شامل چهار بخش کلی مدیریت توزیع هوا، بررسی روش‌های خنک‌کاری، سیستم‌های تهویه‌مطبوع و بهینه‌سازی مصرف انرژی است. عباس و همکاران [۶] با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت به بررسی کارایی و تأثیر دو نوع پیکربندی هم تراز/پلکانی[1] واحدهای خنک‌کاری در سیستم خنک‌کاری ردیفی[2] در مراکز داده پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان می‌دهد که پیکربندی ردیفی دارای عملکرد حرارتی و کارایی انرژی بالاتری است و همچنین شاخص عملکرد حرارتی و کارایی انرژی برای رک‌های[3] میانی به‌خصوص در آرایش پلکانی بهتر از رک‌های انتهایی است. خدابنده و همکاران [۷] با استفاده از شبیه‌سازی عددی، تأثیر روش‌های توزیع هوا و حالت‌های مختلف طراحی سیستم خنک‌کاری اتاق سرور را روی میزان خنک‌سازی مراکز داده بررسی کردند. نتایج ایشان نشان می‌دهد که محفظه بندی راهروهای سرد و گرم در مراکز داده موجب کاهش اتلاف انرژی و افزایش کارایی سیستم خنک‌کاری می‌شود. چو و همکاران [۸] یک مطالعه تجربی در مورد جایگزینی سیستم خنک کننده محیطی با سیستم خنک کننده ردیفی در کره انجام دادند. در این مطالعه از شش شاخص عملکرد برای مقایسه بین دو سیستم استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که خنک‌سازی ردیفی به دبی کمتری نسبت به خنک‌کننده محیطی نیاز دارد و دمای هوای مورد نیاز در سیستم خنک سازی ردیفی بالاتر از دمای مورد نیاز در شرایط خنک‌سازی محیطی است. شیتا و ساها [۹] یک مطالعه عددی بر روی مدیریت حرارتی مرکز داده با استفاده از رویکرد محیط متخلخل برای شبیه‌سازی سرورها انجام دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که رویکرد محیط متخلخل برای شبیه سازی سرورها موثر است و می تواند برای طراحی مراکز داده استفاده شود. معظمی گودرزی و همکاران [۱۰] تأثیر پیکربندی خنک‌کننده را بر عملکرد مرکز داده با مدنظر قرار دادن میزان جریان هوای مورد نیاز هر پیکربندی مطالعه کردند. بعدها معظمی گودرزی و همکاران [۱۱] از اصل یادگیری ماشین برای مدلسازی توزیع دما استفاده کردند. نتایج ایشان نشان داد که افزایش نرخ جریان هوا به میزان ۱۰ درصد باعث افزایش ۷ درصدی مصرف برق خنک کننده می‌شود.

ماکدو و همکاران [۱۲] با استفاده از روش عددی و به‌صورت پارامتری عملکرد حرارتی و توزیع هوا در یک مرکز داده با ۲۰۸ رک سرور تحت بارهای حرارتی و سرعت جریان هوای مختلف را ارزیابی کردند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که امکان بهبود عملکرد حرارتی و توزیع یکنواخت هوا در داخل مرکز داده بدون اختلال در عملکرد واقعی رک سرورها وجود دارد. ژانگ و همکاران [۱۳] به بررسی حالت بهینه در بین هشت ساختار مختلف کانال توزیع هوای زیر کفی تی‌شکل به‌صورت عددی پرداختند. نتایج ایشان نشان می‌دهد که با طراحی شبکه کانال هوای زیرین تی‌شکل با ساختار بهینه، توزیع جریان هوا در مرکز داده موردمطالعه بهبود پیدا کرده و انحراف استاندارد دمای کلی هوای ورودی و خروجی هر رک سرور در محدوده قابل‌قبول و استاندارد به‌دست می‌آید. واتسون و ونکیتسواران [۱۴] با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به بررسی کارایی دو نوع سیستم سرمایش برای خنک‌کاری مراکز داده پرداختند. نادا و سعید [۱۵] به‌صورت عددی تأثیر نحوه

[1] Aligned/staggered
[2] In-rows cooling
[3] Rack

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

جانمایی و پیکربندی واحدهای تهویه‌مطبوع اتاق کامپیوتر[1] را روی توزیع هوا در داخل مرکز داده، مدیریت حرارتی و همچنین شاخص گرمای برگشتی، شاخص گرمای تولیدی و شاخص دمای برگشتی مطالعه کردند. نتایج ایشان نشان می‌دهد که جانمایی واحدهای تهویه‌مطبوع به‌صورت عمود بر ردیف رک‌ها باعث ایجاد توزیع هوای یکنواخت از دریچه‌های توزیع هوای سرد شده و همچنین باعث بهبود شاخص‌های عملکردی ذکر شده و کاهش رسیرکولاسیون هوای داغ در انتهای ردیف رک سرورها می‌گردد. نادا و سعید [۱۶] در یک پژوهش دیگر به‌صورت عددی تأثیر ارتفاع پلنوم هوای برگشتی را روی عملکرد حرارتی و توزیع هوا در مراکز داده بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که افزایش ارتفاع پلنوم سقفی موجب غیریکنواختی جریان هوا، افزایش احتمال رسیرکولاسیون هوای داغ در قسمت بالایی رک سرورها و بای-پس هوای سرد در قسمت انتهایی ردیف رک‌ها می‌گردد. ایشان باتوجه‌به نتایج به‌دست‌آمده در نهایت ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر را به‌عنوان ارتفاع مناسب برای پلنوم سقفی در مراکز داده پیشنهاد دادند. دیاز و همکاران [۱۷] یک تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی برای بررسی درصد مصرف برق هر یک از اجزاء سیستم خنک کننده در مراکز داده انجام دادند. آنها گزارش دادند که حدود ۳۸ درصد از کل توان ورودی به مرکز داده فقط برای خنک کردن استفاده می‌شود. آنها دریافتند که چیلر بالاترین مصرف انرژی را در مورد رک‌های با چگالی بالا دارد. در حالی که برای قفسه‌های با چگالی کم، برج خنک کننده دارای بیشتر برق مصرفی می‌باشد. نادا و همکاران [۱۸] تأثیر استفاده از پیکربندی‌های مختلف واحدهای تهویه مطبوع را بر عملکرد سیستم خنک‌سازی مطالعه کردند و دریافتند که استفاده از چیدمان توزیع‌شده واحدهای تهویه مطبوع عملکرد حرارتی بهتری نسبت به استفاده از چیدمان متمرکز دارد. در مطالعه عددی دیگری، نادا و همکاران [۱۹] تأثیر تغییر فضاهای بین واحدهای تهویه مطبوع و رک سرورها را مطالعه کردند. آنها دریافتند که با افزایش فاصله بین واحد تهویه مطبوع و راهروی سرد، نرخ جریان هوا از کاشی‌های سوراخ‌دار کاهش می‌یابد که به نوبه خود بر شاخص‌های عملکردی تأثیر منفی می‌گذارد. گائو و همکاران [۲۰] به بررسی الگوی جریان هوا در یک مرکز داده مجهز به سیستم تامین هوای زیر کف، با استفاده از شبیه سازی عددی پرداختند. ایشان برای بهینه سازی سیستم خنک‌کاری، استراتژی‌هایی از جمله خالی کردن فضای قفسه استفاده نشده، افزودن پارتیشن‌های عمودی و تا حدی محصور کردن راهروهای سرد اتخاذ کردند. نتایج ایشان نشان می‌دهد که محصور کردن راهروهای سرد بیشترین تاثیر را در عملکرد و بهینه‌سازی سیستم خنک‌کاری داشته است. حسن و همکاران [۲۱] یک مدلسازی دینامیک سیالات محاسباتی از جریان هوا، توزیع دما و توزیع فشار در یک مرکز داده واقع در استرالیا ارائه کردند. در پژوهش ایشان، از تکنیک‌های پارامتریک و بهینه‌سازی برای تعیین بهترین طرح ممکن برای استراتژی‌های خنک‌سازی استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی، نواحی دما بالا در مرکز داده را پیش‌بینی کرده و یک تجزیه و تحلیل سه بعدی دقیق از حرکت هوای سرد در داخل مرکز داده ارائه می‌دهد.

