



Comparative study of the effect of cool materials containing TiO₂ photocatalytic nanoparticles on air temperature as an urban microclimate parameter, in the horizontal and vertical surfaces of the urban space, case study: Jolfa square; Esfahan

ARTICLE INFO

Article Type

Analytic Study

Authors

Zahra Gholami¹
Samaneh Jaliliasdrabad^{2*}
Rezvaneh Amrollahi³

How to cite this article

Gholami Z, Jaliliasdrabad S*, Amrollahi R. Comparative study of the effect of cool materials containing TiO₂ photocatalytic nanoparticles on air temperature as an urban microclimate parameter, in the horizontal and vertical surfaces of the urban space, case study: Jolfa square; Esfahan, 2023, September 23, 13(2):61-84
<https://dorl.net/dor/20.1001.1.23224991.1402.13.2.4.3>

1.M.Sc. in Urban Design, School of Architecture and Environmental Design, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

2. Assistant Professor of Regional & Urban Planning, School of Architecture and Environmental Design, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

3. Assistant Professor, Solid State Physics, Department of Physics, Iran university of Science and Technology, Tehran, Iran.

*Correspondence

Address: Assistant Professor of Regional & Urban Planning, School of Architecture and Environmental Design, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Email: s_jalili@iust.ac.ir

Phone: 73228297

Article History

Received: 2022/12/05

Accepted: 2023/03/07

Published:

ABSTRACT

Aims: In recent years, awareness of how urban surfaces can improve the microclimate has grown. Meanwhile, the challenge of using cool materials in urban spaces to change the microclimate is significant. Because urban surfaces are made up of two types of vertical surfaces (urban facades) and horizontal surfaces (pavements), each of which has a different impact based on where it is set.

Methods: This research investigates the cooling effect of titanium dioxide (TiO₂)-based photocatalytic self-cleaning material (P-S-TiO₂) in an urban square. Materials and methods: This study experimentally studied the evaluation of these materials on horizontal and vertical urban surfaces using ENVI-met software in the space of an urban square, a topic unexplored in earlier research.

Findings: The findings show that when these materials were used in the square's pavement, the air temperature of the urban space of the square at the height of 1.5 meters decreased by about 0.6°C because the square's pavement is about 16°C cooler. Meanwhile, the simulation results showed that if these materials are used in the urban facades of the square, there will be no noticeable change in the air temperature.

Conclusion: The conclusion of this research will increase awareness of how to use P-S-TiO₂ on both vertical and horizontal surfaces. In other words, using these materials on horizontal surfaces benefits the urban microclimate. Improving the urban microclimate increases the quality of the urban space of Jolfa neighborhood square.

Keywords: Urban Microclimate, urban surfaces (Vertical and horizontal), titanium dioxide (TiO₂)-based photocatalytic self-cleaning material, cool materials, Urban air temperature

CITATION LINKS

- [1] Leistner, P., et al. (2019). Building physics design.... [2] Croce, S., Vettorato, D. and Paparella, R. (2019),... [3] Silvia Croce, Daniele Vettorato, Urban surface... [4] Croce, S., Vettorato, D. and Paparella, R. (2019)... [5] Parsaee, M.; Joybari, M.M.; Mirzaei, P.A ... [6] Thorsson, S.; Lindqvist, M.; Lindqvist, S ... [7] Oke, TR. Boundary layer climates, 2nd ed... [8] Changnon, S. A.; Kunkel, K. E.; Reinke, B. C ... [9] Anderson, B. G.; Bell, M. L. Weather-related mortality ... [10] Vanos, J. K.; Kalkstein, L. S.; Sanford, T ... [11] Howard, L. The Climate of London: Deduced,... [12] Carpio, M.; Gonz'alez, 'A.; Gonz'alez, M.; &... [13] Santamouris, M.; Ding, L.; Fiorito, F.; Oldfield, P ... [14] Leone, A.; Federica Gobattoni, F. C. Raffaele ... [15] Taleghani, M. Outdoor thermal comfort ... [16] Rosenfeld, A; Akbari, H.; Romm, J. J.; Pomerantz... [17] Qin, Y. A review on the development of cool, ... [18] Akbari, H., M. Pomerantz, and H. Taha ... [19] Akbari, H.; Konopacki, S. Energy effects ... [20] Li, D.; Bou-Zeid, E. The effectiveness ... [21] Carnielo, E.; Zinzi, M. Optical and thermal,... [22] Doulos, L.; Santamouris, M.; Livada ... [23] Pisello, A. L.; Cotana, F.; Nicolini, A ... [24] Rosenfeld, A.; Romm, J. J.; Akbari, H.; ... [25] Akbari, H.; Damon Matthews, H ... [26] Santamouris, M.; Gaitani, M.; Spanou, ... [27] Ko, J.; Schlaerth, H.; Bruce, A.; Sander, K ... [28] Oleson, K.; Bonan, M.; Feddema, J ... [29] Synnefa, A.; Karlessi, T.; Gaitani, N.; Santamouris... [30] Wang, Y.; Berardi, U.; Akbari, H.; Comparing ... [31] Faragallah, R.N.; Ragheb, R.A. Evaluation of ... [32] Aboelata, A. Reducing outdoor air temperature ... [33] Taleghani, M.; Berardi, U. The effect ... [34] Ragesh, P.; Ganesh, V.A.; Nair, S.V.; Nair, ... [35] Janus, M.; Zatorska, J.; Czyzewski, A.; Bubacz, K., ... [36] Yao J, Chen H, Jiang F et al (2017) Titanium. [37] Gang Liao, Wu Yao, Anming She, Cheng Shi ... [38] Arun, J., Nachiappan, S., Rangarajan, G.,... [39] Fernández-Mira, M.; Relinque, E.J.; Martínez, I.;... [40] Berdahl, P.; Bret, S. E. Preliminary survey ... [41] Levinson, R.; Akbari, H. Effects of composition [42] Sleiman, M.; Ban-Weiss, G.; Gilbert, H.E.; François ... [43] Tang, X.; Rosseler, O.; Chen, S.; de l'Aulnoit,... [44] Berdahl, P., and S. E. Bretz. 1997. "... [45] Sylvia Leydecker ,Nano Materials in Architecture S... [46] Steemers, K., N. Baker, D. Crowther, J. Dubiel ... [47] Ozkeresteci, I.; Crewe, K.; Brazel, A. J.; Bruse, M. ... [48] Mirzaei, M.; Verrelst, J.; Arbabi, M.; Shaklabadi,... [49] Nasrollahi, N.; Hatami, Z.; Taleghani, M.... [50] Salata, F.; Golasi, I.; de Lieto Vollaro, R ... [51] Taleghani, M.; Kleerekoper, L.; Tenpierik ... [52] Nasrollahi, N.; Hatami, Z.; Taleghani, M ... [53] Acero, J. A.; Herranz-Pascual, K. A [54] Faragallah, R.N.; Ragheb, R.A. Evaluation ... [55] Aboelata, A. Reducing outdoor air temperature ... [56] Taleghani, M.; Berardi, U. The effect...

بررسی تطبیقی میزان اثرگذاری مصالح خنک حاوی نانوذرات فوتوکاتالیستی TiO_2 ، بر دمای هوا به عنوان یک پارامتر میکرواقلیم شهری، در سطوح افقی و عمودی فضای شهری مطالعه موردی: میدان جلفا؛ اصفهان

- زهرا غلامی^۱؛ سمانه جلیلی صدرآباد^{۲*}؛ رضوانه امراللهی بیوکی^۳
- ۱- کارشناسی ارشد طراحی شهری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
 - ۲- استادیار شهرسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران (نویسنده مسئول).
 - ۳- استادیار گروه ماده چگال، دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

چکیده

اهداف: توجه به ظرفیت‌های سطوح شهری در بهبود میکرو اقلیم شهری طی سال‌های اخیر زیاد شده است. در این میان چالش استفاده از مصالح خنک در سطوح شهری به‌منظور تغییر در میکرو اقلیم حائز اهمیت است. سطوح شهری از دو نوع سطوح افقی (روسازی‌ها) و سطوح عمودی (جداره‌های شهری) تشکیل شده است که به دلیل جهت قرارگیری آن‌ها، اثرات متفاوتی را ایجاد می‌کنند. این پژوهش به بررسی اثرگذاری مصالح خنک حاوی نانو ذرات فوتوکاتالیستی TiO_2 در فضای شهری میدان پرداخته است

ابزار و روش‌ها: این مطالعه به صورت تجربی، ارزیابی این مصالح را روی سطوح افقی و عمودی شهری را با استفاده از نرم‌افزار ENVI-met (v4) در فضای میدان شهری بررسی نموده است. مطالعات پیشین در این زمینه نشان می‌دهد تاکنون عملکرد حرارتی این مصالح در سطوح شهری بررسی نشده است و اکثر مطالعات انجام شده در این زمینه به بررسی ویژگی خود تمیز شونده آن‌ها پرداخته‌اند.

یافته‌ها: یافته‌ها نشان می‌دهد با استفاده از این مصالح در روسازی میدان، دمای هوای فضای شهری در ارتفاع ۱.۵ متر حدود ۰.۶ درجه سانتی‌گراد کاسته شده است. چون روسازی میدان حدود ۱۶ درجه سانتی‌گراد خنک‌تر شده است، و اگر در جداره‌های شهری میدان از این مصالح استفاده شود، تغییر محسوسی در دمای هوا ایجاد نمی‌شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد اگر در سطح افقی میدان از این مصالح استفاده شود، علاوه بر مزیت ارزشمند خود تمیز شونده آن، تأثیر بسزایی در کاهش دمای هوای میدان محله جلفا دارد. ولی در جداره‌های شهری میدان، تنها اثر خود تمیز شونده دارد و دمای هوای میدان تغییر محسوسی نمی‌کند.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش منجر به افزایش آگاهی در عملکرد حرارتی مصالح خنک حاوی نانوذرات فوتوکاتالیستی TiO_2 ، در دو سطح عمودی و افقی خواهد شد. به عبارتی استفاده از این مصالح در سطوح افقی علاوه بر خاصیت خود تمیز شونده برای میکرو اقلیم شهری نیز منفعت دارد. بهبود میکرو اقلیم شهری منجر به افزایش کیفیت فضای شهری میدان محله جلفا می‌شود.

کلمات کلیدی: میکرو اقلیم شهری، سطوح افقی و عمودی شهری، مصالح حاوی نانو ذرات فوتوکاتالیستی TiO_2 ، مصالح خنک، دمای هوای فضای شهری.

مقدمه

دمای هوای شهرها روز به روز در حال افزایش است. بر اساس نظرات دانشمندان، این افزایش دما تحت تأثیر عوامل بسیار زیادی است، که مهم‌ترین آن‌ها عوامل "انسان-محور" است. به عبارتی می‌توان بیان کرد امروزه، فضاهای شهری، افزایش دمای بی‌سابقه‌ای را تجربه می‌کنند. چندین مطالعه ارتباط بین توسعه شهری و تغییرات آب و هوایی و خطرات آن مانند امواج گرما و سیل را نشان داد است. دمای بالای هوا نه تنها شرایط آسایش حرارتی در فضای باز را بدتر می‌کند و تأثیرات منفی بر سلامت انسان دارد، بلکه مصرف انرژی برای سرمایش را افزایش می‌دهد و باعث بالا رفتن تقاضای برق در شرایط آب و هوایی گرم می‌شود. همچنین، افزایش مستمر سطوح مصنوعی در مناطق شهری (ساخت‌وسازهای شهری) نیز یکی از عوامل اصلی کاهش فضاهای سبز و تخریب محیط‌زیست محسوب می‌شود.

