

انتخاب چیدمان بهینه یک مرکز مخابراتی نمونه با کمک دینامیک سیالات محاسباتی و شبکه‌های عصبی مصنوعی

هاشم وضوحی، ایرج میرزایی*، نادر پورمحمد حصار، مجید عباسعلیزاده

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۳-۰۳

بازنگری: ۱۳۹۸-۰۶-۰۲

پذیرش: ۱۳۹۸-۰۶-۳۱

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۷-۱۱

کلمات کلیدی:

سرمایش

بهینه‌سازی

رک

شبکه عصبی

دینامیک سیالات محاسباتی

خلاصه: در مطالعه‌ی حاضر به بررسی و شبیه‌سازی وضعیت موجود توزیع هوای سرد در سالن یک مرکز ماکروویو پرداخته شده و روش جدیدی برای بهبود وضعیت دمای سالن پیشنهاد شده است. در ابتدا، سالن با چینش حاضر به کمک روش دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی شده و با استفاده از داده‌های تجربی اندازه‌گیری شده توسط حس‌گرهای به کار رفته در خروجی رک‌ها اعتبارسنجی شده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و داده‌های تجربی موجود نشان‌دهنده تطابق بسیار خوبی بین این داده‌ها می‌باشد. اندازه‌گیری دما با خطای کمتر از ۱ درجه نشان‌دهنده انتخاب صحیح روش حل عددی در مطالعه حاضر است. در روش حل دینامیک سیالات محاسباتی، تأثیر نحوه قرارگیری رک‌ها با تغییر چینش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با جابه‌جایی رک‌ها می‌توان به حالات بهتر خنک‌کاری دست یافت. در مرحله پایانی با استفاده از خروجی‌های حل دینامیک سیالات محاسباتی و استفاده از شبکه عصبی بهترین چینش رک‌ها پیشنهاد گردیده است. بر اساس شبیه‌سازی عددی انجام شده کمترین و بیشترین شاخص گرمای تولیدی به ترتیب، ۰/۴۵۶ و ۰/۶۳۱ به دست می‌آید و با توجه به تعریف شاخص گرمای تولیدی هرچه این مقدار کمتر باشد نشان‌دهنده راندمان سرمایشی بالاتر آن چینش می‌باشد. چینش بهینه از نتایج شبیه‌سازی حاصل گردیده است. میانگین دمای دیواره رک‌ها در بهینه‌سازی به کار گرفته شده است. میانگین دمای رک‌های چینش بهینه به دست آمده از شبکه عصبی برابر با ۲۱/۹ سانتی‌گراد می‌باشد که به میزان ۰/۷ درجه سانتی‌گراد نسبت به بهترین حالت شبیه‌سازی کمتر است.

۱- مقدمه

بسیار بالا ابداع و در انواع مدل‌ها و مکان‌ها به کار گرفته می‌شوند. اما نحوه مدیریت دما در سالن‌های مخابراتی به خاطر پیچیده بودن روند تولید حرارت در این سالن‌ها و نیز گستردگی پارامترهای دخیل در فرایند توزیع هوای سرد همواره از جذابیت خاصی برای کارفرمایان و نیز مبتکران سیستم‌های سرمایشی تخصصی مخابرات برخوردار بوده و جای بررسی و مطالعه داشته است.

با توجه به سرعت بالای پیشرفت تکنولوژی ارتباطات و فن‌آوری اطلاعات، نیاز روزافزون به توسعه سیستم‌های ارتباطی با توان پردازش بالا روز به روز بیشتر شده و در راستای این پیشرفت و نیاز به سرعت بالا در دسترسی به اطلاعات، دستگاه‌های مخابراتی و پردازش‌کننده نیاز به انرژی بیشتری جهت کارکرد سیستم‌های خود داشته و در نتیجه حرارت بیشتری تولید خواهند کرد. بر همین اساس هرچه پیشرفت علم و فناوری در زمینه تولید اطلاعات و محتوا صورت می‌گیرد به همان میزان تولید حرارت در سالن‌های مخابراتی بیشتر شده و از همین جهت نیاز به سیستم‌های سرمایشی برای کنترل این حرارت، بیشتر خواهد شد. امروزه سیستم‌های سرمایشی با تکنولوژی

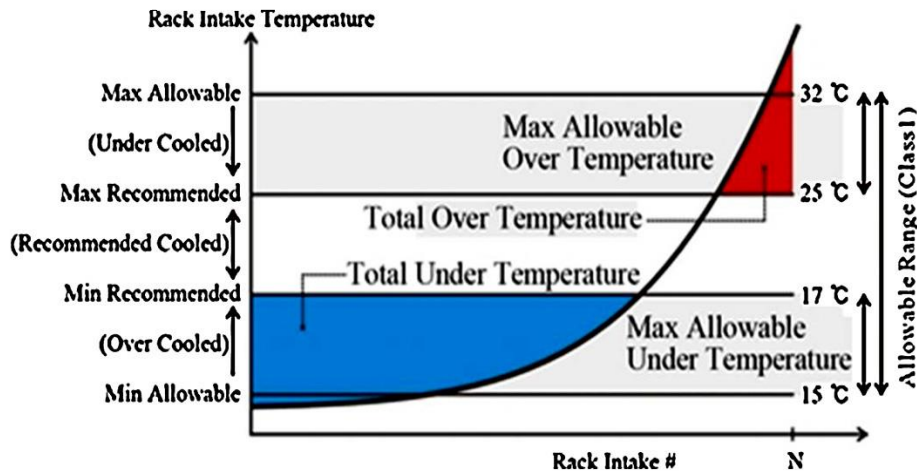
شارما و همکاران [۱] دو پارامتر بی‌بعد شاخص گرمای تولیدی^۱ و شاخص گرمای برگشتی^۲ را معرفی کردند که برای ارزیابی عملکرد دمایی مرکز داده استفاده می‌شوند. این شاخص‌ها روشی را فراهم می‌کنند تا بتوان جریان هوای همرفتی را در اتاق تجهیزات با کف کاذب بررسی کرد. این دو شاخص بی‌بعد، میزان اختلاط دو

1 Supply heat index

2 Return heating index

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: dr.iraj.mirzaee@gmail.com





شکل ۱- محدوده دمایی مجاز و حداکثر طبق استاندارد اشری

Fig. 1. Maximum permissible and maximum temperature range according to Ashrian Standard

تنها ارزیابی نسبی بر مبنای دما و توزیع جریان هوا در اتاق سرورهای فناوری اطلاعات صورت گرفت و از شاخص‌های ارزیابی استفاده نشد. از میان سیستم‌های مختلف، سیستم سرمایش از کف کاذب پایدارترین توزیع محیطی داخلی را نشان داد، اما حتی در این سیستم نیز چرخش دوباره هوای گرم و یا میانبر زدن هوای سرد مشاهده شد. ناکاو و همکاران [۴] حالت‌های مختلف سرمایش مرکز داده را با روش‌های مختلفی مطالعه کردند. این حالت‌ها عبارت بودند از: تأمین هوا از کف به همراه خروجی از سقف، تأمین هوا از کف به همراه خروجی‌های افقی، تأمین هوا از بالا و خروجی‌های از کف و تأمین هوا از بالا و خروجی‌های افقی. پاتل و همکاران [۵ و ۶] جز اولین کسانی بودند که از دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی و مطالعه جریان هوا و توزیع دما در مرکز داده کف کاذب استفاده کردند. شبیه‌سازی‌های تقریبی با کمتر از ۶۰۰۰۰۰ شبکه انجام شد و رک‌ها به‌عنوان جعبه‌هایی مدل شدند که جریان هوا و تولید گرمای یکنواختی داشتند. چیدمان مختلف رک‌ها بر پایه معیار دمای هوای ورودی رک ارزیابی شدند. رامبو و جاشی [۷] و [۸] شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی را با به‌کارگیری مدل توربولانس رنس^۴ توسعه دادند و برای در نظر گرفتن ویژگی‌های درون رک در روش چند مقیاسی، دامنه را گسترش دادند.

اشمیت و کروز [۹ و ۱۰]، هم به‌صورت عددی و هم به‌صورت تجربی، جریان هوای درون کاشی‌های سوراخ‌دار را به‌عنوان مهم‌ترین عامل توزیع غیریکنواخت جریان که منجر به تغییرات دمای رک‌ها می‌شود شناسایی کردند. آن‌ها همچنین توزیع هوای رفت پکیج برودتی

جریان هوای سرد ورودی به رک^۱ و جریان گرم خروجی از رک را نشان می‌دهند. بالا بودن شاخص گرمای تولیدی، بیانگر این است که دمای ورودی بالاست که می‌تواند به خاطر بازگشت مجدد یا اختلاط هوا قبل از ورود به رک باشد. کم بودن شاخص گرمای برگشتی نیز نشان‌گر اختلاط هوای گرم خروجی از رک، با هوای سرد داخل راهرو و یا بین رک و دیوار است. هرچه میزان شاخص گرمای برگشتی زیاد و شاخص گرمای تولیدی کم باشد نشانه‌ی نزدیک شدن به حالت ایده آل طراحی سیستم سرمایش برای مرکز داده می‌باشد. میزان این شاخص‌ها بین ۰ و ۱ است. هرلین [۲] میزان تأثیر سرمایش رک‌ها را مطالعه کرد. شاخص سرمایش بازگشتی^۲ رک مقداری است که نشان می‌دهد تجهیزات رک‌ها چقدر خنک شده و به چه میزان الزامات استانداردها رعایت شده است. همچنین این شاخص معیاری است که دمای ورودی به رک را نشان می‌دهد، و برای عملکرد پیوسته مرکز داده مؤثر می‌باشد. شکل ۱ محدوده دمایی مجاز و دمای حداکثر ورودی به رک در شرایط طراحی را نشان می‌دهد. شرایط دمایی بیش‌ازحد، هنگامی رخ می‌دهد که یک یا چند دمای ورودی بیشتر از حد مجاز باشند. بنابراین مقدار قابل قبول شاخص سرمایش بازگشتی رک بالای ۹۵ درصد می‌باشد.

