



Research Paper

# Evaluating the Effect of the Characteristics of Sidewalk Materials in Improving the Thermal Comfort of the Urban Environment with an Emphasis on Cool Pavement

Hiva Hassanzadeh<sup>1</sup> , Maryam Azmoodeh<sup>\*2</sup> , Najmeh Masteri Farahani<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> Master of Science, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urbanism, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

<sup>2</sup> assistant professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urbanism, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

<sup>3</sup> Instructor, Department of Architecture and Urban Planning, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran



[10.22080/USFS.2024.26353.2396](https://doi.org/10.22080/USFS.2024.26353.2396)

**Received:**

November 26, 2023

**Accepted:**

March 16, 2024

**Available online:**

April 3, 2024

## Abstract

The expansion of urban societies caused significant changes in the living environment of humans. These changes caused many problems, including the increase in thermal tensions and lack of thermal comfort in the cities. Among these changes is the presence of artificial surfaces in urban spaces, which have replaced natural surfaces and include a high percentage of the surface of cities. The difference in the characteristics of the artificial surfaces has made their impact on the thermal comfort conditions of the environment different compared to the natural surfaces. In this research, sidewalks, which include a large part of artificial surfaces in cities, are the subject of study, and the effects of changes in their characteristics on thermal comfort in open spaces are evaluated. Field measurements and numerical simulation methods were used in this study. Field measurements were carried out by a data logger on the campus of Imam Khomeini University of Qazvin. Also, numerical simulations were performed for the hottest day of the year (July 25, 1401) by modeling the site using Envimet software. The results of the data obtained from the simulations were validated with the measured data. Then two characteristics of pavement materials, albedo (reflection coefficient) and material thickness, were investigated in different amounts of simulation and the results obtained from their impact on the thermal comfort of the environment were evaluated by two indices of Physiological Equivalent Temperature (PET) and Universal Thermal Climate Index (UTCI). According to the results, albedo has a greater effect on thermal indices, and reducing its value from 0.8 to 0.2 to a maximum of 3 and an average of 0.4 degrees Celsius will cause a decrease in the thermal comfort index of PET. The thickness of the pavement materials was also evaluated, and the related results indicate the very small and partial effect of changes in this characteristic on the thermal comfort of the environment.

**Keywords:**

Thermal comfort, urban space, pavement materials, albedo, material thickness.

Copyright © 2024 The Authors. Published by University of Mazandaran. This work is published as an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

\*Corresponding Author: Maryam Azmoodeh

**Address:** Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urbanism, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

**Tel:** 09121824368

**Email:** [azmoodeh@arc.ikiu.ac.ir](mailto:azmoodeh@arc.ikiu.ac.ir)

## Extended Abstract

### 1. Introduction

With the expansion of urbanization, artificial surfaces replaced natural surfaces such as plants and soil. Therefore, at present, a major part of the area of the cities is covered by artificial surfaces, and the sidewalks include a high percentage of these surfaces. The research conducted in this field can be divided into two categories. The first group of studies considers the increase of reflection from floor surfaces as a positive thing in improving the thermal comfort of outdoor space, and the second category is studies that refer to the positive effect of reducing the reflection coefficient of floor materials on the thermal comfort of outdoor space. To solve this contradiction, this research seeks to solve this ambiguity by examining the effect of the characteristics of pavement materials on the thermal comfort of urban environments with an emphasis on cold flooring. The two main variables studied in this research are albedo (reflection coefficient) and material thickness.

### 2. Research Methodology

The research method in this study includes four main parts. In the first part, library studies, including books, articles, and theses, were conducted to find variables affecting the performance of floor materials for conducting research. In the second stage, field studies were conducted by selecting a case sample to perform field measurements. Data measurement in the studied site was done for three days of the hot season from 9:30 to 17:00 to increase the validity of the obtained data and reduce possible errors. The data obtained by the data logger in the first half hour would not be considered. In the third part, a simulation tool was used to conduct the research. In this section, Envi-met

(ver5.1), which has been used and validated in many studies and authoritative articles simulation software, was used. The studied site of the model was simulated inside the software, and after verifying the results obtained from the measurement data, various variables were evaluated. In the fourth step, the Biomet part of Envi-met software was used to obtain environmental thermal comfort values according to the output data from the simulation. PET thermal comfort index was used to calculate environmental thermal comfort conditions. In addition to the PET index, another valid thermal comfort index called UTCI was used so that the results were more reliable. Thermal comfort calculations are performed for a person with walking activity and appropriate clothing for the season. In this study, the campus of Imam Khomeini International University was chosen as the target site. The variety of sidewalk materials on the university campus, as well as the importance of the issue of thermal comfort of the open space in this particular use, can be mentioned among the reasons for choosing this site. The first selection area was the pedestrian path located between the two faculties of basic sciences and technical engineering. The second area was the space in front of the central library. This part has different pavement materials compared to the first proposed area and is covered by travertine stone with a thickness of 2 cm.

### 3. Research Findings

Correlation data show a strong relationship between the changes in the albedo level and the thermal comfort performance of the environment. In the hours between 00:00 to 6:00, because the data related to the thermal indices were the same due to the changes in the albedo values, the correlation results were specified as errors and zero, but at other times of



the day, their values show a strong correlation between the albedo data and are thermal indices and show the predictability of these data regarding albedo changes. In this research, three different thicknesses (2, 4, and 6 cm) were considered for the analysis of this feature, and its effect on environmental variables and environmental comfort conditions was evaluated. The difference in the amount created in MRT by increasing the thickness decreases in the period from 6:00 to 21:00. The difference between the data at other times is also insignificant. Although the decrease in MRT caused by the increase in surface thickness is a small amount, this value is maximum in the range of 7 to 8 with a decrease of 0.75 °C in MRT. According to graph 24, the reduction of values in the two time periods, from 7:00 to 8:00 and 18:00 to 19:00, is more different than other times. This difference is due to sunrise and sunset and its radiation on the pavement surfaces and the difference in the thickness of different modes. By examining the PET and UTCI indices, it is clear that the decrease in their values is insignificant and they do not have much effect on improving the thermal conditions of the environment. In the period from 8:00 to 18:00, the thermal stresses were maximum, the PET index was in the hot and very hot thermal range, and UTCI was also in the thermal range of very strong stresses and excessive thermal stresses.

#### 4. Conclusion

The findings of this research reveal that reducing the albedo value reduces the comfort conditions of the environment in the middle of the day and during the peak times of thermal stress, and increasing its

value increases the thermal stress and worsens the conditions of the studied site. Moreover, with the increase in the thickness of the material, the thermal stresses of the environment generally decrease. This decrease in values is insignificant and not perceptible at most times of the day. Based on the findings of this study, some suggestions for improving thermal comfort in open spaces are as follows: using materials with low albedo in different urban levels and increasing the thickness of these materials can improve the thermal comfort of the environment in some periods of the day; taking advantage of these findings can be used during the design and implementation of artificial surfaces and sidewalks. Changing some of the characteristics of the existing materials in the sidewalks to improve the thermal comfort in these environments and reducing the thermal stress in the hot seasons of the year are among other recommendations for improving thermal comfort in open spaces.

#### Funding

There is no funding support.

#### Authors' Contribution

The authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work

#### Conflict of Interest

The authors declared no conflict of interest.

#### Acknowledgments

The authors are grateful to all the persons for scientific consulting in this paper.



علمی پژوهشی

# بررسی تأثیر مصالح پیاده‌راه‌ها در آسایش حرارتی محیط شهری (با تأکید بر کف‌سازی سرد)

هیوا حسن زاده<sup>۱</sup> ID، مریم آزموده<sup>۲\*</sup> ID، نجمه ماستری فراهانی<sup>۳</sup> ID

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.  
<sup>۲</sup> استادیار، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.  
<sup>۳</sup> استادیار، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

[10.22080/USFS.2024.26353.2396](https://doi.org/10.22080/USFS.2024.26353.2396)

## چکیده

گسترش جوامع شهری موجب بروز تغییرات قابل توجهی در شرایط محیط زندگی انسان‌ها شد. این تغییرات مشکلات زیادی از جمله افزایش تنش‌های حرارتی و عدم برقراری آسایش حرارتی در فضای شهرها را به وجود آوردند. از جمله این تغییرات حضور سطوح مصنوع در فضاهای شهری است که جایگزین سطوح طبیعی شده است و درصد بالایی از سطح شهرها را شامل می‌شوند. تفاوت در ویژگی‌های سطوح مصنوع، تأثیر آنها را بر شرایط آسایش حرارتی محیط، نسبت به سطوح طبیعی متفاوت کرده است. در این پژوهش پیاده‌راه‌ها که بخش بزرگی از سطوح مصنوع در شهرها را شامل می‌شوند، موضوع مورد مطالعه است و اثرات تغییر در ویژگی‌های آنها بر آسایش حرارتی در فضاهای باز ارزیابی می‌شود. در این مطالعه از روش‌های اندازه‌گیری‌های میدانی و شبیه‌سازی عددی استفاده شده است. اندازه‌گیری‌های میدانی به وسیله دستگاه دیتالاگر و در محوطه دانشگاه امام خمینی قزوین انجام شد. همچنین با مدل‌سازی سایت توسط نرم‌افزار انویمت شبیه‌سازی‌های عددی برای گرم‌ترین روز از سال (۲۵ تیر ۱۴۰۱) انجام شد. نتایج داده‌های به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها با داده‌های اندازه‌گیری شده اعتبارسنجی شد. سپس دو ویژگی مصالح پیاده‌راه، آلبو (ضریب بازتاب) و ضخامت مصالح در مقادیر مختلف شبیه‌سازی و نتایج به‌دست‌آمده از تاثیرگذاری آنها بر روی PET آسایش حرارتی محیط توسط دو شاخص دمای معادل فیزیولوژیکی و شاخص جهانی آب‌وهوای حرارتی (UTCI) ارزیابی شد. براساس نتایج، آلبو اثرگذاری بیشتری بر روی شاخص‌های حرارتی دارد که کاهش در مقدار آن از ۰٫۸ به ۰٫۲ حداکثر ۳ و به‌طور متوسط ۰٫۴ درجه سانتی‌گراد باعث کاهش در شاخص آسایش حرارتی PET خواهد شد. ضخامت مصالح پیاده‌راه‌ها نیز مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج مربوط به آن نشان‌دهنده اثرگذاری بسیار کم و مقطعی تغییرات این مشخصه، بر روی آسایش حرارتی محیط است.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲ آذر ۰۵

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲ اسفند ۲۶

تاریخ انتشار:

۱۵ فروردین ۱۴۰۳

کلیدواژه‌ها:

آسایش حرارتی، فضای شهری، مصالح پیاده‌راه، آلبو، ضخامت مصالح

\* نویسنده مسئول: مریم آزموده

آدرس: استادیار، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی،

دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

تلفن: ۰۹۱۲۱۸۲۴۳۶۸

ایمیل: azmoodeh@arc.ikiu.ac.ir



## ۱ مقدمه

و می‌توانند موجب کاهش گرمایش شهری شوند. این پیاده‌راه‌ها همواره دمای کمتری نسبت به پیاده‌راه‌های سنتی موجود دارند و سبب کاهش دمای سطوح شهری شده و همچنین باعث تغییر دما در سطوح ارتفاعی مختلف می‌شوند. تاکنون مطالعات گسترده‌ای در تأثیرگذاری پیاده‌راه‌ها در فضاهای شهری انجام شده است. کف‌سازی سرد دارای مصالحی با پوشش‌های انعکاسی (Li, 2016) یا به‌صورت نفوذپذیر می‌باشند که موجب کاهش دمای پیاده‌روها و کاهش جذب گرما از طریق انعکاس تابش‌های خورشیدی می‌شوند؛ این پیاده‌راه‌ها نسبت به پیاده‌راه‌های متعارف دمای کمتری دارند. کف‌سازی‌های سرد را در شکل‌های انعکاسی، تبخیری و شکل اصلاح ذخیره گرما می‌توان توسعه داد که اشکال انعکاسی و تبخیری به‌صورت گسترده‌تری مورد استفاده قرار گرفته است. اما در حال حاضر دستیابی به کف‌سازی سرد با اصلاح خواص ذخیره گرمایی به‌صورت گسترده مورد بررسی قرار نگرفته است و هنوز در مراحل اولیه تحقیق است. (Anupam et al., 2021; Qin et al., 2015). کف‌سازی سرد<sup>۱</sup> انرژی خورشیدی بیشتری را منعکس می‌کند، باعث بهبود تبخیر می‌شود و سردتر از کف‌سازی‌های معمولی باقی می‌ماند. عوامل اثرگذار زیادی بر روی دمای مصالح کف‌سازی‌ها و پیاده‌راه‌ها اثر می‌گذارند که از جمله عوامل خارجی می‌توان به دمای هوا، جریان باد و همچنین آلودگی، ظرفیت حرارتی و غیره به‌عنوان فاکتورهای داخلی اثرگذار بر دمای مصالح کف‌سازی‌ها معرفی کرد. آلودگی به‌عنوان یکی از فاکتورهای تأثیرگذار بر دمای مصالح کف‌سازی‌ها از سایر عوامل تأثیرگذار داخلی از جمله ظرفیت حرارتی، ضریب انتشار و سایر عوامل عملکرد اصلی‌تری بر روی دمای مصالح کف‌سازی‌ها دارد (Qin et al., 2015). نتایج پژوهشی نشان داد استفاده از مواد با آلودگی بالا باعث افزایش تنش حرارتی برای عابران می‌شود و استفاده از این مواد

