



## استفاده از برج خنک کن جهت سیستم‌های سرمایش تابشی در ساختمان‌های اداری مناطق معتدل

مهدی نصرآبادی<sup>1\*</sup>، دونالد فین<sup>2</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یوسی دی، دابلین

\* بیرجند، صندوق پستی: 615/97175، m.nasrabadi@birjand.ac.ir

### چکیده

رشد استفاده از سیستم‌های تهویه مطبوع مکانیکی تراکمی بخار برای سرمایش ساختمان‌های اداری در مناطق با آب و هوای معتدل به افزایش علاقه در جایگزینی این سیستم‌ها با سایر سیستم‌های کم مصرف‌تر انرژی منجر شده است. برج‌های خنک‌کننده به عنوان یک وسیله تولید آب سرد، با اتصال به سیستم‌های سرمایش تابشی و تهویه، یک روش جایگزین جهت تهویه فضاهای اداری در آب و هوای معتدل ارائه می‌دهد. در این روش برج خنک‌کن قابلیت تولید آب سرد با دمای 14-18 درجه سانتی‌گراد با اختلاف 1-3 درجه کلون با دمای تر محیط را دارد. این آب سرد در سیستم سرمایش تابشی بار حرارتی محسوس را پوشش داده و در سیستم تهویه مطبوع بار حرارتی نهان را بر طرف می‌سازد. در این مقاله به صورت خلاصه یک مدل ریاضی از سیستم سرمایش تبخیری با استفاده از نرم‌افزار مطلب بیان گردیده است. درستی این مدل با اطلاعات تجربی بررسی شده و مدل مربوطه با یک مدل ساختمان اداری با استفاده از نرم‌افزار انرژی پلاس متصل گردیده است. نتایج حاکی است علاوه بر این که ضریب عملکرد این سیستم در روز طراحی برای پاریس به عنوان منطقه معتدل گرم و مرطوب در محدوده 2 تا 8 تغییر می‌کند، این سیستم توانایی قابل قبولی جهت تامین شرایط آسایش حرارتی در حدود 67% ساعات کاری در طی روز طراحی را دارا می‌باشد.

کلید واژگان: برج خنک کن، سیستم‌های سرمایش تابشی، آسایش حرارتی، عملکرد سیستم

## Application of open cooling tower with radiant cooling for office space conditioning in temperate climate

Mehdi Nasrabadi<sup>1\*</sup>, Donal Finn<sup>2</sup>

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

2- School of Mechanical & Materials Engineering, University College Dublin, Belfield, Dublin D4, Ireland

\* P.O.B. 97175/615, Birjand, Iran, m.nasrabadi@birjand.ac.ir

### ABSTRACT

The growth in the use of mechanical vapour compression based air conditioning systems for office cooling in temperate climates has led to increased interest in alternative low energy active cooling systems. Cooling towers as a means for producing chilled water, in conjunction with radiant and displacement cooling systems, offer a possible alternative approach for space conditioning of office spaces in temperate climates. The current research hypothesis is based on assessing an integrated cooling tower and radiant / displacement ventilation cooling system for office conditioning in temperate climate. The concept is capable of producing chilled water between 14-18°C with low approach temperatures (1-3 K) and using this water for building sensible cooling by radiant surfaces (floors or ceilings) and building latent cooling by displacement ventilation. A mathematical model of the cooling tower system was developed using MATLAB. The cooling tower was validated against experimental data and integrated with an EnergyPlus model of an office building model incorporating radiant cooling and displacement ventilation systems. Using the overall simulation model, assessment was carried out based on ASHRAE design day specifications for Paris as representative of warm and humid climate. The results indicated that although the COP of the integrated cooling system was fluctuated between 2 and 8, this system can provide thermal comfort condition during 67% of working hours in Paris design day.

**Keywords:** Cooling tower, radiant cooling, thermal comfort, system performance

مهندسی بوده و همچنین سیستم‌های خنک‌کننده منفعل (پسیو<sup>1</sup>) توانایی

کافی برای سرمایش مطلوب را ندارند [4,3].

