



جغرافیا و روابط انسانی، تابستان ۱۴۰۵، دوره ۹ شماره ۲، صص ۶۹۴-۶۷۱

«ارزیابی تأثیر تراکم و تنوع پوشش گیاهی پارک‌های جیبی بر کاهش تنش حرارتی در فضاهای باز مدارس؛ مطالعه موردی: مدارس شهر کرمانشاه، ایران»

امیر یاری نژاد^۱، حسن سجاذاده^{۲*}

۱- پژوهشگر دکتری شهرسازی، گروه شهرسازی، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

۲- استاد، گروه شهرسازی، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

sajadzadeh@basu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۶

چکیده

افزایش دمای هوا و تشدید پدیده جزیره گرمایی شهری، کیفیت ریزاقلیم و آسایش حرارتی فضاهای باز مدارس را، به‌ویژه در اقلیم‌های گرم، کاهش داده است. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی اثر پارک‌های جیبی با سطوح مختلف پوشش گیاهی بر شرایط ریزاقلیمی و آسایش حرارتی فضاهای باز مدارس در اقلیم مدیترانه‌ای با تابستان‌های گرم و خشک (Csa) انجام شد. بدین منظور، پنج سناریوی طراحی شامل وضعیت پایه بدون پوشش گیاهی و چهار سناریوی دارای تراکم‌های مختلف فضای سبز با استفاده از نرم‌افزار ENVI-met V5.6.1 شبیه‌سازی شدند. شاخص‌های دمای هوا (Ta)، میانگین دمای تابشی (MRT)، دمای معادل استاندارد (SET)، شاخص اقلیمی جهانی حرارتی (UTCI) و شاخص میانگین رأی پیش‌بینی شده (PMV) برای ارزیابی عملکرد سناریوها تحلیل شدند.

نتایج نشان داد که در سناریوی پایه، مقادیر MRT بیش از 71°C ، PMV تا $+6.8$ ، UTCI حدود 50°C و SET بیش از 43°C ، بیانگر تنش حرارتی شدید در ساعات میانی روز است. سناریوی دوم با پوشش گیاهی محدود، بهبود اندکی نسبت به وضعیت پایه ایجاد کرد؛ درحالی‌که سناریوهای سوم تا پنجم کاهش محسوسی در بار تابشی و بهبود شاخص‌های آسایش حرارتی نشان دادند. در بهترین حالت، دمای هوا 0.5 تا 2°C ، SET حدود 2 تا 4°C و PMV حدود 0.5 تا 1 واحد نسبت به سناریوی پایه کاهش یافت که عمدتاً ناشی از افزایش سایه‌اندازی و کاهش دمای تابشی بود. نتایج نشان می‌دهد کارایی پارک‌های جیبی به آرایش فضایی، تراکم و کیفیت پوشش گیاهی وابسته است، نه صرف افزایش فضای سبز. این یافته‌ها می‌تواند مبنایی برای طراحی اقلیم‌محور فضاهای باز مدارس و کاهش تنش گرمایی دانش‌آموزان باشد.

کلید واژگان: خرد اقلیم - پارک جیبی - آسایش حرارتی در مدارس - فضای سبز شهری

۱ مقدمه

بیش از ۵۰ درصد از جمعیت جهان اکنون در مناطق شهری زندگی می‌کنند که نشان‌دهنده تغییر مداوم به سمت شهرنشینی است (Rezaei et al., 2024). پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۵۰، تعداد ۶,۴ میلیارد نفر در مناطق شهری زندگی کنند (Zhang et al., 2022). شهرنشینی اگرچه با رونق اقتصادی همراه است اما با این حال، اثرات منفی ناشی از شهرنشینی سریع، کیفیت بالای زندگی شهری را که مردم انتظار آن را دارند، از بین می‌برد (Cetin et al., 2019).

با این وجود، شهرهای امروزی با چالش بزرگی به نام پدیده جزیره گرمایی شهری (UHI) روبرو هستند که با افزایش دمای سطح زمین (LST) و دمای هوا در مناطق شهری در مقایسه با حومه‌های پیرامونی مشخص می‌شود (Kim & Brown, 2021; Schwaab, 2022).

عوامل مختلف فعالیت‌های انسانی همچون شهرنشینی، حمل و نقل و صنعتی شدن در پدیده جزیره گرمایی شهری (UHI) نقش مهمی دارند (Acosta et al., 2024; Colaninno, 2023; Jang et al., 2024). پدیده جزیره گرمایی شهری زمانی رخ می‌دهد که دمای هوا در مناطق شهری به دلیل تراکم زیاد ساختمان‌ها و سطوح سنگفرش شده و کاهش دسترسی به فضاهای سبز شهری، بالاتر از محیط‌های طبیعی اطراف باشد (Mohajerani et al., 2017). این پدیده نه تنها آب و هوای محلی را تغییر می‌دهد، بلکه در بروز شرایط آب و هوایی شدید نیز نقش دارد (Ganeshan et al., 2013). تحقیقات به طور مداوم نشان داده‌اند که اثر جزیره گرمایی شهری به ویژه در تابستان (Peng et al., 2019)، بر مصرف انرژی، تنوع زیستی، کیفیت هوا، آسایش انسان و عدالت اجتماعی تأثیر منفی می‌گذارد (Arunab & Mathew, 2024; Guo et al., 2020; Hu et al., 2024; Liu et al., 2024).

۲ مبانی نظری و پیشینه پژوهش

۲,۱ چارچوب نظری

افزایش نگرانی‌ها در مورد گرمایش شهری، باعث شده است که راهکارهای مبتنی بر طبیعت (Nature-Based Solutions) به اولویت اصلی در برنامه‌ریزی و طراحی شهری تبدیل شوند. همسویی این راهکارها با اهداف کلیدی توسعه پایدار (SDGs)، به ویژه هدف ۱۱ (شهرها و جوامع پایدار) و هدف ۱۳ (اقدامات اقلیمی)، اهمیت آنها را بیش از پیش افزایش می‌دهد (Oukawa et al., 2024). راه حل های مبتنی بر طبیعت از توان اکوسیستم‌های متنوع و مقاوم برای مقابله با تغییرات اقلیمی بهره می‌گیرد و خدماتی مانند محافظت در برابر سیل، بهبود کیفیت هوا و آب،

و کاهش مؤثر دمای شهری را فراهم می‌کند. علاوه بر این، این راهکارها به کاهش تغییرات اقلیمی و ارتقای تنوع زیستی نیز کمک می‌کنند (Chausson et al., 2020).

شایان ذکر است پوشش گیاهی به‌عنوان یکی از راهکارهای مبتنی بر طبیعت (NBS) (Liu et al., 2021)، قادر به ارتقای مشارکت در فعالیت‌های بدنی هستند (Klomp maker et al., 2018; Romagosa, 2018)، و آلودگی هوا را کاهش دهند (Escobedo et al., 2011; James et al., 2015)، و بر جزیره گرمایی شهری تأثیر بگذارند (Shishegar, 2014). همچنین خدمات اکوسیستم را بهبود بخشند (Baur et al., 2013)، و تعامل اجتماعی را ترویج دهند (Hartig et al., 2014) و سلامت روان شهروندان را ارتقا بخشند (Egerer et al., 2019).

گرمای شدید با پیامدهایی چون افزایش مرگ‌ومیر (Speak et al., 2020)، مشکلات سلامت روان (Ebi et al., 2021; Yu et al., 2024)، رشد مصرف انرژی (X. Li et al., 2019) و بالا رفتن هزینه‌های بهداشتی (Liu et al., 2019) ارتباط مستقیم دارد. سازمان جهانی بهداشت گرما را به‌عنوان یک ریسک عمده سلامت عمومی معرفی کرده که نیازمند مداخلات سازگاری شهری است (Zhao et al., 2021). این اثرات برای گروه‌های آسیب‌پذیر مانند کودکان بیشتر مشهود است (Vanos, 2015).

گروه‌های سنی و اجتماعی خاص، به‌ویژه کودکان مدرسه‌ای، به‌طور نامتناسب در معرض خطرات ناشی از گرما قرار دارند. مدارس که در مناطق با شدت بالای پدیده جزیره حرارتی شهری (UHI) واقع شده‌اند، نه تنها سلامت دانش‌آموزان را تهدید می‌کنند (Turunen et al., 2014; Xu et al., 2012)، بلکه فرآیند یادگیری، میزان حضور و عملکرد تحصیلی آنان را نیز مختل می‌سازند (Jiang et al., 2018; Wargocki & Wyon, 2007). شواهد و مطالعات اخیر نشان می‌دهد بخش قابل توجهی از مدارس شهری در نواحی گرم شهری قرار گرفته‌اند و این امر به تشدید نابرابری‌های آموزشی و سلامت منجر می‌شود (Jones et al., 2024).

۲،۲-پیشینه پژوهش:

مطالعات جهانی و تحلیل‌های کلان‌شهری نشان داده‌اند که پارک‌ها می‌توانند به‌طور میانگین چند درجه سانتی‌گراد محیط پیرامون خود را خنک کنند، اگرچه کارآمدی خنک‌سازی بسته به اندازه، نوع پوشش گیاهی و هندسه پارک متغیر است (Zhao et al., 2025).

شواهد نشان می‌دهد که «پارک‌های جیبی» می‌توانند به‌عنوان راهکاری کم‌هزینه و در عین حال قابل اجرا، نقش مهمی در بهبود کیفیت ریزاقلیم فضاهای باز ایفا کنند. پارک‌های جیبی بین بلوک‌های با تراکم بالا نقش مهمی در سیستم

نفوذ سبز شهری ایفا می‌کنند (K. Li et al., 2019). همچنین پارک‌های جیبی می‌توانند از فضای پراکنده در شهر به طور کامل استفاده کنند و به تأثیر زیست‌محیطی پارک به طور کامل بپردازند (Hou et al., 2022). ایده شکل‌گیری این پارک‌ها زمانی مطرح شد که نیاز به فضاهای سبز کوچک اما کارآمد در بافت‌های متراکم شهری افزایش یافت. درواقع، بسیاری از فضاهای رهاشده، زمین‌های بلااستفاده و حتی پشت‌بام‌ها ظرفیت تبدیل شدن به پارک‌های کوچک را داشتند؛ فضاهایی که بعدها با عنوان «پارک‌های جیبی» شناخته شدند (Balai Kerishnan et al., 2020).

سیمور (۱۹۶۹) نیز در تعریف خود تأکید می‌کند که این پارک‌ها از نظر وسعت بسیار کوچک‌تر از پارک‌های معمولی‌اند؛ به‌طوری که در بسیاری از موارد مساحتی کمتر از نیم هکتار دارند. با این حال، همین فضاهای کوچک، اگر درست طراحی شوند، می‌توانند در بافت‌های آموزشی و شهری تأثیر قابل توجهی بر آسایش حرارتی و کیفیت محیط داشته باشند (Seymour, 1969). پارک‌های جیبی با ابعاد کوچک مشخص می‌شوند و معمولاً در فضاهای باقیمانده در مناطق شهری متراکم قرار می‌گیرند، به این معنی که نمایانگر زمینه‌های اجتماعی با کیفیت بالا هستند. در حالی که تعریف واحدی از ویژگی‌های معماری خاص آنها وجود ندارد (Rosso et al., 2022).

