Examining the Effects of Light Color Temperature on Spatial Wayfinding of Users in Commercial Complexes: A Virtual Reality Approach

Mehrafarin Bagheri[1], **Maedeh Pourfathollah**[2]

Received: 2025-11-03 , Accepted: 2026-02-06
DOI: 10.22034/rau.2026.2076659.1277

Extended Abstract

Navigating large shopping centers requires significant cognitive effort due to the constant processing of spatial information and route planning. In such environments, users are continuously exposed to competing visual stimuli, intersecting circulation paths, ambiguous spatial hierarchies, and diverse functional zones, all of which contribute to elevated cognitive load and increased risk of disorientation. This complexity is amplified in contemporary commercial architecture, where aesthetic priorities, multifunctional programs, and dynamic spatial sequences often overshadow human cognitive limitations. Navigating complex environments effectively relies on both individual spatial skills and the clarity of environmental cues provided by the architecture.

Within this context, environmental design elements play a critical role in supporting or hindering wayfinding performance. Among these elements, lighting quality—particularly as a core component of human-centered architectural design—has a decisive influence on spatial perception, attentional allocation, emotional response, and behavioral efficiency. Lighting does not merely serve a functional purpose of illumination; rather, it actively shapes users' cognitive mapping processes and decision-making behavior in complex architectural settings. By manipulating luminance gradients, color temperature, and contrast, designers can subtly direct attention, reveal spatial hierarchies, and reinforce orientation cues. This interplay between lighting and cognition has long been recognized in environmental psychology, yet remains underexplored in architectural research focused on real-world navigation.

Previous research has extensively examined various lighting parameters, including illuminance levels, directionality, contrast, glare control, and uniformity, and their effects on visual comfort and spatial legibility. Despite increasing interest

1. Master student, Architecture engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.
Email: mehrafarinbagheri@gmail.com 0009-0004-2177-2218
2. Assistant Professor, University of Guilan, Rasht, Iran (Corresponding Author).
Email: pourfathollah@guilan.ac.ir 0000-0002-0431-7844

in the non-visual and cognitive effects of light, the impact of correlated color temperature (CCT) on wayfinding in complex commercial environments remains poorly understood. Existing studies often address CCT effects in descriptive or isolated laboratory settings, focusing primarily on mood, preference, or general visual comfort, rather than on measurable behavioral outcomes related to navigation. Moreover, empirical investigations that integrate user-based performance metrics with immersive architectural simulations are still limited. Consequently, the optimal range of light color temperature for enhancing spatial cognition, reducing cognitive load, and improving navigation efficiency in shopping centers hasn't yet been clearly defined.

This research addresses this gap by systematically evaluating the impact of six different correlated color temperature conditions on users' wayfinding performance within a simulated shopping center environment. The study employs a human-centered design approach that leverages the capabilities of interactive virtual reality (VR) with eye-tracking technology to capture both behavioral and perceptual responses. By embedding lighting scenarios directly into a realistic architectural model and observing users' real-time navigation behavior, the research moves beyond subjective assessments and provides objective, data-driven insights into how CCT influences spatial decision-making.

The study is applied in nature and employs an experimental design. A total of 32 participants, aged between 18 and 57 years, took part in the experiment. Participants with varied shopping center experience and spatial abilities navigated a complex virtual shopping center with multiple levels, corridors, landmarks, and routes, allowing for a representative assessment of user responses. The virtual environment was developed using a high-fidelity architectural model to ensure ecological validity, while maintaining full experimental control over lighting conditions.

Six lighting scenarios were implemented, each defined by a distinct correlated color temperature ranging from warm to cool light spectra. Participants completed a series of predefined navigation tasks under each lighting condition and located specific destinations within the virtual shopping center. During navigation, both quantitative and qualitative data were collected. Quantitative performance measures included decision-making time at choice points, the number of wayfinding errors, total task completion time, eye fixation duration, fixation frequency on navigational cues, and overall eye movement patterns. These metrics provided detailed insights into cognitive load, attentional focus, and navigation efficiency. In addition, qualitative data were gathered through post-task questionnaires, capturing participants' subjective perceptions of spatial clarity, visual comfort, perceived difficulty, and overall environmental legibility under each lighting condition.

One-way ANOVA was used to analyze differences in wayfinding performance across the six CCT conditions. Pearson correlations explored relationships between eye-tracking metrics and behavioral performance. This mixed-methods approach provided a comprehensive understanding of how lighting color tem-

perature affects navigation behavior and cognitive processes.

The results demonstrate that lighting with a correlated color temperature of approximately 4000 Kelvin significantly enhances wayfinding performance compared to both warmer (3000 K) and cooler (5000 K) lighting conditions ($p < 0.05$). Under the 4000 K condition, participants exhibited shorter decision-making times at critical choice points, made fewer navigation errors, and demonstrated more focused visual attention toward key spatial cues such as directional signage, landmarks, and circulation axes. Eye-tracking data revealed longer fixation durations and more stable gaze patterns on navigational elements, suggesting improved spatial comprehension and reduced cognitive load. These findings indicate that Neutral-white lighting enhances spatial information processing, perceptual clarity, and cognitive performance.

In contrast, cooler lighting conditions at 5000 K were associated with diminished wayfinding efficiency. Participants navigating under this lighting condition showed increased decision-making times, higher error rates, and more dispersed eye movement patterns. The eye-tracking data suggest that cooler light may increase visual overstimulation and cognitive strain, which leads to reduced attentional focus and less effective use of spatial cues. Participants also reported higher perceived difficulty and lower levels of visual comfort in the qualitative questionnaires, which reinforces the quantitative findings. Warmer lighting at 3000 K, while often perceived as emotionally pleasant, did not support optimal navigation performance, as it appeared to reduce contrast and spatial clarity in key decision-making areas.

These findings contribute to the growing body of evidence that lighting design should be considered a strategic tool for shaping spatial cognition and behavior, rather than a purely aesthetic or technical consideration. By demonstrating the measurable effects of correlated color temperature on wayfinding performance, this study highlights the importance of aligning lighting strategies with human cognitive capabilities and behavioral needs. It provides empirical evidence for performance-based lighting design, in which visual parameters are optimized to enhance both functional and psychological aspects of environmental experience.

The use of virtual reality and eye-tracking technology proved particularly effective in capturing nuanced user responses. It offers a powerful methodological framework for future research in architectural design evaluation. These tools facilitate controlled manipulation of environmental variables while maintaining ecological realism, bridging the gap between laboratory studies and real-world contexts. From a practical perspective, the results suggest that adopting a CCT around 4000 K in circulation paths and decision-intensive areas of shopping centers—such as intersections, atriums, and vertical circulation zones—may significantly enhance navigational clarity and user experience. This insight can guide architectural lighting design toward a more evidence-based, human-centered paradigm.

This study introduces a performance-based lighting model that incorporates

color temperature to improve human wayfinding. This model helps architects, lighting designers, and urban planners enhance spatial legibility and behavioral efficiency in commercial spaces by considering the psychological and cognitive effects of lighting, thus advancing environmental perception and experiential design.