این موضوع مورد توجه بسیاری از محققان شهری است، و همواره در حال یافتن راه‌حلی امیدوارکننده، به‌منظور کاهش دمای هوا در فضاهای شهری هستند. در این زمینه، چندین استراتژی برای مقابله با مسائل مربوط به اثرات مرتبط با تغییرات آب‌وهوا و طراحی سطوح شهری پیشنهاد شده است [۱]. طبق برآوردهای انجام شده، سقف‌ها تقریباً ۲۰ تا ۲۵ درصد از کل سطح شهری را به خود اختصاص می‌دهند و سطح نماها تقریباً دو برابر است.

شهرها توسط عناصر مختلفی ساختاریافته‌اند. هر یک از این عناصر شهری به منظور رفع نیاز شهروندان شکل گرفته‌اند. به عنوان مثال ساختمان‌ها یکی از این عناصر مهم شهری

و عمودی زمین و پوشش‌های ساختمانی است که می‌تواند با مصالح مختلف مشخص شوند و چندین عملکرد را داشته باشند. در واقع، جایگزینی سطوح طبیعی و نفوذپذیر با مصالح غیرطبیعی، مسئول افزایش قابل توجه دمای هوا در مناطق شهری نسبت به محیط اطراف است [۴].

مطالعات علمی اخیر بر اهمیت تغییر طراحی سطوح شهری از یک عملکرد واحد، به یک مفهومی جامع و منعطف جهت کمک به بهبود میکرو اقلیم شهری تأکید می‌کند [۵]. میکرو اقلیم شهری یکی از عوامل مهم و حیاتی برای حضور مردم در فضاهای شهری و کیفیت فضاهای بیرونی است. همان‌طور که تحقیقات نشان می‌دهد، شهرها در دهه‌های آینده با افزایش شدید دمای جهانی مواجه می‌شوند [۵]. میکرو اقلیم مجموعه‌ای محلی از شرایط جوی است که با شرایط مناطق اطراف متفاوت است. این عبارت ممکن است به منطقه‌ای اشاره داشته باشد که چند متر مربع یا چند کیلومتر مربع وسعت دارد. تحقیقات نشان داده است پارامترهای میکرو اقلیمی مانند تابش خورشیدی، دمای هوا، رطوبت، باد و بارندگی محیط ساخته شده به طور قابل توجهی بر کیفیت مکان‌های بیرونی تأثیر می‌گذارد [۶]. پدیده جزیره گرمایی شهری (UHI) زمانی رخ می‌دهد که دمای هوا در شهرها بیشتر از حومه شهرها باشد [۷]. یکی از دلایل اصلی UHI آلودگی کم سطوح شهری است که نسبت تابش خورشیدی منعکس شده توسط یک سطح را کاهش می‌دهد. شهرها توسط اثرات مضر این پدیده UHI تهدید می‌شوند، که مصرف انرژی خنک‌کننده در ساختمان‌ها را افزایش می‌دهد، کیفیت هوا را بدتر می‌کند و سلامت مردم را تحت تأثیر قرار می‌دهد و منجر به افزایش مشکلات سلامتی و مرگومیر می‌شود [۸، ۹، ۱۰].

اثر جزایر حرارتی (UHI) عمدتاً ناشی از: الف) مصالح سطوح شهری که گرما را جذب می‌کنند ب) هندسه شهری (افزایش انعکاس تشعشعات) و جایگزینی پوشش گیاهی و طبیعی با سطوح غیرقابل نفوذ در شهرها است [۱۱]. در واقع استفاده از مصالح خنک (مصالح با آلدو بالا) در سقف ساختمان‌ها و روسازی خیابان‌ها و نمای ساختمان‌ها از

هستند، که ساختار شهر را شکل داده‌اند، و از کنار هم قرار گرفتن آن‌ها یک جداره شهری ساخته می‌شود. عمدتاً جداره‌ها به عنوان لایه محافظ و عایق برای فضاهای داخلی در نظر گرفته می‌شوند. راه‌ها و مسیرهای شهری، عنصر مهم دیگر شهرها هستند که به منظور رفع نیاز جابجایی و حرکت انسان‌ها در فضای شهری شکل گرفته است. این دو عنصر مهم شهری، سطح بسیار وسیعی از شهرها را پوشش داده است. هدف از بیان اهمیت آنها (خیابان‌ها و جداره‌های شهری) این است، که می‌توان از سطوح وسیع این دو عنصر، جهت "مدیریت گرهای شهری"، بهینه‌سازی بهره‌وری استفاده از منابع و کاهش اثرات زیست‌محیطی استفاده کرد. استفاده از سطوح خالی پشت‌بام‌ها، به منظور تولید انرژی، همواره مورد توجه برنامه‌ریزان شهری بوده است، در حالی که بهره‌برداری از سطوح دیگر شهری (جداره و خیابان) تا حد زیادی مورد توجه قرار نمی‌گیرد.

درواقع، دمای هوای فضاهای شهری تحت تأثیر مستقیم این دو عنصر هستند. این دو عنصر در ادبیات شهرسازی، با نام "سطوح شهری" شناخته می‌شود. و اصطلاح "استفاده از سطوح شهری" برای تعریف روش جامعی است که در آن سطوح شهری می‌توانند، انتخاب و طراحی شوند [۲]. "سطوح شهری" این سؤال اساسی را به ذهن می‌آورد، آیا آن‌ها می‌توانند علاوه بر نقش‌های اولیه خود، به منظور بهبود دمای هوای فضای شهری نیز ایفای نقش کنند؟

در سناریوی کنونی یعنی شهرنشینی گسترده و تغییرات اقلیمی جهانی، سطوح شهری و ویژگی‌های آن‌ها نقش کلیدی دارند، زیرا به طور قابل توجهی بر کیفیت زندگی در مناطق شهری و همچنین شرایط محیطی آن‌ها تأثیر می‌گذارند. استفاده از سطوح شهری (جداره‌ها و روسازی‌ها)، منجر به توسعه فرصت‌های متعدد برای بهبود محیط‌های شهری موجود و حمایت از تاب‌آوری نه تنها زیست‌محیطی؛ بلکه اجتماعی و اقتصادی می‌شود [۳]. سطوح شهری شامل تمام سطوحی می‌شود که از نظر تابشی، حرارتی و هیدرولوژیکی محیط ساخته شده را از نظر فیزیکی و مورفولوژیکی مشخص می‌کند. این‌ها شامل سطوح افقی

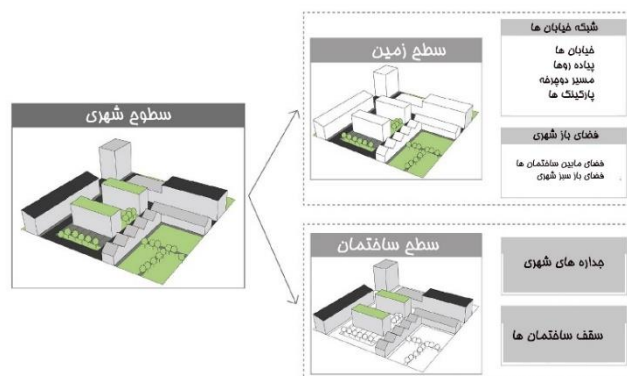
مهم‌ترین راهکارهای جهانی برای کاهش اثر UHI محسوب می‌شود [۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶]. چون منجر به کاهش دمای سطوح شهری می‌شود [۱۷]. آلبدو، توانایی یک سطح برای بازتاب نور را در مقیاس ۰ تا ۱ کمیت می‌کند. فضای شهری از مصالح خشک و غیر قابل نفوذ مانند سنگفرش یا ساختمان ساخته شده‌است. این سطوح با جذب تشعشعات خورشیدی دمای محیط شهری را افزایش می‌دهند. بسیاری از محققین پیشنهاد کرده‌اند که برای کاهش دمای سطوح شهری هنگام جذب نور خورشید، بهتر است از مصالح با آلبدوی بالا استفاده شود [۱۸]. بنابراین، کنترل آلبدوی سطوح شهری اهمیت بسیاری دارد. آیا می‌بایست تمام سطوح شهری بر اساس این اصل اثبات شده (آلبدو شهری)، به سطوحی با آلبدو مناسب و اثرگذار بر میکرو اقلیم شهری، تغییر یابند؟ همان‌طور که می‌دانیم، راه‌حل تخریب و نوسازی امکان‌پذیر نیست؛ اما ما دربره‌ای از زمان هستیم که تکنولوژی نانو در مصالح ساختمانی رشد یافته است. و راه‌حلهایی جدای از تخریب و نوسازی سطوح شهری، پیش روی برنامه ریزان شهری گذاشته است.

مصالح خنک حاوی نانوذرات فوتوکاتالیستی TiO_2 به دلیل داشتن آلبدو بالا به عنوان یک مصالح خنک محسوب می‌شود، زیرا درصدی از اشعه خورشید را جذب نمی‌کنند و تابش خورشیدی را منعکس می‌کنند. بنابراین دمای سطح را خنک می‌کنند. در سال‌های اخیر، سطوح شهری به عنوان سطوح هزینه‌بر (منظور هزینه‌های نگهداری)، در نظر گرفته نمی‌شوند، بلکه به عنوان یک فرصت کلیدی برای بهینه‌سازی منابع و کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی در

نظر گرفته می‌شود. کاربست مصالح در سطوح شهری همواره یکی از مسائل چالش‌برانگیز در طرح‌های شهری محسوب می‌شود. امروزه با رشد تکنولوژی مصالح جدید بسیاری ابداع گردیده و در سطوح شهری به کار گرفته شده‌اند. اما آنچه حائز اهمیت است، به کارگیری این مصالح جدید در سطوح فضای شهری چه تأثیراتی خواهد داشت. آیا تفاوتی میان به کارگیری مصالح خنک حاوی نانوذرات فوتوکاتالیستی TiO_2 ، در سطوح افقی و عمودی بر میکرو اقلیم شهری هست یا خیر؟ (شکل ۱ دسته‌بندی سطوح مختلف افقی و عمودی شهری را نشان می‌دهد). همان‌طور که ادبیات موضوع نشان می‌دهد این مصالح آلبدو بالایی دارند و با گذشت زمان (با کثیف شدن سطوح شهری) آلبدو آن‌ها کم نمی‌شود. این مطالعه به صورت تجربی این موضوع را با استفاده از نرم‌افزار ENVI-met (v4) در فضای میدان شهری بررسی کرد. در مطالعات پیشین از یک طرف، قابلیت‌های خودتمیزشوندگی و عملکرد حرارتی مصالح حاوی نانوذرات فوتوکاتالیستی TiO_2 ، در مقیاس کوچک و در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفته است. از طرف دیگر، در مطالعات پیشین میزان اثرپذیری مصالح خنک در سطوح افقی و عمودی با یکدیگر مقایسه نشده است که در این پژوهش به آن پرداخته شده‌است. این مطالعه به اهداف زیر خواهد پرداخت:

- با به کارگیری مصالح خنک حاوی نانوذرات فوتوکاتالیستی TiO_2 (به عنوان مصالح با آلبدو بالا) در کدام سطح (افقی یا عمودی) به نفع میکرو اقلیم فضای شهری است.

