

بررسی توزیع هوا از سقف و کف به اتاق مراکز داده و محاسبه میزان صرفه جویی سالانه در هزینه برق و تولید کربن دی اکسید در طرح بهینه

زهرا لعل قربانی

مهدی دیمی دشت بیاض*

مجید عباسزاده باجگیران

دانشجو کارشناسی مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

رئیس اداره توسعه و نگهداری سازمان پایانه های مسافر بری مشهد

چکیده

امروزه به دلیل ضرورت وجود مراکز داده، بحث تامین انرژی مورد نیاز آنها از اهمیت بسزایی برخوردار است. بخش اعظمی از انرژی مصرفی در مراکز داده مربوط به نیاز به سرمایش پیوسته آنها می باشد. بر این مبنا بررسی توزیع هوا به عنوان یکی از مهم ترین عوامل مؤثر در صرفه جویی مصرف انرژی و تولید گاز گلخانه ای و افزایش خنک کنندگی امری ضروری است. در این پژوهش با استفاده از نرم افزار Design Builder (DB) مرکز داده ای شبیه سازی شده است و یک بار توزیع هوا از کف و بار دیگر از سقف صورت گرفته است. این پژوهش در شهر مشهد و در بازه زمانی یک ساله بررسی شده است و نتایجی از جمله میزان انتشار کربن دی اکسید که یکی از مخرب ترین گازهای گلخانه ای هست، میزان انرژی مصرفی، دمای اتاق سرور و هزینه های ایجاد شده در دو طرح با هم مقایسه شده اند. نتایج بدست آمده از شبیه سازی نشان داد که در شرایط کاملاً یکسان با توزیع مناسب هوا در مراکز داده می توان دمای هوای اتاق را به منظور افزایش خنک کنندگی اتاق و تجهیزات، مصرف انرژی، هزینه انرژی و همچنین تولید گازهای گلخانه ای و هزینه های ناشی از تولید این گازها کاهش داد. با بکارگیری طرح توزیع هوا از کف به طور میانگین ۴/۵ درجه سلسیوس کاهش دما، ۹۱/۵ کیلووات ساعت کاهش انرژی، ۵۵/۵ کیلوگرم کاهش انتشار کربن دی اکسید و در نتیجه ۹۰/۷۸ دلار کاهش هزینه به نسبت طرح توزیع هوا از سقف در سال وجود دارد.

واژه های کلیدی: مراکز داده، توزیع هوا از سقف، توزیع هوا از کف، شبیه سازی انرژی، انتشار کربن دی اکسید، مصرف انرژی.

Investigation the air distribution from the ceiling and floor to the data center room and calculate the annual cost savings in electricity and carbon dioxide production in the optimal design

Z. Lal-Ghorbani

Department of Mechanical Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

M. Deymi-Dashtebayaz

Department of Mechanical Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

M. Abbaszadeh-Bajgiran

Head of Mashhad Passenger Terminals Development and Maintenance Department

Abstract

Today, due to the need for data centers, the issue of energy supply required by these centers is very important. Much of the energy consumed in data centers is related to the need for continuous cooling. Therefore, it is necessary to study air distribution, as one of the most important factors in energy saving, greenhouse gas production and increasing cooling. In this research, the data center has been simulated using Design Builder software (DB), and once the air has been distributed from the floor and once from the ceiling. This study was conducted in Mashhad over a period of one year and the results such as energy consumption, server room temperature, initial costs for each system and carbon dioxide emissions, which is one of the most destructive greenhouse gases, were compared. The simulation results showed that under exactly the same conditions with proper distribution of air in data centers can reduce room air temperature to increase room cooling and equipment, energy consumption, energy costs as well as greenhouse gas emissions and production costs. By using the floor air distribution plan, there is an average temperature reduction of 4.5 Celsius degrees, 91.5 kWh of energy reduction, 55.5 kg of carbon dioxide emissions, and as a result, there is a \$ 90.78 cost reduction compared to the roof air distribution plan per year.

Keywords: Data Centers, Ceiling and Air Distribution, Energy Simulation, Carbon Dioxide Emission, Energy Consumption.

سیستم کامپیوتری مانند سرورها، دستگاه های مخابراتی ذخیره سازی داده و تأمین برق است. با افزایش شدید ذخیره سازی داده ها و ترافیک، محاسبات ابری در جهان به سرعت در حال گسترش است [۱-۲]. به خصوص در منطقه آسیا و اقیانوس آرام [۳]. محبوبیت محاسبات ابری به ساخت مراکز داده که میزبان میلیون ها کاربر هستند، است. مصرف انرژی یک موضوع مهم برای مراکز داده است چراکه نیاز انسان به فضای مجازی، قابلیت محاسبات ابری و تجهیزات کامپیوتری

۱- مقدمه

نیاز انسان به منابع انرژی به منظور رشد و توسعه اقتصادی و در عین حال محدود بودن آن همواره چالشی در زندگی بشر بوده است. انرژی نقش بسزایی در هزینه های تولید و خدمات و همچنین مسائل زیست محیطی دارند. مراکز داده، فضایی برای نگهداری و مدیریت داده شامل چندین

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m.deimi@hsu.ac.ir

به صورت فزاینده رو به افزایش است. افزایش روز افزون مصرف انرژی در مراکز داده علاوه بر از دست دادن انرژی و در برداشتن هزینه های بسیار، با انتشار گاز کربن دی اکسید باعث گرمای جهانی می شود. از طرفی یکی از نگرانی های عمده جوامع جهانی، تغییر آب و هوا است. افزایش گازهای گلخانه ای مثل CO₂ و Co و Sox باعث بارش باران های اسیدی، بروز مخاطرات بهداشتی و سلامتی برای انسان و سایر موجودات گردیده و آثار آن ها عمدتاً در سطح ملی و منطقه ای است. اثر انتشار CO₂ در سطح جهانی است [۴] از جمله اقدامات جامعه بین الملل در پاسخ به این مشکل، تدوین پیمان نامه تغییرات آب و هوای سازمان ملل متحد [۵] برای دستیابی به تثبیت غلظت گازهای گلخانه ای در جو تا سطح زمین و جلوگیری از تداخل خطرناک فعالیت های بشری با سیستم آب و هوایی و کنترل متوسط افزایش دما در جهان به زیر ۲ درجه سلسیوس در مقایسه با دوره قبل از صنعت و صرفه جویی در انرژی، است.