In conclusion, the research demonstrates that evaluating lighting conditions within immersive virtual architectural environments provides a robust and user-centered approach to understanding the behavioral implications of design decisions. By linking correlated color temperature to objective measures of wayfinding performance and cognitive load, the study advances both theoretical knowledge and practical application in the fields of architectural lighting design, environmental psychology, and human-centered design. Future research may expand on these findings by exploring interactions between CCT and other environmental variables, such as luminance contrast, material reflectance, and spatial configuration, as well as by testing additional user groups and real-world settings. The integration of such interdisciplinary approaches promises to enrich our understanding of how built environments can be designed to support intuitive navigation, cognitive efficiency, and positive user experience in complex spatial systems.

Keywords: Human-centered design; Virtual architectural environments; Wayfinding; Correlated color temperature (CCT); Spatial perception; Virtual reality; Eye-tracking

بررسی اثرات دمای رنگ نور بر مسیریابی فضایی کاربران در مجتمع‌های تجاری با رویکرد واقعیت مجازی و ردیابی چشم[۱]

مهرآفرین باقری[۲]، مائده پورفتح اله[۳]

تاریخ دریافت: ۱۲-۰۸-۱۴۰۴، تاریخ پذیرش: ۱۷-۱۱-۱۴۰۴

DOI: 10.22034/rau.2026.2076659.1277

چکیده

در مراکز تجاری پیچیده و چندلایه، کاربران هنگام مسیریابی با بار شناختی بالا و تصمیم‌گیری‌های مکرر فضایی مواجه هستند؛ ازاین‌رو، نورپردازی به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی طراحی انسان‌محور، نقش مهمی در ادراک فضایی و عملکرد رفتاری کاربران ایفا می‌کند. با وجود بررسی ابعاد مختلف نورپردازی در پژوهش‌های پیشین، تأثیر دمای رنگ نور (CCT) بر رفتار مسیریابی کاربران، به‌ویژه در محیط‌های مجازی معماری و در قالب ارزیابی‌های تجربی مبتنی بر کاربر، همچنان به‌طور دقیق مشخص نشده است.

هدف پژوهش حاضر، بررسی تأثیر شش سطح مختلف دمای رنگ نور بر عملکرد مسیریابی کاربران در یک مرکز تجاری شبیه‌سازی‌شده است. این پژوهش از نوع کاربردی و با روش شبه‌آزمایشی انجام شده و از رویکرد ترکیبی کمی-کیفی بهره می‌گیرد. محیط پژوهش با استفاده از فناوری واقعیت مجازی طراحی شده و داده‌های رفتاری کاربران از طریق ردیابی حرکات چشم ثبت گردید. نمونه آماری شامل ۳۲ شرکت‌کننده در بازه سنی ۱۸ تا ۵۷ سال بود. شاخص‌های مورد سنجش شامل زمان تصمیم‌گیری، تعداد خطاهای مسیریابی، مدت تثبیت نگاه و الگوی حرکت چشم، به‌همراه داده‌های ادراکی حاصل از پرسشنامه بودند.

تحلیل داده‌ها با استفاده از آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه (One-Way ANOVA) و ضریب همبستگی پیرسون انجام شد. نتایج نشان داد که نور با دمای رنگ ۴۰۰۰ کلوین در مقایسه با نورهای گرم‌تر (۳۰۰۰ کلوین) و سردتر (۵۰۰۰ کلوین)، به‌طور معناداری عملکرد مسیریابی کاربران را بهبود می‌بخشد ($p<0.05$). این یافته‌ها بر نقش تعیین‌کننده تنظیم دمای رنگ نور در بهینه‌سازی طراحی مسیرهای حرکتی مراکز تجاری تأکید دارد.

کلیدواژه‌ها: طراحی انسان‌محور، محیط‌های مجازی معماری، مسیریابی، دمای رنگ نور (CCT)، ادراک فضایی، واقعیت مجازی، ردیابی حرکات چشم

---

۱. مقاله حاضر برگرفته از پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد نویسنده اول با عنوان «بررسی مؤلفه‌های کالبدی معماری بر مسیریابی با استفاده از تکنیک واقعیت مجازی؛ نمونه موردی: طراحی مجتمع تجاری در تهران» است که با راهنمایی نویسنده دوم، در دانشگاه گیلان در حال انجام است.

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی معماری، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

Email: mehrafarinbagheri@gmail.com 0009-0004-2177-2218

۳. استادیار، عضو هیات علمی گروه معماری و هنر، دانشگاه گیلان، رشت، ایران (نویسنده مسئول).

Email: pourfathollah@guilan.ac.ir 0000-0002-0431-7844

مقدمه

در دهه‌های اخیر، طراحی نورپردازی در فضاهای معماری از سطح زیبایی‌شناسی صرف فراتر رفته و به عنصری تعیین‌کننده در شکل‌گیری ادراک، تصمیم‌گیری و رفتار کاربران تبدیل شده است. نور نه‌تنها ابزار دیدن و روشنایی فضاست، بلکه عامل اصلی در مسیریابی و تجربه فضایی محسوب می‌شود. در فضاهای پیچیده نظیر مجتمع‌های تجاری، که دارای مسیرهای متنوع، حجم بالای محرک‌های دیداری و فعالیت‌های متکثر هستند، کیفیت و ویژگی‌های نور می‌تواند به‌طور مستقیم بر توانایی افراد در مسیریابی و یافتن مقصد تأثیر بگذارد. تجربه‌های روزمره نشان می‌دهد که تغییر در رنگ، شدت یا دمای نور، احساس راحتی، تمرکز و حتی زمان واکنش افراد را دگرگون می‌سازد. ازاین‌رو، طراحی نوری مناسب در چنین محیط‌هایی نه‌تنها به بهبود زیبایی و کارایی فضا کمک می‌کند، بلکه بخش مهمی از تجربه ادراکی و رضایت کاربر را شکل می‌دهد. در میان ویژگی‌های گوناگون نور، دمای رنگ نور (CCT)[1] از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است(Choi, 2020). این شاخص تعیین می‌کند که نور تا چه اندازه دارای تن گرم یا سرد است و در نتیجه چه نوع حس و ادراکی را در کاربر برمی‌انگیزد. نور با دمای رنگ پایین، فضایی گرم، صمیمی و آرام ایجاد می‌کند، درحالی‌که نور با دمای رنگ بالا، موجب القای حس تمرکز، فعالیت و هوشیاری می‌شود(Chen et al., 2022) با وجود این، در محیط‌های پیچیده نظیر مجتمع‌های تجاری که رفتار حرکتی و تصمیم‌گیری افراد در تعامل مداوم با نشانه‌های محیطی است، یافتن تعادل مناسب میان دمای رنگ و عملکرد ادراکی کاربران، چالشی مهم برای طراحان و معماران به شمار می‌رود(Hao et al., 2022). مسئله اصلی پژوهش حاضر از همین نقطه آغاز می‌شود؛ اینکه تغییر دمای رنگ نور چگونه می‌تواند بر مسیریابی کاربران در مجتمع‌های تجاری تأثیر بگذارد. در چنین فضاهایی، کاربران دائما در حال تصمیم‌گیری‌های سریع و پی‌درپی درباره مسیر، جهت و مقصد خود هستند. درنتیجه، هر تغییری در کیفیت نور ممکن است موجب تسهیل یا اختلال در این تصمیم‌گیری‌ها شود. از سوی دیگر، بسیاری از طراحی‌های نورپردازی موجود در فضاهای تجاری تنها بر جلوه‌های بصری و نمای ظاهری تمرکز دارند و به اثرات شناختی و رفتاری نور کمتر توجه می‌شود. بنابراین، نیاز به پژوهشی جامع و علمی برای بررسی اثرات واقعی دمای رنگ نور بر عملکرد مسیریابی کاربران، بیش از پیش احساس می‌شود.

پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر سطوح مختلف دمای رنگ نور (CCT) بر رفتار مسیریابی کاربران در مجتمع‌های تجاری انجام شده است. در این راستا، تلاش می‌شود تا با بهره‌گیری از فناوری واقعیت مجازی، شرایط نوری واقعی در یک محیط تجاری بازسازی و واکنش کاربران در شرایط مختلف دمای رنگ تحلیل شود(Luo, 2023; Mostafavi, 2023; Shahidi, 2021; Yang & Jeon, 2020). این پژوهش با طرح شش سناریوی متفاوت نوری (نورهای گرم، نورهای خنثی، نورهای سرد) به دنبال یافتن پاسخ برای این پرسش‌هاست که:

۱. دمای رنگ نور تا چه اندازه بر دقت و سرعت تصمیم‌گیری کاربران در فضاهای تجاری تأثیر دارد؟
۲. کدام سطح از دمای رنگ، بیشترین سازگاری را با تمرکز بصری و مسیریابی کاربران نشان می‌دهد؟
۳. تنظیم دمای رنگ نور چگونه بر میزان سردرگمی فضایی و بار شناختی کاربران در فرایند مسیریابی تأثیر می‌گذارد؟

این پرسش‌ها نه‌تنها جنبه تجربی دارند، بلکه با حوزه‌های نظری ادراک محیطی، شناخت فضا و طراحی کاربرمحور نیز ارتباط مستقیم پیدا می‌کنند. پاسخ به آن‌ها می‌تواند به درک دقیق‌تر نقش نور در فرایندهای تصمیم‌گیری فضایی و نحوه تعامل انسان با محیط‌های تجاری منجر شود. ضرورت انجام این تحقیق در چند محور اصلی قابل بیان است. نخست آنکه، در اغلب مطالعات داخلی، تحلیل نورپردازی بیشتر به جنبه‌های فنی، مصرف انرژی یا زیبایی‌شناسی محدود شده و بررسی اثرات رفتاری و شناختی نور کمتر مورد توجه قرار گرفته است. دوم آنکه، روش‌های سنتی ارزیابی رفتار کاربران در فضاهای واقعی معمولاً با محدودیت‌های زیادی همراه‌اند؛ ازجمله دشواری کنترل متغیرها، هزینه‌های بالا و عدم امکان تکرارپذیری دقیق شرایط آزمایش. درمقابل، فناوری واقعیت مجازی (Virtual Reality) امکان شبیه‌سازی شرایط نوری، کنترل کامل متغیرها و تحلیل دقیق رفتار حرکتی و بصری کاربران را در محیطی ایمن و واقعی‌نما فراهم می‌سازد. این فناوری به پژوهشگر اجازه می‌دهد تا بدون وابستگی به فضاهای واقعی، اثرات تغییر نور را بر عملکرد ادراکی افراد با دقت بالا بررسی کند. ازسوی دیگر، مجتمع‌های تجاری در شهرهای معاصر به‌عنوان یکی از پرکاربردترین فضاهای عمومی، نقش مهمی در شکل‌دهی به تجربه شهری و الگوی رفتار کاربران دارند. در چنین فضاهایی، عوامل متعددی از جمله رنگ، بافت، چیدمان فضایی و نور درک کاربر از فضا را

DOI: 10.22034/rau.2026.2076659.1277

تعیین می‌کنند. بااین‌حال، نور به دلیل ماهیت پویا و اثر مستقیم بر سیستم بینایی، تأثیر سریع‌تر و عمیق‌تری بر رفتار کاربر دارد. بنابراین، تحلیل علمی این عامل می‌تواند مبنایی برای بهبود طراحی‌های آینده باشد. اهمیت دیگر پژوهش حاضر در رویکرد میان‌رشته‌ای آن است؛ بدین معنا که از تلفیق سه حوزهٔ طراحی معماری، علوم ادراک محیطی و فناوری‌های نو بهره می‌گیرد. این ترکیب، زمینه‌ای نو برای تحلیل رفتار کاربر فراهم می‌کند و به معماران اجازه می‌دهد تصمیمات طراحی را نه صرفاً بر اساس زیبایی بصری، بلکه بر پایه شواهد تجربی و رفتاری اتخاذ کنند. درنهایت، هدف کلی این پژوهش آن است که با روشن ساختن اثرات واقعی دمای رنگ نور بر نحوه مسیریابی کاربران در محیط‌های تجاری، چارچوبی علمی برای انتخاب دمای رنگ مناسب در طراحی نوری فضاهای پیچیده ارائه دهد. نتایج حاصل می‌تواند به بهبود تجربه فضایی، افزایش رضایت کاربران، و ارتقای کیفیت محیط‌های عمومی کمک کند.

