



بررسی اثرات سرعت هوای ورودی از دریچه‌ها بر شرایط حرارتی و عملکردی در یک مرکز داده^۱

سیدعلیرضا ذوقفاری^{۱*}، مهدی افضلیان^۲

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه پیرجند، پیرجند

۲- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه پیرجند، پیرجند

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

چکیده

در تحقیق حاضر به کمک دینامیک سیالات محاسباتی و نرم‌افزار ایرپک 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 (۰.۶، ۰.۸، ۱.۰ و ۱.۲) متر بر ثانیه و دما برابر با مقدار ثابت ۱۲ درجه سانتی گراد 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 توییدی استفاده شده است. برآسمان نتایج به دست آمده، هر چه سرعت هوای از دریچه‌های ورودی افزایش یابد، شاخص دمای برگشتی و شاخص گرمای توییدی 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 دریچه 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.

کلیدواژگان: 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 نگهداشت [۵]. حدود ۳۰-۵۰ درصد مصرف انرژی در این فضاهای مربوط به سیستم خنکسازی می‌شود [۱]. سیستم‌های سرمایش که در مراکز داده استفاده می‌شود باید بتوانند به صورت تمام وقت (۳۶۵ روز سال، ۲۴ ساعت روز) کار کنند. در نتیجه مصرف انرژی یک مرکز داده ۱۰۰ برابر یک اتاق اداری معمولی است [۶].

همان طور که در "شکل ۱" نشان داده شده است، سیستم‌های سرمایش در مراکز داده به این صورت است که هوای از دریچه‌های کف در محل راهروهای سرد^۲ در دمای‌های پایین وارد فضا می‌شود. با ورود این هوای سرد به

۱- مقدمه

عصر حاضر، عصر ارتباطات و اطلاعات است. در نتیجه رشد و نیاز به مراکز داده^۱ بسیار سریع بوده است [۱]. مراکز داده به مکان‌هایی می‌گویند که برای قرار دادن تجهیزات کامپیوتوری مانند سورهای پردازش‌گر، دستگاه‌های سوییچ شبکه، آرایه‌های ذخیره اینو، سیستم‌های ذخیره اطلاعات و سیستم‌های ارتباطی استفاده می‌شود [۲]. با رشد سریع صنعت مبتنی بر اطلاعات، مراکز داده تبدیل به یک پدیده مرسوم در هر دو بخش دولتی و خصوصی شده است [۳]. علاوه بر تجهیزات فوق، سیستم تهییه هواء، منابع تغذیه، سیستم اطفا حریق و دستگاه‌های امنیتی نیز در این فضاهای موجود است [۴]. برای حفاظت از سیستم‌های کامپیوتوری و افزایش کارکرد و طول عمر آن‌ها با

² Cold aisle

Please cite this article using:

A.zolfaghari, M.afzalian, Investigation the influence of velocity of inlet air on thermal environment and equipment performance in a data center, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Second International Conference on Air-Conditioning, Heating and Cooling Installations*, Vol. 16, No. 13, pp. 194-198, 2016 (in Persian)

¹ Data center

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A.zolfaghari, M.afzalian, Investigation the influence of velocity of inlet air on thermal environment and equipment performance in a data center, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Second International Conference on Air-Conditioning, Heating and Cooling Installations*, Vol. 16, No. 13, pp. 194-198, 2016 (in Persian)

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

2- فضای نمونه

هندهسه مورد بررسی یک مرکز داده به طول 5.3 متر، عرض 4.8 متر و ارتفاع 3 متر است. به علت شرط تقارن، نسب فضای نمونه را حل کرده و عرض اتاق را 2.4 متر قرار می‌دهیم. به علاوه دیوارهای مرکز عایق ولی دیوار سمت چپ را 2.4 متر قرار می‌دهیم. به 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 2.8×0.55 متر و در محل سقف قرار دارد. فشار متوسط استاتیکی در دریچه‌ی خروجی برابر با فشار جو درنظر گرفته شده است.

3- معادلات حاکم و روند حل

در مطالعه حاضر از نسخه 2.0 نرم افزار ایرپک⁶ با حل گرفتۀ⁷ 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 گسترش‌سازی معادلات از روش بالادست مرتبه دوم استفاده شده است. از الگوریتم سیمپل⁹ برای تصحیح جفت شدگی بین فشار و سرعت استفاده شده است.

هم‌چنین 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.