هدف از ارائه پژوهش حاضر بررسی عددی توزیع دما و جریان هوا در یک مرکز داده شامل چهار ردیف رک سرور با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی است که دو ردیف از این رک سرورها دارای تولید بارحرارتی نسبتاً زیادی هستند. باتوجه‌به پژوهش‌های انجام شده در این زمینه می‌توان اظهار داشت که چیدمان ردیفی و پیکربندی راهرو سرد/گرم عملکرد بهتری در زمینه خنک‌سازی مراکز داده از خود نشان داده است؛ بنابراین در این پژوهش، چیدمان ردیفی شامل راهروی سرد و گرم برای مرکز داده مورد مطالعه انتخاب شده است.

۲- مرکز داده موردمطالعه

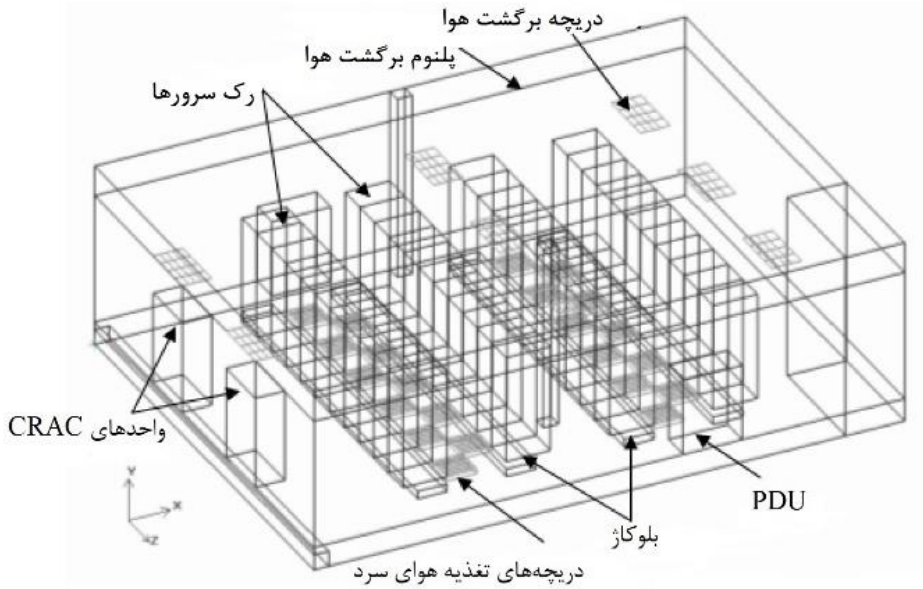
مرکز داده موردنظر در این پژوهش، یک سالن به ابعاد ۴×۹×۱۲ مترمکعب است. شکل شماتیک این مرکز داده در شکل ۱ نشان‌داده‌شده است. همان‌طور که در شکل ۱ نشان‌داده‌شده است، در این مرکز داده یک پلنوم برگشت هوای گرم سقفی به

[1] CRAC (Computer room air conditioning)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

ارتفاع ۰/۶ متر و همچنین یک پلنوم تغذیه هوای سرد از زیر کف به ارتفاع ۰/۴۵ متر تعبیه شده است. این مرکز داده شامل چهار ردیف رک سرور است و هر ردیف شامل ۱۱ کابینت رک است که به‌صورت راهروهای گرم و سرد چیدمان شده‌اند.

لازم به ذکر است که در دو ردیف، رک سرورهایی با بار حرارتی ۳ کیلووات و در دو ردیف دیگر رک سرورهایی با تراکم حرارتی بالا و با بار حرارتی ۷ کیلووات قرار گرفته‌اند. دریچه‌های توزیع هوای سرد در کف راهروی سرد به‌صورت پیکربندی پلکانی قرار گرفته‌اند. علاوه بر این‌ها باتوجه‌به شکل ۱، دو دستگاه توزیع برق نیز در داخل سالن قرار گرفته‌اند که جهت مدیریت توزیع برق از آن استفاده می‌شود. بار حرارتی و ابعاد منابع حرارتی موجود در سالن مرکز داده به‌صورت خلاصه در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱: شکل شماتیک مرکز داده موردمطالعه

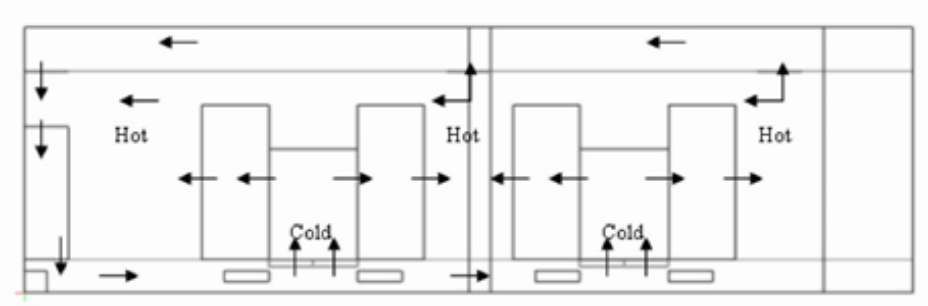
جدول ۱: ابعاد و بار حرارتی منابع حرارتی موجود در مرکز داده

منابع حرارتی	تعداد	ابعاد	بارحرارتی
		m^3	kW
رک سرور با بار حرارتی کمتر	۲۲	۰/۶×۰/۹×۲	۳
رک سرور با بار حرارتی بیشتر	۲۲	۰/۶×۰/۹×۲	۷
واحد توزیع برق	۲	۱/۲×۰/۶×۱/۵	۳/۶

در مرکز داده موردمطالعه در این پژوهش، دو واحد تهویه‌مطبوع جهت تولید هوای سرد در نظر گرفته شده که هر کدام از آنها دارای نرخ جریان هوای ۷/۲۱ مترمکعب بر ثانیه بوده و جریان هوای سرد با دمای ۱۲/۷۸ درجه سلسیوس به‌منظور خنک‌کاری رک سرورها تولید می‌کنند. هوای سرد ایجاد شده در واحدهای تهویه‌مطبوع، از طریق دریچه‌های تعبیه شده در کف راهروی سرد وارد فضای داخلی راهروی سرد شده و از آنجا وارد رک سرورها شده و بعد از خنک‌کاری تجهیزات الکترونیکی، هوای گرم ایجاد شده از پشت رک سرورها وارد راهروی گرم شده و از طریق دریچه‌های موجود در سقف راهروی

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

گرم وارد پلنوم برگشت سقفی شده و در نهایت دوباره وارد به واحدهای تهویه‌مطبوع می‌گردد. شکل شماتیک جریان هوا داخل مرکز داده در شکل ۲ نشان‌داده‌شده است.