اخیرا استفاده از سیستم‌های سرمایش تابشی و تهویه مطبوع جهت سرمایش ساختمان‌های تجاری منجر به توجه محققان به استفاده از برج خنک‌کن جهت تولید آب سرد برای این سیستم‌ها شده است. حسن و همکاران نتایج شبیه‌سازی یک سیستم سرمایش تشعشعی با اتصال به برج خنک‌کن را بیان کرده‌اند. در این تحقیق یک ساختمان مسکونی چهار طبقه با حداکثر بار

### 1- مقدمه

بیش از 40% مصرف انرژی در ساختمان‌های تجاری مربوط به سیستم‌های گرمایش و تهویه مطبوع می‌باشد [2,1]. البته این درصد با توجه به کشور و نوع ساختمان تجاری تغییراتی دارد به‌عنوان مثال در بریتانیا برای ساختمان‌های اداری این درصد به 55% نیز افزایش می‌یابد [2]. تخمین‌های جاری پیش‌بینی می‌کنند که مصرف انرژی الکتریکی جهت تهویه ساختمان‌ها در اتحادیه اروپا تا سال 2020، 50% نسبت به سال 2009 افزایش خواهد داشت [1]. در مناطق معتدل سیستم‌های معمول تبرید یک راه حل فرا

<sup>1</sup> Passive

Please cite this article using:

M.Nasrabadi, D.Finn, Application of open cooling tower with radiant cooling for office space conditioning in temperate climate, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Second International Conference on Air-Conditioning, Heating and Cooling Installations*, Vol. 16, No. 13, pp. 145-148, 2016 (in Persian) (فارسی)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

براساس رابطه تجربی که توسط کاستلو و فین به دست آمده محاسبه گردیده است [10].

$$Me = 1.3 \times (m_w/m_a)^{-0.77} \quad (1)$$

در رابطه (1)،  $Me$  عدد مرکب،  $m_w$  و  $m_a$  به ترتیب دبی جرمی هوا و آب برج خنک کن می باشند.

مدل ریاضی بیان شده برای مطالعات بیشتر جهت بررسی عملکرد سیستم خنک کن استفاده شده است. برای این منظور یک حجم کنترل براساس طراحی انجام شده توسط کاستلو و فین که در "شکل 2" نشان داده شده در نظر گرفته شد.

صحت مدل ریاضی با داده‌های تجربی در دو حالت مختلف دمای آب خروجی برج خنک کن، در "شکل 3" بررسی شده است [8]. همان‌طور که در شکل بیان شده بیشترین اختلاف با داده های تجربی کمتر از 2.5% می باشد. جزئیات بیشتر از مدل به همراه تست مدل با داده‌های تجربی و پیش بینی عملکرد برج خنک کن در شرایط آب و هوایی مختلف در مقالات دیگر به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است [11,8].

### 3- مدل کلی

به منظور بررسی عملکرد برج خنک کن جهت سرمایش ساختمان های اداری در مناطق معتدل دو مدل مجزا شامل سیستم سرمایش تبخیری و مدل ساختمان تهیه گردید. مدل سرمایش تبخیری شامل برج خنک کن مورد نظر، پمپ، فن و مبدل حرارتی می باشد. مدل ساختمان شامل مدل ساده‌ای از یک ساختمان اداری به همراه سیستم‌های سرمایش تابشی و تهویه مطبوع از نوع