با گسترش شهرنشینی و در راستای پاسخ به نیازهای جامعه شهری، سطوح مصنوع جایگزین سطوح طبیعی از جمله گیاهان و خاک شدند. بنابراین در حال حاضر بخش عمده‌ای از مساحت شهرها را سطوح مصنوع در بر می‌گیرند و پیاده‌راه‌ها درصد بالایی از این سطوح را شامل می‌شوند (U.S Environmental Protection Agency, 2012; Li et al., 2020; Akbari et al., 2003). مطالعات سال‌های اخیر نشان می‌دهد که مصالح پیاده‌راه‌ها تأثیر قابل توجهی بر گرمایش شهری و مشکلات ناشی از آن مانند افزایش میزان بیماری‌ها و مرگ‌ومیرها (Chaston, et al., 2022; Laurence, et al., 2022)، کاهش فعالیت‌های مردم در محیط‌های شهری (Li, 2016; Li 2020)، افزایش مصرف انرژی (Tsoka et al., 2019; Yang, 2016; Li, 2020) و غیره را دارد. بنابراین یکی از راهکارهای تعدیل مشکل یادشده، بهبود عملکرد پیاده‌راه‌ها در راستای کاهش تنش‌های حرارتی شهرها است. با تغییر در ویژگی‌های مصالح پیاده‌راه‌ها می‌توان آسایش حرارتی در محیط‌های شهری و عابران را بهبود بخشید که پیامدهای مثبتی از جمله افزایش فعالیت در محیط‌های شهری، تشویق مردم به تردد به‌صورت پیاده، کاهش آلودگی‌ها و گرمایش ناشی از تردد خودروهای نقلیه و کاهش جزایر حرارتی شهرها را در پی خواهد داشت. مقادیر بازتاب‌پذیری سطوح و رنگ آن‌ها، ویژگی‌های حرارتی مصالح پیاده‌راه‌ها، بافت پیاده‌راه‌ها، میزان نفوذپذیری، تأثیرات ضخامت و لایه‌های مختلف آن‌ها، نوع و جنس مواد تشکیل‌دهنده، درصد و چگونگی ساخت آن‌ها از عواملی است که باعث ایجاد تأثیرات مختلفی بر شرایط حرارتی محیط شود. علاوه بر این، ویژگی‌های پیاده‌راه‌ها می‌تواند تأثیرات مختلفی بر آسایش حرارتی در هر محیطی را داشته باشد. در این راستا پیاده‌راه‌هایی با توانایی انعکاس بالای تابش به وجود آمدند که به‌عنوان پیاده‌راه‌های سرد شناخته شده‌اند

۱. Cool Pavement



این عمل باعث بهبود شاخص‌های آسایش حرارتی محیط در نتایج پژوهش شده است (تقوی<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۲۳). در پژوهشی از طالقانی و همکاران در کالیفرنیا استراتژی‌های مختلف کاهش گرما برای بهبود عملکرد و آسایش حرارتی فضای باز مورد ارزیابی قرار گرفت و تأثیرات آنها بر آسایش حرارتی عابران بررسی شد. در این مطالعه از پیاده‌راه‌های سرد با بازتاب بالا استفاده شد. عملکرد ترکیبی درختان همراه با پیاده‌راه‌های سرد دمای هوا را کاهش داد و تأثیر مثبتی بر آسایش حرارتی عابران داشتند (طالقانی و همکاران، ۲۰۱۶). مطالعه دیگری بر روی مصالح سرد توسط دیموندی و همکاران در مرکز شهر سرس<sup>۳</sup> در شمال یونان و در فصل تابستان انجام شد. نتایج به دست آمده مشخص کرد که جایگزینی مصالح معمول پیاده‌راه‌ها و خیابان‌ها با مصالح سرد باعث کاهش دمای سطح آنها و در نتیجه کاهش دمای هوا تا ۶٫۵ درجه سانتی‌گراد می‌شود. (Dimoudi et al., 2014)

در مجموع پژوهش‌های انجام گرفته در این حوزه در دو دسته قابل تقسیم‌بندی هستند. دسته اول پژوهش‌هایی که افزایش بازتاب از سطوح کف را امری مثبت در ارتقای آسایش حرارتی فضای باز تلقی می‌کنند و دسته دوم مطالعاتی اند که به تأثیر مثبت کاهش ضریب بازتاب مصالح کف بر آسایش حرارتی فضای باز اشاره دارند. لذا این مطالعه در پی آنست تا با بررسی تأثیر ویژگی‌های مصالح پیاده‌راه‌ها بر آسایش حرارتی محیط‌های شهری با تأکید بر کف‌سازی سرد به رفع این ابهام بپردازد.

براساس فرض این پژوهش، استفاده از مصالح با آلبدو (ضریب بازتاب) پایین سبب کاهش بازتاب تابش از سطوح پیاده‌راه و بهبود شرایط حرارتی محیط می‌شود و میزان این کاهش مورد واکاوی قرار گرفته است. مقادیر آلبدو سطوح به طور معمول در طول زمان تغییر می‌کند (Djekic et al., 2017).

برای عملکرد آسایش حرارتی در پیاده‌راه‌ها مناسب نیست. (Erell et al., 2013).

در پژوهشی از طالقانی و همکاران در شهر تورنتو مشاهده شد با افزایش مقدار آلبدو دمای سطوح کاهش می‌یابد، اما سبب افزایش تابش خورشیدی انعکاس شده از سطوح بر عابران می‌شود و باعث کاهش آسایش حرارتی عابران می‌شود. در این مطالعه مشاهده شد که با افزایش انعکاس سطوح پیاده‌رو اگرچه دمای این سطوح کاهش می‌یابد اما باعث کاهش آسایش حرارتی برای عابران می‌شود (طالقانی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۷). مطالعه دیگری توسط همین گروه در محوطه دانشگاه دلفت هلند انجام شد و افزایش آلبدو دیوارها و سقف از ۰٫۲ تا ۰٫۸ باعث افزایش میانگین دمای تابشی و مقدار PET شد و عملکرد نامطلوب بر آسایش حرارتی محیط داشت (Xie et al., 2022). مطالعه‌ای بر روی پوشش‌های حرارتی با بازتاب بالا نشان داد که بهره‌گیری از پوشش‌هایی با بازتاب حرارتی بر خنک‌سازی پیاده‌روها با توجه به افزایش مقدار آلبدو آنها تأثیرگذار است و می‌تواند به عنوان راه حلی مناسب برای کاهش جزایر حرارتی در نظر گرفته شود (Lu et al., 2022). در مطالعه‌ای یانگ و همکاران استراتژی‌های مختلف بر روی آسایش حرارتی در محوطه دانشگاهی را با توجه به شاخص PET و TMRT بررسی کردند. در رابطه با مصالح سطوح مصنوعی مقادیر آلبدو سطوح را از ۰٫۲ تا ۰٫۶ تغییر دادند. نتایج نشان داد که اگرچه افزایش آلبدو سطوح باعث کاهش دما می‌شود اما از طرفی باعث افزایش مقادیر PET و TMRT خواهد شد. (Yang et al., 2022). نتایج مطالعه انجام شده توسط تقوی و همکاران نشان داد؛ استفاده از پیاده‌راه‌های سرد باعث کاهش جذب گرما و افزایش انعکاس تابش خورشید به شاخ و برگ درختان اطراف می‌شود؛ که افزایش عملکرد فتوسنتز درختان و به سبب آن کاهش کربن دی‌اکسید محیط را به دنبال داشت.

<sup>3</sup> Serres

<sup>1</sup> Taleghani

<sup>2</sup> Taghvaie



احساس حرارتی در فضاهای باز نه تنها توسط وضعیت بدن، بلکه توسط وضعیت ذهن تعیین می‌شود. این نشان می‌دهد؛ برای درک آسایش حرارتی در فضای باز از نظر جنبه‌های رفتاری یک چارچوب ارزیابی، باید حداقل در چهار سطح فیزیکی، فیزیولوژیکی، روانی، رفتاری بررسی شود (Chen et al., 2012). لای و همکاران پارامترهای تأثیرگذار بر آسایش حرارتی در فضاهای باز را در دو بخش کلی تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم بر آسایش حرارتی فضاهای بیرونی تقسیم‌بندی کردند؛ که هرکدام از این بخش‌ها دارای زیرمجموعه‌های مختلفی به این صورت می‌باشند؛ متغیرهای فیزیکی شامل دمای هوا، تابش حرارتی، باد و رطوبت نسبی متغیرهای فیزیولوژیکی، شامل؛ دمای پوست، دمای بدن، میزان تعریق و متغیرهای سایکولوژی شامل تأثیرات روانی بر آسایش حرارتی که می‌تواند به میزان انتظارات از وضعیت دمایی، تجربه آن‌ها از مقادیر دما، میزان توانایی در کنترل دما، بررسی پیش‌بینی‌های هواشناسی، احساسات و غیره اشاره کرد (Lai et al., 2020). در این میان شرایط آب و هوایی بیشترین تأثیر را بر آسایش حرارتی در فضاهای باز دارد (Li et al., 2020).

کف‌سازی سرد مصالحی با بازتاب خورشیدی بالا می‌باشند (Karakounos, et al., 2018). پیاده‌راهایی که با سطوح رنگی روشن پوشیده شده‌اند نیز دارای آلبدوی بالایی هستند. (Jia et al., 2021). کف‌سازی سرد به کاهش دمای پیاده‌روها و کاهش جذب گرما و انعکاس تابش‌های خورشید کمک می‌کنند و نسبت به پیاده‌راه‌های متعارف خنک‌تر می‌باشند (فرج‌ال...<sup>۳</sup>، ۲۰۲۱) در حال حاضر دستیابی به کف‌سازی سرد با اصلاح خواص ذخیره گرمایی به صورت گسترده مورد بررسی قرار نگرفته است و هنوز در مرحله تحقیق است (Anupam et al., 2021). طالقانی و همکاران پژوهشی در کالیفرنیا انجام دادند که در آن استراتژی‌های مختلف کاهش

همچنین افزایش ضخامت مصالح پیاده باعث می‌شود این سطوح مقدار بیشتری از انرژی خورشید را جذب و دمای محیط در زمان‌های تابش خورشید کاهش و آسایش حرارتی محیط نیز بهبود یابد. در این بررسی، با استفاده از شاخص دمای معادل فیزیولوژیک (PET) که یک شاخص مناسب برای به دست آوردن آسایش حرارتی در فضاهای باز است (طالقانی و همکاران، ۲۰۱۶؛ Matzarakis et al., 1999) و درک راحتی از وضعیت آسایشی محیط نشان می‌دهد (Matzarakis et al., 1999) و نیز بهره‌گیری از شاخص<sup>۱</sup> UTCI ویژگی‌های مختلف پیاده‌راه را در حالات مختلف بررسی خواهد شد. در این مطالعه ویژگی‌های مختلف مصالح پیاده‌راه‌ها که مؤثر بر آسایش حرارتی محیط‌های شهری می‌باشند به‌عنوان متغیرهای تأثیرگذار بر آسایش حرارتی ارزیابی می‌شوند.

## ۲ مبانی نظری

لی و همکاران در نتایج به دست آمده از مطالعات مشخص کردند که آب‌وهوا، رفتارهای انسانی، پوشش گیاهی، ساختمان‌ها، پیاده‌راه‌ها و وسایل نقلیه با هم تعامل دارند و بر آسایش حرارتی در فضاهای باز تأثیر می‌گذارند. (Li et al., 2020) مطالعات در مورد آسایش حرارتی در فضاهای بیرونی در دهه‌های آخر قرن بیستم شروع شد. در سال ۱۹۷۱ اولین مطالعات آسایش حرارتی در فضای باز انجام شد. مایر و هاپ معادل فیزیولوژیکی (PET) را برای ارزیابی در محیط‌های خارجی ارائه کردند (نصراللهی<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۲۰). در پژوهشی که لی و همکاران انجام دادند آسایش حرارتی در محیط‌های باز را این‌گونه بیان کردند که اگر عابران احساس گرما یا سرما نداشته باشند (خنثی) و مایل به ایجاد تغییر در محیط حرارتی بیرون نباشند و یا محیط بیرونی را از نظر حرارتی راحت یا قابل قبول بدانند، آن فضا را می‌توان به‌عنوان یک فضای دارای آسایش حرارتی عنوان کرد (Lai et al., 2020).

