



مصرف انرژی یک موضوع مهم برای مراکز داده است چراکه نیاز انسان به فضای مجازی، قابلیت محاسبات ابری و تجهیزات کامپیوتری به صورت فزاینده رو به افزایش است. افزایش روز افزون مصرف انرژی در مراکز داده علاوه بر از دست دادن انرژی و دربرداشتن هزینه‌های بسیار، با انتشار گاز کربن دی‌اکسید باعث گرمای جهانی می‌شود. از طرفی یکی از نگرانی‌های عمده جوامع جهانی، تغییر آب و هوا است. افزایش گازهای گلخانه‌ای مثل CO<sub>2</sub> و NOx باعث باران‌های اسیدی، بروز مخاطرات بهداشتی و سلامتی برای انسان و سایر موجودات گردیده و آثار آن‌ها عمدتاً در سطح ملی و منطقه‌ای است. اثر انتشار CO<sub>2</sub> در سطح جهانی است [۴] از جمله اقدامات جامعه بین‌الملل در پاسخ به این مشکل، تدوین پیمان‌نامه تغییرات آب و هوای سازمان ملل متحد [۵] برای دستیابی به تثبیت غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو تا سطح زمین و جلوگیری از تداخل خطرناک فعالیت‌های 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 صرفه‌جویی در انرژی، است.

بنابراین، بهبود روش‌های صرفه‌جویی انرژی در مراکز داده تأثیر قابل توجهی بر کاهش هزینه و انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. معمولاً، سیستم خنک‌کننده بخش بزرگی از مصرف کل انرژی را در یک مرکز داده مصرف می‌کند 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 ساختمان‌های اداری است [۸-۹]. طبق نظر هاینان ژانگ و همکاران [۱۰] سرمایه‌های طبیعی یک راه‌حل مؤثر برای کاهش مصرف انرژی دستگاه‌های خنک‌کننده است. آن‌ها ۳ روش سرمایه‌های طبیعی با هوا، آب و سیستم لوله‌های گرمایی را بررسی کردند. سیستم لوله‌های گرمایی، کارایی انرژی و ظرفیت خنک‌سازی انرژی را به دلیل توانایی آن برای انتقال گرما در تغییرات کوچک دما بدون انرژی خارجی دارد. آلفونسو کاپوزولی و همکاران [۱۱] نیز برای بهره‌وری انرژی اقداماتی از جمله مهار راه‌روها، کنترل بیشترین دمای هوای تأمین‌شده، توزیع بهینه هوا و سرمایه‌های طبیعی را مناسب دانسته‌اند. دیمی دشت بیاض و همکاران [۱۲] برای کاهش مصرف انرژی در مراکز داده اکونومایزر سمت هوا (ASE) و اکونومایزر سمت آب (WSE) و اکونومایزر ترکیبی آب و هوا (CAWE)<sup>۲</sup> در ۱۰ شهر، بررسی کردند. نتایج نشان داد که با بکارگیری روش عملیات CAWE در بیشتر شهرها صرفه‌جویی در انرژی و هزینه وجود دارد. بیشترین صرفه‌جویی در انرژی و هزینه برای اصفهان، کرمان و مشهد جهت صرفه‌جویی در مصرف انرژی الکتریکی در حدود ۲۶ مگاوات ساعت در ماه و ۳۰۰۰ دلار آمریکا در دسامبر و ژانویه می‌باشد. هاینان ژانگ و همکاران [۱۳] سیستم یکپارچه تبرید مکانیکی و گرماسیفون (ISMT) را برای سرمایه‌های 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 ایده‌آل برای خنک کردن مراکز داده است که نسبت بهره‌وری انرژی سالانه (AEER)<sup>۵</sup> سیستم یکپارچه تبرید مکانیکی و گرماسیفون ۱۲/۶ است که بسیار بیشتر از دستگاه‌های تهویه سنتی (TAC)<sup>۶</sup> 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 دستگاه‌های تهویه سنتی به دست آمده، محاسبه و مقایسه می‌شود. میزان صرفه‌جویی در مصرف انرژی سالانه برابر با ۵/۴ درصد است. وانگ و همکاران [۱۴] بر روی روش ارزیابی عملکرد قابل‌اطمینان یک سیستم خنک‌کننده ترکیبی که با آب دریاچه در مرکز داده‌ها ترکیب می‌شود، تمرکز کردند. نتایج حاکی از آن بود که در حالت سرمایه‌های طبیعی، آب دریاچه می‌تواند به‌طور کامل بار خنک‌کننده را پوشش دهد. همچنین میزان تعمیرات تجهیزات سیستم تولید سرمایه‌های مرکز داده مورد نظر با استفاده از سرمایه‌های آب دریاچه ۶۴/۲۲ درصد کاهش می‌یابد. ادوارد اووو و همکاران [۱۵] جهت بهینه‌سازی مدل انرژی، سیستم ذخیره‌سازی انرژی گرمایی (TES)<sup>۷</sup> پیشنهاد کردند. این روش به کمک نرم‌افزار TRNSYS و کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی هوک در مخازن ذخیره‌سازی آب در مراکز داده استفاده می‌شود. آن‌ها معتقدند که دمای عملیاتی چیلر باید از مقداری که سیستم اجازه می‌دهد پایین‌تر باشد و بنابراین امکان مطالعه سیستم ذخیره یخ در طرح فراهم می‌شود. نتایج حاکی از آن بود که می‌توان هزینه‌های برق مراکز داده‌ها را سالانه به ۳ درصد کاهش داد. با توجه به تجزیه و تحلیل اقتصادی دوره بازگشت سرمایه طرح پیشنهادی توسط ادوارد اووو 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 می‌کند را برای تأمین هوا بررسی کردند (TPV)<sup>۸</sup>. در این روش جریان جت هوای تأمین شده به‌عنوان یک جت آزاد در نظر گرفته می‌شود که این رشته از جریان جت به چند رشته تبدیل می‌شود. زاویه خروجی‌های هوا به صورتی است که مساحت جریان جت به نسبت جریان یک رشته‌ای افزایش می‌یابد و در یک مکان نزدیک خروجی با یکدیگر تداخل پیدا می‌کنند. روش TPV منجر به یک میدان جریان یکنواخت با سرعت هوای ۰/۳ متر بر ثانیه در منطقه هدف شد و نرخ صرفه‌جویی در انرژی به ۵۲/۹٪ رسید. ژانگ لین و همکاران [۱۷] با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)<sup>۹</sup> اثر موقعیت منبع هوا بر طراحی و عملکرد سیستم تهویه جابجایی (DV)<sup>۱۰</sup> را بررسی کردند. منبع هوا باید در محلی باشد که هوای تازه را بتواند به همه بخش‌های 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 می‌شود. اگر منبع هوا در نزدیکی مرکز اتاق قرار گیرد شرایط

