



Performance analysis of a radiant cooling system connected to a cooling tower in comparison to a fan-coil system in different climatic conditions of Iran

Mehdi Nasrabadi¹

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

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

Received: 07 May 2022 Revised: 18 November 2022 Accepted: 27 December 2022

Abstract

The major part of energy consumption in buildings is related to air conditioning systems. In this study, the performance of the fan-coil system in comparison to radiant chilled ceiling system with embedded pipes in concrete is evaluated. In the radiant cooling system, the cooling tower is used as the sole source of chilled water supplier. Since the effective operation of the cooling tower depends on environmental conditions, the performance of the after mentioned cooling system in different climatic conditions has been studied. For thermal comfort assessment and performance analysis of two mentioned systems, Energy Plus software has been used. The performance of these systems has been compared in the cities of Ahvaz, Tehran and Tabriz. The cities of Ahvaz, Tehran and Tabriz represent hot and semi-humid, hot and dry, temperate and dry climates, respectively. The simulation results present that the radiant chilled ceiling system integrated to cooling tower is capable to provide thermal comfort conditions in Tehran and Tabriz climatic conditions. Furthermore, the energy consumption of cited cooling system is significantly lower than a fan-coil system. The simulation results confirmed that the radiant cooling consumed 50-65% less energy in comparison to a benchmark fan-coil system in Tabriz and Tehran, respectively.

Keywords: Radiant cooling, Cooling tower, Fan-coil, Thermal comfort, Energy consumption

1. Introduction

In commercial buildings, mainly in offices, more than 40% of energy can be recognized to heating, ventilation and air conditioning systems [1]. Present calculations estimate that global energy consumption in the commercial building sector will raise from 30.5 exajoules in 2010 to 51.7 exajoules in 2040, which is corresponding to nearly 70% increasing with reference to a 2010 baseline year [2]. Moreover, electricity consumption, as a key energy end-use in commercial buildings, is predicted to increase by about 128% by 2040, in comparison to a baseline year of 2010 [2].

Consequently, finding alternative low-energy active cooling approaches to mechanical air conditioning systems for the space cooling of commercial buildings is being considered with increased interest. In such cases, it is necessary for such an alternative cooling approach to be not only an energy-efficient solution, but also to provide acceptable levels of thermal comfort for occupants.

In this research, the performance of radiant ceiling

system with embedded pipes has been evaluated and compared to a fan-coil system. The radiant ceiling integrated to a cooling tower as a sole source of cold water supply required, and since the effective operation of the cooling tower depends on environmental conditions, the performance of the cooling system in different climatic conditions has been studied.

For thermal modeling of systems and analysis of their performance, Energy Plus software has been used and the performance of these systems has been compared in terms of thermal comfort and energy consumption in the cities of Ahvaz, Tehran and Tabriz. The cities of Ahvaz, Tehran and Tabriz are representative of hot and semi-humid, hot and dry, temperate and dry climates, respectively.

2. Building model

The building utilized in this research is the standard building CASE600, which has only one zone with net total floor surface area of 48 m² and a height of 2.7

meters. This building has two windows located on the south side of the building with a net surface area of 6 m². An external view of the building used in this study is presented in Figure 1. Due to significant effects of building materials, construction and thermal specification on thermal comfort and energy consumption of buildings, in the current study the materials which are commonly used in Iran is considered in the building model. Consequently the material and thermal capacity is changed to take into account of Iranian building parameter properties [3].

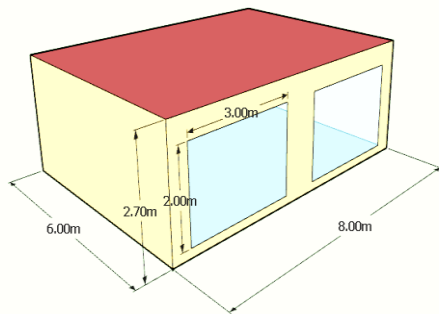


Figure 1. External view of the building

3. Integrated cooling system

The integrated building cooling system is evaluated in this study involves of a cooling tower, a radiant cooling system for space sensible cooling and a displacement ventilation system for space latent cooling. As it is shown in Figure 2, in the integrated cooling system, the cooling tower is the only source of chilled water production.

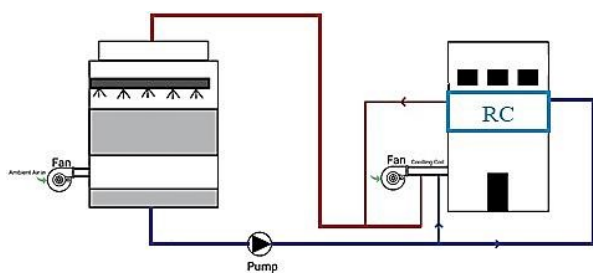


Figure 2. Schematic of the integrated cooling tower with radiant cooling and displacement ventilation systems

3.1. Radiant Cooling model

In the radiant panel model, the inside tube diameter and spacing was assumed to be 15.8 mm and 150 mm, respectively, based on standard design of radiant panel [4]. Considering tube spacing and zone surface area, the required hydronic tubing length for the zone is

calculated.

3.2. Displacement ventilation

In order to provide adequate ventilation for the occupants, a displacement ventilation system is used in the building model. As in the integrated cooling system, the radiant cooling system is assumed to be the main space cooling system, displacement ventilation is used to prepare fresh air ventilation requirement and as an auxiliary cooling system. During occupied hours, ventilation is estimated as 0.255 m³·s⁻¹ according to lowest ventilation rate of ASHRAE Standard 62.1 [5]. During unoccupied times, ventilation is set to zero, assuming that displacement ventilation does not work when the building is empty.

4. Performance analysis

The energy consumption of all equipment includes in the mentioned cooling system where the cooling tower was integrated to the displacement ventilation and radiant cooling panels is estimated and compared to the energy consumption of a fan-coil system which is considered as baseline cooling system. In the integrated cooling system, the total energy consumption involves the energy consumption of the chilled water pump and the cooling tower and displacement ventilation fans during the period 1st June-1st October for the three cited cities. On the other hand the total energy consumption of the baseline cooling system involves the energy consumption of a chiller, a primary and secondary pumps and the cooling tower and fan-coil fans during mentioned period. The results of energy consumption assessment of the cooling systems are illustrated in Figure 3.

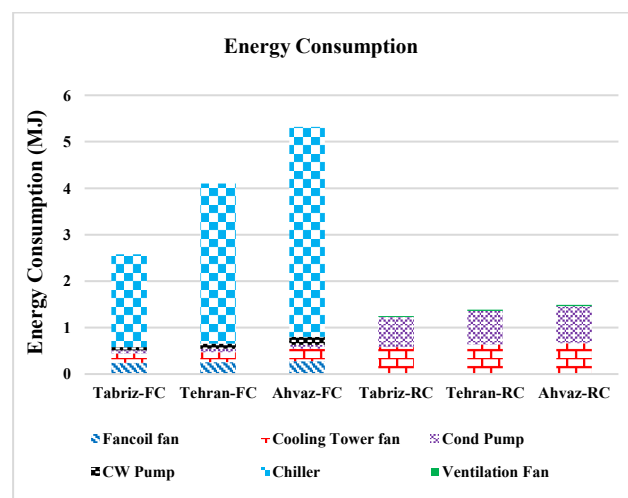


Figure 3. Energy consumption of the baseline and integrated cooling systems

As it is shown, the total energy consumption of the radiant cooling system was significantly less than in

other cases, since the chiller has been omitted in the integrated cooling system. It is presented; most of the energy consumption in the fan-coil system is allocated to the chiller, so that the energy consumption of this equipment in the cities of Ahvaz, Tehran and Tabriz, respectively, are approximately 4.5, 3.4 and 2 mega joules, respectively.

5. Conclusions

Since the major part of energy consumption in buildings is related to air conditioning systems, the proper choice of air conditioning system in any climate zone could have an important effect on reducing energy consumption and also providing thermal comfort for occupants. According to previous researches, radiant cooling systems have a higher energy saving potential than conventional forced air cooling systems and are able to provide thermal comfort conditions due to the uniform distribution of cooling. Therefore, in this research, the performance of a radiant cooling panel connected to a cooling tower has been evaluated. In the integrated cooling system, the cooling tower is used as the sole source for chilled water production, and since the effective operation of the cooling tower depends on environmental conditions, the performance of the cooling system in different climatic conditions of Iran has been studied. In order to compare the results, a fan-coil system is considered as a baseline cooling system. For thermal modeling of systems and analysis of their performance, Energy Plus software has been used and the performance of these systems has been compared in terms of thermal comfort and energy consumption in the cities of Ahvaz, Tehran and Tabriz. The cities of Ahvaz, Tehran and Tabriz are representative of hot and semi-humid, hot and dry, temperate and dry climates, respectively. The modeling results show, although the integrated cooling system can provide suitable thermal comfort conditions in majority of occupant attendance hours in Tehran and Tabriz, it could not prepare suitable thermal comfort conditions in Ahvaz. On the other hand, it can be observed that the energy consumption of the proposed cooling system is significantly lower than the fan-coil system. Energy saving for the integrated cooling system when benchmarked against a fan-coil system, were: 65% in Tehran and 50% in Tabriz.

