



بررسی اثرات سرعت هوای ورودی از دریچه‌ها بر شرایط حرارتی و عملکردی در یک مرکز داده

سیدعلیرضا ذوالفقاری^{1*}، مهدی افزلیان²

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

* بیرجند، صندوق پستی 97175/376، zolfaghari@birjand.ac.ir

چکیده

در تحقیق حاضر به کمک دینامیک سیالات محاسباتی و نرم‌افزار ابریک به بررسی اثرات سرعت هوای ورودی از دریچه‌ها بر شرایط حرارتی و عملکردی یک مرکز داده پرداخته شده است. به این منظور سرعت هوای ورودی در چهار حالت مختلف (0.6، 0.8، 1.0 و 1.2) متر بر ثانیه و دما برابر با مقدار ثابت 12 درجه سانتی‌گراد قرار داده شده است. برای بررسی شرایط حرارتی و عملکردی این مرکز داده از پارامترهای بی بعدی هم‌چون شاخص دمای برگشتی، شاخص گرمای برگشتی و شاخص گرمای تولیدی استفاده شده است. براساس نتایج به دست آمده، هر چه سرعت هوا از دریچه‌های ورودی افزایش یابد، شاخص دمای برگشتی و شاخص گرمای برگشتی افزایش و شاخص گرمای تولیدی کاهش می‌یابد. این موضوع نشان‌دهنده وجود پدیده‌ای به نام جریان عبوری است. به این مفهوم که هوای سرد ورودی از دریچه‌ها بدون عبور از راکها مستقیماً از دریچه‌ی خروجی خارج می‌شود. که خود باعث کاهش راندمان و طول عمر تجهیزات و افزایش مصرف انرژی می‌شود. به علاوه میزان اختلاط هوای سرد با هوای گرم خروجی از راکها افزایش می‌یابد که باعث کاهش عملکرد مرکز داده می‌شود.

کلید واژگان: مرکز داده، سیستم سرمایش، شرایط حرارتی

Investigation the influence of velocity of inlet air on thermal environment and equipment performance in a data center

Alireza zolfaghari*, Mahdi afzalian

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

* P.O.B. 97175.376, Birjand, Iran, zolfaghari@birjand.ac.ir

ABSTRACT

In the present study, the effect of velocity of inlet air from raised floor plenum supply on thermal environment and performance in a data center has been investigated. Inlet air temperature is considered fixed at 12 °C and the air velocity is varied at four levels (0.6, 0.8, 1.0 and 1.2 m/s). To evaluate these parameters effect, three non-dimensional indexes such as Return Temperature Index (RTI), Return Heat Index (RHI) and Supply Heat Index (SHI) are used. Computational fluid dynamics (CFD) and AirPak are used to predict the effect of the inlet air velocity on thermal environment. Based on the results, with increase in inlet air velocity, Return Temperature Index and Return Heat Index are both increased while Supply Heat Index is decreased. This can be explained by increase in bypass airflow. Bypass airflow is caused by the air that leaves the CRAC (Computer Room Air conditioning) unit and return to it directly without passing through the servers. This causes the lower efficiency, lower lifetime for equipment and more energy consumption for data center. Moreover, mixing the cool air and hot outgoing air from racks is increased and performance of data center is decreased.

Keywords: Data center, Thermal environment, Cooling system

استفاده از سیستم سرمایش مراکز داده، باید آن‌ها را به میزان کافی خنک نگاه‌داشت [5]. حدود 30-50 درصد مصرف انرژی در این فضاها مربوط به سیستم خنک‌سازی می‌شود [1]. سیستم‌های سرمایش که در مراکز داده استفاده می‌شود باید بتوانند به صورت تمام وقت (365 روز سال، 24 ساعت روز) کار کنند. در نتیجه مصرف انرژی یک مرکز داده 100 برابر یک اتاق اداری معمولی است [6].