چو و همکاران [۳] با استفاده از شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی^۳ کارایی گرمایی نوعی از سیستم‌های توزیع هوا را که برای مرکز داده مترکم قابل استفاده هستند، مورد تحقیق قرار دادند. اما

- 1 Rack
- 2 Return cooling index
- 3 Computational Fluid Dynamic

توسط ۴ عدد کولرگازی تأمین می‌گردد که با توجه به تولید حرارت بالای سیستم‌های نصب شده در این سالن، دمای احساس شده توسط حس‌گرهای نصب‌شده عمدتاً بالای ۲۴ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. همچنین جهت تأمین همین دما کولرها به‌طور ۲۴ ساعته در حال کار بوده که این کارکرد مداوم زمینه خرابی و عارضه‌های فراوان را برای سیستم‌ها و سالن ایجاد می‌کند. راه حل در نظر گرفته‌شده برای این مشکل نصب و راه‌اندازی سیستم سرمایش بالازن با استفاده از یک عدد پکیج ۲۰ تن مدولار بوده که دارای دو عدد کمپرسور تبرید ۱۰ تن می‌باشد. اصلاح جانمایی رک‌های نصب‌شده از اهداف این تحقیق می‌باشد. در این مطالعه وضعیت فعلی سالن و نیز آرایش طرح‌های پیشنهادی با کمک روش دینامیک سیالات محاسباتی و با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت شبیه‌سازی شده و خروجی‌های اولیه ضمن اینکه برای اعتبارسنجی داده‌های عددی استفاده می‌شوند برای آموزش شبکه عصبی نیز به کار گرفته شده است. شبکه عصبی آموزش‌دیده برای بهینه‌سازی پارامترهای دخیل در بهبود توزیع هوا و خنک‌شدگی سالن به کار گرفته شده است.

۲- تعریف مسئله و معادلات حاکم

در بررسی حاضر تعداد ۴۰ رک داخل سالن سرور قرار گرفته‌اند که هوا از طریق ۶ مسیر وارد (به دلیل اقتضای معماری سالن موجود) و پس از عبور از رک‌ها از طریق یک مسیر خارج می‌شود. لازم به توضیح است که در تمامی حالات، شش ورودی و یک خروجی هوا تعبیه گردیده است و تغییری در شرایط مرزی ورودی و خروجی ایجاد نخواهد شد. شکل ۲ نشان‌دهنده هندسه شماتیک سالن رک مورد مطالعه می‌باشد. در واقع مسئله اصلی در مطالعه حاضر بررسی تأثیر نحوه چینش رک‌ها بر روی راندمان سرمایش مرکز، بدون تغییر شرایط مرزی ورودی و خروجی می‌باشد.

در حل دینامیک سیالات محاسباتی، با توجه به تعریف مسئله و به دست آوردن توزیع دما، از حل معادلات انتقال رینولدز و معادلات ناویر-استوکس استفاده می‌شود.

۲-۱- معادله پیوستگی جرم

یکی از معادلاتی که در روش دینامیک سیالات محاسباتی می‌بایست حل شود، معادله بقای جرم می‌باشد. معادله پیوستگی

را از میان کاشی‌های سوراخ‌دار با شبیه‌سازی‌های دوبعدی و سه‌بعدی دینامیک سیالات محاسباتی مطالعه نموده و با استفاده از کلاهی جریان، نرخ جریان را از میان کاشی‌های سوراخ‌دار اندازه‌گرفتند و نتایج آزمایش‌ها و شبیه‌سازی را باهم مقایسه کردند. چو، یانگ و پارکا [۱۱] در مطالعه خود سعی کردند تا مصرف انرژی در مرکز داده با تراکم بالا را با بهبود کارایی و بازدهی سرمایش و توزیع هوا کاهش دهند. آن‌ها در مجموع، ۲۳ انتخاب طراحی بر اساس مدول استاندارد مربوط به متغیرهای طراحی معماری نظیر محل قرارگیری هوای سرد شده رفت و برگشت، ارتفاع کف کاذب، ارتفاع سقف و غیره را تحلیل کردند. در نهایت، شاخص کارایی سیستم مدیریت هوا را بر اساس نتیجه شبیه‌سازی استخراج کرده و کیفیت طراحی کلی سیستم برودتی را با بررسی تک‌تک این اثرات ارزیابی کردند. در تحقیق آن‌ها المان‌های طراحی با ۵ فاکتور سیستم هواساز که شامل: محل هوای رفت و برگشت، ارتفاع کف کاذب، ارتفاع سقف، دمای هوای رفت، مورد بررسی قرار گرفت. تنظیمات نرخ جریان هوای دستگاه پکیج بر اساس ۵ فاکتور طراحی فوق برای ۴۶ مدل ارزیابی کلی در مدول استاندارد تنظیم گردید. پریادومکول و کیتی چایکام [۱۲] یک شبیه‌سازی از جریان هوای سرد توسط سه سیستم تهویه هوای مختلف در مرکز داده ارائه کردند که عبارت بود از سیستم تهویه هوا از کف کاذب، سیستم تهویه هوا در ردیف^۱ و ترکیب آن‌ها (مابین سیستم‌های کف کاذب و در ردیف)، تا راهنمایی‌های مناسبی را به‌منظور به دست آوردن بهتر سیستم‌های سرمایشی کارآمد در اختیار طراحان قرار دهند. آن‌ها نشان دادند که سیستم سرمایشی کف کاذب نمی‌تواند هوای سرد کافی را به بالای رک برساند. این اتفاق می‌تواند به سرورها آسیب برساند در مقابل سیستم تهویه هوای در ردیف می‌تواند به‌طور مؤثرتری هوای سرد را به بالای رک‌ها برساند به‌طوری‌که هیچ نقطه داغی در بالای رک‌ها دیده نمی‌شود. لازم به توضیح است که مدیریت دمای تجهیزات فناوری اطلاعات به‌شدت وابسته به این مطلب است که هوای سرد به چه نحوی در اتاق تجهیزات توزیع می‌شود. تعدادی از محققین، تحقیقاتی را در رابطه با بهینه‌سازی دینامیکی دمای محیط انجام داده‌اند. در اکثر این تحقیقات توجه اصلی به چیدمان شده است [۱۳].

در بررسی حاضر وضعیت چیدمان یک سالن ماکروویو به‌طور کامل مورد مطالعه قرار گرفته است. سرمایش سالن در حال حاضر

متغیر از متغیرهای فوق می‌توان متغیر دیگر را به دست آورد. معادله کلی حالت به شکل رابطه (۴) بیان می‌شود.

$$f(P, V, T) = 0 \quad (4)$$

معادلات فوق برای یک گاز کامل که فرض اصلی حل مسئله حاضر است به صورت معادله (۵) در می‌آید.

$$P = \rho RT \quad (5)$$

۲-۴- معادلات آشفتگی

مدل آشفتگی انتخاب شده برای حل جریان، مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد می‌باشد. در این مدل آشفتگی معادلات انتقال برای نرخ تولید انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اضمحلال انرژی جنبشی می‌شود.

معادله (۶) نشان دهنده معادله انتقال برای انرژی جنبشی آشفتگی می‌باشد.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \quad (6)$$

$$2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \epsilon$$

و برای نرخ اتلاف انرژی معادله (۷) حل می‌گردد.

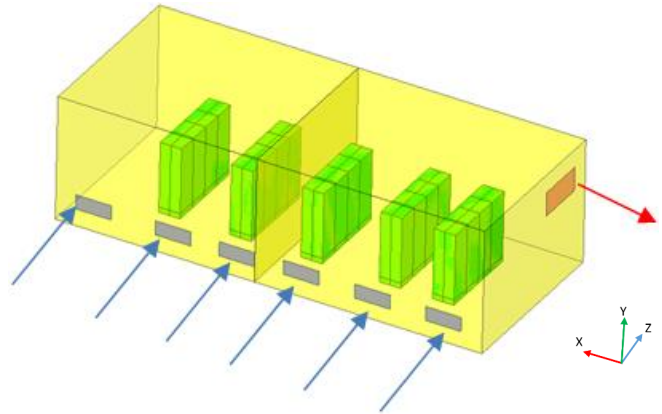
$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \quad (7)$$

$$C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k}$$

در معادلات فوق $\mu_t u_i$ نشان‌دهنده سرعت المان در راستای i و همچنین E_{ij} نشان‌دهنده نرخ تغییر شکل و همچنین μ_t نمایانگر ویسکوزیته گردابه‌ها می‌باشد که از معادله (۸) به دست می‌آید.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (8)$$

همچنین در معادلات فوق ضرایب $C_{\tau\epsilon}$ ، $C_{1\epsilon}$ ، σ_ϵ ، σ_k ضرایب ثابتی است که بر اساس اطلاعات حل‌های زیادی که انجام شده است به دست می‌آید. مقادیر ثابت $C_{\tau\epsilon}$ ، $C_{1\epsilon}$ ، σ_ϵ ، σ_k به ترتیب برابر با ۰٫۹، ۱٫۲۲۵، ۱٫۴۴ و ۱٫۹۲ می‌باشد.