<sup>5</sup> Annual Energy Efficiency Ratio

<sup>6</sup> Traditional Air Conditioner

<sup>7</sup> Thermal Energy Storage

<sup>8</sup> Targeted Personalized Ventilation

<sup>9</sup> Computational Fluid Dynamics

<sup>10</sup> Displacement Ventilation System

<sup>1</sup> Air-Side Economizer

<sup>2</sup> Water-Side Economizer

<sup>3</sup> Combined Air or Water Economizer

<sup>4</sup> Integrated System Of Mechanical Refrigeration And Thermosyphon

فرسوده عمودی (VEDS)<sup>۳</sup> در روش سرمایش از کف (UFAD) بررسی 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 دهی 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<sup>۴</sup> مانند یادگیری عمیق تقویتی (DRL)<sup>۵</sup>، 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 تامین شده (SHI)<sup>۶</sup>، شاخص گرمای بازگشتی (RHI)<sup>۷</sup>، شاخص خنک‌کننده رک (RCI)<sup>۸</sup> و شاخص دمای بازگشتی (RTI)<sup>۹</sup> 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

دمایی یکنواخت‌تری را به نسبت قرارگیری منبع هوا در یک‌طرف اتاق فراهم خواهد کرد. شیانولی 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 شیانولی 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 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 قبل 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)<sup>۱۰</sup>، سیستم مهار راهروی داغ (HACS)<sup>۱۱</sup> و سیستم نوار تیر

<sup>3</sup> Vertical Exhausted Duct System

<sup>4</sup> Under Floor Air Distribution

<sup>5</sup> Machine Learning Technologies

<sup>6</sup> Deep Reinforcement Learning

<sup>7</sup> Supply Heat Index

<sup>8</sup> Return Heat Index

<sup>9</sup> Rack Cooling Index

<sup>10</sup> Return Temperature Index

<sup>1</sup> Cold Aisle Containment System

<sup>2</sup> Hot Aisle Containment System

تأثیر دارد.