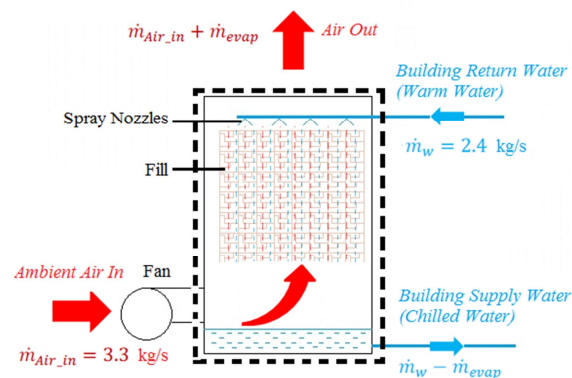


Fig. 2 Cooling tower control volume with water and air flow boundary conditions

شکل 2 حجم کنترل برج خنک کن به همراه شرایط مرزی جریان آب و هوا در برج

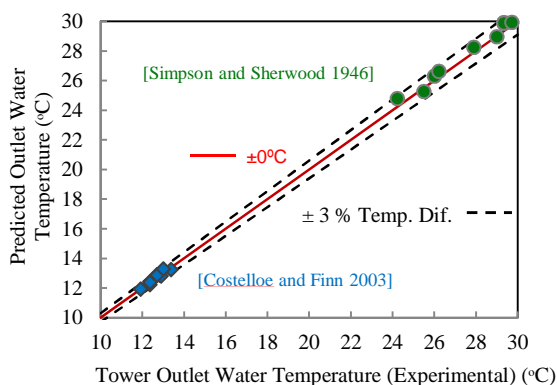


Fig. 3 Comparison of tower water outlet temperature against experimental data [8]

شکل 3 بررسی درستی مدل ریاضی با داده های تجربی [8]

حرارتی  $7.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  در ساعت 6 تا 8 بعدازظهر در شهر هلزینکی<sup>1</sup> لحاظ گردیده است. نشان داده شده است که ضریب عملکرد برج خنک کن در این حالت قابلیت رسیدن به مقدار 8.3 را دارا می باشد [5]. برجستون یک سیستم سرمایش برای ساختمان‌های اداری را مورد ارزیابی قرار داد. در این سیستم یک برج خنک کن آب سرد موردنیاز برای سیستم سرمایش تابشی از نوع تیرهای فعال سرد<sup>2</sup> را فراهم می کرد. در این تحقیق یک ساختمان اداری با مساحت  $450 \text{ m}^2$  در شمال اروپا (48-49°N) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه سازی در طی تابستان نشان دهنده ضریب عملکرد 4 تا 8.5 برای سیستم سرمایش بود [6]. کاستلو و فین همان‌طور که در "شکل 1" نشان داده است یک سیستم سرمایش تبخیری را طراحی نمودند که شامل یک برج خنک کن تر، سیکل اولیه و ثانویه و یک مبدل حرارتی صفحه پره دار می باشد [7]. نتایج آزمایشگاهی نشان می دادند که برج خنک کن طراحی شده توانایی تولید آب سرد با دمای 14-16 درجه سانتی گراد با اختلاف 1-3 درجه کلونین با دمای تر محیط را دارا می باشد. بنابر داده‌های تجربی قابلیت دسترس پذیری برای آب با دمای  $14^\circ\text{C}$  و  $16^\circ\text{C}$  به ترتیب در حدود 72% و 88% برای شهر دابلین<sup>3</sup> می باشد [7].

در این مقاله یک مدل ریاضی از سیستم سرمایش تبخیری با استفاده از نرم افزار مطلب<sup>4</sup> براساس طرح کاستلو و فین بیان گردیده است. درستی این مدل با اطلاعات تجربی بررسی شده و مدل مربوطه با یک مدل ساختمان اداری با استفاده از نرم افزار انرژی پلاس<sup>5</sup> متصل گردیده است.

### 2- مدل ریاضی برج خنک کن

جزئیات مدل ریاضی مورد استفاده در این مقاله به تفصیل در مقاله دیگری بیان شده است [8]. به طور خلاصه مدل ریاضی برای برج خنک کن جریان مخالف، همان‌طور که در "شکل 1" نشان داده شده است، براساس مدل اصلاح شده  $\epsilon - NTU$  تهیه شده است. در این روش فاکتور لوپس<sup>6</sup> برابر یک و هوای خروجی از برج در حالت اشباع فرض شده است. در مقایسه با روش های استاندارد  $\epsilon - NTU$  یا مرکل<sup>7</sup> [9] جهت مدل سازی برج خنک کن، تغییر جرم آب برج براساس فرایند تبخیر لحاظ شده و گرمای ویژه مخلوط بخار و آب برخلاف روش های قبلی ثابت فرض نشده است. در این مدل ضریب برج خنک کن که یکی از پارامترهای اساسی در مدل سازی حرارتی برج می باشد