شکل ۲- هندسه شماتیک سالن ماکروویو

Fig. 2. Schematic geometry of the microwave hall

(۱) دارای ترم تغییرات زمانی می‌باشد که با توجه به شرایط پایا این ترم صفر فرض می‌شود.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

۲-۲- معادله اندازه حرکت

معادله اندازه حرکت در واقع همان قانون دوم نیوتن در سیالات است. بر طبق قانون دوم نیوتن نرخ تغییر اندازه‌ی حرکت المان سیال برابر با برآیند نیروهای وارد بر آن المان می‌باشد. معادله‌ی اندازه حرکت به صورت معادله (۲) حاصل می‌شود.

$$\frac{DU}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 U \quad (2)$$

۲-۳- معادله انرژی

معادله‌ی دیگری که در دامنه‌ی حل مسئله دینامیک سیالات محاسباتی مدنظر است، معادله‌ی انرژی است که نتیجه قانون اول ترمودینامیک می‌باشد و بیانگر این است که نرخ تغییرات انرژی سیال با مجموع نرخ حرارت اضافه شده و نرخ کار انجام شده بر روی المان برابر می‌باشد. معادله کلی انتقال به صورت معادله (۳) خواهد بود. در واقع با حل معادله انرژی، دمای حوزه حل به دست می‌آید.

$$\rho \frac{De}{Dt} = -P \nabla \cdot u + \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi + \dot{Q} \quad (3)$$

از معادلات حالت برای ایجاد رابطه‌ای میان متغیرهای ترمودینامیکی استفاده می‌شود. در معادلات حالت سه متغیر P ، T و V وجود دارد که با فرض تعادل ترمودینامیکی با حداقل دو

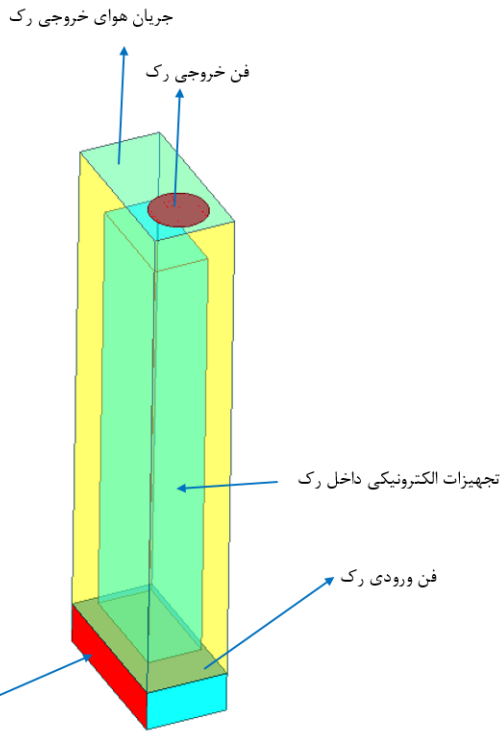
۳- حل عددی و نتایج حاصله

۳-۱- هندسه

در شبیه‌سازی‌های حاضر تعداد ۴۰ رک داخل سالن سرور قرار گرفته‌اند که هوا از طریق ۶ مسیر با دبی ۱٫۱۵ کیلوگرم بر ثانیه و دمای ۲۸٫۱۵ کلوین وارد و پس از عبور از رک‌ها از طریق یک مسیر با دمای جریان ۲۹٫۱۵ کلوین خارج می‌شود. لازم به توضیح است که در تمامی حالات ۶ ورودی و یک خروجی هوا تعبیه گردیده است و تغییری در شرایط مرزی ورودی و خروجی ایجاد نخواهد شد. نحوه چینش حالت اعتبارسنجی در شکل ۳ نشان داده شده است. این رک‌ها در ۱۰ ستون و ۴ ردیف قرار گرفته‌اند. فاصله بین ستون ۱ و ۲ با ستون ۳ و ۴، ۰٫۹ متر، فاصله بین ستون ۳ و ۴ با ستون ۵ و ۶، ۱٫۶ متر و مابقی ستون‌ها، دارای فاصله ۱٫۴ متر می‌باشند. در حالات دیگر هم نام‌گذاری ستون‌ها و ردیف‌ها به همین شکل می‌باشد.

۳-۲- شرایط مرزی

همان‌گونه که در شکل فوق مشخص است دبی هوا به مقدار ۲۰۰۰ فوت مکعب بر دقیقه از ۶ مرز وارد و از یک مرز خارج می‌شود. در تمامی رک‌ها یک فن ورودی با قدرت مکش ۶۰۰ فوت مکعب بر دقیقه و یک فن خروجی با قدرت دمش ۳۰۰ فوت مکعب بر دقیقه موجود است. ولی لزوماً دمای ورودی و خروجی هر رک یکسان نمی‌باشد. لازم به توضیح است که مابقی جریان هوا از اطراف فن خروجی رک خارج می‌شود. شرایط مرزی هر رک در شکل ۴ آورده شده است.



جریان هوای ورودی به رک

شکل ۴- شرایط مرزی هر رک

Fig. 4. The boundary conditions of each rack

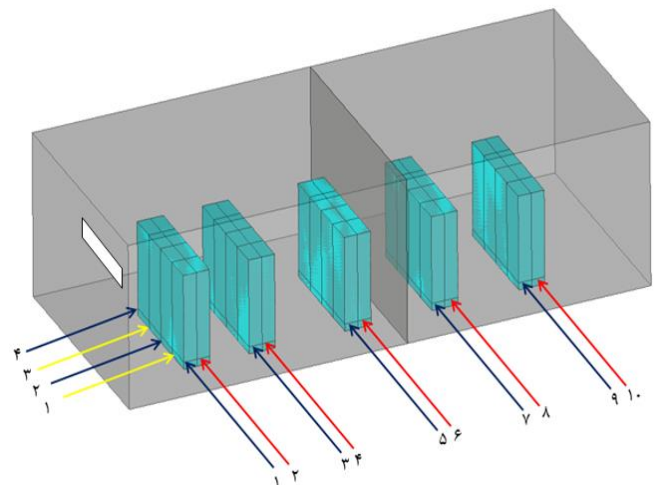
جدول ۱- بررسی استقلال حل از شبکه در ۵ اندازه شبکه

Table 1. Investigation of solution independency in 5 element sizes

تعداد المان (میلیون)	دمای نقطه ۲ (سانتی‌گراد)	خطای نقطه ۲ (%)	دمای نقطه ۱ (سانتی‌گراد)	خطای نقطه ۱ (%)
۲	۲۰٫۲	۳٫۸	۱۷	۳٫۴
۲٫۵	۲۱	۲٫۸	۱۷٫۶	۳٫۳
۳٫۲	۲۱٫۶	۱٫۴	۱۸٫۲	۲٫۲
۴٫۳	۲۱٫۹	۰٫۵	۱۸٫۶	۰
۵٫۵	۲۲		۱۸٫۶	

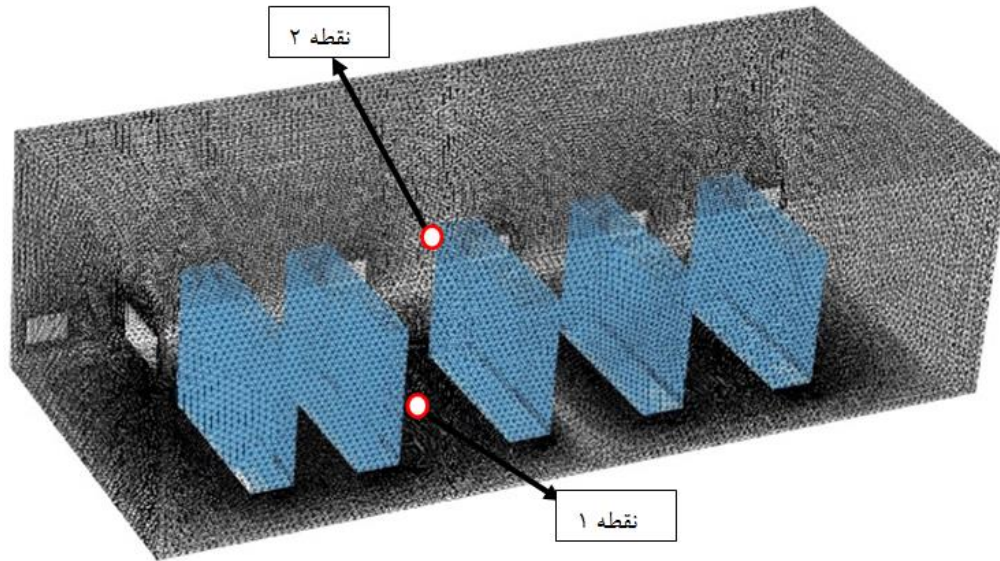
۳-۳- شبکه‌بندی

شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی با حل هم‌زمان سیال اطراف رک‌ها و جسم جامد رک‌ها انجام می‌گیرد. بنابراین شبکه‌بندی روی ناحیه سیال و جامد انجام شده است. جهت دستیابی به اندازه شبکه مناسب شبکه‌بندی در ۵ چینش انجام گرفته است. به منظور بررسی دما در شبکه‌های مذکور دو نقطه در میدان حل مد نظر می‌باشد. جدول ۱ نشان می‌دهد دمای دو نقطه ۱ و ۲ (محدوده نقاط ۱ و ۲ روی شکل ۵ نشان داده شده‌اند) در شبکه‌بندی با تعداد ۴٫۳



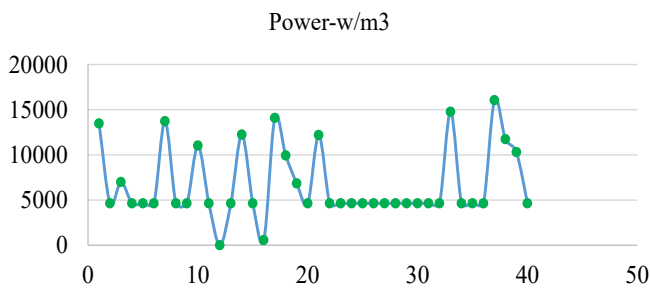
شکل ۳- نحوه چینش رک‌ها در ۱۰ ستون و ۴ ردیف