- آگاهی از تأثیر مواد خود تمیز شونده به عنوان یک ماده با بازتاب بالا بر دمای هوای فضای شهری



شکل ۱. دسته‌بندی سطوح شهری

استفاده از مصالح خنک در سطوح افقی فضای شهری (روسازی خیابان و پیاده‌رو)

با توجه به تأثیر آلودگی سطحی بر میزان انعکاس تابش خورشید به آسمان، روسازی با آلودگی کم یکی از عوامل ایجاد دمای هوای بالا در فضاهای شهری محسوب می‌شود. مطالعات پیشین نشان داده است، آلودگی آسفالت و بتن به ترتیب ۰.۲ و ۰.۳ است [۱۹]. آسفالت و بتن، تابش خورشیدی بالایی را جذب می‌کنند. بنابراین جایگزینی سطوح شهری تیره با مصالح روسازی آلودگی بالا اغلب در سراسر جهان پیشنهاد شده است [۱۸، ۲۰، ۲۱]. رنگ‌های تیره دارای آلودگی کم یا جذب تابشی بالا در طیف مرئی هستند، در حالی که رنگ‌های روشن‌تر دارای آلودگی یا بازتاب خورشیدی بالا هستند. بنابراین، ساختمان‌ها و مصالح سطوح شهری نقش اساسی در تعادل انرژی شهر ایفا می‌کنند زیرا تابش خورشیدی را جذب می‌کنند و از طریق فرآیندهای همرفتی گرما را به محیط آزاد می‌کنند [۲۲]. چندین مطالعه نشان داده اند که خواص حرارتی سطوح شهری می‌تواند ریزاقلیم اطراف آن‌ها را تغییر دهد [۲۳]. استفاده از آلودگی بالا در سطوح شهری دارای مزایای مستقیم و غیرمستقیم در مقیاس محلی، کاهش دمای سطح و مصرف انرژی است [۲۴]. سطوح شهری با آلودگی بالا تابش خورشیدی کمتری را جذب می‌کنند و دمای پایین‌تری نسبت به سطوح شهری با آلودگی پایین دارند. اگر در خانه‌ها و ساختمان‌ها در آب و هوای گرم استفاده شود، سقف‌هایی با بازتاب خورشیدی بالا می‌توانند انرژی خنک‌کننده مورد استفاده در ساختمان‌ها را کاهش

دهند [۲۵]. یک مطالعه تجربی اثر حرارتی روسازی با آلودگی بالا را در چندین پارک بزرگ شهری بررسی کرد. این مطالعه یکی از گسترده‌ترین نمونه‌های کاربردی (ترکیب ۴۵۰۰ مترمربع کاشی بتنی زرد روشن با ۳۷۰۰ مترمربع آسفالت زرد و بتن سفید) است. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از مواد خنک روسازی، دمای هوای محیط شهری را به میزان ۱.۹ درجه سانتی‌گراد و دمای سطح زمین را تا ۱۲ درجه سانتی‌گراد کاهش داد [۲۶]. همچنین، یک مطالعه تجربی در مقیاس محله در شرق لس‌آنجلس به منظور بررسی اثر روسازی‌های خنک بر دمای سطح (Ts) انجام شده است. بر اساس یافته‌های این مطالعه، اگر آلودگی روسازی به طور متوسط ۰.۱۸ افزایش یابد، دمای سطح کف در فضای شهری ۵ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد [۲۷]. مدل‌سازی یک پژوهش تأثیر سقف‌های سفید بر دمای هوای شهر را بررسی کرده‌اند. یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد که استفاده از سقف‌های سفید دمای هوای شهری را کاهش می‌دهد [۲۸]. مطالعه دیگری، دمای سطح در آسفالت سفید (آلودگی ۰.۵) نزدیک به ۱۲ درجه سانتی‌گراد کمتر از آسفالت سیاه با آلودگی ۰.۳ برآورد نموده است [۲۹]. طبق بررسی وانگ و همکاران، روسازی و سقف‌های بازتابی با آلودگی بالا می‌توانند دمای هوا را به طور متوسط ۰.۸ درجه سانتی‌گراد کاهش دهند [۳۰]. بسیاری از مطالعات نشان می‌دهد که با انتخاب مصالح مناسب، برنامه ریزان شهری و معماران منظر به طور قابل‌توجهی به کاهش دمای محیط شهری کمک می‌کنند.

طبیعی است. برخی از نمونه‌ها مانند بال پروانه، گیاهانی مانند کلم و نیلوفر آبی نمونه‌های از این دسته هستند. مواد خودتمیزشونده به دلیل کاربردهای گسترده، از تمیز کردن نماهای شهری و شیشه پنجره، پنل‌های خورشیدی و سیمان گرفته تا منسوجات، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. علاوه بر این کاربردها، مواد خود تمیز شونده هزینه نگهداری، انرژی و زمان تمیز کردن را بسیار کاهش می‌دهند [۳۴]. اصل خود تمیز شوندگی در سال ۱۹۷۳ توسط ویلهلم بارتلوت و تیمش در دانشگاه بن تبیین شد. «فتو کاتالیز» کلمه‌ای است که از ترکیب دو کلمه "فتو" به معنای نور و «کاتالیزور» به عنوان ماده‌ای که یک واکنش شیمیایی را تسریع می‌کند به دست می‌آید. واکنش فوتوکاتالیستی یکی از فناوری‌های اکسیداسیون پیشرفته است. TiO_2 به عنوان فوتوکاتالیزور برای این فرآیند استفاده می‌شود. (TiO_2 توسط نور فرابنفش UV با طول موج‌های خاص فعال می‌شود). شکل ۲ واکنش فوتوکاتالیستی را نشان می‌دهد. خاصیت فوتوکاتالیستی TiO_2 (تیتانیوم دی‌اکسید) باعث می‌شود، ذرات کثیفی، به راحتی با کمک آب از سطح جدا شوند [۳۵].

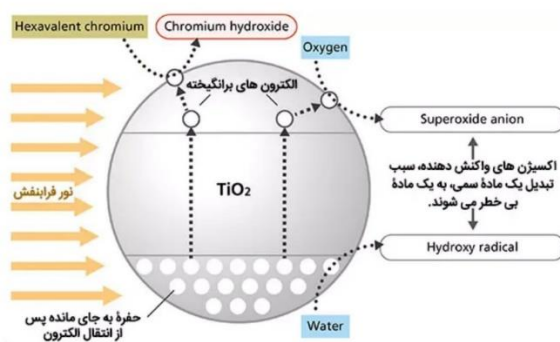
استفاده از مصالح خنک در سطوح عمودی فضای شهری (جداره‌های شهری)

مطالعات بسیار زیادی به بررسی تأثیرات استفاده از مصالح خنک (مصالح با آلبدو بالا) در جداره‌های شهری پرداخته‌اند. برخی از این مطالعات نشان داده‌است استفاده از مصالح خنک در جداره‌ها منجر به کاهش دمای هوا شده‌است، از طرفی، برخی دیگر از مطالعات نشان داده‌اند در صورت استفاده از مصالح خنک (مصالح با آلبدو بالا)، دمای هوا تغییر چندانی نداشته است. نکته حائز اهمیت این است که اثربخشی مصالح با آلبدو بالا در جداره‌های شهری کاملاً به عواملی مانند عرض جغرافیایی، هندسه شهری و عامل نمای آسمان (SVF) و ... وابسته است [۳۱، ۳۲، ۳۳]. بنابراین ارزیابی اثرات مصالح خنک (مصالح با آلبدو بالا) کاملاً به پارامترهای فیزیکی هر فضای شهری بستگی دارد.

مصالح خنک حاوی نانوذرات فوتوکاتالیستی

TiO_2 ، (به اختصار P-S- TiO_2)

بسیاری از فناوری‌ها در دنیای امروز برگرفته از طبیعت هستند. خاصیت خود تمیز شوندگی یکی از این ویژگی‌های



شکل ۲. واکنش‌های فوتوکاتالیستی روی سطح ماده TiO_2

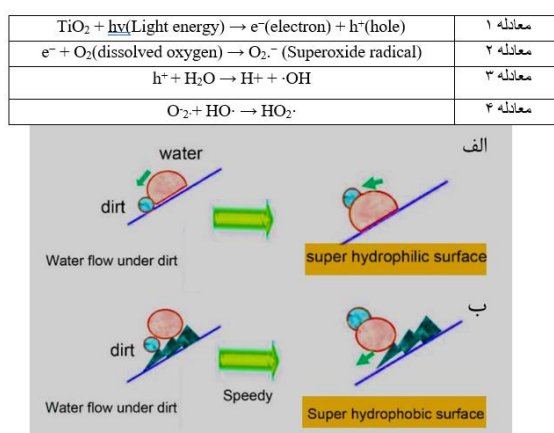
شده است. (۱-۳). رادیکال‌های هیدروکسیل تشکیل شده در طی این واکنش‌ها نیز به تجزیه آلاینده‌ها از طریق فرآیند تخریب فوتوکاتالیستی کمک می‌کنند (معادله ۴) [۳۶، ۳۷، ۳۸]. سطوح خودتمیز شونده به دو گونه سطوح آب‌دوست و آب‌گریز تقسیم می‌شوند. در سطوح آب‌دوست، آب روی

فرآیند فوتوکاتالیستی تیتانیوم دی‌اکسید

قرار گرفتن مداوم در معرض نور منجر به تشکیل دمای بالا در سطح تیتانیوم دی‌اکسید می‌شود و این به نوبه خود منجر به تخریب آلاینده‌ها در سیستم آب می‌شود. تجزیه آلاینده‌ها با کمک اکسیژن محلول موجود در آب در معادلات نشان داده

هستند. دلیل آن این است که این سطوح بیشتر در معرض اشعه ماوراءبنفش خورشید هستند. تابش اشعه ماوراءبنفش منجر به تغییر ساختاری در سطح TiO_2 می‌شود و در نتیجه، نیروی سطحی را در امتداد مرز جامد-مایع القا می‌کند و متعاقباً، زاویه تماس تغییر می‌کند. همچنین تابش اشعه ماوراءبنفش باعث ایجاد فضای خالی اکسیژن می‌شود و در نتیجه یون‌های Ti^{4+} به Ti^{3+} تبدیل می‌شوند [۳۹].

سطوح پخش می‌شود، - کثیفی و سایر ناخالصی‌ها را از بین می‌برد. در مقابل، قطرات آب در پوشش‌های خود تمیزشونده آب‌گریز، روی سطوح می‌لغزند و می‌چرخند و در نتیجه آن‌ها را تمیز می‌کنند (شکل ۳). نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید می‌توانند با جذب نور فرابنفش (UV) در حضور مولکول‌های آب، اجزای اکسیژن فعال تولید کنند. این اجزا می‌توانند به طور مؤثر زمینه‌های باکتریایی را از بین ببرند و مولکول‌های آلی و آلاینده‌های متصل به سطح را تجزیه کنند. کاربرد مصالح خود تمیز شونده در فضای باز شهری مناسب



شکل ۳. نمایش طرحواره فرآیند خود تمیز شونده روی (الف) یک سطح فوق آب‌دوست (ب) یک سطح فوق آب‌گریز

میامی (فلوریدا) به طور تجربی ۵۸۶ ماده شهری را به مدت سه سال در فضای باز قرار داد. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که میانگین آلودگی مواد با آلودگی حدود ۰.۸ به حدود ۰.۶ رسیده‌است. با گذشت زمان، ۲۵٪ از ارزش آلودگی مواد کاهش یافته است. در برخی از نمونه‌ها، آلودگی به حدود ۷۰ درصد کاهش یافته است [۴۲]. یک مطالعه موردی بر روی یک نمای معماری در کالیفرنیا به مدت دو سال انجام شده است. در این مطالعه استفاده از مواد خود تمیز شونده با مواد معمولی مقایسه شد. یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد که پس از دو سال، تقریباً ۰.۱ آلودگی مواد به دلیل کثیفی از بین می‌رود و آلودگی کاهش می‌یابد [۴۳]. ناهمواری روی سطوح و ناخالصی‌های کوچک در مصالح می‌تواند آلودگی یک سطح را کاهش دهد [۴۴]. طبق یک بررسی تجربی، استفاده از TiO_2 منجر به سطوح صاف‌تر می‌شود. سطوح صاف شهری تابش خورشید را کمتر جذب می‌کنند و در نتیجه دمای سطح

سطوح شهری (جداره‌ها و روسازی‌ها)، به دلیل قرار گرفتن در معرض ریزش‌های اقلیمی، گرد و غبار و آلودگی هوا دچار فرسایش می‌شوند. این موضوع باعث می‌شود سطوح شهری کثیف شوند و طول عمر آن‌ها نیز کم شود. مطالعات زیادی اثبات کرده‌اند که کثیف شدن سطوح شهری منجر به کاهش میزان آلودگی سطوح خواهد شد. به عبارت دیگر میزان جذب خورشید با میزان آلودگی سطوح شهری ارتباط مستقیم دارد. که به دلیل کثیف شدن سطوح در طول زمان، آلودگی سطوح شهری (بازتاب خورشیدی) کاهش می‌یابد. و این میزان از کاهش آلودگی سطوح منجر به جذب تابش‌های خورشیدی توسط سطوح خواهد شد [۴۰].