همان طور که در "شکل 1" نشان داده شده است، سیستم‌های سرمایش در مراکز داده به این صورت است که هوا از دریچه‌های کف در محل راهروهای سرد² در دماهای پایین وارد فضا می‌شود. با ورود این هوای سرد به

1- مقدمه

عصر حاضر، عصر ارتباطات و اطلاعات است. در نتیجه رشد و نیاز به مراکز داده¹ بسیار سریع بوده است [1]. مراکز داده به مکان‌هایی می‌گویند که برای قرار دادن تجهیزات کامپیوتری مانند سرورهای پردازش‌گر، دستگاه‌های سویچ شبکه، آرایه‌های ذخیره انبوه، سیستم‌های ذخیره اطلاعات و سیستم‌های ارتباطی استفاده می‌شود [2]. با رشد سریع صنعت مبتنی بر اطلاعات، مراکز داده تبدیل به یک پدیده مرسوم در هر دو بخش دولتی و خصوصی شده است [3]. علاوه بر تجهیزات فوق، سیستم تهویه هوا، منابع تغذیه، سیستم اطفای حریق و دستگاه‌های امنیتی نیز در این فضاها موجود است [4]. برای حفاظت از سیستم‌های کامپیوتری و افزایش کارکرد و طول عمر آن‌ها با

² Cold aisle

¹ Data center

با توجه به اهمیت سرمایه‌ش در این مراکز داده، هدف از تحقیق حاضر بررسی اثرات سرعت هوای ورودی از دریچه‌ها بر عملکرد سیستم سرمایه‌ش است. برای مقایسه حالات مختلف با یکدیگر از چند پارامتر بی‌بعد استفاده می‌کنیم.

2- فضای نمونه

هندسه مورد بررسی یک مرکز داده به طول 5.3 متر، عرض 4.8 متر و ارتفاع 3 متر است. به علت شرط تقارن، نصب فضای نمونه را حل کرده و عرض اتاق را 2.4 متر قرار می‌دهیم. به علاوه دیوارهای مرکز عایق ولی دیوار سمت چپ با شرط تقارن در نظر گرفته شده است. در نصف فضای نمونه، راک‌ها در یک ردیف قرار دارند. در این ردیف، چهار راک قرار دارد و هر راک شامل چهار سرور می‌باشد. بار حرارتی تولیدی هر سرور 800w است.

همان طور که در "شکل 3" نشان داده شده است، تعداد دریچه‌های ورودی 4 عدد و در محل کف اتاق و به ابعاد 0.55×0.7 متر می‌باشد. هوا مستقیماً و بدون زاویه و با دمای 12°C و سرعت‌های متفاوت از دریچه‌های ورودی وارد فضا می‌شود. ابعاد دریچه خروجی 0.55×2.8 متر و در محل سقف قرار دارد. فشار متوسط استاتیکی در دریچه‌ی خروجی برابر با فشار جو در نظر گرفته شده است.

3- معادلات حاکم و روند حل

در مطالعه حاضر از نسخه 2.0 نرم افزار ایرپک⁶ با حل گر فلونت⁷ جهت انجام محاسبات و حل معادلات حاکم استفاده شده است. در نرم‌افزار مذکور برای حل عددی از روش حجم محدود⁸ استفاده شده است، همچنین شبکه‌بندی، جهت حل مسئله یک شبکه‌بندی سازمان یافته است که در آن برای گسسته‌سازی معادلات از روش بالادست مرتبه دوم استفاده شده است. از الگوریتم سیمپل⁹ برای تصحیح جفت شدگی بین فشار و سرعت استفاده شده است.

هم چنین از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی برای بررسی محیط داخلی مورد نظر استفاده شده است. در این روش‌ها برای حل عددی جریان سیال، مدل‌سازی‌های عددی مختلفی توسعه یافته که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به روش معادلات متوسط گیری شده زمانی¹⁰ اشاره کرد.

