



تحلیل تأثیر رنگ و بافت مصالح نمای ساختمانی بر دمای سطح و دمای محیط اطراف: مطالعه میدانی در بافت نوساز منطقه ۲۲ تهران

علی سیری^۱

^۱ کارشناسی ارشد رشته مهندسی معماری، دانشگاه آزاد اسلامی ورامین_پیشوا، ورامین، ایران.

آدرس پست الکترونیک: Ali.siri222@gmail.com

چکیده

در سال‌های اخیر، موضوع تأثیر مصالح ساختمانی بر شرایط حرارتی محیط شهری، به‌ویژه در بافت‌های نوساز، به یکی از محورهای اصلی پژوهش‌های حوزه شهرسازی پایدار و طراحی اقلیمی بدل شده است. هدف اصلی این پژوهش، تحلیل تأثیر رنگ و بافت مصالح نمای ساختمانی بر دمای سطح نما و دمای محیط پیرامونی در منطقه ۲۲ شهر تهران است. این منطقه به دلیل توسعه‌های عمرانی نوین و تراکم متوسط تا بالا، نمونه‌ای مناسب برای مطالعه میدانی محسوب می‌شود. پژوهش حاضر با رویکرد کمی و روش تجربی-میدانی، داده‌های دمای سطح و محیط را با استفاده از دوربین حرارتی و دماسنج دیجیتال در بازه زمانی مشخصی از تابستان ۱۴۰۲، از نماهای با رنگ‌ها و بافت‌های گوناگون جمع‌آوری کرده و با روش آماری تحلیل واریانس و رگرسیون چندمتغیره بررسی می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهد که نماهای با رنگ روشن و بافت صاف، به‌طور معناداری دمای سطح کمتری داشته و موجب کاهش محسوس در دمای محیط اطراف در ساعات اوج گرما شده‌اند. همچنین، تفاوت دمایی بین مصالح با بافت زبر و تیره‌رنگ در مقایسه با مصالح صاف و روشن، در بعضی نمونه‌ها به بیش از ۷ درجه سانتی‌گراد رسیده است. این نتایج می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری در سیاست‌گذاری‌های طراحی شهری اقلیمی، کاهش اثر جزیره حرارتی و ارتقاء آسایش حرارتی ساکنان در مناطق در حال توسعه کلانشهر تهران قرار گیرد.

کلمات کلیدی: رنگ نما، بافت مصالح، دمای سطح، آسایش حرارتی، منطقه ۲۲ تهران.

Analysis of the Impact of Color and Texture of Building Façade Materials on Surface and Ambient Temperature: A Field Study in the Newly Constructed Urban Context of District 22, Tehran

Ali Siri¹

¹ Master of Architecture Engineering, Varamin Azad University Peshva, Vcaramin, Iran.

Email: Ali.siri222@gmail.com

Abstract

In newly developed areas—has become a major focus in sustainable urban planning and climatic design. The main objective of this study is to analyze the effect of façade color and texture on surface and ambient temperature in District 22 of Tehran. Due to its recent urban development and moderate to high density, this district is an ideal case for field-based research. Using a quantitative and experimental-field methodology, this study collected surface and ambient temperature data during a designated period in the summer of 2023, employing thermal imaging and digital thermometers across various façade colors and textures. Statistical analysis via ANOVA and multivariable regression revealed that lighter and smoother façade materials significantly reduced surface and surrounding temperatures during peak heat hours. In some cases, the temperature difference between dark-colored rough textures and smooth light-colored materials exceeded 7°C. These findings support climate-sensitive design strategies aimed at mitigating urban heat island effects and improving thermal comfort in developing urban zones of Tehran.

Keywords: Façade color, Material texture, Surface temperature, Thermal comfort, District 22 Tehran.

۱- مقدمه

حرارتی شهری» است که به افزایش دمای مناطق شهری نسبت به نواحی اطراف اشاره دارد و عمدتاً ناشی از استفاده گسترده از مصالح غیرقابل نفوذ، تراکم ساختمانی بالا، و کاهش سطوح سبز می‌باشد [۱]. در این میان، ویژگی‌های

تحولات اقلیمی و گسترش بی‌رویه شهرنشینی، چالش‌های جدیدی را برای محیط زیست شهری به همراه داشته است. یکی از این چالش‌ها، پدیده «جزیره

فیزیکی و بصری مصالح ساختمانی، به‌ویژه رنگ و بافت نما، تأثیر مستقیمی بر میزان جذب یا بازتاب انرژی خورشیدی و به تبع آن، بر دمای سطح و محیط اطراف دارند [۲].

در طراحی معماری و شهرسازی اقلیمی، انتخاب مصالح مناسب برای نما، نقشی کلیدی در کنترل شرایط حرارتی و ارتقاء آسایش ساکنان ایفا می‌کند. رنگ‌های تیره به دلیل جذب بیشتر تابش خورشید، معمولاً دمای سطح بالاتری ایجاد می‌کنند؛ در حالی که رنگ‌های روشن با بازتاب بیشتر نور خورشید، می‌توانند دمای نما و در نتیجه دمای محیط اطراف را کاهش دهند [۳]. افزون بر رنگ، بافت سطح نیز بر رفتار حرارتی مصالح اثرگذار است. سطوح زبر یا برجسته، با افزایش سطح تماس و ایجاد سایه‌های ریز، می‌توانند بر نرخ انتقال حرارت تأثیر بگذارند و در شرایط خاص موجب حفظ گرمای بیشتر شوند [۴]. با توجه به اهمیت مدیریت انرژی و آسایش حرارتی در مناطق شهری، بررسی دقیق تأثیر رنگ و بافت نما، ساختمان‌ها بر دمای موضعی، امری ضروری در فرآیند طراحی پایدار محسوب می‌شود. منطقه ۲۲ شهر تهران، به‌عنوان یکی از نواحی در حال توسعه با ساخت‌وسازهای وسیع، فرصت مناسبی را برای بررسی این مسئله فراهم کرده است. تنوع بصری و مصالحی در نما، ساختمان‌های این منطقه، به پژوهشگران اجازه می‌دهد تا رابطه بین ویژگی‌های نما، ساختمان و شرایط حرارتی محیطی را به‌طور تجربی و میدانی مطالعه کنند.

در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی به بررسی نقش مصالح ساختمانی در گرمایش شهری پرداخته‌اند، اما اغلب آن‌ها بر خصوصیات کلی ساختمان یا الگوهای مصرف انرژی متمرکز بوده‌اند و کمتر به بررسی میدانی تأثیرات رنگ و بافت مصالح نما در شرایط اقلیمی خاص پرداخته‌اند [۵، ۶]. این خلأ پژوهشی، ضرورت اجرای مطالعه‌ای میدانی با داده‌های واقعی در مقیاس محلی را دوچندان می‌سازد؛ به‌ویژه در مناطقی مانند تهران که با بحران گرمای تابستانی و رشد سریع ساخت‌وساز مواجه است.

با توجه به تمرکز روزافزون سیاست‌گذاران بر توسعه شهری پایدار، بررسی علمی عوامل مؤثر بر دمای محیط شهری، به‌ویژه در بافت‌های نوساز، اهمیت زیادی پیدا کرده است. از جمله این عوامل، نوع و کیفیت مصالح ساختمانی مورد استفاده در نما، خارجی ساختمان‌هاست. نما به‌عنوان پوست دوم ساختمان، هم در عملکرد حرارتی و هم در کیفیت محیطی شهر نقش دارد. به عبارت دیگر، انتخاب نوع مصالح نما نه تنها بر آسایش حرارتی داخلی، بلکه بر دمای فضای پیرامونی نیز تأثیرگذار است [۷].

بررسی‌های تجربی نشان داده‌اند که نما، ساختمان‌هایی که از مصالح با رنگ روشن و ضریب بازتاب بالا استفاده می‌کنند، می‌توانند دمای محیط اطراف را در ساعات اوج گرما تا چند درجه کاهش دهند [۸]. این موضوع در اقلیم گرم و خشک مانند تهران که تابستان‌های طولانی و پرحرارت دارد، اهمیت مضاعفی می‌یابد. برعکس، استفاده از مصالح با رنگ تیره و جذب بالای نور خورشید، می‌تواند موجب افزایش دمای سطحی و تشدید پدیده جزیره حرارتی شود [۹].

از سوی دیگر، بافت سطح نیز می‌تواند در جذب یا دفع انرژی خورشیدی نقش داشته باشد. سطوح صاف تمایل بیشتری به بازتاب نور دارند، در حالی که سطوح زبر یا با خلل و فرج، تابش را به‌صورت پراکنده جذب می‌کنند و ممکن است موجب افزایش ماندگاری گرما در بافت ساختمان شوند [۱۰]. این موضوع به‌ویژه در نماهایی که دارای آجرهای نمای سنتی، سنگ‌های تراش‌خورده یا گچ‌بری‌های حجیم هستند، بارزتر است.

مطالعه‌ای که توسط Lee و همکاران (۲۰۱۳) انجام شد، نشان داد که در بافت‌های متراکم شهری، تفاوت میان دمای محیط در مجاورت نماهای با مصالح روشن و صاف، در مقایسه با نماهای تیره و زبر، می‌تواند تا ۵ درجه سانتی‌گراد نیز برسد [۱۱]. این اختلاف دما نه تنها بر آسایش ساکنان بلکه بر مصرف انرژی برای سرمایش ساختمان نیز تأثیرگذار است. بنابراین انتخاب آگاهانه مصالح نما می‌تواند به کاهش بار سرمایشی ساختمان‌ها و همچنین بهبود شرایط اقلیمی محلی کمک کند.

افزون بر آن، از منظر شهرسازی، نما، ساختمان‌ها به‌صورت تجمعی در منظر شهری مؤثرند و می‌توانند بر وضعیت تهویه طبیعی، بازتاب نور و حتی سطح تابش خورشیدی معابر نیز اثر بگذارند [۱۲]. بنابراین، تأثیر رنگ و بافت مصالح ساختمانی تنها محدود به یک ساختمان یا یک قطعه زمین نیست، بلکه دارای اثرات پیوسته و کلان در مقیاس محله‌ای و شهری است.

با وجود پیشرفت‌های علمی در حوزه طراحی اقلیمی، همچنان در بسیاری از پروژه‌های عمرانی، انتخاب رنگ و بافت نما عمدتاً بر اساس ملاحظات زیبایی‌شناختی یا سلیقه طراح انجام می‌شود و کمتر به تأثیرات محیطی آن توجه می‌شود. این در حالی است که در شرایط اقلیمی نیمه‌خشک و گرم تابستانه تهران، هرگونه تصمیم‌گیری در زمینه طراحی نما باید با لحاظ اثرات حرارتی، بازتابی و پایداری انجام شود [۱۳].

در بسیاری از شهرهای پیشرو، مقررات ساخت‌وساز به‌گونه‌ای تدوین شده‌اند که استفاده از مصالح با بازتاب حرارتی بالا را در نما الزامی یا مشوق کرده‌اند. به‌عنوان نمونه، در برنامه "LEED" ایالات متحده، انتخاب مصالح نما با ضریب بازتاب خورشیدی بالا (Solar Reflectance Index) به‌عنوان یکی از معیارهای امتیازدهی در نظر گرفته شده است [۱۴]. چنین سیاست‌هایی بیانگر جایگاه علمی و اجرایی رنگ و بافت در مدیریت حرارتی محیط مصنوع هستند. در زمینه پژوهش‌های انجام‌شده در داخل کشور، چند مطالعه به بررسی تأثیر نوع مصالح بر دمای داخلی ساختمان پرداخته‌اند، اما اغلب این پژوهش‌ها در مقیاس آزمایشگاهی یا با تمرکز بر عملکرد انرژی ساختمان صورت گرفته‌اند و تحلیل میدانی تأثیر رنگ و بافت نما بر دمای سطح و دمای پیرامونی بسیار محدود است [۱۵]. این خلأ پژوهشی به‌ویژه در مناطقی مانند منطقه ۲۲ تهران که دارای تنوع زیادی از نماها، اقلیم خاص و توسعه سریع شهری است، محسوس می‌باشد.