به عنوان مثال، تحقیقات نشان می‌دهد که آلودگی بتن سفید و خاکستری به ترتیب تقریباً ۰.۷-۰.۸ و ۰.۳-۰.۴ است که با گذشت زمان به دلیل هوازدگی و کثیف شدن به طور چشمگیری کاهش می‌یابد [۴۱]. همچنین، یک مطالعه در

سنگ، آجر، رنگ، گچ، شیشه، چوب و ... به وجود آورده است. این موضوع منجر شده است که توجه برنامه‌ریزان شهری و طراحان به استفاده از این مصالح در ساختمان‌ها و فضاهای شهری دوچندان شود. "سیلویا لیدکر" در کتابی با عنوان "مصالح نانو در معماری" [۴۵، ۴۶]، انواع مختلف کاربرد "مصالح مجهز شده به نانو ذرات" را در سراسر جهان بررسی نموده است. در ادامه برخی نمونه‌های جهانی کاربرد مصالح نانو در سطوح افقی و عمودی بیان شده است.

موزه آرا پیسیس (Ara Pacis Augustae) شکل ۴، نمونه کاربرد مصالح خود تمیز شونده در جداره شهری (سطوح عمودی) است. این موزه یک مجموعه ساختمانی است که شامل چندین گالری، نمایشگاه، کتابخانه، اتاق‌های کنفرانس رستوران و یک میدانچه کوچک مقابل آن است. نمای ساختمان با سنگ تراورتن و همچنین رنگ سفید پوشیده شده است. مصالح این موزه به یک پوشش خود تمیز شونده (به صورت نامرئی) تجهیز شده‌اند. چون این موزه در یک محدوده آلوده از شهر رم است، مصالح خود تمیز شونده، منجر به حفظ کیفیت جداره‌های این موزه (تمیز ماندن سطوح سفید نما) برای مدت طولانی شده است.



شکل ۴. کاربرد مصالح خود تمیز شونده در جداره شهری (سطوح عمودی شهری)

فضای شهری شده است. و برای مدت طولانی تمیز مانده‌اند. همچنین با توجه به اینکه بارش‌های فراوان در این منطقه وجود دارد، این پوشش‌های خود تمیز شونده منجر به کاهش دفعات تمیز کردن جداره‌های شهری در بازه زمانی بسیار طولانی می‌شوند. بنابراین به لحاظ اقتصادی و هزینه‌های نگهداری، بسیار مقرون به صرفه هستند.

کاهش می‌یابد [۴۰]. مصالح خود تمیز شونده به عنوان یک راه‌حل امیدوارکننده جهت حفظ تمیزی سطوح شهری یا به عبارتی حفظ آلبدو اولیه مصالح در سطوح شهری عمل می‌کند. مطالعات نشان می‌دهد مصالح خود تمیز شونده حاوی TiO_2 مانند مصالح خنک در سطوح شهری عمل می‌کند. به طور کلی، پوشش‌های فتوکاتالیستی TiO_2 را می‌توان در هنگام ساخت بر روی سطوح قرار داد. همچنین پس از اتمام مراحل ساخت و نصب سطوح شهری، پوشش‌ها به راحتی بر روی سطوح پاشیده می‌شوند. از مزایای استفاده از این پوشش‌ها در نمای ساختمان جلوگیری از کثیفی و آلودگی سطوح، کاهش آلودگی محیطی و حفظ ظاهر ساختمان در برابر شرایط محیطی می‌باشد. این پوشش‌ها می‌توانند عمر طولانی داشته باشند و در نهایت تغییر ظاهری بسیار ناچیزی داشته باشند.

بررسی نمونه‌های جهانی و داخلی از کاربرد مصالح نانو در سطوح شهری جداره‌ها (سطوح شهری عمودی) و راه‌ها (سطوح شهری افقی) فناوری نانو، پتانسیل‌های بسیار ارزشمندی را در مصالح ساختمانی مختلف (سیمان، بتن،

همچنین نمونه دیگری از کاربرد مصالح خود تمیز شونده در سطوح عمودی، پروژه نوسازی یک شهرک مسکونی در هامبورگ، آلمان شکل ۵ است. این پروژه به منظور نوسازی جداره‌های شهری حدود ۳۶۸۵ مترمربع یک شهرک مسکونی از پوشش‌های خود تمیز شونده سفید و رنگی استفاده کرده است. در این پروژه جداره‌ها رنگ سفید و بالکن‌ها بارنگ‌های برجسته مشخص شده‌اند. این پوشش منجر به بهبود کیفیت



شکل ۵ کاربرد مصالح خود تمیز شونده در جداره شهری (سطوح عمودی شهری)

با رنگ‌های مختلف پوشیده شده است. سرامیک‌های نما به گونه‌ای چیده شده‌اند که از دور و نزدیک تصاویر متفاوتی را به نمایش می‌گذارند. برای حفظ ظاهر خوب و پایین نگه داشتن هزینه نگهداری و تمیز کردن کاشی‌های نما (هزینه‌های اقتصادی) به پوشش‌های خود تمیز شونده فوتوکاتالیستی مجهز شده‌اند. این پوشش‌ها روی کاشی‌ها پاشیده یا پخته شده‌اند و ماندگاری بالایی دارند. شکل ۶

نمونه دیگر کاربرد مصالح خود تمیز شونده در سطوح عمودی شهری، طراحی جداره شهری مجموعه فرهنگی **MAC** (Muhammad Ali Center) است. **MAC** یک مرکز فرهنگی بین‌المللی است و رویدادهای فرهنگی بسیار زیادی را برگزار می‌کند. این مجموعه در سواحل رودخانه اهایو قرار دارد. نمای این ساختمان بسیار چشمگیر است که با یک الگوی پیچیده و خاص از کاشی‌های سرامیکی



شکل ۶ کاربرد مصالح خود تمیز شونده در جداره شهری (سطوح عمودی شهری)

با رنگ‌های روشن، این موضوع در آن‌ها بیشتر نمایان است. استفاده از سنگ‌فرش‌های بتنی خود تمیز شونده در کف فضای شهری یک مجموعه تفریحی در آمریکا به نام "**picada**" نمونه کاربرد این مصالح در سطوح افقی شهری است (شکل ۷).

یکی دیگر از سطوح مهم شهری، کف سازی فضای شهری (سطوح افقی) است. سطوح کف، همواره در معرض آلودگی‌های بسیار زیاد شهری قرار دارند. کاربرد مصالح خود تمیز شونده در سطوح کف می‌تواند برای مدت طولانی، کیفیت پاکیزگی مصالح کف را حفظ کنند. به خصوص مصالح



شکل ۷ کاربرد مصالح خود تمیز شونده در کف فضای شهری (سطوح افقی شهری)

دیگری از کاربرد مصالح خود تمیز شونده در جداره‌های شهری ایران است.

در شکل ۸ استفاده از رنگ خود تمیز شونده حاوی تیتانیوم دی‌اکسید در برج هرمزان و کاخ صاحبقرانیه، نمونه موردی



شکل ۸ استفاده از رنگ خود تمیز شونده، سمت راست: برج هرمزان در منطقه ۲۲ تهران، سمت چپ: کاخ صاحبقرانیه تهران

آب‌وهوای گرم و خشک است. و در 32° $38'$ $30''$ N و 51° $39'$ $51''$ E دقیقه قرار گرفته است. این میدان یک فضای شهری بسیار سرزنده و با کاربری‌های تجاری و تفریحی است. به همین دلیل افراد زیادی در این میدان و در ساعات مختلف روز حضور پیدا می‌کنند. این میدان تاریخی دارای ردیف طاق‌های معماری است که نما را پوشانده است. در گذشته مصالح جداره میدان گچ بوده است. علاوه بر این، طاق‌های معماری از نمای میدان محافظت می‌کنند. به مرور زمان مصالح آجری جایگزین مصالح گچی در نمای میدان شده است. بنابراین دمای هوای میدان به‌منظور آسایش استفاده‌کنندگان از این فضای شهری بسیار حائز اهمیت است. در شکل ۱۰ مشخصات کالبدی میدان نمایش داده شده است.

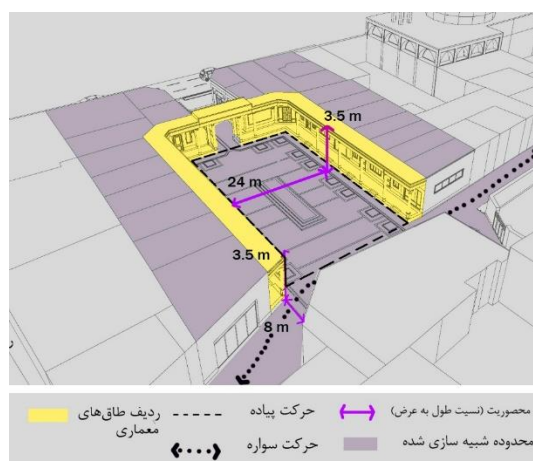
مواد و روش‌ها

همان‌طور که ذکر شد این پژوهش به بررسی اثر مصالح با آلبدو بالا (مصالح خنک حاوی نانوذرات فوتوکاتالیستی TiO_2) در دو نوع سطح شهری افقی و عمودی پرداخته است. این ارزیابی با استفاده از نرم‌افزار ENVI-met در فضای شهری میدانی در محله جلفا در شهر اصفهان پرداخته است. این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی شرایط محیطی استفاده می‌شود. نرم‌افزار ENVI-met یک مدل ریز اقلیم غیرهیدرواستاتیک سه‌بعدی است و معمولاً دارای وضوح زمانی ۱۰ ثانیه و وضوح مکانی از ۰.۵ متر تا ۱۰ متر است [۴۷]. میدان محله جلفا یکی از میدان‌های تاریخی شهر اصفهان است که در محله جلفا قرار گرفته است شکل ۹. اصفهان دارای

بررسی تطبیقی میزان اثرگذاری مصالح خنک حاوی نانوذرات فوتوکاتالیستی TiO_2 بر دمای هوا به عنوان یک پارامتر میکرواقلیم شهری، در سطوح افقی و عمودی فضای شهری... ۷۱



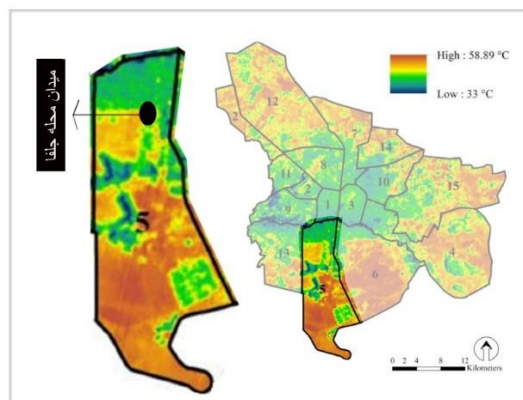
شکل ۹. موقعیت میدان محله جلفا در اصفهان



شکل ۱۰. مشخصات کالبدی میدان محله جلفا

همچنین، این میدان در آب‌وهوای گرم و خشک قرار دارد و کاهش دمای هوا در این نوع اقلیم ضروری است. بنابراین، نتایج این مطالعه را می‌توان به اقلیم‌های مشابه و با تناسبیات کالبدی مشابه میدان محله جلفا تعمیم داد.