در مناطق توسعه‌یافته متراکم، پارک‌های بزرگ اغلب به دلیل محدودیت‌های مکانی غیرقابل اجرا هستند، اما پارک‌های جیبی کوچک را می‌توان به راحتی اجرا کرد (Rosso et al., 2022). پارک‌های جیبی به عنوان یک مداخله کم‌هزینه، از نظر مکانی انعطاف‌پذیر هستند، از نظر شکل متفاوت هستند و ساکنان شهری به راحتی می‌توانند به آنها دسترسی داشته باشند (Zhang & Han, 2021). اگرچه آنها کوچک هستند، اما نوید می‌دهند که ارزش‌های اجتماعی، زیست‌محیطی و فرهنگی مهمی را برای ساکنان شهری به ارمغان بیاورند (Li et al., 2024). همانطور که پارک‌های پالی در نیویورک و پارک ماریسون در مریلند توانستند نمونه‌های قوی برای اثبات این فرضیه باشند.

بسیاری از پژوهشگران بر این نکته تأکید کرده‌اند که فضاهای سبز کوچک‌مقیاس از جمله پارک‌های جیبی به تدریج به یکی از مؤلفه‌های ضروری زیرساخت سبز شهرها تبدیل شده‌اند. این نوع فضاها به دلیل قابلیت استقرار در بافت‌های متراکم، می‌توانند نیاز بخش‌های بیشتری از محله‌ها را به فضای سبز برآورده کنند و از این‌رو در مطالعات مختلف نیز به نقش حیاتی آنها اشاره شده است (Balai Kerishnan et al., 2020).

فضاهای باز مدارس شامل حیاط، حیاط‌های مرکزی (courtyard)، زمین‌های بازی، محوطه‌های بین ساختمان‌ها و گذرگاه‌های باز نقش بسیار مهمی در تأمین آسایش حرارتی، کاهش اثرات گرمایی، و فراهم کردن محیطی مناسب برای فعالیت، یادگیری و رفاه دانش‌آموزان دارند. وقتی محوطه مدرسه باز، بدون سایه و با مصالح با جذب حرارت بالا باشد و ضریب دید آسمان (sky-view factor) زیاد باشد در روزهای آفتابی و گرم، دمای هوا و دمای تابشی (radiant temperature) به سرعت افزایش می‌یابد و منجر به گرمای شدید و بروز خطر برای کودکان

می‌شود (Antoniadis et al., 2020). برعکس، محوطه‌هایی با درختان سایه‌دار و هندسه مناسب می‌توانند تفاوت دمای هوا و دمای تابشی را چند درجه کاهش دهند و به کاهش تنش گرمایی کمک کنند (Balai Kerishnan et al., 2020; Namazi et al., 2024).

مطالعات جدید تأکید دارند که با طراحی هوشمند فضای باز مدارس شامل جهت‌دهی مناسب حیاط (orientation)، انتخاب مصالح با آلبدو بالا یا متریال سرد، ترکیب پوشش گیاهی، و جانمایی ساختمان‌ها می‌توان به طور محسوسی آسایش حرارتی را در دوره‌های گرم افزایش داد (Salameh et al., 2024; Zhao et al., 2024). به ویژه در مناطق گرم و خشک، چنین طراحی‌هایی می‌تواند کاهش نیاز به تهویه مصنوعی و سیستم‌های سرمایشی در فضاهای باز یا نیمه‌باز را به همراه داشته باشد و مدارس را در برابر اثرات موج گرما مقاوم‌تر سازد (Namazi et al., 2024).

کوری (۲۰۱۷) پنج اصل (دسترسی، ویژگی، اصالت، سازگاری و عملکرد) را برای هدایت طراحی پارک‌های جیبی شناسایی کرد و کاربرد آنها را در محیط‌های مختلف شهری از جمله شهرهای بزرگ، شهرهای متوسط و شهرهای کوچک بررسی کرد (Currie, 2017). دیزدار اوغلو (۲۰۲۲) ده معیار برای پارک‌های شهری پایدار پیشنهاد کرد. استفاده از پارک و رضایت از آن می‌تواند تحت تأثیر برخی از معیارها مانند زیرساخت سبز، مکانی برای افراد در تمام سنین، سیستم‌های پارک متصل در فاصله پیاده‌رو، حفظ تنوع زیستی، برنامه‌های فعالیت و نگهداری و مدیریت قرار گیرد (Dizdaroglu, 2022).

به طور خاص، اثرات خنک‌کنندگی پارک‌های جیبی ارتباط نزدیکی با فضای داخلی و ساختار شهری دارد (Zhou et al., 2025). به عنوان مثال، هو و همکاران (۲۰۲۲) سه پارک جیبی در شی‌آن را تجزیه و تحلیل کردند و نشان دادند که تراکم بیشتر درختان منجر به اثر خنک‌کنندگی برجسته‌تری می‌شود (Hou et al., 2022). به طور مشابه، وو و همکاران (۲۰۲۱) ۴۱ پارک جیبی را انتخاب کردند و گزارش دادند که انواع و ترکیب پوشش گیاهی درون پارک‌ها بر اثر خنک‌کنندگی تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این، اثر خنک‌کنندگی نیز بسته به برنامه‌ریزی شهری اطراف متفاوت است (Wu et al., 2021). پارک و همکاران (۲۰۲۱) مشاهده کردند که پارک‌های جیبی بیشترین مزایای خرداقلیمی را برای بزرگترین بلوک‌ها در شش بلوک شهری سئول به همراه دارند (Park et al., 2021).

علاوه بر این، پارک‌های جیبی با داشتن عملکرد تنظیم و بهره‌مندی از ریزاقلیم (Lin et al., 2017)، به عنوان ابزاری حیاتی برای ارائه خدمات کاهش گرما برای شهروندان، به ویژه با توجه به کمبود و توزیع پراکنده فضای موجود در مناطق پرجمعیت، عمل می‌کنند. همچنین اکثر فضاهای سبز شهری در مقیاس نسبتاً بزرگی مورد بررسی قرار گرفته‌اند (Lin et al., 2017).

روسو و همکاران نشان دادند که اگرچه کاهش ریزاقليم آنطور که انتظار می‌رود (دمای هوا -۰,۵ درجه سانتیگراد، رطوبت نسبی +۵-۱۰٪ در داخل پارک) خیلی قابل توجه نیست، اما راحتی درک شده در پارک‌های کوچک بیشتر از خیابان‌ها است و از "خنثی" در خیابان‌های نزدیک به "خوب/بسیار خوب" در پارک تغییر می‌کند. بنابراین، طراحی بهتری برای کاهش ریزاقليم پارک‌های کوچک مورد نیاز است (Rosso et al., 2022). در مطالعه بررسی نقش پارک‌های شهری بر آسایش حرارتی در شهر ارومیه نتایج نشان داد که وجود عوامل اکولوژیکی موجود در پارک مورد مطالعه، می‌تواند ۵ تا ۷ درجه سانتیگراد در شعاع ۸۵ تا ۹۰ متری باعث کاهش دمای محیط اطراف خود شود (قنبری لک & آرام، ۲۰۲۵).

با وجود شواهد گسترده درباره اثرات خنک‌کنندگی فضاهای سبز و پارک‌های شهری، بیشتر مطالعات پیشین در مقیاس کلان‌شهری یا پارک‌های بزرگ مقیاس انجام شده‌اند و توجه اندکی به فضاهای آموزشی، به‌ویژه حیاط مدارس، به‌عنوان یکی از حساس‌ترین محیط‌های انسانی شده است. همچنین، اگرچه پارک‌های جیبی به‌عنوان راهکاری کم‌هزینه و قابل اجرا در بافت‌های متراکم معرفی شده‌اند، هنوز مشخص نیست که کدام الگوهای کاشت، تراکم پوشش گیاهی و جانمایی فضایی می‌توانند بیشترین کارایی خرداقليمی را در محوطه مدارس ایجاد کنند.

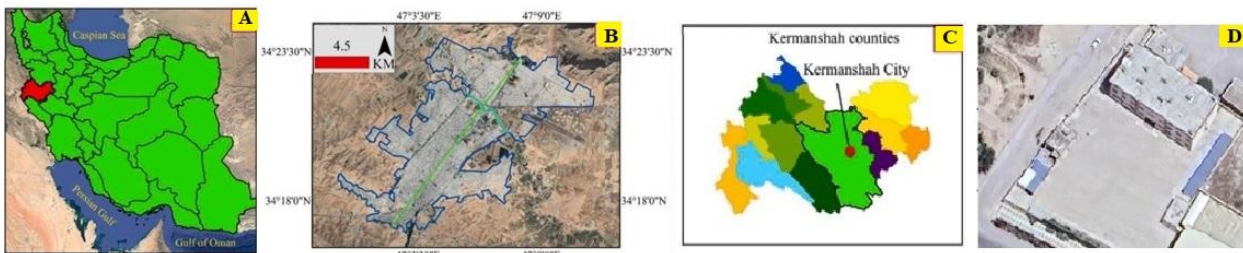
افزون بر این، اغلب پژوهش‌ها مبتنی بر داده‌های میدانی یا تحلیل‌های مقطعی هستند و شبیه‌سازی‌های پارامتریک و سناریو محور پارک‌های جیبی در محیط مدارس، به‌ویژه در اقلیم‌های گرم و خشک، به‌صورت نظام‌مند بررسی نشده‌اند. بر این اساس، پژوهش حاضر با استفاده از شبیه‌سازی خرداقليم شهری، به ارزیابی اثرات سناریوهای مختلف پارک‌های جیبی بر آسایش حرارتی فضاهای باز مدارس در اقلیم مدیترانه‌ای با تابستان‌های خشک و بسیار گرم (CSA) می‌پردازد.

۳ روش پژوهش:

پژوهش حاضر کاربردی و با روش توصیفی-تحلیلی با بهره‌مندی از مطالعات اسنادی و کتابخانه‌ای و همچنین سنجش کمی صورت گرفته است. این مطالعه علاوه بر مرور مبانی نظری موضوع، تاثیر پارک‌های جیبی بر آسایش حرارتی و میانگین دمای تابشی فضای باز مدارس را در اقلیم مدیترانه‌ای با تابستان‌های خشک و بسیار گرم (CSA) مطابق با طبقه بندی اقلیمی کوپن و داده‌های آب و هوایی مستخرج از لیدی باگ تولز در شهر کرمانشاه در غرب ایران با موقعیت جغرافیایی ۳۴ درجه و ۳۰ دقیقه شمالی و ۴۷ درجه و ۱۵ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۳۰۵ متر از سطح دریا با استفاده از نرم افزار ENVI-met نسخه ۵,۶,۱ ارزیابی میکند.