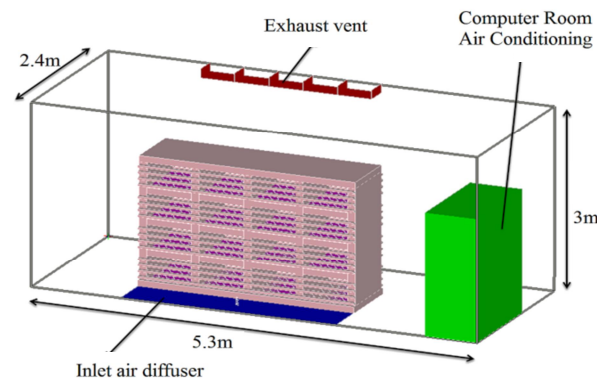


Fig. 3 Configuration of the space model

شکل 3 طرح‌واره نصف فضای نمونه

راک‌ها¹ و عبور از روی تجهیزات که حرارت زیادی تولید می‌کنند و دمای بالایی دارند انتقال حرارت صورت گرفته و هوای گرم از سمت دیگر خارج و وارد راهروهای گرم² می‌شود. این هوای گرم از دریچه‌های خروجی خارج و دوباره از طریق سیستم تهویه فضاهای مراکز داده³ به اتاق بازگردانده می‌شود. عملکرد ضعیف سیستم سرمایه‌ش باعث کاهش راندمان سیستم‌ها و کاهش طول عمر آن‌ها می‌شود. دو عامل جریان برگشتی⁴ و جریان عبوری⁵ از مثال‌های این عملکرد ضعیف است. مطابق "شکل 2" به جریان گرم برگشتی به راهروی سرد، جریان برگشتی و به جریان سردی که بدون خنک کاری راک‌ها از راهروی سرد عبور می‌کند، جریان عبوری می‌گویند [1].

تاکنون مطالعات زیادی در مورد مراکز داده صورت گرفته است. فخیم و همکاران در سال 2011 [2] به بررسی چالش‌های پیش‌روی یک مرکز داده پرداختند و در نهایت طرح‌هایی را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی برای بهبود عملکرد مطرح کردند. در سال 2014، پریادومکل و چالیت [5] به بررسی شرایط یک مرکز داده پرداختند و دریافتند سرورهایی که در ارتفاع بالای راک‌ها قرار دارند، کم‌تر تحت تاثیر سرمایه‌ش قرار دارند و در نتیجه دمای بالاتری دارند. در نتیجه سیستم جدیدی را برای سرمایه‌ش پیشنهاد دادند. در نتیجه در سال 2016، ادوارد و همکاران [6] به دو صورت عددی و تجربی به تحلیل توزیع جریان هوا در یک مرکز داده در کشور اسپانیا پرداختند و در نهایت پیشنهادهای برای کاهش مصرف انرژی و بهبود عملکرد سرمایه‌ش دادند. نادا و همکاران در سال 2016 [7] به بررسی شرایط یک مرکز داده پرداختند. نتایج آن‌ها به این صورت بود که عملکرد سیستم‌های سرمایه‌ش به شدت وابسته به نحوه چیدمان راک‌ها، راهروهای سرد و گرم و محل قرارگیری سیستم تهویه است.

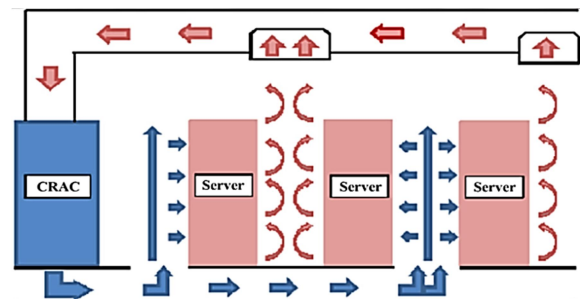


Fig. 1 Schematic of a data center [6]

شکل 1 طرح شماتیکی از یک مرکز داده [6]

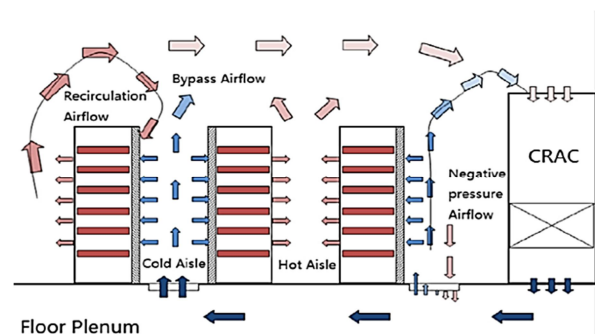


Fig. 2 Recirculation and bypass airflow in a data center [1]

شکل 2 جریان برگشتی و جریان عبوری در یک مرکز داده [1]

⁶ AirPak

⁷ Fluent

⁸ Finite volume

⁹ SIMPLE

¹⁰ Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS)

¹ rack

² Hot aisle

³ Computer Room Air Conditioning (CRAC)

⁴ Recirculation airflow

⁵ bypass airflow

عمل، این شاخص هرگز مقدار 100% را ندارد و تنها در صورت محفظه بسته نمودن راهروها می‌توان به مقدار ایده‌آل 100% نزدیک شد [9].