Fig. 3. Arrangement of racks in 10 columns and 4 rows



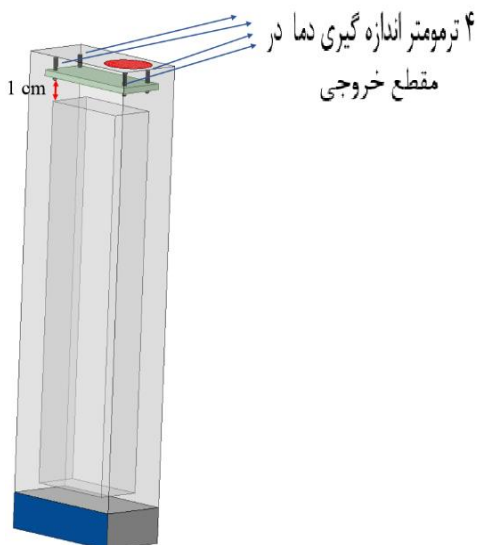
شکل ۵- شبکه‌بندی با ۴/۳ میلیون سلول

Fig. 5. Mesh with 4.3 million cells



شکل ۶- توان تولیدی رک‌ها

Fig. 6. Generating power of racks



شکل ۷- محل قرارگیری ترمومترها جهت اندازه‌گیری دمای خروجی

Fig. 7. Location of thermometers to measure the outlet temperature

میلیون نسبت به شبکه با تعداد ۵/۵ میلیون کمتر از ۰/۵ درصد تغییر می‌کند. بنابراین تعداد شبکه مناسب برای دستیابی به حل معتبر با نتایج حل تجربی در این حالت ۴/۳ می‌باشد. مقادیر دما و خطای هر نود در جدول ۱ قابل رویت می‌باشد. مقدار خطای هر شبکه نسبت به شبکه بعدی (ریزتر) محاسبه می‌شود. لازم به توضیح است که شبکه مورد استفاده در هندسه حاضر از نوع هرمی است. کوچک‌ترین المان آن ۱۰ میلی‌متر روی دیواره در ورودی رک‌ها بوده و بزرگ‌ترین آن ۱۰۰ میلی‌متر و روی دیواره سالن می‌باشد. شکل ۵ نشان‌دهنده شبکه‌بندی با تعداد ۴/۳ میلیون می‌باشد.

۳-۴- اعتبار سنجی

همان‌گونه که توضیح داده شد در سالن‌های سرور، رک‌ها دارای توان‌های متفاوتی هستند لذا تحلیل آن‌ها حساس‌تر و پراهمیت‌تر خواهد بود. با توجه به نوع تجهیزات و نوع پردازش تجهیزات هر رک، توان تولیدی آن‌ها متفاوت می‌باشد. شکل ۶ نشان‌دهنده توان تولیدی هر رک می‌باشد. توان این رک‌ها از میزان برق مصرفی توسط هر رک برآورد شده است. برای اندازه‌گیری میزان برق مصرفی آنها با استفاده از آمپر متر مدل MS۲۰۱۵A با دقت مثبت، منفی ۲ درصد استفاده گردیده است.

برای اعتباربخشی به شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی، دما در خروجی تعدادی از رک‌ها اندازه‌گیری شده است. برای اندازه‌گیری دما، ترمومتر در چهار نقطه به ترتیب شکل ۷ در نظر تعبیه گردیده

جدول ۲- اعتباربخشی حل در خروجی رکها

Tabale 2. Solution validation at rack output

شماره رک	دمای داده تجربی (کلوین)	دمای حل عددی (کلوین)	اختلاف دمای مطلق	خطا %
۱	۲۹۷/۳	۲۹۶/۸	۰/۴۸	۰/۱۶
۳	۲۹۶/۲	۲۹۶/۳	۰/۱۴	۰/۰۵
۷	۲۹۶/۲	۲۹۶/۳	۰/۱۸	۰/۰۶
۱۰	۲۹۷/۲	۲۹۶/۹۵	۰/۲	۰/۰۷
۱۲	۲۹۳/۲	۲۹۳/۶	۰/۴۷	۰/۱۶
۱۴	۲۹۷/۴	۲۹۷/۲	۰/۱۸	۰/۰۶
۱۶	۲۹۳/۵	۲۹۳/۲	۰/۲۹	۰/۱
۱۷	۲۹۷	۲۹۷/۴	۰/۴	۰/۱۳
۱۸	۲۹۶/۴	۲۹۷/۲	۰/۷۹	۰/۲۷
۱۹	۲۹۶	۲۹۶/۵	۰/۵۹	۰/۲
۲۱	۲۹۷/۴	۲۹۷/۳	۰/۱	۰/۰۳
۳۳	۲۹۸	۲۹۷/۶	۰/۳۴	۰/۱۱
۳۷	۲۹۸/۱	۲۹۷/۷	۰/۳۷	۰/۱۲
۳۸	۲۹۷/۱	۲۹۶/۷	۰/۳۹	۰/۱۳
۳۹	۲۹۶/۷	۲۹۶/۲	۰/۴۵	۰/۱۵

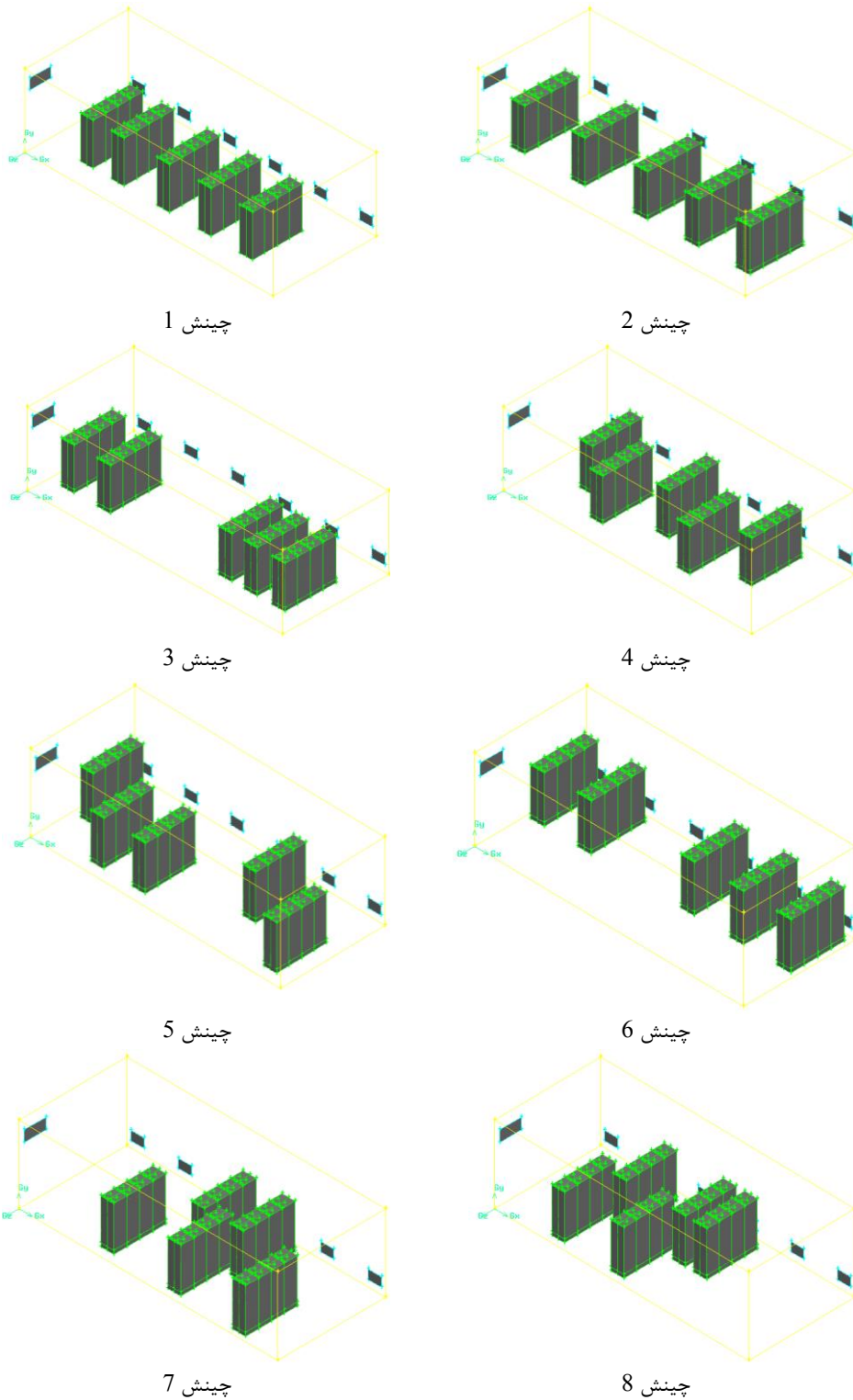
۵-۳- نتایج حل عددی

جهت بررسی تأثیر محل قرارگیری رکها در سالن، ۸ حالت چینش مدنظر قرار گرفته است. نتایج ۸ چینش در این بخش آورده شده است. از تمام ۸ حالت برای پیش بینی چینش بهینه استفاده گردیده است. شکل ۸ نشان دهنده این ۸ حالت چینش می باشد. محل قرارگیری رکها در دو بعد صفحه ای سالن تغییر می کند. رکها در دو بعد X و Z جابه جا می شوند. تغییر مکان رکها بر روی کیفیت سرمایه رکها تأثیرگذار است.