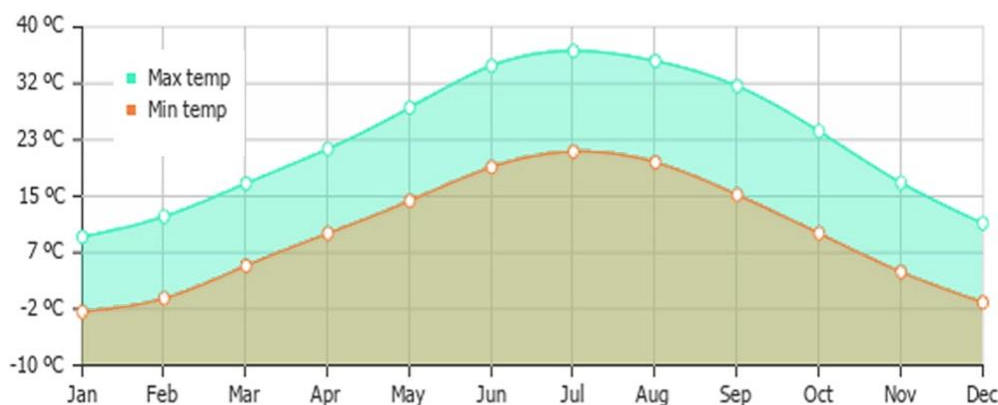
از مهم‌ترین دلایل انتخاب میدان محله جلفا به عنوان سایت جهت بررسی اثر مصالح خنک حاوی نانوذرات فوتوکاتالیستی TiO_2 این است که همان‌طور که نقشه دمای سطح زمین اصفهان (شکل ۱۱) نشان می‌دهد، این میدان نزدیک به هسته‌های جزائر گرمایی شهر اصفهان است.



شکل ۱۱. نقشه دمای سطح زمین اصفهان [48]

بارندگی سالانه در اصفهان در شکل ۱۲ نشان داده شده است. ماه جولای در اصفهان، یک ماه گرم تابستانی، با میانگین دمای نوسان بین ۳۶.۴ درجه سانتی گراد تا ۲۱.۵ درجه سانتی گراد است. بر اساس داده‌های هواشناسی، ۳۱ تیر ماه ۱۴۰۱ یک روز گرم برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. جزئیات پارامترهای ورودی شبیه‌سازی در جدول ۱ گزارش شده است.

ایستگاه هواشناسی فرودگاه بین‌المللی اصفهان برای دریافت داده‌های هواشناسی ورودی انتخاب شده است. (منبع: www.wunderground.com). گیرنده‌هایی که پارامترهای مورد نیاز را بر حسب ساعت جمع‌آوری می‌کنند در نزدیکی جداره‌های میدان و مرکز میدان قرار گرفتند. داده‌های مربوط به ارتفاع ۱.۵ و ۰.۷ متر در این مطالعه برای بررسی دمای هوای فضای شهری به دست آمده است. میانگین دما و



شکل ۱۲. میانگین و حداکثر دما منبع: www.worlddata.info

جدول ۱ پارامترهای ورودی برای شبیه‌سازی‌ها

مدل ENVI-met		عکس هوایی سایت	
۱۴۰۱/۰۴/۳۱	تاریخ شبیه‌سازی	4.50	سرعت باد (Wind speed in 10m)
۰۶:۰۰ صبح	زمان شروع شبیه‌سازی	شرقی	جهت باد (Wind direction)

بررسی تطبیقی میزان اثرگذاری مصالح خنک حاوی نانوذرات فوتوکاتالیستی TiO_2 بر دمای هوا به عنوان یک پارامتر میکرواقلیم شهری، در سطوح افقی و عمودی فضای شهری... ۷۳

طول زبری در محل اندازه گیری (Roughness length at measurement site)		۰.۰۱۰	مجموع زمان شبیه سازی		۱۲ ساعت	
حداکثر رطوبت نسبی (%)		۲۷.۰۰	حداکثر دما (سانتی گراد)		۴۰.۰۰	
حداقل رطوبت نسبی (%)		۶.۰۰	حداقل دما (سانتی گراد)		۱۷.۲۲	
ایجاد مدل شبیه سازی شده	محور x x axis station	34	طول جغرافیایی Longitude	32.38	2	محور x (DX dimensions of x axis station)
	محور y y axis station	42	عرض جغرافیایی Latitude	۵۱.۳۹	2	محور y (DX dimensions of y axis station)
	محور z z axis station	10				محور z (DX dimensions of z axis station)

میدان) و سطح عمودی (جداره‌های میدان) انجام شده است. (جدول ۲). مشخصات مربوط به خواص مصالح به کار رفته در شبیه‌سازی‌ها برای مدل پایه، و هر دو مدل پیشنهادی در جدول ۳ گزارش شده است.

نرم‌افزار ENVI-met امکان بررسی تأثیر مصالح مختلف در فضای شهری را فراهم کرده است. در این مطالعه یک شبیه‌سازی برای وضع موجود میدان (مدل پایه) و دو شبیه‌سازی به‌منظور بررسی اثر مصالح خنک حاوی نانوذرات فوتوکاتالیستی TiO_2 در سطح افقی میدان (سطح روسازی

جدول ۲. مدل‌های پیشنهادی

تغییرات انجام شده در شبیه‌سازی	مدل
این شبیه‌سازی وضعیت فعلی میدان را نشان می‌دهد	۱) مدل پایه (وضع موجود)
در این شبیه‌سازی، از مصالح خنک (رنگ سفید اصلاح شده توسط $P-S-TiO_2$) در جداره‌های میدان استفاده شده‌است (آلبدو به ۰.۹ افزایش یافته‌است)	۲) مدل استفاده از مصالح خنک $P-S-TiO_2$ در جداره‌های میدان (سطح عمودی)
در این شبیه‌سازی تغییر مصالح روسازی و سقف میدان را به مصالح خنک $P-S-TiO_2$ نشان می‌دهد.	۳) مدل استفاده از مصالح خنک $P-S-TiO_2$ در کف‌سازی میدان (سطح افقی)

جدول ۳. ویژگی‌های مصالح در مدل ۱ (www.envi-met.com)، ویژگی‌های مصالح در مدل ۲ و ۳: (https://b2n.ir/f14802)، [۴۲، ۴۹، ۵۰].

	<p>۱) مدل پایه وضع موجود</p>	
	مشخصات	کف سازی بتنی
Albedo	۰,۴۰۰	۰,۱۲۰

0,900	0,900	Emissivity
0,010	0,010	roughness length



مدل استفاده از

مصالح خنک

P-S-TiO₂

در جداره میدان

(سطح عمودی)

مشخصات	رنگ سفید اصلاح شده با P-S-TiO ₂	کف سازی بتنی	آسفالت
Albedo	0.90	0,400	0,120
Emissivity	0.90	0,900	0,900
roughness length	0.005	0,010	0,010



مدل استفاده از

مصالح خنک

P-S-TiO₂

در کف سازی میدان

(سطح افقی)

مشخصات	مصالح پیش‌بام سفید اصلاح شده با P-S-TiO ₂	کف سازی بتنی سفید اصلاح شده با P-S-TiO ₂	آسفالت سفید اصلاح شده با P-S-TiO ₂
Albedo	0.90	0.95	0.40
Emissivity	0.90	0.96	0.90
roughness length	0.005	0.005	0.005

لاگر: GM1365، دقت: ± 0.3 درجه سانتی‌گراد، محدوده: ۳۰- تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد). داده‌ها نشان می‌دهد که نتایج شبیه‌سازی شده تقریباً ۰.۷۸ درجه سانتی‌گراد بالاتر از نتایج اندازه‌گیری شده است. بر اساس مطالعات قبلی، نتایج شبیه‌سازی در این تحقیق از دقت قابل قبولی برخوردار است. خطا ممکن است ناشی از مقادیر یکپارچه خواص مواد، محدودیت شبیه‌سازی دقیق ویژگی‌های مورفولوژیکی و تابش خورشیدی ثابت و تنظیمات جریان جوی در طول

مطالعات قبلی نتایج ENVI-met را با مقایسه نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌های میدانی تأیید کردند. یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد که نرم‌افزار ENVI-met شرایط محیطی را به دقت شبیه‌سازی می‌کند [۵۱، ۵۲]. در این بررسی، نتایج شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده برای اعتبارسنجی با هم مقایسه شدند. نظارت در محل دقیقاً در همان ساعاتی انجام شد که سناریوهای شبیه‌سازی شده بررسی شدند (شکل ۱۳). داده‌های دمای هوا توسط دیتالاگر اندازه‌گیری شد (مدل دیتا

(جدارهای میدان) در نظر گرفته شده‌اند: دمای هوا، میانگین دمای تابشی (MRT) و دمای سطح روسازی Ts.

شبهه‌سازی باشد. [۵۳]. پارامترهای زیر برای تجزیه و تحلیل اثر مصالح خنک حاوی نانوذرات فوتوکاتالیستی TiO_2 در سطح افقی میدان (سطح روسازی میدان) و سطح عمودی



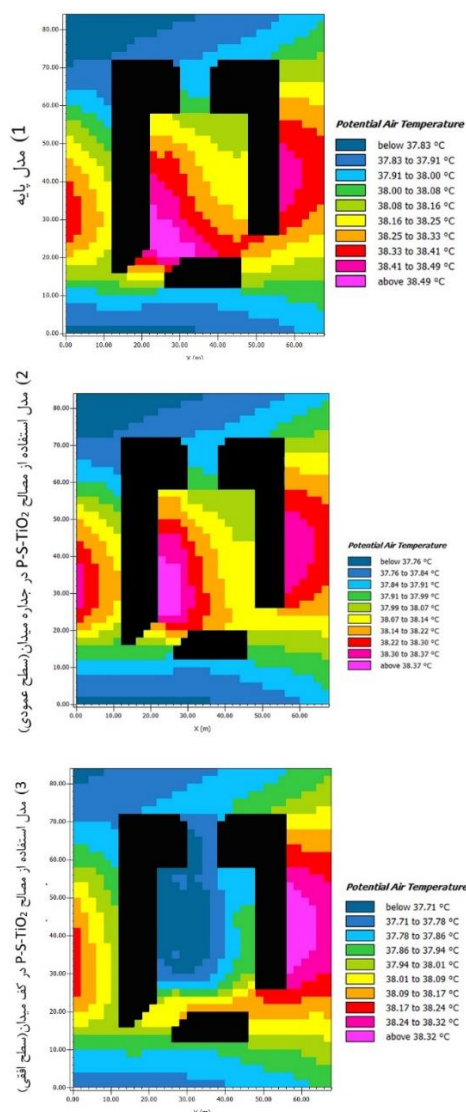
شکل ۱۳. الف) محل دیتالاگر، ب) مدل دیتالاگر

در بخش‌های مرکزی میدان میزان دمای هوا در مقایسه با نقشه پایه حدود ۰.۶ درجه سانتی‌گراد کم شده است. میزان کاهش دمای هوا در مدل ۳، در ارتفاع ۰.۷ متر به حدود ۰.۸ درجه سانتی‌گراد می‌رسد.

