



Research Paper

Evaluating the Effect of Educational Buildings' Form on Improving Outdoor Thermal Comfort

Zahra Khazaie¹, Maryam Azmoodeh^{*2}

¹ M.Sc. Student, Department of Architecture, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

² Assistant Professor, Department of Architecture, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

Keywords

Educational Buildings,
Form, Optimization,
Outdoor thermal comfort,
UTCI.

Scan me



ABSTRACT

Given the effects of outdoor exposure on students' mental and physical health, outdoor spaces are important in educational environments. One way to improve these spaces is to enhance their thermal comfort. This research evaluates how educational building form affects outdoor thermal comfort in Tehran. This paper also uses optimization to identify the best and worst forms across different time frames. We analyzed and categorized 92 buildings from different universities in Tehran and developed an algorithm that produced 432 forms; we then used Rhino, Grasshopper, Ladybug, and Galapagos to run simulations and perform optimization. The results showed that the best form over the entire investigated period was the rectangular form with an east-west extension. Comparing the best and worst forms showed a 0/215 % difference in the percentage of time the spaces have outdoor thermal comfort and a 0/133 °C difference in outdoor thermal comfort between the two forms. The best form can affect outdoor thermal comfort conditions up to 30 meters from the building on the site. Because cold stress prevails throughout the period at the site, the optimization-selected best form is partially similar to the best form for the cold seasons. Therefore, the best form has no gaps, more sun-facing surfaces, and less shading than the worst form. It also has an east-west extension.

*Corresponding Author: Maryam Azmoodeh

Email Address: azmoodeh@arc.ikiu.ac.ir

Khazaie, Z. & Azmoodeh, M. (2026). Evaluating the Effect of Educational Buildings' Form on Improving Outdoor Thermal Comfort. *Human Ecology*, 5(14), 2371–2390.



DOI: <https://doi.org/10.22034/he.2026.573283.1193>



ارزیابی تاثیر فرم ساختمانهای آموزشی در ارتقای آسایش حرارتی فضای باز

زهرا خزایی^۱ مریم آزموده^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد معماری و انرژی، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

^۲ استادیار، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

واژگان کلیدی

آسایش حرارتی فضای باز،
بهینه سازی، ساختمانهای
آموزشی، فرم، UTCI.

اسکن کنید



چکیده

با توجه به تاثیر حضور در فضای باز بر بهبود سلامت روانی و فیزیکی محصلان، فضاهای خارجی در محیطهای آموزشی از اهمیت زیادی برخوردارند. یکی از راههای بهبود این فضاها، بهبود شرایط آسایش حرارتی آنهاست. از طرفی، طراحی فرم ساختمان مربوط به مراحل اولیه طراحی است و تغییر آن بعد از ساخت، پرهزینه است. از این رو، سؤال اصلی پژوهش حاضر این است که فرم ساختمانهای آموزشی چه تأثیری بر شرایط آسایش حرارتی فضاهای باز، در شهر تهران دارد و کدام الگوی فرمی میتواند بهترین و بدترین عملکرد را در بازههای زمانی مختلف ارائه دهد؟ بنابراین هدف پژوهش حاضر، ارزیابی تاثیر فرم ساختمانهای آموزشی در ارتقای آسایش حرارتی فضای باز (با شاخص UTCI) در شهر تهران میباشد. همچنین این پژوهش به اهدافی مانند بهینه سازی به منظور یافتن بهترین و بدترین فرم در بازههای زمانی مختلف نیز میپردازد. با بررسی و دسته بندی ۹۲ دانشکده در شهر تهران و نوشتن الگوریتمی با قابلیت تولید ۴۳۲ فرم با ابعادهای راینو، گرس هاپر، لیدی باگ و گالاپاگوس، شبیه سازی و بهینه سازی انجام شد. نتایج نشان داد، بهترین فرم در بازه زمانی بررسی شده، فرم مستطیل شکل با کشیدگی شرقی-غربی است. اختلاف بین بهترین و بدترین فرم، از نظر آسایش حرارتی خارجی 0.133°C و اختلاف درصد زمان دارای آسایش حرارتی خارجی بین این دو فرم، ۰.۲۱۵٪ است. وجود بهترین فرم در سایت میتواند شرایط آسایش حرارتی خارجی را تا فاصله ۳۰ متری از ساختمان تغییر دهد. با توجه به غالب بودن تنش سرمایی در بازه زمانی مورد بررسی در سایت، بهترین فرم انتخابی توسط بهینه سازی، به بهترین فرم فصول سرد نزدیک تر است. بنابراین بهترین فرم سطوح رو به خورشید بیشتر و سایه اندازی کمتری داشته و بدون پیش آمدگی و فرورفتگی و دارای کشیدگی شرقی-غربی است.

۱. مقدمه

با پیشرفت تکنولوژی و سبک زندگی مدرن، دانشجویان بیشتر وقت خود را در فضاهای بسته شامل خوابگاه، خانه و کلاس‌های درس سپری می‌کنند. دانشجویان عمدتاً قشر جوان را تشکیل داده و زمان زیادی در فضاهای بسته سپری کردن برای این قشر، سبب آسیب‌های جسمی و روانی فراوانی می‌شود. فضای دانشگاه می‌تواند دانشجویان را که در حال گذر از دوران نوجوانی به بزرگسالی هستند، مستعد اضطراب و افسردگی کند (Dyson & Renk, 2006). و پژوهش‌ها نشان داده ارتباط روشنی بین سطح استرس تحصیلی و احتمال داشتن سلامت روان ضعیف وجود دارد (Olivera et al., 2023). از طرفی مطالعات نشان داده که قرار گرفتن در فضای آزاد محیط دانشگاه (با پوشش‌های گیاهی و طبیعت متفاوت) حتی به مدت ۵ دقیقه می‌تواند سبب بهبود در شرایط جسمی و روانی شود (Ning et al., 2023). همچنین حضور در فضای خارجی باعث صرفه جویی در مصرف انرژی در داخل ساختمان می‌شود (Zafarmandi et al., 2022). بنابراین گذراندن وقت در فضای خارجی برای سلامت قشر محصل اهمیت زیادی دارد و به علت حضور این قشر برای مدت طولانی در دانشگاه، فراهم بودن محیط خارجی مناسب در دانشگاه‌ها بسیار حائز اهمیت است. وجود آسایش حرارتی خارجی یکی از مواردی است که باعث فراهم کردن فضای مناسب به منظور حضور دانشجویان در فضاهای خارجی دانشگاه‌ها می‌شود. فرم ساختمان یکی از عواملی است که تصمیم‌گیری درباره آن در مراحل اولیه طراحی صورت می‌گیرد، همچنین پژوهش‌ها نشان می‌دهد پارامترهای آسایش حرارتی از هندسه شهری تاثیر فراوانی می‌پذیرند (Sedira & Mazouz, 2023). فرم ساختمان از مواردی است که بعد از ساخته شدن، برای تغییر نیاز به صرف هزینه و انرژی زیادی دارد. به علت اهمیت آسایش حرارتی فضای خارجی در دانشگاه‌ها و اهمیت در نظر گرفتن تمامی جوانب در طراحی فرم، این پژوهش به بررسی تاثیرات فرم ساختمان بر آسایش حرارتی فضای خارجی می‌پردازد. به همین منظور با بررسی فرم دانشکده‌های دانشگاه‌های شهر تهران، تاثیرات فرم و جهت ساختمان بر پارامترهای آسایش حرارتی بررسی می‌شود تا بهترین فرم به منظور وجود آسایش حرارتی خارجی مطابق با شرایط اقلیمی به دست آورده شود. بررسی تاثیر فرم بر آسایش حرارتی فضای خارجی، در مقیاس یک ساختمان، سابقه‌ی چندانی ندارد و این موضوع به خصوص در ایران مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین این پژوهش با در نظر گرفتن تعداد زیادی از فرم‌های دانشکده‌های شهر تهران و بررسی تاثیر فرم بر آسایش حرارتی خارجی در این شهر و اقلیم، بهترین فرم از ۴۳۲ فرم مختلف را به منظور داشتن بهترین شرایط آسایش حرارتی در فضای خارجی مشخص کرده و تاثیر این فرم بر فضای اطراف خود را بررسی می‌کند.

۲. مبانی نظری و پیشینه تحقیق

موضوع این پژوهش پلی میان طراحی فرم در معماری و آسایش حرارتی فضای خارجی می‌زند که در ادامه به توضیح آن پرداخته خواهد شد. ریشه کلمه فرم Form از زبان لاتین به معنای ایده Idea است، بنابراین فرم همواره از یک ایده نشأت می‌گیرد و این دو اجزایی لاینفک هستند (Erzen-Jale, 2015). مهم‌ترین و اساسی‌ترین مشخصه بنای معماری فرم است (عادلی و ندیمی، ۱۳۹۹). فرم باید با توجه به عوامل متعددی از جمله توجه به عملکرد، زیبایی، محیط، فرهنگ و از همه مهمتر شرایط اقتصادی و بسیاری از موارد دیگر طراحی شود به همین علت فرم مناسب در شرایط مختلف متفاوت است (عالمی و همکاران، ۱۳۹۵). همچنین مواردی مانند سازه، عوامل فرهنگی و اقتصادی و نوع مصالح می‌توانند باعث تغییرات در فرم‌های معماری می‌شوند (Borges, 2001). کارفرما و محیط نیز از عوامل تاثیرگذار بر شکل‌گیری فرم است (عالمی و مجیدی، ۱۴۰۱).

پژوهش درباره مبحث آسایش حرارتی از دهه‌های اول قرن بیستم آغاز شد (Centnerová, 2018). مطالعه درباره آسایش حرارتی در طول جنگ جهانی دوم با پژوهش‌های گایج^۱ به منظور ایجاد شرایط مناسب برای تنفس در موقعیت‌های سخت مانند کشتی‌ها و هواپیماها در دمای بالا آغاز شد (Fabbri, 2015). طبق تعریف اشری، آسایش حرارتی وضعیتی ذهنی است که رضایت از شرایط دمایی محیط را بیان کرده و با ارزیابی ذهنی، ارزیابی می‌شود (ASHRAE, 2017). آسایش حرارتی ترکیبی از عوامل مختلف است و نمی‌تواند توسط یک عامل تعریف شود به همین علت شاخص‌های آسایش حرارتی به وجود آمدند تا ترکیب پارامترهای محیطی و جسمی، در قالب یک شاخص بیان شود (Liu et al., 2023). این شاخص‌ها قابلیت بررسی محیط حرارتی اطراف (داخل و بیرون) و تاثیر آن بر انسان را فراهم می‌کنند و از بین ۱۶۵ شاخص آسایش حرارتی معرفی شده، فقط تعداد معدودی امروزه در حال استفاده هستند (Kumar & Sharma, 2020).

رابطه آسایش حرارتی با محیط به سه دسته آسایش داخلی، خارجی و نیمه خارجی تقسیم می‌شود و برای بررسی آسایش حرارتی در فضای داخلی با دستگاه تهویه مطبوع از شاخص PPD، PMV مدل فانگر و با تهویه طبیعی از آسایش تطبیقی استفاده می‌شود (Rupp et al., 2015). آسایش حرارتی فضای داخلی، به علت شرایط پایدار محیط داخلی و قابلیت کنترل آن در چند دهه‌ی گذشته مورد مطالعه قرار گرفته و معین شده است اما برای تعیین کمیت آسایش حرارتی در محیط خارجی به مدل‌های پویا نیاز است زیرا آسایش در این فضاها به شدت تحت تاثیر عوامل تغییرپذیر محیطی است و زمان قرار گرفتن در معرض آن نیز متغیر است (Coccolo et al., 2016). موضوع آسایش

حرارتی فضای خارجی در دهه‌ی گذشته، مورد توجه محققان قرار گرفته است (Kumar & Sharma, 2020). در پژوهش‌های متعددی پیرامون آسایش حرارتی فضای باز، تأثیر فاکتورهای متعددی مانند وجود گیاهان و آب مورد بررسی قرار گرفته است (Davtalab et al. 2020, Kiani et al, 2025).