روش تحقیق

روش تحقیق این مطالعه از نوع کاربردی و شبه‌آزمایشی است و با رویکرد ترکیبی شامل روش‌های کمی و کیفی انجام گرفته است. هدف از انتخاب چنین رویکردی، دستیابی به تحلیلی جامع از تأثیر دمای رنگی نور (CCT) بر رفتار، تصمیم‌گیری و مسیریابی کاربران در محیط‌های تجاری است. در گام نخست، داده‌های نظری از طریق مطالعات کتابخانه‌ای گردآوری شد تا با بررسی مبانی مربوط به نور، ادراک محیطی و شیوه‌های مسیریابی در معماری، چارچوب مفهومی پژوهش تدوین شود. سپس مرحله میدانی بر پایه استفاده از محیط واقعیت مجازی طراحی شد تا امکان شبیه‌سازی دقیق یک مجتمع تجاری و کنترل کامل شرایط نوری فراهم گردد. در این بخش، محیط سه‌بعدی مجتمع با استفاده از نرم‌افزار Twinmotion بازسازی شد و شش سطح مختلف از دمای رنگی نور در فضا اعمال گردید و با نرم‌افزار Unreal engine به دوربین واقعیت مجازی متصل شد. با توجه به محدودیت ابزارهای پژوهش، این آزمایش در دو مرحله برای هر کاربر انجام شد؛ نخست با واقعیت مجازی محیط را تجربه کردند و بار دیگر با ردیاب چشم محیط‌های طراحی‌شده در ۶ حالت نورپردازی را تجربه کردند. مشارکت‌کنندگان شامل ۳۲ نفر (۲۰ زن و ۱۲ مرد) بودند که با روش نمونه‌گیری تصادفی انتخاب شدند تا رفتار مسیریابی آن‌ها در شرایط نوری گوناگون با دقت بررسی شود. ابزارهای پژوهش شامل هدست واقعیت مجازی Meta Quest 2، نرم‌افزارهای طراحی معماری و ردیابی چشم (Gaze Recorder) بود. مسیرهای نگاه کاربران و نقاط تمرکز دیداری آنان با استفاده از این نرم‌افزار ثبت شد. در صورتی که دوربین واقعیت مجازی با قابلیت ردیابی چشم (مانند نمونه htc vive focus) موجود باشد، شرایط آزمایش و دقت آن و حتی نتایج اندکی متفاوت خواهد بود؛ اما به دلیل محدودیت‌ها و نبود ابزارهای پیشرفته این چنینی، این پژوهش با روش جایگزین صورت گرفته است. برای تکمیل داده‌ها، پس از اجرای سناریوهای حرکتی، پرسشنامه‌ای[۲] نیز توسط شرکت‌کنندگان تکمیل شد تا ابعاد ذهنی و ادراکی آنان از محیط روشن شود. تحلیل داده‌ها در دو بخش کمی و کیفی انجام شد. در مرحله کمی، داده‌های مربوط به زمان تصمیم‌گیری (میانگین زمان پیمایش)، تعداد خطاهای مسیریابی، مدت تثبیت نگاه (مدت تمرکز نگاه)، مسیر حرکت چشم یا پیوستگی دیداری کاربران (میانگین تعداد تمرکز نگاه) در نرم‌افزار SPSS تحلیل گردید تا تفاوت معنادار میان عملکرد کاربران تحت سطوح مختلف CCT مشخص شود. در بخش کیفی، داده‌های حاصل از پاسخ‌های پرسشنامه ادراک محیطی با رویکرد تحلیل محتوای کیفی بررسی شد تا برداشت‌های ذهنی، احساس کیفیت فضا، میزان خوانایی محیط، سطح راحتی بصری و نحوه تجربه کاربران از محیط روشن گردد. این داده‌ها به تبیین چرایی الگوهای رفتاری مشاهده‌شده در نتایج کمی کمک کردند و امکان تلفیق معنادار یافته‌های ادراکی و رفتاری را فراهم ساختند. در مجموع، طراحی پژوهش به گونه‌ای انجام گرفته است که با حفظ اصالت روش ترکیبی، اعتبار بیرونی پژوهش تقویت شود. استفاده از واقعیت مجازی به عنوان محیطی کنترل‌شده و نزدیک به واقعیت، تأثیرات نور را به صورت دقیق و قابل تکرار بررسی می‌کند و این امر قابلیت تعمیم‌پذیری نتایج را افزایش می‌دهد. همچنین ترکیب داده‌های کمی و کیفی نه‌تنها به انسجام یافته‌ها کمک می‌کند بلکه نشان می‌دهد پژوهش حاضر در تحلیل هم‌زمان نور، ادراک محیطی و رفتار حرکتی کاربران توانسته است تصویر نسبتاً کاملی از فرایند مسیریابی در شرایط نوری متفاوت ارائه دهد.

پیشینه تحقیق

در پژوهش "تاثیر دمای رنگ همبسته بر مسیریابی: مطالعه‌ای

در محیط مجازی فرودگاه" به بررسی اثرات دمای رنگ نور (CCT) بر عملکرد راهبری کاربران در محیط فرودگاهی شبیه‌سازی‌شده با واقعیت مجازی پرداخت. آزمون‌ها در سه سطح 6500K ،3000K و 12000K انجام گرفتند و نتایج نشان دادند که اگرچه CCT تأثیر معنی‌داری بر زمان پیمایش یا تعداد خطاها نداشت، اما بر تعداد "مکث‌ها / تردیدها" (hesitations) اثر داشت و با افزایش CCT تعداد مکث‌ها کاهش یافت. در مطالعه‌ای دیگر با عنوان " تأثیر دمای رنگ همبسته بر ادراک و ترجیح بازدیدکنندگان در نمایشگاه موزه واقعیت مجازی" که آن هم در واقعیت مجازی انجام شد و تأثیر دمای رنگ نور بر ادراک کاربر، ترجیح بصری، و متغیرهای فیزیولوژیک (مانند حرکت چشم و HRV[۳]) را ارزیابی کرد. نتایج حاکی از آن بودند که محدوده میانی CCT (مثلاً تقریباً 4500K) بیشترین امتیاز راحتی و ترجیح را به خود اختصاص داد و مقادیر بسیار گرم یا بسیار سرد باعث کاهش تمرکز و افزایش خستگی بصری و استرس شدند. در پژوهشی دیگر "ارزیابی تأثیر روشنایی و دمای رنگ همبسته بر پاسخ‌های عاطفی و ترجیح روشنایی با استفاده از واقعیت مجازی" تأثیر ترکیبی میزان روشنایی (Illuminance) و دمای رنگ نور بر پاسخ‌های عاطفی و ترجیح کاربر در محیط واقعیت مجازی بررسی شد. یافته‌ها نشان دادند که شرایط نوری با CCT و روشنایی مناسب می‌توانند احساس محیطی، ترجیح بصری و حتی عملکرد شناختی را بهبود دهند، و تأکید شده که بافت محیط و زمینه معماری نیز می‌تواند این اثرات را تعدیل کند. مطالعه دیگر در این حوزه"تجسم فضا در واقعیت مجازی: مقایسه‌ای بین محیط‌های مجازی و واقعی برای مسیریابی" می‌باشد که به بررسی تفاوتهای عملکرد مسیریابی در محیط‌های مجازی و واقعی پرداخت. نتایج نشان دادند که افراد مسن‌تر در محیط واقعیت مجازی با مشکلات بیشتری در انتقال از حالت مسیر (route) به نقشه (survey) مواجه بودند، و این به کاهش کارایی راهبری در محیط‌های پیچیده منجر شد. بدین ترتیب، واقعیت مجازی به‌عنوان بستری معتبر برای تحلیل راهبری پیشنهاد شد.

اما در پژوهش "تحلیل تابلوها با استفاده از فناوری ردیابی چشم " که با استفاده از فناوری رهگیری نگاه انجام شد، نحوه تأثیرگذاری تابلوها و نشانه‌های جهت‌یابی در فضاهای عمومی بررسی شد. نتایج نشان می‌دهند که نحوه قرارگیری و طراحی نشانه‌ها (signage) می‌تواند به‌طور چشم‌گیری بر مسیر تصمیم‌گیری و توجه کاربر اثر بگذارد، و در این میان، شرایط نوری و روشنایی نیز به‌عنوان عوامل محیطی مهم معرفی شدند. یک مطالعه میان‌رشته‌ای با عنوان "عناصر مؤثر بر راحتی بصری و ادراک ایمنی در واقعیت مجازی" این مطالعه از یک رویکرد میان‌رشته‌ای استفاده کرد و در محیط واقعیت مجازی با داده‌های EEG[۴]، تأثیر رنگ نور، گرافیک محیط و عناصر معماری را بر راحتی بصری و احساس ایمنی کاربران مورد بررسی قرار داد. یافته‌ها نشان دادند که دمای رنگ نور در بازه میانگین (مثلاً حدود 6250 K–4428) بهترین بازخورد را از نظر جهت‌یابی بصری و احساس ایمنی ارائه داده است.

۱. مبانی نظری

۱. ۱. نورپردازی و ادراک فضایی

نور به‌عنوان یکی از عناصر بنیادین در معماری، نقشی اساسی در ادراک فضا، تشخیص فرم، و تجربه محیطی کاربران دارد. نور نه‌تنها عامل روشنایی و دید است، بلکه به‌منزلهٔ ابزاری شناختی عمل می‌کند که بر درک ابعاد، عمق، و مسیرهای حرکتی در فضا تأثیرگذار است. کیفیت نور شامل شدت، جهت، رنگ، و توزیع فضایی آن است که هرکدام می‌توانند بر احساس راحتی، ایمنی و جذابیت محیط اثرگذار باشند. در مطالعات نورپردازی، یکی از شاخص‌های کلیدی دمای رنگ نور (CCT) است که با واحد کلوین (K) سنجیده می‌شود (صدری و افراسیابی، ۱۳۹۵).