همانطور که در ادبیات موضوع بیان شد استفاده از مصالح خنک با آلبدو بالا منجر به کاهش دمای سطح می‌شود. چون آلبدو بالا تشعشعات خورشیدی کمتری را جذب می‌کند و غالب آن‌ها را منعکس می‌کند. اما در مدل ۲ با وجود استفاده از مصالح با آلبدو بالا در سطح عمودی یعنی جدارها، تغییر محسوسی در دمای هوا مشاهده نشده است. دلیل این موضوع در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نقشه توزیع MRT نشان می‌دهد که "میانگین دمای تابشی" در مدل ۲ افزایش یافته است. در مدل ۲، انعکاس تشعشعات خورشید به جدارهای مقابل برخورد کرده و مجدداً برمی‌گردند، این امر باعث افزایش تشعشعات خورشیدی خواهد شد. به عبارتی در سطوح عمودی چون جدارها مقابل وجود دارد استفاده از مصالح با آلبدو بالا در بسیاری از موارد نمی‌تواند اثرگذار باشد و حتی باید با احتیاط بیشتری استفاده گردد.

یافته‌ها

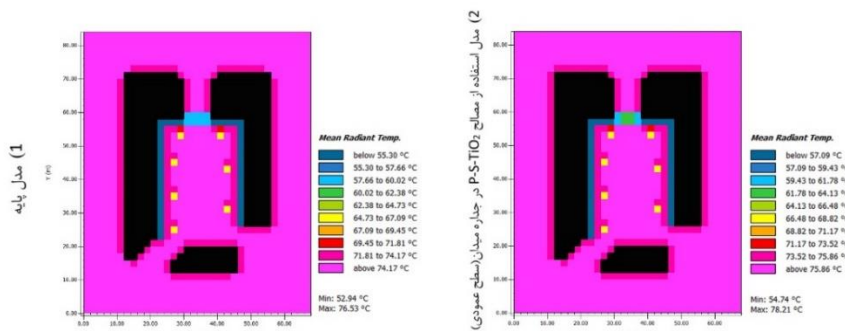
مدل ۱ وضع موجود میدان را نشان می‌دهد و در مدل ۲ مصالح جدارهای میدان (سطوح عمودی)، به مصالح $P-S-TiO_2$ تغییر یافتند. همچنین در مدل ۳ مصالح روسازی میدان به مصالح $P-S-TiO_2$ تغییر یافتند. نتایج شبهه‌سازی مدل پایه با مدل‌های پیشنهادی مقایسه شدند. نقشه‌های توزیع میانگین دمای هوا در دو مدل پیشنهادی و مدل پایه در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در مدل پایه به‌خصوص در بخش‌های مرکزی و جنوب‌غربی میدان دمای هوا بالا و حداکثر ۳۸.۴۹ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد به عبارتی جزائر گرمایی شکل گرفته است. در مدل ۲، با وجود آنکه از مصالح خنک $P-S-TiO_2$ در جدارها استفاده شده است اما نقشه توزیع دمای هوای میدان، تغییر محسوسی در بخش‌های مرکزی و جنوبی میدان نشان نمی‌دهد. در مدل ۳، در سطح روسازی میدان از مصالح خنک $P-S-TiO_2$ استفاده شده است و همان‌طور که نقشه توزیع میانگین دمای هوای میدان نشان می‌دهد در بخش‌های وسیعی از میدان به‌خصوص



شکل ۱۴. نقشه توزیع میانگین دمای هوای میدان جلغا در مدل پایه و دو مدل پیشنهادی (ساعت ۱۳ عصر، ارتفاع ۱.۵ متر)

گزارش شده است که استفاده از مصالح خنک در سقف ساختمان‌ها و روسازی‌ها اغلب یک وضعیت برد-برد است که می‌تواند منجر به کاهش تقاضای انرژی برای خنک کردن فضای داخلی ساختمان شود. تحقیقات قبلی نشان داده است که اثربخشی مواد خنک بر سطوح شهری تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند عرض جغرافیایی، هندسه شهری و فاکتور دید به آسمان (SVF) است. [۵۴،۵۵،۵۶]

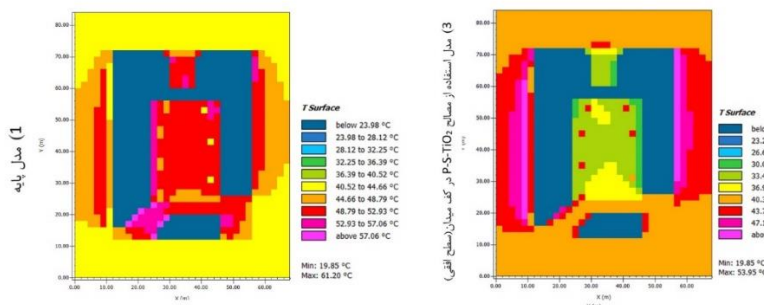
این موضوع در مطالعات پیشین نیز نشان داده شده است. نتایج برخی از آن‌ها نشان می‌دهد که استفاده از مواد خنک (مواد آلبدو بالا) در سطوح شهری باعث کاهش دمای هوا می‌شود. با این حال، برای جبران تشعشعات ناشی از افزایش آلبدو کافی نیست. به عبارتی در جنگ میان کاهش دمای هوا توسط مصالح خنک و افزایش انعکاس تشعشعات خورشیدی، در بسیاری از موارد افزایش تشعشعات پیروز می‌شود. همچنین



شکل ۱۰. نقشه توزیع میانگین دمای تابشی میدان جلغا در مدل پایه و مدل ۲ (ساعت ۱۳ عصر، ارتفاع ۱.۵ متر)

داد؛ در بخش‌های وسیعی از میدان به خصوص در بخش‌های مرکزی میزان دمای هوا در مقایسه با نقشه پایه حدود ۰.۶ درجه سانتی‌گراد کم شده است. دلیل این میزان کاهش دما در واقع خنک شدن سطح روسازی میدان است. از طرفی چون جهت کف فضای شهری روبه آسمان است بنابراین، استفاده از مصالح خنک با آلبدو بالا در کف فضای شهری مؤثرتر واقع شده است چون انعکاس تشعشعات خورشید به آسمان برگشته است.

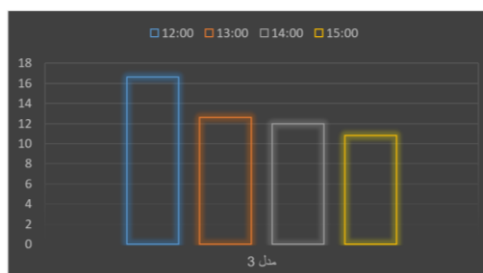
در شکل ۱۵، نقشه دمای سطح روسازی میدان در مدل پایه با مدل ۳ که در آن مصالح خنک P-S-TiO_2 با آلبدو بالا در کف فضای شهری میدان استفاده شده است نشان می‌دهد، میانگین دمای سطح میدان در مدل ۳ حدود ۴ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته است. این درحالی است که در بخش‌های مرکزی میدان کاهش دمای سطح در برخی نقاط تا حدود ۱۶ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته است (شکل ۵). بنابراین سطح روسازی میدان در مدل ۳ در مقایسه با مدل پایه خنک‌تر شده است. همان‌طور که در نقشه توزیع میانگین دمای هوا نشان



شکل ۱۵. نقشه توزیع میانگین دمای سطح روسازی میدان جلغا در مدل پایه و مدل ۳ (ساعت ۱۳ عصر)

که مشاهده می‌شود در ساعت ۱۲ ظهر بیشترین میزان کاهش دمای سطح روسازی در مدل ۳ را نشان می‌دهد.

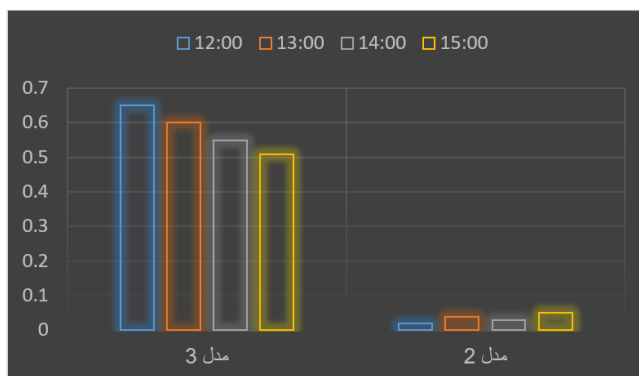
در شکل ۱۶ نتایج دمای سطح روسازی در مدل ۳ با مدل پایه در ۴ ساعت میانی روز با یکدیگر مقایسه شدند، همان‌طور



شکل ۱۶. مقادیر تغییر دمای سطح روسازی میدان در مدل ۳ برای ساعات میانی روز (از ۱۲ تا ۱۵ بعد از ظهر) در رسپتور ۱

چشمگیرتر است. در واقع استفاده از مصالح خنک P-S-TiO₂ در سطوح افقی یعنی روسازی میدان، منجر به کاهش دمای هوا در مرکز میزان شده است. در حالی که استفاده از مصالح خنک P-S-TiO₂ در سطح عمودی یعنی جداره‌های شهری میدان، تغییر محسوسی در دمای هوا ایجاد نکرده است.

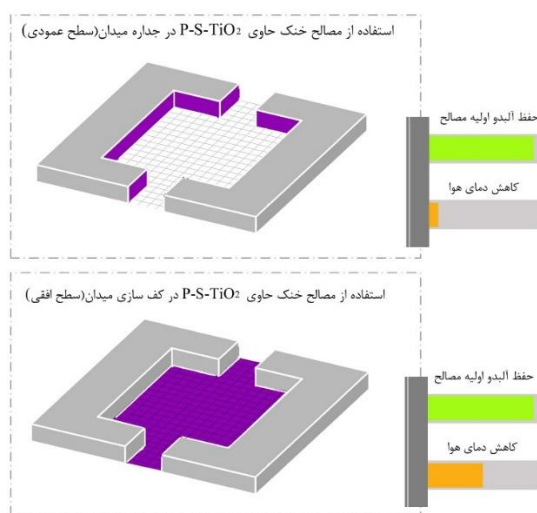
در جدول ۱ مکان رسیپتورها مشخص شده‌اند. نتایج رسیپتور ۱ در مدل پایه با مدل‌های پیشنهادی ۲ و ۳ با یکدیگر مقایسه شدند. این مقایسه در ساعات میانی روز و در ارتفاع ۱.۵ متری صورت گرفته است. همان‌طور که در شکل ۱۷ نشان داده شده است، در مدل ۳ در مقایسه با مدل ۲ میزان کاهش دما بسیار



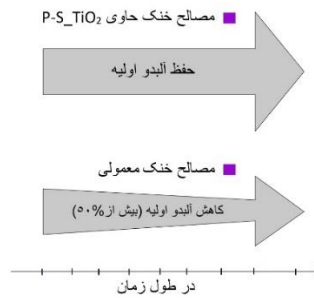
شکل ۱۷. مقادیر تغییر دمای هوای میدان برای ساعات میانی روز (از ۱۲ تا ۱۵ بعد از ظهر) در رسیپتور ۱

مصالح خنک در جداره‌های شهری به طور کلی با چالش بسیاری همراه است و به تناسبات فیزیکی فضای شهری وابسته است. علاوه بر آن، این موضوع ثابت شده است که با گذشت زمان مصالح به کاررفته در سطوح شهری آلوده خود را در روندی نزولی از دست می‌دهند، یعنی آلوده آنها کم می‌شود شکل ۱۹.