به عنوان نمونه در ادامه نتایج حل عددی مورد ۱ ارایه شده است. شکل ۹ نشان دهنده توزیع دما در ردیف های انتهایی می باشد. توزیع دما در ردیف انتهایی نشان می دهد کدام رک دارای توان گرمایشی بیشتر می باشد. کانتور دمای شکل ۹ دلیل انتخاب ورودی هوای سرد در بخش پایینی سالن را نشان می دهد. در صورتی که ورودی های هوا در بالای دیوار قرار بگیرند دمای ورودی به رک جهت سرمایه مناسب نیست. همان گونه که مشاهده می شود با دور شدن از دیوارهای رکها به دلیل اختلاط بیشتر جریان سرد و گرم گرادیان دمایی کمتری ملاحظه می شود. خروجی رکهای با توان بالاتر به

است. لازم به توضیح است که سنسور مورد استفاده برای اندازه گیری از نوع ۲-HTC بوده که دقت اندازه گیری آن ۱ درجه سانتی گراد می باشد. پس از اندازه گیری دما توسط ۴ سنسور تعبیه شده در مقطع خروجی، میانگین دمای آن ها به عنوان دمای مقطع خروجی برای اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفت. دلیل انتخاب ۴ نقطه در این مقطع، گرادیان دمایی موجود در این صفحه می باشد که استفاده از ۱ سنسور برای اندازه گیری را دچار خطا می نماید.

مقایسه ی نتایج حاصل از حل عددی و اطلاعات تجربی در خروجی رکها در جدول ۲ آورده شده است که نشان دهنده تطابق بسیار خوب نتایج حل عددی و تجربی می باشد. برای اعتباربخشی حل عددی دمای هوا در خروجی ۱۵ رک اندازه گیری شده است. دمای اندازه گیری شده در صفحه بالایی رکها در سه نقطه انجام شده و متوسط آن برای اعتباربخشی در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه اندازه ها بر حسب کلوین بوده درصد خطای دو مقدار تجربی و عددی کوچک است. در حقیقت نمودار جدول ۲ تأییدکننده صحت شبیه سازی انجام شده در بررسی حاضر می باشد. همان گونه که قبلاً ذکر شد دقت اندازه گیری سنسورهای داده برداری یک درجه می باشد.

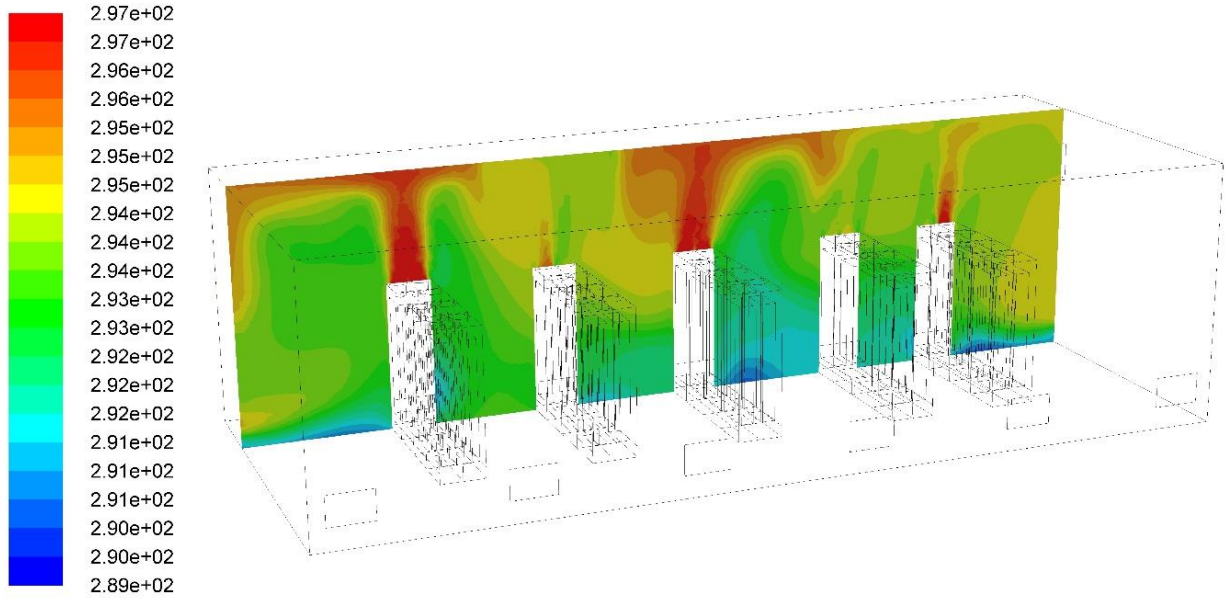


شکل ۸- هندسه ۸ حالت چینش مورد بررسی

Fig. 8. 8 geometry of the arrangement investigated

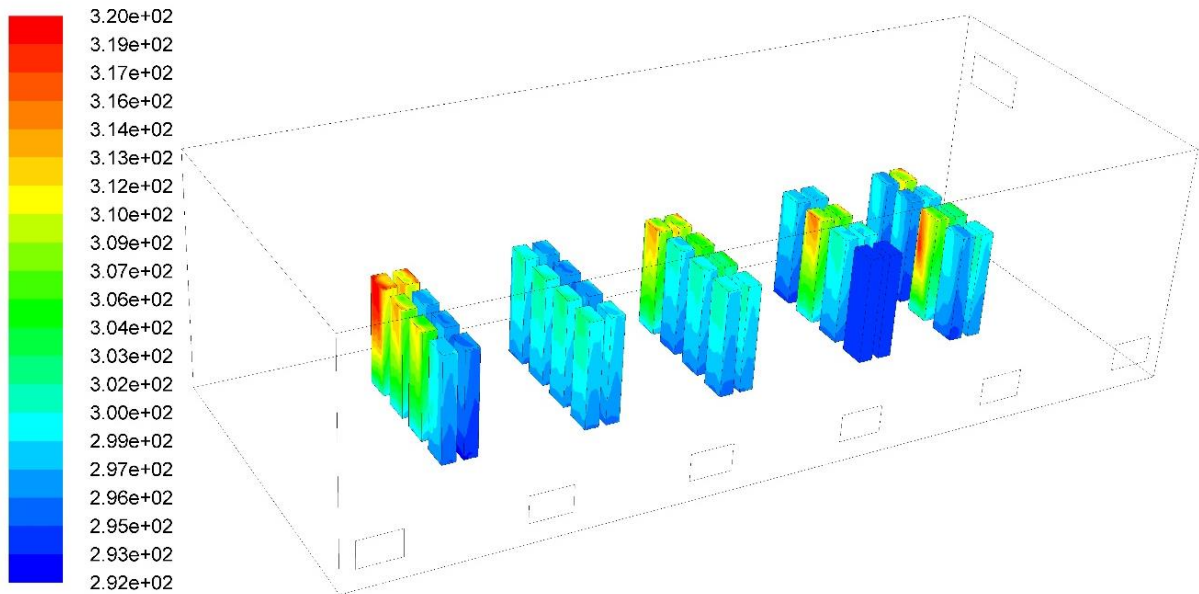
که در این شکل قابل مشاهده است، هوا با حرکت به سمت بالا و گرم شدن تدریجی از توان خنک‌کنندگی آن کاسته شده و در نتیجه دمای بالاتر در قسمت فوقانی رک قابل رؤیت می‌باشد. بیشینه

سبب دوری از جریان ورودی به اتاق و همچنین توان بالاتر آنها دارای دمای خروجی بالاتری می‌باشند. شکل ۱۰ نشان‌دهنده کانتور دمای دیواره رک‌ها است. همان‌طور



شکل ۹- کانتور دما در صفحه میانی ردیف اول و ردیف آخر (کلوین)

Fig. 9. Temperature contour in the middle row of the first row and the last row (Kelvin)



شکل ۱۰- کانتور دمای دیواره رکها (کلوین)

Fig. 10. Rack wall temperature contour (Kelvin)

و خروجی از سی‌رک^۱ (دمای ورودی به سالن) است. این پارامتر نشان‌دهنده نسبت میزان گرمایش، قبل از رسیدن هوای سرد ورودی به رک‌ها به گرمایی که هوای سرد از رک‌ها دریافت می‌کند. شاخص گرمای برگشتی میزان مؤثر انتشار گرما را مشخص می‌کند. استفاده از پارامترهای بی‌بعد باعث می‌شود که این روابط برای سیستم‌ها با

دمای دیواره رک ۳۲۰ کلوین می‌باشد که در محدوده دمایی تحمل‌پذیر است. بیشترین توان مربوط به رک ۳۷ می‌باشد که با توجه به توزیع دما روی دیوار رک قابل رویت است. کمترین دمای دیوار رک مربوط به رک‌های ۱۲ و ۱۶ می‌باشد که متناسب با توان رک نشان داده شده در شکل ۶ می‌باشد.

شاخص گرمای تولیدی تابعی از دمای ورودی رک، خروجی رک

1 CRAC (Computer Room Air Conditioning)

و ترتیب قرارگیری ستون‌های رک که در جدول ۳ ارائه شده است می‌توان دریافت، نزدیک کردن رک‌ها به خروجی سی‌رک (ورودی هوای سرد به سالن) و در حالی که روبروی خروجی سی‌رک باشند باعث افزایش راندمان سرمایه‌ش رک‌ها خواهد شد. این کار باعث می‌شود تا هوای خنک قبل اختلاط با هوای گرم وارد پردازنده‌ها گردد.

شاخص گرمای برگشتی کم نشان‌دهنده اختلاط هوای گرم خروجی از رک‌ها با هوای سرد درون راهرو، بین رک‌ها و دیواره است. این نمودار نشان‌دهنده آن است که هرچه عرض راهرو بین رک‌ها کم شود مقدار شاخص برگشتی افزایش می‌یابد زیرا فرصت اختلاط هوای گرم و هوای سرد کاهش یافته و گرادیان دمایی زیادی ایجاد خواهد شد و نتیجه آن افزایش راندمان سرمایه‌ش است.