محدوده مورد مطالعه یک مدرسه دولتی به عنوان مدل پایه مطابق با تصویر ۱ در نظر گرفته شده است. این مدرسه با مشخصات موجود در جدول ۱ به عنوان نماینده اکثر مدارس دولتی از نظر شکلی و فرمی و مقیاسی است زیرا در ایران

نقشه و سیستم اکثر مدارس دولتی مشابه هم هستند. همچنین اکثر مدارس ایران از فضای باز 5000-1000 متر مربع برخوردارند و از مزایای پوشش گیاهی محروم هستند. شاخص های آسایش حرارتی مورد استفاده در این مطالعه شاخص مدل میانگین رای پیش بینی شده (Predicted Mean Vote-pmv)، شاخص دمای مؤثر استاندارد (Standard Effective Temperature-Set) و شاخص جهانی اقلیم حرارتی (Universal Thermal Climate Index-UTCI) میباشد، همچنین از شاخص دمای هوا و میانگین دمای تابشی به عنوان شاخص های اقلیمی استفاده شد. تحلیل این شاخص ها پایه ای برای استخراج راهکارهای مؤثر در ارتقای کیفیت حرارتی و ایجاد شرایط مطلوب تر برای حضور دانش آموزان در حیاط مدرسه به شمار می آید.



تصویر ۱، موقعیت جغرافیایی مورد مطالعه: A: نقشه ایران، B: نقشه شهرستان کرمانشاه، C: نقشه استان کرمانشاه، D: مدرسه مورد مطالعه. منبع نگارندگان

«قابلیت اطمینان خروجی های شبیه سازی از طریق مقایسه با مطالعات معتبر قبلی ENVI-met که در شرایط آب و هوایی مشابه انجام شده بود، ارزیابی شده است. همچنین روش شناسی اتخاذ شده، ارزیابی سیستماتیک استراتژی های خنک سازی مبتنی بر طبیعت در فضاهای باز مدارس را امکان پذیر می کند و دستورالعمل های طراحی قابل انتقالی را برای شرایط شهری گرم و خشک مشابه ارائه می دهد.

جدول ۱ مشخصات مورد مطالعه و ورودی های نرم افزار

A: مشخصات مدل پایه (نمونه مورد مطالعه)		B: مشخصات ورودی مدل پایه در نرم افزار ENVI MET (سناریوی ۱)	
مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
شمالی-جنوبی	جهت مدرسه	۲۵ درصد	نسبت سطح پنجره به نما (WWR)
125	انحراف مدل از جهت شمال	(Rough)	مصالح سقف
3	تعداد طبقات ساختمان	آجر	مصالح نما
12	ارتفاع ساختمان	آسفالت	مصالح کف فضای باز
25	درصد سطح اشغال	ندارد	پوشش گیاهی
550	مساحت ساختمان	۲۴	ساعات مدلسازی
5500	مساحت سایت	۲۲ می ۲۰۲۵	تاریخ مدلسازی
مدل پایه	نام مدل	۴ × ۴ × ۲	ابعاد هر سلول (DX, DY, DZ)
		۵۰ × ۵۰ × ۵۰	تعداد سلول در شبکه (X, Y, Z)
		۲۰۰ × ۲۰۰	ابعاد دامنه مدل
		ENVI-met.5.6.1	نرم افزار

به منظور پیکربندی پارامترهای فیزیکی و آئرودینامیکی مدل در نرم افزار ENVI-met، از رویه ارائه شده در مطالعه (Haghnegahdar et al., 2025) به عنوان مبنای تنظیمات اولیه استفاده شده است. در پژوهش مذکور که در اقلیم گرم و خشک شیراز انجام شده، داده‌های شبیه‌سازی با داده‌های اندازه‌گیری میدانی) با استفاده از دستگاه LUTRON HT-30075SD در ارتفاع ۱٫۵ متری (مقایسه و همبستگی آن‌ها با نرم افزار SPSS تأیید گردیده است (تصویر ۲). با توجه به یکسان بودن اقلیم گرم و خشک (البته با اختلاف جزئی در طبقه‌بندی کوپن) و استفاده از نسخه مشابه نرم افزار، تنظیمات اعتبارسنجی شده در مطالعه مذکور به عنوان نقطه شروع برای شبیه‌سازی‌های پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفته است.

با این حال، لازم به ذکر است که به دلیل عدم دسترسی به داده‌های اندازه‌گیری میدانی در سایت مورد مطالعه (مدرسه در کرمانشاه)، اعتبارسنجی مستقیم انجام نشده است. بنابراین، نتایج شبیه‌سازی‌های ارائه شده در این پژوهش با در نظر گرفتن این محدودیت تفسیر شده و مقادیر مطلق شاخص‌ها (مانند دمای هوا یا MRT) عمدتاً برای مقایسه‌های نسبی بین سناریوهای مختلف به کار رفته‌اند، نه به عنوان مقادیر واقعی مطلق. رویکرد مقایسه‌ای سناریوها تا حد زیادی اثر خطاهای سیستماتیک مدل را خنثی می‌کند و روابط رتبه‌بندی بین سناریوها را قابل اعتماد می‌سازد.



تصویر ۲: نتایج اعتبارسنجی مدل ENVI-met در مطالعه مرجع در اقلیم شیراز. (Haghnegahdar et al., 2025)

این مطالعه در ۵ سناریو مطابق جدول ۲ و تصویر ۳ با متغیرهایی همچون مساحت پارک، درصد پوشش تاج، گونه درخت، ارتفاع متوسط درخت، فاصله بین درختان، LAI و آلودگی سطح با استفاده از نرم افزار ENVI-met نسخه

۵,۶,۱ در روز اول خرداد به عنوان نماینده روز گرم که دانش آموزان در مدرسه حضور دارند به صورت ۲۴ ساعته با تمرکز بر ساعت ۹ تا ۱۷ به دلیل حضور دانش آموزان شبیه سازی شد و پوشش گیاهی به عنوان راهکار مبتنی بر طبیعت در جهت ارتقای ریزاقلیم و آسایش حرارتی مدارس به کار گرفته شد.

به منظور محاسبه سطح آسایش حرارتی و استخراج دقیق تر داده ها در بخشهای خرداقلیمی، مجموعاً ۳ گیرنده مجازی متفاوت محدوده های مطالعاتی با توزیع فضایی متناسب مکان یابی شده اند. درگزینه محل استقرار این گیرنده ها، تلاش بر آن بوده است تا ضمن برخورداری از توزیع فضایی مناسب در سطح محدوده منتخب مطالعاتی، امکان مقایسه تطبیقی داده های کالبدی، خرداقلیمی و آسایش حرارتی به دست آمده را فراهم آورند.

جدول ۲ مشخصات سناریو های مختلف

سناریو	نوع درختان	فاصله بین درختان (M)	میانگین ارتفاع درخت (M)	تعداد درخت	مساحت پارک (M ²)	توضیحات
سناریوی ۱ (پایه)	بدون درخت	—	—	۰	۰	مدل مرجع بدون فضای سبز
سناریوی ۲	کاج	۲۰-۲۲	۱۹,۵۵	۸	۱۷۸	تراکم کم، تک گونه
سناریوی ۳	کاج - چنار	۱۰-۱۲	۱۸,۷۰	۱۷	۱۷۸	تراکم متوسط، دو گونه
سناریوی ۴	کاج - چنار - افاقیا	۱۰-۱۲	۱۶,۲۰	۳۳	۳۲۶	تراکم زیاد، سه گونه
سناریوی ۵	کاج - چنار - افاقیا - بید	۴-۶	۱۵,۶۰	۴۹	۳۲۶	تراکم بسیار زیاد، چهار گونه



تصویر ۳، سناریو های مورد بررسی مطالعه حاضر به همراه توزیع فضایی گیرنده های مجازی نقاط منتخب مورد مطالعه

منبع: نگارندگان

لازم به ذکر است که انتخاب صحیح گونه‌های درختی در فضاهای باز مدارس نقش مهمی در بهبود آسایش حرارتی، افزایش ایمنی و ارتقای کیفیت محیط آموزشی دارد. گونه‌ها باید علاوه بر کارکردهای حرارتی، با رفتار و نیازهای کودکان نیز سازگار باشند. به‌طور کلی، معیارهای انتخاب در دو دسته ویژگی‌های مورفولوژیک و فیزیولوژیک قرار می‌گیرند.

از نظر مورفولوژیک، درختان با تاج چتری و گسترده بیشترین توان را در ایجاد سایه و کاهش دمای هوا دارند. ارتفاع مناسب زیرتاج (بیش از ۲ تا ۲,۵ متر) برای حفظ میدان دید و ایمنی کودکان ضروری است. همچنین، گونه‌هایی با تراکم برگ زیاد و سطح برگ بالا ($LAI \geq 4$) در کاهش تابش مستقیم و بهبود شرایط حرارتی بسیار مؤثرند. از نظر فیزیولوژیک، گونه‌های پهن‌برگ خزان‌پذیر برای اقلیم‌های گرم و خشک مناسب‌تر هستند؛ زیرا در تابستان با تبخیر و تعریق بالا موجب خنک‌سازی محیط می‌شوند و در زمستان با ریزش برگ‌ها امکان دریافت نور آفتاب را فراهم می‌کنند. برگ‌های تیره‌تر نیز به دلیل جذب بیشتر تابش، فرآیند تعرق و خنک‌سازی را تقویت می‌کنند.

این چارچوب روش‌شناختی، ارزیابی مقایسه‌ای سناریوهای مختلف سبزی‌نگی را امکان‌پذیر می‌سازد و بینش‌های مبتنی بر شواهد را برای طراحی حیاط مدرسه در آب و هوای گرم و خشک ارائه می‌دهد.

۴ بحث و یافته‌ها

۴,۱ شرایط مرجع: تنش حرارتی شدید در حیاط بدون فضای سبز (سناریو ۱)

سناریو یک به‌عنوان وضعیت پایه و نمایانگر شرایط موجود حیاط مدرسه، بدون حضور پارک جیبی یا هرگونه مداخله سبز، مبنای مقایسه عملکرد حرارتی سایر سناریوها قرار گرفت. تحلیل نتایج شبیه‌سازی در سه نقطه با سه گیرنده مجازی (رِسپتور) منتخب حیاط نشان می‌دهد که اگرچه دمای هوا در مقیاس فضا نسبتاً یکنواخت است، اما شاخص‌های تابشی و ترکیبی آسایش حرارتی شرایط نامطلوب و تنش گرمایی شدیدی را در ساعات اصلی استفاده روزانه نشان می‌دهند.

۴,۱,۱ دمای هوا (Air Temperature-Ta)

با توجه به تصویر ۴ دمای هوا در ساعات شب و بامداد (۰۲:۰۰ تا ۰۶:۰۰) در بازه‌ای بین ۲۴,۳ تا ۲۵,۵ درجه سانتی‌گراد قرار داشته و اختلاف دمای بین نقاط مختلف حیاط در این بازه کمتر از ۰,۳ درجه سانتی‌گراد بوده است. با آغاز ساعات روز، دمای هوا به‌تدریج افزایش یافته و در ساعات میانی روز به مقادیر بسیار بالایی رسیده است. بیشینه دمای هوا در بازه زمانی ۱۴:۰۰ تا ۱۵:۰۰ ثبت شده و در نقاط مختلف حیاط به حدود ۴۴,۰ تا ۴۵,۰ درجه سانتی‌گراد رسیده است. حتی در ساعات اوج گرما، حداکثر اختلاف مکانی دمای هوا بین نقاط سه‌گانه عموماً کمتر از

۱,۳ درجه سانتی‌گراد باقی مانده که بیانگر یکنواختی نسبی میدان دمای هوا و تأثیر محدود ویژگی‌های موضعی در این سناریو است.