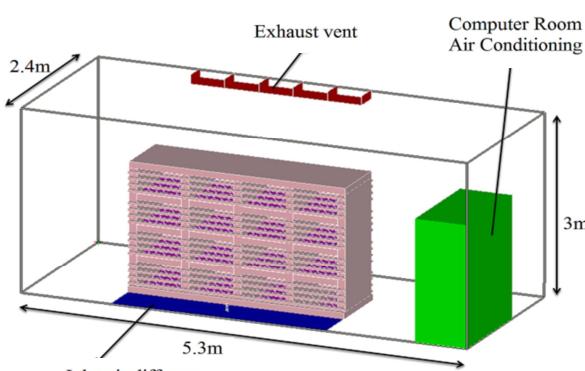
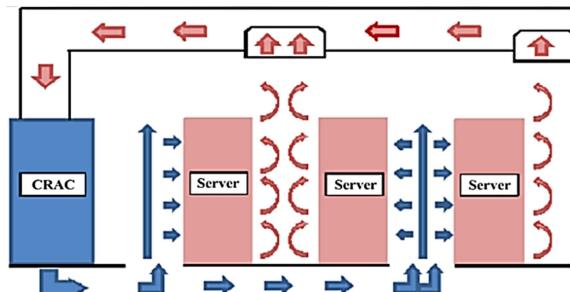


Fig. 3 Configuration of the space model

شکل 3 طرح واره نصف فضای نمونه

راک‌ها¹ و عبور از روی تجهیزات که حرارت زیادی تولید می‌کنند و دمای بالایی دارند انتقال حرارت صورت گرفته و هوا گرم از سمت دیگر خارج و وارد راهروهای گرم² می‌شود. این هوا گرم از دریچه‌های خروجی خارج و دوباره از طریق سیستم تهویه فضاهای مرکز داده³ به اتاق بازگردانده می‌شود. عملکرد ضعیف سیستم سرمایش 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 مرکز داده صورت گرفته است. فχیم 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 سروهایی که در ارتفاع بالای راک‌ها قرار دارند، کم‌تر تحت تاثیر سرمایش قرار دارند و در نتیجه دمای بالاتری دارند. در نتیجه سیستم جدیدی را برای سرمایش پیشنهاد دادند. در نتیجه در سال 2016، ادوارد و همکاران [6] به دو صورت عددی و تجربی به تحلیل توزیع جریان‌ها در یک مرکز داده در کشور اسپانیا پرداختند و در نهایت پیشنهاداتی برای کاهش مصرف انرژی و بهبود عملکرد سرمایشی دادند. نادا و همکاران در سال 2016 [7] به بررسی شرایط یک مرکز داده پرداختند. نتایج آن‌ها به این صورت بود که عملکرد سیستم‌های سرمایشی به شدت وابسته به نحوه چیدمان راک‌ها، راهروهای سرد و گرم و محل قرارگیری سیستم تهویه است.



شکل 1 طرح شماتیکی از یک مرکز داده [6]

شکل 1 طرح شماتیکی از یک مرکز داده [6]

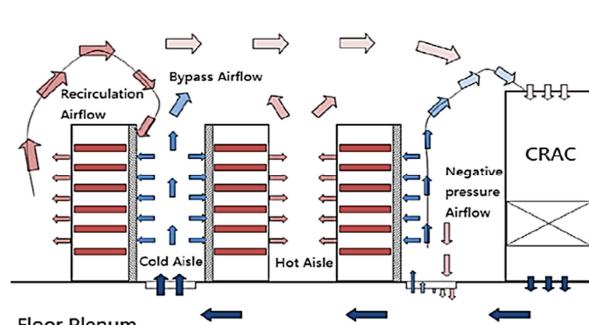


Fig. 2 Recirculation and bypass airflow in a data center [1]

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

⁶ AirPak

⁷ Fluent

⁸ Finite volume

⁹ SIMPLE

¹⁰ Reynolds Averaged Nervier stokes (RANS)

¹ rack

² Hot aisle

³ Computer Room Air Conditioning (CRAC)

⁴ Recirculation airflow

⁵ bypass airflow

عمل، این شاخص هرگ 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 سرمایش برای مرکز داده نزدیک شده‌ایم. این حالت نشان دهنده 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. همان طور 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. بدلاً‌و به 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. همان طور 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 هوای 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 سرمایش 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 خنک سازی سوروها 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.

⁴ Return heat index

⁵ Supply heat index

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 ۲ بیان گر 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 مغلووش 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 هوای 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

$$(6) \text{ محاسبه می‌گردد.}$$

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

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 1.0. 0.8. 0.6 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 پیچیج‌های 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:

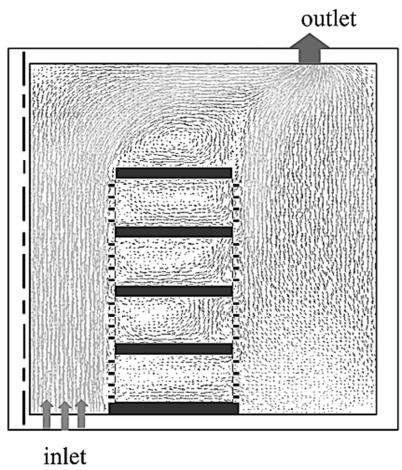
$$RTI = \left[\frac{T_{return} - T_{supply}}{\Delta T_{equipment}} \right] \times 100 \quad (7)$$