در هر دو سطوح عمودی و افقی فضای شهری میدان، این مصالح خاصیت ارزشمند خودتمیز شونده را فراهم می‌کنند، اما در سطوح افقی علاوه بر خودتمیز شونده، می‌توان انتظار کاهش دمای هوا را نیز در میدان محله جلفا با این تناسبات شهری (هندسه شهری) داشت شکل ۱۸. همان‌طور که مطالعات پیشین نیز اثبات کرده‌اند استفاده از



شکل ۱۸. اثرات مصالح خنک حاوی P-S-TiO₂ روی سطح عمودی و افقی



شکل ۱۹. کاهش میزان آلبدو اولیه مصالح سطوح شهری با گذشت زمان

بحث و نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر، تغییر نگرش عمیقی نسبت به ظرفیت سطوح شهری شکل گرفته است. به طور کلی، سطوح شهری به دو سطح عمودی (روسازی‌های خیابان‌ها)، سطوح افقی (جداره‌های شهری) تقسیم می‌شوند. در واقع، این سطوح را به عنوان یک فرصت کلیدی برای بهینه‌سازی منابع و کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی در شهر در نظر گرفته می‌شود. این پژوهش نیز به اهمیت به‌کارگیری این سطوح شهری تأکید کرده است. در واقع مصالحی که روی این سطوح به کار گرفته می‌شوند، می‌توانند تغییرات قابل توجهی در میکرواقلیم شهری فراهم کنند. میکرواقلیم شهری یک پارامتر بسیار اثرگذار در کیفیت فضاهای شهری محسوب می‌شود. در این میان، مصالح جدید روز به روز در حال گسترش هستند و اثرگذاری آن‌ها در مقیاس آزمایشگاهی بررسی شده‌اند اما اثرگذاری آن‌ها در مقیاس فضای شهری مورد توجه قرار نگرفته است. در حالی که فضای شهری پیچیدگی‌های خاص خود را دارد و پارامترهای فیزیکی متفاوت آن قابل توجه هستند.

این پژوهش به بررسی اثرگذاری یک مصالح نوین به نام مصالح خنک حاوی نانوذرات فوتوکاتالیستی TiO_2 در فضای شهری میدان پرداخته است. مصالح نانو، قدرت خود تمیزشوندگی ارزشمندی دارند و مطالعات پیشین توانمندی‌های نانو را در مصالح ساختمانی نشان داده‌اند و روز به روز متقاضیان استفاده از مصالح حاوی نانو افزایش می‌یابد. اما آنچه برای این پژوهش اهمیت دارد این است که به‌کارگیری این مصالح جدید به لحاظ عملکرد حرارتی آن‌ها،

در سطوح فضای شهری چه تأثیراتی خواهند داشت. آیا تفاوتی میان به‌کارگیری مصالح حاوی نانوذرات فوتوکاتالیستی TiO_2 ، در سطوح افقی و عمودی بر میکرو اقلیم شهری هست یا خیر. این مصالح خنک حاوی نانوذرات فوتوکاتالیستی TiO_2 آلبدو بالایی دارند (همچنین تیتانیوم دی‌اکسید نیز منجر به بازتابنده‌تر شدن مصالح می‌شود) و باگذشت زمان (با کثیف شدن سطوح شهری) آلبدو آن‌ها کم نخواهد شد. این مطالعه اثر این موضوع را با استفاده از نرم‌افزار ENVI-met در فضای میدان شهری بررسی کرد.

در این پژوهش سه مدل شبیه‌سازی گردید. مدل ۱، وضعیت موجود میدان را نشان می‌دهد. مدل ۲، استفاده از مصالح خنک حاوی نانوذرات فوتوکاتالیستی TiO_2 در جداره‌های شهری میدان که یک سطح عمودی است، و مدل ۳، استفاده از مصالح خنک حاوی نانوذرات فوتوکاتالیستی TiO_2 در روسازی میدان که یک سطح افقی است را نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهد در مدل ۳ در بخش‌های وسیعی از میدان به‌خصوص در بخش‌های مرکزی، میزان دمای هوا در مقایسه با نقشه پایه حدود ۰.۶ درجه سانتی‌گراد کم شده است. میزان کاهش دمای هوا در مدل ۳، در ارتفاع ۰.۷ متر به حدود ۰.۸ درجه سانتی‌گراد نیز می‌رسد. همچنین در مدل ۳ در برخی نقاط میدان دمای سطح روسازی حدود ۱۶ درجه سانتی‌گراد خنک‌تر شده است. این در حالی است که در مدل ۲، دمای هوای میدان، تغییر محسوسی نشان نمی‌دهد.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد میزان اثرگذاری مصالح خنک حاوی نانوذرات فوتوکاتالیستی TiO_2 ، در سطوح افقی فضای شهری (روسازی‌ها) بر میکرواقلیم، در مقایسه با

صرفه اقتصادی این مصالح در جداره‌های شهری در مقایسه با تک نمای معماری دوچندان است. سطوح شهری در معرض آلودگی‌های شهری هستند، و مجهز کردن آن‌ها به ذرات نانو، هم به لحاظ کیفیت پاکیزگی در جداره‌های شهری (کاهش هزینه‌های نگهداری جداره‌ها) و هم با لحاظ اثرگذاری بر میکرواقلیم شهری، مفید خواهند بود. همچنین با افزایش مصرف انرژی در شهرها، خطر از بین رفتن منابع انرژی و کاهش سوخت‌های فسیلی دوچندان شده است. بنابراین استفاده از ظرفیت‌های موجود سطوح شهری، به‌منظور کنترل گرمای فضای شهری و کاهش دمای هوا نسبت به گذشته مهم‌تر شده است. مصالح نانو با کاهش دمای هوای فضای شهری، می‌توانند در کاهش تقاضای انرژی مصرفی در ساختمان‌ها نیز کمک‌کننده باشند که این موضوع به نوبه خود در کاهش هزینه‌های اقتصادی اثرگذار است.

تشکر و قدردانی

موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است

تأییدیه‌های اخلاقی

موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تعارض منافع

موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

منافع مالی و حمایت‌ها

موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

سهم نویسندگان: سهم نویسنده اول برابر با ۴۰٪ برای مشارکت در گردآوری داده‌ها، مطالعه و ترجمه مطالب و انجام اصلاحات ساختاری؛ سهم نویسنده دوم برابر با ۳۵٪ برای مشارکت در تصحیح داده‌های جمع‌آوری شده، انجام اصلاحات مورد نظر داوران، ویرایش و دسته‌بندی؛ و سهم نویسنده سوم برابر با ۲۵٪ برای ایده اصلی مطالعه، تدوین چکیده و مطالعه و بازنگری مقاله، نتایج مقاله، اصلاحات محتوایی مورد نظر داوران و تحلیل مطالب گزارش شده است.

سطوح عمودی (جداره‌ها) چشمگیرتر است. و دلیل اصلی آن‌هم این است که سطوح افقی روبه آسمان هستند و به‌کارگیری مصالح خنک با آلبدو بالا در آن‌ها منجر می‌شود بخش قابل‌توجهی از انعکاس تشعشعات ناشی از افزایش آلبدوی سطوح، به آسمان برگردد، این درحالی است که در سطوح عمودی، انعکاس تشعشعات ناشی از افزایش آلبدو سطوح، به جداره‌های مقابل برخورد کرده و بار تشعشعات را افزایش می‌دهد.

در فضای شهری میدان محله جلفا از یک‌طرف، استفاده از این نوع مصالح در کف به نفع فضای شهری خواهد بود و از طرف دیگر چون این مصالح در طول زمان تمیز خواهند ماند، بنابراین همواره آلبدو آن‌ها بالا می‌ماند و کاهش نمی‌یابد و عملکرد خود، مبنی بر کاهش جذب تشعشعات خورشیدی را برای مدت زمان طولانی حفظ خواهند کرد. دمای هوای یکی از پارامترهای مهم میکرواقلیم شهری است و میکرو اقلیم شهری نقش مؤثری بر کیفیت فضای شهری می‌گذارد. همچنین تمیز ماندن سطوح شهری با مصالح حاوی نانوذرات فوتوکاتالیستی TiO_2 کیفیت فضای شهری را افزایش می‌دهد. استفاده از مصالح حاوی نانوذرات فوتوکاتالیستی TiO_2 منجر به افزایش کیفیت فضای شهری میدان محله جلفا می‌شود.

تکنولوژی نانو مهم‌ترین افق به دنیای ما انسان‌ها نامیده می‌شود. فناوری نانو، قادر است مواد را تا اندازه‌های کوچک کند که با دوباره‌سازی آن‌ها بتواند مواد و فناوری‌های جدیدی را به جهان عرضه کند. ویژگی‌های شناخته‌شده در مصالح نانو، مانند: سطوح فوتوکاتالیستی خود تمیز شونده با بهره‌گیری از استراتژی‌های قدرتمند موجود در طبیعت شکل گرفته است، که میلیاردها سال پیش به کمال رسیده است. هدف اصلی مصالح خود تمیز شونده افزایش دوام، کاهش هزینه‌ها و کاهش زمان مورد نیاز برای نگهداری است. مصالح ساخته شده با ویژگی خود تمیز شوندگی، می‌توانند به راحتی توسط یک جریان طبیعی آب مانند بارندگی، تمیز شوند و هزینه نگهداری و پاک کردن معمول را کم کنند. بنابراین به لحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه هستند. موضوع کاهش هزینه‌ها و