6. References

- [1] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, and C. Pout. A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, Vol.40, No. 3, pp. 394-398, 2008.
- [2] EIA. Energy Information Administration (EIA). International energy Outlook 2013 With Projection to 2040. U.S. Energy Information Administration, Office of Energy Analysis, U.S. Department of Energy, Washington, 2013.

- [3] A. Zolfaghari, M.Saadatinasab, E. Noroozi Jajarm, Investigation of the Effect of Green Double Skin Facades on Energy Consumption of High-rise Buildings in Tehran's Climatic Conditions. *Journal of Modeling in Engineering*, 2019, Vol.17, No. 56, pp. 51-61, 2019. doi: 10.22075/JME.2018.5914. (in Persian)
- [4] I. Doebber, M. Moore and M.Deru, Radiant slab cooling for retail. *ASHRAE Journal*. Vol.52, No. 12, pp. 28, 2010.
- [5] ASHRAE. *ASHRAE Standard: Standard 62.1-2004*, Ventilation for acceptable indoor air quality. Atlanta, USA, 2004.

ارزیابی عملکرد سیستم سرمایش سقفی متصل به برج خنک کن در مقایسه با سیستم فن کویل در مناطق مختلف آب و هوایی ایران

مهدی نصرآبادی¹

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

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

چکیده

قسمت عمده‌ای از مصرف انرژی در ساختمان‌ها مربوط به سیستم‌های تهویه مطبوع است. با توجه به اینکه انتخاب سیستم مناسب در هر منطقه آب و هوایی تاثیر عمده‌ای در کاهش مصرف انرژی و همچنین شرایط آسایش افراد دارد، در این تحقیق عملکرد سیستم فن کویل با سیستم سرمایش تابشی سقفی با لوله‌های تعبیه شده در بتن مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. در سیستم سرمایش تابشی برج خنک کن به عنوان تنها منبع تامین آب سرد مورد نیاز استفاده می‌گردد و با توجه به اینکه کارکرد موثر برج خنک کن تابع شرایط محیطی است، عملکرد سیستم سرمایشی در شرایط آب و هوایی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. جهت مدل‌سازی حرارتی سیستم‌ها و تحلیل عملکرد آنها از نرم افزار انرژی پلاس استفاده شده است و عملکرد این سیستم‌ها از نقطه نظر آسایش حرارتی و میزان مصرف انرژی در شهرهای اهواز، تهران و تبریز مقایسه شده است. شهرهای اهواز، تهران و تبریز به ترتیب معرف شرایط آب و هوایی گرم و نیمه مرطوب، گرم و خشک، معتدل و خشک هستند. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که سیستم سرمایش سقفی در اتصال با برج خنک کن برای شهرهای تهران و تبریز قادر است شرایط آسایش حرارتی را فراهم کند و مصرف انرژی در این سیستم در مقایسه با سیستم فن کویل کاهش قابل توجهی دارد. میزان کاهش مصرف انرژی در شهر تهران در حدود 65٪ و برای شهر تبریز در حدود 50٪ است.

کلیدواژه‌گان: سرمایش سقفی، برج خنک کن، فن کویل، آسایش حرارتی، مصرف انرژی

Performance analysis of a radiant cooling system connected to a cooling tower in comparison to a fan-coil system in different climatic conditions of Iran

Mehdi Nasrabadi¹

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

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

Received: 07 May 2022 Accepted: 27 December 2022

Abstract

The major part of energy consumption in buildings is related to air conditioning systems. Since selection of a suitable air conditioning system in any climatic zone has a major impact on reducing energy consumption as well as preparing thermal comfort conditions, in this study, the performance of the fan coil system with radiant chilled ceiling system with pipes embedded in concrete is compared and evaluated. In the radiant cooling system, the cooling tower is used as the sole source of cold water supply required, and since the effective operation of the cooling tower depends on environmental conditions, the performance of the cooling system in different climatic conditions has been studied. For thermal comfort assessment and performance analysis of two mentioned systems, Energy Plus software has been used. The performance of these systems has been compared in the cities of Ahvaz, Tehran and Tabriz. The cities of Ahvaz, Tehran and Tabriz represent hot and semi-humid, hot and dry, temperate and dry climates, respectively. The results show that the radiant chilled ceiling system integrated to cooling tower is capable to provide thermal comfort conditions in Tehran and Tabriz climatic conditions. Furthermore, the energy consumption of cited cooling system is significantly lower than a Fan coil system. The simulation results confirmed that the radiant cooling consumed 50-65% less energy in comparison to a benchmark fan coil system in Tabriz and Tehran, respectively.

Keywords: Radiant cooling, Cooling tower, Fan-coil, Thermal comfort, Energy consumption

1- مقدمه

بخش قابل توجهی از انرژی تولیدی در جهان در بخش ساختمان مصرف می‌شود، به نحوی که سهم این بخش از کل مصرف انرژی جهان حدود 40٪ است و موجب انتشار 30٪ از دی اکسیدکربن تولیدی در جهان می‌گردد [1]. در یک ساختمان نیز سیستم‌های تهویه مطبوع بخش عمده‌ای از مصرف انرژی را به خود اختصاص می‌دهد، تحقیقات نشان می‌دهد که بیش از 40٪ مصرف انرژی در ساختمان‌های تجاری مربوط به سیستم‌های گرمایش و تهویه مطبوع است [2]. در کشورهای در حال توسعه پیش بینی می‌شود با انتخاب صحیح سیستم‌ها و تجهیزات مناسب تهویه مطبوع، بین 13 تا 52٪ امکان صرفه‌جویی در مصرف انرژی در بخش ساختمان وجود داشته باشد [2].

سیستم‌های سرمایش تابشی نظیر پنل‌های سرمایش از سقف یا کف و تیرهای خنک در اتصال با سیستم‌های تهویه جابجایی به عنوان یکی از سیستم‌های سرمایشی جایگزین در مقایسه با سیستم‌های معمول سرمایشی شناخته می‌شوند [3]. در سیستم سرمایش سقفی آب سرد در محدوده دمایی 14 الی 18 درجه سانتیگراد مورد استفاده قرار می‌گیرد [4] و دمای آب بیشتر از سیستم‌های معمول سرمایشی است که آب سرد با دمای 5 تا 9 درجه سانتیگراد را لازم دارند [5]. با افزایش دمای آب سرد مورد نیاز، ضریب عملکرد سیستم‌های سرمایشی افزایش می‌یابد و میزان مصرف انرژی به میزان 4٪ بر درجه سانتیگراد کاهش می‌یابد [6]. در این مقاله عملکرد سیستم سرمایش سقفی در اتصال به برج خنک کن مورد ارزیابی قرار گرفته است و با سیستم فن کویل مقایسه گردیده است. برخی از محققان به بررسی عملکرد سیستم فن کویل و سیستم‌های سرمایش تابشی پرداخته‌اند که در ادامه به تعدادی از این پژوهش‌ها اشاره می‌گردد.

نیو¹ و همکاران نشان دادند که خنک کردن فضای داخل ساختمان‌ها با استفاده از جریان آب سرد در لوله‌هایی که داخل سقف قرار گرفته‌اند، امکان پذیر است. در این تحقیق عملکرد سیستم سرمایش سقفی با سیستم‌های معمول سرمایشی در منطقه معتدل مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج نشان داد با توجه به اینکه در سرمایش سقفی دبی آب کمتر و درجه حرارت آب بالاتر از سیستم‌های معمول است، می‌تواند راه حل امید بخشی در زمینه سرمایش و صرفه‌جویی در مصرف انرژی باشد [7].

استتیو² در پژوهشی امکان کاهش مصرف انرژی و کاهش بار ماکزیمم را در بکارگیری سیستم سرمایش سقفی در ساختمان‌های تجاری آمریکا بررسی نمود. نتایج نشان داد که احتمال تقطیر بر روی سطوح سرد در صورت استفاده از این سیستم در مناطق آب و هوایی آمریکا پایین است و میزان مصرف انرژی این سیستم در مقایسه با سایر سیستم‌های معمول سرمایشی پایه هوا در مناطق مختلف آب و هوایی آمریکا 17 تا 42 درصد کمتر است و کاهش بار ماکزیمم در محدود 22 تا 32 درصد متغیر بود [8]. در این مطالعه فقط نتایج برای یک هفته در ماه جولای (11 تا 17 مرداد ماه) مورد

ارزیابی قرار گرفته است و تامین شرایط آسایش حرارتی توسط این سیستم بررسی نشده است.

ژرال³ و همکاران با مدلسازی یک اتاق با سیستم سرمایش سقفی، شرایط آسایش حرارتی ساکنان اتاقی با سقف سرد با سطوح فعالیتی مختلف و ارتفاع اتاق متغیر را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که این سیستم توانایی تامین شرایط آسایش حرارتی جهت فعالیت اداری سبک با نرخ متابولیک 93 وات بر متر مربع را دارد. همچنین نتایج نشان داد با افزایش ارتفاع دمای متوسط تابشی افزایش پیدا می‌کند و برای اتاق با ارتفاع 3 متر دمای متوسط تابشی در حدود 26 درجه سانتیگراد خواهد بود [9].