<sup>3</sup> Faragallah

<sup>1</sup> Universal Thermal Climate Index

<sup>2</sup> Nasrollahi



خنک‌سازی تبخیری دما را کاهش دهند. سنگفرش‌های متخلخل حفره‌های داخلی دارند که کانال نفوذ آب هستند. در کف‌سازی نفوذپذیر<sup>۳</sup> آب باران به‌جای عبور از میان این نوع پیاده‌راه‌ها از کنار واحدهای آن عبور می‌کند. مقدار آلودگی این نوع مصالح کم است و عملکرد مشابهی را نسبت به بتن‌های معمولی در ساعات روز دارند. (Qin et al., 2015). این پیاده‌راه‌ها هنگامی که خشک باشند تأثیرگذاری آنها بر دما پیچیده و نامشخص است (U.S. Environmental Protection Agency, 2012; Qin et al., 2015). باین‌حال در حالت خشک پیاده‌راه‌های نفوذپذیر دمای سطح بالاتری نسبت به پیاده‌راه‌های نفوذناپذیر دارند (Ferrari et al., 2020). ویژگی‌های حرارتی مصالح پیاده‌راه‌ها نیز می‌تواند بر دمای سطح و هوا تأثیرگذار باشند. این ویژگی‌ها می‌توانند عملکرد حرارتی پیاده‌راه‌ها را تحت تأثیر قرار دهد (Chen et al., 2016; Yang et al., 2016). این ویژگی‌ها شامل هدایت حرارتی، انتشار حرارتی<sup>۴</sup> و رسانایی گرمایی<sup>۵</sup> است.

### ۳ روش تحقیق

روش تحقیق در این مطالعه شامل چهار بخش اصلی است. در بخش اول مطالعات کتابخانه‌ای از جمله کتب، مقالات و پایان‌نامه‌ها به‌منظور یافتن متغیرهای تأثیرگذار بر عملکرد مصالح کف برای انجام پژوهش صورت گرفت. در مرحله بعد، مطالعات میدانی از طریق انتخاب یک نمونه موردی برای انجام اندازه‌گیری‌های میدانی انجام شد. متغیرهای مورد بررسی به شرح زیر قابل بیان است:

جدول (۱): متغیرهای مستقل و وابسته در پژوهش

متغیرهای مستقل	متغیرهای وابسته
آلودگی مصالح پیاده‌راه	متوسط دمای تابشی
ضخامت مصالح پیاده‌راه	دمای هوا

گرما برای بهبود عملکرد و آسایش حرارتی فضای باز مورد ارزیابی قرار گرفت. در آن بررسی، عملکرد ترکیبی درختان همراه با پیاده‌راه‌های سرد دمای هوا را کاهش داد و عملکرد مناسبی را پیاده‌راه‌های سرد در مکان‌های سایه‌دار بر آسایش حرارتی عابران داشتند (طالقانی و همکاران، ۲۰۱۶). مطالعه‌ای بر روی مصالح سرد توسط دیموندی و همکاران در مرکز شهر سرس<sup>۱</sup> در ارتفاع ۶۱ متری از سطح دریا انجام شد. نتایج به‌دست‌آمده مشخص کرد که جایگزینی مصالح معمول پیاده‌راه‌ها و خیابان‌ها با مصالح سرد باعث کاهش دمای سطح آنها می‌شود و باعث کاهش دمای هوا تا ۶٫۵ درجه سانتی‌گراد می‌شود. مطالعه در فصل تابستان و گرم‌ترین روزهای آن انجام شد (Dimoudi et al., 2014). پژوهشی که توسط آذری جعفری و همکاران انجام شد نشان داد که استفاده از کف‌سازی سرد سبب کاهش مقادیر CO<sub>2</sub> و بهبود کیفیت هوا و کاهش گازهای گلخانه‌ای می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از کف‌سازی سرد باعث کاهش ۳ تا ۷ درصدی گازهای گلخانه‌ای می‌شود (آذری جعفری<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۲۱). خنک‌سازی ناشی از تبخیر به‌شدت به خواص مواد، وجود رطوبت در نزدیکی سطح و نرخ تبخیر بستگی دارد (Ferrari et al., 2020). پیاده‌راه‌های نفوذپذیر باعث افزایش تبخیر از سطح شده و می‌تواند باعث کاهش دمای سطح و بهبود عملکرد آسایش حرارتی شود (Li, 2016). فناوری نفوذپذیر شامل آسفالت متخلخل، بتن نفوذپذیر، پیاده‌راه‌های نفوذپذیر و پیاده‌راه‌های شبکه‌ای می‌شود. سطوح نفوذپذیر به‌عنوان سطوح سرد شناخته شده‌اند. این سطوح هنگامی که خیس باشند می‌توانند از طریق

<sup>4</sup> Thermal emittance

<sup>5</sup> Thermal conductivity

<sup>1</sup> Serres

<sup>2</sup> AzariJafari

<sup>3</sup> Permeable pavement



دستگاه دیتالاگر در نیم ساعت ابتدایی (۳۰ داده) در نظر گرفته نشده است. همچنین از یک کاور مقوا برای محافظت از دیتالاگرها در برابر تابش مستقیم آفتاب استفاده شده است به گونه‌ای که اختلال یا محدودیتی برای جریان هوای عبوری ایجاد نکند.

اندازه‌گیری داده‌ها در سایت مورد مطالعه، برای افزایش اعتبار داده‌های به‌دست‌آمده و کاهش خطاهای احتمالی برای سه روز آفتابی و بدون ابر، از فصل گرم (۹ و ۱۰ و ۱۱ شهریور) از ساعت ۹:۳۰ تا ۱۷:۰۰ توسط دیتالاگر (کالیبره‌شده توسط شرکت) انجام گرفته است. دستگاه به وسیله یک سه‌پایه در ارتفاع ۱٫۲ متری از سطح زمین قرار داده شد. جهت افزایش دقت بررسی، داده‌های به‌دست‌آمده از

#### جدول (۲): مشخصات دیتالاگر مورد استفاده



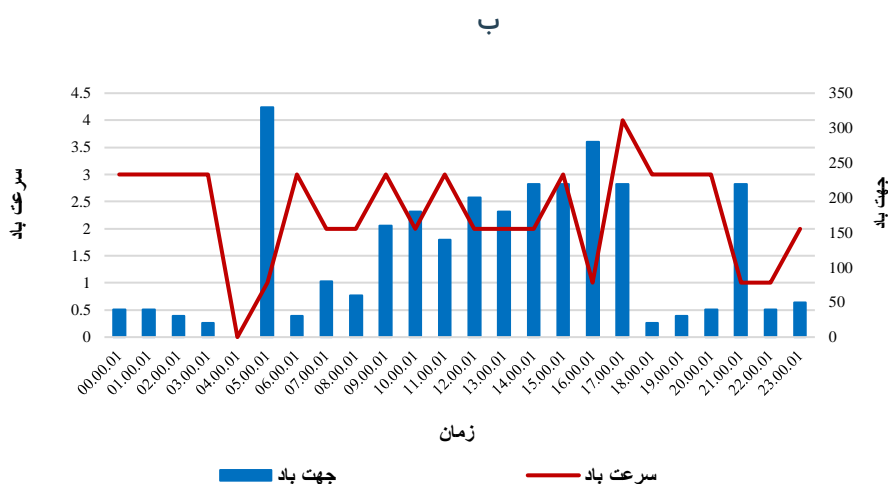
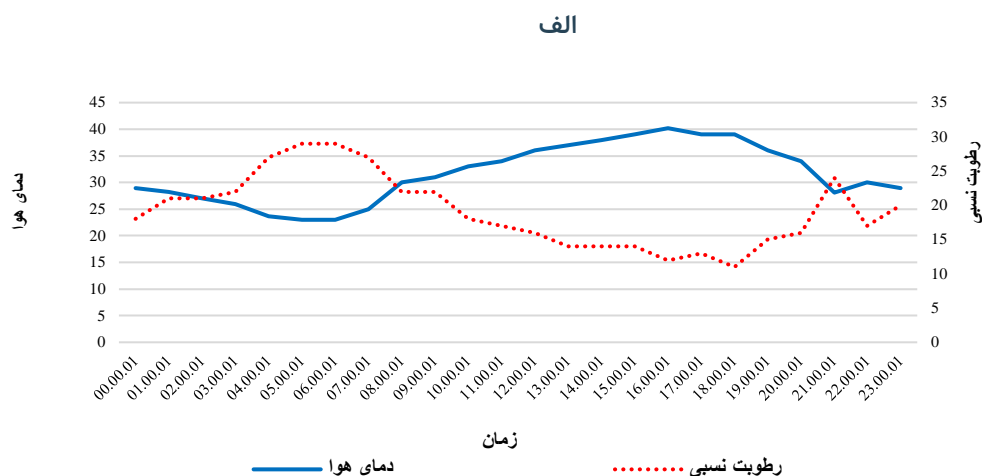
Mini Data logger testo 174 H
دما: $-20 \dots +70 \pm 0.5^\circ\text{C}$
رطوبت: $\pm 3\% \text{RH}$ ۰...۱۰۰
وضوح: $0.1^\circ\text{C} / 0.1\text{RH}$

سنجی مدل شبیه‌سازی‌شده، داده‌های ایستگاه هواشناسی شهر قزوین به‌عنوان داده‌های ورودی برای انجام شبیه‌سازی در نرم‌افزار انویمت در نظر گرفته شدند (شکل ۱). در مرحله بعد، از قسمت Biomet نرم‌افزار انویمت برای به دست آوردن مقادیر آسایش حرارتی محیطی با توجه به داده‌های خروجی حاصل از شبیه‌سازی استفاده می‌شود. از شاخص آسایش حرارتی PET برای محاسبه شرایط آسایش حرارت محیطی استفاده می‌شود (طالقانی و همکاران، ۲۰۱۶؛ Battisti et al., 2020). علاوه بر شاخص PET از شاخص آسایش حرارتی معتبر دیگری به نام UTCI استفاده می‌شود تا نتایج حاصل، از اعتبار بالاتری برخوردار شوند. محاسبات آسایش حرارتی برای یک فرد با فعالیت راه رفتن و دارای پوشش مناسب فصل انجام می‌شود.

در بخش سوم از یک ابزار شبیه‌سازی برای انجام پژوهش بهره گرفته می‌شود. در این پژوهش برای انجام شبیه‌سازی و صحت خروجی‌های به‌دست‌آمده، از نرم‌افزاری استفاده می‌شود که خروجی‌های آن قابل اعتماد بوده و داده‌های اندازه‌گیری شده با داده‌های به‌دست‌آمده از نتایج شبیه‌سازی دارای همبستگی بالایی باشند. در این بخش از نرم‌افزار شبیه‌سازی انویمت<sup>۱</sup> که در بسیاری از پژوهش‌ها و مقالات معتبر از آن استفاده و اعتبار-سنجی شده است (نصراللهی<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۲۰؛ Huang & Chen, 2020; Tsoka et al., 2019) استفاده می‌شود. سایت مورد مطالعه مدل داخل نرم‌افزار شبیه‌سازی‌شده، و پس از صحت‌سنجی نتایج به‌دست‌آمده با داده‌های اندازه‌گیری، متغیر-های مختلف ارزیابی می‌شوند. به‌منظور صحت-

<sup>2</sup> Nasrollahi

<sup>1</sup> Envi-met(ver5.1)



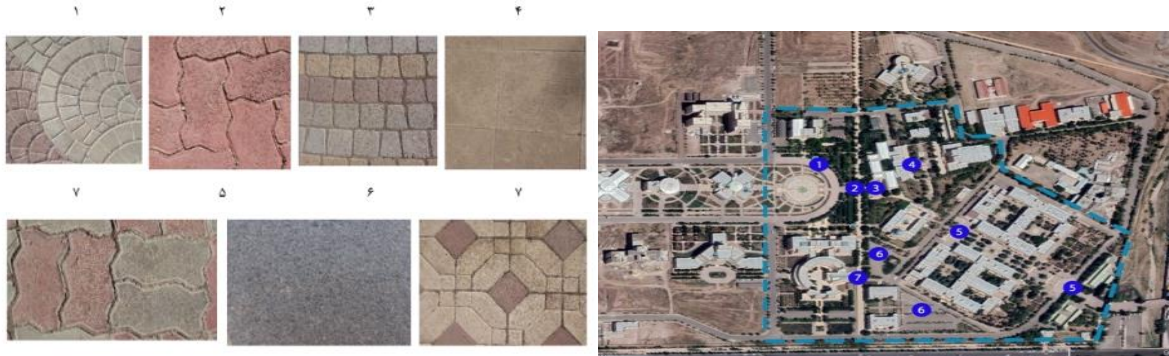
شکل (۱): داده های مربوط به ایستگاه هواشناسی الف) داده های دمای هوا و رطوبت نسبی ب) داده های سرعت باد و جهت باد

جدول (۳) : داده های اصلی موردنیاز به عنوان ورودی به نرم افزار شبیه سازی

واحد	داده مورد نیاز
m.s-1	سرعت باد در ارتفاع ده متری
درجه	جهت باد
k	دمای اولیه
gr.kg-1	رطوبت مخصوص
%	رطوبت نسبی در ارتفاع ۲ متری
	پوشش ابرها
	رطوبت و دمای خاک در عمق های مختلف

مقادیر اندازه‌گیری شده توسط دیتالاگرها با هم مقایسه شده‌اند.