4-2- شاخص گرمای برگشتی⁴ (RHI) و شاخص گرمای تولیدی⁵ (SHI)
این دو شاخص که میزان اختلاط دو جریان هوای سرد ورودی به راک و جریان گرم خروجی از راک را نشان می‌دهد به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$SHI = \frac{T_{in, rack} - T_{supply}}{T_{out, rack} - T_{supply}} \quad (8)$$

$$SHI + RHI = 1 \quad (9)$$

هر چقدر میزان RHI زیاد و SHI کم باشد به حالت ایده‌آل طراحی سیستم سرمایه‌گذاری برای مرکز داده نزدیک شده‌ایم. این حالت نشان دهنده‌ی میزان اختلاط کم هوای سرد با هوای گرم خروجی از راک‌ها می‌باشد [10].

در ابتدا به مقایسه مقدار متوسط دمای هوای ورودی و خروجی راک‌ها به یکدیگر می‌پردازیم. همان‌طور که در جدول 1 نشان داده شده است، هر چه سرعت هوای ورودی بیشتر شود، مقدار دمای متوسط در ورودی راک‌ها بیشتر می‌شود. همچنین دمای خروجی راک‌ها با افزایش سرعت هوای ورودی کم‌تر می‌شود. به‌علاوه با افزایش سرعت هوای ورودی دمای برگشتی کاهش می‌یابد.

حال با توجه به اعداد بی‌بعد معرفی شده در قسمت بالا، به بررسی اثرات سرعت هوای ورودی بر شرایط حرارتی و عملکردی در این فضا می‌پردازیم. همان‌طور که از جدول 2 داریم، شاخص دمای برگشتی در همه‌ی حالت‌ها کمتر از 100% می‌باشد. این موضوع نشان دهنده وجود جریان عبوری در این فضا است. هر چه سرعت هوا بیشتر شود، این شاخص کاهش می‌یابد. به این مفهوم که هوای ورودی به جای خنک‌کاری و ورود به راک‌ها، مستقیماً به سمت دریچه‌های خروجی می‌روند. به همین دلیل هر چه سرعت هوای ورودی بیشتر شود، دمای هوای برگشتی کاهش می‌یابد. زیرا به جای هوای گرم، هوای خنک به سمت دریچه خروجی می‌رود. این موضوع سبب کاهش راندمان و طول عمر تجهیزات و افزایش مصرف انرژی می‌گردد.

مطابق با جدول 2، با افزایش سرعت هوای ورودی شاخص گرمای تولیدی کاهش و شاخص گرمای برگشتی کاهش می‌یابد. که این به مفهوم این است که هر چه سرعت هوای ورودی بیشتر شود، عملکرد این مرکز داده کاهش می‌یابد. به بیان دیگر با کاهش سرعت تبادل حرارت بهتری رخ می‌دهد و سرمایه‌گذاری به صورت موثرتری صورت می‌گیرد.

"شکل‌های 4 تا 7" توزیع بردارهای سرعت برای حالت‌های مختلف مورد بررسی را نشان می‌دهد. این نمودارها درستی محاسبات و نتیجه‌گیری‌های صورت گرفته را نشان می‌دهد. مطابق این شکل‌ها، در همه‌ی حالت‌ها جریان عبوری مشاهده می‌شود. و هر چه سرعت هوای ورودی از دریچه‌ها بیشتر شود، این جریان عبوری بیشتری رخ می‌دهد. به طوری که در حالتی که سرعت هوای ورودی 0.6 متر بر ثانیه است، این پدیده کمتر رخ می‌دهد و هوای سرد ورودی به داخل راک‌ها نفوذ کرده و باعث خنک‌سازی سرورها می‌شود. و هر چه سرعت هوای ورودی بیشتر شود، این اتفاق کمتر رخ می‌دهد. به طوری که در سرعت 1.2 متر بر ثانیه، بیشتر هوای سرد ورودی از دریچه‌ها بدون ورود به راک‌ها و خنک‌سازی به سمت بالا حرکت کرده و از دریچه‌های خروجی خارج می‌شود.