تیان⁴ و همکاران مطالعه‌ای میدانی از آسایش حرارتی و گرمای محیطی با یک سیستم خنک کننده تابشی را ارائه نمودند. در این پژوهش از ترکیب اندازه گیری‌های میدانی و پرسشنامه‌های مبتنی بر پروتکل ASHRAE RP-921 استفاده و 116 داده از 82 شرکت کننده جمع آوری شد. نتایج نشان داد که مهمترین مزیت خنک کننده تابشی برای آسایش حرارتی کاهش نارضایتی حرارتی با کاهش اختلاف دمای عمودی هوا است. همچنین نتایج بررسی نشان داد که 14 تا 22 درصد از شرکت کنندگان احساس سرمای موضعی در مناطق بازو و پا داشتند [10].

مومن⁵ و همکاران در سال 2008 ارزیابی میدانی از آسایش حرارتی در دانشگاه مهندسی و فناوری مهران واقع در منطقه نیمه گرمسیری پاکستان را انجام دادند. شبیه سازی سیستم تهویه معمولی و سیستم تابشی با استفاده برنامه TRNSYS انجام شد. نتایج نشان داد که دستیابی به آسایش حرارتی در بیشتر اوقات سال امکان پذیر است و استفاده از سیستم تابشی باعث صرفه جویی 80 درصدی انرژی می‌شود [11].

ذوالفقاری و همکاران امکان سنجی استفاده از سیستم‌های سقف سرد را در اقلیم‌های متفاوت آب و هوایی ایران مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که مناطق حاشیه دریای خزر، خلیج فارس و دریای عمان استفاده از این سیستم‌ها به دلیل رطوبت نسبی بالا، با محدودیت شدید مواجه است. ضمن اینکه در مناطق کویری و مرکزی ایران استفاده از این سیستم‌ها بدون هیچگونه محدودیتی امکان استفاده وجود دارد. همچنین برای استفاده از سیستم‌های سرمایش سقفی در مناطق معتدل و نیز نواحی غرب ایران باید تدابیر خاص را به کار گرفت [12].

اگزیدیس⁶ و همکاران در تحقیقی سیستم‌های سرمایش تابشی و تهویه جابه‌جایی را از نظر تامین شرایط آسایش حرارتی و مصرف انرژی در یک اتاق اداری مقایسه کردند. نتایج نشان داد که سیستم‌های سرمایش تابشی همیشه نمی‌توانند شرایط آسایش حرارتی مناسبی را در مقایسه با سیستم‌های تهویه جابه‌جایی ارائه دهند. اگرچه در صورت عدم رطوبت، شرایط آسایش را با مصرف انرژی کمتری تامین می‌کنند [13].

مصلحی و همکاران امکان استفاده از پنل‌های تشعشی گرمایشی-سرمایشی در ساختمان‌های مسکونی در 5 منطقه اقلیمی مختلف و برای

3 Zmrhal
4 Tian
5 Memon
6 Oxizidis

1 Niu
2 Stetiu

کمتری دارد و در حدود 45 درصد در میزان مصرف انرژی صرفه‌جویی می‌کند [18].

در این تحقیق عملکرد سیستم فن کوپل با سیستم سرمایش تابشی سقفی با لوله‌های تعبیه شده در بتن مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. در سیستم سرمایش تابشی برج خنک کن به عنوان تنها منبع تامین آب سرد مورد نیاز استفاده می‌شود و با توجه به اینکه کارکرد موثر برج خنک کن تابع شرایط محیطی است، عملکرد سیستم سرمایشی در شرایط آب و هوایی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. جهت مدل‌سازی حرارتی سیستم‌ها و تحلیل عملکرد آنها از نرم افزار انرژی پلاس استفاده شده است و عملکرد این سیستم‌ها از نقطه نظر آسایش حرارتی و میزان مصرف انرژی در شهرهای اهواز، تهران و تبریز مقایسه شده است. شهرهای اهواز، تهران و تبریز به ترتیب معرف شرایط آب و هوایی گرم و نیمه مرطوب، گرم و خشک، معتدل و خشک هستند.

2- تقسیم بندی اقلیمی ایران

ایران به علت قرار گرفتن در موقعیت جغرافیایی خاص و دارا بودن عوامل مختلف محیطی از قبیل دریای آزاد، دریاچه، کویر، کوهستان و جنگل، دارای آب و هوای متفاوت است و از این رو در فصول مختلف سال، شرایط اقلیمی متغیری را می‌توان مشاهده نمود [19].

2-1- تقسیم بندی تابستانی

منظور از این تقسیم‌بندی، نشان دادن آب و هوا در تابستان برای مناطق مختلف و تنظیم آن در هر گروه خاص است. عوامل موثر در تقسیم‌بندی تابستانی عبارتند از: درجه حرارت خشک (DB)⁴، درجه حرارت مرطوب (WB)⁵، رطوبت نسبی (RH)⁶ و مقدار رطوبت (W)⁷. با مشخص شدن دو عامل از عوامل فوق، بقیه پارامترها مشخص می‌شود. بنابراین تقسیم‌بندی طبق دو عامل مهم می‌تواند صورت پذیرد: الف) تفاوت در درجه حرارت. ب) تفاوت در رطوبت [19].

2-2- تقسیم بندی زمستانی

جهت بررسی مناطق در زمستان، تنها عامل مهم، حداقل درجه (حرارت خشک زمستانی) است. با توجه به تقسیم‌بندی‌های تابستانی، نمونه گروه‌های زمستانی می‌توانند با کمی چشم‌پوشی و تطبیق به گروه‌های خاص تابستانی تعلق گیرند. در جدول 1 تقسیم بندی زمستانی و تابستانی ارائه شده است، همچنین شکل 1 به صورت شماتیک نقشه ایران و تقسیم‌بندی شهرها را در 5 تیپ مختلف نشان می‌دهد [19].

تحقیقات پیشین در زمینه امکان سنجی استفاده از سیستم‌های سرمایش سقفی نشان می‌دهد که استفاده از این سیستم‌ها در مناطق مرطوب نظیر مناطق قرار گرفته در حاشیه خلیج فارس، دریای عمان و دریای خزر به علت احتمال تقطیر آب در سطح با محدودیت مواجه است [12]، لذا در این تحقیق عملکرد سیستم‌ها در سه شهر اهواز، تبریز و تهران که به ترتیب معرف شرایط آب و هوایی گرم و نیمه مرطوب، گرم و خشک و معتدل و

اتاقی با مساحت 48 m^2 و بار داخلی $4/17 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ و با حضور یک فرد را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در مناطق کویری و شبه کویری سیستم‌های تابشی شرایط آسایش حرارتی افراد را تامین می‌کنند و در مقایسه با سیستم فن کوپل می‌توانند حدود $11/3$ درصد در مصرف انرژی گرمایش و $9/1$ درصد در مصرف انرژی سرمایشی صرفه‌جویی داشته باشند [14].

مارکز¹ و همکاران سیستم‌های فن کوپل و گرمایش از کف و ترکیب این دو سیستم را از نقطه نظر مصرف انرژی و آسایش حرارتی در شهرهای مادرید، لندن و نیویورک مقایسه کردند. نتایج مدل‌سازی توسط نرم افزار TRNSYS نشان داد از نظر آسایش حرارتی سیستم ترکیبی بهترین عملکرد را به خود اختصاص می‌دهد. به عنوان مثال میزان ساعت عدم آسایش (PPD) در سیستم ترکیبی برای مادرید در محدوده 2 درصد بود درحالیکه این پارامتر برای سیستم فن کوپل در حدود 40 درصد قرار داشت. از نظر مصرف انرژی سیستم فن کوپل بدترین عملکرد را به خود اختصاص داد به نحویکه مصرف انرژی این سیستم 15 درصد بیشتر از سایر سیستم‌ها بود [15]. در این تحقیق اگرچه نتایج مصرف انرژی به صورت فصلی مورد ارزیابی قرار گرفته است ولی نتایج آسایش حرارتی فقط برای یک روز خاص (4 دسامبر) گزارش شده است.

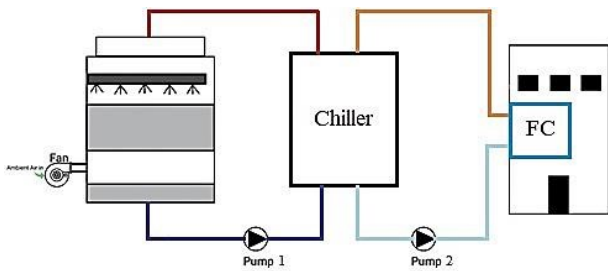
نصرآبادی و فین به بررسی عملکرد یک سیستم سرمایش تبخیری جهت تامین آب سرد مورد نیاز سیستم سرمایش تابشی پرداختند. در این تحقیق مدل ریاضی سیستم سرمایش تبخیری برای یک نمونه برج خنک کن ارائه شد و عملکرد برج در حالتی که تنها تامین کننده آب سرد مورد نیاز برای سیستم سرمایش تابشی بود در شهر پاریس به عنوان شهر منتخب در منطقه آب و هوایی گرم و مرطوب در روز طراحی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که سیستم سرمایش از سقف در روز طراحی قادر به تامین شرایط آسایش حرارتی در 67٪ ساعات حضور افراد است [16].