جهت صحت سنجی داده‌های آب‌وهوایی، خروجی‌های به‌دست‌آمده از نتایج شبیه‌سازی با



شکل (۲): انواع و مدل‌های مختلف مصالح کارشده در پیاده‌راه‌ها

ازجمله دلایل انتخاب این سایت می‌توان به تنوع متریال و مصالح پیاده‌راه‌ها در محوطه دانشگاه و نیز اهمیت موضوع آسایش حرارتی فضای باز در این کاربری خاص اشاره کرد. با توجه به محدودیت‌های ابزارهای شبیه‌سازی و بالا بردن مدت زمان انجام پژوهش بخشی از سایت دانشگاه امام به‌عنوان محدوده مطالعاتی برای انجام پژوهش در نظر گرفته شد.

محدوده انتخابی اول مسیر پیاده قرارگرفته بین دو دانشکده علوم پایه و فنی مهندسی است. محدوده دوم نیز فضای روبروی کتابخانه مرکزی است. این قسمت دارای مصالح پیاده را متفاوتی نسبت به محدوده پیشنهادی اول است. و توسط سنگ تراورتن با ضخامت ۲ سانتی‌متر پوشیده شده است.

مدل شبیه‌سازی‌شده تا هنگامی که داده‌های خروجی آن به مقدار مطلوبی از همبستگی با داده‌های اندازه‌گیری شده برسد بهبود داده شده است. داده‌های دمای هوا و رطوبت نسبی که توسط دستگاه دیتالاگر در سایت مورد مطالعه ثبت شده است با داده‌های خروجی به‌دست‌آمده از نرم‌افزار انویمت در شرایط زمانی یکسان مقایسه و میزان مشابهت آنها محاسبه شده است. داده‌های مربوط به آسایش حرارتی محیط، به‌دست‌آمده از نرم‌افزار انویمت، با داده‌های به‌دست‌آمده از شاخص PET توسط نرم‌افزار ریمن و همچنین با داده‌های به‌دست‌آمده از سایت [UTCI.com](http://UTCI.com) برای شاخص UTCI مقایسه و صحت سنجی شده است.

در این پژوهش محوطه دانشگاه بین‌المللی امام خمینی به‌عنوان سایت مورد نظر انتخاب شد.



شکل (۳): محدوده‌های انتخابی سایت برای انجام شبیه‌سازی الف) فضای بین دانشکده علوم پایه و دانشکده فنی مهندسی ب) فضای روبروی کتابخانه

در جدول شماره ۴ سایر مشخصات و تنظیمات اصلی لحاظ گرفته برای نرم‌افزار انویمت مشخص شده است.

جدول (۴): تنظیمات اصلی مربوط به نرم‌افزار انویمت

موقعیت: قزوین عرض جغرافیایی: ۳۶° و ۲۷° طول جغرافیایی: ۵۰° منطقه زمانی: GMT 3:30	موقعیت مدل:
تعداد گزید در محورها: ۳۰*۱۳۰*۷۰ سایز هر گزید: 2m تقسیمات اولین گزید محور z ها: ۵ شروع حالت تلسکوپ: 20m درصد حالت تلسکوپی: ۵ چرخش مدل نسبت به شمال: ۵۵-	هندسه مدل:
تعداد نستینگ‌ها: ۱۰	حالت:

حالت‌های مختلف شبیه‌سازی شده به صورت زیر است:

با توجه به پژوهش حاضر، حالت‌های مختلف از ویژگی‌های پیاده‌راه‌ها، برای ارزیابی عملکرد آنها بر روی آسایش حرارتی محیط شبیه‌سازی شده است.

جدول (۵) ویژگی‌ها و حالت‌های ارزیابی

ویژگی ارزیابی شده	حالت‌های مختلف	شرایط محیطی عادی یا آبیاری شده
-------------------	----------------	--------------------------------

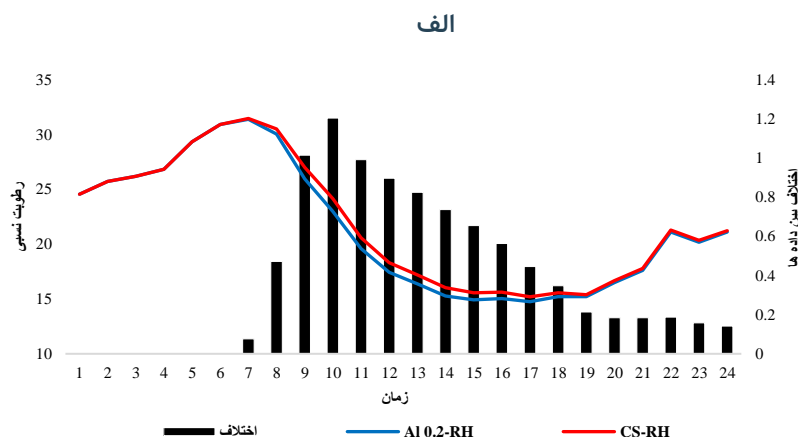


شرایط عادی	آلبدو: 0.2 آلبدو: 0.5 آلبدو: 0.8	آلبدو (Albedo)
شرایط عادی	ضخامت: 0.02m ضخامت: 0.04m ضخامت: 0.06m	ضخامت (Thickness)

تا ۱۴ است که در ساعت ۱۳ این اختلاف به یک درجه‌ی سانتی‌گراد رسیده است. در رابطه با رطوبت نسبی محیط نیز مقدار آن در حالتی که آلبدو ۰٫۲ (Al 0.2) است کمتر از وضع موجود است. مقدار اختلاف بین داده‌ها در ساعت ۱۰ به حداکثر خود می‌رسد که این مقدار برابر با ۱٫۲۰ درصد است. در شکل ۴ داده‌های حالت وضع موجود (CS) با Al 0.2 مقایسه شده‌اند.

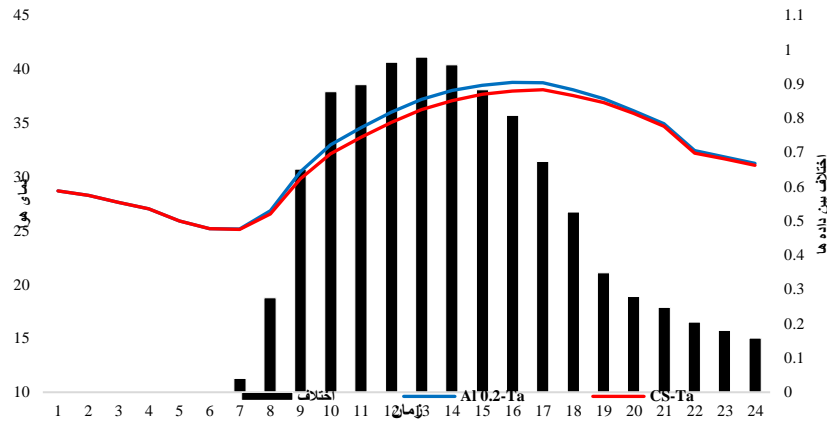
## ۴ یافته‌ها و بحث

با مقایسه داده‌های به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی حالت موجود با حالتی که در آن آلبدو کاهش یافته است به‌صورت ساعتی، برای گرم‌ترین روز سال مشاهده می‌شود که دمای هوا در ساعات مختلفی از روز بالاتر از حالت وضع موجود است و بیشترین مقدار این اختلاف در اواسط روز یعنی از ساعت ۱۲





ب



شکل (۴): مقایسه داده های بین دو حالت وضع موجود و آلبدو ۰٫۲ و اختلاف بین داده های آنها (الف) داده های دمای هوا و (ب) رطوبت نسبی

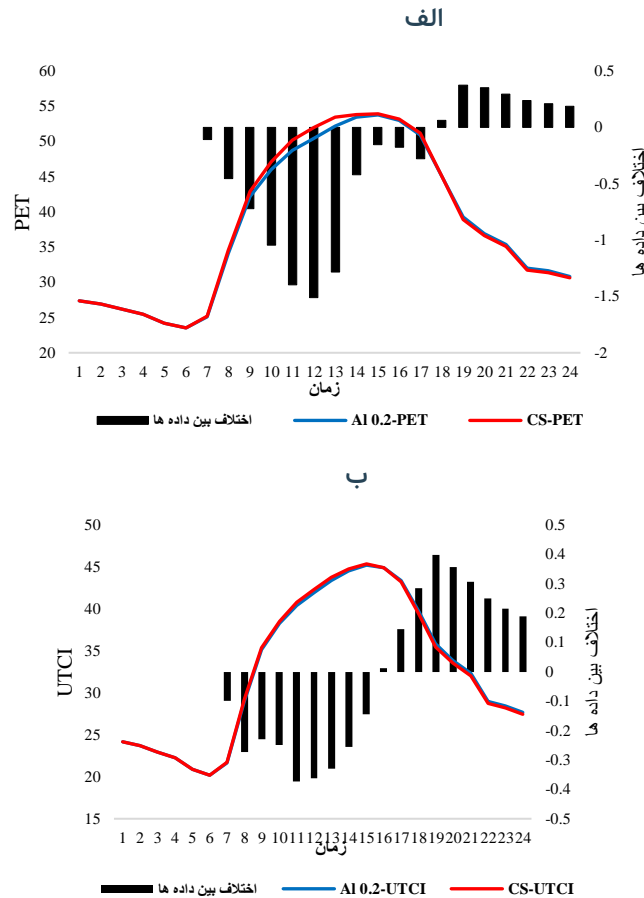
با کاهش مقدار آلبدو سطح از ۰٫۵ به ۰٫۲ تغییر بسیار ناچیزی در سرعت باد اتفاق می افتاد که مقدار آن کمتر از ۰٫۱ متر بر ثانیه است و می توان از آن چشم پوشی کرد.

#### ۴٫۱ ارزیابی شاخص های حرارتی در آلبدو ۰٫۲

در این قسمت اثرگذاری کاهش مقدار آلبدو بر شاخص های آسایش حرارتی بررسی شده است. در شکل ۵ شاخص های آسایش حرارتی PET و UCI نشان داده شده است. مقایسه دو حالت CS و AI 0.2 نشان می دهد که تغییر در مقدار آلبدو مصالح پیاده راه ها و کاهش مقدار آن نسبت به حالت وضع موجود، باعث تغییر در شرایط آسایش حرارت محیط در ساعات مختلف روز می شود. با توجه به شاخص PET (شکل ۵ الف) می توان مشاهده کرد که مقادیر PET در اواسط روز نسبت به حالت وضع موجود کاهش یافته است و نیز از ساعات ۱۸ تا ۲۴ نیز نسبت به حالت CS افزایش یافته است. شاخص PET در ساعت ۱۲ با ۱٫۵۰ درجه بیشترین کاهش را نسبت به حالت CS داشته است و در ساعت ۱۹ با

تفاوت میانگین دمای تابشی (MRT) در حالت وضع موجود با حالت AI 0.2 در اواسط روز که مقادیر MRT بسیار بیشتر از حالت مطلوب خود است؛ نسبت به سایر ساعات های روز بیشتر است. در بازه بین ساعت ۱۱ تا ساعت ۱۳ مقدار داده های میانگین دمای تابشی حالت AI 0.2 بیشترین اختلاف را با حالت وضع موجود دارد؛ که ۴٫۶۰ درجه سانتی گراد از حالت وضع موجود مقدار آن کمتر است. از طرفی نیز مقدار MRT از ساعت ۱۸ تا ۲۴ برای حالت AI 0.2 بیشتر از وضع موجود است و مقدار این اختلاف در ساعت ۱۹ به مثبت ۰٫۴ درجه سانتی گراد می رسد. نتایج به دست آمده نشان می دهد که با کاهش مقدار آلبدو نسبت به وضع موجود دمای هوا خصوصاً در اواسط روز افزایش می یابد و همچنین مقدار رطوبت نسبی نسبت به حالت موجود کاهش می یابد از طرفی نیز با کاهش مقدار آلبدو داده های مربوط به میانگین دمای تابشی نسبت به حالت موجود در اواسط روز و ساعاتی که بیشترین مقدار MRT در محیط ثبت می شود کاهش یافته و برای ساعات انتهایی روز که خورشید غروب می کند بیشتر از حالت موجود است.