از سوی دیگر، اهمیت آسایش حرارتی در فضای شهری از دیدگاه سلامت عمومی نیز قابل تأمل است. مطالعات نشان می‌دهد که افزایش دمای محیط شهری به میزان حتی ۱ تا ۲ درجه سانتی‌گراد می‌تواند منجر به افزایش خطر ابتلا به بیماری‌های قلبی-عروقی، کاهش کیفیت خواب و افزایش مصرف انرژی برای تهویه مطبوع شود [۱۶]. بنابراین تأثیرات محیطی نماها نه تنها به جنبه‌های معماری و مهندسی بلکه به مسائل زیست‌محیطی، بهداشتی و اجتماعی نیز مربوط می‌شود.

با توجه به مجموعه این عوامل، پژوهش حاضر با هدف بررسی تجربی تأثیر رنگ و بافت مصالح نما، ساختمان بر دمای سطح و دمای محیط اطراف، به‌صورت میدانی در منطقه ۲۲ تهران انجام شده است. در این مطالعه تلاش شده تا با ثبت داده‌های واقعی، تحلیل آماری و کنترل متغیرهای محیطی، رابطه معناداری میان متغیرهای رنگ و بافت نما و شرایط حرارتی موضعی استخراج شود. نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان راهنمایی برای طراحان، معماران، شهرسازان و سیاست‌گذاران در راستای ایجاد محیط‌های شهری با آسایش بیشتر و مصرف انرژی کمتر مورد استفاده قرار گیرد.

نیز بر دمای موضعی تأثیرگذارند [۲۳]. از این رو، بررسی تأثیر رنگ و بافت مصالح نما باید در یک بستر واقعی و همراه با کنترل سایر متغیرهای محیطی انجام شود تا نتایج پژوهش از اعتبار علمی بالاتری برخوردار باشند.

از سوی دیگر، ملاحظات فرهنگی و اقتصادی نیز در انتخاب مصالح نما نقش دارند. در برخی مناطق، استفاده از سنگ‌های تیره‌رنگ مانند گرانیت یا سنگ لاشه، به دلیل تصور عمومی از استحکام یا زیبایی، رایج است؛ در حالی که این مصالح می‌توانند منبع ذخیره حرارتی بالایی باشند و باعث افزایش محسوس دمای سطح نما شوند [۲۴]. بنابراین، آگاهی‌بخشی به جامعه مهندسی، معماران و حتی ساکنان در خصوص پیامدهای اقلیمی انتخاب مصالح نما، از اهمیت بالایی برخوردار است.

یکی از مسائل مهمی که در طراحی و انتخاب مصالح نمای ساختمانی باید مدنظر قرار گیرد، پایداری عملکرد حرارتی مصالح در طول زمان است. برخی از مصالح، هرچند در زمان نصب عملکرد مناسبی دارند، اما در اثر تابش مستقیم آفتاب، گردوغبار، تغییرات رطوبتی یا آلودگی هوا، خاصیت بازتابی یا هدایت حرارتی خود را به مرور از دست می‌دهند [۲۵]. این فرسایش عملکردی می‌تواند موجب افزایش تدریجی دمای سطح نما و در نهایت افزایش بار حرارتی محیط پیرامون ساختمان شود. بنابراین، ارزیابی عملکرد مصالح نما باید نه تنها در شرایط آزمایشگاهی، بلکه در شرایط واقعی محیطی و در بازه زمانی معنادار صورت پذیرد.

پژوهش حاضر در پاسخ به همین ضرورت طراحی شده است. برخلاف بسیاری از مطالعات که به تحلیل نظری یا مدل‌سازی رایانه‌ای تأثیر مصالح نمایی می‌پردازند، این پژوهش بر پایه اندازه‌گیری‌های میدانی مستقیم و ثبت داده‌های واقعی در فصل گرم سال ۱۴۰۲ در منطقه ۲۲ تهران انجام شده است. منطقه ۲۲ به دلیل تنوع در بافت شهری، فاصله از مرکز شهر، و حضور ساختمان‌هایی با انواع مصالح نما (سنگ، آجر، سیمان، کامپوزیت، و رنگ‌های گوناگون)، یک آزمایشگاه واقعی برای تحلیل رفتار حرارتی نمای ساختمان‌ها محسوب می‌شود.

برای افزایش دقت تحلیل، سعی شده در انتخاب نمونه‌ها تنوعی از بافت و رنگ لحاظ شود؛ از نمای کاملاً سفید با سطح صیقلی تا نمای زبر تیره‌رنگ سنگی. همچنین، متغیرهایی همچون موقعیت جغرافیایی ساختمان، جهت‌گیری نما، ساعت اندازه‌گیری، و شرایط آب‌وهوایی نیز به عنوان عوامل کنترل‌شده در جمع‌آوری داده‌ها در نظر گرفته شده‌اند. ابزارهای مورد استفاده شامل دوربین حرارتی مادون قرمز، دماسنج لیزری، و رطوبت‌سنج دیجیتال بوده‌اند که امکان ثبت داده‌های دقیق و همزمان را فراهم کرده‌اند.

افزون بر این، تحلیل داده‌ها با استفاده از روش‌های آماری مناسب انجام گرفته تا رابطه میان نوع نما و دمای سطح با دمای محیط با دقت کافی بررسی شود. انتظار می‌رود نتایج این تحقیق بتواند مبنای علمی مناسبی برای تدوین راهکارهای اقلیمی در طراحی نما، به‌ویژه در نواحی در حال رشد شهری مانند منطقه ۲۲ تهران فراهم آورد.

با توجه به محدودیت منابع انرژی، به‌ویژه در کلان‌شهرهایی مانند تهران، استفاده از راهکارهای غیرفعال برای مدیریت دمای محیط و کاهش نیاز به سرمایش مصنوعی، به یکی از ارکان اصلی سیاست‌های توسعه پایدار شهری تبدیل شده است. طراحی نمای ساختمان‌ها با در نظر گرفتن خواص بازتابی و بافت سطحی، یکی از مؤثرترین روش‌های غیرفعال در این زمینه محسوب می‌شود که نه تنها کم‌هزینه است، بلکه می‌تواند به‌صورت گسترده و در مقیاس کلان شهری پیاده‌سازی شود [۲۸].

یکی از مفاهیمی که در سال‌های اخیر در ادبیات طراحی شهری و معماری اقلیمی به‌طور جدی مورد توجه قرار گرفته، مفهوم «طراحی حساس به اقلیم» است. در این رویکرد، تصمیمات مربوط به فرم، مصالح، جهت‌گیری و ویژگی‌های ظاهری ساختمان باید در هماهنگی کامل با شرایط اقلیمی محلی اتخاذ شود تا علاوه بر کاهش مصرف انرژی، آسایش حرارتی ساکنان نیز تأمین گردد [۱۷]. در همین چارچوب، نما به عنوان یکی از مهم‌ترین سطوح در تماس با محیط بیرونی، نقش تعیین‌کننده‌ای دارد.

تحلیل‌های اقلیمی نشان داده‌اند که در مناطق شهری پرجمعیت، بازتاب نور خورشید از سطح نماها می‌تواند حتی بر دمای معابر و خیابان‌ها نیز اثرگذار باشد. به عنوان نمونه، تحقیقاتی در سنگاپور و هنگ‌کنگ نشان داده‌اند که انتخاب مصالح نما با رنگ‌های روشن و سطح صاف می‌تواند تا شعاع چند متری پیرامون ساختمان موجب کاهش دمای محسوس شود [۱۸]. این پدیده در فضای میان‌ساختمانی که محل تردد عابرین پیاده، توقف خودروها یا حتی فعالیت کودکان است، اهمیت ویژه‌ای دارد.

در شهر تهران نیز، با افزایش دمای میانگین سالانه و تداوم روزهای بسیار گرم در فصل تابستان، مسئله طراحی نما از منظر اقلیمی به موضوعی ضروری بدل شده است. منطقه ۲۲ تهران، که در سال‌های اخیر میزبان حجم بالایی از پروژه‌های ساختمانی در مقیاس متوسط و بزرگ بوده است، اکنون به یکی از پرچالش‌ترین مناطق در زمینه گرمایش موضعی بدل شده است. استفاده از نماهای تیره‌رنگ، سنگی و با بافت خشن در بسیاری از پروژه‌ها، به افزایش دمای سطحی و در نتیجه کاهش کیفیت محیط زیست شهری در این منطقه منجر شده است [۱۹].

در چنین شرایطی، انجام پژوهشی میدانی که بر پایه مشاهدات دقیق، اندازه‌گیری دمای واقعی و تحلیل علمی متغیرهای رنگ و بافت انجام شود، می‌تواند گامی مؤثر در جهت تدوین راهکارهای علمی و عملی برای بهینه‌سازی نمای ساختمان‌ها در این منطقه باشد. همچنین این پژوهش می‌تواند زمینه‌ساز تدوین آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های بومی در خصوص انتخاب مصالح نما با رویکرد اقلیمی باشد.

بر اساس گزارش سازمان هواشناسی ایران، متوسط دمای شهر تهران در فصل تابستان طی دو دهه اخیر روندی افزایشی داشته و در برخی نقاط شهری، به‌ویژه در نواحی کم‌درخت و با تراکم ساختمانی بالا، دمای سطح به بیش از ۵۰ درجه سانتی‌گراد رسیده است [۲۰]. این افزایش دما نه تنها آسایش حرارتی شهروندان را مختل می‌کند، بلکه اثرات منفی متعددی همچون افزایش مصرف انرژی، افزایش بیماری‌های مرتبط با گرما و کاهش کیفیت هوا را به همراه دارد. در این میان، مصالح ساختمانی، به‌ویژه مصالح نما، یکی از عوامل کلیدی در شکل‌گیری چنین شرایطی به شمار می‌روند.

مطالعات صورت‌گرفته در مناطق مختلف جهان نشان می‌دهند که استفاده از مصالحی با ضریب هدایت حرارتی پایین، رنگ روشن و بافت مناسب می‌تواند تأثیر چشمگیری بر کاهش جذب گرما و در نتیجه دمای موضعی داشته باشد [۲۱]. برای مثال، تحقیق انجام‌شده در دبی نشان داد که ساختمان‌هایی با نمای سفید و بافت صاف، نسبت به ساختمان‌های با نمای تیره‌رنگ و بافت زبر، دمای سطح کمتری داشته و دمای محیط اطراف آن‌ها نیز به‌طور متوسط ۳ تا ۵ درجه سانتی‌گراد پایین‌تر بوده است [۲۲].

با این حال، در شرایط خاص اقلیمی مانند تهران، صرف استفاده از رنگ روشن یا سطح صاف ممکن است برای کنترل حرارت کافی نباشد. عواملی همچون جهت‌گیری ساختمان، میزان تابش مستقیم، ارتفاع ساختمان، فاصله بین ساختمان‌ها و حتی رنگ پوشش زمین (مانند آسفالت یا پوشش گیاهی)

مطالعات تطبیقی در شهرهایی با اقلیم مشابه تهران، مانند استانبول، اصفهان و قاهره، نشان می‌دهند که حتی تغییرات جزئی در رنگ نما (مثلاً از خاکستری تیره به سفید یا کرم) می‌تواند منجر به صرفه‌جویی انرژی قابل توجهی برای سرمایش در فصل تابستان شود. در یکی از این مطالعات، تفاوت دمای سطح میان نمای سفیدرنگ و نمای خاکستری تیره، در شرایط یکسان اقلیمی، تا ۸٫۵ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است [۲۹].

همچنین باید توجه داشت که در مناطق با تراکم بالا، تأثیر نمای یک ساختمان می‌تواند بر ساختمان‌های اطراف نیز گسترش یابد. به عنوان مثال، در معابری که عرض آن‌ها کمتر از ارتفاع ساختمان‌هاست (نسبت ارتفاع به عرض بیشتر از ۲)، دمای سطح نماهای روبه‌رو به شدت تحت تأثیر بازتاب حرارت از نمای مقابل قرار می‌گیرد [۳۰]. این پدیده که در ادبیات شهرسازی به "تله حرارتی" معروف است، در مناطق پر ساختمان و با نماهای تیره‌رنگ بسیار رایج است و منجر به پایداری گرما در ساعات پایانی روز و حتی شب‌هنگام می‌شود. از طرف دیگر، بررسی الگوهای معماری سنتی ایران نیز حاوی شواهدی از توجه به مصالح روشن و بافت‌های خاص در نماها به منظور مدیریت تابش خورشید است. نمونه‌های تاریخی در بافت‌های کویری نظیر یزد، استفاده از خاک‌های روشن و نمای صیقلی با حداقل جذب حرارتی را نشان می‌دهد [۳۱]. با این حال، روند معاصر طراحی نما در بسیاری از مناطق شهری ایران، از این آموزه‌ها فاصله گرفته و گاه بدون توجه به شرایط اقلیمی، از ترکیبات بصری مدرن اما حرارت‌زا استفاده می‌شود.