انجمن بین‌المللی زیست‌هواشناسی با همکاری ۷۳۰ COST Action به منظور توسعه یک شاخص بر اساس پیشرفته‌ترین مدل ترموفیزیولوژیکی، متخصصان زیادی را گرد هم آوردند (Błażejczyk et al., 2013) و براساس مدل چند گره‌ای از تنظیم حرارتی بدن انسان، شاخصی توسعه دادند که در طیف وسیعی از شرایط مختلف آب و هوایی در فضای باز پاسخگو و بر اساس واکنش‌های فیزیولوژیکی باشد (Fiala et al., 2011). این شاخص باید بوجه حرارتی انسان و پاسخ فیزیولوژیکی حرارتی یک فرد معمول را در نظر گیرد، آن‌ها این شاخص را، شاخص اقلیم حرارتی جهانی یا UTCI نامیدند (Fiala et al., 2011). هدف UTCI این است که عکس‌العمل فیزیولوژیکی انسان به شرایط حرارتی واقعی که به صورت چند بعدی تعریف شده است را به صورت یک کمیت تک بعدی تعریف کند (Błażejczyk et al., 2013).

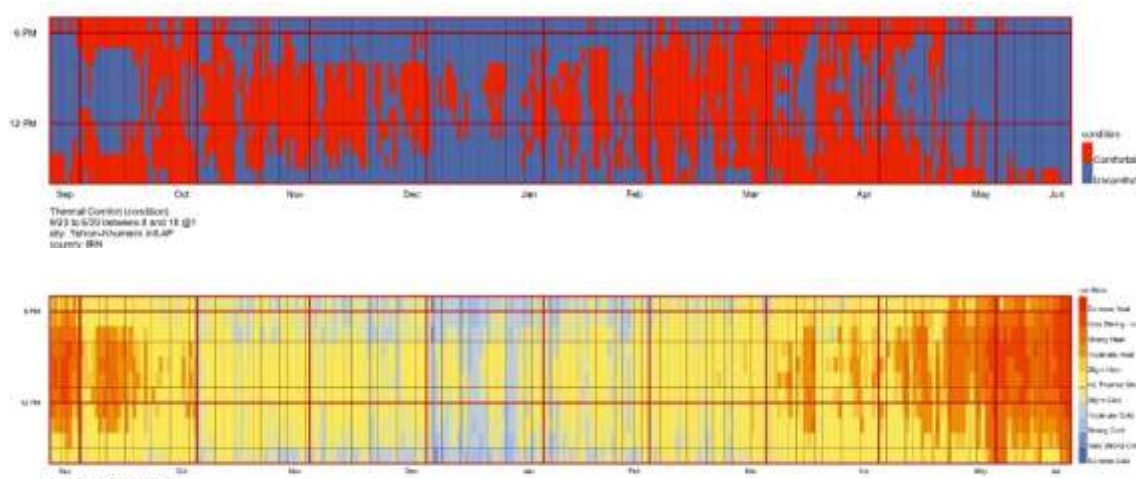
تحقیقات متعددی با استفاده از شاخص UTCI به منظور بررسی آسایش حرارتی فضای خارجی پرداختند: سدیرا و مازوز در پژوهشی با استفاده از نرم افزار ریمن ۱ تأثیر هندسه شهری را بر آسایش حرارتی فضای خارجی را بررسی می‌کنند، در این پژوهش شاخص‌های هندسه شهری خیابان از طریق اندازه‌گیری نسبت ارتفاع به طول، ضریب دید به آسمان و جهت قرارگیری خیابان‌ها مشخص شد، نتایج نشان داد هندسه شهری بر پارامترهای آسایش حرارتی (UTCI و دمای تابشی) تأثیرگذار است و در نهایت پیشنهادهایی برای شاخص‌های هندسه شهری به منظور بهبود آسایش حرارتی خارجی ارائه شد (Sedira & Mazouz, 2023). بدر و همکاران در مطالعه‌ای با تمرکز بر شاخص‌های جهت‌گیری، نسب ابعاد خیابان و تراکم ساختمان‌ها به بررسی تأثیر هندسه شهری بر آسایش حرارتی خارجی بر افراد پیاده در تابستان در منطقه‌ی گرم و مرطوب گرمسیری می‌پردازند، نتایج نشان داد تراکم ساختمان با UTCI همبستگی منفی دارد و با افزایش تراکم ساختمان‌ها UTCI بهبود می‌یابد، همچنین جهت باد می‌تواند تأثیر جهت خیابان بر آسایش حرارتی خارجی را تحت تأثیر قرار دارد (Bedra et al., 2023). (عزیزی و همکاران ۱۳۹۹) در پژوهشی به بررسی فرم بافت‌های شهری بر شاخص‌های آسایش حرارتی در فصل گرم می‌پردازند. با استفاده از شاخص UTCI و بررسی سه نوع بافت (ارگانیک، منظم و آپارتمانی) نتایج این پژوهش نشان داد فرم بافت‌های شهری و تناسب فضای باز بر آسایش حرارتی خارجی تأثیرگذار است. صمدپور شهرک و همکاران در پژوهشی به منظور بهبود شرایط آسایش حرارتی فضای باز در اطراف مجتمع‌های مسکونی برای سالمندان در شهر تبریز توسط نرم افزار انوی-مت ۲ و با بررسی شاخص‌های PMV و UTCI در گرم‌ترین و سردترین روزهای سال، به یافتن مناسب‌ترین اعداد برای نسبت ارتفاع به فاصله و زاویه قرارگیری مناسب ساختمان‌ها می‌پردازد (Samadpour Shahrak et al., 2022). سان و همکاران به بررسی و یافتن بهینه‌ترین جهت، بهینه‌ترین محل قرارگیری در سایت و بهترین فرم برای داشتن بهترین آسایش حرارتی در فضای باز برای ساختمان مهدکودک در دو شهر چین، با استفاده از شاخص UTCI توسط نرم افزار راینو با پلاگین‌های لیدی باگ ۳، باترفلای ۴، گرس‌هاپر ۵ و اعتبارسنجی میدانی و پلاگین گالاپاگوس ۶ می‌پردازند. نتایج این پژوهش نشان دهنده اهمیت بیشتر تنش گرمایی از تنش سرمایی و تأثیرگذاری بیشتر دمای تابشی از باد بر آسایش حرارتی فضای خارجی است (Sun et al., 2023). کاکن و نوبو به بررسی تأثیر ۴ فرم مختلف یک ساختمان در شهر داکا در بنگلادش بر آسایش حرارتی خارجی با شاخص PET توسط نرم‌افزار انوی-مت و ریمن پرداخته شد. نتایج این پژوهش نشان داد که ساختمان‌های با ارتفاع بیشتر و سطح اشغال کمتر آسایش حرارتی بیشتری را در فضای خارجی فراهم می‌کنند (Kakon & Nobuo, 2012). (کرمی راد و همکاران ۱۳۹۷) به بررسی آسایش حرارتی خارجی در حیاط‌های ۷ خانه سنتی قاجاریه در شهر شیراز توسط نرم افزار انوی مت و با شاخص PMV می‌پردازند. در طی این پژوهش عواملی مانند تناسب حوض و فضای سبز نسبت به حیاط، مساحت حوض و فضای سبز، نسبت ارتفاع به عرض، ضریب دید به آسمان، زاویه چرخش و مساحت حیاط‌ها با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج نشان داد تفاوت هندسه‌ی حیاط‌ها و جهت‌گیری همراه با سایر عوامل محیطی و فیزیکی بر آسایش حرارتی این فضاها تأثیرگذار بوده است و کمترین مساحت و ضریب دید به آسمان آسایش حرارتی مناسب‌تری را فراهم می‌کند. درجه جهت‌گیری مناسب ساختمان نیز برای این اقلیم مشخص شد و همچنین دمای متوسط تابشی تأثیر زیادی نسبت به سایر عوامل بر آسایش حرارتی فضای خارجی با شاخص PMV در این اقلیم دارد. چن و همکاران در پژوهشی به بررسی تأثیر تاج پوشش گیاهی (سایبان پوشش گیاهی) بر شرایط حرارتی و آسایش فضای خارجی در بهار و زمستان می‌پردازند. این

پژوهش با استفاده از نرم افزار انوی-مت و با شاخص PET انجام گرفته است. نتایج نشان داد تابش در این دو فصل جزو عوامل تاثیرگذار بوده و وجود سایبان درختان موجب افزایش رطوبت نسبی و دما و کاهش تابش و سرعت باد در طول روز می شود همچنین استفاده از پوشش گیاهی پهن برگ ریز برای بهبود شرایط آسایش حرارتی مناسب است (Chen et al., 2023). گچکار و همکاران در پژوهشی آسایش حرارتی خارجی در باغ شهری دلگشا در شهر ارومیه را مورد بررسی قرار دادند. این پژوهش با انجام بررسی های میدانی و پرسشنامه و استفاده از نرم افزارهای انوی مت و ریمن انجام گرفت. با مقایسه تاثیرات مصالح، آب و پوشش گیاهی بر بهبود شرایط آسایش حرارتی خارجی در این باغ شهری، محدوده آسایش تخمین زده شد. سپس به منظور بهبود شرایط آسایش خارجی در این باغها در تابستان استفاده از آب، بتن با آلبو بالا، درختان با تاج پهن و متراکم و تنه بلند و در زمستان استفاده از آسفالت آلبو بالا، درختانی مانند سرو و صنوبر پیشنهاد شد (Gachkar et al., 2021).

بررسی پیشینه پژوهش های انجام شده درباره ی آسایش حرارتی خارجی نشان می دهد که به موضوع تاثیر گیاهان پرداخته شده است، همچنین به موضوع فرم بیشتر در مقیاس های بزرگ شهری مانند بلوک های شهری، خیابان ها و بافت های شهری پرداخته شده و پژوهش های معدودی به بررسی فرم در مقیاس یک ساختمان پرداختند. پژوهش های معدودی که در مقیاس ساختمان هستند نیز به موضوعات مهدکودک در شهر چین، بررسی ۴ فرم ساده با تغییرات محدود در فرم و دیگری بررسی چند حیاط خانه های قدیمی بوده است. همچنین بسیاری از پژوهش ها از شاخص UTCI برای آسایش حرارتی فضای خارجی استفاده کردند. بنابراین با توجه به پیشینه پژوهش و خلأ های موجود در پژوهش های بررسی شده در مقیاس ساختمان در شهر تهران، موضوع پژوهش حاضر ارزیابی تاثیر فرم ساختمان های آموزشی در ارتقای آسایش حرارتی فضای باز در تهران می باشد.

۳. روش پژوهش

بستر مطالعه، شهر تهران، پرجمعیت ترین شهر ایران می باشد. این شهر در مختصات ۵۱ درجه و ۱۷ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۳ دقیقه شرقی و ۳۵ درجه تا ۳۶ درجه و ۴۴ دقیقه شمالی (علیچانی و سادات رضوی، ۱۳۹۶) قرار گرفته است. برای بررسی شرایط آب و هوایی این شهر در سایت مورد نظر با استفاده از UTCI، از نرم افزار راینو و کامپوننت لیدی باگ در گرسهاپر استفاده شد. نمودارهای زیر میزان آسایش خارجی در شهر تهران را حدوداً در محدود بازه زمانی حضور دانشجویان در طول سال تحصیلی بر اساس شاخص UTCI را نشان می دهند. همان طور که در شکل ۱ دیده می شود، ماه ژوئن و اواخر سپتامبر، یعنی در اواخر و اوایل سال تحصیلی آسایش حرارتی خارجی کاهش یافته و هوا گرم می شود، در زمستان به خصوص در ژانویه، در ساعات ابتدایی و پایانی مشخص شده شرایط آسایش کم و هوا سرد می شود. در ماه های نوامبر، مارچ و ساعات میانی روز در دسامبر و ساعات ابتدایی و انتهایی روز در سپتامبر، می و آوریل نیز شرایط آسایش حرارتی خارجی برقرار می شود.