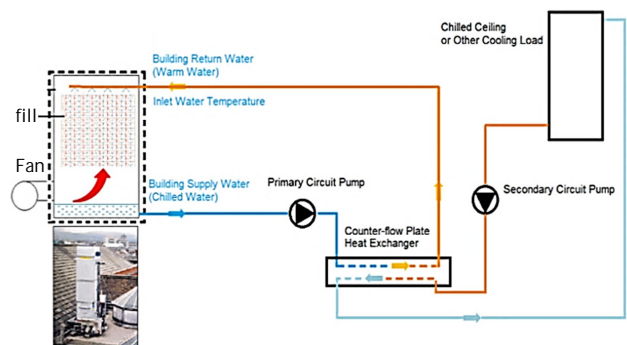


Fig. 1 Schematic of an indirect evaporative cooling system [7]

شکل 1 شماتیک سیستم سرمایش تبخیری طراحی شده [7]

- 1 Helsinki
- 2 Active chilled beam
- 3 Dublin
- 4 MATLAB
- 5 EnergyPlus
- 6 Lewis
- 7 Merkel

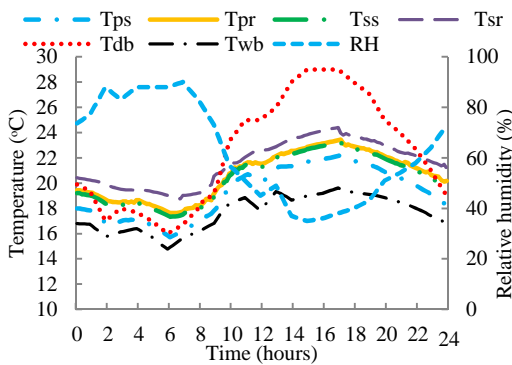


Fig. 5 Primary and secondary data for integrated cooling system analysis in Paris design day analysis

شکل 5 عملکرد سیستم برای روز طراحی در شهر پاریس

برج خنک‌کن آب سرد موردنیاز برای سیستم سرمایش از سقف و تهویه مطبوع را فراهم می‌کند.

دمای تر و رطوبت نسبی بوده،  $T_{ps}$ ،  $T_{pr}$  دمای آب سرد رفت و برگشت در سیکل اولیه و  $T_{ss}$  و  $T_{sr}$  دمای آب سرد رفت و برگشت را در سیکل ثانویه نشان می‌دهد. همان‌طور که در "شکل 5" نشان داده شده است دمای آب سرد رفت در سیکل‌های اولیه و ثانویه از دمای تر محیط پیروی می‌کند. براساس این شکل کمترین و بیشترین دمای آب تولیدی توسط برج خنک کن به ترتیب 17 و 21.3 درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

دمای موثر هر یک از فضای ساختمان در طی روز طراحی در بازه‌های زمانی ده دقیقه در "شکل 6" نشان داده شده است. دما در فضای شرقی به علت تابش خورشید در روز در ابتدای صبح کمی بالاتر از بقیه فضا می‌باشد در حالی که در طی روز فضا جنوبی بیشترین دما و نزدیک به غروب فضای غربی بیشترین دما به خود اختصاص می‌دهند. همان‌طور که در شکل نشان داده شده بیشترین دمای موثر برای فضاهای ساختمان در روز طراحی در حدود 29 درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

ضریب عملکرد برج خنک کن و سیستم سرمایش در طول روز طراحی در "شکل 7" نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است بهترین عملکرد در ساعات پایانی و ابتدای روز که فرایند سرمایش تبخیری بهترین راندمان را دارد رخ می‌دهد. همان‌طور که مشخص است ضریب عملکرد سیستم سرمایش در محدوده 2 تا 8 متغیر است درحالی‌که ضریب عملکرد برج خنک‌کن در بازه 4 تا 12 تغییر می‌کند.