سالولای² و همکاران عملکرد پنج سیستم سرمایشی تهویه طبیعی، تهویه مکانیکی، فن کوپل، پنل‌های سرمایش تابشی سقفی معلق و مدفون در بتن را در شهرهای استکهلم، هامبورگ، اشتوتگارت، میلان، رم و پالمو از نقطه نظر مصرف انرژی و آسایش حرارتی با شبیه سازی یک ساختمان معمولی اداری توسط TRNSYS 17 را بررسی کردند. از مقایسه نتایج شبیه سازی می‌توان دریافت برای مناطق ذکر شده، مصرف انرژی سیستم‌های سرمایش تابشی به میزان محسوسی کمتری از سیستم فن کوپل است. به عنوان مثال برای اشتوتگارت در شرایط آسایش حرارتی تقریباً یکسان مصرف انرژی سیستم‌های سرمایش تابشی در یک سال در حدود $13/5$ کیلووات ساعت بر متر مربع بود در حالیکه برای سیستم فن کوپل این عدد در حدود $27/3$ کیلووات ساعت بر مترمربع محاسبه شده است [17].

پان³ و همکاران عملکرد فن کوپل با سیستم تهویه مطبوع مرکزی، از نظر آسایش حرارتی و انرژی مصرفی مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق حاکی از آن است که سیستم فن کوپل در مقایسه با سیستم تهویه مطبوع مرکزی جهت رسیدن به یک سطح آسایش حرارتی یکسان زمان عملکردی

4 Dry Bulb
5 Wet Bulb
6 Relative humidity
7 Moisture Content

1 Marques
2 Salvalai
3 Pan



شکل 2 شماتیک سیستم سرمایش فن کویل به همراه تجهیزات مربوطه

3-2- سیستم‌های سرمایش تابشی

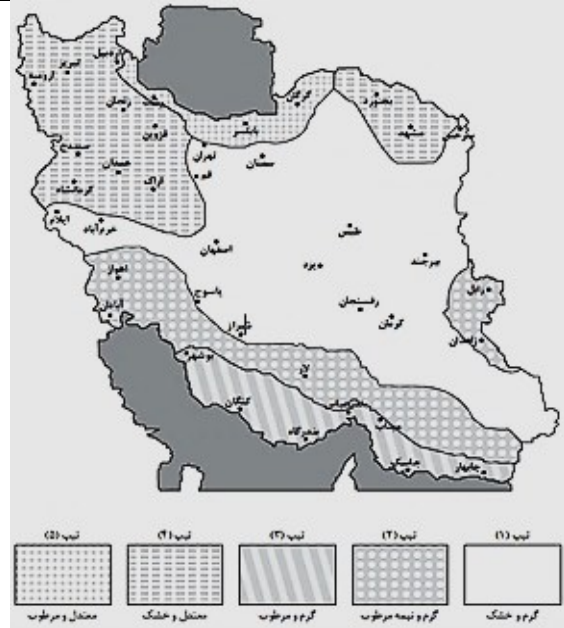
سیستم‌های سرمایش تابشی، برای دفع گرمای داخل ساختمان به خارج، به جای استفاده از اختلاف دمای بالا بین هوای داخل ساختمان و سیال عامل در یک سطح انتقال حرارت محدود در سیستم‌های معمول، از اختلاف دمای کمتر با کمک سطوح انتقال حرارت بزرگتر استفاده می‌گردد. در نتیجه گرادیان عمودی دما در این سیستم‌ها در مقایسه با سیستم‌های معمول که از سیستم چرخش هوا استفاده می‌کنند، کاهش پیدا می‌کند. در سیستم‌های تابشی به دلیل عدم وزش هوا، ناراضیاتی حرارتی موضعی کاهش یافته و همچنین عملکرد تابشی اینگونه سیستم‌ها باعث از بین رفتن گرادیان دمای نامطلوب در داخل ساختمان می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود که سیستم‌های تابشی، شرایط آسایش حرارتی مطلوبتری را در ساختمان فراهم سازند. کاهش اختلاف دما بین فضای داخل ساختمان و سیال عامل، به میزان زیادی از بروز مشکلاتی مانند شرایط ناخوشایند به دلیل اختلاط نامناسب هوای سرد ارسال به اتاق و هوای گرم موجود، جلوگیری به عمل می‌آورد [20].

در این تحقیق سیستم سرمایش تابشی به صورت لوله‌های تعبیه شده در بتن است که اصطلاحاً به عنوان سیستم‌های سرمایشی فعال حرارتی (TABS) شناخته می‌شوند. در این سیستم می‌توان از ظرفیت ذخیره سازی حرارتی ساختاری ساختمان استفاده کرد [21]. نتایج تحقیقات پیشین نشان می‌دهد با بکارگیری این سیستم در یک اتاق اداری (با ابعاد $4/92 \times 5/5$ متر و ارتفاع $3/2$ متر) در ماه آگوست (10 مرداد ماه تا 9 شهریور ماه) در کشور چک با بار داخلی 18 وات بر مترمربع، دمای موثر بیش از 10 درجه سانتیگراد کاهش پیدا کرده است [22-23]. به منظور تامین هوای تازه جهت ساکنین از سیستم تهویه جابجایی استفاده شده است. در این حالت هوای ورودی با عبور از کویل سرمایشی که آب سرد برج خنک کن در آن جاری است، خنک شده و وارد اتاق می‌شود. شماتیک این سیستم سرمایشی در شکل 3 نشان داده شده است. محل قرارگیری لوله‌های آب سرد در بتن و ترتیب قرارگیری لایه‌ها در شکل 4 نشان داده شده است. در این تحقیق بر اساس استاندارد قطر لوله‌های سرمایش تابشی 0/015875 متر و فاصله لوله‌ها از هم 0/15 متر است [24] و طول کل لوله‌ها نیز با توجه به ابعاد اتاق محاسبه شده است.

خشک هستند در چهار ماه گرم سال، از 11 خرداد (1st June) تا 9 مهر (1st October)، مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول 1 تقسیم‌بندی کلی اقلیم تابستانی و زمستانی [19]

تیپ‌بندی	نوع آب و هوا		شهر
	تابستان	زمستان	
تیپ 1	گرم و خشک	سرد	تهران، بیرجند و...
تیپ 2	گرم و نیمه‌مرطوب	معتدل	اهواز و...
تیپ 3	گرم و مرطوب	گرم	بندر عباس و...
تیپ 4	معتدل و خشک	خیلی سرد	تبریز، زنجان و...
تیپ 5	معتدل و مرطوب	سرد	رشت، رامسر و...



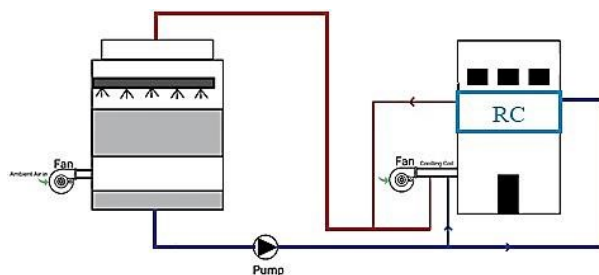
شکل 1 نقشه تقسیمات اقلیمی ایران [19]

3- شرح سیستم‌ها

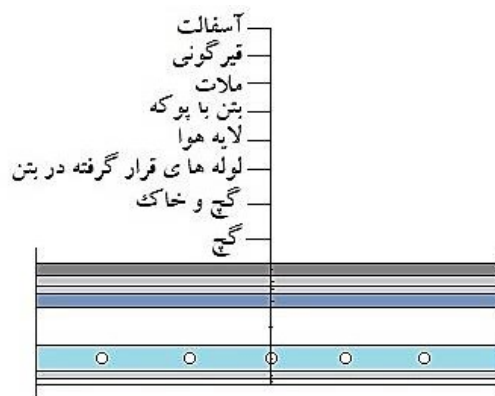
3-1- سیستم فن کویل

فن کویل یک سیستم تهویه مطبوع است که عمل سرمایش و گرمایش را به صورت جابجایی اجباری انجام می‌دهد. اجزای اصلی این سیستم شامل: فن، کویل سرمایش و گرمایش و فیلتر هوا است. نحوه کار این سیستم بدین صورت است که کویل‌ها آب گرم و سرد را توسط دو لوله که به آن‌ها متصل است از واحد مرکزی دریافت کرده و با عبور هوا از روی این کویل‌ها توسط فن دمنده سرمایش و گرمایش انجام می‌شود. به هر کویل دو لوله متصل می‌شود که یکی ورودی آب گرم از بویلر در زمستان یا آب سرد از چیلر در تابستان و دیگری لوله برگشت آب به موتورخانه مرکزی است. کویل معمولاً از لوله‌های مسی با پره‌های آلومینیومی ساخته شده است. فن کویل‌ها را می‌توان از نظر محل نصب، روکار یا توکار بودن تقسیم بندی کرد. شماتیک سیستم سرمایش فن کویل به همراه منابع تامین کننده سرمایش و تجهیزات بکار رفته در این سیستم در شکل 2 نشان داده شده است.