شکل ۱. نمودارهای آسایش حرارتی خارجی در شهر تهران در بازه زمانی مشخص شده (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۳)

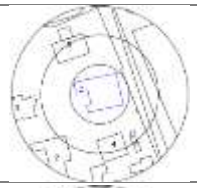
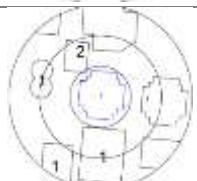
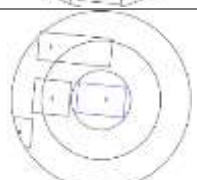
Figure 1. Diagrams of outdoor thermal comfort in Tehran in the specified time period

به منظور یافتن فرم های متداول دانشکده ها در شهر تهران، همسایگی، فرم و ارتفاع ۹۲ دانشکده از ۸ دانشگاه دولتی تهران، شامل دانشگاه های تربیت مدرس، الزهرا، امیرکبیر، تهران، شهید بهشتی، شهید رجایی، صنعتی شریف و علم و صنعت توسط نقشه های هوایی گوگل مپ بررسی شد. سپس این ۹۲ فرم دسته بندی شدند. فرم های قابل تعریف در دسته های I, L, E, C, T, +، مستطیل شکل و حیاط مرکزی مشخص شدند. به منظور انجام این دسته بندی برخی از فرم ها که دارای ساختار پیچیده یا ترکیبی بودند در یک، دو و یا حتی سه دسته بندی تکرار

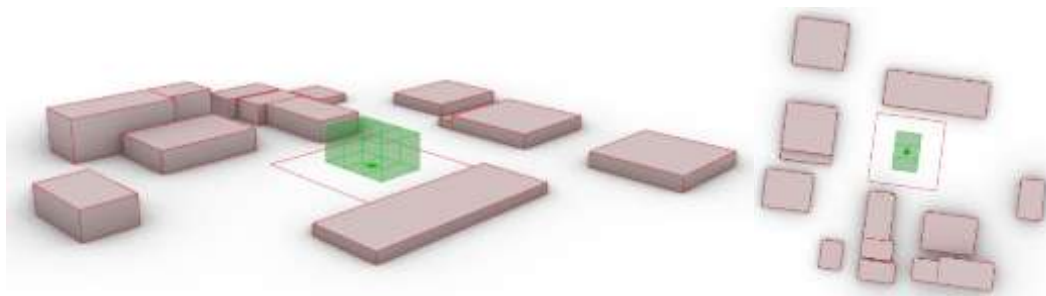
شدند (جدول ۱). در این پژوهش، همه‌ی فرم‌های دسته‌بندی، به غیر از فرم حیاط مرکزی در روند شبیه‌سازی در نظر گرفته شدند. زیرا سایر فرم‌ها با استفاده از سه مکعب مستطیل قابل تشکیل هستند اما حیاط مرکزی این گونه نیست. بنابراین این پژوهش ۸۴ درصد از فرم‌های تکرار شده‌ی دانشکده‌ها در شهر تهران را بررسی می‌کند.

جدول ۱. درصد تکرار هر فرم (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۳)

Table 1. The percentage of repetition of each form

ردیف	فرم	درصد تکرار	دیاگرام	نمونه‌ای از پلان دانشکده‌ها
۱	I	۳٪		
۲	L	۱۸٪		
۳	E	۱۳٪		
۴	C	۱۰٪		
۵	T	۵٪		
۶	+	۱٪		
۷	مستطیل شکل	۲۹٪		
۸	حیاط مرکزی	۱۶٪		

در این پژوهش همسایگی‌های اطراف بنا با توجه به شرایط واقعی و با انتخاب یک دانشکده و شبیه‌سازی فضاهای همسایگی آن انجام شد. جهت فرم‌های به وجود آمده و همسایگی‌ها نیز مطابق همان شرایط واقعی، در زاویه ۷۰.۷۵ درجه از شمال به سمت شمال شرقی قرار داده شد (شکل ۲). تمام فرم‌های مختلف دانشکده‌ها در محدوده‌ی یک مربع با ابعاد ۵۴×۵۴ مترمربع تغییر فرم می‌دهد، بنابراین این مربع به عنوان سایت در نظر گرفته شد (شکل ۲). اما مساحت فضای شبیه سازی ۹ متر از مساحت سایت از همه طرف افزایش یافت. یعنی مساحت فضای شبیه سازی نیز ثابت (۷۲×۷۲ مترمربع) در نظر گرفته شده است. با توجه به تصاویر مقاله "Building Form and Outdoor Thermal Comfort: Inverse Design the Microclimate of Outdoor Space for a Kindergarten" (Sun et al., 2023) حرارتی در محدوده نزدیکی اطراف هر بنا با تغییر فرم آن اتفاق می‌افتد. بنابراین برای کاهش زمان شبیه سازی، شبیه سازی در کل منطقه اتفاق نیفتاد.



شکل ۲. پرسپکتیو و پلان دانشکده و همسایگی‌ها (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۳)

Figure 2. Perspective and plan of the university and neighborhoods

سطح اشغال فرم‌ها در تمامی حالات نیز عدد ۲۰.۱۶ درصد در نظر گرفته شد. داده‌های آب و هوایی به صورت epw از پایگاه داده one building از ایستگاه هواشناسی فرودگاه بین المللی امام خمینی (ره) تهران دریافت شد. جدول زیر متغیرهای این پژوهش را نشان می‌دهد.

جدول ۲. متغیرهای پژوهش (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۳)

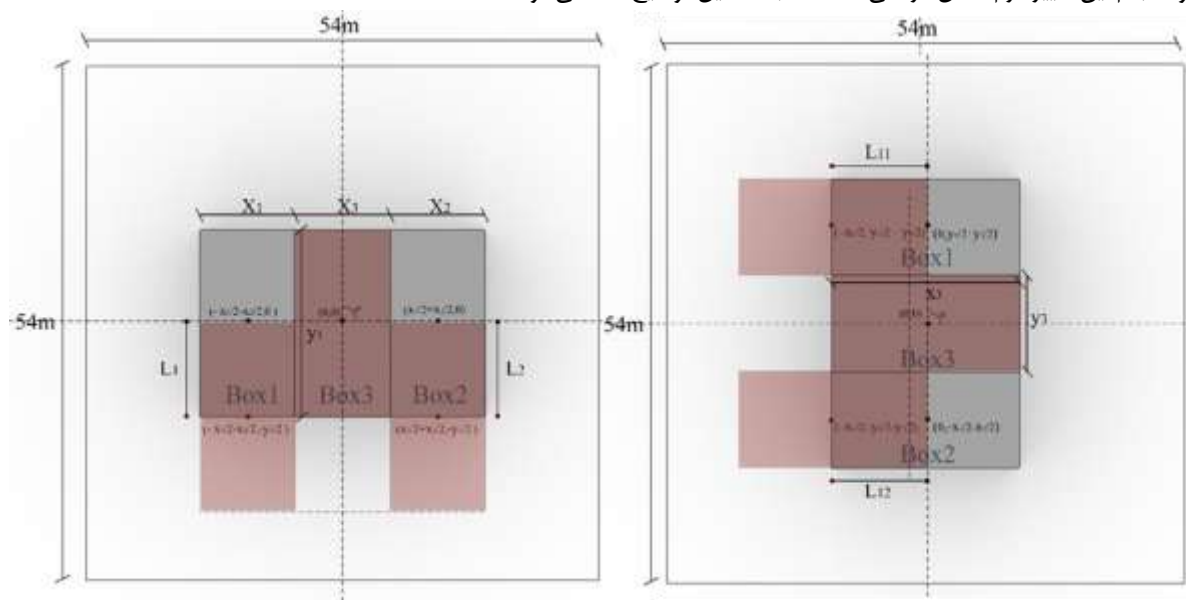
Table 2. Research variables

عنوان متغیر	نقش متغیر	کمی	نوع متغیر کیفی	واحد	توضیحات
	نقش متغیر	کمی	نوع متغیر کیفی	واحد	توضیحات
فرم ساختمان	*		*	-	انواع فرم‌های دسته بندی شده و به وجود آمده توسط الگوریتم
ابعاد	*	*		m	تغییر ابعاد به منظور ایجاد فرم‌های متنوع
اجزاء فرم ساختمان	*	*		-	تغییر محل قرارگیری اجزاء هر فرم به منظور ایجاد فرم‌های متنوع
جهت ساختمان	*	*		درجه	بررسی هر فرم در چهار جهت مختلف
UTCI آسایش حرارتی خارجی	*		*	°C	شاخص اقلیم حرارتی جهانی که شامل مولفه‌های باد، میانگین دمای تابشی، دمای هوا و رطوبت نسبی است.
درصد آسایش حرارتی خارجی	*	*		%	میانگین درصد زمانی که میانگین فضاهای اطراف سایت در آسایش هستند (در بازه زمانی ثابت)
همسایگی‌ها	*		*	-	ساختمان‌های اطراف سایت مورد نظر در طول شبیه سازی، ثابت در نظر گرفته شدند.
ارتفاع	*	*		m	ارتفاع همسایگی‌ها و فرم مورد بررسی در همه ی حالات ثابت است. ارتفاع فرم های مورد بررسی ۱۴ متر (۴ طبقه با ارتفاع ۳.۵ متری) می‌باشد. انتخاب ۴ طبقه با توجه به میانگین ارتفاع ساختمان دانشکده‌های بررسی شده، در نظر گرفته شد.

توضیحات	واحد	نوع متغیر		نقش متغیر			عنوان متغیر
		کیفی	کمی	نقش ۱	نقش ۲	نقش ۳	
مساحت فرم‌های مورد بررسی در طول شبیه سازی همواره ثابت (۵۸۸ مترمربع) است.	m ²		*	*			مساحت‌ها

ژو و همکاران در پژوهشی برای مقایسه شرایط آسایش حرارتی خارجی فرم‌ها از درصد استفاده کردند (Xu et al., 2019). در پژوهش حاضر نیز، میانگین درصد زمانی که میانگین فضای اطراف فرم دارای آسایش حرارتی است، در فرم‌های مختلف در بازه‌ی زمانی ثابت مقایسه می‌شود. به عبارت دیگر با تغییر فرم، زمان دارای آسایش حرارتی در فضای خارجی تغییر می‌کند و بهترین فرم، فرمی است که میانگین درصد زمانی که میانگین فضای خارجی آن در آسایش است در بازه زمانی ثابت به نسبت سایر فرم‌ها بیشتر باشد. میانگین درصد این نقاط دارای آسایش هر چه به ۱۰۰ نزدیک تر باشد، آسایش حرارتی خارجی بیشتری در محدوده مشخص شده و زمان داده شده، وجود دارد. سپس میزان میانگین آسایش حرارتی هر نقطه در مدت زمان داده شده به صورت نقشه نمایش داده می‌شود.

به منظور ایجاد تمامی فرم‌های دسته بندی، این الگوریتم، سه مکعب مستطیل با مساحت و ارتفاع ثابت را در نظر گرفته است. این سه مکعب مستطیل ۴۳۲ فرم مختلف را با تغییر ابعاد، جهت و محل قرارگیری تشکیل می‌دهند در عین حال که مساحت فرم ثابت می‌ماند (شکل ۳). نحوه انجام این تغییر فرم شامل مراحل است که به تفصیل توضیح داده می‌شود.