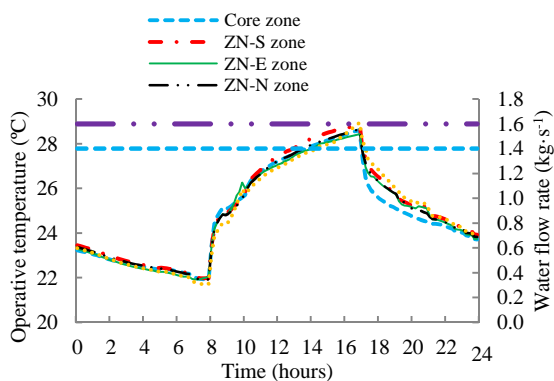


Fig. 6 Operative temperature in different building zones with primary and secondary water flow in Paris design day analysis

شکل 6 دمای موثر هر یک از فضای ساختمان در طی روز طراحی

جایگاهی می‌باشد که آب سرد موردنیاز جهت این سیستم‌های سرمایش توسط برج خنک کن تامین می‌گردد. مدل ساختمان شامل نمای بیرونی و داخلی در "شکل 4" نشان داده شده است. همان‌طور که در "شکل 4" نشان داده شده است مدل ساختمان از 4 فضای کناری در هر یک از جهات اصلی جغرافیایی و یک فضای مرکزی تشکیل شده است.

با توجه به این‌که منطقه هدف در این تحقیق، آب و هوای معتدل اروپا می‌باشد مصالح و خواص حرارتی آن براساس طرح کرولیجا برای ساختمان اداری در بریتانیا اعمال شده است [12]. با توجه به این‌که مدل سیستم سرمایش تبخیری با نرم‌افزار مطلب تهیه شده است می‌بایست این کد به مدل ساختمان متصل گردد. بدین منظور از نرم‌افزار واسط BCVTB و امکانات PlantComponent:UserDefined در نرم‌افزار انرژی پلاس استفاده شده است. این امکانات قابلیت اتصال کلیه اجزایی و سیستم‌هایی که در نرم‌افزار انرژی پلاس موجود نیست را به کاربر می‌دهد.

#### 4- بررسی عملکرد سیستم سرمایش برای روز طراحی

با توجه به اینکه برج خنک‌کن به عنوان تنها منبع تولید سرمایش در این سیستم شناخته می‌شود ضریب عملکرد برای برج خنک‌کن براساس حجم کنترل "شکل 2" و همچنین کل سیستم سرمایش براساس معادلات (2) و (3) به شرح زیر تعریف می‌گردد.

$$COP_{Tower} = \frac{\dot{Q}_{Tower}}{P_{Fan} + P_{Primary\ pump}} \quad (2)$$

$$COP_{Cooling\ System} = \frac{\dot{Q}_{Cooling\ system}}{P_{Fan} + P_{Primary\ pump} + P_{Secondary\ pump} + P_{DV\ fan}} \quad (3)$$

در این معادلات  $P_{Primary\ pump}$ ،  $P_{Secondary\ pump}$  به ترتیب نشان‌دهنده توان مصرفی پمپ‌های اولیه و ثانویه مطابق "شکل 1" می‌باشند و  $P_{Fan}$ ،  $P_{DV\ fan}$  به ترتیب توان مصرفی فن برج خنک‌کن و فن سیستم تهویه را نشان می‌دهد.

دبی جرمی آب براساس طراحی در سیکل اولیه و ثانویه به ترتیب  $1.4$  و  $1.6$  می‌باشد. نرخ تهویه براساس حداقل میزان موردنیاز برای ساختمان اداری از استاندارد اشری<sup>1</sup>  $62.1$  برابر با  $0.255 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  لحاظ شده است [13]. بار حرارتی داخلی برمبنای افراد، وسایل الکتریکی و روشنایی  $66 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  و زمان اعمال آن را از ساعت 8 صبح تا 5 بعدازظهر لحاظ شده است [14].

در "شکل 5" نحوه عملکرد سیستم سرمایش برای روز طراحی در شهر پاریس به عنوان منطقه گرم و مرطوب [15] نشان داده شده است زمانی که

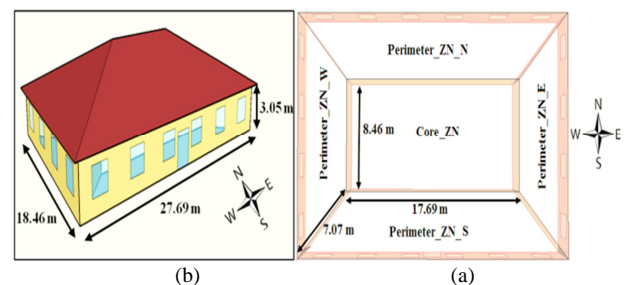


Fig. 4 Schematic of small office building (a) external view (b) internal view with zone names