1700	1000	0/25	فیرگونی
2110	1000	1/15	آسفالت
1900	840	1	آجر
2000	920	1/15	ملات
2300	1000	1/75	بتن
1300	840	0/34	بتن با پوکه
1/169	1004	0/3	لایه هوا
1000	840	1/15	گچ و خاک
1300	1000	0/7	گچ
2500	840	2/9	سنگ گرانیت
3000	1000	1/4	موزائیک



شکل 3 سیستم سرمایش تابشی پیشنهادی به همراه تجهیزات مربوطه



شکل 4 محل قرارگیری لوله‌های پنل سرمایش تابشی مورد استفاده

5- روش حل و اعتبارسنجی مدل

روش تعادل حرارتی در انرژی پلاس برای محاسبه و تجزیه و تحلیل تغییرات گرما در ساختمان استفاده می‌گردد به نحویکه انتقال حرارت از طریق سطوح چندلایه و انتقال حرارت از طریق تجهیزات تهویه مطبوع و همچنین تولید حرارت منابع حرارتی لحاظ می‌گردد [26]. در این روش از تعادل شارهای حرارتی که روی هر سطح وجود دارند استفاده شده و دمای روی سطوح با حل دستگاه معادلات محاسبه می‌شود. جزئیات معادلات ریاضی در مستندات مرجع مهندسی انرژی پلاس [26] ارائه شده است. تأیید دمای هوای اتاق با اندازه‌گیری گرمای ورودی و خروجی ساختمان در روز طراحی برای شرایط آب و هوایی اهواز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این بررسی برج خنک‌کن به پنل‌های سرمایشی متصل است.

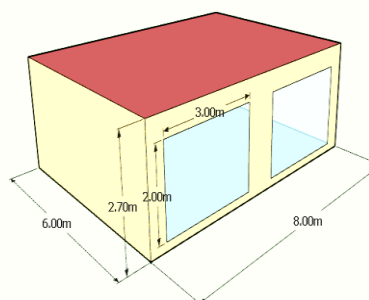
جدول 3 ترتیب قرار گرفتن لایه‌ها و ضخامت آنها [25]

اجزاء ساختمان	لایه‌ها	ضخامت (m)	
کف	بتن با پوکه	0/1	
	ملات	0/02	
	موزائیک	0/03	
سقف	آسفالت	0/04	
	فیرگونی	0/03	
	ملات	0/02	
	بتن با پوکه	0/05	
	لایه هوا	0/4	
	بتن	0/1	
	گچ و خاک	0/02	
	گچ	0/005	
	دیوار	سنگ گرانیت	0/02
		ملات	0/02
آجر		0/2	
گچ و خاک		0/02	
گچ		0/005	

5-1- روش موازنه انرژی

4- فضای نمونه

ساختمان به کار رفته در این تحقیق ساختمان استاندارد CASE600 است که دارای تنها یک ناحیه به مساحت 48 متر مربع و ارتفاع 2/7 متر است. این ساختمان دارای دو پنجره هر کدام به مساحت 6 متر مربع در ضلع جنوبی ساختمان است. در شکل 5 نمای بیرونی ساختمان نشان داده شده است.

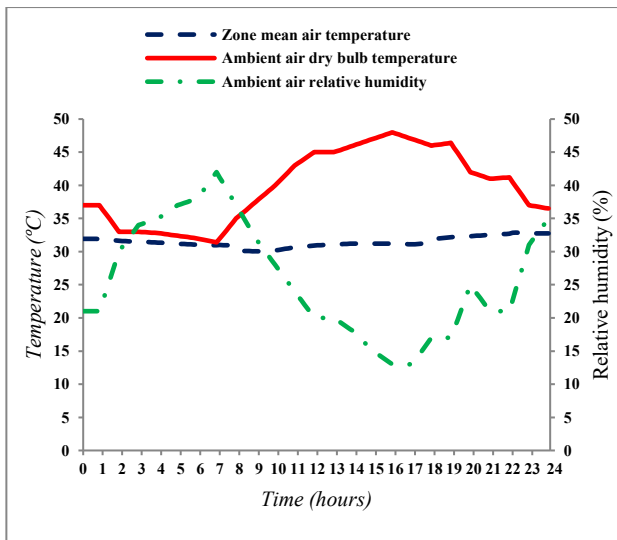


شکل 5 نمای بیرونی ساختمان از دید جنوب غربی

مواد و مصالح به کار رفته در ساختمان مطابق جداول 2 و 3 است که در این جداول مشخصات حرارتی، ضخامت و ترتیب قرارگیری مواد به کار رفته بر اساس مصالح موجود در کشور از سطح خارجی به سطح داخلی آورده شده است [25].

جدول 2 جنس مصالح به کار رفته در ساختمان [25]

مواد و مصالح	ضریب هدایت حرارتی	گرمای ویژه	چگالی
	(Wm ⁻¹ K ⁻¹)	(Jkg ⁻¹ K ⁻¹)	(kgm ⁻³)



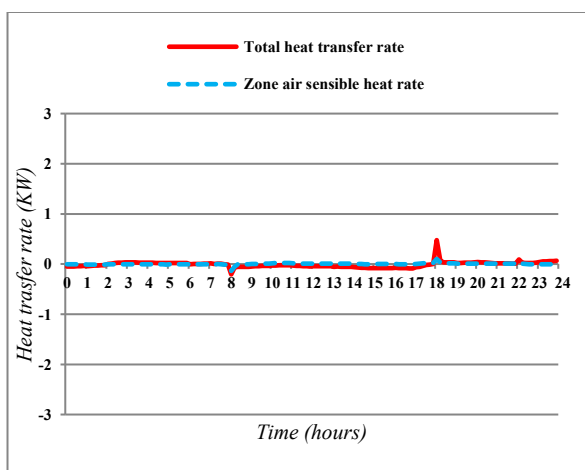
شکل 7 دمای متوسط هوای اتاق به همراه شرایط محیطی در روز طراحی شهر اهواز

5-2- مقایسه انرژی

به منظور ارزیابی انرژی کل منتقل شده به ساختمان و تغییرات دمای هوای اتاق با توجه به این انتقال انرژی، چگالی هوا و گرمای ویژه مخلوط هوا و بخار آب در هر گام زمانی محاسبه شده است. خواص مخلوط هوا و بخار آب در هر گام زمانی بر اساس معادلات مربوطه محاسبه شده است [27]. با توجه به ابعاد اتاق، جرم هوای اتاق بدست آمده است و انتقال گرمای محسوس هوا با توجه به معادله زیر در هر گام زمانی محاسبه می‌گردد.

$$\dot{Q}_{\text{zone air sensible heat rate}} = m_{\text{Air}} \times c_{p\text{ma}} \times \left(\frac{T_{\text{Air},n+1} - T_{\text{Air},n}}{t_{n+1} - t_n} \right) \quad (2)$$

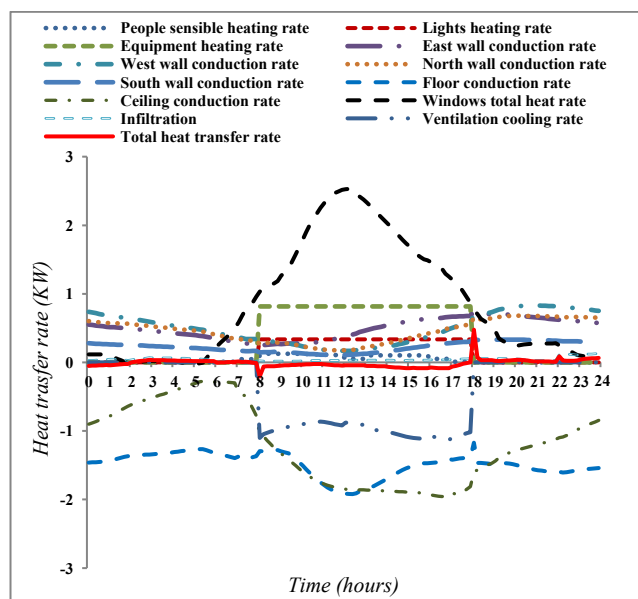
در این معادله $T_{\text{Air},n}$ دمای هوای اتاق در زمان t_n و $T_{\text{Air},n+1}$ دمای هوای اتاق در گام زمانی بعدی یعنی t_{n+1} است. نتایج محاسبه انتقال گرمای محسوس هوا و مقایسه آن با انتقال حرارت کل در شکل 8 نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که این دو پارامتر اختلاف ناچیزی دارند.



به منظور بررسی تعادل انرژی در فضای مورد نظر ابتدا باید منابع افزایش و کاهش حرارت تعریف شود. به طور کلی، منبع اصلی افزایش گرما را می‌توان به تجهیزات، سیستم روشنایی، فعالیت متابولیکی افراد، نفوذ هوا و انتقال حرارت رسانایی از طریق سطوح طبقه بندی کرد. منابع اصلی کاهش حرارت به انتقال حرارت ناشی از سطوح ساختمان و انتقال حرارت ناشی از نفوذ هوا و بکارگیری سیستم‌های تهویه مکانیکی گروه بندی می‌شوند. در نتیجه نرخ انتقال حرارت کل به فضای ساختمان را می‌توان به صورت معادله زیر ارائه کرد:

$$\dot{Q}_{\text{total}} = \dot{Q}_{\text{equipment}} + \dot{Q}_{\text{people}} + \dot{Q}_{\text{light}} + \dot{Q}_{\text{opaque surfaces}} + \dot{Q}_{\text{infiltration}} + \dot{Q}_{\text{ventilation}} \quad (1)$$

در شکل 6 نرخ حرارت منتقل شده از تمامی منابع حرارتی در طول روز نشان داده شده است. با توجه به این شکل مهمترین منبع افزایش حرارت در ساختمان انتقال حرارت از شیشه‌ها به فضای داخل است که در طول روز به حداکثر مقدار ممکن رسیده است. بعد از این عامل، انرژی حرارتی تولید شده توسط تجهیزات موجود در ساختمان دومین منبع افزایش حرارت ساختمان است. همانطور که در شکل نشان داده شده است مهمترین عوامل کاهش بار حرارتی ساختمان انتقال حرارت از طریق سطوح کف و سقف و همچنین انتقال حرارت از طریق سیستم تهویه است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود سیستم تهویه مکانیکی فقط در زمان حضور افراد فعال است و سیستم سرمایش تابشی در تمام طول روز فعال است تا دمای هوای اتاق را کاهش دهد. نمودار تغییرات دمای هوای اتاق در روز طراحی در شهر اهواز در شکل 7 نشان داده شده است. بر اساس این شکل اگرچه دمای متوسط هوای اتاق در ابتدای روز تا زمان حضور افراد در حال کاهش است ولی با حضور افراد و اعمال بار تجهیزات و افراد و همچنین اعمال بارهای محیطی در ساختمان دمای متوسط هوای اتاق افزایش می‌یابد.