۱. ۲. نورپردازی و فرایند مسیریابی در معماری

مسیریابی(Wayfinding) فرایندی است شناختی و رفتاری که فرد در طی آن، با دریافت نشانه‌های محیطی و پردازش آن‌ها در ذهن، مسیر حرکت خود را به‌سوی مقصد برنامه‌ریزی می‌کند. در محیط‌های پیچیده مانند مجتمع‌های تجاری، نشانه‌های بصری و نوری نقش مهمی در کاهش بار شناختی و افزایش اطمینان حرکتی دارند. نورپردازی می‌تواند با هدایت توجه، برجسته‌سازی مسیرها، و تعیین کانون‌های دیداری به‌عنوان یک عامل مسیریابی عمل کند. مطالعات تجربی در فضاهای فرودگاهی و بیمارستانی نشان داده‌اند که نور با دمای رنگ مناسب و شدت متعادل، زمان تصمیم‌گیری را کاهش داده و میزان خطای مسیریابی را کم می‌کند(Ryan & Hill, 2022).

DOI: 10.22034/rau.2026.2076659.1277

۱. ۳. اثر نور بر رفتار و رضایت ادراکی کاربران

از دیدگاه روان‌شناسی محیطی، نور می‌تواند پاسخ‌های شناختی، هیجانی و فیزیولوژیکی کاربران را تعدیل کند. تغییردر شدت یا رنگ نور، به‌طور مستقیم بر احساس راحتی بصری و رضایت کلی از محیط اثر می‌گذارد. در فضاهای تجاری، که تجربهٔ خرید و حرکت کاربران با انگیزش‌های متنوع همراه است، نورپردازی مطلوب می‌تواند ضمن افزایش وضوح مسیر، حس لذت و تمایل به ماندگاری را نیز تقویت کند. همچنین پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که رضایت از نورپردازی رابطهٔ مستقیمی با ادراک کیفیت محیط دارد (سیل سپور و نقصان محمدی و امیدواری، ۱۳۹۴؛ اسماعیلیان و آپرناک، ۱۴۰۲).

۱. ۴. رویکردهای تجربی در مطالعات نور و معماری

در دههٔ اخیر، استفاده از فناوری‌های شبیه‌سازی و واقعیت مجازی در مطالعات ادراک نوری رواج یافته است. این روش‌ها امکان کنترل دقیق متغیرهای نوری و مشاهدهٔ رفتار کاربران در محیط‌های شبه‌واقعی را فراهم می‌آورند. پژوهش‌هایی که از روش‌های آزمایشگاهی یا واقعیت مجازی بهره گرفته‌اند، نشان داده‌اند که تغییر در ویژگی‌های نورپردازی، به‌ویژه CCT و توزیع شدت نور، تأثیر قابل‌توجهی بر دقت تصمیم‌گیری و رضایت فضایی شرکت‌کنندگان دارد. این یافته‌ها مبنای نظری محکمی برای بررسی اثر نور در مسیرهای حرکتی مجتمع‌های تجاری فراهم می‌کنند. در مجموع، مرور ادبیات نظری نشان می‌دهد که نورپردازی به‌عنوان یک متغیر محیطی پیچیده، بر رفتار حرکتی، تصمیم‌گیری شناختی، و رضایت ادراکی کاربران اثرگذار است. پژوهش حاضر بر این مبنا طراحی‌شده تا با بررسی تجربی حالت‌ها مختلف نورپردازی در یک مسیر تجاری، سهم نور در بهبود عملکرد مسیریابی و ادراک کیفی فضا را تبیین نماید (بهشتی و همکاران، ۱۳۹۸).

۲. فرضیه‌های تحقیق

با توجه به مبانی نظری پژوهش و مطالعات پیشین در حوزه ادراک محیطی، نورپردازی معماری و مسیریابی فضایی، فرضیه‌های این تحقیق بر این اصل استوار است که دمای رنگ نور به‌عنوان یکی از متغیرهای کلیدی محیطی، می‌تواند بر فرایندهای شناختی، تصمیم‌گیری فضایی و رفتار حرکتی کاربران در محیط‌های معماری مجازی تأثیرگذار باشد. از آنجا که مسیریابی فرایندی وابسته به پردازش هم‌زمان اطلاعات بصری، توجه انتخابی و درک ساختار فضایی است، انتظار می‌رود تغییر در ویژگی‌های طیفی نور، به‌ویژه دمای رنگ همبسته (CCT)، بر عملکرد مسیریابی کاربران اثر معنادار بگذارد. بر این اساس، فرضیه نخست پژوهش بر وجود رابطه‌ای معنادار بین دمای رنگ نور و شاخص‌های عملکرد مسیریابی کاربران، شامل زمان پیمایش، تعداد خطاهای مسیریابی و الگوی تمرکز نگاه، تأکید دارد (حافظی، ۱۳۹۶).

در ادامه، با توجه به نقش نور در هدایت توجه بصری و افزایش خوانایی عناصر فضایی، فرض می‌شود که دمای رنگ نور می‌تواند میزان تمرکز بصری کاربران را در مسیرهای حرکتی تحت تأثیر قرار دهد. تمرکز نگاه و مدت تثبیت دیداری بر عناصر هدایت‌کننده فضایی، به‌عنوان شاخصی از بار شناختی و کیفیت پردازش اطلاعات محیطی، در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته است. بر این اساس، فرضیه دوم بیان می‌کند که میان دمای رنگ نور و میزان تمرکز بصری کاربران در محیط معماری مجازی رابطه‌ای معنادار وجود دارد و برخی بازه‌های دمای رنگ، شرایط مناسب‌تری برای تمرکز و جهت‌یابی بصری فراهم می‌کنند (اعظم مسعودی و همکاران، ۱۴۰۱؛ سمیه صدری و همکاران، ۱۳۹۷؛ محیا چشمه و همکاران، ۱۴۰۲).

از منظر تجربه ادراکی، احساس حضور یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی کیفیت محیط‌های واقعیت مجازی به شمار می‌رود که بازتاب‌دهنده میزان درگیری شناختی و ادراک واقع‌نمایانه کاربر از فضا است. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که شرایط نوری نامناسب می‌تواند باعث کاهش حس حضور و افزایش فاصله ادراکی کاربر از محیط شود. بر همین مبنا، فرضیه سوم این پژوهش بر آن استوار است که دمای رنگ نور تأثیر معناداری بر احساس حضور کاربران در محیط معماری مجازی دارد و تنظیم بهینه این متغیر می‌تواند تجربه فضایی را تقویت کند(سید موسی، ۱۳۸۴؛ فرشته و همکاران، ۱۳۸۶).