- 205–213.
<https://doi.org/10.1097/EDE.0b013e318190ee08>
10. Vanos, J. K.; Kalkstein, L. S.; Sanford, T. J. Detecting synoptic warming trends across the US Midwest and implications to human health and heat-related mortality. *International Journal of Climatology*. 2015, 35, 85–96. <https://doi.org/10.1002/joc.3964>
 11. Howard, L. *The Climate of London: Deduced from Meteorological Observations Made in the Metropolis and at Various Places around It*, London: Harvey and Darton, J. and A. Arch, Longman, Hatchard, S. Highley and R. Hunter, 1833
 12. Carpio, M.; Gonz'alez, 'A.; Gonz'alez, M.; & Verichev, K. Influence of pavements on the urban heat island phenomenon: A scientific evolution analysis. *Energy and Buildings*. 2020, 226, Article 110379. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110379>
 13. Santamouris, M.; Ding, L.; Fiorito, F.; Oldfield, P.; Osmond, P.; Paolini, R.; Synnefa, A. Passive and active cooling for the outdoor built environment – Analysis and assessment of the cooling potential of mitigation technologies using performance data from 220 large scale projects. *Solar Energy*. 2017, 154, 14–33. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.006>
 14. Leone, A.; Federica Gobattoni, F. C. Raffaele Pelorosso, Nature-based climate adaptation for compact cities: Green courtyards as urban cool islands. *Plurimondi*. 2020, 18, 83–110. <http://plurimondi.poliba.it/index.php/Plurimondi/article/view/156>.
 15. Taleghani, M. Outdoor thermal comfort by different heat mitigation strategies- A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018, 81, 2011–2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.010>
 16. Rosenfeld, A; Akbari, H.; Romm, J. J.; Pomerantz, M. Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction. *Energy Build*. 1998, 28, 51-62. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00063-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00063-7)
 17. Qin, Y. A review on the development of cool pavements to mitigate urban heat island effect. *Renewable and sustainable energy*
 1. Leistner, P., et al. (2019). Building physics design of urban surfaces. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 323(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/323/1/012067>
 2. Croce, S., Vettorato, D. and Paparella, R. (2019) 'A Systemic Approach for the Optimization of Urban Surfaces Usage', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 290, 290, p. 012113. doi: 10.1088/1755-1315/290/1/012113.
 3. Silvia Croce, Daniele Vettorato, Urban surface uses for climate resilient and sustainable cities: A catalogue of solutions, *Sustainable Cities and Society*, Volume 75, ۲۰۲۱, ۱۰۳۳۱۳, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103313>
 4. Croce, S., Vettorato, D. and Paparella, R. (2019) 'A Systemic Approach for the Optimization of Urban Surfaces Usage', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 290, 290, p. 012113. doi: 10.1088/1755-1315/290/1/012113.
 5. Parsaee, M.; Joybari, M.M.; Mirzaei, P.A.; Haghighat, F. Urban heat island, urban climate maps and urban development policies and action plans. *Environ. Technol. Innov.* 2019, 14, 100341. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100341>
 6. Thorsson, S.; Lindqvist, M.; Lindqvist, S. Thermal bioclimatic conditions and patterns of behaviour in an urban park in Göteborg, Sweden. *Int J Biometeorol*. 2004, 48, 149-56. doi: 10.1007/s00484-003-0189-8
 7. Oke, TR. *Boundary layer climates*, 2nd ed.; Routledge, 2002 Sep 11; ISBN 9780415043199
 8. Changnon, S. A.; Kunkel, K. E.; Reinke, B. C.; Changnon, S. A.; Kunkel, K. E.; Reinke, B. C. Impacts and responses to the 1995 heat wave: A call to action. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1996, 77, 1497–1506. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<1497:IARTTH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<1497:IARTTH>2.0.CO;2)
 9. Anderson, B. G.; Bell, M. L. Weather-related mortality: How heat, cold, and heat waves affect mortality in the United States. *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*. 2009, 20,

- thealbedo of urban areas. ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS. 2012, 7, 024004. doi:10.1088/1748-9326/7/2/024004
26. Santamouris, M.; Gaitani, M.; Spanou, A.; Saliari, M.; Giannopoulou, K.; Vasilakopoulou, K.; Kardomateas, T. Using cool paving materials to improve microclimate of urban areas—Design realization and results of the flisvos project. *Building and Environment*, 2012, 53, 128-136. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.01.022>
 27. Ko, J.; Schlaerth, H.; Bruce, A.; Sander, K.; Ban-Weiss, G. Measuring the impacts of a real-world neighborhood-scale cool pavement deployment on albedo and temperatures in Los Angeles. *Environmental Research*. 2022, 17, 044027. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac58a8>
 28. Oleson, K.; Bonan, M.; Feddema, J. Effects of white roofs on urban temperature in a global climate model *Geophys. Res. Lett.* 2010, 37, L03701. <https://doi.org/10.1029/2009GL042194>
 29. Synnefa, A.; Karlessi, T.; Gaitani, N.; Santamouris, M.; Assimakopoulos, D.N.; Papakatsikas, C. Experimental testing of cool colored thin layer asphalt and estimation of its potential to improve the urban microclimate. *Build. Environ.* 2011, 46, 38-44. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.06.014>
 30. Wang, Y.; Berardi, U.; Akbari, H.; Comparing the effects of urban heat island mitigation strategies for Toronto, Canada. *Energ. Buildings*. 2016, 114, 2-19. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.046>
 31. Faragallah, R.N.; Ragheb, R.A. Evaluation of thermal comfort and urban heat island through cool paving materials using ENVI-Met. *Ain Shams Eng. J.* 2022, 13, 101609. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.10.004>
 32. Aboelata, A. Reducing outdoor air temperature, improving thermal comfort, and saving buildings' cooling energy demand in arid cities—Cool paving utilization. *Sustain.* reviews. 2015, 52, 445-459. <https://doi.org/10.1016/j.rsres.2015.07.177>
 18. Akbari, H., M. Pomerantz, and H. Taha. 2001. "Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas." *Solar Energy* 70(3): 295-310. doi: [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00089-X)
 19. Akbari, H.; Konopacki, S. Energy effects of heat-island reduction strategies in Toronto, Canada. *Energy*. 2004, 29, 191-210. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2003.09.004>
 20. Li, D.; Bou-Zeid, E. The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies. *Environmental Research Letters*, 2014, 9, 055002. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/9/5/055002>
 21. Carnielo, E.; Zinzi, M. Optical and thermal characterisation of cool asphalts to mitigate urban temperatures and building cooling demand. *Building and Environment*. 2013, 60, 56-65. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.004>
 22. Doulos, L.; Santamouris, M.; Livada, I. Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials. *Solar Energy*. 2004, 77, 231-249. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.04.005>
 23. Pisello, A. L.; Cotana, F.; Nicolini, A.; Buratti, C. Effect of dynamic characteristics of building envelope on thermal-energy performance in winter conditions: In field experiment. *Energy and Buildings* 2014, 80, 218-230. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.017>
 24. Rosenfeld, A.; Romm, J. J.; Akbari, H.; Pomerantz, M. Policies to reduce Heat Islands: Magnitudes of benefits and incentives to achieve them. In 1996 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings. 1996, 9, 177. <http://eande.lbl.gov/EAP/BEA/HIP/hiref.html>
 25. Akbari, H.; Damon Matthews, H.; Donny Seto. The long-term effect of increasing

- <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110817>
40. Berdahl, P.; Bret, S. E. Preliminary survey of the solar reflectance cool roofing materials. *Energy and Buildings*. 1997, 25, 149-158. doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)01004-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)01004-3)
41. Levinson, R.; Akbari, H. Effects of composition and exposure on the solar reflectance of portland cement concrete. *Cement and Concrete Research*. 2002, 32, 1679-1698. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00835-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00835-9)
42. Sleiman, M.; Ban-Weiss, G.; Gilbert, H.E.; François, D.; Berdahl, P.; Kirchstetter, T.W.; Destailats, H.; Levinsin, R. Soiling of building envelope surfaces and its effect on solar reflectance—Part I: Analysis of roofing product databases. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2011, 95, 3385-3399. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.08.002>
43. Tang, X.; Rosseler, O.; Chen, S.; de l'Aulnoit, S.H.; Lussier, M. J.; Zhang, J.; Ban-Weiss, G.; Gilbert, H.; Levinson, R.; Destailats, H. Self-cleaning and de-pollution efficacies of photocatalytic architectural membranes. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2021, 281, 119260. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2020.119260>
44. Berdahl, P., and S. E. Bretz. 1997. "Preliminary survey of the solar reflectance cool roofing materials." *Energy and Buildings* 25(2): 149-158. doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)01004-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)01004-3)
45. Sylvia Leydecker ,Nano Materials in Architecture, Interior Architecture and Design, Birkhäuser Basel, ISBN 978-3-7643-7994-0, <https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8321-3>
46. Steemers, K., N. Baker, D. Crowther, J. Dubiel, and M. Nikolopoulou. (2010). "Radiation absorption and urban texture." *Build. Research and Information* 26(2): 103-112. doi: <https://doi.org/10.1080/096132198370029>
47. Ozkeresteci, I.; Crewe, K.; Brazel, A. J.; Bruse, M. Use and evaluation of the ENVI-Cities Soc. 2021, 68, 102762. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102762>
33. Taleghani, M.; Berardi, U. The effect of pavement characteristics on pedestrians' thermal comfort in Toronto. *Urban Clim*. 2018, 24, 449-459. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.05.007>
34. Ragesh, P.; Ganesh, V.A.; Nair, S.V.; Nair, A.S. A review on 'self-cleaning and multifunctional materials. *Journal of Materials Chemistry A*. 2014, 2, 14773-14797. doi: <https://doi.org/10.1039/C4TA02542C>
35. Janus, M.; Zatorska, J.; Czyzewski, A.; Bubacz, K.; Nejman, E.K.; Morawsk, A.W. Self-cleaning properties of cement plates loaded with N, C -modified TiO_2 photocatalysts. *Applied Surface Science*. 2018, 330, 200-206. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.12.113>
36. Yao J, Chen H, Jiang F et al (2017) Titanium dioxide and cadmium sulfide co-sensitized graphitic carbon nitride nanosheets composite photocatalysts with superior performance in phenol degradation under visible-light irradiation. *J Colloid Interface Sci* 490:154-162
37. Gang Liao, Wu Yao, Anming She, Cheng Shi, Junqing Zuo, Delong Wu, Interfacial design of nano- TiO_2 modified recycled concrete powder for building self-cleaning, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023, 130925 <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.130925>
38. Arun, J., Nachiappan, S., Rangarajan, G. et al. Synthesis and application of titanium dioxide photocatalysis for energy, decontamination and viral disinfection: a review. *Environ Chem Lett* 21, 339-362 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01503-z>
39. Fernández-Mira, M.; Relinque, E.J.; Martínez, I.; Castellote, M. Evaluation of changes in surface temperature of TiO_2 functionalized pavements at outdoor conditions, *Energy and Buildings*. 2021, 237, 110817.

- Met. Ain Shams Eng. J. 2022, 13, 101609. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.10.004>
55. Aboelata, A. Reducing outdoor air temperature, improving thermal comfort, and saving buildings' cooling energy demand in arid cities—Cool paving utilization. *Sustain. Cities Soc.* 2021, 68, 102762. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102762>
56. Taleghani, M.; Berardi, U. The effect of pavement characteristics on pedestrians' thermal comfort in Toronto. *Urban Clim.* 2018, 24, 449–459. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.05.007>
- met model for environmental design and planning: An experiment on linear parks. *Proceedings of the 21st International Cartographic Conference (ICC)*, 2003, 10–16. <https://doi.org/ISBN: 0-958-46093-0>
48. Mirzaei, M.; Verrelst, J.; Arbabi, M.; Shaklabadi, Z.; Lotfizadeh, M.; Urban Heat Island Monitoring and Impacts on Citizen's General Health Status in Isfahan Metropolis: A Remote Sensing and Field Survey Approach. *Remote Sensing*. 2020, 12, 1350. <https://doi.org/10.3390/rs12081350>
49. Nasrollahi, N.; Hatami, Z.; Taleghani, M. Development of outdoor thermal comfort model for tourists in urban historical areas; A case study in Isfahan. *Building and Environment*. 2017, 125, 356–372. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.09.006>
50. Salata, F.; Golasi, I.; de Lieto Vollaro, R.; de Lieto Vollaro, A. Urban microclimate and outdoor thermal comfort. A proper procedure to fit ENVI-met simulation outputs to experimental data. *Sustain. Cities Soc.* 2016, 26, 318–343. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.07.005>
51. Taleghani, M.; Kleerekoper, L.; Tenpierik, M.; Van Den Dobbelsteen, A. Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands. *Building and Environment*, 2015, 83, 65–78. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.014>
52. Nasrollahi, N.; Hatami, Z.; Taleghani, M. Development of outdoor thermal comfort model for tourists in urban historical areas; A case study in Isfahan. *Building and Environment*. 2017, 125, 356–372. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.09.006>
53. Acero, J. A.; Herranz-Pascual, K. A comparison of thermal comfort conditions in four urban spaces by means of measurements and modelling techniques. *Building and Environment*. 2015, 93, 245–257. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.06.028>
54. Faragallah, R.N.; Ragheb, R.A. Evaluation of thermal comfort and urban heat island through cool paving materials using ENVI-