شکل ۱. نحوه تغییرات ابعاد و جابه جایی در فرم (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۳)

Figure 3. Dimension changes and displacement in the form

جدول ۱. متغیرهای فرم و بازه و مقدار آن‌ها (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۳)

Table 3. Form variables and their value

مقدار	متغیر
{10,14,18}	X ₁ (m)
{10,14,18}	X ₂ (m)
{10,14,18}	X ₃ (m)
(196/x ₁)	y ₁ (m)
(196/x ₂)	y ₂ (m)
(196/x ₃)	y ₃ (m)
{0, -y ₃ /2}	L ₁
{0, -y ₃ /2}	L ₂

$\{0, -x_3/2\}$	L_{12}
$\{0, -x_3/2\}$	L_{11}
$\{0, 90, 180, 270\}$	α°

مجموع مساحت سه مکعب مستطیل (که ترکیب آن‌ها یک فرم را تشکیل می‌دهد) ثابت است، و علاوه بر آن مساحت هر سه آن‌ها یا یکدیگر برابر و در طی تغییرات فرم نیز ثابت می‌ماند.

مساحت کل فرم: ۵۸۸ مترمربع مساحت هر مکعب مستطیل: مترمربع ۱۹۶

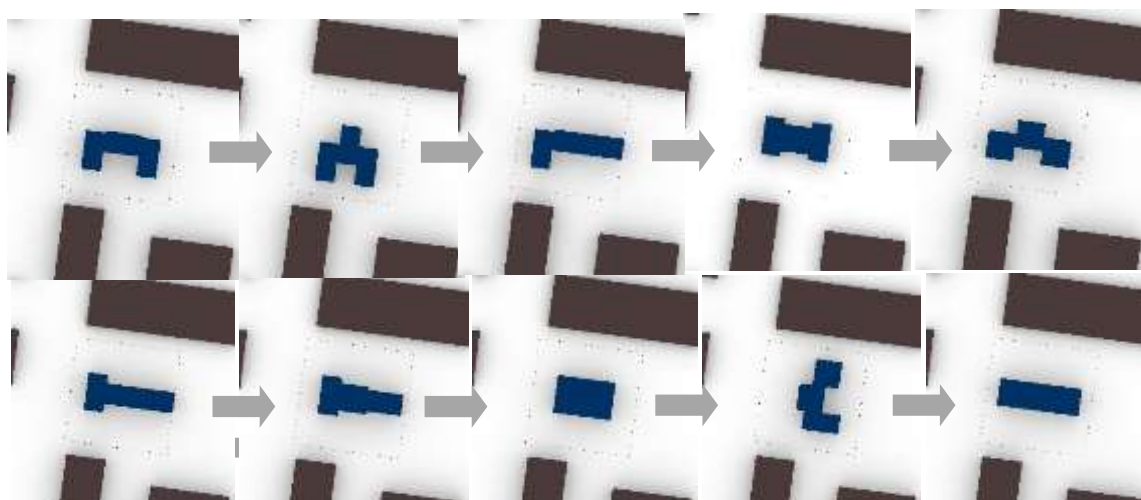
مطابق (جدول ۳)، در هر مستطیل با تغییر X های آن در محدوده مشخص شده، به علت ثابت بودن مساحت (۱۹۶ مترمربع)، Y مستطیل مربوطه نیز دست می‌آید ($Y = 196/X$). محدوده تغییرات X شامل اعداد ۱۰، ۱۴ و ۱۸ است. علت استفاده از این اعداد این است که، برای تشکیل فرم‌های متنوع نیاز به داشتن حداقل یک مربع و دو مستطیل یکی با کشیدگی در راستای محور X ها و دیگری با کشیدگی در راستای محور Y ها بود. بنابراین ابتدا عدد ۱۴ ($\sqrt{196} = 14$) که باعث ایجاد فرم مربع شکل می‌شود، انتخاب شد. سپس اعدادی با اختلاف ۴ واحد بیشتر و کمتر از ۱۴، یعنی ۱۸ و ۱۰، برای ایجاد مستطیل‌هایی با کشیدگی‌های مختلف انتخاب شد. به علت افزایش زمان قابل توجه در شبیه سازی، انتخاب بیشتر از سه عدد برای متغیر X ممکن نبود. به همین خاطر، برای مشخص کردن متغیرهای دیگر X ، ۴ واحد اختلاف از عدد ۱۴ در نظر گرفته شد به این منظور که، مستطیل‌های حاصل نسبت بین طول و عرض بیشتری داشته باشند تا کشیدگی آن‌ها در فرم قابل مشاهده و توجه باشد.

به غیر از مکعب مستطیل ۳ که موقعیت قرارگیری آن در محور مختصات ثابت است، دو مکعب مستطیل دیگر در دو موقعیت، مستقل از هم، می‌توانند جابه‌جا شوند (L ها در جدول ۳ و شکل ۳). در موقعیت اول، مرکز مستطیل‌های ۱ و ۲ با مرکز مستطیل ۳ در یک راستا قرار گیرد (نقطه بالایی مشکی در ابتدای L در شکل ۳) و موقعیت دوم (نقطه قرمز در پایین و انتهای L در شکل ۳)، شرایطی است که در آن مرکز مستطیل‌های طرفین به اندازه نصف ضلع مجاور مستطیل وسط ($2/3 - y_3$ در شکل ۳ سمت چپ) به سمت پایین حرکت می‌کند. اگر مستطیل مانند شکل راست (شکل ۳) چرخیده باشد، جهت حرکت در راستای منفی محور X ها و اگر مانند شکل سمت چپ چرخیده باشد جهت حرکت در راستای منفی محور Y هاست. در تصاویر بالا (شکل ۳)، شکل قرمز قابلیت حرکت مستطیل‌های ۱ و ۲ را نشان می‌دهد. البته مستطیل‌های ۱ و ۲ مستقل از هم حرکت می‌کنند و لزومی ندارد که L های آن‌ها با هم یکسان باشند. در مرحله بعد فرم حاصل قابلیت چرخش حول مرکز خود، در ۴ جهت، با زاویه ۹۰ درجه، را دارد (α جدول ۳).

در نتیجه این الگوریتم قابلیت تشکیل ۴۳۲ فرم مختلف را دارد:

$$3^3 \times 2^2 \times 4 = 432 \quad (1)$$

۴: چرخش - ۲: دو موقعیت جابه‌جایی برای هر مستطیل در طرفین - ۳: تغییر ابعاد در سه حالت برای هر مستطیل



شکل ۲. ۱۱ نمونه از ۴۳۲ فرم تولید شده توسط الگوریتم با سه مکعب مستطیل (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۳)

Figure 4. 11 examples out of 432 forms generated by the algorithm with three rectangular cubes

تنظیمات شبیه سازی: در این پژوهش تمرکز بر آسایش حرارتی در فضای خارجی دانشکده‌ها است، بنابراین بازه زمانی مورد بررسی، در محدوده زمانی حداکثر حضور دانشجویان در طول سال تحصیلی انتخاب شد که از ۱۰ مهرماه تا ۱ تیر از ساعت ۹ تا ۱۸ در نظر گرفته شد که حضور دانشجویان در دانشگاه در طول سال تحصیلی در این بازه زمانی بیشتر است. و بهترین فرم، فرمی است که برای کل این بازه پاسخگو باشد و بیشترین آسایش حرارتی خارجی را فراهم آورد. در ادامه بهترین فرم‌ها در فصل‌های پاییز، زمستان و بهار نیز (از ساعت ۹ تا ۱۸) به صورت جداگانه بررسی شدند. اطلاعات مورد نیاز برای الگوریتم از طریق فایل epw به دست آمد. تنظیمات نیز برای فرد ایستاده با قد ۱۶۷ متر با رنگ پوست سبزه (نه سیاه و نه سفید) و میزان لباس متوسط و بازتاب زمین ۰.۳ در نظر گرفته شد. گریدهای محدوده شبیه سازی شده ۳×۳ متری در نظر گرفته شد. گرید با ابعاد کمتر، زمان شبیه سازی را به اندازه قابل توجهی طولانی می‌کرد. بهینه سازی با استفاده از پلاگین گالاپاگوس انجام شد. ورودی‌های این پلاگین ژن‌ها و تابع عملکرد هستند. ژن‌های این پلاگین، متغیرهایی (اسلایدرهایی) که با استفاده از آن‌ها تغییر ابعاد، جهت و جابه به جایی فرم‌ها انجام می‌شد، در نظر گرفته شد. ورودی تابع عملکرد نیز میانگین درصد زمانی که میانگین نقاط گرید در شرایط آسایش حرارتی در بازه زمانی ثابت قرار دارند مشخص شد و تنظیمات به گونه ای انجام شد تا به منظور پیدا کردن بهترین فرم این مقدار به حداکثر برسد. و به منظور یافتن بدترین فرم در هر بازه زمانی، مقدار تابع عملکرد بر روی حداقل قرار گرفت. در تنظیمات گالاپاگوس Max stagnant مساوی ۱۰، جمعیت ۱۰ و boost اولیه ۲ در نظر گرفته شد و سایر تنظیمات پیش فرض گالاپاگوس است.

مقاله ای به منظور بررسی آسایش حرارتی خارجی با شاخص UTCI از لیدی باگ برای بررسی شرایط آسایش خارجی و از باترفلای برای شبیه سازی وضعیت حرکت باد استفاده کرده است (Sun et al., 2023). همچنین پژوهش دیگری در تلاش است با استفاده از تصاویر دو بعدی پانوراما از نمای دو بعدی خیابان، یک مدل آماری ارائه کند که آسایش حرارتی خارجی آن خیابان را محاسبه کند و محاسبه آسایش حرارتی خارجی با شاخص UTCI در این مقاله توسط پلاگین لیدی باگ انجام شد (Yazicioğlu & Gursel Dino, 2021). همان طور که مشاهده می شود، در مقالات نامبرده محاسبه آسایش حرارتی خارجی با شاخص UTCI توسط پلاگین لیدی باگ انجام شد. در پژوهش حاضر نیز به منظور محاسبه آسایش حرارتی خارجی از پلاگین لیدی باگ استفاده شد. به منظور اعتبارسنجی این نرم افزار، این مقاله به پژوهشهای دیگری استناد می کند که در آنها با مقایسه اطلاعات برداشت شده از روش میدانی و خروجی های شبیه سازی، صحت شبیه سازی در حوزه آسایش مورد تایید قرار گرفته است (López-Cabezaa, 2021).

۴. نتایج

در این بخش داده‌ها و خروجی‌های مربوط به بهینه سازی ۴۳۲ فرم مختلف در الگوریتم اول، آورده شده است. لازم به ذکر است در قسمت نتایج به علت زاویه ۷/۷۵ درجه به سمت شمال شرقی همه ی فرم‌های بررسی شده، منظور از شمال و جنوب، مایل به شمال شرقی و جنوب غربی با زاویه ۷/۷۵ درجه است (شرق و غرب هم با احتساب ۷/۷۵ درجه در واقع جنوب شرقی و شمال غربی محسوب می‌شود). همچنین منظور از درصد فضای دارای آسایش، میانگین درصد زمانی است که میانگین فضای اطراف فرم در محدوده آسایش حرارتی است. و منظور از درجه آسایش حرارتی خارجی هر فرم، میانگین درجه آسایش حرارتی فضای خارجی آن فرم است. مشخصات بهترین و بدترین فرم در بازه های زمانی مختلف:

خروجی‌های بهینه سازی توسط الگوریتم ژنتیک در جدول ۴ آمده است. در این جدول بهترین و بدترین فرم بر اساس بیشترین و کمترین درصد زمانی که فضای سایت دارای آسایش حرارتی خارجی مناسب در بازه زمانی ثابت است، در زمان‌های مختلف نشان داده شده است. در ستون‌های بعدی، میانگین درجه آسایش حرارتی خارجی محیط و میانگین دمای تابشی نشان داده شده است.