علاوه بر احساس حضور، یکی از چالش‌های مهم در استفاده از محیط‌های واقعیت مجازی، بروز علائم واقعیت مجازی(VR Sickness) است که می‌تواند عملکرد شناختی و رفتار حرکتی کاربران را مختل کند. از آنجا که تحریک بیش‌ازحد یا نامتعادل سیستم بینایی، به‌ویژه در نورهای بسیار سرد یا بسیار گرم، ممکن است موجب افزایش ناراحتی‌های ادراکی شود، فرضیه چهارم پژوهش بر این اساس شکل گرفته است که دمای

رنگ نور تأثیر معناداری بر میزان بروز علائم بیماری واقعیت مجازی کاربران دارد و برخی شرایط نوری نسبت به سایرین باعث کاهش این علائم می‌شوند.

در سطح مقایسه‌ای، با توجه به طراحی پژوهش در قالب شش سناریوی مختلف دمای رنگ نور، فرض بر آن است که عملکرد مسیریابی و تجربه ادراکی کاربران در تمامی این شرایط یکسان نیست. بنابراین، فرضیه پنجم پژوهش بیان می‌کند که بین شرایط مختلف دمای رنگ نور از نظر شاخص‌های عملکردی (زمان پیمایش، تعداد خطا، تمرکز نگاه) و شاخص‌های ادراکی (احساس حضور و بیماری واقعیت مجازی) تفاوت معنادار آماری وجود دارد و می‌توان یک بازه بهینه دمای رنگ را از نظر عملکرد و تجربه کاربر شناسایی کرد. درنهایت، با توجه به تفاوت‌های فردی کاربران، جنسیت به‌عنوان یک متغیر کنترلی در پژوهش در نظر گرفته شده است. بااین‌حال، بر اساس شواهد نظری و نتایج مطالعات مشابه، انتظار می‌رود که اثر دمای رنگ نور بر عملکرد مسیریابی و تجربه ادراکی کاربران مستقل از جنسیت باشد.(Suzer et al., 2018).

۳. ابزارهای تحقیق

در این پژوهش، روایی ابزارهای اندازه‌گیری شامل هدست واقعیت مجازی Meta Quest 2 و نرم‌افزار ردیابی نگاه Gaze Recorder به منظور اطمینان از دقت سنجش شاخص‌های بصری و رفتاری کاربران مورد ارزیابی قرار گرفت. برای بررسی روایی هدست Meta Quest 2، محیط سه‌بعدی شبیه‌سازی‌شده در چند مرحله از نظر کیفیت نمایش فضا، وضوح عناصر معماری، نمایش صحیح شدت روشنایی و بازتولید دقیق دمای رنگ نور (CCT) بررسی شد و نتایج نشان داد که این ابزار از نظر بازنمایی بصری و نمایش دقیق محرک‌های نوری و فضایی، از روایی صوری و محتوایی مناسب برخوردار است. همچنین برای اطمینان از روایی نرم‌افزار Gaze Recorder، یکبار آزمایش پایلوت با تعداد محدودی (۵ نفر) از کاربران انجام شد تا دقت ثبت شاخص‌های دیداری شامل مدت تثبیت نگاه، تعداد تمرکز نگاه، مسیر حرکت چشم و پیوستگی دیداری ارزیابی شود. نتایج اولیه نشان داد که نرم‌افزار با خطای بسیار پایین قادر به ثبت پایدار داده‌هاست. علاوه‌بر این، روایی محتوایی نرم‌افزار (مطابق با پیشینه پژوهش‌های قبلی) بررسی و تأیید شد که خروجی‌های نرم‌افزار با شاخص‌های مورد نیاز پژوهش برای تحلیل تمرکز بصری، ادراک مسیر و رفتار مسیریابی کاملاً سازگار است. در مجموع، نتایج ارزیابی‌ها نشان داد که ابزارهای مورد استفاده از روایی لازم برای سنجش دقیق رفتار دیداری و ادراکی کاربران در محیط واقعیت مجازی برخوردار هستند.

پایلوت آزمون (Pilot Testing)

به منظور اطمینان از کارایی ابزارهای پژوهش و رفع اشکالات احتمالی پیش از اجرای اصلی، یک پایلوت آزمون (Pilot Study) با مشارکت ۵ نفر از جامعه مشابه نمونه اصلی (۵ خانم دانشجو در بازهٔ سنی ۲۲-۲۸ سال) انجام شد. هدف از این مرحله، ارزیابی وضوح پرسش‌ها، زمان لازم برای تکمیل پرسشنامه، راحتی کار با محیط واقعیت مجازی و جلوگیری از بروز خطاهای احتمالی در زمان اجرای اصلی (حدود ۳۰ دقیقه برای هر فرد) بود. در این مرحله، شرکت‌کنندگان پس از تکمیل پرسشنامه، بازخوردهای خود را درخصوص ابهام‌های مفهومی، دشواری پاسخ‌دادن، تکراری بودن سؤال‌ها و تناسب آن‌ها با سناریوهای نوری ارائه کردند. نتایج پایلوت نشان داد که برخی اصطلاحات پرسشنامه نیازمند ساده‌سازی و برخی پرسش‌ها نیازمند بازنویسی و دارای ابهام هستند. پس از اعمال تغییرات و اصلاح ساختار، نسخه نهایی پرسشنامه آماده اجرای اصلی شد. برای ارزیابی روایی صوری و محتوایی پرسشنامه‌ها، نسخه اولیه با بررسی کامل پژوهشگر متخصص حوزه معماری، نورپردازی و روان‌شناسی محیطی نوشته شد و میزان شفافیت، فهم‌پذیری، تناسب ظاهری و ارتباط سؤال‌ها با متغیرهای

جدول ۱. سؤال‌های پرسشنامه استاندارد سنجش کیفیت مسیریابی و ادراک فضایی در محیط واقعیت مجازی

ردیف	مولفه مورد سنجش	سوال
۱	احساس حضور (کیفیت ادراک فضایی)	احساس می‌کردم واقعاً در فضای مجتمع حضور دارم.
۲		طراحی محیط آن‌قدر واقعی بود که حضور فیزیکی در یک مجتمع تجاری را حس می‌کردم.
۳	بیماری واقعیت مجازی (کیفیت مسیریابی مؤثر از مؤلفه کالبدی معماری)	در تمرکز روی جزئیات محیط دچار مشکل شدم.
۴		
۵		احساس سرگیجه و سردرد هنگام حرکت در محیط داشتم.
۶		دچار افزایش ضربان قلب یا تعریق شدم.
۷		احساس تهوع داشتم.

DOI: 10.22034/rau.2026.2076659.1277

جدول ۲.سوال‌های پرسشنامه بر اساس متغیر مؤلفه کالبدی معماری (دمای رنگ نور) و تأثیر آن بر ادراک فضایی و مسیریابی (این پرسشنامه برای هر ۶ حالت جداگانه تکرار شده است).