۰٫۴ درجه سانتی‌گراد بیشترین مقدار افزایش در این شاخص نسبت به حالت CS به وجود آمده است.



شکل (۵): الف) داده‌های مربوط به شاخص PET برای ساعات مختلف روز برای دو حالت وضع موجود و آلبدو ۰٫۲ (ب) داده‌های مربوط به شاخص UTCI برای ساعات مختلف روز برای دو حالت وضع موجود و آلبدو ۰٫۲

آنها در ساعت‌هایی که خورشید در حال غروب است، می‌شود.

## ۴٫۲ افزایش مقدار آلبدو

در این حالت مقدار آلبدو نسبت به وضع موجود افزایش داده شد؛ تا عملکرد افزایش آلبدو بر روی متغیرهای محیطی و شاخص‌های آسایشی بررسی و ارزیابی شود. مقدار آلبدو از ۰٫۵ حالت وضع موجود به ۰٫۸ برای پیاده‌راه سایت افزایش یافت. متغیرهای محیطی به دست‌آمده از نتایج شبیه‌سازی برای حالتی که در آن آلبدو سطح پیاده‌راه به ۰٫۸ تغییر یافته است در جدول شماره ۶ آمده است.

در مورد شاخص UTCI (شکل ۵ ب) نیز شرایط آسایش حرارتی محیط در مقایسه با حالت CS در اواسط روز کاهش و از ساعت ۱۶ به بعد این روند افزایشی بوده است. با کاهش مقدار آلبدو سطح پیاده‌راه به ۰٫۲ مقدار UTCI در ساعت ۱۱ بیشترین کاهش را نسبت به حالت CS داشته است که مقدار آن منفی ۰٫۳۷ بوده است و در ساعت ۱۹ تا ۲۰ بیشترین افزایش UTCI را نسبت به CS داشته است که این مقدار به مثبت ۰٫۴ رسیده است. به‌صورت کلی می‌توان عنوان کرد که کاهش مقدار آلبدو سطوح پیاده‌راه باعث کاهش مقدار شاخص‌های حرارتی در اواسط روز و افزایش مقادیر



جدول (۶): مقادیر به دست آمده از نتایج خروجی انویمت برای متغیرهای آب‌وهوایی در حالت آلبدو ۰.

پارامتر اقلیمی	تاریخ	میانگین	حداکثر مقدار	حداقل مقدار
دمای هوا	۲۵ تیر	۳۱,۷۴ C°	۳۷,۳۸ C°	۲۵,۰۸ C°
رطوبت نسبی	۲۵ تیر	٪۲۲,۲۳	٪۳۱,۵۳	٪۱۵,۶۴
میانگین دمای تشعشعی	۲۵ تیر	۴۲,۹۰ C°	۷۷,۲۴ C°	۱۴,۹۱ C°
سرعت باد	۲۵ تیر	۱,۱۰ m/s	۱,۱۶ m/s	۱,۰۶ m/s

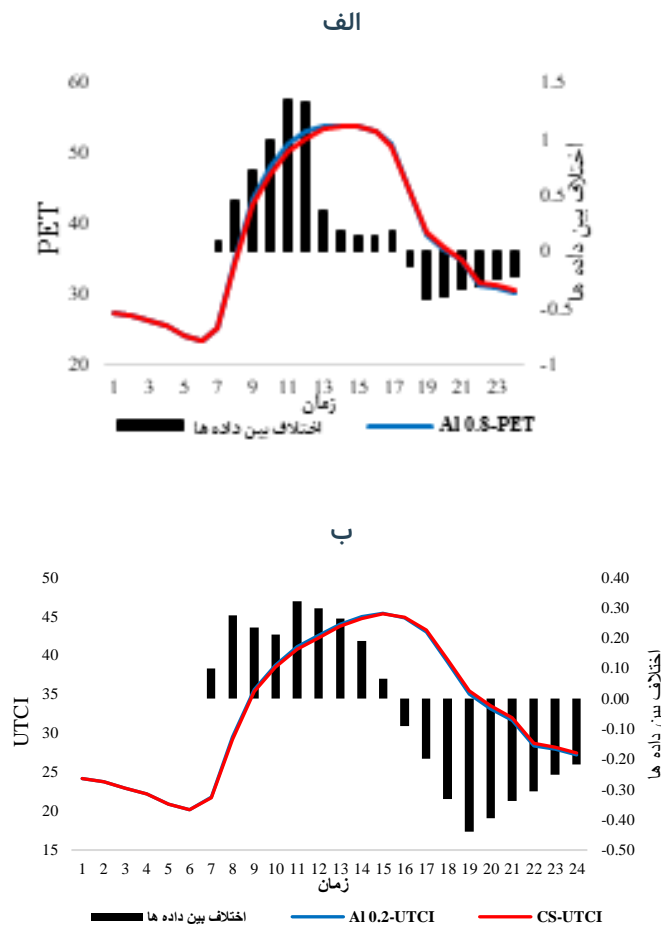
که با مقایسه این شاخص‌ها با حالت CS مشاهده می‌شود که افزایش مقدار آلبدو باعث ایجاد تفاوت در شرایط آسایشی شده است. شاخص PET (شکل ۵ الف) نشان می‌دهد که مقادیر حداکثر این شاخص در بازه بین ساعت‌های ۱۰ تا ۱۶ اتفاق افتاده است. PET در ساعت ۱۶ با مقدار ۵۴,۰۴ بیشترین مقدار و کمترین مقدار آن در ساعت ۵ صبح اتفاق افتاده است. مقایسه شرایط آسایش حرارتی در حالت Al 0.8 با CS نشان می‌دهد در زمان‌هایی که تابش خورشید وجود دارد؛ افزایش مقدار آلبدو سطح پیاده‌راه باعث افزایش مقدار PET و بدتر شدن شرایط آسایش محیطی می‌شود. تفاوت ایجاد شده در ساعت‌های ۱۰ و ۱۱ بیشتر از سایر ساعت‌ها است که مقدار آن به ۱,۳۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. از ساعت ۱۸ تا ۲۴ نیز مقدار PET در حالت Al 0.8 در مقایسه با CS کاهش یافته که بیشترین مقدار این کاهش در ساعت ۱۹ با مقدار ۰,۴۱ بوده است. با توجه به شاخص PET در ساعت ۰ بامداد تا ۷ صبح شرایط آسایش حرارتی در محیط وجود دارد و اگر محدوده کمی گرم و کمی سرد نیز در نظر گرفته شود؛ بازه بین ساعت‌های ۰ تا ۷,۳۰ و ۲۱,۳۰ تا ۲۴ در این محدوده قرار می‌گیرد که نشان می‌دهد در ساعاتی که محیط توسط افراد مورد استفاده قرار می‌گیرد شرایط آسایش حرارتی وجود ندارد.

با استفاده از مصالح با آلبدو ۰,۸ (Al 0.8) در اکثر ساعات روز دمای هوا کمتر از حالت وضع موجود است و به سبب آن نیز مقادیر رطوبت افزایش یافته است. در ساعت ۱۰ صبح بیشترین اختلاف رطوبت نسبی بین داده‌های مربوط به Al 0.8 و CS در ساعت ۱۰ صبح رخ داده است. مقدار میانگین دمای تابشی برای Al 0.8 در مقایسه با حالت CS در زمان‌هایی که تابش آفتاب به سطح پیاده‌راه برخورد می‌کند بیشتر شده است و در ساعات انتهایی روز که خورشید غروب می‌کند مقدار آن نسبت به حالت CS کمتر شده است. افزایش مقدار MRT در اواسط روز که بیشترین تنش‌های گرمایی در محیط وجود دارد به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در محدوده ۱۲ تا ۱۴ تفاوت آن با حالت CS به ۴,۳۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. بیشترین مقدار کاهش آن نسبت به حالت CS نیز در ساعت ۲۰ رخ می‌دهد که مقدار آن ۰,۴ درجه سانتی‌گراد است.

### ۴,۳ ارزیابی شاخص‌های حرارتی در Al 0.8

افزایش مقدار آلبدو سطح پیاده‌راه باعث ایجاد تغییر در متغیرهای آب و هوایی و به سبب آن شرایط آسایش حرارتی محیط شده است. در شکل ۵ شاخص‌های PET و UTCI نشان داده شده است؛





شکل (۶): مقایسه شاخص های آسایش حرارتی بین حالت AI 0.8 با CS (الف) شکل مربوط به شاخص PET و (ب) شاخص UTCI

#### ۴٫۴ ارزیابی عملکرد آلبدو

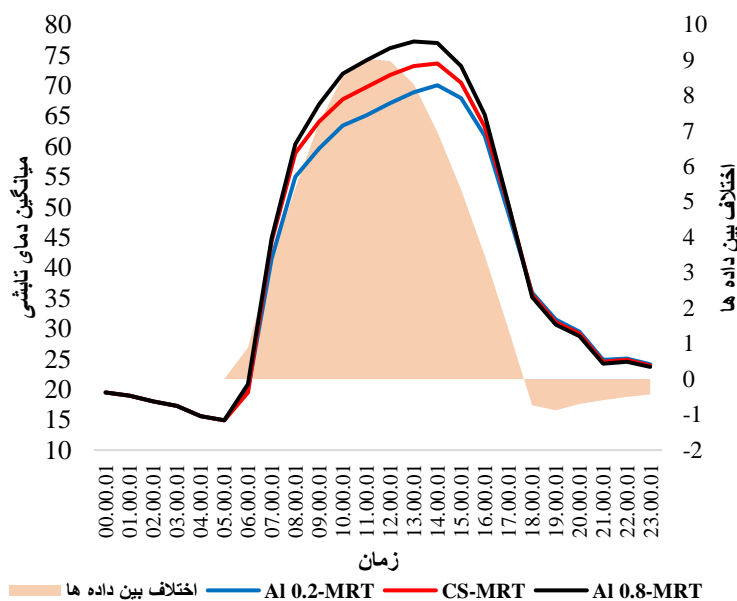
در این پژوهش مقادیر آلبدو در سه سطح ۰٫۲ (AI)، ۰٫۵ (CS) و ۰٫۸ (AI 0.8) بررسی و اثرات آنها بر روی شرایط آسایش حرارتی محیط ارزیابی شد. آلبدو یک ویژگی در مصالح پیاده‌راه‌ها است. و با تغییر در این ویژگی، مقدار جذب و انعکاس تابش خورشید توسط مصالح تغییر می‌کند؛ که در نتیجه آن بر پارامترهای محیط (دمای هوا، رطوبت نسبی، متوسط دمای تابشی و غیره) و نیز شرایط آسایشی آن اثرگذار است. در این بخش به صورت کلی عملکرد آلبدو بر روی پارامترهای محیط و شاخص‌های آسایش ارزیابی خواهد شد.

مقادیر به دست آمده مربوط به شاخص UTCI (شکل ۵ ب) نیز نشان می‌دهد که شرایط آسایش حرارتی محیط در ساعت ۱۵ در بدترین حالت خود قرار دارد و مقدار آن ۴۵٫۳۴ درجه است که نشان‌دهنده تنش گرمایی قوی در این زمان است و با مقایسه حالت AI 0.8 با CS می‌توان گفت در بازه بین ساعت ۷ تا ۱۶ افزایش مقدار آلبدو باعث افزایش مقدار UTCI نسبت به حالت CS می‌شود و از ساعت ۱۶ به بعد نیز باعث کاهش مقدار آن نسبت به CS می‌شود. به صورت کلی شاخص UTCI نیز عملکردی مشابه به PET در مورد شرایط آسایش محیطی نشان می‌دهد اما در برخی از جزئیات دارای تفاوت‌هایی است که می‌تواند ناشی از محاسبات بخصوص هرکدام از شاخص‌ها باشد.