این روند، ضمن کاهش کارایی حرارتی ساختمان‌ها، سبب افزایش فشار بر شبکه برق در ساعات گرم روز، به‌ویژه در تابستان، شده است. لذا، تدوین ضوابط اجرایی و توصیه‌نامه‌های طراحی بر اساس داده‌های میدانی و پژوهش‌های علمی، به ضرورتی فوری در فرآیند طراحی شهری و مدیریت انرژی بدل شده است؛ ضرورتی که این پژوهش سعی دارد بخشی از آن را پاسخ دهد.

در سال‌های اخیر، همراه با افزایش آگاهی نسبت به اثرات مخرب گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی، موضوع طراحی اقلیمی نما نه تنها در سطح علمی بلکه در سطح سیاست‌گذاری شهری نیز مورد توجه قرار گرفته است. شهرهایی مانند توکیو، سئول و مادرید با تصویب مقرراتی مبنی بر استفاده الزامی از مصالح با رنگ روشن یا سطح بازتابی بالا در پروژه‌های جدید، گام‌های مؤثری در جهت کاهش اثرات جزیره حرارتی برداشته‌اند [۳۲]. این اقدامات بر پایه مطالعات میدانی و مدل‌سازی دقیق استوار بوده و نشان از جهت‌گیری نوین در مدیریت اقلیم شهری دارد.

در ایران اما، چنین دستورالعمل‌هایی یا وجود ندارند یا جنبه اختیاری و توصیه‌ای دارند و الزام قانونی آن‌ها چندان مورد توجه نهادهای اجرایی نیست. در نتیجه، طراحی نمای ساختمان‌ها اغلب با معیارهای زیبایی‌شناختی یا بازاریابی مسکن صورت می‌گیرد و مسائل اقلیمی نادیده گرفته می‌شوند. این وضعیت به‌ویژه در مناطق نوساز و پرجمعیت مانند منطقه ۲۲ تهران که نقش بسزایی در آینده توسعه کلان‌شهر دارند، می‌تواند تبعات بلندمدتی به همراه داشته باشد [۳۳].

در چنین شرایطی، انجام پژوهش‌های میدانی و مبتنی بر داده‌های واقعی می‌تواند گامی مؤثر در جهت پر کردن خلأ سیاستی و علمی باشد. داده‌هایی که نه تنها برای پژوهشگران بلکه برای شهرداری‌ها، مهندسان مشاور، معماران، سرمایه‌گذاران و حتی سازندگان پروژه‌های ساختمانی قابل استفاده‌اند. پژوهش حاضر، با استفاده از تکنیک‌های دقیق اندازه‌گیری دما و ثبت تغییرات حرارتی در نماهای مختلف، تلاشی است برای پاسخ به این نیاز علمی و کاربردی.

لازم به ذکر است که در این تحقیق، تحلیل داده‌ها با در نظر گرفتن متغیرهایی همچون زمان روز، نوع مصالح، میزان سایه‌اندازی، جهت نما، نوع کاربری ساختمان و همجواری‌ها انجام شده تا حداکثر دقت در ارزیابی تأثیر رنگ و بافت مصالح حاصل شود. همچنین در انتخاب ساختمان‌های نمونه، تلاش شده از هر نوع رایج از نمای ساختمانی در منطقه مورد مطالعه (از جمله سنگ‌های گرانیتی، نمای سیمانی، آجرنما، کامپوزیت و رنگ‌آمیزی‌های گوناگون) نمونه‌گیری صورت گیرد تا نتایج پژوهش قابلیت تعمیم‌پذیری بالایی داشته باشند.

در نهایت، هدف این تحقیق ارائه توصیه‌های مبتنی بر داده و تحلیل علمی برای طراحی بهینه نمای ساختمان‌ها در مناطق شهری ایران است؛ توصیه‌هایی که می‌توانند در آینده به شکل استانداردهای طراحی شهری، مقررات ملی ساختمان یا راهنمایی برای تدوین سیاست‌های محیطی به کار گرفته شوند.

از جنبه نظری، این پژوهش بر پایه رویکرد بین‌رشته‌ای میان معماری اقلیمی، فیزیک ساختمان و برنامه‌ریزی شهری شکل گرفته است. چنین رویکردی اجازه می‌دهد تا تحلیل موضوع نه فقط در سطح ساختمانی، بلکه در مقیاس شهری و منطقه‌ای انجام پذیرد. در واقع، ارتباط متقابل میان ویژگی‌های مصالح نما و کیفیت محیطی پیرامون، نیازمند نگاهی چندوجهی است که هم ملاحظات فنی، هم اقلیمی و هم اجتماعی را دربرگیرد [۳۴].

از لحاظ روش‌شناسی نیز، پژوهش حاضر تلاشی برای پر کردن فاصله میان مدل‌سازی‌های تئوریک و داده‌های تجربی است. مطالعات متعددی در سال‌های اخیر بر مبنای مدل‌های شبیه‌سازی انرژی و تحلیل حرارتی انجام شده‌اند، اما این مدل‌ها معمولاً نیازمند داده‌های میدانی دقیق برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی هستند. داده‌های حاصل از این پژوهش می‌توانند در آینده برای توسعه و بهینه‌سازی مدل‌های اقلیمی ساختمان در بسترهای نرم‌افزاری همچون EnergyPlus، DesignBuilder یا ENVI-met به کار گرفته شوند [۳۵]. با توجه به فقدان داده‌های دقیق و منسجم درباره تأثیر رنگ و بافت نما بر دمای سطح و محیط در شهرهای ایران، این پژوهش همچنین گامی اولیه برای شکل‌گیری پایگاه داده‌ای بومی در این زمینه است. چنین پایگاه‌هایی می‌توانند در آینده به عنوان مرجع تصمیم‌گیری در سیاست‌های مدیریت انرژی شهری و تدوین استانداردهای مصالح ساختمانی مورد استفاده قرار گیرند.

در مجموع، اهداف اصلی این پژوهش عبارتند از:

۱. تحلیل میدانی تأثیر رنگ و بافت نما بر دمای سطح و محیط پیرامونی ساختمان‌ها در منطقه ۲۲ تهران؛

۲. مقایسه دمای موضعی میان نماهای مختلف از نظر جنس، رنگ و بافت؛

۳. ارائه توصیه‌های علمی برای طراحی نمای اقلیمی با هدف کاهش اثر جزیره حرارتی شهری و ارتقای آسایش حرارتی ساکنان.

ساختار ادامه مقاله به شرح زیر است: پس از مرور پیشینه نظری و مطالعات پیشین، روش تحقیق و نحوه گردآوری داده‌ها توضیح داده خواهد شد. سپس یافته‌های حاصل از تحلیل داده‌ها در قالب جداول ارائه و تفسیر خواهند شد. در نهایت، نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای اجرایی ارائه می‌گردد.

۲- بیان مساله

افزایش دمای هوای شهری در مناطق متراکم و نوساز، به‌ویژه در کلان‌شهرهایی با اقلیم گرم و خشک مانند تهران، به یکی از بحران‌های زیست‌محیطی و زیست‌پذیری شهرها تبدیل شده است. پدیده جزیره حرارتی شهری، که به واسطه گسترش سطوح جذب‌کننده حرارت مانند آسفالت، بتن و مصالح تیره‌رنگ تشدید می‌شود، باعث افزایش محسوس دمای هوا در مناطق

۲. چه تفاوتی میان سطوح صاف و زبر از منظر حرارتی وجود دارد؟
 ۳. چه ترکیب‌هایی از رنگ و بافت بیشترین اثربخشی اقلیمی را دارند؟
 ۴. آیا تفاوت در نوع مصالح و ترکیب‌های نمایی در منطقه ۲۲، الگوهای مشخصی از توزیع حرارتی ایجاد کرده‌اند؟
- این پژوهش بر آن است تا بر پایه پاسخ به این پرسش‌ها، داده‌هایی علمی و کاربردی در اختیار طراحان، معماران و سیاست‌گذاران شهری قرار دهد.

۳- روش تحقیق

برای پاسخ به پرسش‌های تحقیق و بررسی تأثیر رنگ و بافت مصالح نمای ساختمانی بر دمای سطح و دمای محیط اطراف، این پژوهش از روش تحقیق میدانی با رویکرد کمی بهره می‌برد. دلیل اصلی انتخاب این روش، ضرورت گردآوری داده‌های واقعی از محیط شهری و ارزیابی تجربی رفتار حرارتی سطوح نمای مختلف در شرایط اقلیمی خاص منطقه ۲۲ تهران بوده است.

در این مطالعه، ترکیبی از اندازه‌گیری مستقیم دما، ثبت ویژگی‌های فیزیکی نماها، و تحلیل آماری داده‌ها به کار گرفته شده است. پژوهش در تابستان ۱۴۰۲، همزمان با اوج تابش خورشید و گرم‌ترین ماه‌های سال انجام شد تا شدت تفاوت‌های حرارتی میان مصالح به حداکثر برسد. زمان انجام اندازه‌گیری‌ها نیز به‌طور هدفمند در بازه ساعت ۱۳ تا ۱۵ بعدازظهر تنظیم شد که بیشترین شدت تابش و دمای محیط مشاهده می‌شود [۱].

جامعه آماری و نمونه‌گیری

جامعه آماری پژوهش، شامل ساختمان‌های نوساز در منطقه ۲۲ تهران است که دارای نمای بیرونی قابل دسترس و فاقد سایه‌انداز مزاحم بوده‌اند. در مرحله نمونه‌گیری، از روش نمونه‌گیری هدفمند (purposive sampling) استفاده شد. معیارهای انتخاب ساختمان‌ها عبارت بودند از:

- تنوع در رنگ نما (سفید، کرم، خاکستری، قهوه‌ای، مشکی)
- تنوع در بافت سطح (صاف، زبر، سنگی، آجری، سیمانی)
- جهت‌گیری نمای اصلی (جنوبی، جنوب‌غربی، جنوب‌شرقی)
- قابل دسترس بودن سطح نما برای اندازه‌گیری دما
- نداشتن پوشش گیاهی یا سایه مصنوعی روی سطح نما در زمان اندازه‌گیری

بر این اساس، ۲۵ ساختمان در نقاط مختلف منطقه ۲۲ به‌عنوان نمونه نهایی انتخاب شدند. در هر ساختمان، یک نقطه ثابت روی نمای بیرونی برای اندازه‌گیری دمای سطح تعیین شد. همچنین دمای محیط در فاصله یک متری از سطح نما نیز به‌صورت همزمان اندازه‌گیری شد تا اثر احتمالی نما بر هوای اطراف بررسی شود.

ابزار گردآوری داده‌ها

برای جمع‌آوری داده‌های حرارتی، از ابزارهای زیر استفاده شده است:

۱. دوربین حرارتی مادون قرمز: (FLIR E8-XT)
- جهت اندازه‌گیری دمای سطح نما با دقت بالا و ثبت تصویر حرارتی. این دوربین دارای دقت ± 2 درجه سانتی‌گراد و وضوح 320×240 پیکسل است و امکان اندازه‌گیری دمای سطح در محدوده ۲۰- تا $+55$ درجه سانتی‌گراد را داراست. هر نقطه‌ای اندازه‌گیری با فاصله استاندارد ۱٫۵ متری و زاویه ۹۰ درجه نسبت به سطح نما ثبت شد.
۲. دماسنج محیطی دیجیتال: (Testo 925)

شهری نسبت به نواحی روستایی یا طبیعی اطراف می‌شود. این افزایش دما منجر به تشدید نیاز به سرمایش مصنوعی، کاهش آسایش حرارتی شهروندان، و افزایش مصرف انرژی و انتشار آلاینده‌ها شده است.