در این تحقیق هدف محاسبه میزان برق مصرفی، تولید کربن دی‌اکسید، هزینه‌های مرتبط با آنها و صرفه‌جویی سالانه در هزینه برق و تولید کربن دی‌اکسید است. برای دستیابی به این اهداف با استفاده از DB، توزیع هوا از سقف و کف به اتاق مراکز داده در بازه زمانی یک‌ساله در شرایط یکسان شبیه‌سازی می‌شود.

## 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 خنک‌سازی انجام می‌شود و از طریق ۱ مسیر دیگر خارج می‌شود. لازم به توضیح است که در دو حالت بررسی شده، یک ورودی و خروجی هوا تعبیه گردیده است و تغییری 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 خنک‌کننده، محل قرارگیری اتاق، درصد پنجره روی دیوار، ورود و خروج کارکنان در اتاق، رطوبت و غیره می‌شود که از عوامل تأثیرگذار در شبیه‌سازی هستند.

در این پژوهش راندمان سرمایش، میزان تولید کربن دی‌اکسید و هزینه‌های 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 شبیه‌سازی شده شامل اتاق، پلنوم و دریچه است که مشخصات هر یک در جدول ۲ آورده شده است. دیوارها از چهار لایه به ترتیب از بیرونی‌ترین لایه به داخلی‌ترین لایه از اجر چینی، پلی استایرن، بلوک بتنی و گچ ساخته شده است که در شکل ۱ لایه‌های دیوار و در جدول ۳ مشخصات آنها قابل مشاهده است. لازم به توضیح است در این شبیه‌سازی از فن کویل با چیلر هوا خنک به‌عنوان سیستم خنک‌کننده استفاده شده است. سیستم خنک‌کننده در مرکز داده در بازه زمانی یک‌ساله به‌صورت شبانه‌روزی در حال کار کردن است. با توجه به شکل ۲ سیستم خنک‌کننده برای تأمین هوای ورودی چیلر، هوای گرم اتاق را دریافت می‌کند. بعد از انجام فرایند خنک‌کنندگی هوای خارج شده از چیلر به کمک دمنده که در پلنوم قرار دارد، وارد اتاق می‌شود. همچنین برای سیستم روشنایی مرکز داده از لامپ‌های 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 می‌شوند این روند در تمام روزهای سال به‌صورت منظم انجام می‌شود. در نهایت شرایط مرزی اعمال شده در مدل شبیه‌سازی در جدول ۴ آورده شده است.

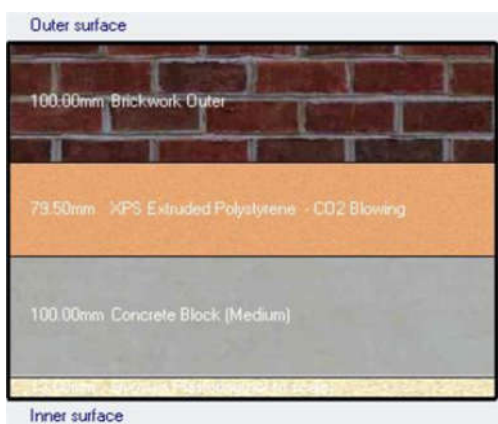
جدول ۱- موقعیت جغرافیایی شهر مشهد

پارامتر	مقدار	واحد
عرض جغرافیایی	۳۶/۲۷	درجه-اعشار

طول جغرافیایی	۵۹/۶۳	درجه-اعشار
ارتفاع شهر از سطح دریا	۹۹۹	متر

جدول ۲- مشخصات مدل شبیه‌سازی

هدف	مساحت ( $m^2$ )
اتاق	۸۸
پلنوم	۸۸
دریچه	۰/۲۵



شکل ۱- نمایی از لایه‌های دیوار

جدول ۳- مشخصات لایه‌های دیوار به ترتیب از بیرونی‌ترین لایه به داخلی‌ترین 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