شکل ۲: چیدمان راهرو سرد و گرم و مسیر جریان هوا در داخل سالن مرکز داده

۳- شبیه‌سازی عددی

در پژوهش حاضر، برای مدل‌سازی عددی مرکز داده موردمطالعه، از نرم‌افزار ایرپک[1] بهره گرفته شده است که از زیرمجموعه‌های شرکت انسیس بوده و نرم‌افزاری قدرتمند در شبیه‌سازی جریان و انرژی در ساختمان و همچنین بررسی سیستم‌های تهویه مطبوع است.

۳-۱-معادلات حاکم

معادلات حاکم بر مسئله برای یک میدان جریان سه‌بعدی، تراکم‌ناپذیر و در حالت پایا حل شده‌اند. باتوجه‌به این که جریان سیال، از نوع جریان آشفته است علاوه بر معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی باید یک مدل توربولانس نیز برای مدل‌سازی اثرات اغتشاش به کار گرفته شود که در این پژوهش از مدل معروف k-ε استاندرد استفاده شده است. بیشتر مطالعات موجود در زمینه حل عددی در مراکز داده از روش k-ε استاندارد برای در نظر گرفتن اثرات آشفتگی استفاده کرده‌اند[۷، ۹، ۱۲، ۱۵و ۱۶]. در واقع مدل k-ε استاندارد، برای حل تنش رینولدز در معادلات مومنتوم اغتشاشی به کار گرفته می‌شود. معادلات حل شده برای شبیه‌سازی جریان هوا در مرکز داده موردمطالعه به شرح زیر هستند[۲۲]:

معادله بقای جرم:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \qquad (۱)$$

معادله بقای مومنتوم:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left((\mu + \mu_t)\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) + g_i\beta(T - T_0) \qquad (۲)$$

که در آن p فشار استاتیکی، μ ویسکوزیته دینامیکی سیال، μ_t ویسکوزیته دینامیکی آشفته سیال، g شتاب گرانش و β نشان دهنده ضریب انبساط حرارتی است.

معادله بقای انرژی:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E + P)] = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(k_{eff}\frac{\partial T}{\partial x_i}\right) + S_h \qquad (۳)$$

[1] Airpack

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

که در آن E انرژی کل و S_h منبع حرارتی و k_{eff} رسانایی موثر است.

$$k_{eff} = k + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \quad (۴)$$

معادله‌های انتقال انرژی جنبشی اغتشاشی (k):

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k})\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon \quad (۵)$$

معادله انتقال نرخ اتلاف انرژی جنبشی اغتشاشی (ε):

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon})\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \quad (۶)$$

که در این معادلات، G_k نشان‌دهنده تولید انرژی جنبشی آشفته ناشی از گرادیان‌های میانگین سرعت و G_b تولید انرژی جنبشی آشفته ناشی از شناوری است. $C_{1\epsilon}$، $C_{2\epsilon}$ و $C_{3\epsilon}$ ثابت هستند. σ_k و σ_ϵ به ترتیب اعداد پرانتل آشفته برای k و ϵ هستند.

ویسکوزیته اغتشاشی در مدل k-ε از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (۷)$$

برای حل و گسسته‌سازی معادلات حاکم بر مسئله، از روش حجم محدود در نرم‌افزار ایرپک استفاده شده و همچنین برای ارتباط‌دادن بین میدان سرعت و فشار، الگوریتم معروف سیمپل به کار گرفته شده است. لازم به ذکر است که به‌منظور دستیابی به دقت بالا در محاسبات، از روش مرتبه دوم برای گسسته‌سازی ترم‌های جابجایی و نفوذ استفاده شده است.

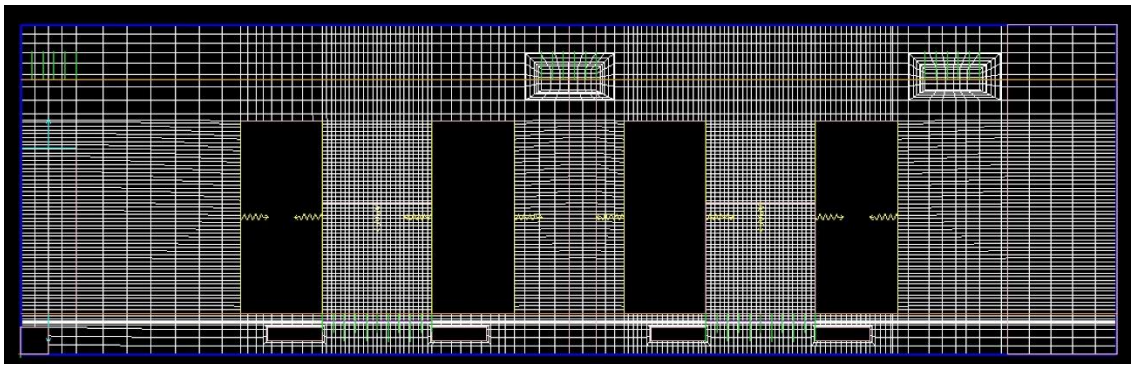
۳-۲- شرایط مرزی

در این پژوهش، همه دیوارها، سقف سالن، کف سالن و پلنوم رفت‌وبرگشت هوا به صورت عایق در نظر گرفته شده‌اند. برای واحدهای تهویه‌مطبوع، دو دریچه هوای ورودی و خروجی به ترتیب در کف و قسمت بالایی آنها در نظر گرفته شده است. دبی حجمی و دمای هوا برای این دریچه‌ها به ترتیب ۷/۲۱ مترمکعب بر ثانیه و ۱۲/۷۸ درجه سلسیوس است. همچنین شرایط مرزی برای رک سرورهای تعبیه شده در مرکز داده و واحدهای توزیع برق به‌صورت شار حرارتی ثابت (مقدار بار حرارتی در جدول ۱ ذکر شده است) در نظر گرفته شده است. علاوه بر این قسمتی از رک سروها که داخل راهرو سرد قرار دارند به‌عنوان ورودی هوای سرد و قسمتی از آنها که در راهرو گرم قرار دارند به‌عنوان خروجی هوای گرم تعریف شده‌اند. همه‌ی دریچه‌های تعبیه شده در کف راهرو سرد به‌صورت دریچه ورودی هوای سرد و دریچه‌های تعبیه شده در سقف راهرو گرم به‌عنوان دریچه‌های خروجی هوای گرم لحاظ شده‌اند.

۳-۳- شبکه بندی

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

به منظور تجزیه و تحلیل دقیق الگوی جریان هوا، ایجاد یک شبکه‌بندی دقیق برای فضای محاسباتی ضروری است. در این پژوهش، یک نوع شبکه‌بندی شش وجهی بی سازمان[1] انتخاب شده و پس از بررسی استقلال از شبکه، تعداد شبکه‌بندی نهایی نزدیک به ۱/۸ میلیون المان به دست آمده است. لازم به ذکر است که برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر، مش‌بندی در اطراف منابع حرارتی موجود در فضا ریزتر از سایر نواحی در نظر گرفته شده است. نمایی از مش‌بندی نهایی برای فضای محاسباتی در نظر گرفته شده، در شکل ۳ نشان داده شده است.