۴,۱,۲ میانگین دمای تابشی (Mean Radiant Temperature – MRT)

در مقابل دمای هوا، میانگین دمای تابشی نوسانات زمانی و مکانی بسیار شدیدتری را نشان می‌دهد. مقادیر MRT در ساعات شبانه پایین بوده و عمدتاً در بازه ۶ تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد قرار داشته‌اند، اما با افزایش تابش خورشیدی، به‌ویژه از ساعت ۰۹:۰۰ به بعد، افزایش چشمگیری یافته‌اند. در بازه زمانی ۱۲:۰۰ تا ۱۶:۰۰، مقادیر MRT در نقاط مختلف حیاط به حدود ۵۴ تا بیش از ۷۱ درجه سانتی‌گراد رسیده است. بیشترین مقادیر MRT در نقطه سوم مشاهده شده، به‌طوری‌که اختلاف آن با سایر نقاط در ساعات اوج به حدود ۱۰ تا ۱۲ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. این اختلاف مکانی قابل‌توجه نشان‌دهنده نقش غالب تابش خورشیدی مستقیم و بازتاب سطوح سخت، در کنار نبود عناصر سایه‌انداز مؤثر، در تشدید بار تابشی محیط است.

۴,۱,۳ شاخص مدل میانگین رای پیش‌بینی شده (Predicted Mean Vote-PMV)

شاخص PMV در ساعات شب و بامداد مقادیری منفی و نزدیک به شرایط آسایش نسبی را نشان می‌دهد (حدود -۰,۵ تا -۰,۷۵). با افزایش دمای هوا و به‌ویژه MRT در ساعات روز، PMV به‌سرعت افزایش یافته و از ساعت ۰۹:۰۰ وارد محدوده تنش گرمایی می‌شود. در ساعات اوج (۱۳:۰۰ تا ۱۶:۰۰)، مقادیر PMV در نقاط مختلف حیاط به بازه‌ای حدود ۵,۵+ تا بیش از ۶,۸+ رسیده است که بیانگر تنش حرارتی بسیار شدید می‌باشد. بیشترین مقادیر PMV عمدتاً در نقطه سوم مشاهده شده که هم‌راستا با مقادیر بالاتر MRT در این ناحیه است.

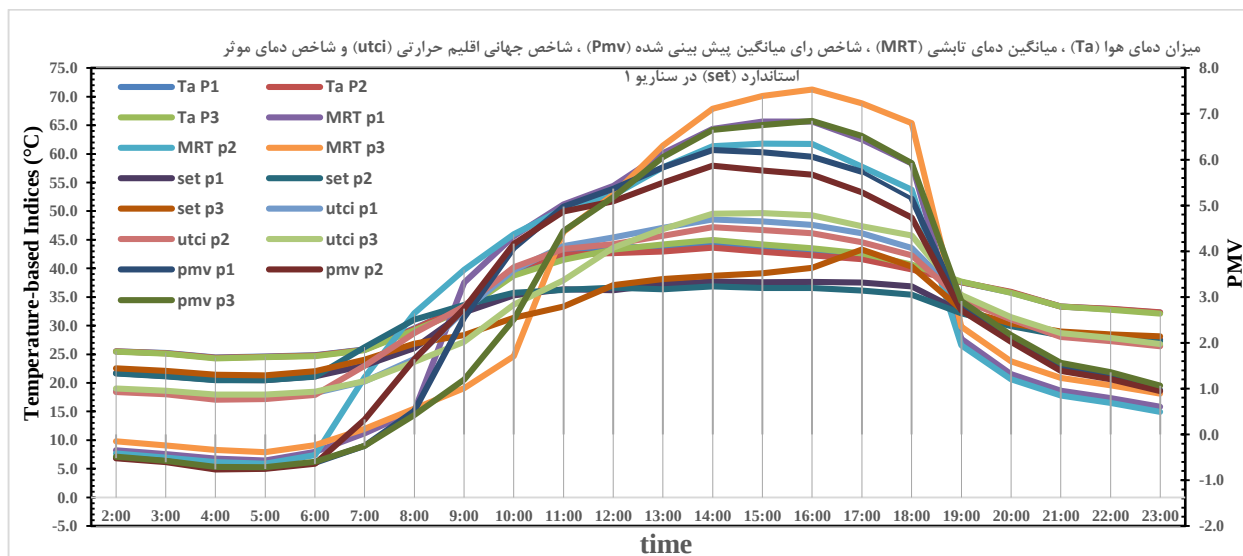
۴,۱,۴ شاخص جهانی اقلیم حرارتی (Universal Thermal Climate Index-UTCI)

رفتار شاخص UTCI نیز روندی مشابه PMV را نشان می‌دهد. در ساعات شب، UTCI در محدوده ۱۷ تا ۱۹ درجه سانتی‌گراد قرار داشته که متناظر با شرایط آسایش یا تنش حرارتی خفیف است. با نزدیک شدن به ساعات میانی روز، UTCI افزایش یافته و از حدود ساعت ۱۰:۰۰ وارد محدوده تنش حرارتی شدید می‌شود. بیشینه مقادیر UTCI در ساعات ۱۴:۰۰ تا ۱۵:۰۰ ثبت شده و در نقاط مختلف به حدود ۴۸ تا نزدیک ۵۰ درجه سانتی‌گراد رسیده است که مطابق طبقه‌بندی‌های رایج، بیانگر تنش حرارتی بسیار شدید در فضای باز است.

۴,۱,۵ شاخص دمای مؤثر استاندارد (Standard Effective Temperature-SET)

شاخص SET نیز تغییرات قابل‌توجهی را در طول روز نشان می‌دهد. مقادیر SET در ساعات شب و بامداد در محدوده ۲۰ تا ۲۲ درجه سانتی‌گراد قرار داشته، اما با افزایش بار حرارتی محیط، در ساعات روز به‌شدت افزایش یافته است. در بازه زمانی ۱۲:۰۰ تا ۱۷:۰۰، مقادیر SET در نقاط مختلف حیاط به حدود ۳۶ تا بیش از ۴۳ درجه سانتی‌گراد رسیده

است. بیشترین مقادیر SET در نقطه سوم ثبت شده که نشان‌دهنده تأثیر هم‌زمان دمای هوا، دمای تابشی بالا و شرایط نامطلوب تبادل حرارتی بدن با محیط است.



تصویر ۴: اطلاعات اقلیمی بدست آمده از شبیه سازی سناریو ۱

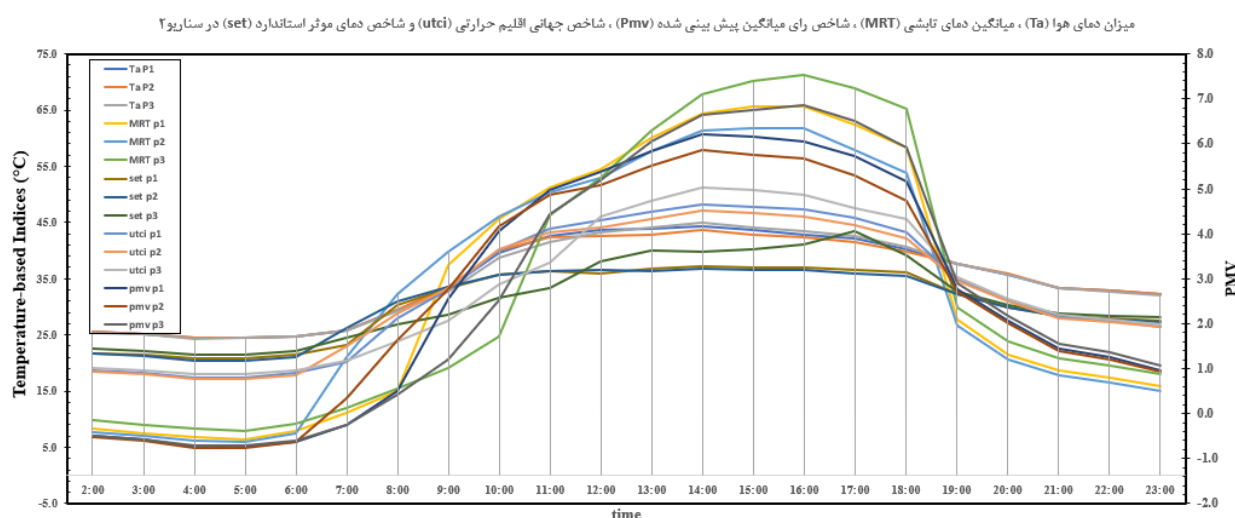
۴,۲ افزایش محدود فضای سبز: تأثیر ناچیز بر آسایش حرارتی (سناریو دوم)

در سناریو دوم، مداخله سبز به صورت محدود مطابق جدول ۲ و تصویر ۱ صورت گرفت. میانگین دمای هوای محیط در ساعات شبانه‌روز حداقل مقدار خود را در بازه ۴:۰۰ تا ۶:۰۰ با مقادیر حدود ۲۴,۴ تا ۲۴,۸ درجه سانتیگراد نشان می‌دهد و با آغاز تابش مستقیم خورشید، روند افزایشی شدیدی را تجربه می‌کند؛ به‌طوری‌که بیشینه دمای هوا در ساعات ۱۳:۰۰ تا ۱۵:۰۰ و با میانگین حدود ۴۴-۴۵ درجه سانتیگراد ثبت شده است. این الگو بیانگر تأثیر غالب بار حرارتی روزانه و محدود بودن اثرات کاهنده شرایط محیطی در ساعات اوج تابش است.

طبق تصویر ۵ میانگین دمای تابشی (MRT) در این سناریو نوسانات شدیدتری نسبت به دمای هوا نشان می‌دهد. مقادیر MRT از حدود ۶-۹ درجه سانتیگراد در ساعات شب به بیش از ۶۵-۷۰ درجه سانتیگراد در بازه ۱۴:۰۰ تا ۱۶:۰۰ افزایش یافته است که بیانگر افزایش قابل‌توجه بار تابشی سطوح اطراف، به‌ویژه در نقاط در معرض تابش مستقیم است. اختلاف محسوس بین نقاط اندازه‌گیری‌شده نیز حاکی از ناهمگنی شرایط تابشی در فضا می‌باشد.