شکل ۱۲ نشان‌دهنده کمینه و متوسط دمای ورودی به ۴۰ رک در ۸ چینش می‌باشد. این نمودار تأییدکننده شاخص گرمای برگشتی می‌باشد. هرچه دمای ورودی بیشتری در چینش‌ها مشاهده شود، راندمان سیستم سرمایه‌ش کاهش می‌یابد. با توجه به رابطه (۱۱) در چینش‌هایی که دمای ورودی به رک پایین می‌باشد (متوسط دما) سرمایه‌ش رک با کیفیت بالاتری انجام می‌شود. این امر با کنار هم قرار دادن شکل ۱۱ و شکل ۱۲ تأیید می‌شود. به ترتیب بالاترین و پایین‌ترین مقدار متوسط دمای ورودی مربوط به چینش ۷ و ۸ می‌باشد و به همین دلیل پایین‌ترین و بالاترین کیفیت خنک‌کاری را نیز دارا می‌باشد. تنها با کاهش ۲٫۳ درجه در دمای ورودی به رک شاخص گرمای برگشتی نزدیک به ۵۰ درصد افزایش می‌یابد که اهمیت کاهش اختلاط هوای راهروی گرم و سرد را نشان می‌دهد.

شاخص سرمایه‌ش برگشتی رک پارامتر دیگری است که در طراحی اتاق‌های سرور مورد بررسی قرار می‌گیرد. این شاخص مقداری است که نشان می‌دهد تجهیزات رک به چه میزان خنک شده و چقدر الزامات استانداردها رعایت شده است. یعنی وضعیتی که در آن رک‌های خنک شده، برای ادامه فعالیت‌شان به آن شرایط نیاز دارند. در تمامی حالات بررسی‌شده شاخص سرمایه‌ش بازگشتی رک بالا و پایین^۱، ۱۰۰ درصد می‌باشد.

شکل ۱۳ نشان‌دهنده، بیشینه و متوسط دمای خروجی از ۴۰ رک در ۸ چینش می‌باشد. با توجه به روابط (۱۰) و (۱۱) افزایش

ابعاد مختلف مقیاس‌بندی شوند. رابطه (۱۰) نشان‌دهنده رابطه کلی شاخص گرمای تولیدی می‌باشد.

$$SHI = \frac{\delta Q}{Q + \delta Q} \quad (10)$$

و همچنین شاخص گرمای برگشتی از رابطه (۱۱) به دست می‌آید.

$$RHI = \frac{Q}{Q + \delta Q} \quad (11)$$

در رابطه‌های فوق Q مجموع کل گرمای منتشر توسط رک‌های درون سالن می‌باشد و از رابطه (۱۲) به دست می‌آید.

$$Q = \sum_j \sum_i m_j^r C_p (T_{out}^r)_j - (T_n^r)_j \quad (12)$$

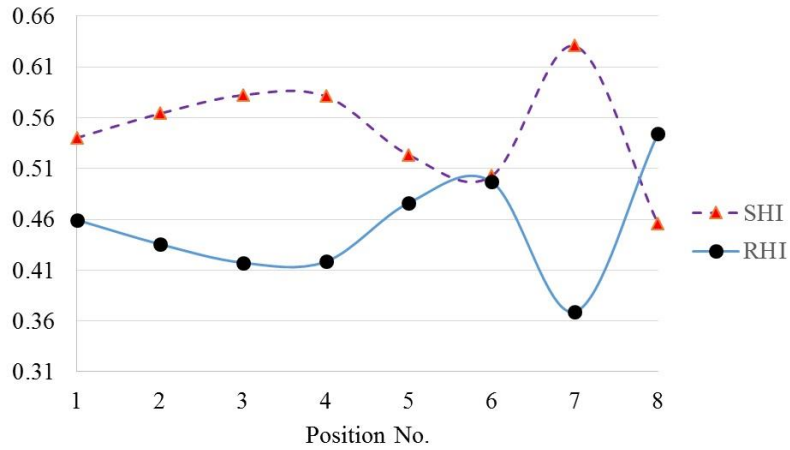
همچنین δQ افزایش آنتالپی هوای سرد قبل از ورود به رک‌ها می‌باشد و از رابطه (۱۳) به دست می‌آید.

$$\delta Q = \sum_j \sum_i m_j^r C_p (T_n^r)_j - T_{ref} \quad (13)$$

$(T_n^r)_j$ و $(T_{out}^r)_j$ به ترتیب میانگین دمای ورودی و خروجی به i امین رک در j امین ردیف رک‌هاست. T_{ref} نشان‌دهنده دمای خروجی از کانال‌های هوای سرد به سالن است که در این کار برای تمام خروجی‌ها با هم برابر است. با فرض اینکه هیچ‌گونه انتقال گرمایی در کانال کشی اتفاق نمی‌افتد، هوای خروجی از کانال‌های ورودی به اتاق سرور به‌عنوان دمای مرجع برای محاسبات آنتالپی استفاده می‌شوند. این دما ۲۸۹٫۱۵ کلوین در نظر گرفته شده است. نمودار شاخص گرمای تولیدی و شاخص گرمای برگشتی برای حالت‌های مختلف چینش در شکل ۱۱ ارائه شده است. در عمل بالابودن شاخص گرمای تولیدی نشان‌دهنده دمای هوای ورودی بالاست که ناشی از چرخش دوباره هوای گرم به درون راهروی سرد یا عبارتی اختلاط هوای گرم و سرد قبل از ورود به رک‌هاست. شاخص گرمای تولیدی نماد خوبی از بازده انرژی سیستم بوده و درعین حال نشان‌دهنده نقص عملکرد سیستم به دلیل دماهای بالا است. نفوذ گرما به درون راهروی سرد صرفاً ناشی از الگوهای چرخش دوباره درون اتاق است.

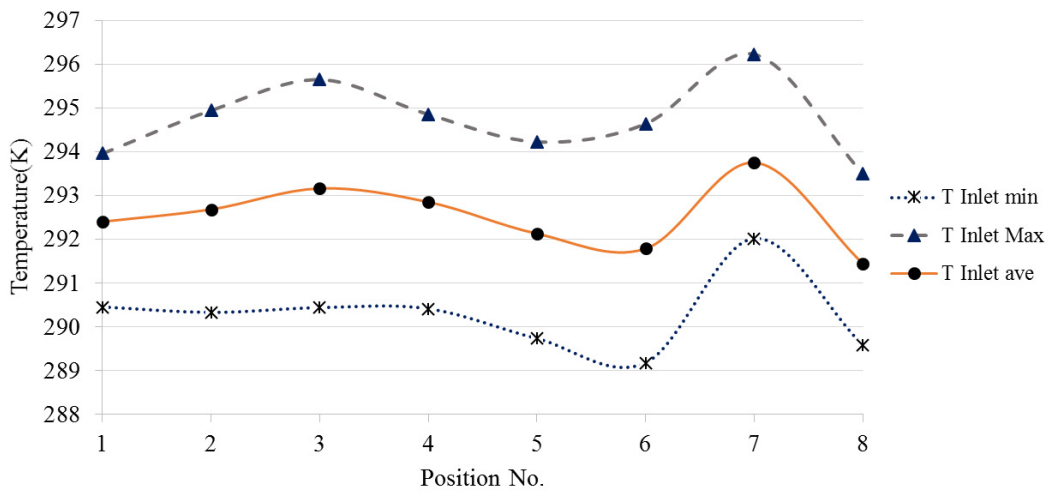
شکل ۱۱ نشان می‌دهد شاخص گرمای تولیدی در حالت چینش هشتم با مقدار ۰٫۴۵۶ کمترین مقدار و در چینش هفتم بیشترین مقدار، یعنی ۰٫۶۳۱ را دارا می‌باشد. بعد از چینش هفتم بیشترین مقدار شاخص گرمای تولیدی به ترتیب مربوط به چینش چهارم، سوم می‌باشد. با توجه به مقادیر استخراج شده از ۸ حالت شبیه‌سازی

1 Return Cooling Index High and Low



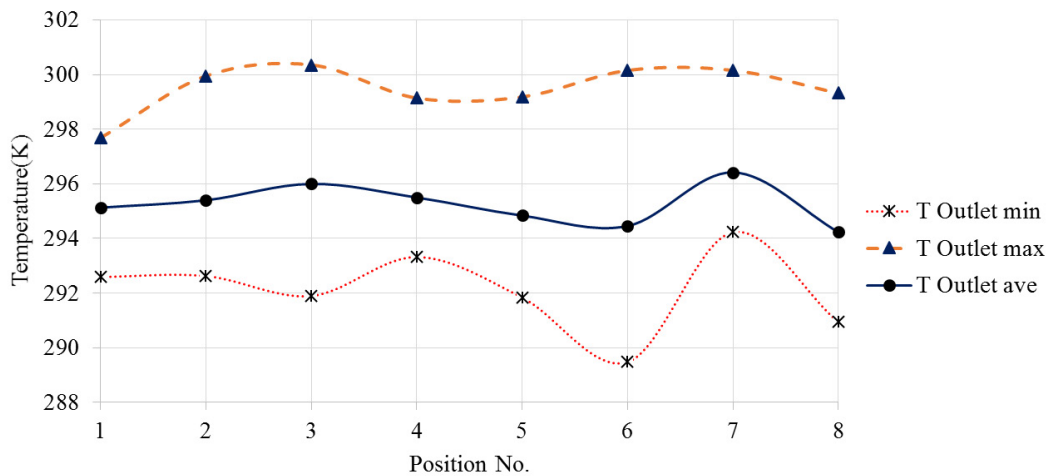
شکل ۱۱- RHI و SHI برای حالت‌های مختلف چینش