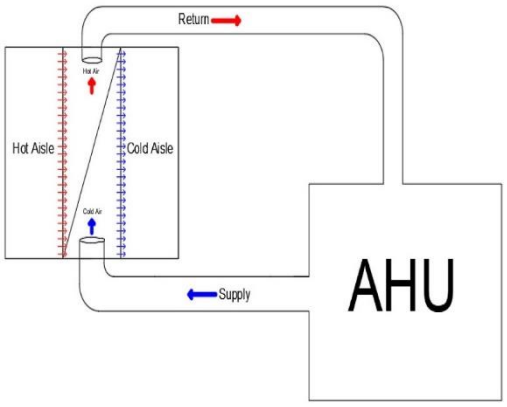
شکل۳: شبکه‌بندی نهایی برای فضای محاسباتی مربوطه

۳-۴- اعتبارسنجی

در این پژوهش برای اعتبارسنجی نتایج به‌دست‌آمده با نرم‌افزار ایرپک از مدل آزمایشگاهی محمد و همکاران [۲۳] استفاده شده است. مدل تجربی ذکر شده یک محفظه در مقیاس کوچک و به ابعاد ۳۳×۴۲×۴۵ سانتی‌متر مکعب است و دیواره‌های آن از ورقه‌های پلکسی - گلس ساخته شده است. شکل شماتیک نمای جانبی مدل آزمایشگاهی محمد و همکاران، در شکل ۴ نشان داده‌شده است. این مدل آزمایشگاهی شامل دو عدد رک سرور است که به‌صورت ردیفی چیده شده‌اند. علاوه بر این‌ها یک دستگاه هواساز[2] به‌منظور ایجاد هوای سرد برای این محفظه در نظر گرفته شده است. دریچه تغذیه هوای سرد در کف محفظه و در بین رک سرورها و دریچه برگشت هوای گرم در سقف محفظه تعبیه شده است. هوای سرد با دمای ۲۲/۵ درجه سلسیوس از دمنده واقع در فضای بین دو رک سرور وارد محفظه شده و پس از خنک‌کاری رک‌ها وارد راهرو گرم می‌شود و سپس از طریق مکنده تعبیه شده در سقف محفظه، دوباره وارد واحد هواساز می‌گردد. توان حرارتی در نظر گرفته شده برای محفظه موردنظر، ۲/۱۶ کیلووات بر مترمربع است.

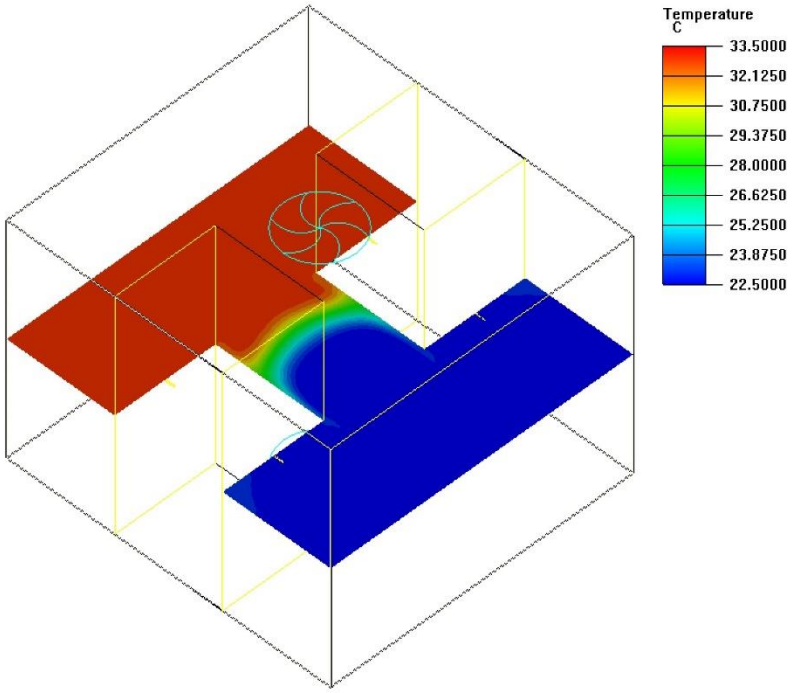
[1] Hexa unstructured
[2] AHU (Air Handling Unit)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]



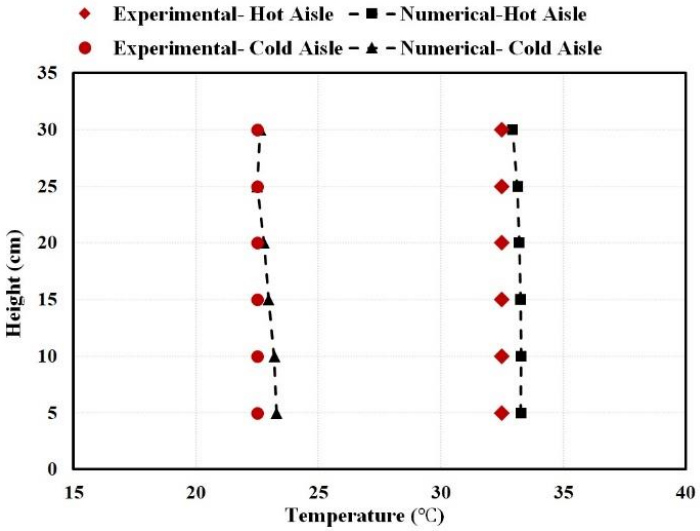
شکل ۴. شکل شماتیک نمای جانبی مدل آزمایشگاهی ساخته شده توسط محمد و همکاران [۲۳]

در شکل ۵، توزیع دمای به‌دست‌آمده از مدل عددی نشان‌داده‌شده است. همچنین در شکل ۶، توزیع دمای به‌دست‌آمده در راهرو گرم و سرد در راستای ارتفاع رک سرورها با نتایج تجربی مقایسه شده است.



شکل ۵: کانتور دمای به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عددی برای راهرو گرم و سرد

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]



شکل ۶: مقایسه توزیع دمای راهرو سرد و گرم در راستای ارتفاع رک سروها

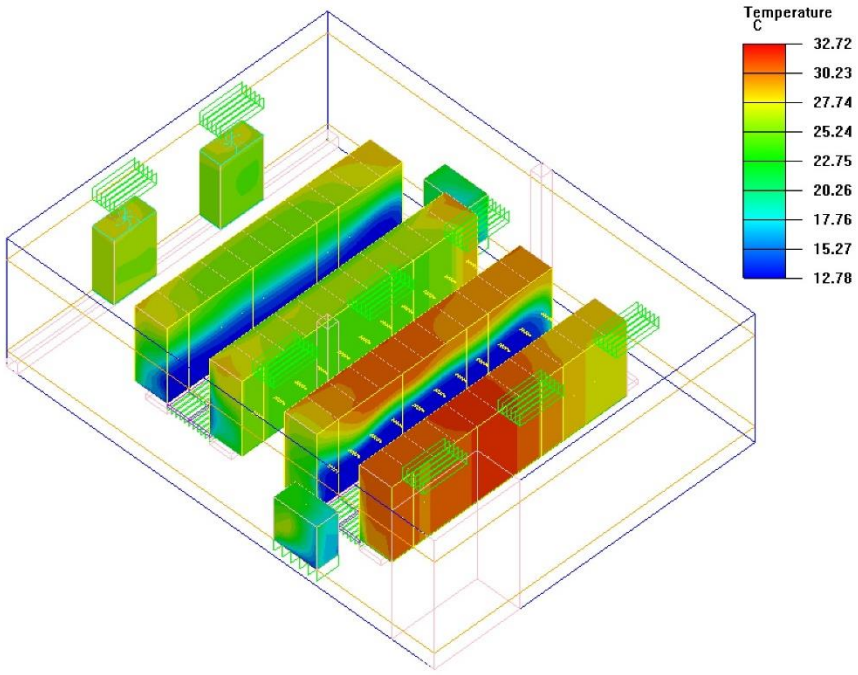
باتوجه‌به شکل ۶، تطابق خیلی خوبی بین نتایج تجربی و عددی مشاهده می‌گردد به‌طوری‌که ماکزیمم خطای مشاهده شده بین نتایج عددی و تجربی برای راهرو گرم حدود ۳/۵ درصد و برای راهرو سرد حدود ۲/۳ درصد است.