شاخص‌های ترکیبی آسایش حرارتی، به‌ویژه UTCI و SET، رفتار مشابهی با MRT نشان داده‌اند. مقدار UTCI از محدوده ۱۸-۱۹ درجه سانتیگراد در ساعات شب به بیشینه‌ای در حدود ۵۰-۵۱ درجه سانتیگراد در ساعات اوج روز می‌رسد که شرایط تنش حرارتی شدید را نشان می‌دهد. شاخص SET نیز در ساعات بعدازظهر به مقادیر بیش از ۴۰ درجه سانتیگراد افزایش یافته و بیانگر کاهش محسوس آسایش حرارتی کاربران فضا است.

شاخص PMV در ساعات شب در محدوده آسایش نسبی (حدود -۰,۷ تا +۰,۵) قرار دارد، اما با افزایش بار حرارتی روزانه، از ساعت ۹:۰۰ به بعد وارد ناحیه تنش شدید شده و در ساعات ۱۳:۰۰ تا ۱۶:۰۰ به مقادیر بیش از +۶ می‌رسد. این افزایش شدید PMV هم‌راستا با افزایش MRT و UTCI بوده و نقش غالب مؤلفه تابش در کاهش آسایش حرارتی این سناریو را تأیید می‌کند.



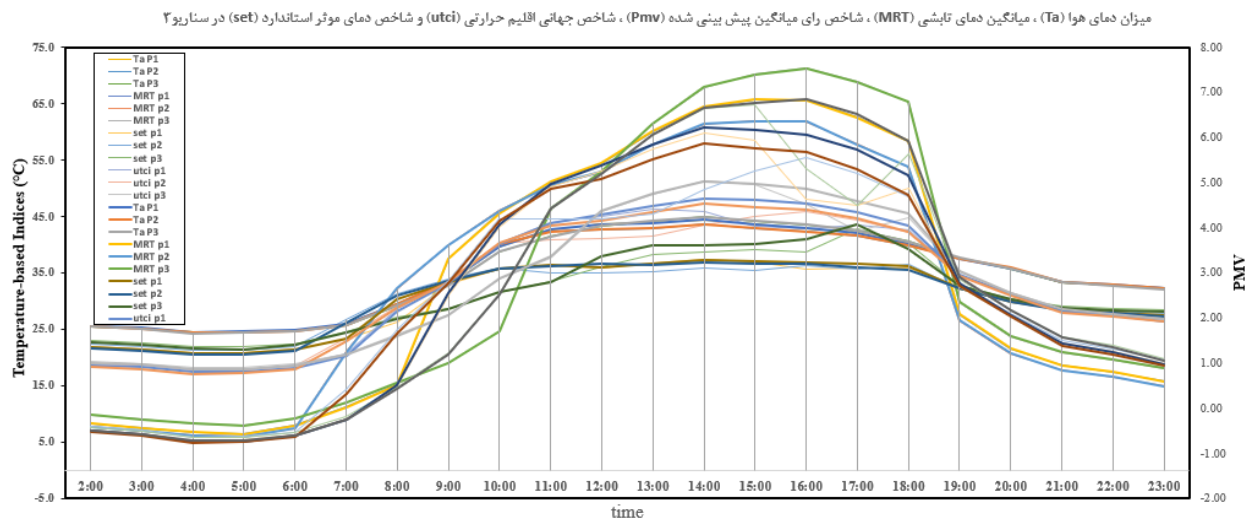
تصویر ۵: اطلاعات اقلیمی شبیه سازی سناریو ۲

۴,۳ افزایش تراکم متوسط: آغاز کاهش محسوس تنش تابشی (سناریو سوم)

سناریو سوم با افزایش قابل توجه فضای سبز نسبت به سناریو ۲ شبیه‌سازی شد. دمای هوا در سه نقطه منتخب حیاط طی شبانه‌روز تغییرات مشابه سناریوهای قبل را نشان می‌دهد، اما با کاهش نسبی در ساعات‌های میانی روز. دمای هوا صبحگاهی بین ۲۴,۳ تا ۲۵,۹ درجه سانتی‌گراد بوده و در ساعت اوج تابش خورشید (۱۴:۰۰ تا ۱۵:۰۰) به حدود ۴۲,۳ تا ۴۴,۹ درجه سانتی‌گراد می‌رسد که اندکی کمتر از سناریو ۲ است، و نشان‌دهنده اثر خنک‌کنندگی فضای سبزی می‌باشد. دمای تابشی میانگین (MRT) نیز کاهش نسبی داشته و به‌ویژه در نقطه دوم که بیشترین پوشش سبز در دسترس است، کاهش محسوسی دیده می‌شود. مقادیر MRT اوج روز در حدود ۶۱ تا ۷۱ درجه سانتی‌گراد قرار دارند، که نسبت به سناریو ۲ کمی کمتر است و نشان می‌دهد تابش خورشیدی با کمک سایه‌گذاری طبیعی کاهش یافته است.

شاخص‌های آسایش حرارتی نیز تغییرات ملموسی دارند: PMV در ساعات شب نزدیک به آسایش (حدود -۰,۵ تا +۰,۵) و در ساعات اوج روز به حدود ۴,۶ تا ۶,۶ می‌رسد، کاهش جزئی نسبت به سناریو ۲ که بیانگر کاهش تنش حرارتی است. شاخص UTCI نیز در ساعات میانی روز مقادیر حداکثر ۵۰,۶ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد، کمی کمتر از سناریو ۲، که حاکی از کاهش گرمای حسی ناشی از تابش مستقیم است. همچنین شاخص SET روند مشابه داشته و کاهش نسبی در ساعات ظهر و بعدازظهر دیده می‌شود (حداکثر حدود ۴۲-۳۹ درجه سانتی‌گراد).

در مجموع، مطابق با تصویر ۶، سناریو ۳ نشان می‌دهد که افزودن فضای سبز بیشتر به حیاط مدرسه، با کاهش محسوس دمای تابشی و تنش حرارتی در ساعات اصلی فعالیت روزانه، به بهبود آسایش حرارتی کمک می‌کند. اختلافات مکانی بین نقاط مختلف حیاط نیز کاهش یافته که نشان‌دهنده یکنواخت‌تر شدن شرایط ریزاقليمی است.



تصویر ۶: اطلاعات اقلیمی شبیه سازی سناریو ۳

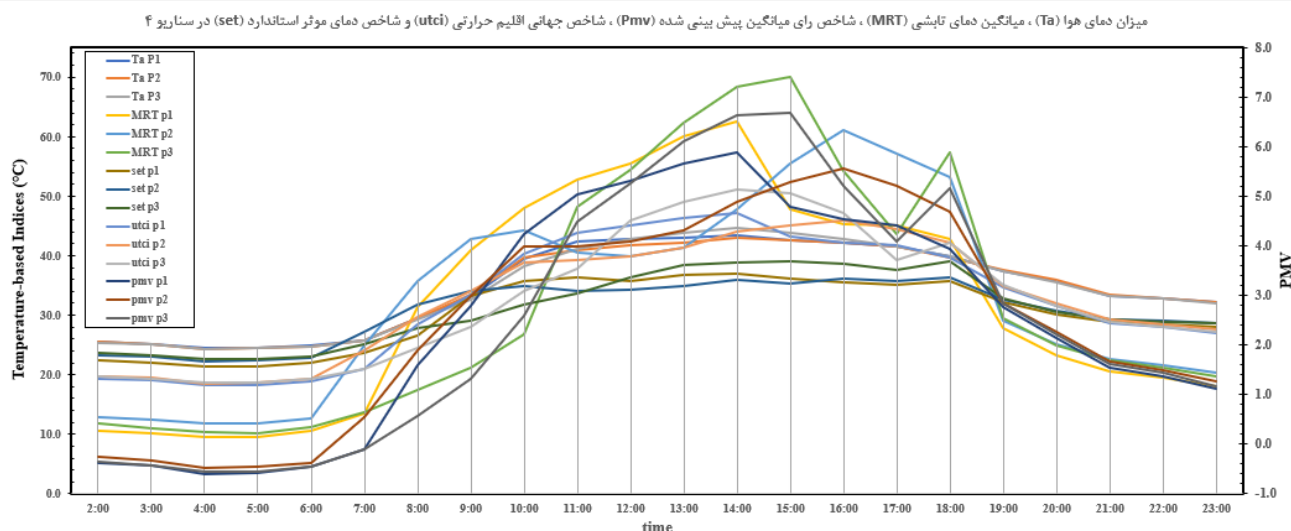
۴،۴ تراکم زیاد و تنوع سه گونه: بهبود معنادار شاخص‌های ترکیبی (سناریو چهارم)

سناریو چهارم، با توجه به تصویر ۷، با افزایش قابل توجه سطح فضای سبز نسبت به سناریو سوم در حیاط مدرسه، مورد تحلیل قرار گرفت. داده‌های شبیه‌سازی نشان می‌دهند که با وجود تغییرات محدود در دمای هوا بین نقاط مختلف، تأثیر کاهش تابش مستقیم خورشید و سایه‌اندازی ناشی از پوشش گیاهی بر شاخص‌های آسایش حرارتی کاملاً مشهود است. دمای هوا در ساعات بامداد بین ۲۴،۳ تا ۲۵،۸ درجه سانتی‌گراد قرار دارد و به تدریج با افزایش تابش خورشید تا بعدازظهر به بیشینه حدود ۴۴،۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. اختلاف دمای هوا بین نقاط مختلف حیاط کمتر از ۱،۵ درجه سانتی‌گراد است که همچنان یکنواختی نسبی میدان دما در مقیاس حیاط را نشان می‌دهد. در مقابل، میانگین دمای تابشی (MRT) کاهش محسوس نسبت به سناریوهای قبل داشته و اثر سایه‌اندازی و پوشش گیاهی واضح است. بیشینه مقادیر MRT در ساعات اوج تابش به حدود ۶۸-۷۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد، که در نقاط سایه‌دار کمتر است و اختلاف مکانی بین نقاط حاکی از تأثیر مثبت فضای سبز در کاهش تابش مستقیم و بهبود شرایط حرارتی است.

شاخص‌های آسایش حرارتی نیز این اثر را تأیید می‌کنند. مدل PMV در ساعات اوج تابش بین ۴،۱ تا ۶،۶ قرار دارد که کاهش نسبی نسبت به سناریوهای قبلی نشان می‌دهد و بیانگر کاهش تنش حرارتی با افزودن فضای سبز است. شاخص UTCI بیشینه‌ای در حدود ۵۱،۲ درجه سانتی‌گراد ثبت کرده که همچنان وارد محدوده تنش حرارتی شدید

می‌شود، اما نسبت به سناریو سوم کاهش دارد. در شاخص SET نیز روندی مشابه را نشان می‌دهد و در برخی نقاط سایه‌دار، مقادیر کمتر و نزدیک به شرایط آسایش نسبی مشاهده می‌شود.

در مجموع، نتایج سناریو چهار نشان می‌دهند که افزایش سطح فضای سبز تأثیر ملموسی بر کاهش تابش مستقیم و بهبود آسایش حرارتی در حیاط مدرسه داشته است. این سناریو، به‌ویژه در نقاط سایه‌دار، تنش حرارتی را کاهش داده و شرایط استفاده روزانه را مطلوب‌تر می‌کند.