جدول ۴. مشخصات آسایش حرارتی خارجی در خروجی های بهترین و بدترین فرم (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۳)

Table 4. Outdoor thermal comfort characteristics in best and worst form

نوع فرم: بهترین / بدترین	بازه زمانی			دیگرام	درصد فضای دارای آسایش	میانگین درجه آسایش حرارتی خارجی (UTCI)	میانگین دمای تابشی	میانگین درجه آسایش حرارتی خارجی بدون باد (UTCI)	دسته بندی	آسایش
	پاییز	زمستان	بهار							
بهترین	*	*	*		۴۲.۶۲۲	۱۲.۳۹۰	۲۵.۱۸۲	۱۹.۴۳۱	-۰.۲۴۷	۰.۴۲۶

بدترین	*	*	*	۴۲.۴۰۷	۱۲.۲۵۷	۲۴.۷۵۴	۱۹.۲۸۹	-۰.۲۶۱	۰.۴۲۴
بهترین	*			۵۴.۸۶۱	۲۲.۶۲۳	۳۵.۴۳۰	۲۶.۹۷۴	۰.۷۷۷	۰.۵۴۸
بدترین	*			۵۴.۳۴۹	۲۲.۸۲۰	۳۶.۱۴۶	۲۷.۱۸۰	۰.۸۰۳	۰.۵۴۳
بهترین	*			۴۸.۶۰۲	۱۲.۹۱۵	۲۳.۰۹۶	۱۸.۶۶۹	-۰.۲۵۳	۰.۴۸۶
بدترین	*			۴۸.۴۰۴	۱۲.۷۳۱	۲۲.۵۱۱	۱۸.۴۷۷	-۰.۲۷۳	۰.۴۸۴
بهترین	*			۲۲.۲۵۸	۲.۱۸۴	۱۶.۹۳۴	۱۲.۹۳۲	-۱.۱۹۱	۰.۲۲۲
بدترین	*			۲۱.۲۸۰	۱.۹۶۱	۱۶.۲۷۲	۱۲.۶۹۲	-۱.۲۱۲	۰.۲۱۲

جدول ۵ شرایط سایت مورد نظر در هر بازه ی زمانی بدون وجود هیچ فرمی را نشان می‌دهد. اعداد ستون دسته بندی در جدول ۵ طبق جدول ۷ نمایانگر بازه‌های تنش است، اعداد منفی تنش سرمایی و اعداد مثبت تنش گرمایی را نشان داده و هر چه قدرمطلق این اعداد بیشتر باشد، میزان تنش نیز بیشتر است. اعداد ستون آسایش جدول ۵ مطابق جدول ۶ در بازه بین ۰ و ۱ هستند. هر چه این عدد به یک نزدیک تر باشد، میزان تنش حرارتی محیط نیز بیشتر است.

جدول ۲. جدول وضعیت سایت بدون وجود ساختمان مورد بررسی (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۳)

Table 5. The site characteristics without the examined building

بازه زمانی	درصد فضای دارای آسایش حرارتی خارجی	میانگین درجه آسایش حرارتی خارجی (UTCI)	دسته بندی	آسایش
کل باز (پاییز+زمستان+بهار)	۴۳.۰۲۴	۱۳.۲۶۲	-۰.۱۵۰	۰.۴۳۰
بهار	۵۱.۵۷۸	۲۳.۸۸۴	۰.۹۴۴	۰.۵۱۵
پاییز	۴۹.۴۸۵	۱۳.۵۶۹	-۰.۱۸۴	۰.۴۹۴
زمستان	۲۵.۷۰۱	۲.۹۸۲	-۱.۱۲۲	۰.۲۵۷

جدول ۶. دسته بندی آسایش حرارتی بر اساس میزان تنش (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۳)

Table 6. Classification of thermal comfort based on the amount of stress

بدون تنش حرارتی	۱
دارای تنش حرارتی	۰

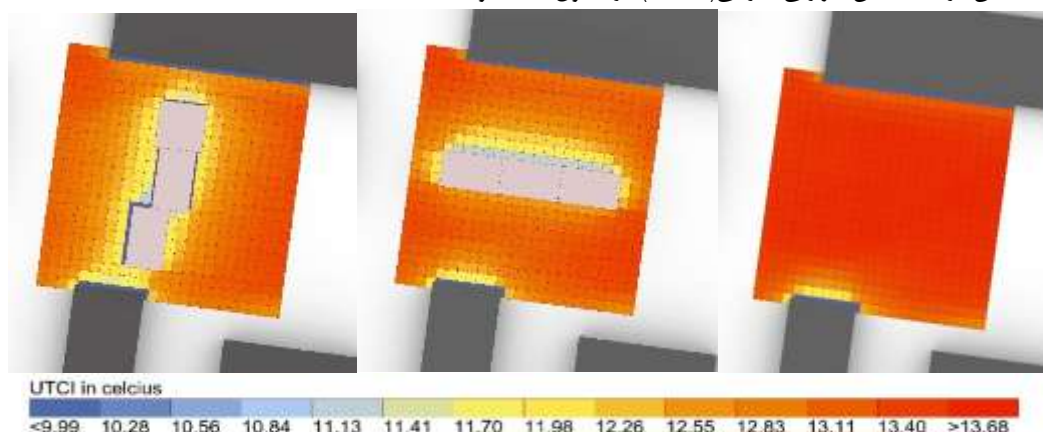
جدول ۳. دسته بندی بازه های تنش حرارتی در قالب اعداد (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۳)

Table 7. Classification of thermal stress in the form of numbers

ردیف	بازه	دسته بندی تنش	عدد
۱	$UTCI < -۴۰$	تنش سرمایی شدید	-۵
۲	$-۴۰ \leq UTCI < -۲۷$	تنش سرمایی بسیار قوی	-۴
۳	$-۲۷ \leq UTCI < -۱۳$	تنش سرمایی قوی	-۳
۴	$-۱۳ \leq UTCI < ۰$	تنش سرمایی متوسط	-۲

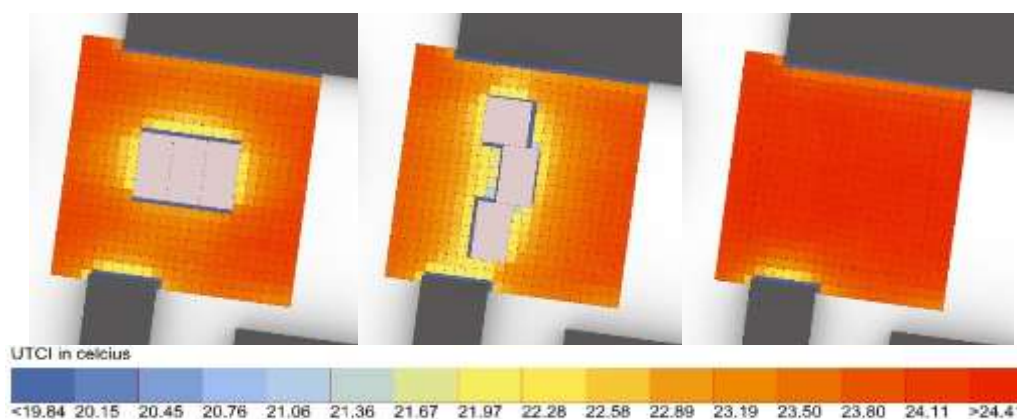
۵	$0 \leq UTCI < 9$	تنش سرمایی کم	-۱
۶	$9 \leq UTCI < 26$	بدون تنش حرارتی	۰
۷	$26 \leq UTCI < 28$	تنش گرمایی کم	+۱
۸	$28 \leq UTCI < 32$	تنش گرمایی متوسط	+۲
۹	$32 \leq UTCI < 38$	تنش گرمایی قوی	+۳
۱۰	$38 \leq UTCI < 46$	تنش گرمایی بسیار قوی	+۴
۱۱	$46 < UTCI$	تنش گرمایی شدید	+۵

تصاویر ۵ تا ۸ دیاگرام‌های میانگین درجه آسایش حرارتی خارجی بهترین و بدترین فرم را در بازه‌های زمانی مختلف نشان می‌دهند. همچنین دیاگرام وضعیت سایت که اعداد آن در جدول ۵ نشان داده شده است نیز در این تصاویر قابل مشاهده است. در واقع شکل‌های زیر دیاگرام‌های ستون‌های میانگین درجه آسایش حرارتی خارجی (UTCI) در جدول‌های ۵ و ۴ است.



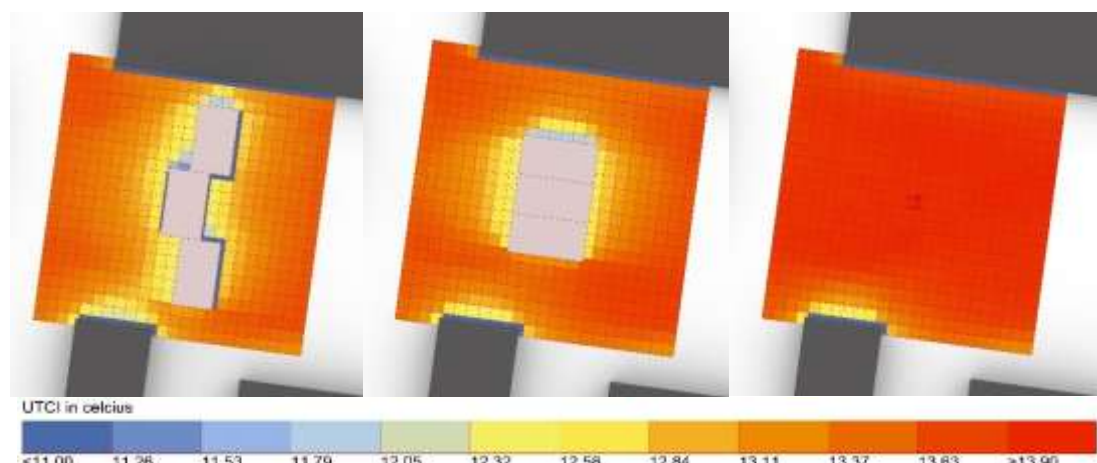
شکل ۵. آسایش حرارتی خارجی سایت، بهترین فرم و بدترین فرم در کل بازه زمانی (پاییز، زمستان و بهار) از راست به چپ (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۳)

Figure 5. Outdoor thermal comfort of the site, the best form and the worst form in the whole period (autumn, winter and spring) from right to left



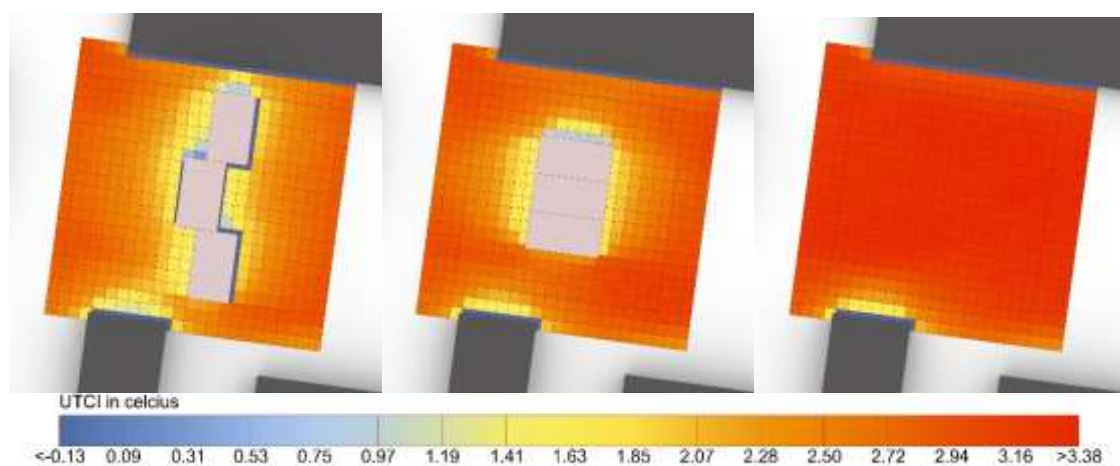
شکل ۶. آسایش حرارتی خارجی سایت، بهترین فرم و بدترین فرم در بهار از راست به چپ (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۳)

Figure 6. Outdoor thermal comfort of the site, best form and worst form in spring from right to left