Fig. 11. RHI and SHI for different alignment mode



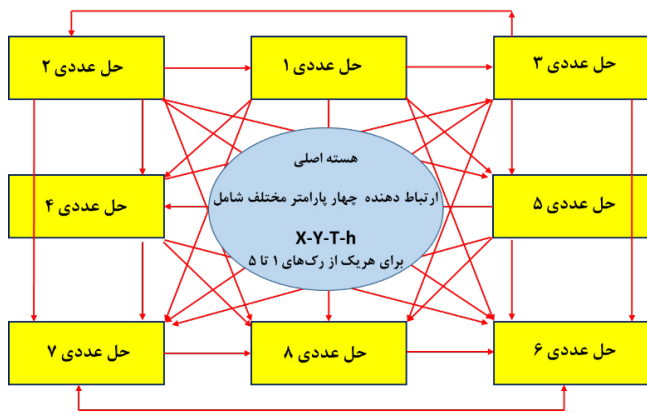
شکل ۱۲- بیشینه دمای ورودی به رک‌ها بر حسب کلونین برای حالت‌های مختلف چینش

Fig. 12. Maximum Kelvin Inlet Rack Temperature for Different Position



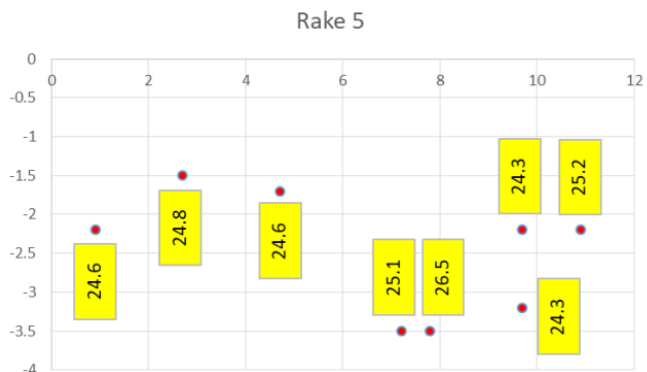
شکل ۱۳- بیشینه دمای خروجی از رک‌ها بر حسب کلونین برای حالت‌های مختلف چینش

Fig. 13. Maximum output temperature of racks in Kelvin for different modes of alignment



شکل ۱۴- شبکه‌ی عصبی انتخاب شده برای ارتباط بین چهار پارامتر x ، y ، T و h برای هر یک از رک‌ها

Fig. 14. The neural network selected for the relationship between the four parameters x , y , T and h for each of the racks



شکل ۱۵- محل قرارگیری رک شماره ۵ در موقعیت‌های مختلف

Fig. 15. Location of Rack 5 in different positions

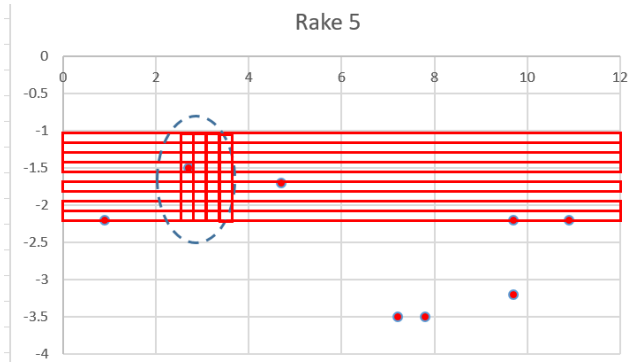
از شماره رک ۱ تا رک ۵ به همراه دمای به دست آمده آن‌ها استخراج می‌شود. به عنوان مثال رک ۱، در ۸ موقعیت مختلف قرار گرفته و در این ۸ موقعیت مقدار دما استخراج می‌گردد. با استفاده از این داده‌ها قرار است تا یک تابع حداقل‌سازی بر روی هر یک از رک‌ها پیاده شود. توضیحات مربوط به الگوریتم حداقل‌سازی در قدم‌های بعدی ارائه می‌گردد. به عنوان مثال رک شماره ۵ که از دمای بالایی در بین رک‌ها برخوردار بوده، در موقعیت‌های مختلف مطابق شکل ۱۵ قرار گرفته است. در هر یک از موقعیت‌ها، دمای به خصوصی حاصل شده است. برای مثال به طور کامل مشخص است که مقدار دمای حداقل در موقعیت X برابر با ۹٫۷ می‌باشد. نکته‌ی مهم در این مرحله این است که در کدام موقعیت، دمای کمینه برای این رک اتفاق خواهد افتاد.

دمای خروجی باعث بالارفتن کیفیت سرمایه‌ش رک‌ها خواهد شد. در عین حال که دمای خروجی چینش ۷ از مابقی حالت‌ها بیشتر است اما چون تغییرات دما در خروجی رک‌ها (شکل ۱۳) برای ۸ چینش نسبت به تغییرات دما در ورودی رک (شکل ۱۲) کمتر می‌باشد تاثیرگذاری دمای ورودی بیشتر بوده و چینش ۸ بالاترین راندمان سرمایه‌ش را دارد. به عبارت دیگر اختلاف دمای متوسط خروجی حد بالا و پایین خروجی رک‌ها (شکل ۱۳) برای ۸ چیدمان ۱/۸ درجه و اختلاف دمای متوسط حد بالا و پایین ورودی رک‌ها (شکل ۱۲) ۲/۷ درجه برای ۸ چیدمان می‌باشد که نشان می‌دهد دمای ورودی بر کیفیت سرمایه‌ش موثرتر است.

۴- بهینه‌سازی

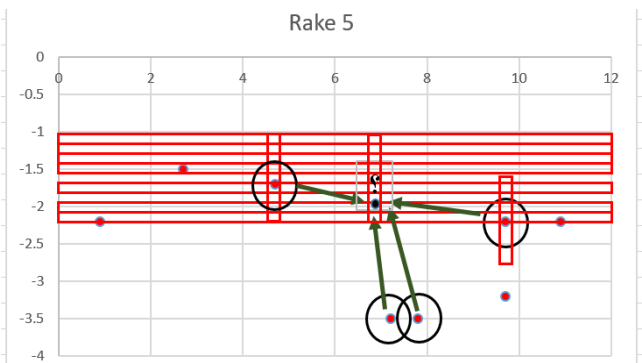
الگوریتم ژنتیک استفاده شده در این پژوهش بر اساس بهره‌گیری از ایده‌ی شبکه‌ی عصبی برای یافتن موقعیت مناسب رک‌ها برای رسیدن به حداقل دمای ممکن می‌باشد. برای این منظور دو منبع مناسب در این حوزه [۱۴ و ۱۵] به عنوان رهیافت شبکه‌ی عصبی انتخاب و مراحل دستیابی به موقعیت مناسب رک‌ها با بهره‌گیری از ایده‌های به کاررفته در این منابع انجام گردیده‌است. برای این منظور از یک شبکه‌ی عصبی مطابق شکل ۱۴ استفاده شده تا بین چهار پارامتر مختلف یعنی Z ، X ، T و h موقعیت رک‌ها و همچنین دو پارامتر انتقال حرارت دما (T) و ضریب انتقال حرارت همرفتی (h) ارتباط برقرار نماید. مقدار دما در این بخش از مقاله از میانگین دمای دیواره رک‌ها استخراج شده است. بعد از حل عددی انجام‌شده، این چهار پارامتر برای هر یک از رک‌ها استخراج گردیده تا امکان رسیدن به شرایط بهینه وجود داشته باشد. همان‌طور که در شکل شبکه عصبی مشاهده می‌شود، تمامی حل‌های عددی از طریق هسته‌ی اصلی که دریافت‌کننده چهار پارامتر ذکر شده است، با هم در ارتباط بوده تا در نهایت منجر به یک انتخاب بهینه شود. به منظور کاهش حجم اطلاعات و افزایش سرعت در شبکه، بین ضریب انتقال حرارت همرفتی و دمای رک با استفاده از معادلات انتقال حرارت دو بعدی ارتباط برقرار شده تا این ضریب از الگوریتم میان‌یابی حذف و تنها پارامتر دما به عنوان هدف مورد نظر باشد. الگوریتم میان‌یابی با استفاده از روش ذکر شده در منبع [۱۶] استفاده شده است. نحوه میان‌یابی در ادامه توضیح داده می‌شود.

در این مرحله ابتدا موقعیت مکانی هر یک از رک‌ها شامل X و Z



شکل ۱۶- شبکه‌بندی با ابعاد ۲ سانتی‌متر در ۲ سانتی‌متر

Fig. 16. 2cm x 2cm grid



شکل ۱۷- شبکه‌بندی با ابعاد ۲ سانتی‌متر در ۲ سانتی‌متر

Fig. 17. 2cm x 2cm grid

گره‌ها، مقدار دمای مجهول از اطلاعات رک قرار گرفته در موقعیت‌های مختلف به دست آمده است. در نهایت برای هر یک از رک‌های شماره ۱ تا ۵، یک ماتریس حاوی اطلاعات موقعیت X و Z گره‌ها و دمای آن‌ها حاصل می‌شود. با اطلاعات به دست آمده در مرحله قبل، مقدار حداقل دما در شبکه تعیین می‌شود. در واقع در این قسمت تعیین می‌گردد که رک شماره ۱ تا ۵ در چه موقعیت‌هایی بایستی قرار گرفته شوند تا دمای آن‌ها به حداقل برسد. به عبارتی در این قسمت الگوریتم یافتن حداقل دما اجرا می‌شود. شکل ۱۸ نحوه قرارگیری رک‌ها را به همراه دمای حداقل به دست آمده برای هر کدام با استفاده از کد به کار رفته در نرم‌افزار متلب نشان می‌دهد. میانگین دمای به دست آمده برابر با 21.9 درجه سانتی‌گراد بوده که به میزان 0.7 درجه نسبت به بهترین حالت شبیه‌سازی کمتر است و نشان می‌دهد موقعیت‌های به دست آمده مقدار حداقل دما را برای هر یک از رک‌ها به همراه دمای میانگین ایجاد کرده‌اند. در این شبیه‌سازی، دمای رک ۵ به مقدار کمینه خود یعنی 24.1 رسیده است.