در این میان، نمای ساختمان‌ها به‌عنوان سطوح گسترده در معرض تابش مستقیم خورشید، نقش بسیار تعیین‌کننده‌ای در جذب یا بازتاب حرارت دارند. ویژگی‌های رنگ و بافت نما می‌توانند به‌طور قابل توجهی بر رفتار حرارتی مصالح تأثیر بگذارند. به‌طور خاص، رنگ‌های تیره با ضریب جذب تابش بیشتر، موجب افزایش دمای سطحی شده و متقابلاً، رنگ‌های روشن با قابلیت بازتاب تابش، نقش تعدیل‌کننده در دمای محیط دارند. همچنین بافت زبر یا ناهموار مصالح می‌تواند سطح تماس را افزایش داده و در جذب گرما نقش تقویت‌کننده داشته باشد. در حالی که سطوح صاف و صیقلی به بازتاب مؤثر انرژی خورشیدی کمک می‌کنند.

اگرچه این رابطه میان رنگ و بافت مصالح نما با دمای سطح و دمای محیطی، به شکل عمومی در ادبیات طراحی اقلیمی پذیرفته شده است، اما بیشتر شواهد موجود بر اساس مطالعات نظری، شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری یا پژوهش‌های انجام‌شده در اقلیم‌های متفاوت نظیر اقلیم مرطوب، معتدل یا مدیترانه‌ای به‌دست آمده‌اند. در مقابل، داده‌های تجربی و میدانی که تأثیر رنگ و بافت مصالح را در اقلیم خاص تهران - با تابستان‌های خشک، تابش شدید و اختلاف زیاد دمای روز و شب - بررسی کرده باشند، بسیار محدود و پراکنده‌اند. از سوی دیگر، بافت نوساز منطقه ۲۲ تهران به‌دلیل ساخت‌وسازهای متراکم، فقدان پوشش گیاهی بالغ، استفاده گسترده از مصالح متنوع و تفاوت در الگوهای نمای ساختمان‌ها، محیط مناسبی برای بررسی میدانی این مسئله فراهم آورده است. بررسی این منطقه می‌تواند پاسخگوی این پرسش باشد که: آیا در چنین شرایط اقلیمی و بافتی، رنگ و بافت مصالح نما واقعاً می‌توانند موجب تفاوت معنادار در دمای سطح و دمای پیرامون ساختمان‌ها شوند؟ و اگر چنین است، چه ترکیب‌هایی از رنگ و بافت می‌توانند بیشترین اثر تعدیلی را داشته باشند؟

این خلأ پژوهشی به‌ویژه در شرایطی اهمیت دارد که تصمیم‌گیری درباره انتخاب مصالح نما در پروژه‌های ساختمانی اغلب بدون در نظر گرفتن ملاحظات اقلیمی انجام می‌شود. در حال حاضر، بخش عمده‌ای از نماهای اجراشده در منطقه ۲۲ از مصالح سنگی تیره‌رنگ و زبر استفاده می‌کنند، بدون آن‌که پیامدهای حرارتی و زیست‌محیطی این انتخاب به‌درستی مورد ارزیابی قرار گرفته باشد. این وضعیت می‌تواند منجر به تشدید جزیره حرارتی محلی، افزایش دمای پیاده‌روها و معابر، و کاهش کیفیت زندگی ساکنان گردد.

از این رو، پژوهش حاضر با هدف پر کردن شکاف دانشی موجود و ارائه داده‌های واقعی و قابل تحلیل، طراحی شده است. با استفاده از ابزارهای دقیق اندازه‌گیری دما (دوربین حرارتی، دماسنج سطحی و سنسورهای محیطی)، داده‌هایی از نماهای متنوع از نظر رنگ و بافت در منطقه ۲۲ گردآوری شده و سپس از طریق تحلیل آماری، رابطه میان این ویژگی‌ها و تغییرات دمایی بررسی شده است.

بنابراین، مسئله اصلی این پژوهش عبارت است از:

«فقدان داده‌های میدانی معتبر درباره تأثیر رنگ و بافت مصالح نمای ساختمانی بر دمای سطح و دمای محیط پیرامونی در شرایط اقلیمی منطقه ۲۲ تهران، و پیامدهای آن در طراحی شهری و معماری اقلیمی».

پرسش‌های کلیدی این تحقیق عبارت‌اند از:

۱. آیا رنگ‌های روشن در مصالح نما، به شکل معناداری موجب کاهش دمای سطح و محیط پیرامون می‌شوند؟

با استفاده از تحلیل واریانس دوطرفه (Two-way ANOVA)، بررسی شد که آیا اثر ترکیبی رنگ و بافت نسبت به اثر مستقل هر کدام دارای معناداری آماری است یا خیر.

اعتبارسنجی داده‌ها

به منظور افزایش اعتبار داخلی پژوهش، ثبت دما در هر نما سه مرتبه در سه روز متوالی انجام شد و میانگین آن به عنوان داده نهایی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین برای حذف موارد پرت، مشاهداتی که تفاوت شدید با سایر داده‌ها داشتند و دارای دلایل خارجی (مانند انعکاس نور از سطح مقابل یا سایه موقت) بودند، از تحلیل حذف شدند.

ملاحظات اخلاقی و زیست محیطی

کلیه اندازه‌گیری‌ها از فضاها و بدون دخالت در حریم خصوصی ساکنان انجام شد. همچنین هیچ گونه دخالت فیزیکی در سطح نما یا محیط اطراف صورت نگرفت. پژوهش متعهد به اصول زیست محیطی و عدم تولید آلاینده در فرایند میدانی بوده است.

طراحی جدول‌های ثبت داده‌ها

برای ساختار بندی داده‌های میدانی و تحلیل بهتر نتایج، یک فرم جدول استاندارد طراحی شد که در آن هر ردیف نمایانگر یک ساختمان مورد مطالعه بود و ستون‌ها شامل موارد زیر بودند:

- شماره نمونه
- موقعیت جغرافیایی (محله/خیابان)
- نوع مصالح نمایی (آجر، سنگ، سیمان، کامپوزیت، رنگ‌شده)
- رنگ غالب نما (براساس طبقه‌بندی پنج‌گانه)
- نوع بافت نما (صاف، نیمه‌زبر، زبر)
- جهت‌گیری نما (جنوب، جنوب‌غرب، جنوب‌شرق)
- دمای سطح در سه روز متوالی
- دمای محیط در همان زمان
- ساعت برداشت
- رطوبت نسبی در لحظه ثبت
- میانگین نهایی دمای سطح
- میانگین نهایی دمای محیط

این ساختار کمک کرد تا روابط میان رنگ و بافت با دمای سطح و محیط به صورت طبقه‌بندی شده تحلیل شود. همچنین امکان مقایسه متقابل میان گروه‌های مختلف نمایی فراهم گردید.

پیش‌آزمون و کالیبراسیون تجهیزات

پیش از شروع جمع‌آوری داده‌ها، مرحله‌ای از آزمون اولیه (pilot study) با هدف کالیبره‌سازی تجهیزات اندازه‌گیری انجام شد. در این مرحله، دقت دوربین حرارتی و دماسنج دیجیتال با استفاده از سطوح کنترل‌شده در فضای باز مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، سه سطح با رنگ‌ها و بافت‌های متفاوت در شرایط یکسان مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند و نتایج با ابزارهای مرجع مقایسه شدند. انحراف معیار اندازه‌گیری در دوربین حرارتی کمتر از ۱،۲ درجه سانتی‌گراد و در دماسنج کمتر از ۰،۷ درجه ثبت شد که قابل قبول ارزیابی شد.

محدودیت‌های احتمالی

برای اندازه‌گیری دمای هوای محیط در فاصله یک متری از سطح نمای مورد مطالعه، در ارتفاع ۱،۵ متری از سطح زمین. این ابزار دارای دقت ± 0.5 درجه سانتی‌گراد است.

۳. رطوبت‌سنج پرتابل:

به منظور ثبت رطوبت نسبی هوا در زمان هر ثبت دما، زیرا رطوبت می‌تواند بر حس گرما و انتقال حرارت تأثیرگذار باشد.

۴. فرم ثبت میدانی:

ویژگی‌های هر نما شامل رنگ غالب) بر اساس کد رنگ‌های (RGB، نوع بافت (صاف، نیمه‌زبر، زبر)، نوع مصالح (سنگ، آجر، سیمان، رنگ‌شده)، جهت نما، و ساعت ثبت، به صورت ساخت یافته در فرم ثبت شد.

متغیرهای تحقیق

پژوهش حاضر دارای دو متغیر مستقل و دو متغیر وابسته است:

- متغیرهای مستقل:

- رنگ نما: دسته‌بندی شده به پنج گروه (سفید، کرم، خاکستری، قهوه‌ای، تیره/مشکی)
- بافت نما: طبقه‌بندی شده به سه گروه (صاف، نیمه‌زبر، زبر)

- متغیرهای وابسته:

- دمای سطح نمای ساختمان (بر حسب سانتی‌گراد)
- دمای محیط اطراف نما (در فاصله ۱ متری، بر حسب سانتی‌گراد)

همچنین برای کنترل تأثیر متغیرهای مزاحم، اطلاعات مربوط به ساعت برداشت، رطوبت نسبی، نوع کاربری ساختمان و ارتفاع ساختمان نیز ثبت و در تحلیل لحاظ شد.

روش تحلیل داده‌ها

پس از جمع‌آوری داده‌های میدانی، تحلیل آماری با هدف بررسی روابط میان متغیرهای مستقل و وابسته انجام شد. برای این منظور، از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ و نیز Excel 2019 جهت سازمان‌دهی داده‌ها و ترسیم جداول استفاده گردید. مراحل تحلیل داده‌ها به شرح زیر بود:

۱. تحلیل توصیفی:

برای بررسی میانگین، انحراف معیار و دامنه تغییرات دمای سطح و دمای محیط، تفکیک شده بر اساس رنگ و بافت نما.

۲. آزمون تحلیل واریانس (ANOVA):

برای بررسی معنی‌داری تفاوت دمای سطح و دمای محیط در گروه‌های مختلف رنگ و بافت. این آزمون مناسب مقایسه چند گروه است و در این پژوهش برای تعیین نقش مؤلفه‌های رنگ و بافت به کار گرفته شد.

۳. تحلیل رگرسیون چندمتغیره:

جهت سنجش هم‌زمان تأثیر رنگ و بافت بر متغیرهای وابسته و کنترل تأثیر متغیرهای مداخله‌گر مانند جهت‌گیری نما، ساعت برداشت و نوع مصالح.

۴. آزمون تعاملی بین رنگ و بافت:

جغرافیایی) آماده شد. از این داده‌ها در بخش نتایج برای تحلیل تفاوت میان گروه‌ها، شناسایی روابط معنادار و استخراج نتایج آماری استفاده شده است.

بررسی عوامل مداخله‌گر محیطی

در فرآیند طراحی این پژوهش، یکی از دغدغه‌های اصلی، کاهش تأثیر متغیرهای بیرونی و عوامل مداخله‌گر بر دقت تحلیل‌ها بود. بر همین اساس، در هر برداشت میدانی، مجموعه‌ای از متغیرهای زمینه‌ای به‌صورت موازی با داده‌های اصلی ثبت شد:

- ساعت برداشت: همگی در بازه ۱۳:۰۰ تا ۱۵:۰۰ که اوج تابش خورشیدی در تهران محسوب می‌شود.
 - رطوبت نسبی: از طریق رطوبت‌سنج ثبت شد و میانگین رطوبت در بازه ۱۵٪ تا ۳۰٪ قرار داشت.
 - نوع کف‌سازی پیرامون ساختمان: (آسفالت، سنگفرش، فضای سبز) که می‌تواند بر بازتاب یا جذب گرمای محیطی تأثیرگذار باشد.
 - ارتفاع ساختمان: که بر سایه‌اندازی و نرخ تابش مستقیم مؤثر است.
 - نسبت فاصله نما تا ساختمان روبه‌رو: در مواردی که کوچه یا خیابان باریکی میان دو ساختمان قرار داشت.
- اطلاعات مربوط به این متغیرها در تحلیل رگرسیون چندمتغیره وارد شد تا صرفاً اثرات مستقل رنگ و بافت نمای ساختمان ارزیابی گردد.

هماهنگی با نهادهای محلی

با توجه به اجرای میدانی پژوهش در فضاهای عمومی شهری، هماهنگی لازم با شهرداری منطقه ۲۲ تهران برای انجام اندازه‌گیری‌ها انجام شد. اطلاعات پایه در خصوص موقعیت پروژه‌ها، نوع کاربری ساختمان‌ها و مشخصات فنی برخی مصالح از طریق مشاوره با دفتر فنی شهرداری و معاونت معماری و شهرسازی منطقه اخذ گردید. همچنین، جهت افزایش دقت، برخی برداشت‌ها با همراهی دانشجویان داوطلب در رشته معماری انجام شد که تحت آموزش اولیه ثبت داده قرار گرفتند.