شکل ۷. آسایش حرارتی خارجی سایت، بهترین فرم و بدترین فرم در پاییز از راست به چپ (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۳)

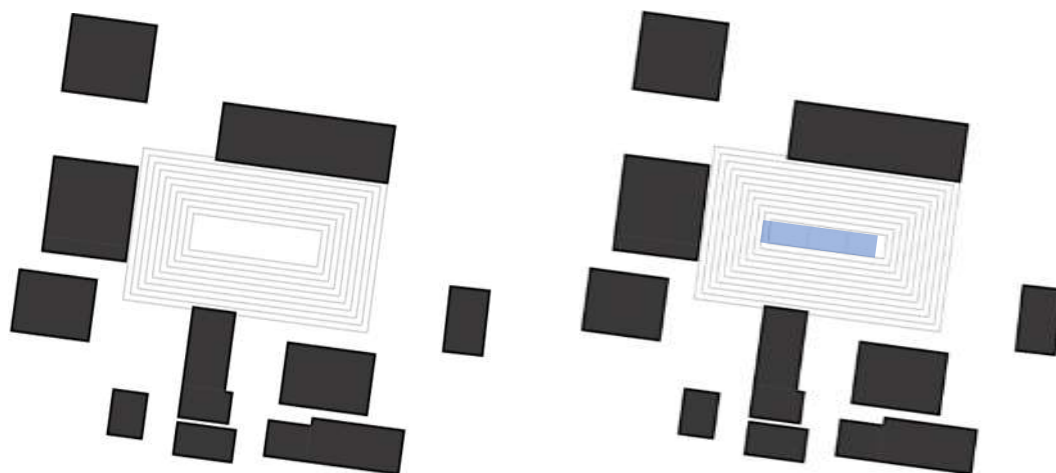
Figure 7. Outdoor thermal comfort of the site, best form and worst form in autumn from right to left



شکل ۸. آسایش حرارتی خارجی سایت، بهترین فرم و بدترین فرم در زمستان از راست به چپ (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۳)

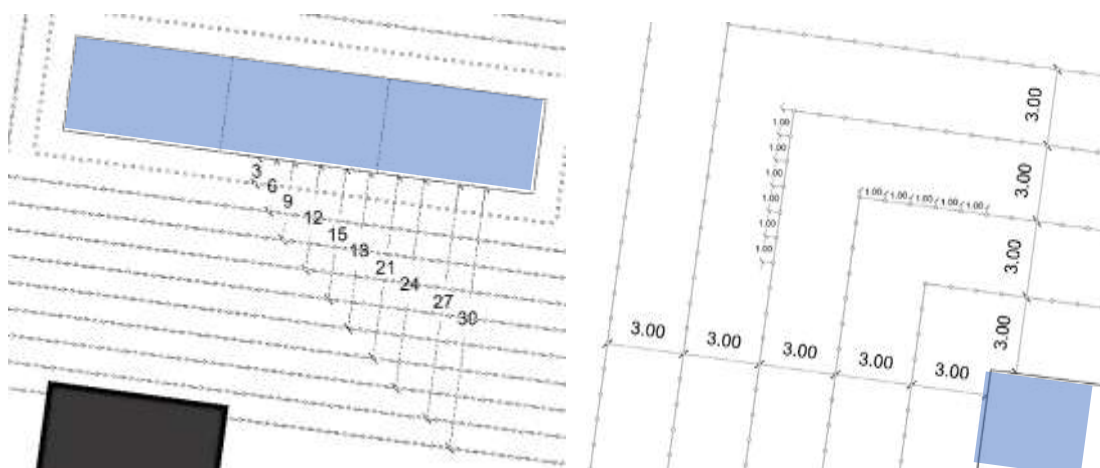
Figure 8. Outdoor thermal comfort of the site, the best form and the worst form in winter from right to left

مطابق شکل‌های ۹ و ۱۰، در فاصله سه متری از محیط اطراف ساختمان، نقاطی قرار داده شد و میانگین درجه آسایش حرارتی خارجی در این نقاط اندازه گرفته شد. اختلاف بین درجه آسایش حرارتی خارجی نقاط قرار گرفته در اطراف ساختمان و درجه آسایش حرارتی همان نقاط در همان موقعیت اما بدون وجود ساختمان اندازه گیری شد (شکل ۹). سپس این محاسبات با افزایش فاصله (۳ متری) نقاط دور تا دور ساختمان از بنای ساختمان، مجدداً انجام گرفت. اختلاف بین درجه آسایش حرارتی نقاط مشخص شده با وجود ساختمان و درجه آسایش حرارتی بدون وجود ساختمان نشان دهنده تأثیر حضور این بنا بر آسایش حرارتی محیط اطرافش است. فاصله ای که در آن، این اختلاف به صفر برسد، به این معناست که وجود ساختمان بر آسایش حرارتی خارجی در آن فاصله تأثیری ندارد. بنابراین این اختلاف نشان دهنده این است که وجود ساختمان مورد نظر تا چه فاصله‌ای بر آسایش حرارتی خارجی محیط تأثیر گذار است (جدول ۸).



شکل ۹. حالت A: جایگذاری نقاط با وجود ساختمان و حالت B: جایگذاری نقاط بدون وجود ساختمان به ترتیب از (راست به چپ) (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۳)

Figure 9. A: Placement of points with building and B: Placement of points without building (in order from right to left)



شکل ۱۰. موقعیت قرارگیری نقاط برای اندازه گیری آسایش حرارتی خارجی در فواصل مساوی (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۳)

Figure 10. points placement for outdoor thermal comfort measurement at equal distances

جدول ۸. اختلاف آسایش حرارتی خارجی با فرم و بدون فرم در فواصل مختلف (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۳)

Table 8. The difference of outdoor thermal comfort with and without form at different distances

۱۵ متر		۱۲ متر		۹ متر		۶ متر		۳ متر		آسایش حرارتی خارجی
درصد	درجه آسایش	درصد	درجه آسایش	درصد	درجه آسایش	درصد	درجه آسایش	درصد	درجه آسایش	
۰/۰۶۱	-۰/۳۶۱	-۰/۰۲۶	-۰/۴۷۷	-۰/۰۱۵	-۰/۰۶۳۷	-۰/۰۳۴۸	-۰/۰۸۶۵	-۰/۰۵۷۶	-۱/۲۳۶	حالت B - حالت A
۳۰ متر		۲۷ متر		۲۴ متر		۲۱ متر		۱۸ متر		آسایش حرارتی خارجی
درصد	درجه آسایش	درصد	درجه آسایش	درصد	درجه آسایش	درصد	درجه آسایش	درصد	درجه آسایش	
-۰/۰۱۷	۰/۰۷۳	-۰/۰۲۴	-۰/۰۱۳۵	-۰/۰۰۳	-۰/۰۱۶۳	۰/۰۷۲	-۰/۰۲۲۶	۰/۰۹۷	-۰/۰۲۹	حالت B - حالت A

در جدول ۹، بهترین فرم به صورت کلی (بهترین فرم برای محدوده زمانی بررسی شده)، در هر فصل به صورت جداگانه بررسی شد، تا تاثیرات و تغییرات ایجاد شده در آسایش حرارتی خارجی توسط بهترین فرم در هر فصل مشخص شود.

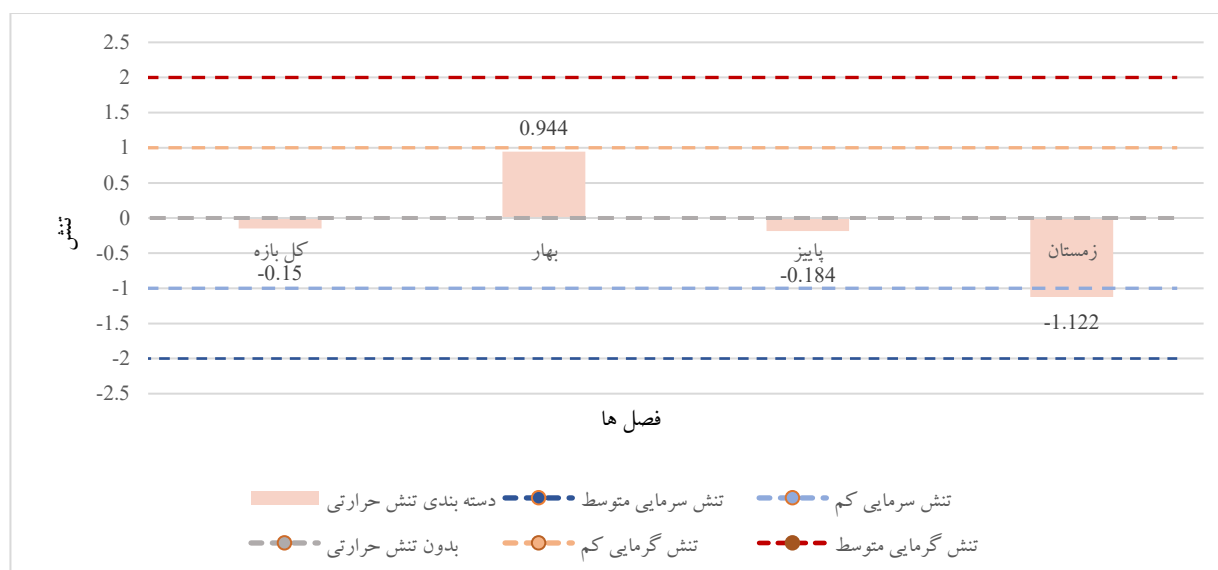
جدول ۹. بررسی بهترین فرم کلی در فصول مختلف (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۳)

Table 9. Examining the best form in different seasons

زمستان	پاییز	بهار	بهترین فرم /
۲۲.۱۴۴	۴۸.۵۶۹	۵۴.۵۹۵	درصد فضای دارای آسایش حرارتی خارجی
۲.۱۶۸	۱۲.۹۰۴	۲۲.۷۷۲	میانگین درجه آسایش حرارتی خارجی (UTCI)

۵. بحث

در این بخش به تحلیل و نتیجه گیری از داده‌های به دست آمده پرداخته می‌شود. با بررسی تنش‌های سایت در جدول ۵، بیشترین تنش حرارتی در بین فصول، مربوط به فصل زمستان است و کمترین تنش حرارتی مربوط به فصل پاییز می‌باشد. بنابراین فصلی که بیشترین تاثیر را در کل بازه زمانی دارد فصل زمستان است. همچنین در شکل ۱۱، مشاهده می‌شود که تنش سایت در کل بازه زمانی انتخابی منفی است و فصل‌های زمستان و پاییز نیز دارای تنش سرمایی هستند. بنابراین تنش سرمایی تاثیر بیشتری بر شرایط سایت گذاشته است. و مقایسه قدر مطلق اعداد شکل ۱۱، نشان می‌دهد که بیشترین مقدار تنش حرارتی در سایت مربوط به فصل زمستان است. بنابراین در بازه شرایط مورد بررسی تنش سرمایی و فصل زمستان تنش غالب است.



شکل ۳. دسته بندی تنش حرارتی سایت در فصول مختلف (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۳)

Figure 11. Classification of thermal stress of the site in different seasons

در ادامه با تحلیل نتایج با استفاده از جدول ۹، جدول ۱۱ ارائه شد. در جدول زیر در ردیف دوم، بهترین فرم به دست آمده برای داشتن فضایی با حداکثر زمان دارای آسایش حرارتی خارجی در کل بازه زمانی که دیاگرام آن نیز در جدول زیرین دیده می‌شود، در هر فصل به طور جداگانه بررسی شد. سپس میانگین درجه آسایش حرارتی خارجی بهترین فرم برای هر فصل که در جدول ۹۹ و دیده می‌شود در ردیف اول جدول زیر نوشته شد. اختلاف این دو عدد، نشان دهنده این موضوع است که بهترین فرم برای کل محدوده زمانی انتخابی، شرایط حرارتی کدام فصل را بهبود بیشتری داده است و در نتیجه بهترین فرم کلی از چه تنش حرارتی تاثیر بیشتری داشته است.