جدول (۷): داده‌های آب و هوایی به دست آمده از نتایج شبیه‌سازی برای حالت‌های مختلف و مقایسه آن‌ها با حالت وضع موجود (به صورت میانگین داده‌ها)

اختلاف با CS	WS(m/s)	اختلاف با CS	RH(%)	اختلاف با CS	Ta(c°)	اختلاف با CS	MRT(c°)	حالت ارزیابی‌شده
-	۱,۱۱	-	۲۱,۸۱	-	۳۲,۱۸	-	۴۱,۵۸	CS
۰	۱,۱۱	-۰,۳۹	۲۱,۴۲	+۰,۴۱	۳۲,۵۹	-۱,۴۰	۴۰,۱۸	AI 0.2
۰	۱,۱۱	+۰,۴۲	۲۲,۲۳	-۰,۴۴	۳۱,۷۴	+۱,۳۲	۴۲,۹۰	AI 0.8



شکل (۷): مقادیر میانگین دمای تابشی در حالت‌های مختلف آلبدو

نسبت به سایر متغیرهای محیطی وجود دارد و اینکه در بخش‌های قبل اثرگذاری آلبدو بر روی دمای

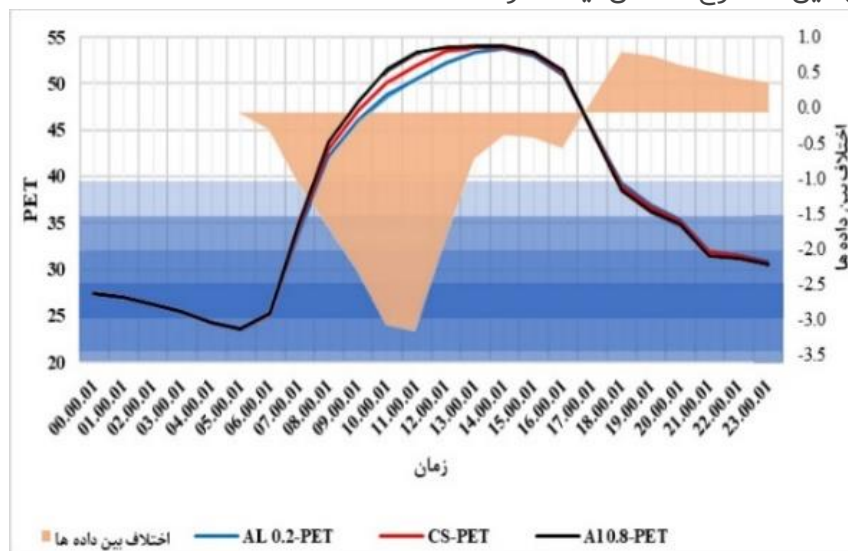
با توجه به اینکه همبستگی بالاتری بین شاخص‌های آسایش حرارتی با مقدار میانگین دمای تابشی



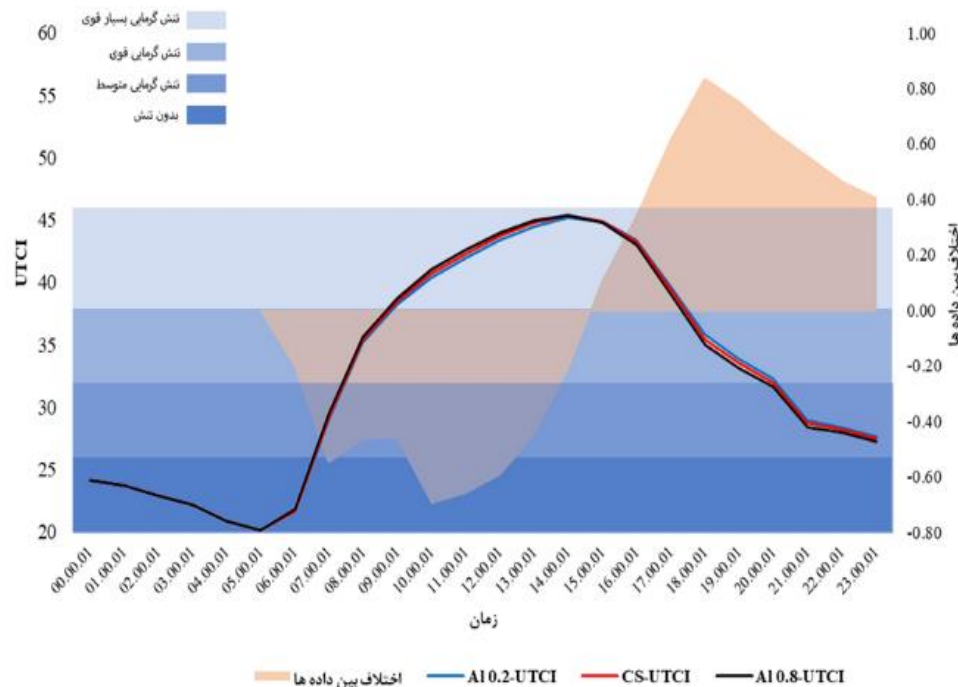
درصد بیشتری از تابش برخورد کرده به این سطوح جذب می‌شود. به همین دلیل در ساعات گرم روز سطوح با آلبدو بالا به دلیل انعکاس بیشتر باعث افزایش مقدار میانگین دمای تابشی محیط می‌شوند. همچنین در ساعات انتهایی روز سطوحی که گرمای بیشتری را جذب کرده‌اند نسبت به دیگر سطوح تابش بیشتری به محیط دارند. به همین دلیل سطوح با آلبدو بیشتر در اواسط روز باعث ایجاد میانگین دمای تابشی بالاتری در محیط خواهند شد که با توجه به سایت مورد مطالعه افزایش آلبدو در مصالح پیاده‌راه باعث افزایش میانگین دمای تابشی در بازه زمانی ۶ تا ۱۸ خواهد شد.

هوا، رطوبت نسبی و سرعت باد تجزیه و تحلیل شد در این قسمت فقط میانگین دمای تابشی و دو شاخص PET و UTCI بررسی خواهند شد. داده‌های مربوط به متغیرهای آب و هوایی به صورت میانگین در جدول ۷ مشخص شده است.

شکل ۷ نشان می‌دهد که کاهش مقدار آلبدو باعث کاهش مقدار میانگین دمای تابشی در اکثر ساعات‌های روز می‌شود؛ بخصوص در ساعاتی که بیشترین مقادیر تنش‌های گرمایی در محیط وجود دارد. همچنین افزایش مقدار آلبدو سبب افزایش انعکاس سطوح پیاده‌راه و جذب کمتر تابش می‌شود و باعث می‌شود که میانگین دمای تابشی زمانی که آلبدو مصالح پیاده‌راه بیشتر است اعداد بالاتری را نشان دهد؛ و هر چه میزان آلبدو سطوح پیاده کاهش یابد انعکاس این سطوح کاهش یافته و



شکل (۸): تغییرات شاخص PET در مقادیر مختلف آلبدو

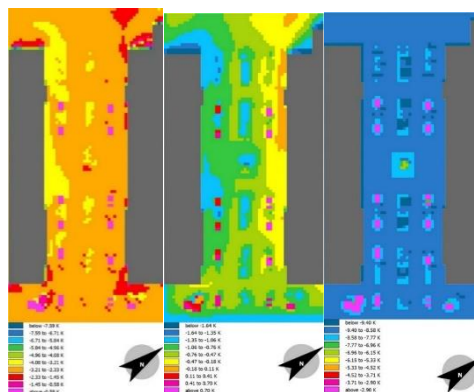


شکل (۹): تغییرات شاخص UTCI در مقادیر مختلف آلبدو

و افزایش مقدار UTCI در ساعت ۱۰ و ۱۸ حداکثر بوده است که در ساعت ۱۰ تا ۱۱ کاهش آلبدو باعث کاهش ۰٫۷ و در ساعت ۱۸ تا ۱۹ باعث افزایش ۰٫۸۳ در UTCI شده است. با توجه به تنش‌های حرارتی موجود در سایت همچنان شرایط حرارتی محیط در ساعت‌های استفاده نامناسب بوده و اگرچه کاهش مقدار آلبدو شاخص‌های آسایشی را کاهش می‌دهد، اما همچنان شرایط آسایشی سایت مورد نظر در محدوده‌های نامطلوبی قرار دارد.

در شکل ۱۰ که میزان تغییرات محیط در مقایسه در حالت AI 0.2 و AI 0.8 نشان داده شده است، می‌توان مشاهده کرد که کاهش مقدار آلبدو باعث کاهش مقادیر MRT؛ و شاخص‌های حرارتی PET و UTCI شده است. این کاهش مقادیر در نواحی پیاده‌راه و سطوح سنگفرش شده نسبت به سایر نقاط محیط بیشتر است.

تغییر در مقادیر آلبدو شرایط آسایش محیطی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در شکل ۸ و ۹ نشان داده شده است که تغییر مقادیر آلبدو باعث ایجاد تغییر در شرایط آسایش حرارتی شده است. در شکل ۸ که مربوط به شاخص PET است؛ نشان می‌دهد که تغییر آلبدو از ۰٫۸ به ۰٫۲ باعث کاهش مقدار PET در اواسط روز و افزایش آن در اواخر روز شده است. حداکثر مقدار تغییر ایجاد شده نزدیک به سه درجه سانتی‌گراد در ساعت ۱۱ تا ۱۲ ظهر بوده است که کاهش مقدار آلبدو باعث کاهش PET شده است. از طرفی از ساعت ۱۷ تا ۲۴ نیز کاهش مقدار آلبدو باعث افزایش PET شده است. افزایش PET در حداکثر مقدار خود که در ساعت ۱۸ تا ۱۹ رخ داده است کمتر از ۰٫۸ بوده است. از طرفی با توجه به شاخص UTCI تغییر در آلبدو سطح باعث ایجاد تغییر در UTCI شده است. در شکل ۹ نشان می‌دهد که کاهش مقدار آلبدو در تا ساعت ۱۵ عملکردی کاهش‌ی نسبت به UTCI داشته و از ۱۵ تا ۲۴ باعث افزایش مقدار UTCI شده است. کاهش

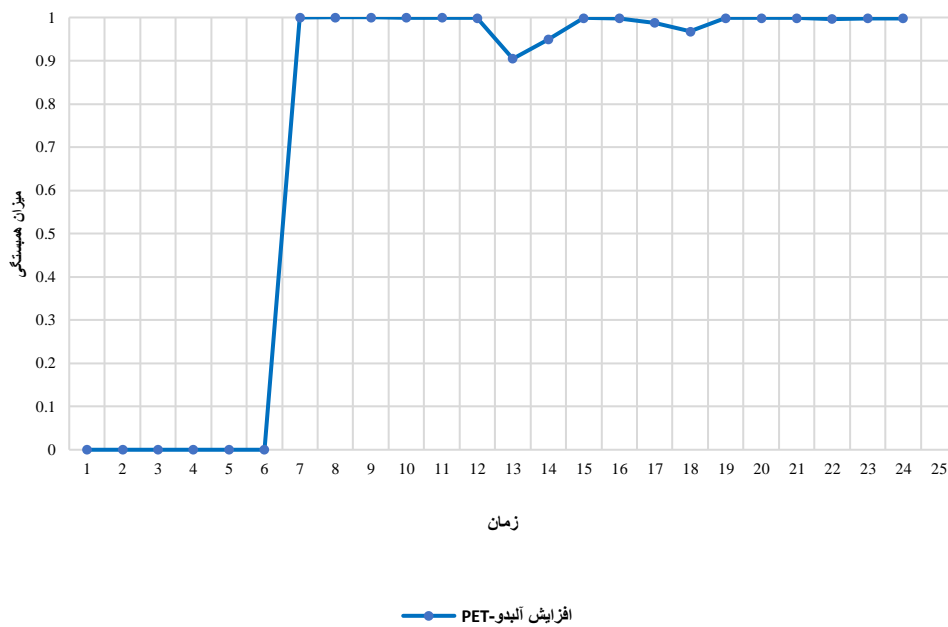


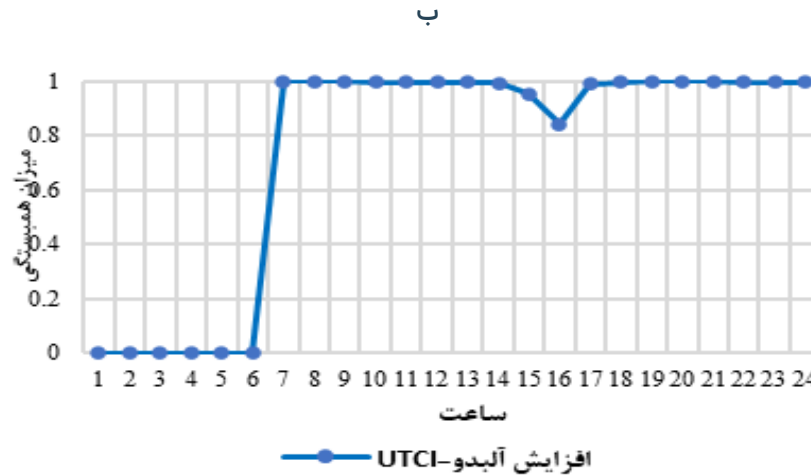
الف ب ج

شکل (۱۰): بیشترین اختلاف ایجادشده در مقایسه دو حالت AI 0.8 و AI 0.2 (الف) میانگین دمای تابشی ب (PET و ج)