شکل 6 نرخ انتقال حرارت توسط منابع حرارتی در طول روز طراحی در شهر اهواز

شکل 8 مقایسه نرخ انتقال انرژی کل به ساختمان و تخمین نرخ گرمای محسوس هوای اتاق

6- مدل آسایش حرارتی فنر

مدل ریاضی آسایش حرارتی ارائه شده توسط فنر در دهه 1970 به عنوان یکی از مدل‌های آسایش حرارتی رایج شناخته می‌شود [28]. در این مدل آسایش حرارتی تمامی تلفات انرژی از بدن انسان که شامل: انتقال حرارت از طرق جابجایی و تشعشع از سطح بدن و لباس‌ها، انتقال حرارت از طریق تعریق و تبخیر در پوست، اتلاف حرارتی تنفسی را در برمی‌گیرد. در این مدل شرایط حرارتی بدن به عوامل فردی و عوامل محیطی وابسته است. عوامل فردی شامل نرخ متابولیک و میزان عایق بندی لباس‌ها است و عوامل محیطی شامل دمای هوا، دمای متوسط تابشی، فشار بخار هوا و سرعت هوا است [29]. در این مدل تخمین آسایش حرارتی بر اساس شاخص PMV گزارش می‌شود. این شاخص میانگین پاسخ گروه بزرگی از افراد را بر اساس مقیاس احساس حرارتی اشره تخمین می‌زند و مقدار آن در محدوده 3- (احساس حرارتی خیلی سرد) تا 3+ (احساس حرارتی خیلی گرم) تغییر می‌کند [29]. در این مقاله شاخص PMV در هر گام زمانی توسط نرم افزار محاسبه می‌گردد.

7- روش مدل‌سازی

در این تحقیق سیستم‌های فن کویل و سرمایش سقفی در ساختمان استاندارد CASE600 در نرم افزار انرژی پلاس شبیه سازی شده است. انرژی پلاس نرم افزاری در زمینه شبیه سازی مصرف انرژی ساختمان است که بر اساس ترکیبی از برنامه‌های DOE و BLAST عمل می‌کند. در سیستم سرمایش سقفی برج خنک کن به عنوان تنها منبع سرمایش سیستم عمل می‌کند در حالیکه در سیستم فن کویل از چیلر استفاده شده است. در این مقاله سیستم فن کویل به عنوان سیستم پایه معرفی شده است تا عملکرد سیستم سرمایش پیشنهادی با این سیستم مقایسه گردد.

7-1- شرایط شبیه سازی

با توجه به اینکه شهرهای منتخب در نواحی آب و هوایی مختلفی قرار گرفته‌اند، ظرفیت منابع تامین کننده سرمایش نظیر چیلر، برج خنک کن و دی‌آب در پمپ‌ها با توجه به بار حرارتی روز طراحی توسط نرم افزار محاسبه و انتخاب شده است و عملکرد سیستم‌ها در هر گام زمانی قابل ارزیابی است. دمای آب خروجی از چیلر در سیستم فن کویل $6/67^{\circ}\text{C}$ لحاظ شده است و در سیستم‌های سرمایش سقفی دمای آب ورودی به پنل‌ها توسط دمای آب خروجی از برج خنک کن تعیین می‌گردد که تابع شرایط محیطی است [30]. ساختمان مورد نظر به عنوان یک ساختمان اداری لحاظ شده است که زمان حضور افراد ساعات 7 الی 17 روزهای اداری است. برای فضای اداری مذکور میزان پوشش افراد 1 clo، نرخ متابولیک 1/2 met و تعداد افراد 3 نفر در نظر گرفته شده است. clo واحدی است که درجه عایق ارائه شده توسط یک لباس را توصیف می‌کند. یک clo مقدار لباس مورد نیاز یک انسان در حال استراحت برای حفظ آسایش حرارتی در دمای اتاق 21 درجه سانتیگراد یا 71 درجه فارنهایت را نشان می‌دهد. همچنین نرخ متابولیک

افراد با واحد met سنجیده می‌شود که هر یک met معادل 58 وات بر متر مربع است [29].

7-2- نحوه شبیه سازی

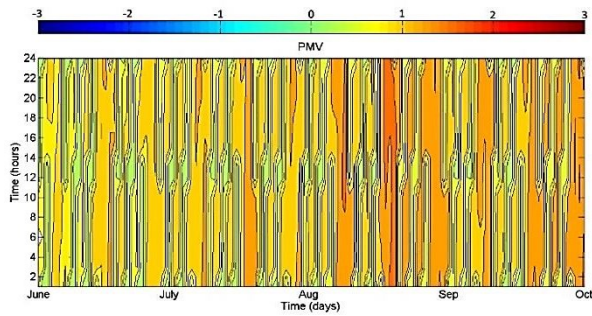
با توجه به شکل 2 تجهیزات به کار رفته در سیستم فن کویل شامل: پمپ، برج خنک کن، چیلر، فن کویل و لوله‌های ارتباطی است و سیستم سرمایش تابشی همانطور که در شکل 3 نشان داده شده است شامل: پمپ، برج خنک کن، سیستم سرمایش تابشی به صورت لوله‌ها مدفون در بتن و لوله‌های ارتباطی بین اجزا است. در نرم افزار انرژی پلاس هر کدام از تجهیزات در قسمت مربوط به خود تعریف و مشخصات آن‌ها وارد می‌شود. برای شبیه سازی باید تجهیزات به وسیله لوله‌ها، داکت‌ها و سایر تجهیزات به هم متصل شوند. در انرژی پلاس هر جزء در سیستم تهویه مطبوع باید حداقل یک گره (Node) ورودی و یک گره خروجی داشته باشد. در نرم افزار انرژی پلاس گره‌ها نقاطی هستند که در آن خواص سیال ارزیابی می‌شود و به تجهیز بعدی ارسال می‌گردد. هر تجهیز در انرژی پلاس خواص سیال را در گره ورودی خوانده و با توجه به تابع عملکردی تعریف شده برای آن، خواص سیال را در گره خروجی تولید می‌کند. گره خروجی یک تجهیز به گره ورودی تجهیز دیگر متصل می‌شود و به این ترتیب تجهیزات به یکدیگر متصل می‌شوند.

8- بررسی عملکرد سیستم‌های سرمایشی

با توجه به خروجی‌های تعریف شده در نرم افزار انرژی پلاس امکان بررسی پارامترهای موثر در عملکرد سیستم‌های تهویه مطبوع در هر گام زمانی وجود دارد. در این مقاله عملکرد سیستم‌های سرمایشی در ماه‌های گرم سال از لحاظ تامین شرایط آسایش حرارتی و میزان مصرف انرژی مورد بررسی قرار گرفته است که به شرح زیر ارائه می‌گردد.

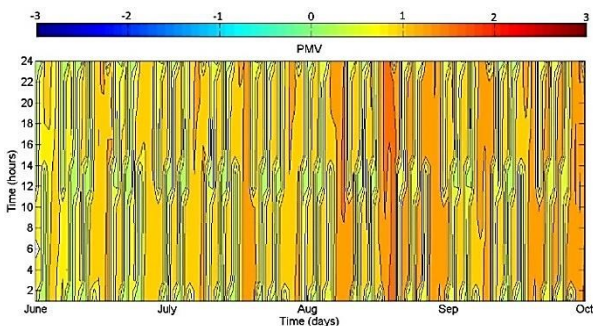
8-1- ارزیابی تامین آسایش حرارتی

برای سنجش میزان آسایش حرارتی افراد معیار PMV مورد بررسی قرار گرفته است. این معیار با اختصاص یک عدد به احساس حرارتی افراد در محدوده 3- تا 3 تعریف می‌شود. عدد 3 بیانگر شرایط خیلی گرم، 2 گرم، 1 کمی گرم، 0 خنثی، 1- کمی سرد، 2- سرد و 3- خیلی سرد است. اگرچه استاندارد حرارتی ایزو 7730، محدوده $0/5 < \text{PMV} < 0/5$ را به عنوان محدوده ایده‌آل برای آسایش حرارتی معرفی می‌کند [29]، محدوده $1 < \text{PMV} < 1$ که در آن 80٪ افراد حاضر احساس رضایت دارند، به عنوان محدوده قابل قبول آسایش حرارتی توسط برخی از پژوهشگران ارائه شده است [31]. در اشکال 9 تا 11، نمودار ارزیابی آسایش حرارتی برای دو نوع سیستم سرمایشی در شهرهای مختلف با توجه به معیار PMV در فصل گرما از 11 خرداد (1st June) تا 9 مهر (1st October)، مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اینکه گام زمانی لحاظ شده برای ارائه پارامتر آسایش حرارتی 10 دقیقه است، در بازه مورد بررسی 17568 عدد برای این پارامتر گزارش شده است که جهت نمایش این تعداد داده نمودار فرشی انتخاب شده است. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه سیستم‌های سرمایشی در روزهای تعطیل و در خارج از ساعت اداری خاموش هستند، پارامتر آسایش حرارتی در