شکل 4 شماتیک مدل ساختمان شامل (a) نمای بیرونی و (b) نمای درونی

<sup>1</sup> ASHRAE

سرد را دارد. سیستم سرمایش تبخیری با اتصال برج خنک‌کن به سیستم سرمایش تابشی و تهویه به عنوان یک راه حل جایگزین برای سیستم‌های معمول سرمایش در مناطق معتدل را دارد. در این مقاله عملکرد سیستم سرمایش بیان شده برای یک ساختمان اداری در شهر پاریس به‌عنوان منطقه گرم و مرطوب در روز طراحی براساس استاندارد اشری مورد بررسی از لحاظ کارایی و آسایش حرارتی قرار گرفت. نشان داده شد علاوه بر این که ضریب عملکرد این سیستم در روز طراحی برای پاریس به‌عنوان منطقه معتدل گرم و مرطوب در محدوده 2 تا 8 تغییر می‌کند، این سیستم توانایی قابل قبولی جهت تامین شرایط آسایش حرارتی در حدود 67% ساعات کاری را دارا می‌باشد.

## 6- مراجع

- [1] U. Eicker, *Low energy cooling for sustainable buildings*. ISBN 978-0-470-69744-3, 2009.
- [2] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, et al., A review on buildings energy consumption information, *Energy and Buildings*, No. 40(3), pp. 394-398, 2008.
- [3] D. Alexander, M. O'Rourke, Design Considerations for Active Chilled Beams. *ASHRAE Journal*, No. 50(9), pp. 50-54, 2008.
- [4] B. Costelloe, D.P. Finn, Indirect evaporative cooling potential in air-water systems in temperate climates, *Journal of Energy and Buildings*, No. 35, pp. 573-591, 2003.
- [5] A. Hasan, M. Vuolle, K. Sirén, R. Holopainen, and P. Tuomaala. A cooling tower combined with chilled ceiling: system optimisation. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, No. 2(3), pp. 217-224, 2007.
- [6] B. Bergsten. *Evaporative Cooling Tower and Chilled Beams, Design Aspects for Cooling in Office Buildings in Northern Europe*. PhD Thesis. Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden, 2009.
- [7] B. Costelloe, and D.P. Finn. Indirect evaporative cooling potential in air-water systems in temperate climates. *Energy and Buildings*, 35:573-591, 2003.
- [8] M. Nasrabadi, D.P. Finn, Mathematical modeling of a low temperature low approach direct cooling tower for the provision of high temperature chilled water for conditioning of building spaces, *Applied Thermal Engineering*, No. 64, pp. 273-282, 2014.
- [9] J.C. Kloppers, D.G. Kroger, Cooling Tower Performance Evaluation: Merkel, Poppe, and e-NTU Methods of Analysis. *J. of Eng. for Gas Turbines and Power*, Vol. 127, pp. 1-7, 2005.
- [10] B. Costelloe, and D.P. Finn. Heat transfer correlations for low approach evaporative cooling systems in buildings. *Applied thermal engineering*, No. 29(1), pp. 105-115, 2009.
- [11] M. Nasrabadi, D.P. Finn, Performance analysis of a low approach low temperature direct cooling tower for high-temperature building cooling systems. *Energy and Buildings*, 84, pp.674-689, 2014.
- [12] I. Korolija. *Heating, Ventilating and Air-conditioning System Energy Demand Coupling with Building Loads for Office Buildings*. PhD Thesis. De Montfort University, Leicester, UK, 2011.
- [13] ASHRAE. *ASHRAE Standard: Standard 62.1-2004*, Ventilation for acceptable indoor air quality. Atlanta, USA, 2004.
- [14] G. Dunn, and I. Knight. Small power equipment loads in UK office environments. *Energy and buildings*, No. 37(1), pp. 87-91, 2005.
- [15] Nick Barnard, Denice Jaunzens (Eds.), Low energy cooling: technology selection and early design guidance, Annex 28, *Low Energy Cooling*, Building Research Establishment Ltd, 2001 (January 2001).
- [16] ASHRAE. *ASHRAE Handbook: Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, USA, SI edition, 2013.
- [17] S. Wei, M. Li, W. Lin, and Sun, Y. Parametric studies and evaluations of indoor thermal environment in wet season using a field survey and PMV-PPD method. *Energy and Buildings*, No. 42(6), pp. 799-806, 2010.