ردیف	متغیر	سوال متناسب برای سنجش
۱	دمای رنگ نور (CCT)	رنگ نورپردازی به درک بهتر مسیرها مجتمع تجاری کمک کرد.
۲		به راحتی می‌توانستم موقعیت خود را تشخیص دهم، زیرا نور و روشنایی مسیرها مناسب بود.
۳		احساس می‌کردم در هر لحظه می‌دانم به کدام سمت باید حرکت کنم و رنگ نورپردازی مسیرها این حس را تقویت می‌کرد.
۴		نورپردازی مجتمع منسجم بود و سردرگمی مرا کاهش داد.
۵		نورپردازی موانع و پیچیدگی‌های فضایی را مشخص می‌کرد.
۶		رنگ روشنایی بر تصمیم من برای انتخاب مسیر تأثیر داشت و مسیرها را قابل تشخیص‌تر می‌کرد.
۷		شدت نور عاملی بر اساس گیجی یا سردرگمی در من شد.
۸		نوع رنگ نورپردازی و روشنایی باعث شد در فضا احساس تمرکز و جهت‌یابی بهتری داشته باشم.
۹		در پایان مسیر احساس کردم نورپردازی به تجربه شناخت فضا و مسیریابی من کمک کرد.

پژوهش (مسیریابی، تمرکز بصری، برداشت ادراکی، و بار شناختی) ارزیابی شد. بررسی‌های اولیه نشان داد که بیشتر گویه‌ها از نظر بیان ظاهری و سادگی مفهوم، مناسب هستند. بااین‌حال چند مورد از گویه‌ها به دلیل نارسایی در بیان دقیق مفاهیم یا ارتباط ضعیف با محتوای ادراکی بازنویسی شد. اصلاحات انجام‌شده شامل کوتاه‌سازی برخی گویه‌ها، حذف دو مورد سؤال غیرضروری و افزایش دقت در توصیف معنای اصطلاحات مرتبط با نورپردازی بود. درنهایت، همانگونه که در «جدول ۱» قابل مشاهده است، این نمونه پرسشنامه برای انجام آزمایش بازنویسی شد. مطابق «جدول ۲»، پرسش‌هایی به منظور سنجش ادراک کاربران از اثرات دمای رنگ نور بر فرایند مسیریابی طراحی شده‌اند. تمرکز این پرسش‌ها بر مولفه‌هایی همچون خوانایی مسیرها، تشخیص موقعیت، انسجام روشنایی، تأثیر رنگ نور بر تصمیم‌گیری حرکتی و کاهش احساس سردرگمی فضایی است. این پرسش‌ها به‌عنوان ابزار سنجش ادراکی، در کنار شاخص‌های عینی عملکردی (زمان تصمیم‌گیری، خطای مسیریابی و الگوهای رهگیری چشم) به کار گرفته شدند تا درک جامعی از ارتباط میان شرایط نوری و بار شناختی کاربران فراهم شود.

در این پژوهش، حجم نمونه (تعداد افراد تعیین‌شده برای جمع‌آوری داده) با توجه به فرمول‌های توان آماری (Power Analysis) و با در نظر گرفتن سطح معناداری(a) ۰/۰۵ و توان(1-ß) ۰/۸، بر اساس رویه‌های پذیرفته‌شده در تحقیقات علمی و استانداردهای پژوهش‌های علوم رفتاری، روانشناسی محیطی و معماری در نهایت به تعداد تقریبی ۳۲ نفر در نظر گرفته شد. این تعداد لازم برای مشاهدهٔ یک اثر متوسط (d=0.5) در طراحی داخل نمونه محاسبه شد.

$$n = ((Z_{1-a/2} + Z_{1-\beta})^2) / d^2$$

سطح معناداری:

$$a = 0.05 \rightarrow Z_{1-a/2} = 1.96$$

توان آزمون:

$$1- \beta = 0.80 \rightarrow Z_{1-\beta} = 0.842$$

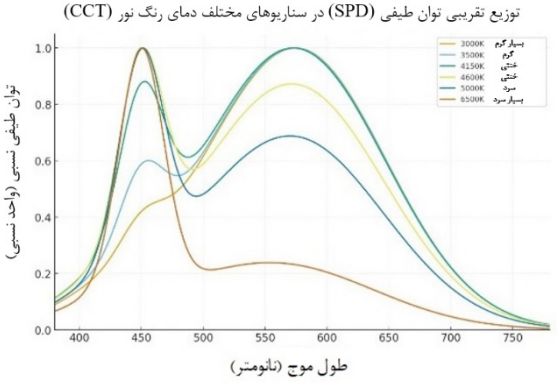
اندازه اثر متوسط:

$$d = 0.5$$

$$n = ((1.96 + 0.842)^2) / (0.5)^2 = (2.802)^2 / 0.25 = 7.85 / 0.25 = 31.4 \approx 32 \text{ نفر}$$

۴.نحوه تعیین حالت‌های مختلف دمای رنگ نور[۵]

دمای رنگ نور یکی از شاخص‌های بنیادین در ارزیابی ویژگی‌های بصری نور است که با واحد کلوین (K) بیان می‌شود و ارتباط مستقیمی با درک روانی و احساسی انسان از فضا دارد. به‌طور کلی، دماهای پایین‌تر(حدود ۲۷۰۰ تا ۳۵۰۰ کلوین) به‌عنوان نور گرم شناخته می‌شوند و دارای ته‌رنگهای زرد تا نارنجی هستند، در حالی‌که دماهای بالاتر (۵۰۰۰ تا ۶۵۰۰ کلوین) به‌عنوان نور سرد شناخته شده و دارای ته‌رنگهای سفید مایل به آبی‌اند. این تقسیم‌بندی از نظر فیزیولوژیکی و ادراکی



تصویر ۱. درجه‌بندی دمای رنگ نور بر اساس منحنی اسپکتروم (SPD)

نیز اهمیت دارد، زیرا دمای رنگ بر خلق‌وخو، هوشیاری، تمرکز و حتی جهت‌گیری فضایی تأثیرگذار است. در اغلب مطالعات روانشناسی محیطی و نورپردازی معماری، دماهای رنگی به سه بازهٔ اصلی تقسیم می‌شوند:

۱. نور گرم: 2700–3500 K، ۲. نور خنثی یا طبیعی: 4000–5000 K، ۳. نور سرد: 5500–6500 K تصویر ۱ درجه‌بندی دمای رنگ نور و ارتباط آن را با طیف پخش نور نشان می‌دهد.

با این حال، تحقیقات اخیر به‌ویژه در محیط‌های مجازی و فضاهای پیچیده مانند فرودگاه‌ها یا مجتمع‌های تجاری، پیشنهاد می‌کنند که بازه‌های میانی و دقیق‌تر نیز باید مورد توجه قرار گیرند تا بتوان اثرات تدریجی تغییر (دمای رنگ نور) CCT بر عملکرد شناختی و رفتاری افراد را تحلیل کرد. برای بررسی اثر دمای رنگ نور بر عملکرد مسیریابی کاربران، تصمیم گرفتیم شش سطح مختلف دمای رنگ نور را در محیط شبیه‌سازی شده طراحی کنیم. انتخاب این شش حالت به ما اجازه داد تا بازه کاملی از نور گرم تا نور سرد را پوشش دهیم و اثرات جزئی تغییر دما بر ادراک بصری و تصمیم‌گیری فضایی کاربران را به دقت ارزیابی کنیم. هر سطح نوری نمایندهٔ یک طیف خاص از احساس گرمی یا سردی نور بود و امکان بررسی دقیق‌تر روند تغییر رفتار کاربران را فراهم می‌کرد. با استفاده از این شش سطح، هدف اصلی ما شناسایی دمای رنگ مقبول و بهینه برای بهبود عملکرد مسیریابی بود. این رویکرد امکان مقایسه آماری بین سطوح مختلف را فراهم می‌کند و به ما کمک می‌کند تا روشنایی‌ای را پیشنهاد دهیم که هم رضایت بصری کاربران را افزایش دهد و هم خطای تصمیم‌گیری و سردرگمی حرکتی را کاهش دهد. درنتیجه، طراحی چند سطحی نور به ما این امکان را داد که با دقت علمی بیشتری دمای رنگ ایده‌آل برای محیط‌های تجاری را تعیین کنیم.(Choi, 2020; Hao et al., 2022; Luo, 2023; Mostafavi, 2023; Namrouti et al., 2025; Shahidi, 2021; Yang & Jeon, 2020).