UTCI

الف





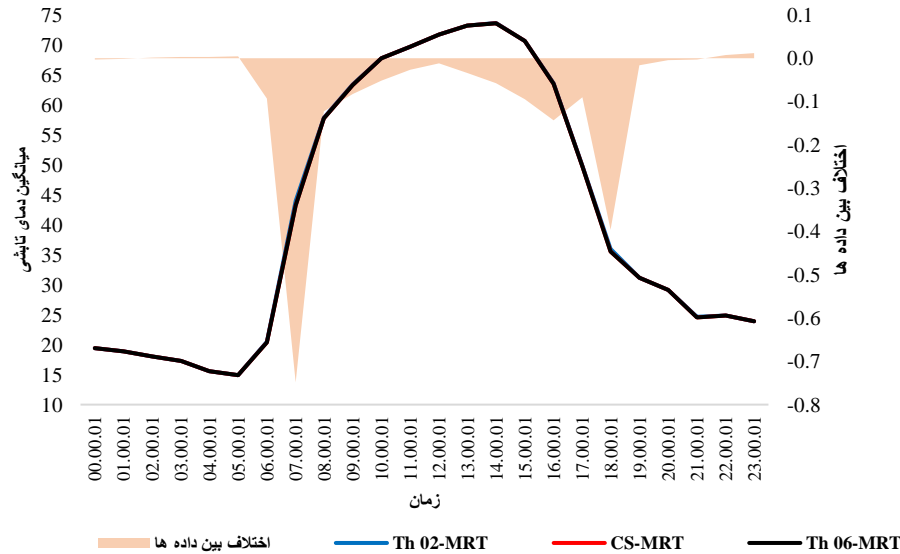
شکل (۱۱): همبستگی بین تغییرات آلبدو و مقادیر PET در ساعات مختلف روز

متغیرهای محیطی و شرایط حرارتی محیطی باشد، در این بخش از پژوهش بررسی و اثرات آن بر شرایط آسایش حرارتی محیط ارزیابی شده است. تغییر در ضخامت مصالح پیاده‌راه‌ها را می‌توان به‌نوعی ایجاد تغییر در لایه‌ها نیز تعبیر کرد؛ زیرا با افزایش یا کاهش مقدار ضخامت مصالح فاصله لایه‌های مختلف با شرایط متفاوت، نسبت به سطح تغییر خواهد کرد. همچنین با توجه به جنس آنها، تغییر در ضخامت مصالح پیاده‌راه‌ها می‌تواند باعث تغییر در عملکرد حرارتی این سطوح شود. در این پژوهش سه ضخامت (۲، ۴ و ۶ سانتی‌متر) مختلف برای تحلیل این ویژگی در نظر گرفته شده است و اثرگذاری آن بر متغیرهای محیطی و شرایط آسایش محیطی ارزیابی شده است.

همبستگی بین داده‌های مربوط به شاخص‌های حرارتی با افزایش مقادیر آلبدو در شکل ۱۱ مشخص شده است. داده‌های مربوط به همبستگی رابطه قوی بین تغییرات میزان آلبدو با عملکرد آسایش حرارتی محیط نشان می‌دهند. با توجه به شکل در بازه زمانی ۰ تا ۶ به دلیل یکسان بوده داده‌های مربوط به شاخص‌های حرارتی در اثر تغییرات مقادیر آلبدو نتایج همبستگی به‌صورت خطا و صفر مشخص شده، اما در سایر زمان‌های روز مقادیر آنها نشان‌دهنده ارتباط قوی بین داده‌های آلبدو با شاخص‌های حرارتی بوده و پیش‌بینی‌پذیر بودن این داده‌ها را نسبت به تغییرات آلبدو نشان می‌دهد.

## ۴٫۵ ضخامت مصالح پیاده‌راه

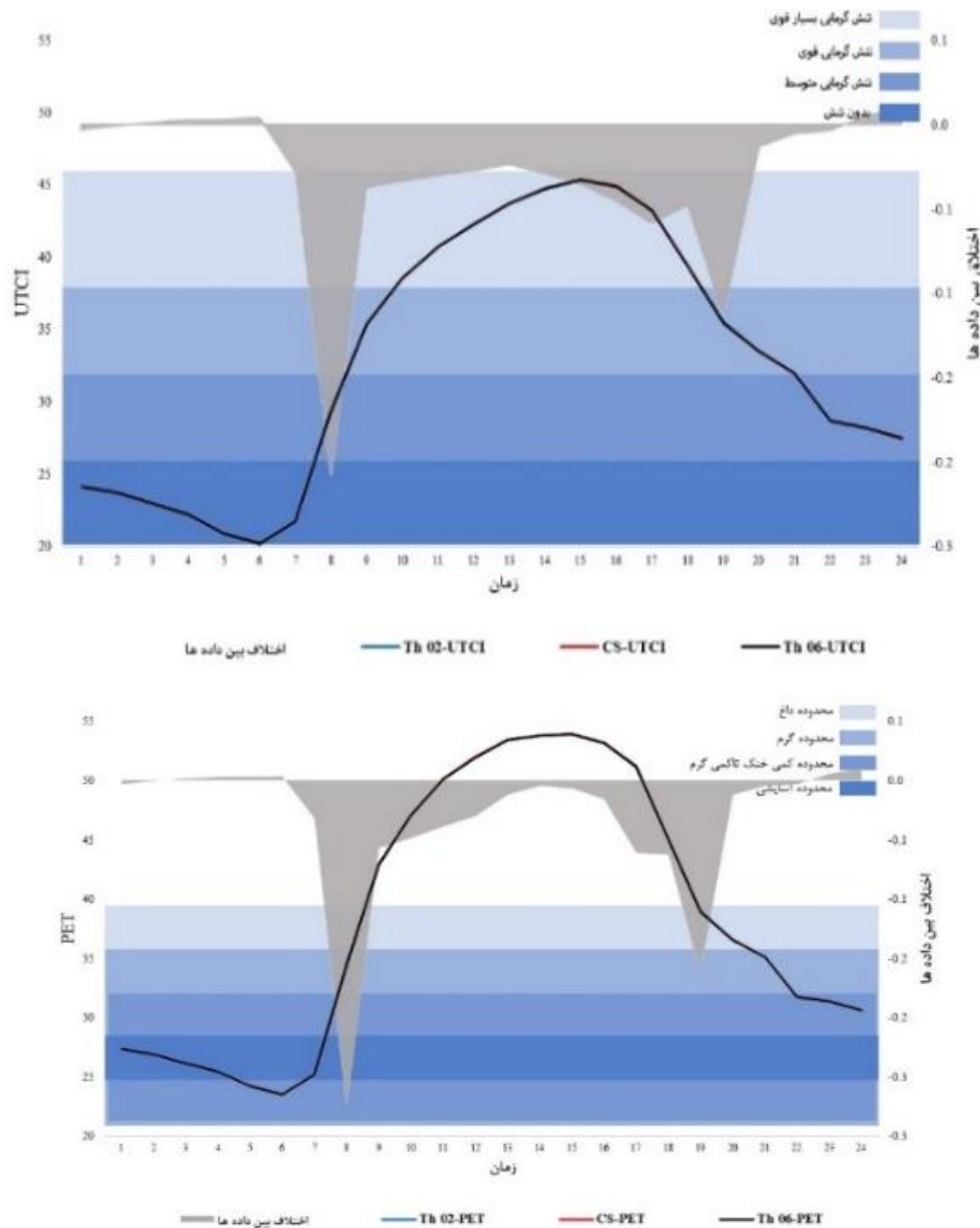
ضخامت که یک مشخصه فیزیکی برای مصالح پیاده‌راه است و می‌تواند راه‌حلی ساده برای بهبود



شکل (۱۲): داده MRT به دست آمده از تغییرات ضخامت سطوح

مقداری کمی است؛ اما این مقدار در بازه ۷ تا ۸ با کاهش ۰٫۷۵ درجه سانتی‌گراد در MRT حداکثر است. با توجه به شکل ۱۲ کاهش مقادیر در دو بازه زمانی ۷ تا ۸ و ۱۸ تا ۱۹ نسبت به سایر زمان‌ها تفاوت بیشتری دارد. این تفاوت به دلیل طلوع و غروب خورشید؛ تابش آن بر روی سطوح پیاده و تفاوت در ضخامت حالت‌های مختلف ایجاد شده است.

در شکل ۱۲ میانگین دمای تابشی برای ضخامت‌های مختلف نشان داده شده است. به صورت کلی افزایش مقدار ضخامت سطح باعث کاهش در مقدار MRT می‌شود. تفاوت مقداری ایجاد شده در MRT به وسیله افزایش ضخامت، در بازه زمانی ۶ تا ۲۱ کاهش است. اختلاف ایجاد شده بین داده‌ها در سایر زمان‌ها نیز ناچیز است. اگرچه کاهش MRT به وجود آمده از افزایش ضخامت سطح



شکل (۱۳): مقادیر تغییرات شاخص حرارتی الف (PET)

(ب) UTCI در اثر تغییر در ضخامت مصالح سطوح پیاده راه

بررسی شاخص‌های PET و UTCI مشخص می‌شود؛ کاهش مقادیر آنها ناچیز بوده و اثر چندانی بر روی بهبود شرایط حرارتی محیط ندارند. در شکل‌های داده شده مربوط به شاخص‌های حرارتی (شکل ۱۴ الف و ب) که محدوده‌های آسایش حرارتی محیط مشخص شده است؛ عملکرد نامناسب محیط از لحاظ آسایش حرارتی مشاهده می‌شود. در بازه زمانی ۸ تا ۱۸ تنش‌های حرارتی حداکثر بوده؛

داده‌های به دست آمده از شاخص‌های حرارتی در ضخامت‌های مختلف نشان می‌دهد که افزایش ضخامت باعث بهبود مقادیر شاخص‌های حرارتی شده است. کاهش مقادیر مربوط به شاخص‌های حرارتی در بازه‌های زمانی که تابش مستقیم خورشید وجود دارد بیشتر از سایر زمان‌ها است. عملکرد کاهش‌دهنده‌های مربوط به شاخص‌های حرارتی مشابهت بالایی آنها را با MRT نشان می‌دهد. با

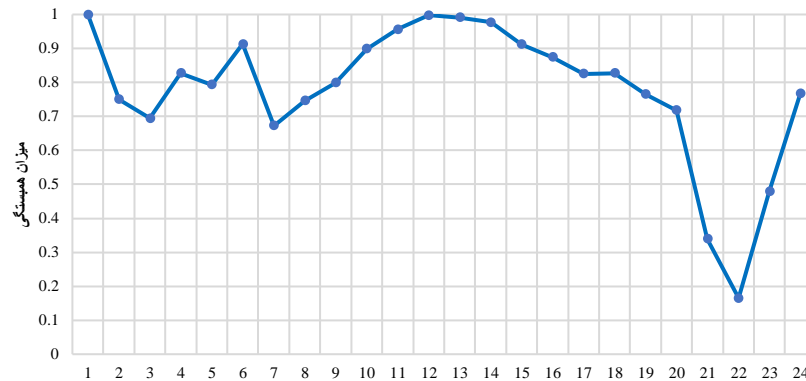


است. به صورت کلی نواحی مربوط به سطوح سنگفرش شده که سطح بزرگی از محیط را نیز شامل می‌شود؛ مقادیر آنها به صورت یکسان کاهش داشته است.

شاخص PET در محدوده حرارتی داغ و خیلی داغ و UTCI نیز در محدوده حرارتی تنش‌های بسیار قوی و تنش‌های حرارتی بیش از حد قرار دارند.

اختلاف ایجاد شده حداکثر اختلاف ایجاد شده در سایت براساس شاخص‌های حرارتی به واسطه تغییرات در ویژگی‌های سطوح سنگفرشی ایجاد شده

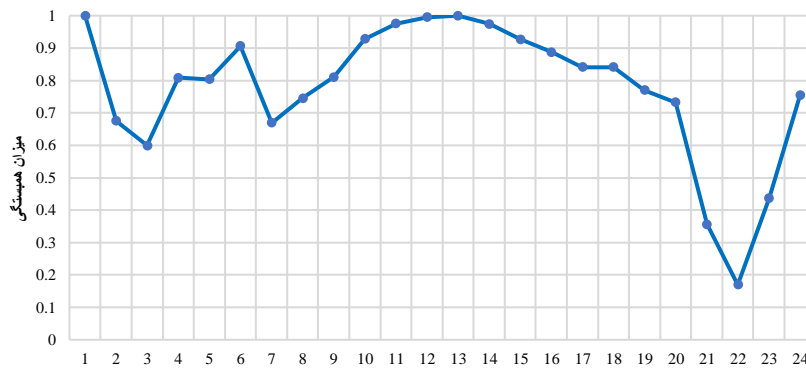
الف



زمان

افزایش ضخامت-PET

ب



زمان

افزایش ضخامت-UTCI

#### شکل (۱۴): همبستگی بین شاخص‌های آسایش حرارتی و تغییرات در ضخامت سطوح پیاده راه‌ها

حرارتی است. عملکرد آسایشی محیط با ایجاد تغییرات در این ساعت‌ها پیش‌بینی پذیر خواهد بود. در یک سری از بازه‌های زمانی این شرایط وجود ندارد و در برخی دیگر نیز رابطه‌ای قوی بین داده‌ها دیده

میزان رابطه بین داده‌های مربوط به شاخص حرارتی با افزایش ضخامت مصالح سطح نشان می‌دهد؛ افزایش ضخامت در اواسط روز دارای همبستگی بالایی با داده‌های به‌دست‌آمده از شاخص‌های



داده‌های آن تغییر می‌کند و به صورت کلی باعث ایجاد تغییر در میانگین متغیرها نخواهد شد. از طرفی نیز باید توجه داشت که این عملکرد برای جنس‌های مختلف مصالح با ویژگی‌های متفاوت می‌تواند متفاوت از این مقادیر باشد.