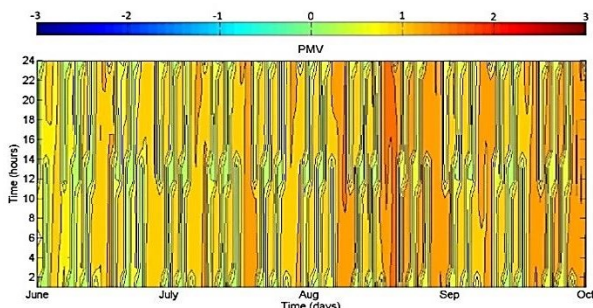


(ب)

شکل 9 ارزیابی تامین شرایط آسایش حرارتی توسط سیستم سرمایش سقفی (الف) و سیستم فن کویل (ب) در شهر اهواز

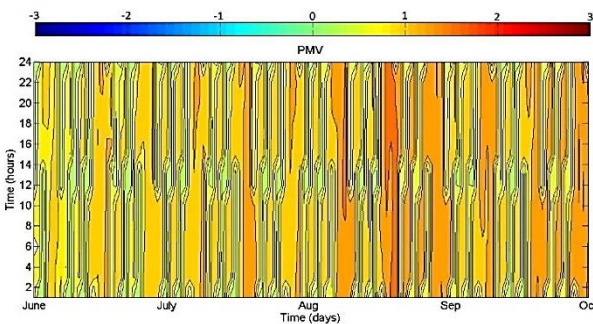


(الف)



(ب)

شکل 10 ارزیابی تامین شرایط آسایش حرارتی توسط سیستم سرمایش سقفی (الف) و سیستم فن کویل (ب) در شهر تبریز

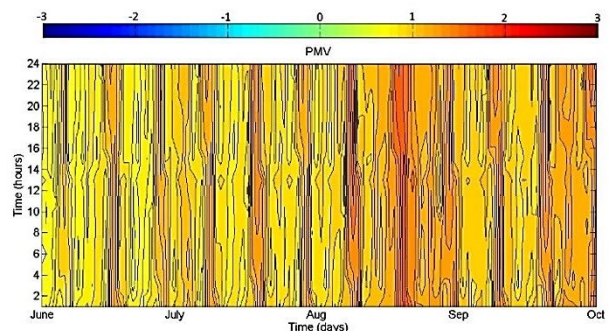


این بازه‌های زمانی ممکن است خارج از محدوده قابل قبول آسایش حرارتی باشد.

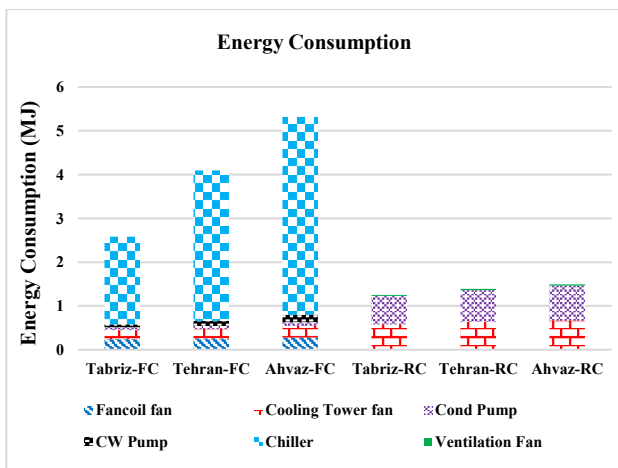
همانطور که در شکل 9 (ب) نشان داده شده است پارامتر آسایش حرارتی در روزهای اداری و در ساعات حضور افراد در محدوده ± 0.5 قرار دارد، در مقایسه با توجه به شکل 9 (الف) می‌توان مشاهده کرد این پارامتر برای سیستم سرمایش سقفی در اغلب روزها بیشتر از 1 است که نشان می‌دهد سیستم سرمایش سقفی در اتصال با برج خنک کن امکان تامین شرایط آسایش حرارتی را برای شهر اهواز ندارد. با توجه به شکل 9 می‌توان دریافت سیستم فن کویل در مقایسه با سیستم سرمایش تابشی مذکور، در ساعات حضور افراد قادر به تامین شرایط بهتری از لحاظ آسایش حرارتی است.

با توجه به شکل 10 (الف) می‌توان پی برد سیستم سرمایش سقفی در اتصال با برج خنک‌کن برای شهری مانند تبریز قادر به تامین شرایط آسایش حرارتی در بیشتر زمان‌های حضور افراد است و تنها در تعداد محدودی از روزها نظیر اوایل تیر (اواسط ژوئن)، اوایل مرداد (اواسط ژوئیه) و اواسط شهریور (اوایل آگوست) میزان پارامتر PMV بیش از 1+ است. با ملاحظه شکل 10 (ب) و مقایسه آن با شکل 10 (الف) می‌توان دریافت که تفاوت قابل توجهی در دو نوع سیستم سرمایشی در شهر تبریز وجود ندارد و هر دو نمودار از یک الگو پیروی می‌کنند.

با مشاهده شکل 11 (الف) می‌توان دریافت اگرچه سیستم سرمایش سقفی در شهر تهران فقط در محدوده زمانی مشخصی که شامل: اواسط مرداد ماه (اوایل و اواسط آگوست) و اوایل شهریور ماه (اواخر آگوست) و اواخر شهریورماه (اواسط سپتامبر) است قادر به تامین شرایط آسایش حرارتی نیست، در بیشتر فصل گرما و در ساعات‌های حضور افراد پارامتر آسایش حرارتی در محدوده قابل قبول قرار دارد. از شکل 11 (ب) می‌توان دریافت که تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین نتایج آسایش حرارتی در دو سیستم فن کویل و سرمایش سقفی در شهر تهران وجود ندارد.



(الف)



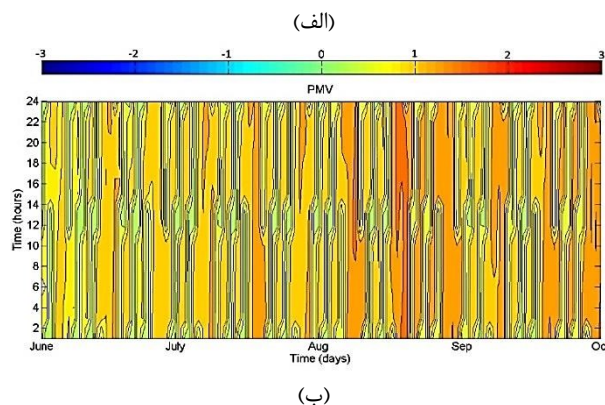
شکل 12 مصرف انرژی تجهیزات سیستم‌های سرمایشی در شهرهای مختلف

9- نتیجه گیری

با توجه به اینکه قسمت عمده‌ای از مصرف انرژی در ساختمان‌ها مربوط به سیستم‌های تهویه مطبوع است، انتخاب مناسب سیستم تهویه مطبوع در هر منطقه آب و هوایی تاثیر عمده‌ای در کاهش مصرف انرژی و همچنین تامین شرایط آسایش افراد دارد. بر اساس تحقیقات پیشین سیستم‌های سرمایش تابشی نسبت به سیستم‌های معمول سرمایشی هوای اجباری از پتانسیل صرفه‌جویی انرژی بالاتر برخوردار است و با توجه به توزیع یکنواخت سرمایش قادر به تامین شرایط آسایش حرارتی است. لذا در این تحقیق عملکرد سیستم فن کویل با سیستم سرمایش تابشی سقفی متصل به برج خنک‌کن مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. در سیستم سرمایش تابشی برج خنک‌کن به عنوان تنها منبع تامین آب سرد مورد نیاز استفاده می‌گردد و با توجه به اینکه کارکرد موثر برج خنک‌کن تابع شرایط محیطی است، عملکرد سیستم سرمایشی در شرایط آب و هوایی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. جهت مدل‌سازی حرارتی سیستم‌ها و تحلیل عملکرد آنها از نرم افزار انرژی پلاس استفاده شده است و عملکرد این سیستم‌ها از نقطه نظر آسایش حرارتی و میزان مصرف انرژی در شهرهای اهواز، تهران و تبریز مقایسه شده است. شهرهای اهواز، تهران و تبریز به ترتیب معرف شرایط آب و هوایی گرم و نیمه مرطوب، گرم و خشک، معتدل و خشک هستند. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که سیستم سرمایش سقفی در اتصال با برج خنک‌کن برای شهرهای تهران و تبریز قادر است شرایط آسایش حرارتی را فراهم کند و مصرف انرژی در این سیستم در مقایسه با سیستم فن کویل کاهش قابل توجهی دارد. میزان کاهش مصرف انرژی در شهر تهران در حدود 65٪ و برای شهر تبریز در حدود 50٪ است. اگرچه نتایج نشان می‌دهد که سیستم سرمایش سقفی ارائه شده کاهش قابل چشمگیری در مصرف انرژی در شهر اهواز دارد، ولی قادر به تامین شرایط آسایش حرارتی در این شهر نیست.