جدول ۱۰. مقایسه بهترین فرم هر فصل و بهترین فرم در فصول مختلف (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۳)

Table 10. Comparison of the best form of each season and the best form in different seasons

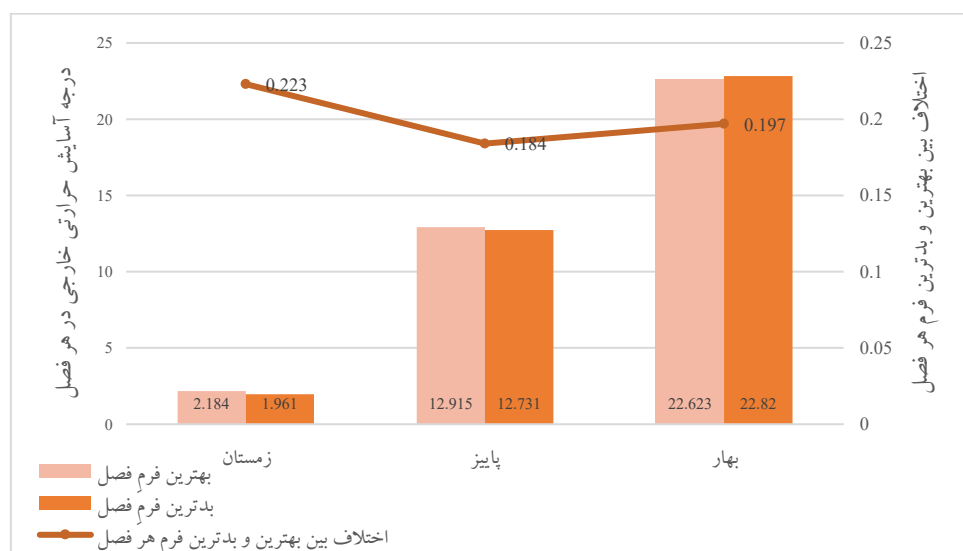
ردیف	بازه زمانی:	میانگین درجه آسایش حرارتی خارجی (UTCI)			کل سال
		زمستان	پاییز	بهار	
۱	بهترین فرم فصل	۲/۱۸۴	۱۲/۹۱۵	۲۲/۶۲۳	۱۲/۳۹۰
۲	بدترین فرم فصل	۲/۱۶۸	۱۲/۹۰۴	۲۲/۷۷۲	
۳	اختلاف	۰/۰۱۶	۰/۰۱۱	۰/۰۱۴۹	

در جدول ۱۱، اختلاف بین ردیف اول و دوم عدد منفی به دست می‌آید، و بقیه ی فصول عدد مثبت، این بدین معناست که در بهار برای افزایش آسایش حرارتی خارجی نیاز به کاهش درجه و در فصل‌های سرد نیاز به افزایش درجه است. و به این دلیل که بهترین فرم فصل بهار دارای آسایش بیشتری از بهترین فرم کل بازه زمانی در فصل بهار است، عدد فصل بهار منفی است. اما با مقایسه قدرمطلق این اختلاف‌ها (جدول ۱۱) مشاهده می‌شود که اختلاف بین بهترین فرم فصل و بهترین فرم کل بازه زمانی در همان فصل، در فصول پاییز و زمستان کمتر از بهار است. این اختلاف نشان می‌دهد که بهترین فرم کل بازه زمانی، به بهترین فرم فصول سرد نزدیک تر است و در بهینه سازی تلاش شده تا فصل‌های سرد اولویت قرار داده شود، زیرا تنش سرمایی از تنش گرمایی در این محدوده زمانی و سایت مورد نظر تأثیر بیشتری بر آسایش حرارتی خارجی می‌گذارد.

جدول ۱۱. مقایسه آسایش حرارتی خارجی بهترین و بدترین فرم فصل (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۳)

Table 11. Comparison of outdoor thermal comfort of the best and worst form of the season

	میانگین درجه آسایش حرارتی خارجی (UTCI)		
	بهار	پاییز	زمستان
بهترین فرم فصل	۲۲.۶۲۳	۱۲.۹۱۵	۲.۱۸۴
بدترین فرم فصل	۲۲.۸۲۰	۱۲.۷۳۱	۱.۹۶۱
اختلاف	-۰.۱۹۷	۰.۱۸۴	۰.۲۲۳

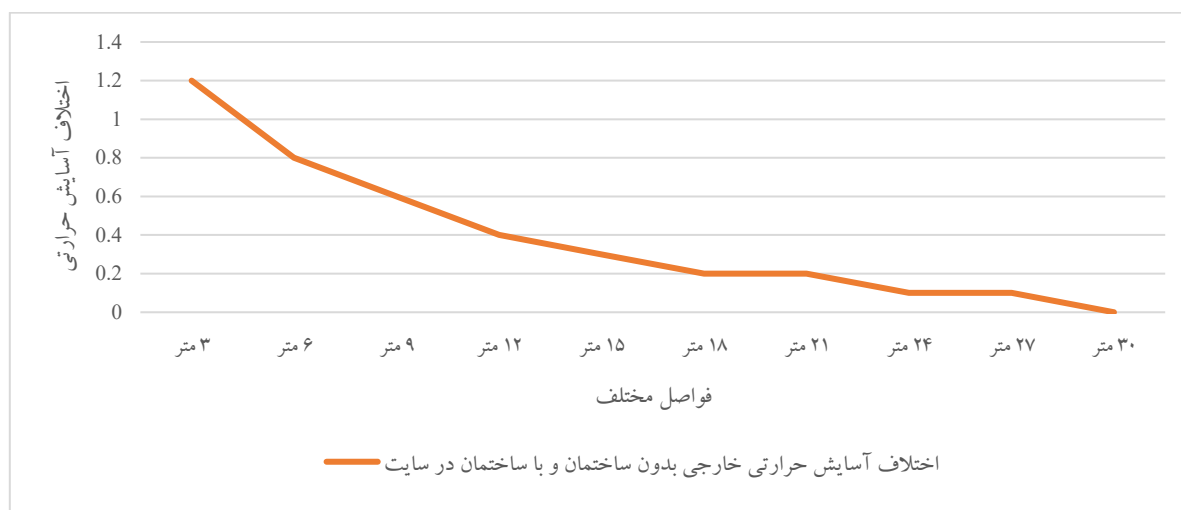


شکل ۱۲. مقایسه درجه آسایش حرارتی خارجی بهترین و بدترین فرم هر فصل (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۳)

Figure 12. Comparing the degree of outdoor thermal comfort of the best and worst forms of each season

شکل ۱۲ با نشان دادن اختلاف بین بهترین فرم هر فصل و بدترین فرم همان فصل، می‌تواند میزان تاثیر تغییر فرم بر شرایط آسایش حرارتی هر فصل را مشخص کند. همان طور که مشاهده می‌شود، قدر مطلق اختلاف در زمستان بیشترین مقدار است و به ترتیب در بهار و پاییز این اختلاف کم و کمتر می‌شود. این اختلاف جزئی نشان می‌دهد که تغییرات فرم بنا در فصل زمستان می‌تواند بیشترین تغییرات و بهبود در آسایش حرارتی را به وجود آورد (شکل ۱۲).

با توجه به جدول ۸، وجود اختلاف منفی در درصد و درجه آسایش حرارتی خارجی نشان می‌دهد که به طور کلی وجود یک ساختمان در محدوده سایت، شرایط آسایش حرارتی را بدتر می‌کند، و کاهش تعداد ساختمان‌ها باعث بهبود شرایط آسایش می‌شود. همچنین نمودار ۱۳ نشان می‌دهد که با افزایش فاصله از ساختمان، تاثیر فرم بر آسایش حرارتی خارجی نیز کاسته می‌شود. و در سایت انتخابی، حضور فرم مورد نظر در سایت قابلیت این را دارد که شرایط آسایش حرارتی اطراف خود را تا فاصله ۳۰ متری از ساختمان تغییر دهد.



شکل ۱۳. اختلاف آسایش حرارتی خارجی بدون ساختمان و با ساختمان در سایت (دقت ۰.۱) (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۳)
Figure 13. Difference of outdoor thermal comfort without building and with building on the site (accuracy 0.1)

۶. نتیجه گیری

نتایج نشان داد تنش کل بازه ی شبیه سازی شده در سایت منفی است. همچنین تنش فصول پاییز و زمستان منفی و تنش حرارتی فصل بهار مثبت است. به علت بیشتر بودن قدرمطلق تنش زمستان از فصول دیگر و بیشتر بودن روزهایی با تنش سرمایی در بازه زمانی بررسی شده، آسایش حرارتی خارجی در کل بازه زمانی دارای تنش منفی است و تنش سرمایی در بازه مورد نظر غالب است. مقایسه اختلاف بهترین فرم کل بازه زمانی در فصول مختلف به صورت جداگانه، با بهترین فرم هر فصل نشان می‌دهد که این اختلاف در فصول پاییز و زمستان کمتر از بهار است. از این موضوع می‌توان نتیجه گرفت که بهترین فرم انتخابی برای کل بازه توسط بهینه سازی، به بهترین فرم فصول سرد نزدیک تر است و در بهینه سازی تلاش شده تا فصل‌های سرد اولویت قرار داده شود، زیرا تنش سرمایی از تنش گرمایی در محدوده زمانی معین شده، مطابق پاراگراف قبل، تاثیر بیشتری بر آسایش حرارتی خارجی می‌گذارد.

در ادامه محاسبه اختلاف بین بهترین فرم و بدترین فرم هر فصل، نشان داد که تغییر فرم در کدام فصل قابلیت ایجاد بیشترین تغییر را در شرایط آسایش حرارتی خارجی دارد. نتایج نشان داد که قدرمطلق اختلاف از بیشترین به کمترین به ترتیب در زمستان، بهار و پاییز است. بنابراین تغییرات فرم بنا در فصل زمستان تاثیر بیشتری بر تغییر شرایط آسایش حرارتی خارجی دارد و می‌تواند بیشترین تغییرات و بهبود در آسایش حرارتی را به وجود آورد.

با بررسی اختلاف بین آسایش حرارتی بدون وجود فرم و با وجود فرم در سایت در فواصل مختلف، در نقاط مشخص شده، مشاهده شد که وجود بهترین فرم در سایت می‌تواند شرایط آسایش حرارتی را تا فاصله ی ۳۰ متری از ساختمان تغییر دهد. بررسی کیفی نتایج نشان داد بهترین فرم کل بازه زمانی، مستطیلی با کشیدگی شرقی-غربی و بدون پیش آمدگی یا فرو رفتگی است. با مقایسه بهترین فرم‌های فصل‌های پاییز، بهار و زمستان با بهترین فرم کل بازه، مشاهده می‌شود که بهترین فرم در کل بازه، دارای فرمی مشابه فرم زمستان و پاییز است و به صورت متراکم و مستطیل شکل انتخاب شده است. علت تشابه بین بهترین فرم کل بازه زمانی با بهترین فرم فصول سرد، غالب بودن تنش سرمایی در کل بازه زمانی است. این فرم‌ها سطوح رو به خورشید بیشتری دارند و بدون پیش آمدگی و فرو رفتگی هستند و تا با کاهش سایه اندازی و افزایش دریافت تابش، حداکثر نور جنوب را دریافت کند و تنش حرارتی سرمایی را تشدید نکند. با توجه به نتایج ارائه شده، علت این

که بهترین فرم کل بازه با وجود تنش سرمایی کاملاً مشابه بهترین فرم فصل پاییز و زمستان نیست، تأثیرات تنش گرمایی فصل بهار در بازه زمانی مورد بررسی می‌باشد به صورتی که بهترین فرم کل بازه مشابه بهترین فرم زمستان و پاییز به مربع نزدیک نیست و مستطیلی با کشیدگی شرقی غربی است، این کشیدگی با ایجاد سایه بیشتر در قسمت شمالی ساختمان، می‌تواند فضای مناسبی برای آسایش در فصل گرم را نیز فراهم کند و کشیدگی شرقی غربی و سطح رو به جنوب زیاد و بدون خلل و فرج بودن آن باعث دریافت حداکثر تابش مستقیم در فصول سرد می‌شود. در بهترین فرم بهار برای کاهش تنش گرمایی، سطوح رو به جنوب به علت کشیدگی شمالی-جنوبی به حداقل رسیده و بخشی از سطوح رو به جنوب نیز به علت پیش آمدگی و فرورفتگی‌ها در سایه قرار می‌گیرند تا تابش کمتری را دریافت کند. متعاقباً با توجه به موارد گفته شده به علت تنش های گرمایی، بهترین فرم در فصل بهار تقریباً مشابه بدترین فرم کل بازه زمانی، و بدترین فرم در فصول زمستان و پاییز است.