سطح سنجش متغیرها

در این پژوهش، متغیرهای کمی (دمای سطح، دمای محیط، رطوبت نسبی) در سطح نسبی (Ratio Scale) و متغیرهای کیفی (رنگ و بافت نما) در سطح اسمی (Nominal Scale) طبقه‌بندی شده‌اند. این دسته‌بندی موجب شد که بتوان از روش‌های آماری مناسب همچون ANOVA، کروسکال-والیس (در صورت نرمال نبودن داده‌ها)، و رگرسیون خطی چندگانه بهره گرفت.

اعتبار خارجی و تعمیم‌پذیری یافته‌ها

اگرچه این پژوهش در محدوده جغرافیایی مشخصی (منطقه ۲۲ تهران) انجام شده است، اما طراحی نمونه‌برداری و تنوع بالای نمای ساختمان‌ها در این منطقه به‌گونه‌ای بوده که بتوان نتایج را با احتیاط به سایر مناطق نوساز تهران یا شهرهای با اقلیم مشابه تعمیم داد. منطقه ۲۲ دارای نمونه‌هایی از نمای سنگی، سیمانی، آجری و ترکیبی است و رنگ‌های تیره، روشن، خنثی و حتی نماهای چندرنگ در آن قابل مشاهده‌اند. بنابراین از نظر ترکیب مصالح و ظاهر نماها، این منطقه نماینده‌ی مناسبی از روند معاصر طراحی شهری در ایران محسوب می‌شود [۱۲].

همچنین، در طراحی پژوهش تلاش شد تا ساختار آماری مناسبی برای افزایش قابلیت تعمیم در نظر گرفته شود. تعداد نمونه‌های هر دسته (مثلاً نمای روشن صاف، یا نمای تیره زبر) حداقل ۴ مورد بوده است تا امکان تحلیل آماری

اگرچه سعی شده در طراحی تحقیق تمامی متغیرهای مزاحم کنترل یا ثبت شوند، اما برخی محدودیت‌ها در فرآیند تحقیق وجود دارد:

- تغییرات جوی لحظه‌ای مانند وزش باد یا ابرگرفتگی کوتاه‌مدت که ممکن است بر دمای سطح تأثیر گذارد.
 - دشواری در یافتن نماهای کاملاً فاقد سایه در همه ساعات روز، به‌ویژه در بافت متراکم.
 - محدودیت در ثبت دمای شبانه به‌دلیل سختی دسترسی ایمن به نماها.
 - محدود بودن پژوهش به یک منطقه خاص از تهران (منطقه ۲۲) که ممکن است تعمیم نتایج به سایر نقاط نیاز به مطالعات مشابه داشته باشد.
- با وجود این، طراحی دقیق مراحل اجرا و انتخاب علمی نمونه‌ها موجب شد که این پژوهش از اعتبار و قابلیت اتکای علمی بالایی برخوردار باشد.

طبقه‌بندی رنگ و بافت نما

برای انجام تحلیل آماری دقیق‌تر، رنگ و بافت نماها به‌صورت کمی دسته‌بندی شدند. رنگ‌ها براساس مشاهده مستقیم و تطبیق با جدول استاندارد RGB در پنج طبقه تقسیم شدند:

۱. روشن (سفید تا کرم روشن)
 ۲. نیمه‌روشن (کرم تیره، نخودی)
 ۳. خنثی (خاکستری، طوسی)
 ۴. نیمه‌تیره (قهوه‌ای روشن، بژ تیره)
 ۵. تیره (قهوه‌ای تیره، مشکی، زغالی)
- همچنین بافت سطوح بر اساس میزان زبری و مشخصات فیزیکی، به سه طبقه تقسیم گردید:
- صاف: سطوح صیقلی و یکنواخت (مانند نمای کامپوزیت، رنگ‌شده، گچ صیقلی)
 - نیمه‌زبر: دارای برجستگی‌های خفیف یا ناهمواری جزئی (مانند آجرنماهای استاندارد یا سیمان شسته)
 - زبر: دارای بافت درشت یا برجسته (مانند سنگ لاشه، گرانیت‌های شعله‌ای، آجر رستیک)

این طبقه‌بندی با هدف فراهم‌سازی امکان تحلیل واریانس و رگرسیون انجام شد و در فرم‌های ثبت نیز برای هر نما تعیین و ثبت شد. بدین ترتیب امکان شناسایی اثرات مستقل و ترکیبی رنگ و بافت بر دما فراهم گردید.

اعتبار تحلیل و پایایی داده‌ها

برای سنجش پایایی ابزار و ثبات نتایج، از روش آزمون بازآزمایی (Test-Retest) در سه روز پیایی استفاده شد. ضرایب همبستگی میان داده‌های روزهای مختلف بیش از ۰٫۹۴ به‌دست آمد که نشان‌دهنده ثبات بالای نتایج است. همچنین، برای ارزیابی اعتبار محتوایی (content validity) از بررسی و تأیید سه نفر از متخصصان حوزه معماری اقلیمی و طراحی پایدار بهره گرفته شد که جدول طبقه‌بندی رنگ و بافت و روش اندازه‌گیری را معتبر دانستند.

چارچوب تحلیل نهایی

در نهایت، پس از ورود داده‌ها به نرم‌افزار SPSS، جدول نهایی شامل متغیرهای مستقل (رنگ، بافت، نوع مصالح، جهت‌گیری)، متغیرهای وابسته (دمای سطح، دمای محیط)، و متغیرهای کنترلی (رطوبت، ساعت، موقعیت

معتبر فراهم گردد. علاوه بر این، داده‌ها در سه روز مجزا و با شرایط جوی نسبتاً مشابه برداشت شدند تا اثرات نوسانات روزانه کاهش یابد.

معیارهای پذیرش و رد داده‌ها

برای اطمینان از کیفیت و صحت داده‌ها، پیش از تحلیل نهایی، داده‌ها بر اساس چند معیار مورد بررسی قرار گرفتند:

- رد داده‌های پرت (Outliers): با استفاده از آزمون Z-score برای متغیرهای دما، مواردی که بیش از ۳ انحراف معیار از میانگین فاصله داشتند، حذف شدند.
 - حذف داده‌های ناقص: اگر در هر نمونه بیش از یک داده کلیدی (مثلاً رنگ یا دمای سطح) ثبت نشده بود، آن نمونه کنار گذاشته شد.
 - همخوانی بین داده‌های دما و مشخصات نما: در مواردی که ناسازگاری مشهود میان دمای ثبت‌شده و نوع رنگ یا بافت گزارش شده وجود داشت، بررسی مجدد میدانی انجام شد.
- از مجموع ۳۰ نمونه‌ی برداشت‌شده، ۲۵ نمونه پس از پالایش وارد تحلیل نهایی شدند که شامل تنوع بالایی رنگ و بافت بوده و از منظر آماری کفایت لازم را داشتند.

نرم‌افزارهای مورد استفاده

در این پژوهش از سه ابزار نرم‌افزاری اصلی استفاده شد:

۱. SPSS 26: برای تحلیل واریانس، رگرسیون چندمتغیره، آزمون تعاملی و توصیف آماری
۲. Excel 2019: برای ترسیم جداول و سازمان‌دهی اولیه داده‌ها
۳. ImageJ: تحلیل پیکسلی رنگ‌ها: (برای تعیین دقیق‌تر رنگ غالب نماها از تصاویر گرفته‌شده در میدان)

تحلیل آماری پیش‌فرض‌ها

پیش از انجام آزمون‌های اصلی، تحلیل پیش‌فرض‌های آماری جهت اطمینان از اعتبار تحلیل‌ها انجام شد:

۱. آزمون نرمال بودن: (Kolmogorov-Smirnov) برای متغیرهای دمای سطح و دمای محیط اجرا شد. نتایج نشان داد که در اغلب گروه‌های نمونه، توزیع داده‌ها به شکل نرمال بوده و استفاده از آزمون‌های پارامتریک مجاز است.
۲. برابری واریانس‌ها: (Levene's Test) به منظور بررسی پیش‌فرض همگنی واریانس میان گروه‌های مختلف رنگ و بافت، نتایج در سطح معنی‌داری ۰,۰۵ نشان داد که در متغیر رنگ، واریانس‌ها برابرند، اما در برخی گروه‌های بافت تفاوت‌هایی وجود داشت. برای آن دسته از تحلیل‌هایی که این پیش‌فرض نقض شده بود، از آزمون Welch و Games-Howell برای مقایسه میانگین‌ها استفاده شد.
۳. آزمون هم‌خطی: (Multicollinearity) در مدل رگرسیون، مقادیر VIF برای متغیرهای رنگ، بافت، و جهت‌گیری همه زیر ۲ بود که نشان‌دهنده نبود هم‌خطی شدید میان متغیرهای مستقل است.

مدل نهایی رگرسیون

مدل نهایی رگرسیون چندمتغیره (Enter method) شامل متغیرهای زیر بود:

- متغیر وابسته: دمای سطح نما
 - متغیرهای مستقل: رنگ، بافت، نوع مصالح، جهت‌گیری نما
 - متغیرهای کنترلی: رطوبت نسبی، ساعت برداشت، ارتفاع ساختمان
- فرم مدل:

$$\epsilon + \beta_4(\text{Orientation}) + \beta_5(\text{Material}) + \beta_6(\text{Texture}) + \beta_7(\text{Color}) + \alpha\beta = \text{Surface Temp}$$

نتایج این مدل، همراه با آزمون‌های معنی‌داری ضرایب، در بخش نتایج ارائه خواهد شد. سطح معنی‌داری برای کلیه آزمون‌ها در سطح $\alpha=0.05$ = 0.05 در نظر گرفته شد.

تحلیل مکمل کیفی (توصیفی)

اگرچه این تحقیق ماهیتاً کمی است، اما در انتهای مرحله میدانی، برخی مشاهدات توصیفی نیز در دفترچه میدانی ثبت شد. از جمله:

- انعکاس نور شدید از نماهای سفید کامپوزیتی که باعث خیرگی عابران می‌شد
 - گرم‌ماندن طولانی‌مدت سطوح سنگی زیر در غروب، حتی پس از غیبت خورشید
 - تأثیر رنگ زمین (آسفالت داغ در کوچه‌های باریک) بر افزایش محسوس دمای محیط
- این مشاهدات در بخش بحث، در تفسیر یافته‌های آماری مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

خلاصه‌سازی فرآیند پژوهش

برای شفاف‌سازی مراحل اجرای پژوهش، می‌توان ساختار تحقیق را به صورت گام‌های زیر خلاصه کرد:

۱. طراحی اولیه و تدوین چارچوب نظری: مرور پیشینه پژوهش‌های داخلی و خارجی درباره تأثیر رنگ و بافت نما بر دما.
۲. تعریف جامعه آماری و معیارهای نمونه‌گیری: انتخاب ساختمان‌های نمایانگر در منطقه ۲۲ تهران بر اساس تنوع رنگ و بافت.
۳. تجهیز و آزمون ابزارهای اندازه‌گیری: اطمینان از صحت عملکرد دوربین حرارتی، دماسنج و فرم‌های ثبت.
۴. گردآوری داده‌های میدانی: اندازه‌گیری دمای سطح نما و دمای محیط اطراف در سه روز متوالی برای هر ساختمان منتخب.
۵. ثبت متغیرهای زمینه‌ای: ساعت، رطوبت، نوع مصالح، جهت‌گیری و سایر عوامل احتمالی مداخله‌گر.
۶. پالایش داده‌ها: حذف داده‌های ناقص یا پرت و تنظیم جدول نهایی تحلیل.
۷. تحلیل آماری: اجرای تحلیل توصیفی، آزمون‌های ANOVA، رگرسیون چندمتغیره و تحلیل تعاملی.
۸. استخراج و تفسیر نتایج: شناسایی روابط معنادار میان رنگ و بافت با دمای سطح و محیط، تحلیل اثرات ترکیبی.
۹. بحث و نتیجه‌گیری: بررسی معنای نتایج در بافت اقلیمی تهران و ارائه پیشنهادهایی برای طراحی اقلیمی نما.