۴- بحث و نتایج

در این پژوهش یک مرکز داده به‌منظور ارزیابی جریان هوا و پیش‌بینی نواحی بحرانی به‌منظور افزایش کارایی سیستم سرمایشی، به‌صورت عددی شبیه‌سازی شده است. مرکز داده در نظر گرفته شده دارای تولید حرارت نسبتاً بالا بوده و همچنین دارای چیدمان راهرو سرد و گرم است. علاوه بر این، یک پلنوم تغذیه هوای سرد زیر کف و یک پلنوم هوای گرم برگشتی سقفی در آن تعبیه شده است. مطابق با استاندارد اشری [۲۴]، دمای مجاز ورودی به رک سرورها برای جلوگیری از گرم‌شدن بیش از حد[1] آنها بهتر است در محدوده ۱۸ الی ۲۷ درجه سلسیوس باشد؛ بنابراین با درنظرگرفتن محدوده مجاز دمای ورودی تعیین شده توسط استاندارد اشری [۲۴] برای رک سرورها، ارزیابی کانتورهای دمایی در جهت‌های طولی و عرضی در قسمت‌های مختلف مرکز داده و تحلیل الگوی جریان می‌تواند تحلیل درستی از نواحی احتمالی تشکیل نواحی دما بالا در داخل سالن ارائه دهد. در شکل ۷ توزیع دمای به‌دست‌آمده برای رک سرورها، واحدهای تهویه‌مطبوع و واحدهای توزیع برق نشان‌داده شده است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، نواحی دما بالا با دماهای بیش از ۲۷ درجه سلسیوس در ورودی (راهرو سرد) رک سرورهای با تراکم حرارتی ۷ کیلووات و همچنین در قسمت پشت آنها (راهرو گرم) ایجاد شده‌اند. اما توزیع دمایی رک سرورهای با تولید حرارت ۳ کیلووات هم در قسمت ورودی و هم در قسمت خروجی بین ۱۲/۷ و ۲۷ درجه سلسیوس است که مطابق با محدوده دمایی مجاز استاندارد اشری[۲۴] است.

[1] Overheating

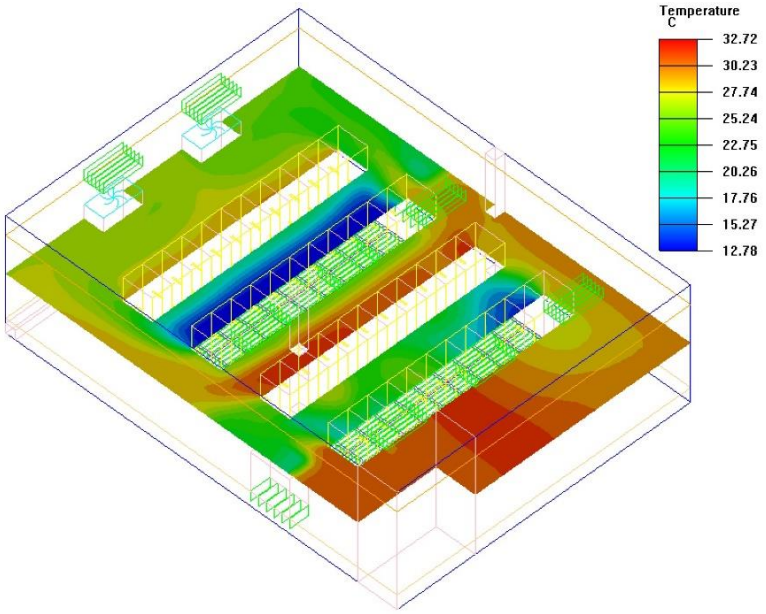
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]



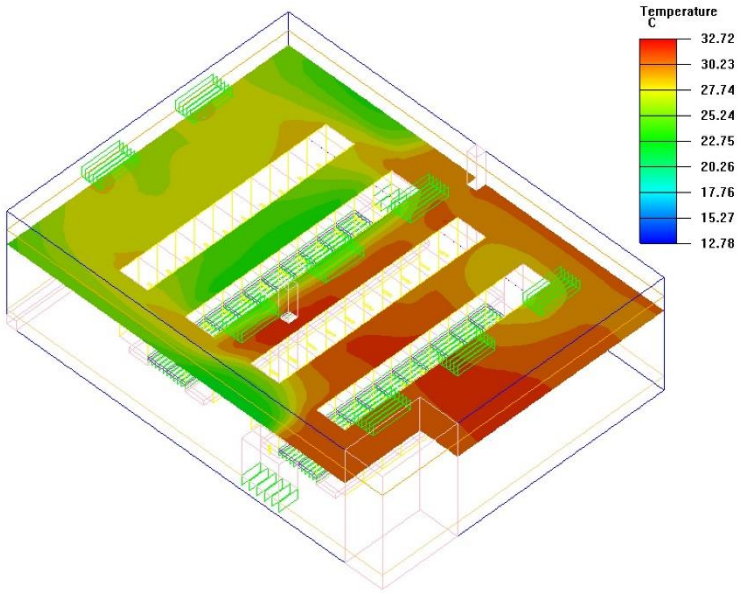
شکل ۷: توزیع دمای رک سرورها، واحدهای تهویه‌مطبوع و واحدهای توزیع برق

کانتور دمای به‌دست‌آمده در صفحه x-z و در ارتفاع‌های ۱/۵ متری و ۲ متری از کف سالن داده به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده است. هدف از بررسی کانتور دما در ارتفاع‌های مختلف، بررسی احتمال افزایش دما در راستای ارتفاع رک سرورها است. همچنین با بررسی توزیع دما در ارتفاع ۲ متری که در واقع قسمت انتهایی رک سرورها است به‌راحتی می‌توان احتمال برگشت هوای گرم به داخل راهرو سرد را بررسی کرد. با مقایسه شکل‌های ۸ و ۹ می‌توان اظهار داشت که هم در راهرو گرم و هم در راهرو سرد هر دو ردیف کابینت‌ها با افزایش ارتفاع، دمای هوا افزایش می‌یابد و همچنین گرادیان دمایی در ارتفاع بالاتر بیشتر از ارتفاع پایین‌تر است. اما در ردیف رک سرورهای با توان حرارتی کمتر، ماکزیمم دما از حد مجاز یعنی ۲۷ درجه سلسیوس تجاوز نمی‌کند درحالی‌که نواحی دما بالا با دمای ۳۲/۷ درجه سلسیوس در ارتفاع ۲ متری در راهروهای گرم و سرد مربوط به رک سرورهای با تراکم حرارتی بالا ایجاد شده‌اند. همچنین با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود هوای داغ خروجی در ارتفاع ۲ متری در راهروی سرد در حال چرخش مجدد بوده و با هوای سرد عرضه شده مخلوط می‌شود.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]