10- مراجع

[1] L. Yang, H. Yan, J. C. Lam, Thermal comfort and building energy consumption implications—a review, *Applied energy*, Vol. 115, pp. 164-173, 2014.
 [2] U. Eicker, *Low energy cooling for sustainable buildings*, New York: John Wiley & Sons, 2009.



شکل 11 ارزیابی تامین شرایط آسایش حرارتی توسط سیستم سرمایش سقفی (الف) و سیستم فن کویل (ب) در شهر تهران

8-2- ارزیابی مصرف انرژی

همانطور که در شکل‌های 2 و 3 نشان داده شده است، تجهیزات مصرف کننده انرژی در سیستم سرمایش سقفی پیشنهادی شامل فن برج خنک‌کن، فن سیستم تهویه مطبوع و پمپ اولیه است، در حالیکه در سیستم فن کویل تجهیزاتی نظیر چیلر، پمپ اولیه و ثانویه، فن برج خنک‌کن و فن سیستم فن کویل مصرف کننده انرژی هستند. میزان مصرف انرژی تجهیزات مختلف بکاررفته در سیستم‌های سرمایشی در شهرهای مختلف در کل فصل گرما در شکل 12 ارائه شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌گردد، قسمت عمده‌ای از مصرف انرژی کل در سیستم فن کویل به چیلر اختصاص یافته است به نحویکه این میزان مصرف انرژی در بازه مورد بررسی در شهرهای اهواز، تهران و تبریز به ترتیب در حدود 4/5، 3/4 و 2 مگاژول است. با توجه به نمودار 12 بالاترین مصرف انرژی در سیستم فن کویل بعد از مصرف انرژی چیلر به ترتیب به فن فن کویل، فن برج خنک‌کن، پمپ ثانویه و پمپ اولیه اختصاص یافته است. به نحویکه برای شهر تهران مصرف انرژی تجهیزاتی نظیر فن فن کویل، فن برج خنک‌کن، پمپ ثانویه و پمپ اولیه به ترتیب 0/25، 0/22، 0/11 و 0/07 مگاژول می‌باشد. همانطور که در شکل 12 نشان داده شده است مصرف انرژی پمپ اولیه در سیستم سرمایش تابشی در شهرهای اهواز، تهران و تبریز به ترتیب در حدود 0/8، 0/72 و 0/65 مگاژول است در حالیکه مصرف انرژی فن برج خنک‌کن در شهرهای اهواز، تهران و تبریز به ترتیب در حدود 0/66، 0/63 و 0/58 مگاژول تخمین زده شده است. از مقایسه مصرف انرژی تجهیزات در شکل 12 می‌توان دریافت، اگرچه مصرف انرژی فن برج خنک‌کن و پمپ اولیه در بکارگیری سیستم تابشی نسبت به سیستم فن کویل افزایش قابل توجهی داشته است ولی به دلیل حذف چیلر میزان مصرف انرژی الکتریکی کل در سیستم سرمایش تابشی با بکارگیری برج خنک‌کن به عنوان تنها منبع تامین سرمایش کمتر از نصف میزان مصرف انرژی در سیستم فن کویل است.

- Ventilation and Retrofitting Prague, AIVC Brussels. Vol. 5, pp. 79-84, 2004.
- [24] I. Doebber, M. Moore and M. Deru, Radiant slab cooling for retail, *ASHRAE Journal*, Vol. 52, No. 12, pp. 28, 2010.
- [25] A. Zolfaghari, M. Saadatinasab, E. Noroozi Jajarm, Investigation of the Effect of Green Double Skin Facades on Energy Consumption of High-rise Buildings in Tehran's Climatic Conditions. *Journal of Modeling in Engineering*, Vol. 17, No. 56, pp. 51-61, 2019. doi: 10.22075/JME.2018.5914. (in Persian)
- [26] Documentation E. *Engineering reference-EnergyPlus 9.2*. The Reference to EnergyPlus Calculation. 2019.
- [27] DG. Kröger, *Air-cooled heat exchangers and cooling towers: thermal-flow performance evaluation and design*, Vol. 1, Pennwell Corp, 2004.
- [28] PO. Fanger, Thermal environment—Human requirements. *Environmentalist*. Vol. 6, No. 4, pp. 275-278, 1986.
- [29] ASHRAE. *ASHRAE Handbook: Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, USA, SI edition, 2013.
- [30] M. Nasrabadi and DP. 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*, Vol. 64, No. 1, pp. 273-282, 2014.
- [31] S. Wei, M. Li, W. Lin and Y. Sun, Parametric studies and evaluations of indoor thermal environment in wet season using a field survey and PMV-PPD method, *Energy and Buildings*, Vol. 42, No. 6, pp. 799-806, 2010.
- [3] P. Ma, LS. Wang, N. Guo, Modeling of hydronic radiant cooling of a thermally homeostatic building using a parametric cooling tower, *Applied energy*, Vol. 127, pp. 172-181, 2014.
- [4] M. Virta, D. Butler, J. Gräslund, J. Hogeling, EL. Kristiansen, M. Reinikainen, G. Svensson, editors, *Chilled beam application guidebook, REHVA guidebook*, No 5, ISBN:2-9600468-3-8, 2013.
- [5] LD. Harvey, *A handbook on low-energy buildings and district-energy systems: fundamentals, techniques and examples*, Routledge, 2012.
- [6] DR. Wulfinghoff, *Energy Efficiency Manual: for everyone who uses energy, pays for utilities, designs and builds, is interested in energy conservation and the environment preservation*, Maryland: Energy Institute Press, ISBN-13: 978-0965792677, 2000.
- [7] J. Niu, JV. Kooi, HV. Rhee, Energy saving possibilities with cooled-ceiling systems, *Energy and buildings*, Vol. 23, No. 2, pp. 147-158, 1995.
- [8] C. Stetiu, Energy and peak power savings potential of radiant cooling systems in US commercial buildings. *Energy and buildings*, Vol. 30, No. 2, pp. 127-138, 1999.
- [9] V. Zmrhal, J. Hensen, F. Drkal, Modelling and simulation of a room with a radiant cooling ceiling. InProc. *Eighth International IBPSA Conference*, Eindhoven, Netherlands, 2003.
- [10] Z. Tian, JA. Love, A field study of occupant thermal comfort and thermal environments with radiant slab cooling, *Building and Environment*, Vol. 43, No. 10, pp. 1658-70, 2008.
- [11] RA. Memon, S. Chirarattananon, P. Vangtook, Thermal comfort assessment and application of radiant cooling: a case study, *Building and environment*, Vol. 43, No. 7, pp. 1185-96, 2008.
- [12] A. Zolfaghari, M. Maerefat, A. Omidvar, Evaluation of Using the Radiant Ceiling Cooling Systems Respect to Widely Variety of Climatic Conditions in Iran, *The Iranian Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 64, pp. 47-64, 2009. (in Persian)
- [13] S. Oxizidis, AM. Papadopoulos. Performance of radiant cooling surfaces with respect to energy consumption and thermal comfort, *Energy and buildings*, Vol. 57, pp. 199-209, 2013.
- [14] S. Moslehi, M. Maerefat, R. Arababadi, Applicability of radiant heating-cooling ceiling panels in residential buildings in different climates of Iran. *Procedia Engineering*. Vol. 145, pp. 18-25, 2016.
- [15] AA. Márquez, JM. López, FF. Hernández, FD. Muñoz, AC. Andrés, A comparison of heating terminal units: Fan-coil versus radiant floor, and the combination of both, *Energy and Buildings*, Vol. 138, pp. 621-629, 2017.
- [16] M. Nasrabadi and D. Finn. Application of open cooling tower with radiant cooling for office space conditioning in temperate climate, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 13, pp. 145-148, 2017.
- [17] Salvalai G, Pfafferott J, Sesana MM. Assessing energy and thermal comfort of different low-energy cooling concepts for non-residential buildings, *Energy Conversion and Management*, Vol. 76, pp. 332-341, 2013.
- [18] CS. Pan, HC. Chiang, MC. Yen, CC. Wang. Thermal comfort and energy saving of a personalized PFCU air-conditioning system, *Energy and buildings*, Vol. 37, No. 5, pp. 443-449, 2005.
- [19] M. Nasrabadi, A. Zolfaghari, M. Doaghoo, Performance analysis of radiant floor heating in small residuail buildings under Iran's weather conditions. *27th annual conference of Mechanical Engineering*, ISME 2019-1498, Tehran, Iran, 2019. (in Persian)
- [20] JM. Palmer, KS. Chapman, RD. Watson, *Handbook of Radiant Heating and Cooling*, McGraw-Hill Education, 2017.
- [21] JD. Feng, S. Schiavon, F. Bauman, Cooling load differences between radiant and air systems, *Energy and Buildings*, Vol. 65, pp. 310-321, 2013.
- [22] M. Lain, J. Hensen, Combination of low energy and mechanical cooling technologies for buildings in central Europe. In *5th International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, (pp. 1-6), France, 2004
- [23] M. Lain, F. Drkal, J. Hensen, V. Zmrhal, *Low energy cooling techniques for retrofitted office buildings in central Europe*,