نمی‌شود. به‌طور کلی می‌توان گفت همبستگی بین داده‌های آسایش حرارتی با افزایش ضخامت مصالح سطوح پیاده‌راه‌ها در زمان‌های مختلف روز مقادیر متفاوتی است. به‌طور کلی افزایش ضخامت مصالح پیاده‌راه باعث کاهش مقادیر شاخص‌های حرارتی و بهبود شرایط محیطی می‌شود؛ که مقدار آن کم است و فقط در برخی ساعات خاص مقداری

ویژگی بررسی شده	تاریخ	حالات مختلف	میانگین مقدار شاخص PET	میانگین تغییرات	میانگین حداکثر اختلاف ایجاد شده	میانگین مقدار شاخص UTCI	میانگین تغییرات	حداکثر اختلاف ایجاد شده
وضع موجود (CS)	۲۵ تیر	CS	38.34	-	-	32.87	-	-
آلبدو (Albedo)	۲۵ تیر	Al 0.2	38.10	-۰.۲۴	۱.۵	32.86	-۰.۰۱	۰.۴
	۲۵ تیر	Al 0.8	۳۸.۵۱	۰.۱۷	۱.۴	32.85	-۰.۰۲	۰.۳۱
ضخامت (Thickness)	۲۵ تیر	Th 0.2	38.38	۰.۰۴	۰.۲۸	32.90	۰.۰۳	۰.۲۱
	۲۵ تیر	Th 0.6	38.34	۰	۰.۰۱	32.87	۰	۰.۰۱

جدول (۸): تغییرات شاخص‌های حرارتی در حالت‌های مختلف ارزیابی شده

## ۵ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

عملکردهای مختلفی را با توجه به جنس مصالح از خود نشان دهد. در این پژوهش، با بررسی رابطه بین داده‌های مربوط به شاخص‌های حرارتی و تغییرات ایجاد شده در ویژگی‌های مختلف مشخص شد؛ ارتباط قوی بین مقادیر شاخص‌های حرارتی و تغییرات ایجاد شده در آلبدو سطوح وجود دارد. در ارتباط با ضخامت مصالح سطح نیز در اواسط روز رابطه قوی بین داده‌ها دیده می‌شود. اما به صورت کلی در سایر زمان‌ها همبستگی قوی بین مقادیر شاخص‌های حرارتی با تغییر در ضخامت سطوح دیده نمی‌شود.

در نهایت با ارزیابی ویژگی‌های مورد بررسی مشخص شد: افزایش مقدار آلبدو باعث افزایش در مقادیر شاخص‌های آسایشی و بدتر شدن شرایط حرارتی محیط می‌شود. همچنین با کاهش مقادیر آلبدو شرایط حرارتی محیط بهبود پیدا می‌کند.

در نمونه مورد بررسی در این تحقیق مشاهده شده که کاهش مقدار آلبدو شرایط آسایش محیط را در اواسط روز و زمان‌های اوج تنش‌های حرارتی کاهش می‌دهد و افزایش مقدار آن باعث افزایش تنش‌های حرارتی و بدترین شدن شرایط سایت مورد مطالعه می‌شود. در این نمونه، ضخامت مصالح پیاده‌راه‌ها به‌عنوان یک مشخصه فیزیکی در مقادیر مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد با افزایش ضخامت مصالح تنش‌های حرارتی محیط به‌صورت کلی کاهش می‌یابد. تغییرات به‌وجودآمده در داده‌های مربوط به شاخص‌های حرارتی در بازه‌های خاصی از روز نسبت به سایر زمان‌ها بیشتر است. با این حال بازه‌های کوچکی از روز را شامل می‌شود. این کاهش مقادیر در اکثر زمان‌های روز ناچیز است و قابل احساس نیست. همچنین تغییر ضخامت در مصالح مختلف می‌تواند



استفاده از این مصالح در سطوح پیاده‌راه‌ها و یا سایر سطوح شهری می‌تواند باعث بهبود آسایش حرارتی محیط شود.

۲. همچنین افزایش ضخامت این مصالح می‌تواند در برخی بازه‌های روز آسایش حرارتی محیط را بهبود ببخشد. اگرچه مقادیر این اختلاف در اکثر زمان‌های روز بسیار کم بوده و می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد.

۳. بهره‌گیری از این یافته‌ها می‌تواند در زمان طراحی و اجرای سطوح مصنوع و پیاده‌راه‌ها و یا تغییر در برخی از ویژگی‌های مصالح موجود در پیاده‌راه‌ها به کار برده شود. تا آسایش حرارتی در این محیط‌ها بهبود و تنش‌های حرارتی در فصول گرم سال کاهش پیدا کند.

همچنین افزایش مقادیر ضخامت مصالح پیاده‌راه به‌صورت کلی باعث بهبود شاخص‌های حرارتی در برخی از بازه‌های روز می‌شود. می‌توان گفت در اکثر بازه‌های روز افزایش ضخامت مصالح پیاده‌راه بر روی شاخص‌های حرارتی تأثیری نمی‌گذارد.

افزایش مقادیر آلبدو باعث افزایش مقادیر شاخص‌های حرارتی در اواسط روز و زمان‌هایی می‌شود که تابش مستقیم خورشید در سایت وجود دارد و مقادیر مربوط به شاخص‌های حرارتی را در ساعت‌هایی که تابش خورشیدی در سایت وجود ندارد (شب) کاهش خواهد داد.

این پژوهش اطلاعات ارزشمندی را برای شهرسازان، طراحان شهری و طراحان در بهبود شرایط آسایش حرارتی، با توجه به ویژگی پیاده‌راه‌ها در نقاط مختلف شهری فراهم کرده است؛ براساس یافته‌های به‌دست‌آمده از این مطالعه برخی از پیشنهادات، برای بهبود آسایش حرارتی در فضاهای باز به شرح زیر است:

۱. استفاده از مصالح با آلبدو پایین (ضریب بازتاب پایین) در سطوح مختلف شهری،



## منابع

- Akbari, H., Shea, R., & Haider, T. (2003). Analyzing the land cover of an urban environment using high-resolution orthophotos, *Landscape and Urban Planning* 63, Pages 1-14. (In Persian)
- Andreas Matzarakis, Helmut Mayer, Moses G. Iziomon, Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature, *Int J Biometeorol* (1999) 43:76-84
- Anupam, B-R., Sahoo, U-C., Chandrappa, A., & Rath, P. (2021). Emerging technologies in cool pavements: A review/Construction and Building Materials 299, 123892.
- AzariJafari, H., Xu, X., Gregory, J., & Kirchain, R. (2021). Urban-Scale Evaluation of Cool Pavement Impacts on the Urban Heat Island Effect and Climate Change, *Environmental Science & Technology*. 55 (17), 11501-11510.
- Battisti, A., Laureti, F., Zinzi, M., & Volpicelli, G. (2018). Climate Mitigation and Adaptation Strategies for Roofs and Pavements: A Case Study at Sapienza University Campus/ Sustainability, 10, 3788
- Chen, J., Chu, R., Wang, H., Zhang, L., Chen, X., & Du, Y. (2019). Alleviating urban heat island effect using high conductivity permeable concrete pavement, *Journal of Cleaner Production*.
- Chen, L., Ng, E. (2012). Outdoor thermal comfort and outdoor activities: A review of research in the past decade, *Cities* 29, Pages 118-125
- Dimoudi, A., Zoras, S., Kantzioura, A., Stogiannou, X., Kosmopoulos, P., & Pallas, C. (2014). Use of cool materials and other bioclimatic interventions in outdoor places in order to mitigate the urban heat island in a medium size city in Greece, *Sustainable Cities and Society*, Volume 13, Pages 89-96.
- Djekic, J., Djukic, A., Vukmirovic, M., Djekic, P., & Dinic Brankovic, M. (2017). Thermal Comfort of Pedestrian Spaces and the Influence of Pavement Materials on Warming Up During Summer, *Energy and Buildings*.
- Erell, E. (2013). Effect of high-albedo materials on pedestrian heat stress in urban street canyons. *Urban Climate*.
- Faragallah, R-N., Ragheb, R-A. (2021). Evaluation of thermal comfort and urban heat island through cool paving materials using ENVI-Met/, *Ain Shams Engineering Journal*. (In Persian)
- Ferrari, A., Kubilay, A., Derome, D., & Carmeliet, J. (2020). The use of permeable and reflective pavements as a potential strategy for urban heat island mitigation, *Urban Climate* 31, 100534.
- Huang, J-M., Chen, L-C. A. (2020). Numerical Study on Mitigation Strategies of Urban Heat Islands in a Tropical Megacity: A Case Study in Kaohsiung City, Taiwan, *Sustainability*, 12, 3952.
- Jia, S., Wang, Y. (2021). Effect of heat mitigation strategies on thermal environment, thermal comfort, and walkability: A case study in Hong Kong/Building and Environment 201, 107988.



- Karakounos I., Dimoudi A. Zoras S. (2018). The influence of bioclimatic urban redevelopment on outdoor thermal comfort, *Energy and Buildings*, 158:1266.
- Lai, D., Lian, Z., Liu, W., Guo, C., Liu, W., Liu, K., & Chen, Q. (2020). "A comprehensive review of thermal comfort studies in urban open spaces," Accepted by *Science of the Total Environment*
- Laurence, S., Kalkstein, D., Edith, B., de Guzman, D., & Sailor, J. (2022). increasing trees and high albedo surfaces decreases heat impacts and mortality in Los Angeles, CA, *International Journal of Biometeorology*.
- Li, H. (2016). Pavement materials for heat island mitigation: Design and management strategies, *Butterworth-Heinemann*.
- Li, J., Liu, N. (2020). The perception, optimization strategies and prospects of outdoor thermal comfort in China: A review, *Building and Environment* 170, 106614.
- Lu, Y., Rahman, M.A., Moore, N.W., & Golrokh, A.J. (2022). Lab-Controlled Experimental Evaluation of Heat Reflective Coatings by Increasing Surface Albedo for Cool Pavements in Urban Areas. *Coatings*, 12, 7.
- Nasrollahi, N., Ghosouri, A., Khodakarami, J., & Taleghani, M. (2020). Heat-Mitigation Strategies to Improve Pedestrian Thermal Comfort in Urban Environments: A Review, *Sustainability*, 12, 10000. (In Persian)
- Nasrollahi, N., Hatami, Z., & Taleghani, M. (2017). Development of outdoor thermal comfort model for tourists in urban historical areas; A case study in Isfahan, *Building and Environment*. (In Persian)
- Qin, Y. A. (2015). review on the development of cool pavements to mitigate urban heat island effect, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 52, Pages 445-45.
- Taghvaie, A., Shafiee, E., Heidari, S. (2023). Assessment of Urban Heat Mitigation Strategies to Improve Outdoor Thermal Comfort Regarding Carbon Dioxide Concentration in Tehran Metropolis. *Int J Environ Res* 17, 36. (In Persian)
- Taleghani, M. (2018). the impact of increasing urban surface albedo on outdoor summer thermal comfort within a university campus, *Urban Climate*, Volume 24, Pages 175-184. (In Persian)
- Taleghani, M., Sailor, D., & Ban-Weiss, G. (2016). Micrometeorological simulations to predict the impacts of heat mitigation strategies on pedestrian thermal comfort in a Los Angeles neighborhood, *Environ. Res. Lett.* 11, 024003. (In Persian)
- Tsoka, S., Tsikaloudaki, K., & Theodosiou, T. (2019). coupling a Building Energy Simulation Tool with a Microclimate Model to Assess the Impact of Cool Pavements on the Building's Energy Performance Application in a Dense Residential Area, *Sustainability*, 11, 2519.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2012). "Cool Pavements." In: *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies*.
- Xie, J., Zhou, Z. (2022). Numerical Analysis on the Optimization of Evaporative Cooling Performance for



- Permeable Pavements. Sustainability, 14, 4915.
- Yang, J., Wang, Z-H., & Kamil, E. (2016). Heather Dylla, Effect of pavement thermal properties on mitigating urban heat islands: A multi-scale modeling case study in Phoenix, Building and Environment 108, 110-121.
- Yang, L., Liu, J., & Zhu, S. (2022). Evaluating the Effects of Different Improvement Strategies for the Outdoor Thermal Environment at a University Campus in the Summer: A Case Study in Northern China. Buildings, 12, 2254.