بنابراین، بهبود روش های صرفه جویی انرژی در مراکز داده تأثیر قابل توجهی بر کاهش هزینه و انتشار گازهای گلخانه ای دارد.

معمولاً، سیستم خنک کننده بخش بزرگی از مصرف کل انرژی را در یک مرکز داده مصرف می کند که ۴۰٪ از کل مصرف انرژی است [۶-۷]. در چند سال گذشته، انرژی بیشتری در هر مترمربع در مراکز داده با تراکم بالا مصرف شده است که ۱۰۰ برابر مقدار انرژی مصرفی در ساختمان های اداری است [۸-۹]. طبق نظر هاینان ژانگ و همکاران [۱۰] سرمایه طبیعی یک راه حل مؤثر برای کاهش مصرف انرژی دستگاه های خنک کننده است. آن ها ۳ روش سرمایه طبیعی با هوا، آب و سیستم لوله های گرمایی را بررسی کردند. سیستم لوله های گرمایی، کارایی انرژی و ظرفیت خنک سازی انرژی را به دلیل توانایی آن برای انتقال گرما در تغییرات کوچک دما بدون انرژی خارجی دارد. آلفونسو کاپوزولی و همکاران [۱۱] نیز برای بهره وری انرژی اقداماتی از جمله مهار راهروها، کنترل بیشترین دمای هوای تأمین شده، توزیع بهینه هوا و سرمایه طبیعی را مناسب دانسته اند. دیمی دشت بیاض و همکاران [۱۲] برای کاهش مصرف انرژی در مراکز داده اکونومایزر سمت هوا (ASE)^۱ و اکونومایزر سمت آب (WSE)^۲ و اکونومایزر ترکیبی آب و هوا (CAWE)^۳ در ۱۰ شهر، بررسی کردند. نتایج نشان داد که با بکارگیری روش عملیات CAWE در بیشتر شهرها صرفه جویی در انرژی و هزینه وجود دارد. بیشترین صرفه جویی در انرژی و هزینه برای اصفهان، کرمان و مشهد جهت صرفه جویی در مصرف انرژی الکتریکی در حدود ۲۶ مگاوات ساعت در ماه و ۳۰۰۰ دلار آمریکا در دسامبر و ژانویه می باشد. هاینان ژانگ و همکاران [۱۳] سیستم یکپارچه تبرید مکانیکی و گرماسیفون (ISMT)^۴ را برای سرمایه طبیعی مراکز داده بررسی کردند. این سیستم از دو چرخه مستقل یعنی چرخه تبرید مکانیکی و چرخه گرماسیفون با یک مبادله کن گرما تشکیل شده است. نتایج نشان داد که سیستم یکپارچه تبرید مکانیکی و گرماسیفون یک روش ایده آل برای خنک کردن مراکز داده است که نسبت بهره وری

انرژی سالانه (AEER)^۵ سیستم یکپارچه تبرید مکانیکی و گرماسیفون ۱۲/۶ است که بسیار بیشتر از دستگاه های تهویه سنتی (TAC)^۶ است. مصرف انرژی سالانه در یک مرکز داده کوچک با سیستم یکپارچه تبرید مکانیکی و گرماسیفون در چهار شهر واقع در مناطق مختلف آب و هوایی چین در مقایسه با دستگاه های تهویه سنتی به دست آمده، محاسبه و مقایسه می شود. میزان صرفه جویی در مصرف انرژی سالانه برابر با ۵/۴ درصد است. وانگ و همکاران [۱۴] بر روی روش ارزیابی عملکرد قابل اطمینان یک سیستم خنک کننده ترکیبی که با آب دریاچه در مرکز داده ها ترکیب می شود، تمرکز کردند. نتایج حاکی از آن بود که در حالت سرمایه طبیعی، آب دریاچه می تواند به طور کامل بار خنک کننده را پوشش دهد. همچنین میزان تعمیرات تجهیزات سیستم تولید سرمایه مرکز داده مورد نظر با استفاده از سرمایه آب دریاچه ۶۴/۲۲ درصد کاهش می یابد. ادوارد اورو و همکاران [۱۵] جهت بهینه سازی مدل انرژی، سیستم ذخیره سازی انرژی گرمایی (TES)^۷ پیشنهاد کردند. این روش به کمک نرم افزار TRNSYS و کاربرد الگوریتم بهینه سازی هوک در مخازن ذخیره سازی آب در مراکز داده استفاده می شود. آن ها معتقدند که دمای عملیاتی چیلر باید از مقداری که سیستم اجازه می دهد پایین تر باشد و بنابراین امکان مطالعه سیستم ذخیره یخ در طرح فراهم می شود. نتایج حاکی از آن بود که می توان هزینه های برق مراکز داده ها را سالانه به ۳ درصد کاهش داد. با توجه به تجزیه و تحلیل اقتصادی دوره بازگشت سرمایه طرح پیشنهادی توسط ادوارد اورو و همکاران بین ۱۱ تا ۱۲ سال است. البته عدم قطعیت قیمت برق در آینده عاملی است که تجزیه و تحلیل اقتصادی را سخت کرده است.