در این تحقیق، معادلات حاکم شامل معادلات مربوط به جریان و انتقال حرارت است.

معادله پیوستگی:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

معادله بقای تکانه خطی:

$$\rho(\vec{V} \cdot \nabla \vec{V}) = -\nabla P + \mu_{eff} \nabla^2 \vec{V} + \vec{s} \quad (2)$$

معادله انرژی:

$$\vec{V} \cdot \nabla T = \alpha \nabla^2 T + S_T \quad (3)$$

که

همچنین \vec{s} بیان‌گر نیروهای حجمی (شناوری) وارد بر سیال است و به کمک تقریب بوزینسک محاسبه می‌شود.

$$\vec{s} = \rho \vec{g} [1 - \beta(T - T_0)] \quad (4)$$

که β ضریب انبساط حجمی و \vec{g} بردار شتاب گرانش زمین است.

برای معادله انرژی نیز در جریان مغشوش جملات جدیدی با عنوان شار حرارتی اغتشاشی¹ پدید می‌آیند که با استفاده از مدل‌های اغتشاشی مدل می‌شوند. از مطرح‌ترین مدل‌های اغتشاشی برای محیط‌های داخلی می‌توان به مدل صفرمعادله‌ای داخلی² اشاره کرد که توسط چن و زو [8] برای شبیه‌سازی جریان هوا در محیط‌های داخلی توسعه و بسط داده شده است و با توجه به بررسی‌های صورت گرفته دارای نتایج بسیار خوبی در محیط‌های داخلی است. ضمناً μ_{eff} ضریب لزجت موثر سیال است که شامل لزجت سیال و لزجت اغتشاشی سیال می‌باشد و داریم:

$$\mu_{eff} = \mu_t + \mu \quad (5)$$

که لزجت اغتشاشی سیال در معادله صفر معادله‌ای داخلی به کمک رابطه محاسبه می‌گردد.

$$\mu_t = 0.03874 \rho \nu L \quad (6)$$

4- نتایج و بحث روی نتایج

همان‌طور که قبلاً بیان شد، هدف از تحقیق حاضر بررسی اثرات سرعت هوای ورودی از دریچه‌های کف بر شرایط حرارتی و عملکردی در یک مرکز داده است. به این منظور و با فرض این که سرعت هوای ورودی از تمامی دریچه‌ها با هم برابر است، سرعت‌ها برابر با مقدار 0.6، 0.8، 1.0 و 1.2 متر بر ثانیه قرار داده شده است. برای مقایسه حالات مختلف سرعت هوای ورودی با یکدیگر، از چند پارامتر بی‌بعد استفاده می‌کنیم که در ادامه به معرفی آن‌ها خواهیم پرداخت.

4-1- شاخص دمای برگشتی³ (RTI)

این شاخص بیانگر نرخ جریان هوای خروجی از پکیج‌های سرمایشی به تجهیزات از جمله راک‌ها می‌باشد. به عبارتی این شاخص مدیریت هوای خروجی از تجهیزات سرمایشی به راک‌ها می‌باشد. همچنین شاخص دمای برگشتی، وجود جریان برگشتی و یا جریان عبوری را نیز نشان می‌دهد. این شاخص طبق رابطه‌ی (7) تعریف می‌شود:

$$RTI = \left[\frac{T_{return} - T_{supply}}{\Delta T_{equipment}} \right] \times 100 \quad (7)$$

اگر مقدار شاخص بزرگتر از 100% باشد به معنای وجود جریان برگشتی و اگر مقدار این شاخص کمتر از 100% باشد به معنای وجود جریان عبوری می‌باشد. بنابراین ایده‌آل‌ترین مقدار برای این شاخص، 100% می‌باشد. در

⁴ Return heat index

⁵ Supply heat index

¹ Turbulence Heat Flux

² Indoor zero equation

³ Return temperature index

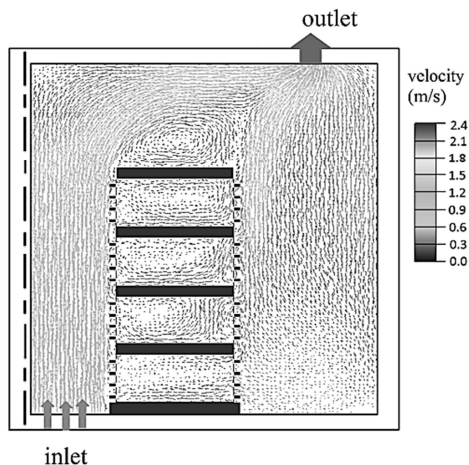


Fig. 6 velocity vectors for $v_{in} = 1.0$ (m/s)