در این مرحله، فرآیند شبکه‌سازی دوبعدی بر روی هر یک از رک‌ها انجام می‌گیرد. به عنوان نمونه این فرآیند بر روی رک شماره ۵ توضیح داده شده است. بر روی صفحه‌ی دو بعدی ابتدا یک شبکه با ابعاد ۲ سانتی‌متر در ۲ سانتی‌متر زده می‌شود. برای مثال شماتیکی از این شبکه در شکل ۱۶ نشان داده شده است. این شبکه سرتاسر صفحه‌ی دوبعدی را فرا می‌گیرد. شبکه‌بندی با دستور تولید شبکه در نرم‌افزار متلب انجام می‌شود. سباز انتخاب شده شبکه ۲ سانتی‌متر در ۲ سانتی‌متر به صورت بهینه و با روش سعی و خطا به دست آمده تا هم دقت شبکه پایین نباشد و هم تعداد اطلاعات قابل ذخیره‌سازی برای رک‌ها زیاد نشود. این مرحله از الگوریتم بر روی هر یک از رک‌ها انجام می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۸ ملاحظه می‌شود، هر یک از ۸ حالت چینش نقاط بر روی گره‌ها قرار گرفته است. از این رو اطلاعات برخی از شبکه‌ها کامل بوده و مقدار دما بر روی آن‌ها مشخص است. در مرحله‌ی بعدی قرار است از شبکه‌های حاوی اطلاعات دما استفاده کرده تا دمای شبکه‌هایی که فاقد دما می‌باشند، تعیین شود.

در این مرحله، از یکی از توابع معروف نرم‌افزار متلب به منظور درون‌یابی و برون‌یابی اطلاعات به نام گریددیتا^۱ استفاده می‌شود. این تابع این امکان را فراهم می‌سازد تا اطلاعات دما در کلیه‌ی نقاط شبکه تعیین گردد. برای این کار از روش مکعبی^۲ استفاده می‌شود. با استفاده از این روش، برای محاسبه‌ی دما در یک گره، از ۴ گره حاوی اطلاعات دما استفاده می‌شود. نحوه‌ی استفاده از ۴ گره اطراف در شکل ۱۷ نشان داده شده است.

در شکل ۱۷ برای یافتن دمای گره مجهول، از ۴ گره همسایه اطراف که اطلاعات آن قبلاً از شبیه‌سازی به دست آمده است، استفاده می‌شود. بدین‌صورت که نحوه‌ی اثر بخشی گره‌های معلوم بر گره مجهول، وابسته به نزدیکی آن‌ها به آن گره می‌باشد. برای مثال در شکل ۱۷ گره سمت چپ به دلیل نزدیکی از اثرگذاری بیشتری نسبت به سه گره دیگر برخوردار خواهد بود. نحوه به دست آمدن اطلاعات گره، بر اساس میان‌یابی دما از طریق ۴ گره همسایه و بر اساس فاصله‌ی آن‌ها می‌باشد. با اعمال این فرآیند بر همگی گره‌های موجود، اطلاعات دما در تمامی گره‌های نامعلوم تعیین می‌گردد. در پایان این مرحله، یک ماتریس حاوی موقعیت X و Z تمامی گره‌ها به همراه دمای آن‌ها به دست می‌آید. بدین مفهوم که در تمامی

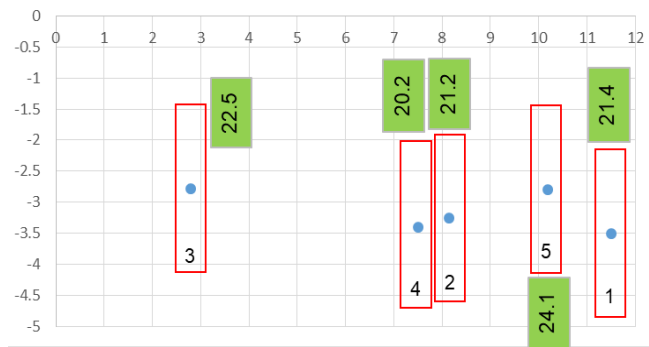
1 Griddata
2 Cubic

متوسط دمای دیواره رک در بهینه‌سازی به کار رفته است. در نهایت هدف اصلی به دست آوردن حالت بهینه با استفاده از شبکه عصبی است که از نتایج بهینه‌سازی می‌توان استنباط کرد کمترین دما، ۲۰٫۲ درجه سانتی‌گراد و بیشترین دما ۲۴٫۱ می‌باشد. این دماها زمانی حاصل می‌شود که رک‌ها با تولید حرارت‌های مختلف بر اساس شکل ۱۵ چینش شوند.

مراجع

- [1] R.K. Sharma, C.E. Bash, C.D. Patel, Dimensionless parameters for evaluation of thermal design and performance of large scale data centers, in: Proceedings of AIAA2002-3091, American Institute of Aeronautics and Astronautics Conference, 2002.
- [2] 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.
- [3] J. Cho, T. Lim, B.S. Kim, Measurements and predictions of the air distribution systems in high compute density (Internet) data centers, Energy and Buildings 41 (10) (2009) 1107–1115.
- [4] Nakao, M., Hayama, H. and Nishioka, M., 1991, 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), p. 393-400.
- [5] C.D. Patel, C. 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.
- [6] C.D. Patel, R. Sharma, C. Bash, M. Beitelmal. Thermal considerations in cooling of large scale high compute density data centers, Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 2002, pp. 767e776.
- [7] J. Rambo, Y. Joshi. Multi-scale modeling of high power density data centers, The Pacific Rim/ASME International Electronics Packaging Technical

حالت بهینه (با میانگین دما ۲۱٫۹)



شکل ۱۸- چینش بهینه قرارگیری رک‌ها برای رسیدن به حداقل دمای میانگین و حداقل دما برای هر رک

Fig. 18. Optimal alignment of racks to achieve minimum average temperature and minimum temperature for each rack

حالت بهینه به دست آمده از کد، نشان می‌دهد الگوریتم به کار رفته توانسته است دمای پایین‌تری را نسبت به حالات ۱ تا ۸ شبیه‌سازی ایجاد کند. در این چیدمان، دمای رک ۱، رک ۲، رک ۳، رک ۴ و رک ۵ به ترتیب برابر با ۲۱٫۴، ۲۱٫۲، ۲۱٫۲، ۲۲٫۵، ۲۰٫۲ و ۲۴٫۱ به دست آمده است. مقدار حداقل دمای چیدمان بهینه، مربوط به رک ۴ و برابر با ۲۰٫۲ می‌باشد.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی برای ۸ حالت چینش شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد چینش هشتم بهترین شاخص گرمای تولیدی برابر با ۰٫۴۵۶ و چینش هفتم بدترین شاخص گرمای تولیدی برابر با ۰٫۶۳۱ را دارا می‌باشد. می‌توان دریافت نزدیک کردن رک‌ها به خروجی سی‌رک (ورودی هوای سرد به سالن) و در حالی که روبروی خروجی سی‌رک باشند باعث افزایش راندمان سرمایش رک‌ها خواهد شد. این کار باعث می‌شود تا هوای خنک قبل اختلاط با هوای گرم وارد پردازنده‌ها گردد. از طرفی تنها با کاهش ۲٫۳ درجه در دمای ورودی به رک شاخص گرمای برگشتی نزدیک به ۵۰ درصد افزایش می‌یابد که اهمیت کاهش اختلاط هوای راهروی گرم و سرد را نشان می‌دهد. در تمامی چینش‌های بررسی شده شاخص سرمایش بازگشتی رک بالا و پایین، ۱۰۰ درصد می‌باشد. بهینه‌سازی با استفاده از نتایج شبیه‌سازی انجام شده است.

- “Application of the combined air-conditioning systems for energy conservation in data center”. *Journal of the Energy and Buildings*, pp. 580–586.
- [13] N.M.S. Hassan, M.M.K. Khan, M.G. Rasul, (2013). “Temperature monitoring and CFD Analysis of Data Centre”. *Journal of the Procedia Engineering*, pp. 551–55
- [14] Z. Song, B. T. Murray, and B. Sammakia, “Airflow and temperature distribution optimization in data centers using artificial neural networks,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 64, pp. 80–90, Sep. 2013.
- [15] S. Deng and Y. Hwang, “Applying neural networks to the solution of forward and inverse heat conduction problems,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 49, no. 25–26, pp. 4732–4750, Dec. 2006.
- [16] C.-C. Wang, J.-H. Huang, and D.-J. Yang, “Cubic spline difference method for heat conduction,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 39, no. 2, pp. 224–230, Feb. 2012.
- Conference and Exhibition, 2003, IPACK2003-35297.
- [8] J. Rambo, Y. Joshi. Physical models in data centers airflow simulations, ASME International Mechanical Engineering Congress and R&D Exposition, 2003, IMECE03-41381.
- [9] R. Schmidt, K.C. Karki, S.V. Patankar. Raised data center: Perforated tile flow rates for various tile layouts, 9th Intersociety Conference on Thermal and Thermo mechanical Phenomena in Electronic Systems, 2004.
- [10] R. Schmidt, K.C. Karki, K.M. Kelkar, A. Radmehr, S.V. Patankar. Measurements and predictions of the flow distribution through perforated tiles in raised floor data centers, The Pacific Rim/ASME International Electronics Packaging Technical Conference.
- [11] Jinkyun Cho, Joonyoung Yang, Woopyoung Park, (2014). “Evaluation of air distribution system’s airflow performance for cooling energy savings in high-density data centers”. *Journal of the Energy and Buildings*, pp. 270–279.
- [12] Priyadumkol, Chawalit Kittichaikarn, (2014).