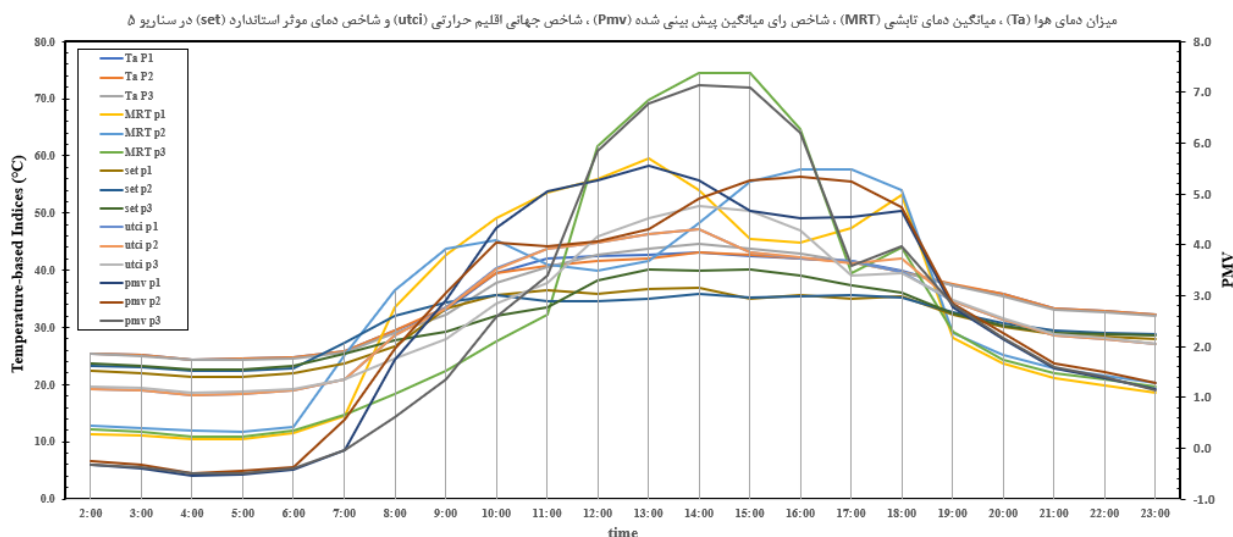
تصویر ۷: اطلاعات اقلیمی شبیه سازی سناریو ۴

۴,۵ تراکم بسیار زیاد و پوشش چهارگونه: بیشترین کاهش تنش حرارتی (سناریو پنجم)

سناریوی ۵، که بالاترین سطح مداخله فضای سبز را نشان می‌دهد، در مقایسه با سناریوهای قبلی، بیشترین بهبود را در تمام شاخص‌های حرارتی و آسایش نشان می‌دهد. دمای هوا (Ta) در سناریوی ۵ کاهش مداومی را در تمام نقاط پایش شده نشان می‌دهد، با کاهش متوسط تقریباً ۱,۸ تا ۲,۵ درجه سانتیگراد در مقایسه با سناریوی بدون فضای سبز (سناریو ۱) و ۰,۶ تا ۱,۱ درجه سانتیگراد در مقایسه با سناریوی ۴. این کاهش نشان دهنده اثر خنک‌کننده تجمعی پوشش گیاهی گسترده از طریق سایه‌اندازی و تبخیر و تعرق است. همچنین بهبود قابل توجه در میانگین دمای تابشی (MRT) مشاهده می‌شود که نسبت به سناریوی ۱، در محدوده ۶ تا ۱۰ درجه سانتیگراد کاهش می‌یابد. در مقایسه با سناریوهای سبز متوسط، MRT بیشتر ۲ تا ۴ درجه سانتیگراد کاهش می‌یابد که نقش غالب پوشش گیاهی مترکم در تضعیف تابش خورشیدی موج کوتاه و محدود کردن ذخیره گرما در سطوح سخت را برجسته می‌کند. شاخص PMV تغییر آشکاری را به سمت خنثی بودن حرارتی نشان می‌دهد. در حالی که سناریوی ۱ با تنش گرمایی شدید (PMV تا +۶,۸) مشخص می‌شود، سناریوی ۵ این شاخص را به طور محسوسی کاهش داده و آن را به محدوده تنش متوسط نزدیک می‌کند،

به طور مشابه، مقادیر $UTCI$ در سناریوی ۵ در مقایسه با سناریوی پایه تقریباً ۴ تا ۷ درجه سانتیگراد کاهش می‌یابد و از دسته‌های مرتبط با تنش گرمایی متوسط به شرایط نزدیک‌تر به تنش گرمایی جزئی یا قابل قبول منتقل می‌شود. این امر تأیید می‌کند که گسترش فضای سبز نه تنها دمای هوا، بلکه بار حرارتی ترکیبی مؤثر بر بدن انسان را نیز بهبود می‌بخشد. شاخص SET از یک روند قابل مقایسه پیروی می‌کند، با کاهش ۳ تا ۵ درجه سانتیگراد نسبت به سناریوی ۱ و ۱ تا ۲ درجه سانتیگراد نسبت به سناریوی ۴، که نشان‌دهنده کاهش قابل توجه تنش گرمایی معادل در شرایط پوشش سبز بالا است.

به طور کلی، روندهای کمی مشاهده شده در سناریوی ۵، رابطه قوی و غیرخطی بین تراکم فضای سبز و افزایش آسایش حرارتی را تأیید می‌کنند. در حالی که بهبودهای تدریجی از سناریوهای ۲ تا ۴ مشاهده می‌شود، بیشترین کاهش در شاخص‌های استرس حرارتی در سناریوی ۵ رخ می‌دهد، که تأکید می‌کند حداکثر مداخله سبز، مزایای اقلیمی نامتناسب بالاتری را در محیط‌های حیاط مدرسه به همراه دارد.



تصویر ۸: اطلاعات اقلیمی شبیه سازی سناریو ۵

۴,۶ تحلیل آماری مقایسه سناریوها

به منظور ارزیابی معناداری تفاوت‌های مشاهده‌شده بین سناریوهای مختلف، مقادیر شاخص‌های اصلی (MRT , Ta ، SET ، $UTCI$ ، PMV) در ساعت اوج گرمای روز (۱۴:۰۰) برای هر سه گیرنده مجازی استخراج و میانگین و انحراف معیار آنها محاسبه شد. جدول ۳ این مقادیر را برای پنج سناریو نشان می‌دهد.

جدول ۳ - مقایسه آماری شاخص‌های اقلیمی و آسایش حرارتی در ساعت ۱۴:۰۰ (میانگین $\pm$ انحراف معیار، $n=3$ گیرنده)

سناریو	شاخص جهانی اقلیم حرارتی UTCI	دمای مؤثر استاندارد SET	شاخص PMV	میانگین دمای تابشی MRT	دمای هوا Ta
	(°C)	(°C)		(°C)	(°C)
۱	48.43 $\pm$ 1.18	37.76 $\pm$ 0.92	6.24 $\pm$ 0.39	64.54 $\pm$ 3.28	44.31 $\pm$ 0.67
۲	48.90 $\pm$ 2.11	37.99 $\pm$ 1.65	6.24 $\pm$ 0.39	64.56 $\pm$ 3.25	44.31 $\pm$ 0.68
۳	46.91 $\pm$ 3.90	37.28 $\pm$ 1.42	5.87 $\pm$ 0.92	64.56 $\pm$ 3.25	44.31 $\pm$ 0.68
۴	47.48 $\pm$ 3.61	37.25 $\pm$ 1.40	5.80 $\pm$ 0.87	59.60 $\pm$ 10.55	43.68 $\pm$ 0.78
۵	48.48 $\pm$ 2.31	37.57 $\pm$ 2.09	5.77 $\pm$ 1.20	58.92 $\pm$ 13.79	43.54 $\pm$ 0.84

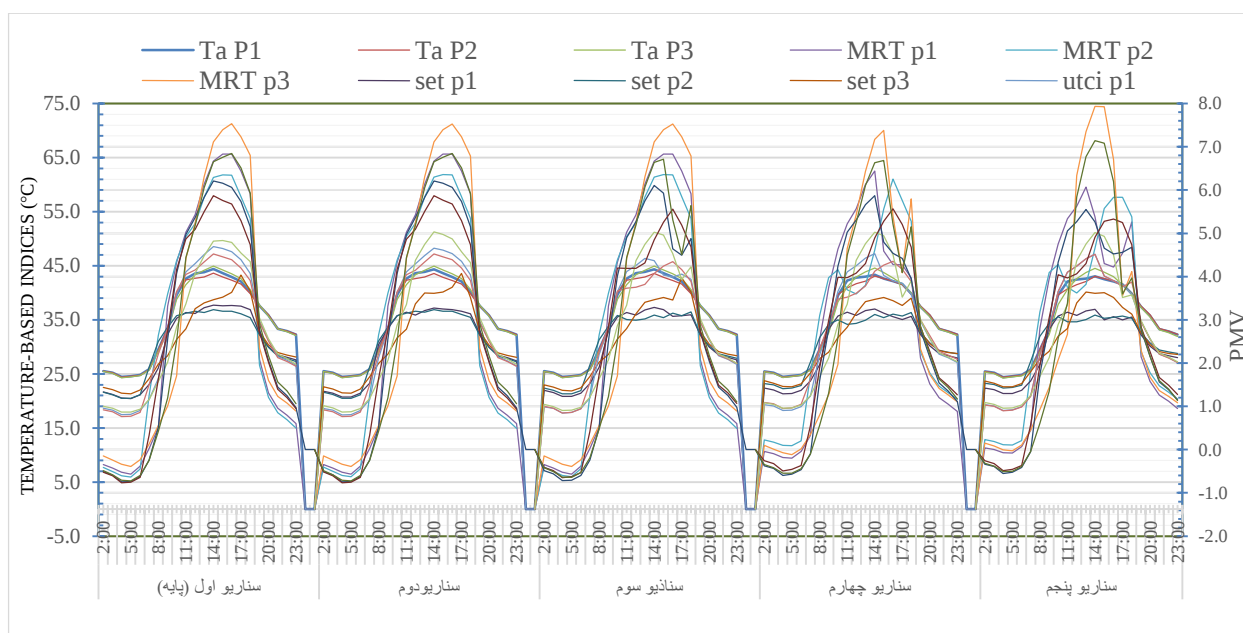
نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که با افزایش تراکم پوشش گیاهی از سناریوی ۱ به ۵، میانگین MRT حدود ۵٫۶ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته، در حالی که میانگین Ta تنها ۰٫۸ درجه سانتی‌گراد کاهش داشته است. این یافته تأیید می‌کند که اثر اصلی پارک‌های جیبی بر کاهش بار تابشی است. با این حال، انحراف معیار بالای MRT در سناریوهای ۴ و ۵ (به ترتیب ۱۰٫۵۵ و ۱۳٫۷۹) حاکی از توزیع نابرابر سایه و وجود نقاط داغ در حیات مدرسه است که نیازمند بهینه‌سازی چیدمان درختان در طراحی‌های آتی می‌باشد.