۷. منابع

۱. عزیزی، محمد مهدی، امین زاده، بهناز، و آقاملائی، ریحانه (۱۳۹۹). ارزیابی عملکرد حرارتی بافت های شهری در اقلیم شهر تهران: آموزه هایی برای طراحی شهری حساس به شرایط خرد اقلیم. نشریه هنرهای زیبا - معماری و شهرسازی، ۲۵(۱)، ۵-۱۵. <https://doi.org/10.22059/jfaup.2020.296175.672397>
۲. عادل، سمیرا و ندیمی، هادی. (۱۳۹۹). مرزهای مفهومی فرم در معماری، باغ نظر، ۱۷(۸۹)، ۵۵-۷۰. <https://doi.org/10.22034/bagh.2020.197836.4263>
۳. عالمی، بابک و مجیدی، مرتضی. (۱۴۰۱). ارزیابی تأثیر مؤلفه های شکل دهنده فرم بر وجوه آن به منظور دستیابی به فرم معماری مطلوب، مورد مطالعاتی: ساختمان سازمان میراث فرهنگی. معماری و شهرسازی آرمان شهر، ۱۵(۴۰)، ۱۲۹-۱۴۷. Doi: 10.22034/aaud.2021.272595.2420
۴. عالمی، بابک، پوردیهیمی، شهرام و مشایخ فریدنی، سعید. (۱۴۰۰). سازه، فرم و معماری، مطالعات معماری ایران، ۵(۹)، ۱۲۳-۱۴۰.
۵. علیجانی، بهلول، و سادات رضوی، زینب (۱۳۹۶). مقایسه شاخص های آسایش برای ارزیابی راحتی اقلیمی شهر تهران. اندیشه جغرافیایی، ۱۶(۸)، ۱۴۵-۱۶۹. <https://geonot.znu.ac.ir>
۶. کرمی راد، سینا، بنزاده، بهاره، زارعی، هانی، و قزلباش، ابراهیم (۱۳۹۷). ارزیابی و تحلیل آسایش حرارتی حیات خانه های تاریخی شهر شیراز در دوره ی قاجاریه. پژوهش های باستان شناسی ایران، ۹(۲۰)، ۱۸۳-۲۰۲. <https://doi.org/10.22084/nbsh.2019.17023.1792>
7. Adeli, S. and Nadimi, H. (2020). Conceptual Limits of Form in Architecture. *The Monthly Scientific Journal of Bagh-e Nazar*, 17(89), 55-70. <https://doi.org/10.22034/bagh.2020.197836.4263> [In Persian].
8. Alemi, B. and Majidi, M. (2022). Evaluating the Components Constituting Form and their Effects on Form Features to Achieve a Desirable Architectural Form; Case Study: Cultural Heritage Organization Building. *Armanshahr Architecture & Urban Development*, 15(40), 129-147. doi:10.22034/aaud.2021.272595.2420. Doi: 10.22034/aaud.2021.272595.2420 [In Persian].
9. Alemi, B. Pourdehimi, S. and Mashayekh Faridani, S. (2022). Structure, Form and Architecture. *Journal of Iranian Architecture Studies*, 5(9), 123-140. [In Persian].
10. Alijani, B., & Sadat Razavi, Z. (2017). Comparing the different climatic indices in assessing the comfort condition of Tehran urban area. *Geographical Notion*, 8(16), 145-169. <https://geonot.znu.ac.ir> [In Persian].
11. ASHRAE. (2017). Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. *ASHRAE Standard 55-2017*.
12. Azizi, M., Aminzadeh, B., & Aghamolaei, R. (2020). An Evaluation of Thermal Performance of Urban Fabrics in Tehran Climate: Implications for Micro Climate-Sensitive Urban Design. *Journal of Fine Arts: Architecture and Urban Planning*, 25(1), 5-15. <https://doi.org/10.22059/jfaup.2020.296175.672397> [In Persian].
13. Bedra, K. B., Zheng, B., Li, J., & Luo, X. (2023). A Parametric-Simulation Method to Study the Interconnections between Urban-Street-Morphology Indicators and Their Effects on Pedestrian Thermal Comfort in Tropical Summer. *Sustainability*, 15(11). <https://doi.org/10.3390/su15118902>
14. Blazejczyk, K., Jendritzky, G., Bröde, P., Baranowski, J., Fiala, D.,...Kampmann, B. (2013). An introduction to the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *Geographia Polonica*. 86. 5-10. DOI:10.7163/GPol.2013.1
15. Borges, R.F. (2001). Evolution of architectural forms of historic buildings. 55. 599-608.

16. Centnerová, H. (2018). On the history of indoor environment and its relation to health and wellbeing. *REHVA Journal*, 14-20.
17. Chen, H., Liu, R., & Zhang, Y. (2023). The Impact of Vegetation Canopy on the Outdoor Thermal Environment in Cold Winter and Spring. *Sustainability*, 15(17). <https://doi.org/10.3390/su151712818>
18. Coccolo, S., Kämpf, J., & Scartezzini, J., & Pearlmutter, D. (2016). Outdoor human comfort and thermal stress: A comprehensive review on models and standards. *Urban Climate*. 18. DOI: [10.1016/j.uclim.2016.08.004](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.08.004).
19. Dyson, R., & Renk, K. (2006). Freshmen Adaptation to University Life: Depressive Symptoms, Stress, and Coping. *Journal of Clinical Psychology*, 62(10), 1231-1244. <https://doi.org/10.1002/jclp.20295>
20. Erzen-Jale, Nejdet. (2015). Form and meaning in architectural theory. *SAJ - Serbian Architectural Journal*. 7. 75-84. DOI: [10.5937/SAJ1501075E](https://doi.org/10.5937/SAJ1501075E)
21. Fabbri, K. (2015). *A Brief History of Thermal Comfort: From Effective Temperature to Adaptive Thermal Comfort*. Indoor Thermal Comfort Perception (7-23). DOI: [10.1007/978-3-319-18651-1_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-18651-1_2)
22. Fiala, D., Havenith, G., Bröde, P., Kampmann, B., & Jendritzky, G. (2011). UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *International journal of biometeorology*. 56. 429-41. DOI: [10.1007/s00484-011-0424-7](https://doi.org/10.1007/s00484-011-0424-7).
23. Gachkar, D., Taghvaei, S., & Norouzian-Maleki, S. (2021). Outdoor thermal comfort enhancement using various vegetation species and materials (case study: Delgosha Garden, Iran). *Sustainable Cities and Society*, 75(1). <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103309>
24. Jamshid Davtalab, Shahram Poor Deyhimi, Valentina Dessi, Mohammad Reza Hafezi, Morteza Adib,
25. The impact of green space structure on physiological equivalent temperature index in open space,
26. *Urban Climate*, Volume 31, 2020, 100574, ISSN 2212-0955, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100574>.
27. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212095518301809>)
28. Kakon, A. N., & Nobuo, M. (2012). The effects of building form on microclimate and outdoor thermal comfort in a tropical city. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 6(11), 1492-1503. <https://www.researchgate.net>
29. karamirad, s., banazade, b., zarei, h., & Ghezelbash, E. (2019). Assessment and Analysis of Thermal Comfort Courtyards of Shiraz Historical Houses in Qajar Era. *Pazhohesh-ha-ye Bastanshenasi Iran*, 9(20), 183-202. <https://doi.org/10.22084/nbsh.2019.17023.1792> [In Persian].
30. H. Kiani, J. Davtalab, M. Adib, A. Heidari, 2025, The Effect of Fountains and Vegetation on Temperature, Humidity and Thermal Comfort in Open Spaces with a Focus on Persian Garden: A Case Study of Kashan City
31. Volume 16, Issue 2, Spring 2025, Pages 270-278 <https://doi.org/10.5829/ijee.2025.16.02.09>
32. Kumar, P & Sharma, A. (2020). Study on importance, procedure, and scope of outdoor thermal comfort –A review. *Sustainable Cities and Society*, 61. DOI: [10.1016/j.scs.2020.102297](https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102297).
33. Liu, Z., Li, J., & Xi, T. (2023). A Review of Thermal Comfort Evaluation and Improvement in Urban Outdoor Spaces. *Buildings*, 13(12), 3050. <https://doi.org/10.3390/buildings13123050>
34. López-Cabeza, V. P., Diz-Mellado, E., Rivera-Gómez, C., Galán-Marín, C., & Samuelson, H. W. (2022). Thermal comfort modelling and empirical validation of predicted air temperature in hot-summer Mediterranean courtyards. *Journal of Building Performance Simulation*, 15(1), 39–61. <https://doi.org/10.1080/19401493.2021.2001571>
35. Ning, W., Yin, J., Chen, Q., & Sun, X. (2023). Effects of brief exposure to campus environment on students' physiological and psychological health. *Front Public Health*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1051864>
36. Olivera, P. C., Gordillo, P. G., Mejía, H. N., Taborga, I. L., Chacón, A. G., & Unzueta, A. S. (2023). Academic stress as a predictor of mental health in university students. *Cogent Education*, 10(2). <https://doi.org/10.1080/2331186X.2023.2232686>
37. Rupp, R., Giraldo Vásquez, N., & Lamberts, R. (2015). A review of human thermal comfort in the built environment. *Energy and Buildings*. 105. 178–205. DOI: [10.1016/j.enbuild.2015.07.047](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.047).
38. Samadpour Shahrak, E., Sattari Sarbangholi, H., & Moosavi, M. (2022). Improving Outdoor Thermal Comfort for Elderly in Residential Complexes. *Iranian (Iranica) Journal of Energy & Environment*, 13(1), 55-70. <https://doi.org/10.5829/ijee.2022.13.01.07>
39. Sedira, S., & Mazouz, S. (2023). The effect of urban geometry on outdoor thermal comfort. Application of the UTCI index in hot and arid climates. *Technium: Romanian Journal of Applied Sciences and Technology*, 6, 23–31. <https://doi.org/10.47577/technium.v2021i.8140>
40. Sun, R., Liu, J., Lai, D., & Liu, W. (2023). Building form and outdoor thermal comfort: Inverse design the microclimate of outdoor space for a kindergarten. *Energy & Buildings*, 284, 112824. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112824>
41. Xu, X., Liu, Y., Wang, W., Xu, N., Liu, K., & Yu, G. (2019). Urban Layout Optimization Based on Genetic Algorithm for Microclimate Performance in the Cold Region of China. *Applied Sciences*, 9(22).

- <https://doi.org/10.3390/app9224747>
42. Yazıcıoğlu, G., & Gursel Dino, I. (2021). From Streetscape to Data Semantic segmentation for the prediction of outdoor thermal comfort. eCAADe. <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2021.1.555>
43. Zafarmandi, S., Mahdavinnejad, M., Norford, L., & Matzarakis, A. (2022). Analyzing Thermal Comfort Sensations in Semi-Outdoor Space on a University Campus: On-Site Measurements in Tehran's Hot and Cold Seasons. Atmosphere, 13(7), 1034. <https://doi.org/10.3390/atmos13071034>