شکل 6 بردارهای سرعت برای حالتی که سرعت ورودی 1.0 متر بر ثانیه است

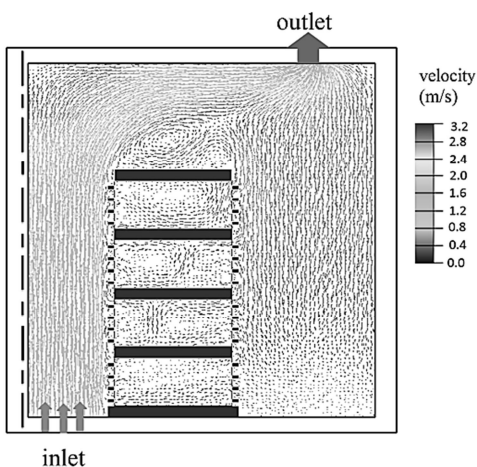


Fig. 7 velocity vectors for $v_{in} = 1.2$ (m/s)

شکل 7 بردارهای سرعت برای حالتی که سرعت ورودی 1.2 متر بر ثانیه است

5- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی اثرات سرعت هوای ورودی از دریچه‌ها بر شرایط حرارتی و عملکردی یک مرکز داده پرداخته شده است. به این منظور سرعت هوای ورودی در چهار حالت مختلف (0.6، 0.8، 1.0 و 1.2) متر بر ثانیه و دما برابر با مقدار ثابت 12 درجه سانتی‌گراد قرار داده شده است. برای بررسی شرایط حرارتی و عملکردی این مرکز داده از پارامترهای بی‌بعدی هم‌چون شاخص دمای برگشتی، شاخص گرمای برگشتی و شاخص گرمای تولیدی استفاده شده است. براساس نتایج به‌دست آمده، هر چه سرعت هوا از دریچه‌های ورودی افزایش یابد، شاخص دمای برگشتی و شاخص گرمای برگشتی افزایش و شاخص گرمای تولیدی کاهش می‌یابد. این موضوع نشان‌دهنده وجود پدیده‌ای به نام جریان عبوری است. به این مفهوم که هوای سرد ورودی از دریچه‌ها بدون عبور از راک‌ها مستقیماً از دریچه‌ی خروجی خارج می‌شود. که خود باعث کاهش راندمان و طول عمر تجهیزات و افزایش مصرف انرژی می‌شود. به‌علاوه میزان اختلاط هوای سرد با هوای گرم خروجی از راک‌ها افزایش می‌یابد که باعث کاهش عملکرد مرکز داده می‌شود.

6- فهرست علائم

- g شتاب گرانش (ms^{-2})
- P فشار ($kgm^{-1}s^{-2}$)

جدول 1 مقایسه دمای متوسط ورودی به و خروجی از راک‌ها

Table 1 Comparison of the inlet and outlet air in racks

سرعت هوای ورودی از دریچه‌ها (متر بر ثانیه)	دمای متوسط ورودی به راک‌ها (درجه سانتی‌گراد)	دمای متوسط خروجی از راک‌ها (درجه سانتی‌گراد)	برگشتی (درجه سانتی‌گراد)
0.6	17.3	31.3	22.9
0.8	18.5	30.9	20.3
1.0	19.8	29.4	18.0
1.2	20.6	27.0	15.9

جدول 2 مقایسه شرایط عملکردی برای سرعت‌های مختلف از دریچه‌های ورودی

Table 2 Comparison the performance for various velocities

سرعت هوای ورودی از دریچه‌ها (متر بر ثانیه)	RHI	SHI	RTI
0.6	0.73	0.27	77.9
0.8	0.66	0.34	66.9
1.0	0.55	0.45	62.5
1.2	0.45	0.55	60.9