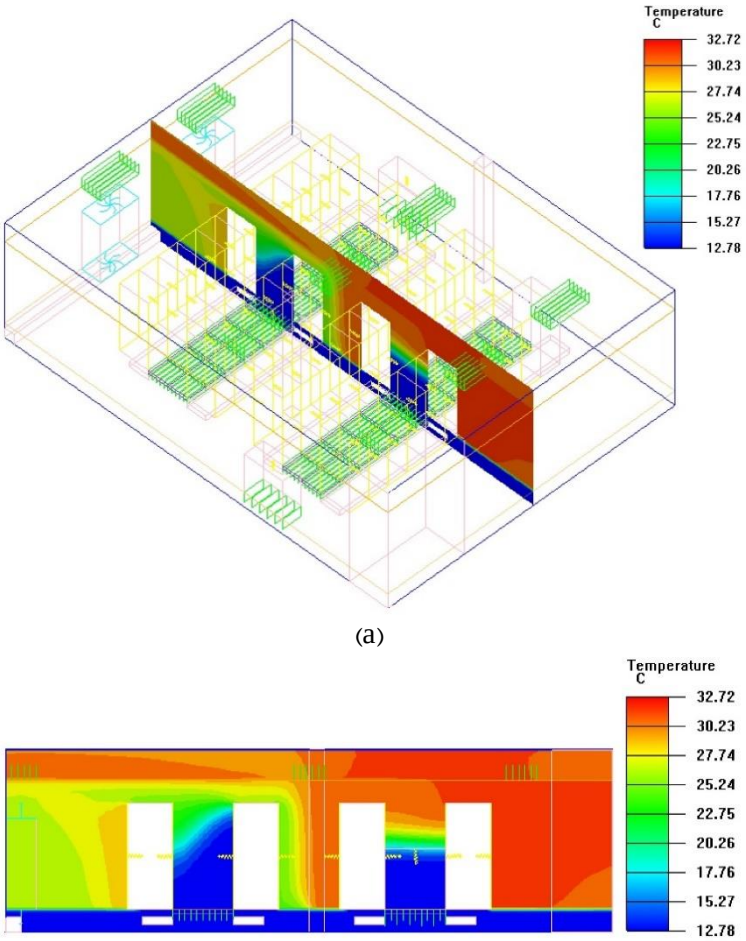
شکل ۸: کانتور دما در ارتفاع ۱/۵ متر از کف سالن داده



شکل ۹: کانتور دما در ارتفاع ۲ متر از کف سالن داده

در شکل ۱۰، کانتور دما در جهت طولی سالن مرکز داده و در عرض ۴/۵ متری و در دو نمای ایزومتریک و نمای از روبرو نشان‌داده‌شده است. همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان‌داده‌شده است، نواحی دما بالا با دمای ۳۲/۷ درجه سلسیوس در قسمت ورودی رک سرورهای ۷ کیلووات ایجاد شده است درحالی‌که محدوده دمای ورودی رک سرورهای ۳ کیلووات در محدوده مجاز اشری [۲۴] قرار دارد. در ضمن ناحیه بحرانی از نظر تشکیل نواحی دما بالا در قسمت انتهایی مرکز داده یعنی قسمت پشتی آخرین ردیف از رک سرورها به طور کامل مشهود است، به‌طوری‌که دمای هوا در این ناحیه حدود ۳۳ درجه سلسیوس است.

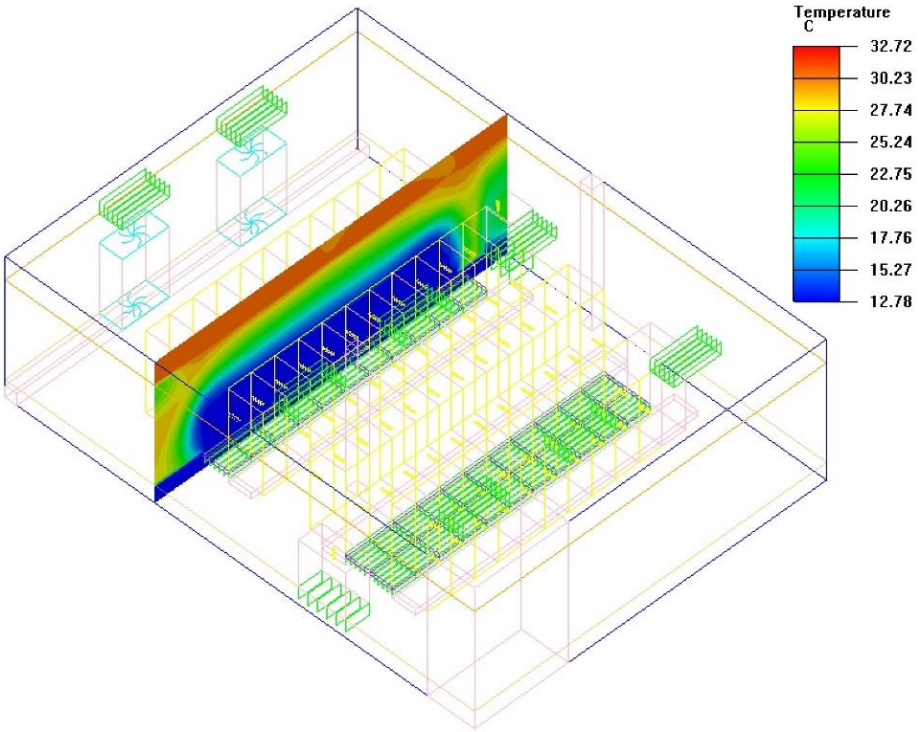
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]



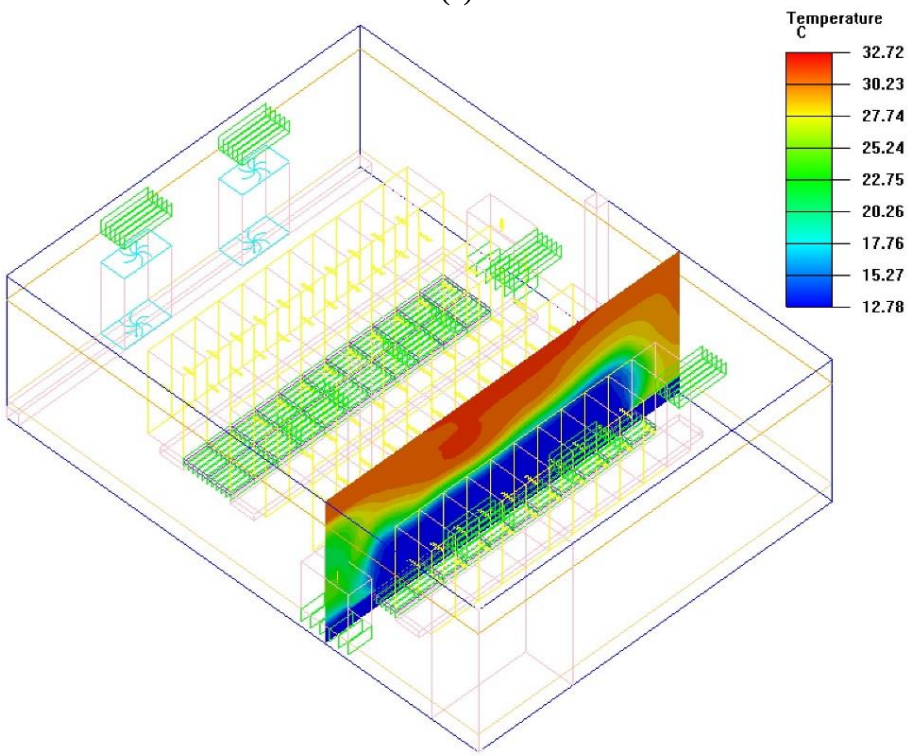
شکل ۱۰: کانتور دما در جهت طولی سالن داده (a) نمای ایزومتریک (b) نمای روبرو