ران گائو و همکاران [۱۶] حالت توزیع هوا که تنها منبع هوا را برای منطقه هدف فراهم می کند را برای تأمین هوا بررسی کردند (TPV)^۸. در این روش جریان جت هوای تأمین شده به عنوان یک جت آزاد در نظر گرفته می شود که این رشته از جریان جت به چند رشته تبدیل می شود. زاویه خروجی های هوا به صورتی است که مساحت جریان جت به نسبت جریان یک رشته ای افزایش می یابد و در یک مکان نزدیک خروجی با یکدیگر تداخل پیدا می کنند. روش TPV منجر به یک میدان جریان یکنواخت با سرعت هوای ۰/۳ متر بر ثانیه در منطقه هدف شد و نرخ صرفه جویی در انرژی به ۵۲/۹٪ رسید. ژانگ لین و همکاران [۱۷] با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)^۹ اثر موقعیت منبع هوا بر طراحی و عملکرد سیستم تهویه جابجایی (DV)^{۱۰} را بررسی کردند. منبع هوا باید در محلی باشد که هوای تازه را بتواند به همه بخش های اتاق تحویل دهد و نباید در پشت موانع قرار گیرد. نتایج حاصل از بررسی حاکی از آن بود که قرارگیری منبع هوا در محل نامناسب، مانع از توزیع هوا و منجر به تجمع هوای کهنه می شود. اگر منبع هوا در نزدیکی مرکز اتاق قرار گیرد شرایط دمایی یکنواخت تری را به نسبت قرارگیری منبع هوا در یک طرف اتاق

⁵ Annual Energy Efficiency Ratio

⁶ Traditional Air Conditioner

⁷ Thermal Energy Storage

⁸ Targeted Personalized Ventilation

⁹ Computational Fluid Dynamics

¹⁰ Displacement Ventilation System

¹ Air-Side Economizer

² Water-Side Economizer

³ Combined Air or Water Economizer

⁴ Integrated System Of Mechanical Refrigeration And

Thermosyphon

کردند. نتایج نشان داد اندازه فیزیکی پلنوم و هندسه دریچه ورودی هوا بر جریان هوا با کنترل میدان فشار دینامیک و افت فشار روی کاشی‌ها تأثیر می‌گذارد. انسداد افراز، ساختار موانع و ساختارهای راهنما، موانعی درونی هستند که جریان هوا را با کنار زدن در مخزن تحت تأثیر قرار می‌دهند. جیانکسیونگ وان و همکاران [۲۲] به اندازه‌گیری و مدیریت جریان هوا برای بهبود بهره‌وری سرمایش و انرژی در مراکز داده ای که هوا دمی از کف انجام می‌شود پرداختند. آن‌ها باور داشتن در میان تمامی راه‌حل‌های خنک‌کننده در دسترس، خنک‌کننده هوا به علت سادگی خود، صنعت مراکز داده را کنترل می‌کند. همچنین ایده‌های جدیدی از جمله طرح‌های زیرساخت جدید و روش‌های کنترل منابع خنک‌سازی برای مدیریت جریان هوای مرکز داده‌ها ارائه کردند. به دلیل هزینه بالای مقاوم سازی، طرح‌های زیرساخت جدید مناسب نیست در حالی که تکنیک‌های کنترل خنک‌کننده هوشمند و به‌طور خاص، فن‌آوری‌های یادگیری ماشین^۵ مانند یادگیری عمیق تقویتی (DRL)^۶، که با موفقیت به مسایل مدیریت منابع فن‌آوری اطلاعات و قدرت اعمال شده است سازگاری زیادی را نشان می‌دهند. از مزیت‌های بکارگیری کنترل‌کننده هوشمند می‌توان به سازگار بودن با تغییرات سیستم از جمله تغییر حجم کاری و نوسانات دمای فضای باز به دلیل قابلیت یادگیری آن اشاره کرد. به کمک این تکنیک‌ها هزینه‌های ناشی از سرمایش ۴۰٪ کاهش می‌یابد. جینکیون چو و همکاران [۲۳] عملکرد جریان هوا در سیستم توزیع هوا برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی در مراکز داده با تراکم بالا را ارزیابی کردند. آنها مدیریت جریان هوا در مراکز داده چگالی بالا را با هدف به حداقل رساندن گردش مجدد هوای گرم و عبور هوای سرد در مراکز داده انجام دادند. آن‌ها در مدیریت هوا از شاخص‌هایی که نقش مهمی در اجرای طرح داشتند استفاده کردند که عبارتند از شاخص گرمای تأمین شده (SHI)^۷، شاخص گرمای بازگشتی (RHI)^۸، شاخص خنک‌کننده رک (RCI)^۹ و شاخص دمای بازگشتی (RTI)^{۱۰} که از میان شاخص‌ها ابتدا باید RCI بررسی شود و سایر شاخص‌ها عنوان یک روش کلی قضاوت در نظر گرفته شوند. اصلی‌ترین عاملی که بر راندمان جریان هوا در اتاق سرور تأثیر می‌گذارد، دمای هوای تولید شده در سیستم خنک‌کننده است. همچنین وقتی راهرو سرد و راهرو گرم در شرایط باز باشد و امکان اختلاط هوای گرم و سرد وجود داشته باشد، بیشترین بهره‌وری انرژی زمانی حاصل می‌شود که دمای هوای تولید شده در سیستم خنک‌کننده ۱۸ درجه سلسیوس باشد در حالی که با جداسازی فیزیکی راهرو سرد و گرم می‌توان با تولید هوا با دمای ۲۲ درجه بیشترین بهره‌وری انرژی را داشت. علاوه بر این، افزایش ارتفاع کف در افزایش عملکرد جریان هوا تأثیر می‌گذارد اما ارتفاع سقف حداقل تأثیر دارد.