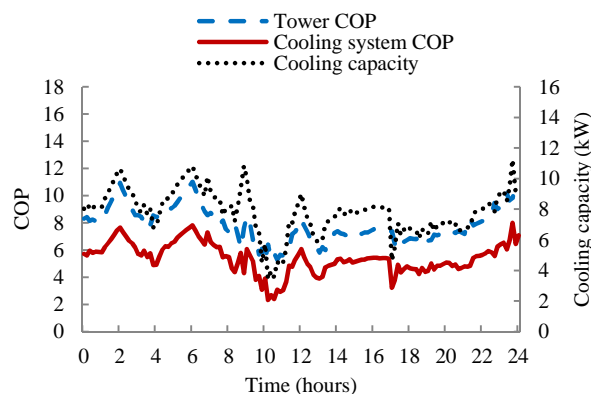


Fig. 7 Tower COP, cooling system COP and cooling capacity of the integrated CT with RC and DV in Paris design day analysis

شکل 7 ضریب عملکرد برج خنک کن و سیستم سرمایش به‌همراه ظرفیت سرمایش در طول روز طراحی

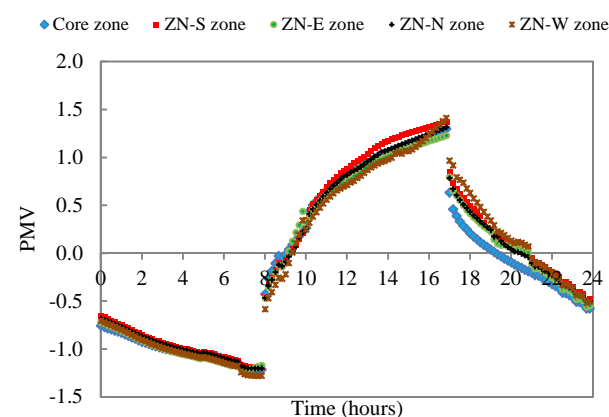


Fig. 8 PMV index value of different building zones for the integrated CT to radiant ceiling and DV in Paris design day analysis

شکل 8 بررسی آسایش حرارتی در فضای مختلف ساختمان بر مبنای سیستم سرمایش مفروض

تأمين آسایش حرارتی به‌وسیله این سیستم سرمایش با پارامتر PMV "شکل 8" مورد بررسی قرار گرفته است. این پارامتر پاسخ جمعی افراد در مورد مقیاس آسایش حرارتی استاندارد اشری را تخمین می‌زند [16]. بر مبنای این پارامتر عدد +1 شرایط نسبتاً گرم و عدد -1 شرایط نسبتاً سرد را نشان می‌دهد در نتیجه زمانی که این پارامتر ما بین  $\pm 1$  قرار دارد شرایط نسبتاً قابل قبول آسایش حرارتی را نشان خواهد داد [17]. با توجه به "شکل 8" می‌توان دید که سیستم سرمایش بیان شده در این مقاله تا ساعت حدوداً 2 بعد از ظهر شرایط نسبتاً مناسبی برای افراد مهیا می‌کند و بعد از این ساعت نیاز به سیستم سرمایش کمکی می‌باشد. با توجه به این که ساعت کاری در بازه 8 تا 5 بعد از ظهر در نظر گرفته شده است می‌توان نتیجه گرفت که سیستم سرمایش مفروض در این مقاله توانایی تامین شرایط آسایش حرارتی در حدود 67% ساعات کاری در روز طراحی برای پاریس را دارا می‌باشد.

## 5- نتیجه گیری

با توجه به این که برج خنک کن قابلیت تولید آب سرد با دمای 14-18 درجه سانتی‌گراد با اختلاف 1-3 درجه کلویین با دمای تر محیط قابلیت تولید آب