در شکل ۱۱، کانتور دما در جهت عرضی مرکز داده و در قسمت راهروهای سرد مربوط به هر دو ردیف رک سرورها نمایش‌داده‌شده است. لازم به ذکر است که با ارزیابی کانتور دمای عرضی در راهروهای سرد به‌خوبی می‌توان نحوه عملکرد سیستم خنک‌کاری را از نظر برگشت هوای گرم و تشکیل نواحی دما بالا در قسمت ورودی رک سرورها بررسی کرد؛ بنابراین با درنظرگرفتن شکل۱۱ باتوجه‌به مطالب ذکر شده، می‌توان اظهار داشت که در راهرو سرد رک سرورهای با تراکم حرارتی بالا گرادیان دمایی نسبت به راهروی سرد رک سرورهای با تراکم حرارتی پایین‌تر، بیشتر است و همچنین نقاطی با دمای بالاتر از ۲۷ درجه سلسیوس در آن تشکیل شده است. در ضمن برگشت تدریجی هوای گرم به داخل راهرو سرد به‌خصوص در ردیف رک سرورهای با توان حرارتی بالا مشاهده می شود.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]



(a)



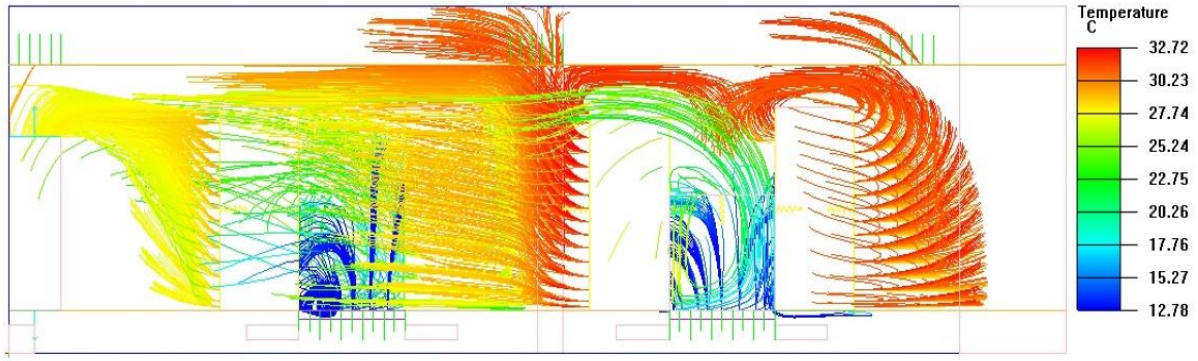
(b)

شکل ۱۱: کانتور دما در جهت عرضی در راهرو سرد (a) رک سرورهای با توان حرارتی پایین (b) رک سرورهای با توان حرارتی بالا

در شکل۱۲، الگوی جریان هوا در داخل سالن مرکز داده نشان‌داده‌شده است که به‌خوبی نشان‌دهنده توزیع جریان هـوای سرد از واحدهای تهویه‌مطبوع به سمت پلنوم تغذیه هوای سرد زیر کفی و جریان هوای گرم از سقف راهروهای گرم به سمت

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

پلنوم هوای گرم برگشتی است. با توجه به شکل ۱۲، یک جریان برگشتی هوای گرم از قسمت بلایی رک سرورها به داخل راهروی گرم، هم از ردیف سرورهای با بار حرارتی کم و هم از ردیف سرورهای با بار حرارت بالا مشاهده می‌گردد. در واقع هدف از اجرای سیستم مدیریت هوا در مراکز داده با چگالی بالا، به حداقل رساندن گردش مجدد هوای گرم و عبور هوای سرد در مراکز داده است. در صورت اجرای موفقیت آمیز، هر دو هدف منجر به صرفه جویی در انرژی و بهبود شرایط حرارتی می شود. مدیریت هوا به کاهش هزینه‌های عملیاتی با افزایش بهره‌وری اقتصادی و بهبود راندمان سیستم خنک‌کننده کمک می‌کند [۲۵].



شکل ۱۲: الگوی جریان هوا در داخل مرکز داده

۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

هدف از انجام این پژوهش شناسایی و پیش‌بینی مناطق بحرانی مانند نواحی دما بالا، مناطق برگشت هوای گرم و کنارگذر هوای سرد در سراسر سالن یک مرکز داده به‌منظور افزایش کارایی سیستم خنک‌کاری است. به همین منظور یک مرکز داده با تراکم حرارتی بالا و دارای چهار ردیف کابینت رک (۴۴ رک) با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و به‌صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شده است. باتوجه‌به اینکه چیدمان مرکز داده به‌صورت راهروی سرد و گرم، کارایی بهتری از لحاظ خنک‌کاری و کاهش مصرف انرژی دارد، برای مرکز داده در نظر گرفته شده در این پژوهش نیز پیکربندی راهروی سرد و گرم در نظر گرفته شده است. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش به‌صورت خلاصه به شرح زیر می‌باشند:

- در قسمت بالایی رک کابینت‌ها در هر چهار ردیف، در قسمت انتهایی سالن مرکز داده و در قسمت ورودی رک سرورهای با چگالی حرارتی بالاتر، نواحی دما بالا با دمای ۳۲/۷ درجه سلسیوس که بالاتر از محدوده دمای مجاز پیشنهاد شده توسط استاندارد اشری (محدوده دمایی بین ۱۸ الی ۲۷ درجه سانتی‌گراد) است، مشاهده می‌شود.
- سیستم سرمایش به‌کاررفته در این پژوهش برای خنک‌کاری رک‌های ردیف اول و دوم دارای (رک سرورهای با توان حرارتی کمتر) عملکرد و کارایی بهتری در مقایسه با دو ردیف انتهایی (رک سرورهای با توان حرارتی بیشتر) است.
- باتوجه‌به الگوی جریان به‌دست‌آمده، برگشت جریان هوای گرم از قسمت بالایی رک‌ها و از قسمت راهروی گرم به داخل راهروی سرد در هر چهار ردیف وجود دارد.
- باتوجه‌به نتایج به‌دست‌آمده پیشنهاد می‌گردد برای دستیابی به نتایج بهتر و برطرف‌کردن مشکلات موجود حالت‌های مختلف جانمایی واحدهای تهویه‌مطبوع در داخل سالن داده، بررسی شود.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