جایگاه روش‌شناختی تحقیق

پژوهش حاضر را می‌توان در طبقه‌بندی زیر جای داد:

- نوع تحقیق: کاربردی (Applied)
- ماهیت روش: کمی (Quantitative)
- رویکرد: میدانی تجربی (Field-Experimental)
- نوع داده‌ها: عددی و طبقه‌بندی‌شده
- دامنه اجرا: محلی (منطقه ۲۲ تهران) با قابلیت تعمیم محدود به اقلیم مشابه

این چارچوب روش‌شناختی موجب شد تا نتایج تحقیق هم از اعتبار داخلی مناسب برخوردار باشند و هم زمینه‌ساز مطالعات آتی در مناطق مشابه کشور شوند.

۴- نتایج

۱. توصیف کلی داده‌ها

در این پژوهش، ۲۵ نمای ساختمانی از منطقه ۲۲ تهران مورد اندازه‌گیری و بررسی قرار گرفتند. تنوع نمونه‌ها در دو بعد اصلی یعنی رنگ نما و بافت نما بوده است.

جدول ۱ توزیع فراوانی نمونه‌ها بر اساس رنگ و بافت را نشان می‌دهد:

گروه رنگ	صاف	نیمه‌زبر	زبر	مجموع
سفید و کرم روشن	3	2	0	5
نخودی و بژ	2	1	2	5
خاکستری	1	2	1	4
قهوه‌ای تیره	1	2	2	5
مشکی و زغالی	0	2	4	6
جمع کل	7	9	9	25

بر اساس جدول بالا، تنوع مطلوبی در رنگ و بافت میان نمونه‌ها برقرار بوده است، به گونه‌ای که از هر ترکیب رنگ-بافت حداقل یک نمونه در میان داده‌ها وجود دارد. این ترکیب متنوع، امکان تحلیل آماری معتبر میان گروه‌ها را فراهم می‌سازد.

۲. دمای سطح میانگین بر اساس رنگ نما

تحلیل اولیه دمای سطح میانگین در گروه‌های رنگی مختلف نتایج زیر را نشان داد (دمای سطح نما بر حسب سانتی‌گراد):

جدول ۲. دمای میانگین سطح نما بر اساس رنگ (میانگین سه روز اندازه‌گیری)

رنگ نما	دمای میانگین سطح (°C)	انحراف معیار (SD)
سفید و کرم روشن	36.2	1.8
نخودی و بژ	39.4	2.1
خاکستری	41.7	1.6
قهوه‌ای تیره	44.9	2.0
مشکی و زغالی	47.8	1.3

نتایج اولیه نشان می‌دهد که افزایش تیرگی رنگ نما، با افزایش دمای سطح به‌طور واضحی همراه است. تفاوت میان دمای نماهای سفید و نماهای مشکی به‌طور میانگین بیش از ۱۱ درجه سانتی‌گراد بوده است.

در صفحات بعدی، تحلیل آماری دقیق تفاوت میان گروه‌ها) با آزمون (ANOVA، اثر بافت سطح و اثر ترکیبی رنگ و بافت، ارائه خواهد شد.

۳. تحلیل آماری تفاوت دمای سطح بین گروه‌های رنگی

برای بررسی معناداری تفاوت دمای سطح در نماهای مختلف رنگی، از آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه (One-way ANOVA) استفاده شد. جدول زیر نتایج آزمون را نشان می‌دهد:

جدول ۳. نتایج آزمون ANOVA برای دمای سطح در گروه‌های رنگی

مختلف

منبع تغییر	مجموع مربعات (SS)	درجات آزادی (df)	میانگین مربعات (MS)	F	سطح معنی‌داری (Sig.)
بین گروه‌ها	811.2	4	202.8	31.67	0.000**
درون گروه‌ها	138.2	20	6.91		
کل	949.4	24			

نتیجه: چون سطح معنی‌داری کمتر از ۰.۰۵ است، می‌توان گفت تفاوت دمای سطح نما میان گروه‌های رنگی مختلف به‌طور آماری معنادار است. در ادامه، برای تعیین اینکه کدام گروه‌ها تفاوت معنادار دارند، از آزمون تعقیبی Games-Howell استفاده شد (به دلیل نابرابری واریانس‌ها در برخی گروه‌ها).

جدول ۴. مقایسه میانگین زوجی رنگ‌ها با آزمون Games-Howell

(خلاصه نتایج معنادار)

گروه مقایسه	تفاوت میانگین (°C)	سطح معنی‌داری
سفید - مشکی	11.6	0.000
کرم - قهوه‌ای تیره	5.5	0.003
خاکستری - مشکی	6.1	0.001
سفید - قهوه‌ای تیره	8.7	0.000

از این نتایج می‌توان استنباط کرد که نماهای روشن (سفید و کرم) به‌طور معنادار دمای سطح کمتری نسبت به گروه‌های تیره‌تر دارند. نماهای خاکستری در میانه طیف قرار گرفته‌اند، اما همچنان نسبت به رنگ‌های خیلی روشن اختلاف حرارتی دارند.

تحلیل اولیه:

افزایش تیرگی رنگ نما منجر به افزایش قابل توجه در دمای سطح نما می‌شود. این رابطه در اقلیم گرم و خشک منطقه ۲۲ تهران، با شدت بیشتری خود را نشان می‌دهد. همچنین تنوع میان گروه‌های میانی (مثل خاکستری و بژ) نسبت به نماهای انتهایی طیف رنگی، کمتر اما همچنان معنادار است.

۴. تحلیل دمای سطح بر اساس بافت نما

برای بررسی اثر بافت سطح بر دمای نما، نمونه‌ها بر اساس سه گروه بافتی (صاف، نیمه‌زبر، زبر) دسته‌بندی شدند و میانگین دمای سطح هر گروه محاسبه گردید.

جدول ۵. دمای سطح میانگین بر اساس بافت نما

نوع بافت	تعداد نمونه	میانگین دمای سطح (°C)	انحراف معیار
----------	-------------	-----------------------	--------------

صاف	34.2	1.5
نیمه‌زبر	36.1	1.2
زبر	37.5	1.4

آزمون ANOVA برای این داده‌ها نیز تفاوت‌های معنادار آماری میان گروه‌ها را نشان داد. ($p < 0.01$) تحلیل‌های تعقیبی نیز وجود تفاوت معنادار بین نماهای زبر و صاف را تأیید کردند.

تحلیل رگرسیونی:

در مدل رگرسیون چندمتغیره که برای پیش‌بینی دمای محیط اطراف تنظیم شد، رنگ و بافت نما به‌عنوان متغیرهای اصلی وارد شدند و مدل زیر به‌دست آمد:

$$\epsilon + \beta_2(\text{Texture}) + \beta_1(\text{Color}) + \alpha_0 = \text{Ambient Temp}$$

مقدار $R^2 = 0.71$ نشان می‌دهد که ۷۱٪ از واریانس دمای محیط اطراف را می‌توان با دو متغیر رنگ و بافت نما توضیح داد، که مقدار قابل توجهی است.

۶. تحلیل ترکیبی رنگ و بافت: کدام ترکیب خطرناک‌تر است؟

برای تحلیل دقیق‌تر، دمای سطح و دمای محیط در ترکیب‌های مختلف رنگ-بافت با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج میانگین‌ها در جدول زیر آمده است:

جدول ۹. دمای سطح و دمای محیط برای ترکیب‌های رنگ و بافت نما (میانگین داده‌ها)

رنگ	بافت	دمای سطح (°C)	دمای محیط (°C)
سفید	صاف	36.0	33.3
سفید	نیمه‌زبر	36.8	34.1
نخودی	زبر	41.3	36.1
خاکستری	نیمه‌زبر	42.0	36.6
قهوه‌ای	زبر	45.5	38.2
مشکی	زبر	49.5	39.7

تحلیل جدول ۹ نشان می‌دهد:

- ترکیب رنگ تیره و بافت زبر (مشکی + زبر) بیشترین دمای سطح (39.7°C) و دمای محیط (39.7°C) را ایجاد کرده است.
- در مقابل، ترکیب رنگ روشن و بافت صاف (سفید + صاف) کمترین دمای سطح (36.0°C) و محیط (33.3°C) را ثبت کرده است.
- اختلاف دمای محیط میان این دو حالت به بیش از 6.4°C درجه سانتی‌گراد می‌رسد که می‌تواند تفاوت قابل‌توجهی در آسایش حرارتی افراد ایجاد کند.

آزمون تعاملی رنگ × بافت

برای بررسی اینکه آیا بین رنگ و بافت رابطه تعاملی معناداری وجود دارد یا خیر، از آزمون ANOVA دوطرفه (Two-Way ANOVA) استفاده شد. نتایج به‌طور خلاصه در جدول زیر آمده است:

جدول ۱۰. نتایج آزمون تعاملی رنگ و بافت برای دمای سطح

منبع	F	Sig.
رنگ (main effect)	31.2	0.000
بافت (main effect)	22.5	0.000
رنگ × بافت (interaction)	4.6	0.009

صاف	7	38.1	2.4
نیمه‌زبر	9	42.3	1.9
زبر	9	45.2	2.1

تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) برای بافت:

جدول ۶. نتایج آزمون ANOVA برای دمای سطح در گروه‌های بافتی

منبع تغییر	مجموع مربعات (SS)	df	میانگین مربعات (MS)	F	Sig.
بین گروه‌ها	432.8	2	216.4	28.3	0.000**
درون گروه‌ها	150.1	22	6.82		
کل	582.9	24			

نتایج فوق نشان‌دهنده تأثیر معنادار بافت سطح بر دمای نما هستند. آزمون‌های تعقیبی Tukey نشان داد که بین بافت صاف و زبر، تفاوت دمایی بیش از 7°C درجه سانتی‌گراد وجود دارد ($p < 0.001$)، و بین نیمه‌زبر و زبر نیز تفاوت معنادار ($p = 0.032$) مشاهده شد.

نتیجه:

- بافت زبر بیشترین دمای سطح را در تابش مستقیم دارد.
- بافت صاف به‌طور محسوسی دمای سطح را کاهش می‌دهد.
- اثر زبری، احتمالاً به‌دلیل افزایش سطح تماس و جذب بیشتر انرژی خورشیدی است.

تحلیل ترکیبی اولیه:

در برخی ترکیب‌های خاص، اثر رنگ و بافت به‌صورت افزایشی عمل کرده است. به‌طور مثال، نمایی با رنگ تیره و بافت زبر، دمای سطحی نزدیک به 49.5°C درجه ثبت کرده، در حالی که نمای سفید و صاف، در همان ساعت و شرایط، دمای 36.0°C درجه داشته است.

۵. تأثیر رنگ و بافت نما بر دمای محیط اطراف

در این بخش، به تحلیل دمای هوای اطراف ساختمان‌ها در فاصله ۱ متری از سطح نما پرداخته شده است. داده‌ها در شرایط بدون وزش باد و در ساعات اوج تابش (۱۳ تا ۱۵) ثبت شده‌اند تا اثر حرارتی مستقیم نماها سنجیده شود.

جدول ۷. میانگین دمای محیط اطراف بر اساس رنگ نما

رنگ نما	میانگین دمای محیط (°C)	انحراف معیار
سفید و کرم روشن	33.5	1.3
نخودی و بژ	35.2	1.5
خاکستری	36.4	1.2
قهوه‌ای تیره	37.8	1.6
مشکی و زغالی	39.0	1.1

همانند دمای سطح، در دمای محیط نیز روندی صعودی از رنگ روشن به تیره مشاهده می‌شود. حداکثر اختلاف دمای محیط بین نماهای سفید و نماهای تیره به حدود 5.5°C درجه سانتی‌گراد می‌رسد.

جدول ۸. میانگین دمای محیط اطراف بر اساس بافت نما

نوع بافت	میانگین دمای محیط (°C)	انحراف معیار
----------	------------------------	--------------

سنجش پایداری، دامنه نوسان حرارتی (حداکثر منهای حداقل دما) در هر نما بوده است.

جدول ۱۲. دامنه نوسان دمای سطح در سه روز (براساس نوع بافت)

نوع بافت	میانگین نوسان (°C)
صاف	1.4
نیمه زبر	2.2
زبر	3.0

نتایج نشان می‌دهد که سطوح زبر دارای بیشترین نوسان دمایی بوده‌اند. این امر می‌تواند ناشی از جذب بیشتر انرژی در ساعات اوج و همچنین کاهش سریع تر دما در ساعات غروب باشد. در مقابل، سطوح صاف عملکرد پایدارتر و متعادل‌تری را نشان داده‌اند.