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

¹ Turbulence Heat Flux

² Indoor zero equation

³ Return temperature index

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

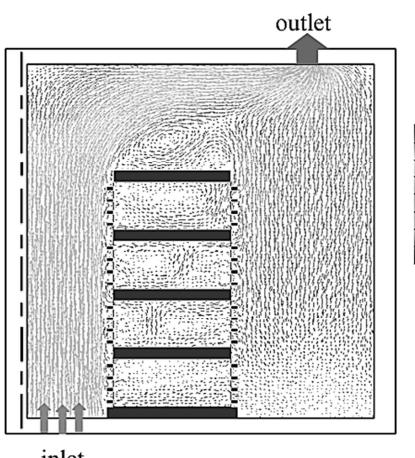
جدول 1 مقایسه دمای متوسط ورودی به و خروجی از راکها
Table 1 Comparison of the inlet and outlet air in racks

سرعت هوا	دماهای متوسط	دماهای متوسط	دماهای متوسط	دماهای متوسط
ورودی از دریچه ها (درجه سانتی گراد)	برگشتی راکها (درجه سانتی گراد)	خروجی از راکها (درجه سانتی گراد)	ورودی به راکها (درجه سانتی گراد)	برگشتی
(متر بر ثانیه)	(متر بر ثانیه)	(متر بر ثانیه)	(متر بر ثانیه)	(متر بر ثانیه)
0.6	17.3	31.3	22.9	22.9
0.8	18.5	30.9	20.3	20.3
1.0	19.8	29.4	18.0	18.0
1.2	20.6	27.0	15.9	15.9

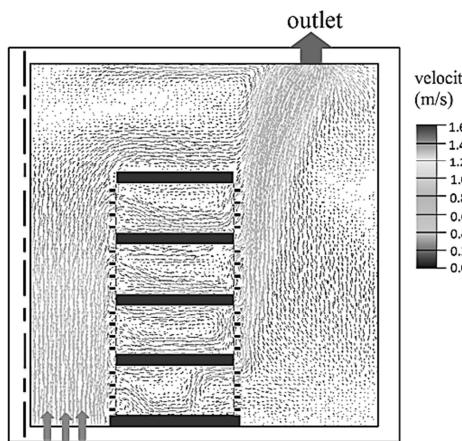
جدول 2 مقایسه شرایط عملکردی برای سرعت های مختلف از دریچه های ورودی

Table 2 Comparison the performance for various velocities

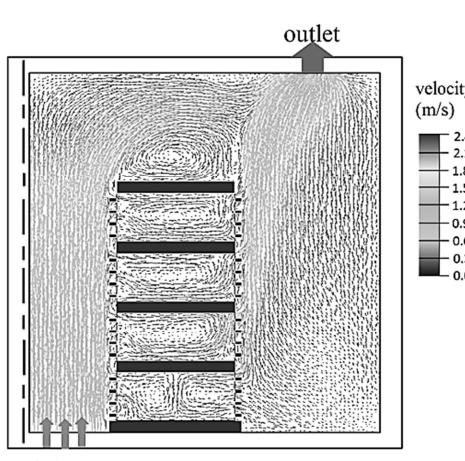
سرعت هوا و دریچه ها (متر بر ثانیه)	RHI	SHI	RTI	
0.6	0.73	0.27	77.9	
0.8	0.66	0.34	66.9	
1.0	0.55	0.45	62.5	
1.2	0.45	0.55	60.9	

Fig. 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

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

5- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی اثرات سرعت هوا ورودی از دریچه ها بر شرایط حرارتی و عملکردی یک مرکز داده پرداخته شده است. به این منظور سرعت هوا 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 سانتی گراد 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 بدست آمده، هر چه سرعت هوا از دریچه های ورودی افزایش یابد، شاخص دمای برگشتی و شاخص گرمای برگشتی افزایش و شاخص گرمای تولیدی کاهش می یابد. این موضوع نشان دهنده وجود پدیدهای به نام جریان عبوری است. به این مفهوم که هوا سرد ورودی از دریچه ها بدون عبور از راکها مستقیماً از دریچه خروجی خارج می شود. که خود باعث کاهش راندمان و طول عمر تجهیزات و افزایش مصرف انرژی می شود. به علاوه میزان اختلاط هوا و سرد با هوا گرم خروجی از راکها افزایش می یابد که باعث کاهش عملکرد مرکز داده می شود.

6- فهرست عالیم

$$\begin{aligned} g & \text{ شتاب گرانش (ms}^{-2}\text{)} \\ P & \text{ فشار (kgm}^{-1}s^{-2}\text{)} \end{aligned}$$

- 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. Kittichaikarn, 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.

شاخص گرمای برگشتی (بی بعد)	RHI
شاخص دمای برگشتی (بی بعد)	RTI
شاخص گرمای تولیدی (بی بعد)	SHI
دما (K)	T
سرعت (ms^{-1})	V
علایم یونانی	
نفوذ حرارتی (m^2s^{-2})	α
ضریب انبساط حجمی (K^{-1})	β
چگالی (kgm^{-3})	ρ
لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)	μ
زیرنویس‌ها	
سروور	equipment
وروپی	in
خروجی	out
رایک	rack
برگشتی	return
دریچه و روپی	supply
اغتشاشی	t

7 - مراجع

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