کرد:

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

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

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

که در آن EF عامل انتشار CO<sub>2</sub> 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<sub>e</sub>) در صرفه‌جویی انرژی انتخابی (ES) به دست آورد:

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

بر این اساس، با استفاده از هزینه جرمه انتشار کربن دی‌اکسید (C<sub>CO2</sub>) و کاهش انتشار کربن دی‌اکسید (CR)، میزان صرفه‌جویی در هزینه کاهش انتشار کربن دی‌اکسید با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

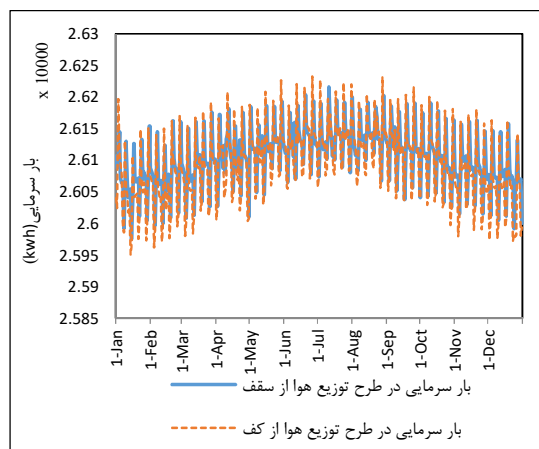
$$Cost_{CO2} = C_{CO2} \times CR \quad (4)$$

سرانجام، معادله (۵) کل صرفه‌جویی در هزینه را به‌عنوان جمع صرفه‌جویی در هزینه‌های انرژی و صرفه‌جویی در کاهش انتشار CO<sub>2</sub> ارائه می‌دهد:

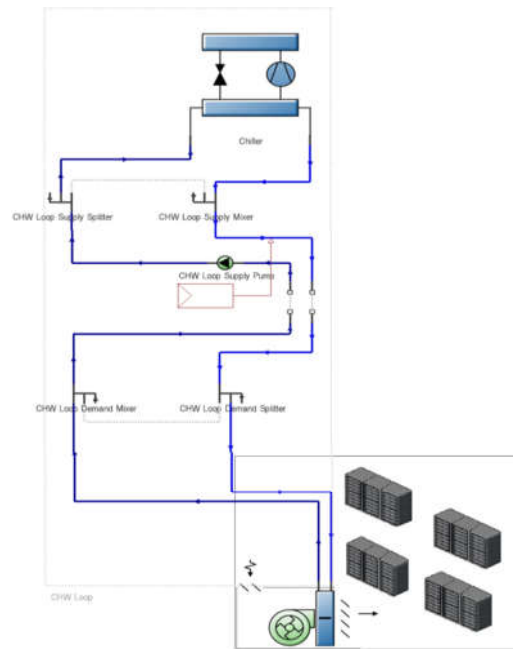
$$Cost_{total} = Cost_{energy} + Cost_{CO2} \quad (5)$$

#### 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	$\frac{m^3}{s}$

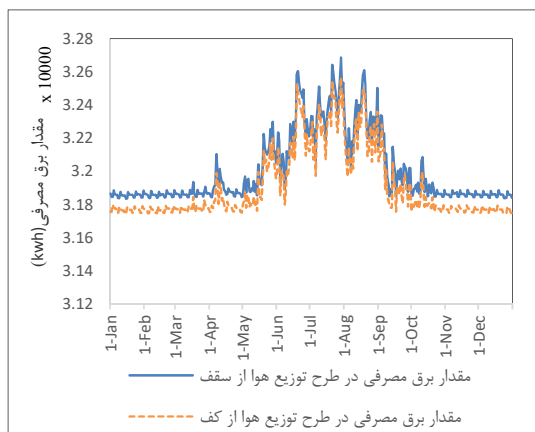
#### ۳- معادلات

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 کربن دی‌اکسید ایجاد می‌شود، است. برای انجام محاسبات اقتصادی باید از پارامترهای معرفی شده در جدول ۵ استفاده شود.