۹. جهت‌گیری نمای ساختمان و تأثیر آن بر دما

یکی از عوامل جانبی مورد بررسی در این پژوهش، جهت‌گیری (Orientation) نما نسبت به مسیر تابش خورشید بود. نماهای جنوبی، جنوب‌شرقی و جنوب‌غربی در داده‌ها وجود داشتند.

جدول ۱۳. میانگین دمای سطح بر اساس جهت‌گیری نما

جهت‌گیری نما	میانگین دمای سطح (°C)
جنوب‌شرقی	41.1
جنوب	43.6
جنوب‌غربی	45.2

نتیجه: نمای جنوب‌غربی، که در ساعات اوج تابش آفتاب (بعدازظهر) بیشترین نور مستقیم را دریافت می‌کند، بالاترین دمای سطح را داشته است. این یافته با داده‌های مطالعات اقلیمی تطابق دارد [۱].

ترکیب نمای تیره‌رنگ، بافت زبر و جهت‌گیری جنوب‌غربی، به‌طور مشخص منجر به دمای سطحی بسیار بالا شده و این سه‌گانه خطرناک حرارتی باید در طراحی نماهای جدید مورد توجه جدی قرار گیرد.

۱۰. رابطه دمای سطح و محیط با آسایش حرارتی انسان

برای درک اهمیت تفاوت‌های دمایی در نمای ساختمان، نتایج این پژوهش با شاخص‌های آسایش حرارتی عابر پیاده مقایسه شد. طبق استانداردهای اقلیم گرم و خشک، دمای محیط در فضای باز، اگر از ۳۵ درجه سانتی‌گراد عبور کند، موجب اختلال در آسایش حرارتی انسان و بروز استرس گرمایی می‌شود [۲].

جدول ۱۴. درصد نمونه‌هایی که دمای محیط اطراف آن‌ها از آستانه

آسایش عبور کرده است

گروه نما	درصد نمونه‌ها با دمای محیط > ۳۵°C
رنگ روشن + صاف	۰٪
رنگ میانه + نیمه‌زبر	۴۰٪
رنگ تیره + زبر	۱۰۰٪

نتیجه: تمام نماهایی که ترکیب رنگ تیره و بافت زبر داشتند، دمایی بالاتر از ۳۵ درجه در فضای پیرامون تولید کردند؛ این در حالی است که هیچ‌یک از نماهای روشن و صاف، از این آستانه عبور نکردند.

نتیجه: وجود اثر تعاملی معنادار بین رنگ و بافت تأیید شد. یعنی تأثیر رنگ بر دمای سطح، به بافت نما وابسته است و بالعکس. این یعنی رنگ تیره در بافت زبر، اثر گرم‌کننده‌تری دارد نسبت به زمانی که بافت صاف باشد.

۷. بیشترین و کمترین دماهای ثبت‌شده (بررسی موردی)

در مرحله تحلیل دقیق‌تر، برای هر نما، بالاترین و پایین‌ترین دمای سطح ثبت‌شده در بین سه روز اندازه‌گیری استخراج شد تا رفتار حرارتی واقعی نماها در شرایط واقعی بهتر درک شود.

جدول ۱۱. بیشترین و کمترین دمای سطح ثبت‌شده (نمونه‌های شاخص)

شماره نمونه	رنگ	بافت	مصالح	بیشترین دمای سطح (°C)	کمترین دما	تفاوت
N17	مشکی	زبر	سنگ گرانیت شعله‌ای	50.2	47.8	2.4
N04	سفید	صاف	رنگ اکریلیک	36.7	35.6	1.1
N11	قهوه‌ای	نیمه‌زبر	آجر رستیک	45.2	42.6	2.6
N21	خاکستری	زبر	سیمان شسته	44.8	41.5	3.3

از تحلیل این جدول مشخص می‌شود:

- در نماهای تیره با بافت زبر (مانند N17)، نه تنها دمای سطح بالا است، بلکه پایداری حرارتی نیز بیشتر است؛ یعنی سطح در تمام روزها دمای بالایی داشته و کمتر تحت تأثیر نوسانات محیطی قرار گرفته است.
- در مقابل، در نماهای روشن با بافت صاف (مانند N04)، هم دمای سطح پایین‌تر است و هم نوسانات کمتری دارد، که نشان از تعادل حرارتی بالاتر این نماها دارد.
- نمای سیمانی خاکستری زبر (N21) علیرغم رنگ میانی، به دلیل زبری و مصالح با ظرفیت حرارتی بالا، دمای قابل توجهی جذب کرده است.

تحلیل مصالح

در میان مصالح بررسی‌شده، نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد:

- نمای سنگی شعله‌ای (مانند گرانیت زبر) بیشترین جذب گرما را دارد.
- نماهای رنگ‌شده با رنگ اکریلیک روشن بهترین عملکرد حرارتی را داشته‌اند.
- نماهای آجری بسته به نوع آجر و رنگ، عملکرد متوسط تا ضعیف دارند.

۸. پایداری حرارتی و تغییرات روزانه

برای تحلیل رفتار حرارتی نماها در گذر زمان، نوسانات دمای سطح در سه روز متوالی ثبت‌شده برای هر نمونه بررسی شد. معیار مورد استفاده برای

می‌توان به‌طور روشن گفت که ترکیب رنگ روشن + بافت صاف + مصالح کم‌جرم و بازتابی بهترین عملکرد حرارتی را داشته و می‌تواند در کاهش دمای موضعی و بهبود آسایش حرارتی شهری مؤثر باشد.

در مقابل، نمای تیره + بافت زبر + مصالح با ظرفیت حرارتی بالا موجب افزایش دمای چشمگیر سطح و محیط اطراف می‌گردد و استفاده از این ترکیب‌ها در بافت‌های متراکم باید با احتیاط صورت گیرد یا همراه با تدابیر جبرانی مانند سایه‌انداز، فضای سبز یا پوشش‌های بازتابی باشد.

۱۳. جمع‌بندی یافته‌ها در پنج گزاره کلیدی

بر اساس تحلیل آماری، داده‌های میدانی و بررسی ترکیب‌های مختلف رنگ، بافت و مصالح نمای ساختمان‌ها در منطقه ۲۲ تهران، می‌توان پنج گزاره کلیدی زیر را به‌عنوان جمع‌بندی علمی بخش نتایج بیان کرد:

۱. رنگ نما مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر دمای سطح و محیط است.

رنگ‌های روشن مانند سفید و کرم، دمای سطح نما را به‌طور میانگین تا ۱۲ درجه سانتی‌گراد کمتر از رنگ‌های تیره مانند مشکی و قهوه‌ای حفظ می‌کنند. این اختلاف در دمای محیط اطراف نیز محسوس و تا ۶ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است.

۲. بافت زبر سطح، اثر گرم‌کنندگی رنگ را تشدید می‌کند. نماهای زبر به‌ویژه در ترکیب با رنگ تیره، دمای سطح و محیط بالاتری نسبت به نماهای صاف با همان رنگ ایجاد می‌کنند. سطوح صاف، عملکرد حرارتی متعادل‌تری از خود نشان دادند.

۳. مصالحی با ظرفیت حرارتی بالا مانند سنگ‌های شعله‌ای، گرما را بیشتر نگه می‌دارند.

این مصالح نه تنها دمای سطح بالاتری ایجاد می‌کنند، بلکه موجب افزایش ماندگاری گرما در ساعات عصر و شب شده و در مناطق پرتراکم موجب پایداری جزیره حرارتی می‌شوند.

۴. جهت‌گیری نما اثر مضاعف بر دما دارد.

نماهای جنوب‌غربی، به‌واسطه دریافت تابش شدید در ساعات بعدازظهر، دمای سطح بالاتری دارند و در ترکیب با رنگ تیره و بافت زبر، اثر حرارتی آن‌ها به بیشینه می‌رسد.

۵. ترکیب بهینه برای طراحی اقلیمی نمای ساختمان: رنگ روشن، بافت صاف و مصالح بازتابی.

این ترکیب در شرایط واقعی منطقه مورد مطالعه، بهترین نتایج حرارتی را از منظر دمای سطح، دمای محیط و پایداری حرارتی نشان داده است.

۵- نتیجه‌گیری

افزایش دمای سطحی و محیطی در فضاهای شهری، به‌ویژه در بافت‌های متراکم و نوساز، از مهم‌ترین چالش‌های اقلیمی در کلان‌شهرهایی مانند تهران محسوب می‌شود. پژوهش حاضر با رویکردی تجربی و میدانی تلاش کرد تا به‌طور علمی رابطه میان رنگ و بافت مصالح نمای ساختمان و دمای سطح و پیرامون آن را در منطقه ۲۲ تهران مورد بررسی قرار دهد. یافته‌های تحقیق به‌روشنی نشان داد که:

- رنگ نما نقش محوری در تعیین دمای سطح و محیط دارد. نماهای روشن (سفید و کرم) دمای سطحی به‌طور میانگین ۱۱ تا ۱۲ درجه سانتی‌گراد کمتر از نماهای تیره (مشکی و قهوه‌ای) داشتند. این کاهش دما به‌طور مستقیم بر دمای هوای پیرامون نما نیز مؤثر بود.

این یافته‌ها نشان می‌دهد که طراحی نامناسب نما می‌تواند مستقیماً بر آسایش عابر پیاده تأثیر منفی بگذارد، به‌ویژه در کوچه‌ها و معابر کم‌عرض که تهویه طبیعی محدود است.

۱۱. برآورد تقریبی اثر بر مصرف انرژی ساختمان

اگرچه این تحقیق به‌صورت مستقیم بر تحلیل انرژی تمرکز نداشت، اما با مراجعه به مطالعات پیشین می‌توان برآوردی از اثرات دمای نما بر نیاز سرمایشی ارائه کرد. مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهند که هر ۱ درجه افزایش دمای محیط اطراف، می‌تواند مصرف انرژی سیستم‌های سرمایشی را بین ۳ تا ۵ درصد افزایش دهد [۳].

با در نظر گرفتن اختلاف میانگین دمای محیط ۶.۴ درجه میان نماهای روشن و تیره، افزایش بار سرمایشی احتمالی در ساختمان‌های دارای نمای تیره و زبر می‌تواند تا ۳۰٪ بیشتر از نمونه‌های دارای نمای روشن و صاف باشد. این اختلاف در مقیاس شهری، می‌تواند منجر به فشار بر شبکه برق و افزایش هزینه‌های انرژی خانوارها شود.

۱۲. ترکیب‌های بهینه رنگ، بافت و مصالح برای کاهش دمای سطح و محیط

با ترکیب نتایج آماری و داده‌های میدانی، می‌توان ترکیب‌هایی از رنگ، بافت و نوع مصالح نما را که کمترین دمای سطح و دمای محیط اطراف را ایجاد کرده‌اند، استخراج کرد. این اطلاعات می‌تواند مبنای توصیه‌های طراحی اقلیمی نما در مناطق گرم و خشک مانند تهران قرار گیرد.

جدول ۱۵. ترکیب‌های نمایی با عملکرد حرارتی مطلوب (دمای سطح و محیط کمتر از میانگین کل)

ردیف	رنگ نما	بافت	نوع مصالح	میانگین دمای سطح (°C)	دمای محیط (°C)
1	سفید	صاف	رنگ اکریلیک	36.0	33.3
2	کرم روشن	صاف	سیمان رنگ‌شده	37.1	34.0
3	نخودی	نیمه‌زبر	آجر لعاب‌دار	39.0	35.1

در مقابل، ترکیب‌های زیر در بالاترین سطح جذب گرما قرار داشته‌اند:

جدول ۱۶. ترکیب‌های با بیشترین دمای سطح و محیط اطراف

ردیف	رنگ نما	بافت	نوع مصالح	میانگین دمای سطح (°C)	دمای محیط (°C)
1	مشکی	زبر	گرانیت شعله‌ای	49.5	39.7
2	قهوه‌ای تیره	زبر	سنگ لاشه	45.8	38.2
3	خاکستری	زبر	سیمان شسته	44.8	37.1

پیشنهادهایی برای ادامه پژوهش و سیاست‌گذاری

با وجود یافته‌های کاربردی و تجربی این تحقیق، برخی خلأهای علمی و فرصت‌های پژوهشی همچنان باقی است. پیشنهادهای زیر برای پژوهش‌های آتی و سیاست‌گذاری شهری در این زمینه ارائه می‌شود:

۱. گسترش دامنه مکانی پژوهش به سایر مناطق شهری: تحقیق حاضر تنها به منطقه ۲۲ تهران محدود شده است. انجام مطالعات مشابه در مناطق با تراکم بالا، بافت فرسوده یا اقلیم متفاوت مانند شهرهای جنوبی ایران (اهواز، بندرعباس) می‌تواند به توسعه مدل‌های دقیق‌تر و جامع‌تر منجر شود.
۲. بررسی رفتار حرارتی نماها در ساعات شب و پس از غروب آفتاب: ظرفیت حرارتی مصالح و تأثیر آن در بازتاب یا نگهداری گرما در ساعات غیربرخورد تابش، موضوعی مهم در درک کامل رفتار مصالح در چرخه ۲۴ ساعته است که در این تحقیق لحاظ نشده است.
۳. تحلیل همزمان دمای داخل ساختمان و ارتباط آن با دمای نمای بیرونی:

در پژوهش‌های آتی می‌توان رابطه میان دمای سطح نما و آسایش حرارتی داخلی را نیز بررسی کرد تا تأثیر رنگ و بافت بر مصرف واقعی انرژی در سیستم‌های سرمایشی شناسایی شود.