۵ نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که فضاهای باز مدارس در اقلیم مدیترانه‌ای با تابستان‌های خشک و بسیار گرم (CSA)، در صورت نبود مداخلات سبز، در ساعات اصلی استفاده روزانه در معرض تنش حرارتی شدید تا بسیار شدید قرار دارند. سناریوی پایه (بدون پارک جیبی) بیانگر شرایطی است که در آن اگرچه دمای هوا توزیعی نسبتاً یکنواخت دارد، اما بار تابشی بسیار بالا عامل اصلی کاهش آسایش حرارتی محسوب می‌شود. در این سناریو، میانگین دمای تابشی (MRT) در ساعات ۱۲ تا ۱۶ به مقادیری بین ۵۴ تا بیش از ۷۱ درجه سانتیگراد رسیده و شاخص‌های ترکیبی آسایش حرارتی نظیر (PMV تا +۶٫۸)، UTCI تا حدود ۵۰ درجه سانتیگراد و SET تا بیش از ۴۳ درجه سانتیگراد شرایطی را نشان می‌دهند که مطابق طبقه‌بندی‌های استاندارد، برای کودکان در فضای باز کاملاً نامطلوب و بالقوه خطرناک است.

طبق تصویر ۹ مقایسه سناریوهای مختلف نشان می‌دهد که افزودن پارک‌های جیبی به‌تنهایی، بدون افزایش معنادار پوشش تاج و تراکم گیاهی (سناریو دوم)، تأثیر محسوسی بر بهبود شرایط حرارتی ندارد. در این سناریو، بیشینه دمای هوا همچنان در حدود ۴۴-۴۵ درجه سانتیگراد باقی مانده و مقادیر اوج MRT، PMV و UTCI تقریباً مشابه سناریوی پایه است. این یافته به‌روشنی نشان می‌دهد که صرف حضور فضای سبز محدود، بدون طراحی اقلیمی مناسب، قادر به کاهش تنش گرمایی نیست.

در مقابل، سناریوی سوم که با افزایش قابل توجه مساحت فضای سبز، تراکم تاج درختان و بهبود ویژگی‌های مورفولوژیک پوشش گیاهی همراه بوده است، بهبود ملموسی در عملکرد حرارتی فضا نشان می‌دهد. در این سناریو، بیشینه دمای هوا در ساعات اوج تابش حدود ۰,۵ تا ۲ درجه سانتی‌گراد نسبت به سناریوهای قبلی کاهش یافته و مهم‌تر از آن، کاهش محسوس MRT در نقاط دارای سایه مؤثر مشاهده شده است. این کاهش بار تابشی مستقیماً به بهبود شاخص‌های آسایش حرارتی منجر شده؛ به‌طوری‌که مقادیر اوج PMV حدود ۰,۵ تا ۱ واحد و SET حدود ۲ تا ۴ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته و UTCI نیز کاهش قابل توجهی را در ساعات بحرانی ظهر و بعدازظهر نشان می‌دهد. علاوه بر این، اختلاف مکانی شاخص‌ها بین نقاط مختلف حیاط کمتر شده که بیانگر یکنواخت‌تر شدن شرایط ریزاقليمی و کاهش نقاط بحرانی تنش حرارتی است.



تصویر ۹: مقایسه نتایج شبیه سازی اقلیمی سناریوهای ۱ تا ۵

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش تأیید می‌کند که اثر اصلی پارک‌های جیبی در بهبود آسایش حرارتی مدارس، نه از طریق کاهش چشمگیر دمای هوا، بلکه از مسیر کاهش بار تابشی و میانگین دمای تابشی (MRT) حاصل می‌شود. این موضوع اهمیت طراحی دقیق پوشش گیاهی، انتخاب گونه‌های مناسب با LAI بالا، تاج گسترده و ارتفاع زیرتاج ایمن، و جانمایی هوشمندانه پارک‌های جیبی در فضاهای باز مدارس را برجسته می‌کند. در چنین شرایطی، پارک‌های جیبی می‌توانند به‌عنوان یک راهکار کم‌هزینه، انعطاف‌پذیر و قابل اجرا، نقش مؤثری در کاهش تنش گرمایی و ارتقای کیفیت محیط آموزشی ایفا کنند.

۶. پیشنهادهایی برای مطالعات آینده

با توجه به نتایج و محدودیت‌های ذکر شده، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، اثر پارک‌های جیبی در فضاهای باز مدارس با تنوع بیشتری از سناریوهای اقلیمی و زمانی مورد بررسی قرار گیرد؛ به‌ویژه تحلیل عملکرد این فضاها در دوره‌های موج گرما و روزهای حدی می‌تواند به درک بهتر تاب‌آوری حرارتی مدارس کمک کند. همچنین، ترکیب پوشش گیاهی با سایر راهکارهای غیرفعال نظیر مصالح با آلودگی بالا، سطوح خنک، عناصر آب‌نما و سایه‌بان‌های سبک می‌تواند به‌صورت سناریوهای تلفیقی بررسی شود. از سوی دیگر، اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی با اندازه‌گیری‌های میدانی و لحاظ کردن رفتار واقعی کاربران (الگوهای حضور، فعالیت بدنی و زمان استفاده دانش‌آموزان) می‌تواند دقت نتایج را افزایش دهد. در نهایت، توسعه دستورالعمل‌های طراحی اقلیمی ویژه مدارس شهری، مبتنی بر یافته‌های کمی و قابل تعمیم این‌گونه مطالعات، می‌تواند گام مؤثری در جهت ارتقای سلامت، عدالت اقلیمی و کیفیت محیط‌های آموزشی در شهرهای گرم ایران باشد.

تقدیر و تشکر: این پژوهش بدون حمایت مالی خاصی انجام شده است. نویسندگان از تمامی کسانی که در روند انجام این پژوهش همکاری داشته‌اند سپاسگزارند.

اعلام عدم تعارض منافع: نویسندگان اعلام می‌دارند که در انجام این پژوهش هیچ‌گونه تعارض منفعی برای ایشان وجود نداشته است. " (تعارض منافع به حالتی گفته می‌شود که منافع شخصی مادی یا غیرمادی نویسنده یا نویسندگان با نتایج پژوهش در تعارض باشد و این موضوع بر روند انجام پژوهش یا اعلام صادقانه نتایج تأثیر بگذارد).

پی‌نوشت‌ها:

۱. PMV: Predicted Mean Vote (متوسط پیش‌بینی شده رأی حرارتی)

۲. UTCI: Universal Thermal Climate Index (شاخص جهانی اقلیم حرارتی)

۳. SET: Standard Effective Temperature (دمای مؤثر استاندارد)

۴. MRT: Mean Radiant Temperature (میانگین دمای تابشی)

۵. CSA: Mediterranean climate with hot, dry summer (اقلیم مدیترانه‌ای با تابستان گرم و خشک)

۶. Ta Air Temperature: دمای هوا

- Acosta, M. P., Vahdatikhaki, F., Santos, J., Jarro, S. P., & Dorée, A. G. (2024).105170 Data-driven analysis of Urban Heat Island phenomenon based on street typology. *Sustainable Cities and Society*, 101, 105170. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105170>
- Antoniadis, D., Katsoulas, N., & Papanastasiou, D. K. (2020).1144 Thermal Environment of Urban Schoolyards: Current and Future Design with Respect to Children's Thermal Comfort. *Atmosphere*, 11(11), 1144 .
- Arunab, K. S., & Mathew, A .۱۰۵۱۱۷.(۲۰۲۴) .Quantifying urban heat island and pollutant nexus: A novel geospatial approach. *Sustainable Cities and Society*, 101, 105117. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105117>
- Balai Kerishnan, P., Maruthaveeran, S., & Maulan, S. (2020).126۹۴۷Investigating the usability pattern and constraints of pocket parks in Kuala Lumpur, Malaysia. *Urban Forestry & Urban Greening*, 50, 126647. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126647>
- Baur, J. W. R., Tynon, J. F., & Gómez, E. (2013).10۱۱۱-۰ Attitudes about urban nature parks: A case study of users and nonusers in Portland, Oregon. *Landscape and Urban Planning*, 117, 100–111. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.04.015>
- Cetin, M., Adiguzel, F., Gungor, S., Kaya, E & .,Sancar, M. C. (2019).1103–1112 Evaluation of thermal climatic region areas in terms of building density in urban management and planning for Burdur, Turkey. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 12(9), 1103–1112. <https://doi.org/10.1007/s11869-019-00727-3>
- Chausson, A., Turner, B., Seddon, D., Chabaneix, N., Girardin, C. A. J., Kapos, V., Key, I., Roe, D., Smith, A., Woroniecki, S., & Seddon, N. (2020).6134–6155 Mapping the effectiveness of nature-based solutions for climate change adaptation. *Global Change Biology*, 26(11), 6134–6155. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/gcb.15310>
- Colaninno, N. (2023).100124 Insights into heat islands at the regional scale using a data-driven approach. *City and Environment Interactions*, 20, 100124. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cacint.2023.100124>
- Currie, M. A. (2017).76–95 A design framework for small parks in ultra-urban, metropolitan, suburban and small town settings. *Journal of Urban Design*, 22(1), 76–95. <https://doi.org/10.1080/13574809.2016.1234334>
- Dizdaroglu, D. (2022).69–81 Developing design criteria for sustainable urban parks. *Journal of contemporary urban affairs*, 6(1), 69–81 .
- Ebi, K. L., Capon, A., Berry, P., Broderick, C., de Dear, R., Havenith, G., Honda, Y., Kovats, R. S., Ma, W., Malik, A .,Morris, N. B., Nybo, L., Seneviratne, S. I., Vanos, J., & Jay, O. (2021).698–708 Hot weather and heat extremes: health risks. *The Lancet*, 398(10301), 698–708. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)01208-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)01208-3)
- Egerer, M., Ordóñez, C., Lin, B. B., & Kendal ,D. (2019).126445 Multicultural gardeners and park users benefit from and attach diverse values to urban nature spaces. *Urban Forestry & Urban Greening*, 46, 126445. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126445>