فراهم خواهد کرد. شبانولی یوان و همکاران [۱۸] به تجزیه و تحلیل زوایای مایل سرورها در مراکز داده جهت بهینه‌سازی جریان هوا پرداختند. سرورها در ۴ زاویه ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه اعمال شدند. طبق نظر آن‌ها در صورتی که سرورها در زاویه ۳۰ درجه قرار بگیرند فرایند خنک‌سازی به کمک جریان هوا به بهترین شکل انجام می‌شود. اعمال زاویه ۳۰ درجه در این طرح باعث حذف حداقل ۷/۵٪ درصد گرمای اضافه در رک‌ها و ایجاد محیط گرمایی بهینه می‌شود. محیط گرمایی بهینه از ایجاد نقاط داغ محلی در رک‌ها که باعث خراب شدن سرورها می‌شود جلوگیری می‌کند. همچنین شبانولی یوان و همکاران [۱۹] در مقاله‌ای دیگر با مانع‌های انعطاف‌پذیر جریان سیال، بهینه‌سازی جریان هوا را در مراکز داده بررسی کردند. آن‌ها از مانع‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰ سانتی‌متری با زاویه‌های ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵، ۹۰ جهت عبور هوا و یافتن شرایط بهینه استفاده کردند. نتایج نشان داد که استفاده از مانع‌های انعطاف‌پذیر روشی مؤثر برای بهبود توزیع جریان هوا و بهره‌وری سرمایشی در داخل اتاق مراکز داده است. در صورت استفاده از مانع با طول ۲۰ سانتی‌متری که زاویه ۷۵ درجه در جهت عمودی رک دارد محیط گرمایی بهینه ایجاد می‌شود. محیط گرمایی بهینه در نتیجه تضعیف نقاط داغ محلی که در رک‌ها وجود دارند، است. ون-شیائو چو و همکاران [۲۰] مدیریت مسیر جریان هوا را بررسی کردند که تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد سرمایش در مراکز داده دارد. بر اساس روش‌های موجود مدیریت مسیر جریان هوا، مسیرهای طولانی جریان هوای و مسیرهای کوتاه به ترتیب مشخص می‌شوند. مسیرهای طولانی جریان هوا ممکن است از گردش مجدد هوا، توزیع هوا و نشت هوا رنج ببرد با این حال، این اثرات اغلب با چیدمان هندسی مراکز داده تعامل دارند اما در نصب نسبتاً مقرون‌به‌صرفه است. بالعکس، سیستم خنک‌کننده با مسیرهای کوتاه جریان هوا می‌تواند به‌طور مؤثر کاستی‌های روش قبیل را کاهش داده یا به‌طور کامل حذف کند، اما می‌تواند در استقرار پرهزینه باشد. همچنین ممکن است هنوز هم از مشکل توزیع جریان هوا رنج ببرد. به‌طور معمول، روش CFD به‌طور گسترده برای مطالعه مدیریت گرمایی و جریان هوا مراکز داده استفاده شده است. برای سیستم خنک‌کننده با مسیرهای کوتاه جریان هوا، مطالعات بر روی سیستم خنک‌کننده با مبادله کن‌گرما و فن‌آوری لوله گرمایی انجام می‌شود. علاوه بر این، بر اساس مطالعات انجام‌شده در مورد خنک‌کننده با مبادله کن‌گرما، ضرورت برای مدیریت جریان هوا توسط مطالعات CFD پیشنهاد شده است و تأثیر چیدمان سرور روی یکنواختی جریان هوا بررسی شده است. این یافته توسط مدیریت مناسب طرح اصلی در طرح سرور متمرکز یافته می‌شود و می‌تواند توزیع جریان هوا در درون رشته‌ای را تا ۳۰ درصد کاهش دهد. هونجی لو و همکاران [۲۱] سرمایش از کف را برای تأمین هوای مناسب و کافی بررسی کردند و اثرات هندسه پلنوم در جریان هوا را ارائه دادند. روش‌های گوناگونی برای مدیریت هوا از جمله سیستم مهار راهروی سرد (CACS)^۱، سیستم مهار راهروی داغ (HACS)^۲ و سیستم نوار تیر فرسوده عمودی (VEDS)^۳ در روش سرمایش از کف (UFAD)^۴ بررسی

⁴ Under Floor Air Distribution

⁵ Machine Learning Technologies

⁶ Deep Reinforcement Learning

⁷ Supply Heat Index

⁸ Return Heat Index

⁹ Rack Cooling Index

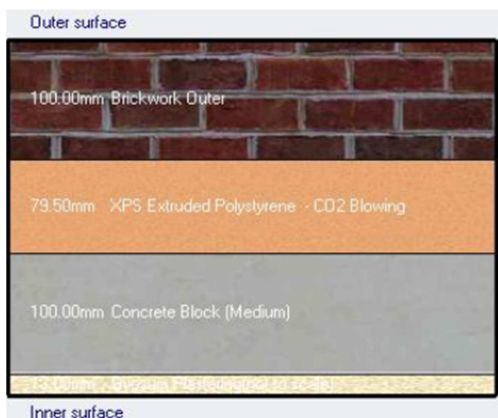
¹⁰ Return Temperature Index

¹ Cold Aisle Containment System

² Hot Aisle Containment System

³ Vertical Exhausted Duct System

ارتفاع شهر از سطح دریا	۹۹۹	متر
جدول ۲- مشخصات مدل شبیه سازی		
هدف	مساحت (m^2)	
اتاق	۸۸	
پلنوم	۸۸	
دریچه	۰/۲۵	



شکل ۱- نمایی از لایه های دیوار

جدول ۳- مشخصات لایه های دیوار به ترتیب از بیرونی ترین لایه به داخلی ترین لایه

لایه	ضخامت (m)	رسانایی گرمایی ($\frac{W}{m-K}$)	گرمای مخصوص ($\frac{J}{kg-K}$)	چگالی ($\frac{kg}{m^3}$)
اجر چینی	۰/۱	۰/۸۴	۸۰۰	۱۷۰۰
پلی استایرن	۰/۰۷۹۵	۰/۰۳۴	۱۴۰۰	۳۵
بلوک بتنی	۰/۱	۰/۵۱	۱۰۰۰	۱۴۰۰
گچ	۰/۰۱۳	۰/۴	۱۰۰۰	۱۰۰۰

در این تحقیق هدف محاسبه میزان برق مصرفی، تولید کربن دی اکسید، هزینه های مرتبط با آنها و صرفه جویی سالانه در هزینه برق و تولید کربن دی اکسید است. برای دستیابی به این اهداف با استفاده از DB، توزیع هوا از سقف و کف به اتاق مراکز داده در بازه زمانی یک ساله در شرایط یکسان شبیه سازی می شود.