جدول ۵- پارامترهای مؤثر در محاسبات اقتصادی

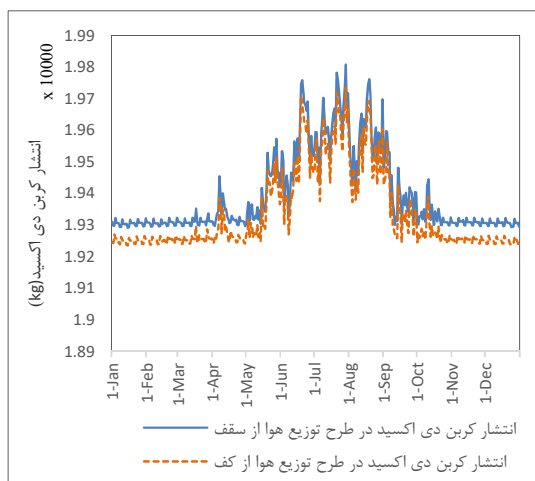
پارامتر	مقدار	واحد
C <sub>e</sub>	۰/۱	$\frac{\$}{kWh}$
C <sub>CO2</sub>	۰/۰۲۴	$\frac{\$}{kg}$
EF	۰/۵۸۷	$\frac{kgCO2}{kWh}$

Cop را می‌توان به‌عنوان نسبت اثر خنک‌کننده به کل کار بیان



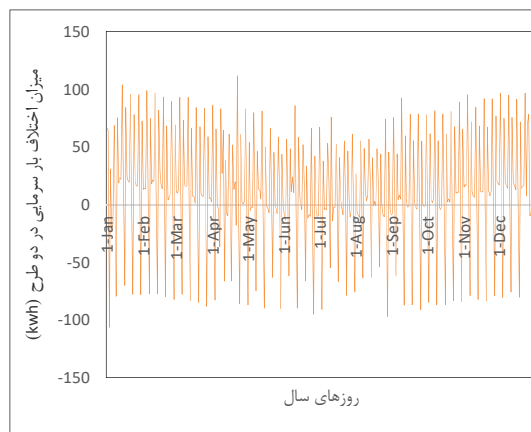
شکل ۶- مقدار برق مصرفی در بازه زمانی یکساله

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.



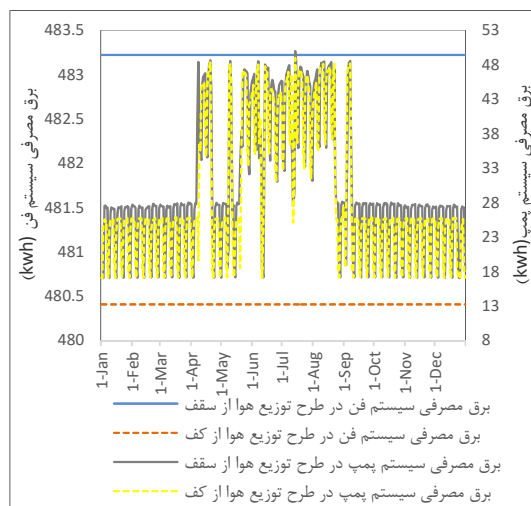
شکل ۷- انتشار کربن‌دی‌اکسید در بازه زمانی یکساله

به‌طورکلی 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.



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

میزان انرژی مصرفی در سیستم HVAC<sup>۱</sup> 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.

<sup>۱</sup> Heating, Ventilating and Air Conditioning

$\dot{Q}$	آهنگ انتقال گرما (kW)
$Q_t$	دبی حجمی هوا ( $m^3s^{-1}$ )
$A_{tile}$	مساحت دریچه ( $m^2$ )
$C_{CO2}$	عامل انتشار کربن دی‌اکسید ( $kg^{-1}$ )
$U_o$	سرعت جریان هوای ورودی ( $ms^{-1}$ )
$ASE$	اکونومایزر سمت هوا
$WSE$	اکونومایزر سمت آب
$CAWE$	اکونومایزر 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., Oro, 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 تغییر 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 ( $SkWh^{-1}$ )
EF	عامل انتشار کربن ( $kgCO_2 kWh^{-1}$ )
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.