فهرست علائم

علائم انگلیسی	
ضریب ثابت	C
انرژی (W)	E
ضریب انتقال حرارت هدایت (W/m.K)	k
انرژی جنبشی اغتشاشی (m^2/s^2)	k
فشار (Pa)	p
دمای سیال (K)	T
بعد مکانی (m)	x
سرعت (m/s)	u
علایم یونانی	
چگالی سیال (kg/m^3)	ρ
ویسکوزیته دینامیکی سیال ($N \cdot s/m^2$)	μ
عدد پرانتل آشفته	σ
ویسکوزیته اغتشاشی سیال ($N \cdot s/m^2$)	μ_t
دلتای دیراک	δ
نرخ اتلاف انرژی جنبشی اغتشاشی (m^2/s^3)	ε
زیرنویس‌ها	
مربوط به نیروی شناوری	b
نشان‌دهنده سه جهت محور مختصات	i
نشان‌دهنده سه جهت محور مختصات	j
مربوط به انرژی جنبشی اغتشاشی	k
مربوط به جریان اغتشاشی	t
مربوط به نرخ اتلاف انرژی جنبشی اغتشاشی	ε

مراجع

[1] R.Gupta, , I. Puri, Waste heat recovery in a data center with an adsorption chiler: Technical and economic analysis, Energy Conversion and Management, 245(2021) 114576.
[2] A. M. Abbas, A. S. Huzayyin, T. A. Mouneer, S. A.Nada, Effect of data center servers' power density on the decision of using in-row cooling or perimeter cooling, Alexandrian Engineering Journal, 60(2021) 3855-3867.
[3] Ch. Jin, X. Bai, Y. An, J. Ni, J. Shen, Case study regarding the thermal environment and energy efficiency of raised-floor and row-based cooling, Building and Environment, 182(2020) 107110.
[4] W. Chu, , Ch. Wang, A review on airflow management in data centers, Applied Energy, 240(2019) 84-119.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[5] X. Gong, L. Zhang, H. Xu, M. Gao, A review on evaluation metrics of thermal performance in data centers, Building and environment, 177(2021) 106907.
[6] A. M.Abbas, A. S. Huzayyin, T. A. Mouneer, S. A. Nada, Thermal management and performance enhancement of data centers architectures using aligned/staggered in-row cooling arrangements, Case Studies in Thermal Engineering, 24(2021) 100884.
[۷] خدابنده‌لو، محمد؛ پورمحمود، نادر؛ میرزایی ایرج، بررسی عددی تأثیر روش‌های توزیع هوا در میزان خنک‌سازی مرکز داده، مجله مدل‌سازی در مهندسی، ۲۰ (۱۴۰۱) ۳۵-۴۶.
[8] J. Cho, J. Woo, Development and experimental study of an independent row-based cooling system for improving thermal performance of a data center, Applied Thermal Engineering, 169 (2020), 114857.
[9] D. V. Sheth, S. K. Saha,Numerical study of thermal management of data centre using porous medium approach, Journal of Building Engineering, 22(2019), 200-215.
[10] H. Moazamigoodarzi, P. J. Tsai, S. Pal, S. Ghosh, I. K. Puri, Influence of cooling architecture on data center power consumption, Energy, 183(2019), 525-535.
[11] H. Moazamigoodarzi, R. Gupta, S. Pal, P. J. Tsai ,S. Ghosh, I. K. Puri,Modeling temperature distribution and power consumption in IT server enclosures with row-based cooling architectures, Appied Energy, 261(2020), 114355.
[12] D. Macedo, R. Godina, P. D. Gaspar, M. T. Covas, A Parametric Numerical Study of the Airflow and Thermal Performance in a Real Data Center for Improving Sustainability, Applied Sciences, 9(2019) 18.
[13] Y. Zhang, K. Zhang, J. Liu, R. Kosonen, X. Yuan, Airflow uniformity optimization for modular data center based on the constructal T-shaped underfloor air ducts, Applied Thermal Engineering, 155(2019) 489-500.
[14] B.Watson, V. Venikiteswaran, Universal cooling of data centers: A CFD Analysis, Energy Procedia142(2017) 2711-2720.
[15] S. A. Nada, M. A. Said, Effect of CRAC unit layout on thermal management of data center, Applied thermal Engineering, 118(2017) 339-344.
[16] S. A. Nada, M. A. Said, Comprehensive study on the effects of plenum depths on air flow and thermal managements in data centers, International Journal of Thermal Energy, 122(2017) 302-312
[17] A. J. Diaz, R. Caceres, J. M. Crdemil, L. Silva-Lianca, Energy and exergy assessment in a perimeter cooled data center: The value of second law efficiency, Applied Thermal Engineering, 124(2017).
[18] 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, Alexandria Engineering Journal, 55(2016), 959-971.
[19] S.A. Nada, M.A. Said, M.A. Rady, Numerical investigation and parametric study for thermal and energy management enhancements in data centers' buildings, Applied Thermal Engineering, 98(2016), 110-128.
[20] C. Gao, Zh.Yu, J. Wu, Investigation of airflow pattern of a typical data center by CFD simulation, Energy Procedia, 78(2015), 2687-2693.
[21] 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.
[22] Airpak 3.0 User's Guide, Fluent Inc, 2007.
[23] A. Mohamed, A.S. Huzayyin, T. Mouneer, S.A. Nada, Thermal management and performance enhancement of data cente architectures using aligned/staggered in-row cooling arrangements, Case Studies in Thermal Engineering, 24(2021) 100884.
[24] ASHRAE, Thermal Guidelines for Data Processing Environments, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, (2004).
[25] J. Cho, J. Yang, W. Park, Evaluation of air distribution system's airflow performance for coolingenergy savings in high-density data centers, Energy and Buildings, 68 (2014), 270-279.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

چکیده انگلیسی:

Evaluation of airflow and temperature distribution of a high-density data center using computational fluid dynamics

Negin Moallemi khiavi[1], Asgar Minaei[2,*]

[1]Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran , Iran
[2]Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Received: April 2023 Accepted: July 2023

Abstract

In this paper, using computational fluid dynamics, the air flow pattern and temperature distribution for a high-density data center is presented. The Air-pack software is employed to evaluate the performance of the cooling system within the data center. A high-density data center with a total power density of 227.2 kW is considered. The arrangement considered for the data center is a cold/hot aisle layout and also two computer room air conditioning (CRAC) units are employed to produce cold air flow. A three-dimensional analysis of cold/hot air flow within the data center is provided and high temperature and hot air re-circulation areas are predicted. The results of this research show that in the entrance of the higher thermal density rack servers, there are areas with a temperature of 32.7^{0C}, which exceeds the permissible limit determined by the ASHRAE standard. But the temperature distribution of lower thermal density rack servers is completely consistent with the ASHRAE temperature range. Also, the hot exhaust air is recirculating into cold aisles and mixing with the supplied cold air. This model could be used to evaluate the air flow and thermal mapping in order to design a new data centers or to optimize existing data centers in terms of reducing the problems in data center cooling, including hot air return and cold air bypass.

Key words: Data center cooling, Computational fluid dynamics, Energy consumption Reduction, High-temperature zones

*corresponding author: a.minaei@uma.ac.ir

Cite this article as Negin Moallemi khiavi1, Asgar Minaei. Evaluation of airflow and temperature distribution of a high-density data center using computational fluid dynamics. Journal of Energy Conversion, 2024, 10(4), 59-75

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]