۲- مشخصات دو طرح پیشنهادی

در بررسی حاضر مرکز داده در شهر مشهد واقع شده که موقعیت جغرافیایی شهر مشهد در جدول ۱ قابل مشاهده است. در این مرکز داده یک رک تراکم بالا قرار گرفته است. همچنین در مرکز داده هوا از طریق ۱ مسیر وارد اتاق شده سپس فرایند خنک سازی انجام می شود و از طریق ۱ مسیر دیگر خارج می شود. لازم به توضیح است که در دو حالت بررسی شده، یک ورودی و خروجی هوا تعبیه گردیده است و تغییر در شرایط مرزی ورودی و خروجی ایجاد نخواهد شد. اتاق سرورها در شرایط کاملاً یکسان مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. این شرایط شامل جنس دیوارها، سیستم خنک کننده، محل قرارگیری اتاق، درصد پنجره روی دیوار، ورود و خروج کارکنان در اتاق، رطوبت و غیره می شود که از عوامل تأثیرگذار در شبیه سازی هستند.

در این پژوهش راندمان سرمایش، میزان تولید کربن دی اکسید و هزینه های ناشی از آنها توابع هدف است. در واقع مسئله اصلی در مطالعه حاضر بررسی تأثیر محل قرارگیری دریچه ورود هوا به اتاق بر روی توابع هدف بدون تغییر شرایط مرزی ورودی و خروجی است. مدل شبیه سازی شده شامل اتاق، پلنوم و دریچه است که مشخصات هر یک در جدول ۲ آورده شده است. دیوارها از چهار لایه به ترتیب از بیرونی ترین لایه به داخلی ترین لایه از اجر چینی، پلی استایرن، بلوک بتنی و گچ ساخته شده است که در شکل ۱ لایه های دیوار و در جدول ۳ مشخصات آنها قابل مشاهده است. لازم به توضیح است در این شبیه سازی از فن کوئل با چیلر هوا خنک به عنوان سیستم خنک کننده استفاده شده است. سیستم خنک کننده در مرکز داده در بازه زمانی یک ساله به صورت شبانه روزی در حال کار کردن است. با توجه به شکل ۲ سیستم خنک کننده برای تأمین هوای ورودی چیلر، هوای گرم اتاق را دریافت می کند. بعد از انجام فرایند خنک کنندگی هوای خارج شده از چیلر به کمک دمنده که در پلنوم قرار دارد، وارد اتاق می شود. همچنین برای سیستم روشنایی مرکز داده از لامپ های LED استفاده شده است. کارکنان در ساعت ۹:۰۰ الی ۹:۳۰ و ۱۲:۳۰ الی ۱۳:۳۰ برای بازرسی و تعمیرات وارد اتاق کامپیوتر می شوند این روند در تمام روزهای سال به صورت منظم انجام می شود. در نهایت شرایط مرزی اعمال شده در مدل شبیه سازی در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۱- موقعیت جغرافیایی شهر مشهد

پارامتر	مقدار	واحد
عرض جغرافیایی	۳۶/۲۷	درجه-اعشار
طول جغرافیایی	۵۹/۶۳	درجه-اعشار

کرد:

$$C_{op} = \frac{\dot{Q}_c}{W_{total}} \quad (1)$$

در ابتدا، مقدار صرفه‌جویی در انرژی الکتریکی بر اساس اختلاف کل کار با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

سپس، معادله (۲) مقدار کاهش انتشار CO₂ را نشان می‌دهد.

$$CR = ES \times EF \quad (2)$$

که در آن EF عامل انتشار CO₂ برای برق و ES میزان انرژی صرفه‌جویی شده است (جدول ۵).

میزان صرفه‌جویی در هزینه انرژی حاصل از بهینه‌سازی را می‌توان با استفاده از رابطه (۳) با ضرب هزینه برق (C_e) در صرفه‌جویی انرژی انتخابی (ES) به دست آورد:

$$Cost_{energy} = C_e \times ES \quad (3)$$

بر این اساس، با استفاده از هزینه جریمه انتشار کربن‌دی‌اکسید (C_{CO2}) و کاهش انتشار کربن‌دی‌اکسید (CR)، میزان صرفه‌جویی در هزینه کاهش انتشار کربن‌دی‌اکسید با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود: (جدول ۵)

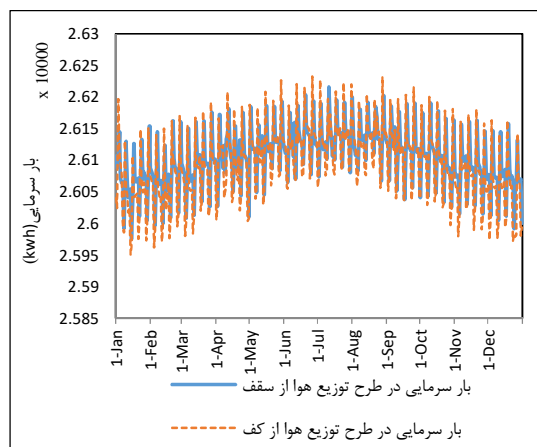
$$Cost_{CO2} = C_{CO2} \times CR \quad (4)$$

سرانجام، معادله (۵) کل صرفه‌جویی در هزینه را به‌عنوان جمع صرفه‌جویی در هزینه‌های انرژی و صرفه‌جویی در کاهش انتشار CO₂ ارائه می‌دهد:

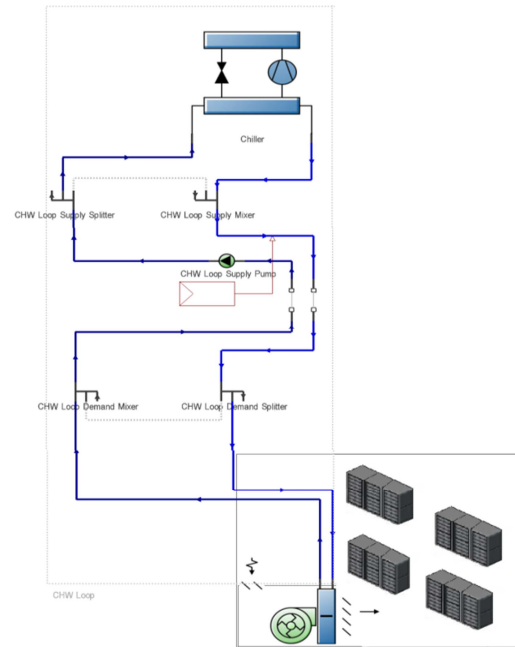
$$Cost_{total} = Cost_{energy} + Cost_{CO2} \quad (5)$$

۴- بحث و نتایج

بار سرمایی در دو طرح پیشنهادی توزیع هوا در ۳۶۵ روز سال در شکل ۳ و اختلاف بار سرمایی دو طرح در شکل ۴ قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان گرمایی که باید برای خنک‌سازی دستگاه‌ها از اتاق سرورها خارج شود در دو طرح تقریباً یکسان است و می‌توان از اختلاف بار به نسبت مقدار بار روزانه چشم‌پوشی کرد در این صورت نتایج با فرض یکسان بودن شرایط در هر دو طرح کاملاً مطابقت دارد.



شکل ۳- بار سرمایی در بازه زمانی یک‌ساله



شکل ۲- نمایی از سیستم خنک‌کننده

جدول ۴- تنظیمات پارامتر برای شرایط مرزی

پارامتر	معادله	مقدار	واحد
دمای مرز	-	۲۰	°C
سرعت جریان هوای داخلی	-	۵/۳۳	$\frac{m}{s}$
نرخ جریان هوای ورودی	$Q_i = U_o A_{tile}$	۱/۳۳۲۵	$\frac{m^3}{s}$

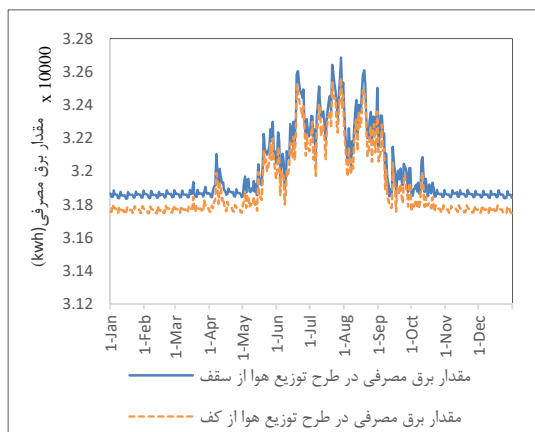
۳- معادلات

علاوه بر بررسی پارامترهای مؤثر در کارایی مراکز داده، در این بخش به بررسی و محاسبه هزینه‌های مصرفی مراکز داده پرداخته می‌شود. این هزینه‌ها شامل هزینه برق مصرفی و میزان هزینه‌ای که به علت تولید گاز کربن‌دی‌اکسید ایجاد می‌شود، است. برای انجام محاسبات اقتصادی باید از پارامترهای معرفی شده در جدول ۵ استفاده شود.

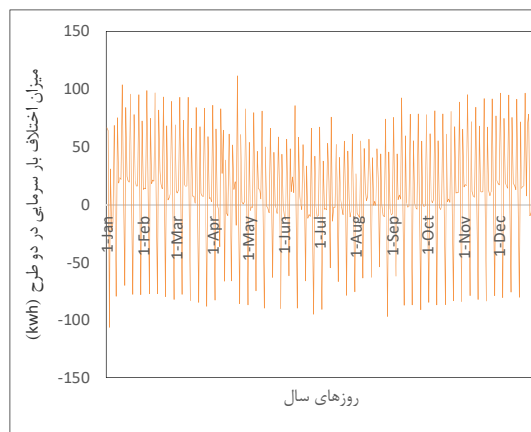
جدول ۵- پارامترهای مؤثر در محاسبات اقتصادی

پارامتر	مقدار	واحد
C _e	۰/۱	$\frac{\$}{kWh}$
C _{CO2}	۰/۰۲۴	$\frac{\$}{kg}$
EF	۰/۵۸۷	$\frac{kgCO2}{kWh}$