- Escobedo, F. J., Kroeger, T & ,Wagner, J. E. (2011).2078–2087 Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices. *Environmental Pollution*, 159(8), 2078–2087. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.01.010>
- Ganeshan, M., Murtugudde, R & ,Imhoff, M. L. (2013).1–23 A multi-city analysis of the UHI-influence on warm season rainfall. *Urban Climate*, 6, 1–23. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.09.004>
- Guo, A., Yang, J., Sun, W., Xiao, X., Xia Cecilia, J., Jin, C., & Li, X. (2۰۲۴۴۳). (۰۲۰ Impact of urban morphology and landscape characteristics on spatiotemporal heterogeneity of land surface temperature. *Sustainable Cities and Society*, 63, 102443. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102443>
- Haghnegahdar, K., sholeh, m., Lotfi, S., & Sadeghi, A. (2025).3–18 ارزیابی پیامدهای دگرگونی هندسه شهری بر شرایط خرد اقلیمی و آسایش حرارتی (مطالعه موردی: محله تاریخی سنگ سیاه). فصلنامه مطالعات شهری، ۱۴(۵۳)، ۱۸–۳. <https://doi.org/10.22034/urbs.2024.140859.5017>
- Hartig, T., Mitchell, R., de Vries, S., & Frumkin, H. (2014).207–228 Nature and health. *Annu Rev Public Health*, 35, 207–228. <https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-032013-182443>
- Hou, J., Wang, Y., Zhou, D., & Gao, Z. (2022).300 Environmental Effects from Pocket Park Design According to District Planning Patterns—Cases from Xi'an, China. *Atmosphere*, 13(2), 300 .
- Hu, J., Chen, G., Wang, F., Hassan, W. M., Cai, M., Fan, W., & Yuan, X. (2024).111439 Nematodes as biological indicators of urban heat island effects in the Chongqing area urban green spaces. *Ecological Indicators*, 158, 111439. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111439>
- James, P., Banay, R. F., Hart, J. E., & Laden, F. (2015).131–142 A Review of the Health Benefits of Greenness. *Current Epidemiology Reports*, 2(2), 131–142. <https://doi.org/10.1007/s40471-015-0043-7>
- Jang, S., Bae, J., & Kim, Y. (2024).105007 Street-level urban heat island mitigation: Assessing the cooling effect of green infrastructure using urban IoT sensor big data. *Sustainable Cities and Society*, 100, 105007. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105007>
- Jiang, J., Wang, D., Liu, Y., Xu, Y., & Liu, J. (2018).102–113 A study on pupils' learning performance and thermal comfort of primary schools in China. *Building and Environment*, 134, 102–113. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.02.036>
- Jones, K. K., Vijay, V., & Zenk, S. N. (2024).1166–1177 SchoolHEAT: Racial and Ethnic Inequity in School Temperature. *J Urban Health*, 101(6), 1166–1177. <https://doi.org/10.1007/s11524-024-00919-y>
- Kim, S. W., & Brown, R. D. (2021).146389 Urban heat island (UHI) intensity and magnitude estimations: A systematic literature review. *Sci Total Environ*, 779, 146389. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146389>
- Klomp maker, J. O., Hoek, G., Bloemsma, L. D., Gehring, U., Strak, M., Wijga, A. H., van den Brink, C., Brunekreef, B., Lebret, E., & Janssen, N. A. H. (2018).531–540 Green space definition affects associations of green space with overweight

- and physical activity. *Environmental Research*, 160, 531–540. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.10.027>
- Li, J., Nordin, N. A., & Md Dali, M. (2024). 98–117 Does small mean unimportant? A review of pocket park values and associated factors. *Open House International*, 50(1), 98–117. <https://doi.org/https://doi.org/10.1108/OHI-12-2023-0295>
- Li, K., Liu, X., & Zhou, J. (2019). 1217–1236 Impact of environmental characteristics in urban green spaces on outdoor thermal environment: A case study of Wuhan City, China. *Indoor and built environment*, 28(9), 1217–1236 .
- Li, X., Zhou, Y., Yu, S., Jia, G., Li, H., & Li, W. (2019). 407–419 Urban heat island impacts on building energy consumption: A review of approaches and findings. *Energy*, 174, 407–419. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.183>
- Lin, P., Lau, S. S. Y., Qin, H., & Gou, Z. (2017). 48–60 Effects of urban planning indicators on urban heat island: a case study of pocket parks in high-rise high-density environment. *Landscape and Urban Planning*, 168, 48–60. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.09.024>
- Liu, H.-Y., Jay, M., & Chen, X. (2021). 10950 The Role of Nature-Based Solutions for Improving Environmental Quality, Health and Well-Being. *Sustainability*, 13(19), 10950 .
- Liu, K., Song, C., Zhao, S., Wang, J., Chen, T., Zhan, P., Fan, C., & Zhu, J. (2024). 113960 Mapping inundated bathymetry for estimating lake water storage changes from SRTM DEM: A global investigation. *Remote Sensing of Environment*, 301, 113960. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113960>
- Liu, Y., Saha, S., Hoppe, B. O., & Convertino, M. (2019). 702–711 Degrees and dollars – Health costs associated with suboptimal ambient temperature exposure. *Science of The Total Environment*, 678, 702–711 . <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.398>
- Mohajerani, A., Bakaric, J., & Jeffrey-Bailey, T. (2017). 522–538 The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *Journal of Environmental Management*, 197, 522–538. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.095>
- Namazi, Y., Charlesworth, S., Montazami, A., & Taleghani, M. (2024). 111793 The impact of local microclimates and Urban Greening Factor on schools' thermal conditions during summer: A study in Coventry, UK. *Building and Environment*, 262, 111793. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111793>
- Oukawa, G. Y., Krecl, P., Targino, A. C., & Batista, L. F. A. (2024). 105204 Advantages of modeling the urban heat island intensity: A tool for implementing nature-based solutions. *Sustainable Cities and Society*, 102, 105204. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105204>
- Park, J., Kim, J.-H., Sohn, W., & Lee, D.-K. (2021). 127256 Urban cooling factors: Do small greenspaces outperform building shade in mitigating urban heat island intensity? *Urban Forestry & Urban Greening*, 64, 127256. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127256>

- Peng, S., Feng, Z., Liao, H., Huang, B., Peng, S., & Zhou, T. (2019). 127–132 Spatial-temporal pattern of, and driving forces for, urban heat island in China. *Ecological Indicators*, 96, 127–132.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.08.059>
- Rezaei, T., Arunrat, N., Chareonwong, U., & Pumijumnong, N. (2024). 102000 Mapping urban heat: Unveiling nature-based solutions in Sari City, Iran. *Urban Climate*, 55, 102000.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.102000>
- Romagosa, F. (2018). 26–32 Physical health in green spaces :Visitors' perceptions and activities in protected areas around Barcelona. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*, 23, 26–32.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jort.2018.07.002>
- Rosso, F., Pioppi, B., & Pisello, A. L. (2022). 111918 Pocket parks for human-centered urban climate change resilience: Microclimate field tests and multi-domain comfort analysis through portable sensing techniques and citizens' science. *Energy and Buildings*, 260, 111918.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111918>
- Salameh, M., Abu-Hijleh, B., & Touqan, B. (2024). 101853 Impact of courtyard orientation on thermal performance of school buildings' temperature. *Urban Climate*, 54, 101853.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101853>
- Schwaab, J. (2022). 100091 Sprawl or compactness? How urban form influences urban surface temperatures in Europe. *City and Environment Interactions*, 16, 100091.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cacint.2022.100091>
- Seymour, W. N. (1969). Small Urban Spaces: The Philosophy, Design, Sociology, and Politics of Vest-Pocket Parks and Other Small Urban Open Spaces .
- Shishegar, N. (2014). 119 The impacts of green areas on mitigating urban heat island effect: A review. *The International Journal of Environmental Sustainability*, 9(1), 119 .
- Speak, A., Montagnani, L., Wellstein, C., & Zerbe, S. (2020). 103748 The influence of tree traits on urban ground surface shade cooling. *Landscape and Urban Planning*, 197, 103748.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103748>
- Turunen, M., Toyinbo, O., Putus, T., Nevalainen, A., Shaughnessy, R., & Haverinen-Shaughnessy, U. (2014). 733–739 Indoor environmental quality in school buildings, and the health and wellbeing of students. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 217(7), 733–739.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2014.03.002>
- Vanos, J. K. (2015). 1–15 Children's health and vulnerability in outdoor microclimates: A comprehensive review. *Environment international*, 76, 1–15 .
- Wargocki, P., & Wyon, D. (2007). 193–220 The Effects of Moderately Raised Classroom Temperatures and Classroom Ventilation Rate on the Performance of Schoolwork by Children (RP-1257). *HVAC&R Research*, 13, 193–220.
<https://doi.org/10.1080/10789669.2007.10390951>

- Wu, C., Li, J., Wang, C., Song, C., Haase, D., Breuste, J., & Finka, M. (2021).657969 Estimating the cooling effect of pocket green space in high density urban areas in Shanghai, China. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 657969 .
- Xu, Z., Etzel, R. A., Su, H., Huang, C., Guo, Y., & Tong, S. (2012).120–131 Impact of ambient temperature on children's health: A systematic review. *Environmental Research*, 117, 120–131. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2012.07.002>
- Yu, Z., Chen, J., Chen, J., Zhan, W., Wang, C., Ma, W., Yao, X., Zhou, S., Zhu, K., & Sun, R. (2024).114098 Enhanced observations from an optimized soil-canopy-photosynthesis and energy flux model revealed evapotranspiration-shading cooling dynamics of urban vegetation during extreme heat. *Remote Sensing of Environment*, 305, 114098. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114098>
- Zhang, H., & Han, M. (2021).127080 Pocket parks in English and Chinese literature: A review. *Urban Forestry & Urban Greening*, 61, 127080. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127080>
- Zhang, J., Li, Z., Wei, Y., & Hu, D. (2022).109469 The impact of the building morphology on microclimate and thermal comfort-a case study in Beijing. *Building and Environment*, 223, 109469. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109469>
- Zhao, Q., Guo, Y., Ye, T., Gasparrini, A., Tong, S., Overcenco, A., Urban, A., Schneider, A., Entezari, A., Vicedo-Cabrera, A. M., Zanobetti, A., Analitis, A., Zeka, A., Tobias, A., Nunes, B., Alahmad, B., Armstrong, B., Forsberg, B., Pan, S. C.,...Li, S. (2021).e415–e425 Global, regional, and national burden of mortality associated with non-optimal ambient temperatures from 2000 to 2019: a three-stage modelling study. *Lancet Planet Health*, 5(7), e415–e425. [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(21\)00081-4](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(21)00081-4)
- Zhao, X., Kong, K., Wang, R., Liu, J., Deng, Y., Yin, L., & Zhang, B. (2025).7015 Assessing the Cooling Effects of Urban Parks and Their Potential Influencing Factors: Perspectives on Maximum Impact and Accumulation Effects. *Sustainability*, 17(15), 7015 .
- Zhao, Y., Zhao, K., Zhang, X., Zhang, Y., & Du, Z. (2024).111247 Assessment of combined passive cooling strategies for improving outdoor thermal comfort in a school courtyard. *Building and Environment*, 111247, 111247, 252, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111247>
- Zhou, S.-Q., Yu, Z.-W., Ma, W.-Y., Yao, X.-H., Xiong, J.-Q., Ma, W.-J., Xiang, S.-Y., Yuan, Q., Hao, Y.-Y., Xu, D.-F., Wang, B.-Y., & Zhao, B. (2025).105242 Vertical canopy structure dominates cooling and thermal comfort of urban pocket parks during hot summer days. *Landscape and Urban Planning*, 254, 105242. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2024.105242>
- قنبری لک، س.، & آرام، ف. (۲۰۲۵). – بررسی نقش پارک های شهری بر آسایش حرارتی (نمونه موردی: پارک ائلر باغی و ساحلی شهر ارومیه). جغرافیا و روابط انسانی، –. <https://doi.org/10.22034/gahr.2025.499512.2364>