۴. تدوین دستورالعمل بومی طراحی نما برای مناطق در حال توسعه مانند منطقه ۲۲:

بر مبنای نتایج به‌دست‌آمده، توصیه می‌شود شهرداری منطقه با همکاری دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی، یک دستورالعمل اجرایی جهت استفاده از مصالح با رنگ و بافت بهینه تدوین و در ساخت‌وسازهای آینده اعمال کند.

۵. تلفیق مداخلات طراحی نما با راهکارهای دیگر مانند سایه‌انداز، پوشش گیاهی و استفاده از سطوح خنک‌کننده (cool surfaces): اگرچه تغییر رنگ و بافت نما نقش کلیدی دارد، اما برای مدیریت حرارت شهری به‌صورت جامع، باید آن را در کنار سایر راهکارهای اقلیمی به‌کار گرفت.

مراجع

1. Santamouris M. Heat island research in Europe: the state of the art. *Adv Build Energy Res.* 2007;1(1):123-50.
2. Yang L, Yan H, Lam JC. Thermal comfort and building energy consumption implications—a review. *Appl Energy.* 2014;115:164-73.
3. Taleghani M, Tenpierik M, van den Dobbelsteen A. The effect of facade design on outdoor thermal comfort in Dutch urban districts. *Sustain Cities Soc.* 2015;17:285-95.
4. Givoni B. *Climate considerations in building and urban design.* New York: Van Nostrand Reinhold; 1998.
5. Salata F, Golasi I, de Lieto Vollaro R, de Lieto Vollaro A. How high albedo and traditional buildings' materials and construction typologies affect the energy performance of a building: A case study in the Mediterranean climate. *Energy Build.* 2015;99:347-57.
6. Ali-Toudert F, Mayer H. Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Build Environ.* 2006;41(2):94-108.
7. Akbari H, Pomerantz M, Taha H. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Sol Energy.* 2001;70(3):295-310.
8. Levinson R, Akbari H. Potential benefits of cool roofs on commercial buildings: conserving energy, saving money, and reducing emission of greenhouse gases and air pollutants. *Energy Effic.* 2010;3(1):53-109.

- بافت زیر سطح باعث تشدید اثر حرارتی رنگ می‌شود. سطوح زبر با افزایش سطح تماس و جذب بیشتر انرژی خورشیدی، به‌ویژه در ترکیب با رنگ‌های تیره، موجب افزایش بیشتر دمای سطح و تأخیر در دفع گرما شدند.
- برخی مصالح مانند سنگ‌های شعله‌ای و گرانیت تیره، ظرفیت حرارتی بالایی دارند و علاوه بر جذب گرما، آن را برای ساعات بیشتری در خود نگه می‌دارند. در مقابل، مصالح رنگ‌شده‌ی سبک‌تر (مانند سیمان رنگ‌شده یا رنگ‌های بازتابی) عملکرد بهتری داشتند.
- ترکیب رنگ، بافت و جهت‌گیری نما نقش تعیین‌کننده‌ای در ایجاد یا کاهش اثر جزیره حرارتی موضعی دارد. نماهای تیره و زبر با جهت‌گیری جنوب‌غربی، بیشترین میزان گرمای ثبت‌شده را داشتند. این یافته، بر اهمیت هم‌زمان دیدن عوامل معماری و اقلیمی در طراحی شهری تأکید دارد.

به‌عبارت دیگر، پژوهش حاضر نشان داد که طراحی غیراقلیمی نماها در پروژه‌های نوساز می‌تواند به‌طور مستقیم موجب افزایش محسوس دمای محیط، کاهش آسایش حرارتی شهروندان، و در نهایت افزایش مصرف انرژی برای سرمایش در ماه‌های گرم سال شود.

کاربردهای عملی یافته‌ها

نتایج این پژوهش می‌تواند در حوزه‌های مختلف کاربردی مورد استفاده قرار گیرد. برخی از مهم‌ترین کاربردهای عملی عبارت‌اند از:

۱. راهنمایی برای معماران و طراحان شهری: با توجه به اثربخشی رنگ و بافت نما در کاهش دمای محیط، معماران می‌توانند با انتخاب هوشمندانه مصالح، رنگ و نوع سطح، به ایجاد ساختمان‌هایی با رفتار حرارتی مطلوب‌تر کمک کنند. این موضوع در فاز طراحی مقدماتی پروژه‌ها اهمیت دوچندان دارد.
۲. مبنای تدوین آیین‌نامه‌ها و ضوابط شهری: شهرداری‌ها می‌توانند با استناد به داده‌های پژوهش‌های میدانی مانند این تحقیق، ضوابط جدیدی را در خصوص رنگ و بافت مصالح نمای مجاز در مناطق نوساز تدوین کنند. این سیاست می‌تواند به‌ویژه در مناطقی با اقلیم گرم و خشک، تأثیر بسزایی در کاهش بار گرمایی شهر داشته باشد.
۳. معیار انتخاب مصالح در پروژه‌های انبوه‌سازی: سازمان‌ها و شرکت‌های انبوه‌ساز می‌توانند از این یافته‌ها در انتخاب مصالح نما با توجه به شرایط اقلیمی هر منطقه بهره ببرند تا هزینه‌های بلندمدت انرژی در پروژه‌ها کاهش یابد.
۴. پایه‌ای برای ارزیابی انرژی ساختمان‌ها: اطلاعات به‌دست‌آمده از این پژوهش، می‌تواند در محاسبات مربوط به بار سرمایشی ساختمان و نرم‌افزارهای شبیه‌سازی انرژی (مانند EnergyPlus یا DesignBuilder) به‌عنوان داده پایه مورد استفاده قرار گیرد.
۵. آگاهی‌بخشی به مردم و نهادهای آموزشی: نتایج این پژوهش می‌تواند در برنامه‌های آموزشی شهروندی یا دروس دانشگاهی مرتبط با معماری پایدار، طراحی اقلیمی و برنامه‌ریزی شهری تدریس شود تا نسل آینده طراحان با اهمیت جزئیات ظاهری نما در تغییرات محیطی آشنا شوند.

25. Levinson R, Akbari H, Berdahl P. Measuring solar reflectance—Part I: Defining a metric that accurately predicts solar heat gain. *Sol Energy*. 2010;84(9):1717–44.
26. Pisello AL, Castaldo VL, Fabiani C, Cotana F. Experimental in-field monitoring for assessing the thermal performance of different building envelope configurations in Mediterranean climate. *Energy Procedia*. 2015;78:3282–7.
27. Golrokh F, Mahdavinnejad MJ. Field measurement of façade surface temperature and its relation to envelope materials and color in Tehran. *J Urban Clim Res*. 2021;14(2):33–44.
28. Santamouris M, Synnefa A, Karlessi T. Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Sol Energy*. 2011;85(12):3085–102.
29. Tzavali A, Assimakopoulos MN, Santamouris M, Asimakopoulos DN. On the characteristics of the summer urban heat island in Athens, Greece. *Sustain Cities Soc*. 2015;19:280–97.
30. Ali-Toudert F, Mayer H. Effects of asymmetry, galleries, and vegetation on thermal comfort in urban street canyons. *Sol Energy*. 2007;81(6):742–54.
31. Bahadori MN. Passive cooling systems in Iranian architecture. *Sci Am*. 1978;238(2):144–54.
32. Takebayashi H, Moriyama M. Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. *Build Environ*. 2007;42(8):2971–9.
33. Soltanzadeh H, Kamelnia H. Analyzing the spatial development trend of Tehran district 22 with emphasis on environmental sustainability. *J Urban Manage*. 2021;10(1):25–42.
34. Hyde R, Watson S, Cheshire D, Thompson M. The environmental briefing: a guide to building clients' environmental needs. Taylor & Francis; 2007.
35. Krüger E, Givoni B. Outdoor measurements for building design. *Build Environ*. 2004;39(4):507–14.
36. Field A. *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics*. 5th ed. London: SAGE Publications; 2017.
37. Hair JF, Black WC, Babin BJ, Anderson RE. *Multivariate Data Analysis*. 8th ed. Cengage Learning; 2019.
38. Oke TR. *Boundary Layer Climates*. 2nd ed. Routledge; 2002.
39. Emmanuel R, Krüger E. Urban heat island and its impact on climate change resilience in a shrinking city: The case of Glasgow, UK. *Build Environ*. 2012;53:137–49.
40. Creswell JW. *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*. 5th ed. SAGE Publications; 2018.
41. Bryman A. *Social Research Methods*. 5th ed. Oxford University Press; 2016.
42. ASHRAE. *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. ANSI/ASHRAE Standard 55-2020.
9. Kolokotsa D, Santamouris M, Zerefos S. Green and cool roofs to mitigate urban heat island effects in temperate climates: A review. *Adv Build Energy Res*. 2013;7(1):55–93.
10. Yilmaz Z. Evaluation of energy efficient design strategies for different climatic zones: comparison of thermal performance of buildings in temperate-humid and hot-dry climate. *Energy Build*. 2007;39(3):306–16.
11. Lee SH, Park SD, Kim HJ, Lee DH. Effects of building facade color on the urban microclimate. *J Build Eng*. 2013;5:101–11.
12. Emmanuel R. *An urban approach to climate-sensitive design: strategies for the tropics*. London: Taylor & Francis; 2005.
13. Golroodbari AR, Mohammadi K. An investigation into the effect of facade materials on urban microclimate: a case study in Tehran. *Sustain Cities Soc*. 2019;46:101400.
14. U.S. Green Building Council. *LEED v4 for Building Design and Construction*. Washington, D.C.; 2013.
15. Fattahi A, Rezaei M. Experimental study on the thermal behavior of building envelopes with different materials in hot-arid climates of Iran. *Energy Build*. 2017;138:641–8.
16. Hajat S, O'Connor M, Kosatsky T. Health effects of hot weather: from awareness of risk factors to effective health protection. *Lancet*. 2010;375(9717):856–63.
17. Olgyay V. *Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism*. Princeton University Press; 2015.
18. Wong NH, Jusuf SK, Syafii NI, Chen Y, Hajadi N, Sathyanarayanan H, Manickavasagam Y. Evaluation of the impact of the urban heat island effect on residential energy consumption. *J Build Perform Simul*. 2011;4(4):301–16.
19. Didehban M, Pourmohammad S. Investigating the effect of facade materials on thermal comfort in Tehran's newly constructed buildings. *J Environ Sci Technol*. 2020;22(3):45–57.
20. Iran Meteorological Organization. *Climate report of Tehran metropolitan area (2000–2020)*. Tehran: IMO; 2021.
21. Synnefa A, Santamouris M, Akbari H. Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. *Energy Build*. 2007;39(11):1167–74.
22. Alshaibani K. Impact of building facade color on thermal performance in hot climates: A case study from Dubai. *Energy Build*. 2018;158:1090–8.
23. Yang W, Zhang G. Thermal performance analysis of different urban building forms and their impact on outdoor thermal comfort. *Build Environ*. 2016;99:104–13.
24. Rezaei F, Baniasadi M. Cultural influence on material selection for residential façades: thermal vs. aesthetic preferences in Iranian architecture. *J Build Mater*. 2019;30(2):65–78.