Cop را می‌توان به‌عنوان نسبت اثر خنک‌کننده به کل کار بیان

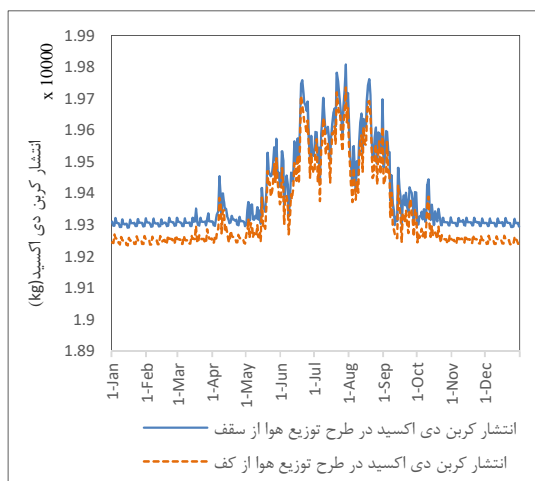


شکل ۶- مقدار مصرفی در بازه زمانی یکساله



شکل ۴- اختلاف بار سرمایی دو طرح در بازه زمانی یکساله

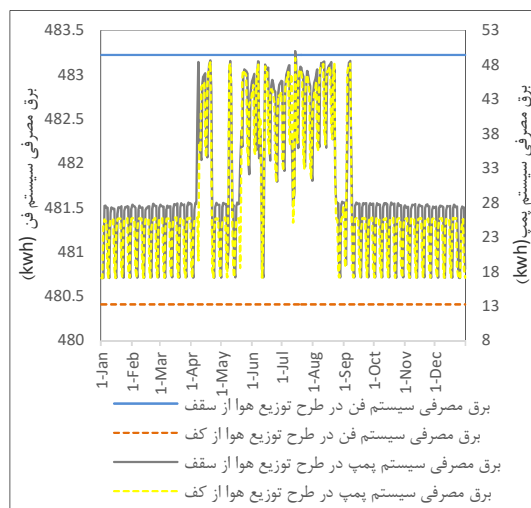
همان‌طور که در بخش ۱ گفته شد یکی از بزرگ‌ترین نگرانی‌های جوامع انسانی امروزه گرمایش کره زمین است که حاصل انتشار گازهای گلخانه‌ای بخصوص کربن‌دی‌اکسید است. افزایش مصرف انرژی، انتشار کربن‌دی‌اکسید را افزایش می‌دهند در نتیجه لازم است این پارامتر در انتخاب طرح بهینه بررسی شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی به‌خوبی ارتباط بین مصرف انرژی و انتشار کربن‌دی‌اکسید را نشان می‌دهند. در طرح پیشنهادی توزیع هوا از کف میزان انتشار کربن‌دی‌اکسید کمتر از طرح توزیع هوا از سقف است که در شکل ۷ انتشار کربن‌دی‌اکسید در بازه زمانی یکساله مشاهده می‌شود.



شکل ۷- انتشار کربن‌دی‌اکسید در بازه زمانی یکساله

به‌طور کلی هزینه یک سال یک مرکز داده شامل هزینه مصرف برق و جریمه تولید کربن‌دی‌اکسید است که برای این پژوهش در شکل ۸ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهند که در طرح توزیع هوا از کف نه تنها پارامترهای عملیاتی بهبود می‌یابند بلکه با بهره بردن از این طرح هزینه هم کاهش می‌یابد. در نهایت با توجه به رابطه ۵، با بهره بردن از طرح توزیع هوا از کف ۹۰/۷۸ دلار به نسبت توزیع هوا از سقف در سال صرفه‌جویی در هزینه وجود دارد.

میزان انرژی مصرفی در سیستم HVAC^۱ که صرف سیستم فن و سیستم پمپ می‌شود که در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان انرژی مصرفی در سیستم فن به نسبت میزان انرژی مصرفی سیستم پمپ در هر دو طرح پیشنهادی چشم‌گیر است. برای صرفه‌جویی بیشتر در مصرف انرژی بهتر است به بهینه‌سازی این تجهیزات مخصوصاً سیستم فن پرداخت که خارج از بحث این پژوهش است.



شکل ۵- برق مصرفی تجهیزات سیستم HVAC

علاوه بر سیستم HVAC عوامل دیگری از جمله سیستم قدرت، دستگاه‌های کنترلی، سیستم روشنایی، سیستم امنیتی، تجهیزات فن‌آوری اطلاعات و غیره وجود دارد که انرژی مصرف می‌کنند. در حالت کلی میزان مصرف انرژی در اتاق کامپیوتر در شکل ۶ آورده شده است همان‌طور که مشاهده می‌شود با توزیع مناسب هوا می‌توان در مصرف انرژی صرفه‌جویی کرد.

¹ Heating, Ventilating and Air Conditioning

\dot{Q}	آهنگ انتقال گرما (kW)
Q_t	دبی حجمی هوا (m^3s^{-1})
A_{file}	مساحت دریچه (m^2)
C_{CO2}	عامل انتشار کربن دی‌اکسید ($\$/kg^{-1}$)
U_o	سرعت جریان هوای ورودی (ms^{-1})
ASE	اکونومايزر سمت هوا
WSE	اکونومايزر سمت آب
$CAWE$	اکونومايزر ترکیبی آب و هوا
TES	سیستم ذخیره‌سازی انرژی گرمایی
TPV	تهویه شخصی هدفمند
CFD	دینامیک سیالات محاسباتی
DV	سیستم تهویه جابجایی
$CACS$	سیستم مهار راهروی سرد
$HACS$	سیستم مهار راهروی داغ
$VEDS$	سیستم نوار تیر فرسوده عمودی
$UFAD$	توزیع هوا از کف
TAC	دستگاه تهویه سنتی
$AEER$	نسبت بهره‌وری انرژی سالانه
$HVAC$	سیستم گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع
DRL	یادگیری عمیق تقویتی
SHI	شاخص گرمای تأمین شده
RHI	شاخص گرمای بازگشتی
RCI	شاخص خنک کننده رک
RTI	شاخص دمای بازگشت

۷- مراجع

- [1] Depoorter, V., Oró, E. and Salom, J. The location as an energy efficiency and renewable energy supply measure for data centres in Europe. *Applied Energy*, Vol. 140, pp. 338-349, 2015.
- [2] Sevencan, S., Lindbergh, G., Lagergren, C. and Alvfors, P. Economic feasibility study of a fuel cell-based combined cooling, heating and power system for a data centre. *Energy and Buildings*, Vol. 111, pp.218-223, 2016.
- [3] Fainman, Y. and Porter, G. Directing data center traffic. *Science*, Vol.342, No.6155, pp.202-203, 2013.
- [4] دامن کشیده م. و نظری م. و رضایی ا. س.، بررسی عوامل مؤثر بر انتشار CO2 در ایران (مطالعه موردی نیروگاه‌ها). فصلنامه علوم اقتصاد، د. ۴، ش. ۱۲، ص ۶۳-۷۹، ۱۳۸۹.
- [5] Anderson, K. and Peters, G. The trouble with negative emissions. *Science*, Vol. 354, No.3609, pp.182-183, 2016.
- [6] Rong, H., Zhang, H., Xiao, S., Li, C. and Hu, C. Optimizing energy consumption for data centers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 58, pp.674-691, 2016.
- [7] Siriwardana, J., Jayasekara, S. and Halgamuge, S.K. Potential of air-side economizers for data center cooling: A case study