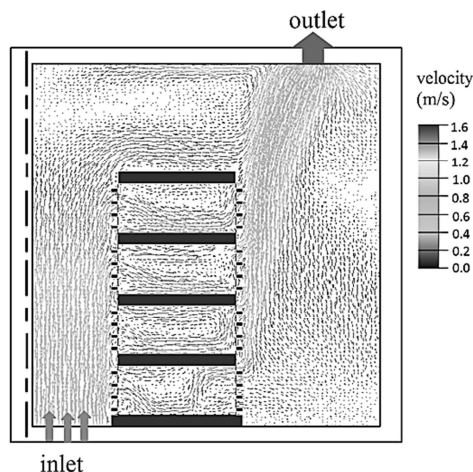


Fig. 4 velocity vectors for $v_{in} = 0.6$ (m/s)

شکل 4 بردارهای سرعت برای حالتی که سرعت ورودی 0.6 متر بر ثانیه است

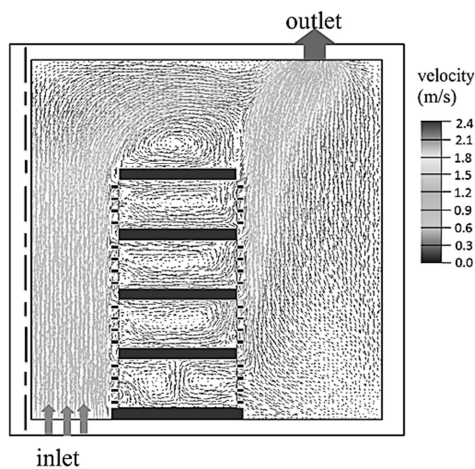


Fig. 5 velocity vectors for $v_{in} = 0.8$ (m/s)

شکل 5 بردارهای سرعت برای حالتی که سرعت ورودی 0.8 متر بر ثانیه است

- for data centers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 62, pp. 579–585, 2013.
- [2] B. Fakhim, M. Behnia, S. W. Armfield, N. Srinarayana, Cooling solutions in an operational data centre: A case study, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, pp. 2279-2291, 2011.
- [3] J. Cho, B. S. Kim, Evaluation of air management system's thermal performance for superior cooling efficiency in high-density data centers, *Energy and Buildings*, Vol. 43, pp. 2145-2155, 2011.
- [4] N. M. S. Hassan, M. M. K. Kan, M. G. Rasul, Temperature monitoring and CFD Analysis of Data Centre: A case study, *Journal of the Procedia Engineering*, pp. 551-559, 2013.
- [5] J. Priyadumkol, C. Kittichaikam, Application of the combined air conditioning systems for energy conservation in data center, *Energy and Buildings*, pp. 553–561, 2016.
- [6] E. Oro, A. Garcia, J. Salom, Experimental and numerical analysis of the air management in a datacentre in Spain, *Energy and Buildings*, Vol. 116, pp. 580–586, 2014.
- [7] S. A. Nada, M. A. Rady, M. A. Said. CFD investigations of data centers' thermal performance for different configurations of CRACs units and aisles separation, *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 55, pp. 959–971, 2016.
- [8] B.F. Yu, Z.B. Hu, M. Liu, H.L. Yang, Q.X. Kong, Y.H. Liu, Review of research on air-conditioning systems and indoor air quality control for human health, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 32, pp. 3–20, 2009.
- [9] M. K. Herrlin, Improved data center energy efficiency and thermal performance by advanced airflow analysis, *Proceedings of Digital Power Forum*, pp. 10–12, 2007.
- [10] R. K. Sharma., C. E. Bash, C. D. Patel, Dimensionless Parameters for Evaluation of Thermal Design and Performance of Large scale Data Centers" *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA)*, pp. 3091–3101, 2002.

RHI شاخص گرمای برگشتی (بی بعد)

RTI شاخص دمای برگشتی (بی بعد)

SHI شاخص گرمای تولیدی (بی بعد)

T دما (K)

V سرعت (ms^{-1})

علایم یونانی

α نفوذ حرارتی (m^2s^{-2})

β ضریب انبساط حجمی (K^{-1})

ρ چگالی (kgm^{-3})

μ لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)

زیرنویس‌ها

سرور equipment

ورودی in

خروجی out

راک rack

برگشتی return

دریچه ورودی supply

اغتشاشی t

7- مراجع

- [1] X. Qian, Z. Li, Zh. Li, A thermal environmental analysis method