شکل ۸- مقدار هزینه در بازه زمانی یک‌ساله

۵- نتیجه‌گیری

دو طرح توزیع هوا از سقف و توزیع هوا از کف به اتاق مراکز داده در بازه زمانی یک‌ساله در کشور ایران و شهر مشهد در شرایط کاملاً یکسان شبیه‌سازی شده است. این شرایط شامل جنس دیوارها، سیستم خنک‌کننده، محل قرارگیری اتاق، درصد پنجره روی دیوار، ورود و خروج کارکنان در اتاق، رطوبت و غیره می‌شود و همچنین تغییری در شرایط مرزی ورودی و خروجی ایجاد نخواهد شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد در مقایسه دو طرح توزیع هوا از سقف و کف، توزیع هوا از کف طرح بهتری است بر این اساس می‌توان به نتایج زیر اشاره نمود:

- با توزیع هوا از کف حدود ۴/۵ درجه دمای اتاق نسبت به طرح توزیع هوا از سقف کاهش می‌یابد.
- با توزیع هوا از کف حدود ۹۱/۵ کیلووات ساعت نسبت به طرح توزیع هوا از سقف در انرژی صرفه‌جویی می‌شود.
- با توزیع هوا از کف تولید گازهای گلخانه‌ای حدود ۵۵/۵ کیلوگرم نسبت به طرح توزیع هوا از سقف کاهش می‌یابد.
- با توزیع هوا از کف در یک سال ۹۰،۷۸ دلار نسبت به طرح توزیع هوا از سقف هزینه‌ها کاهش می‌یابد.

برای صرفه‌جویی هر چه بیشتر در مراکز داده بررسی عوامل مؤثر بر توزیع هوا و بهینه‌سازی تجهیزات سیستم خنک‌کننده مخصوصاً فن که ظرفیت بالایی برای بهینه شدن دارد و همچنین کنترل هوشمند سیستم خنک‌کننده پیشنهاد می‌شود.

۶- نمادها

c_e	فاکتور قیمت انرژی ($\$/kWh^{-1}$)
EF	عامل انتشار کربن ($kg CO_2 kWh^{-1}$)
ES	صرفه‌جویی در انرژی (kWh)
CR	کاهش کربن دی‌اکسید (kg)
W_{total}	مصرف برق (kW)

- for key Australian cities. *Applied Energy*, Vol. 104, pp.207-219, 2013.
- [8] Depoorter, V., Oró, E. and Salom, J. The location as an energy efficiency and renewable energy supply measure for data centres in Europe. *Applied Energy*, Vol. 140, pp.338-349, 2015.
- [9] Gong, X., Zhang, Z., Gan, S., Niu, B., Yang, L., Xu, H. and Gao, M. A review on evaluation metrics of thermal performance in data centers. *Building and Environment*, Vol. 177, p.106907, 2020.
- [10] Zhang, H., Shao, S., Xu, H., Zou, H. and Tian, C. Free cooling of data centers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.35, pp.171-182, 2014.
- [11] Capozzoli, A. and Primiceri, G. Cooling systems in data centers: state of art and emerging technologies. *Energy Procedia*, Vol. 83, pp.484-493, 2015.
- [12] Deymi-Dashtebayaz, M. and Namanlo, S.V. Potentiometric and economic analysis of using air and water-side economizers for data center cooling based on various weather conditions. *International Journal of Refrigeration*, Vol. 99, pp.213-225, 2019.
- [13] Zhang, H., Shao, S., Xu, H., Zou, H. and Tian, C. Integrated system of mechanical refrigeration and thermosyphon for free cooling of data centers. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 75, pp.185-192, 2015.
- [14] Wang, J., Zhang, Q., Yoon, S. and Yu, Y. Reliability and availability analysis of a hybrid cooling system with water-side economizer in data center. *Building and Environment*, Vol. 148, pp.405-416, 2019.
- [15] Oro, E., Codina, M. and Salom, J. Energy model optimization for thermal energy storage system integration in data centres. *Journal of Energy Storage*, Vol. 8, pp.129-141, 2016.
- [16] Gao, R., Wang, C., Li, A., Yu, S. and Deng, B. A novel targeted personalized ventilation system based on the shooting concept. *Building and Environment*, Vol. 135, pp.269-279, 2018.
- [17] Lin, Z., Chow, T.T., Tsang, C.F., Fong, K.F. and Chan, L.S. CFD study on effect of the air supply location on the performance of the displacement ventilation system. *Building and environment*, Vol. 40, No.8, pp.1051-1067, 2005.
- [18] Yuan, X., Xu, X., Wang, Y., Liu, J., Kosonen, R. and Cai, H. Design and validation of an airflow management system in data center with tilted server placement. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 164, p.114444, 2020.
- [19] Yuan, X., Wang, Y., Liu, J., Xu, X. and Yuan, X. Experimental and numerical study of airflow distribution optimisation in high-density data centre with flexible baffles. *Building and Environment*, Vol. 140, pp.128-139, 2018.
- [20] Chu, W.X. and Wang, C.C. A review on airflow management in data centers. *Applied Energy*, Vol. 240, pp.84-119, 2019.
- [21] Lu, H., Zhang, Z. and Yang, L. A review on airflow distribution and management in data center. *Energy and Buildings*, Vol. 179, pp.264-277, 2018.
- [22] Wan, J., Gui, X., Kasahara, S., Zhang, Y. and Zhang, R. Air flow measurement and management for improving cooling and energy efficiency in raised-floor data centers: A survey. *IEEE Access*, Vol. 6, pp.48867-48901, 2018.
- [23] Cho, J., Yang, J. and Park, W. Evaluation of air distribution system's airflow performance for cooling energy savings in high-density data centers. *Energy and buildings*, Vol. 68, pp.270-279, 2014.