به منظور طراحی سناریوهای نوری پژوهش، حالات مختلف دمای رنگ نور بر اساس مبانی نظری نورپردازی معماری، طبقه‌بندی‌های استاندارد CCT و یافته‌های مطالعات پیشین تعیین شدند. دمای رنگ نور به‌عنوان متغیری پیوسته در نظر گرفته شد که طیفی از نورهای بسیار گرم تا بسیار سرد را در بر می‌گیرد. بر این اساس، بازه‌ای از ۲۰۰۰ تا حدود ۹۰۰۰ کلوین انتخاب شد تا تمامی حالات ادراکی محتمل در فرایند مسیریابی پوشش داده شود.

برای تحلیل دقیق‌تر اثرات تدریجی تغییر دمای رنگ نور بر رفتار کاربران، این بازه به شش سطح مجزا تقسیم شد. این سطوح شامل دو حالت نور گرم (بسیار گرم و گرم)، دو حالت نور خنثی، و دو حالت نور سرد (سرد و بسیار سرد) هستند. انتخاب این تقسیم‌بندی امکان بررسی تفاوت‌های رفتاری و ادراکی کاربران را نه‌تنها بین دسته‌های اصلی نور، بلکه در بازه‌های میانی نیز فراهم می‌کند و به شناسایی نقطه بهینه دمای رنگ نور در مسیریابی فضایی کمک می‌نماید.

در تمامی سناریوها، سایر متغیرهای محیطی ثابت نگه داشته شد و تنها دمای رنگ نور تغییر یافت تا اثر خالص این متغیر بر عملکرد مسیریابی، تمرکز بصری و تجربه ادراکی کاربران قابل مقایسه باشد. تصویر زیر، حالات شش‌گانه دمای رنگ نور به‌کاررفته در آزمایش را نشان می‌دهد. تصویر ۲ حالت‌های مختلف آزمون را نشان می‌دهد.

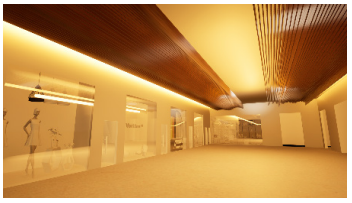
۵. نتایج تحلیل‌های آزمون‌های آماری بهره‌گیری‌شده برای سنجش فرضیه‌ها

به منظور آزمون فرضیه‌های پژوهش و بررسی تأثیر دمای رنگ نور بر شاخص‌های عملکردی و ادراکی کاربران در محیط معماری مجازی، از مجموعه‌ای از آزمون‌های آماری پارامتریک و ناپارامتریک استفاده شد. انتخاب آزمون‌ها بر اساس نوع متغیرها، سطح اندازه‌گیری داده‌ها و توزیع آماری آن‌ها انجام گرفت.

فرضیه اول: بین دمای رنگ نور و عملکرد مسیریابی کاربران رابطه معناداری وجود دارد.

برای آزمون این فرضیه، از آنجا که متغیرهای عملکردی شامل زمان پیمایش، تعداد خطا و مدت و تعداد تمرکز نگاه دارای ماهیت کمی و پیوسته بودند و شرایط نرمال بودن داده‌ها برقرار بود، از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. نتایج این آزمون در جدول ۳ ارائه شده است. ضرایب همبستگی به‌دست‌آمده نشان داد که بین دمای رنگ نور و شاخص‌های عملکردی روابط قوی و معنادار آماری ($p < 0.05$) وجود دارد؛ بر این اساس، فرضیه اول پژوهش تأیید می‌شود.

DOI: 10.22034/rau.2026.2076659.1277



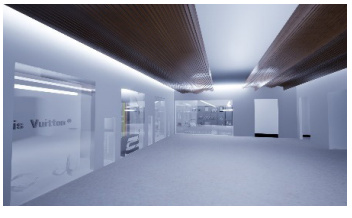
حالت۱- بسیار گرم (Very Warm Light-2000 K)

حالت۲- گرم (Warm Light-3000 K)

حالت۳-خنثی (Neutral -4000 K)

حالت۴-خنثی (Neutral -5000 K)

حالت۵-سرد (Cool Light-6500 K)



حالت۶-بسیار سرد (Very Cool Light- 8000-9000 K)

تصویر۲. حالات مختلف آزمون در دمای رنگ نورهای متفاوت.

جدول ۳. ضرایب همبستگی پیرسون بین دمای رنگ نور و متغیرهای پارامتریک.

تفسیر نتایج آزمون	شدت رابطه	Sig. (p-value)	r (Pearson)	متغیر وابسته
افزایش دمای رنگ تا بازه خنثی با کاهش معنادار زمان مسیریابی همراه است.	قوی	۰٫۰۰۳	۰٫۶۲-	زمان پیمایش
کاهش خطا با نزدیک‌شدن به نور ۴۰۰۰ کلوین	متوسط	۰٫۰۰۶	۰٫۵۸-	تعداد خطا
افزایش تمرکز بصری در نور ۴۰۰۰ کلوین	قوی	۰٫۰۰۲	۰٫۶۵+	مدت تمرکز نگاه
افزایش احساس حضور در نور۴۰۰۰ کلوین	قوی	۰٫۰۰۴	۰٫۶۰+	احساس حضور
کاهش معنادار بیماری واقعیت مجازی در نور ۴۰۰۰ کلوین	قوی	۰٫۰۰۲	۰٫۶۳-	بیماری واقعیت مجازی
توضیح: «احساس حضور» و «VR Sickness» به صورت نمره میانگین تبدیل شده و تقریباً پیوسته‌اند، بنابراین پیرسون برای بررسی خطی استفاده شده است.				

فرضیه دوم: بین دمای رنگ نور و احساس حضور کاربران در محیط مجازی رابطه معناداری وجود دارد.

با توجه به اینکه داده‌های مربوط به احساس حضور دارای ماهیت رتبه‌ای بوده و توزیع نرمال را به‌طور کامل برآورده نمی‌کردند، برای آزمون این فرضیه از ضریب همبستگی اسپیرمن استفاده شد. نتایج آزمون اسپیرمن که در جدول۴ ارائه شده است، وجود رابطه‌ای معنادار و یکنواخت بین دمای رنگ نور و احساس حضور را نشان می‌دهد ($p < 0.05$)؛ بنابراین، فرضیه دوم نیز مورد تأیید قرار گرفت.

جدول ۴. ضرایب همبستگی اسپیرمن بین دمای رنگ نور و متغیرهای غیرپارامتریک.

تفسیر نتایج آزمون	شدت رابطه	Sig. (p-value)	P (Spearman)	متغیر وابسته
رابطه یکنواخت و معنادار بین نور ۴۰۰۰ کلوین و افزایش حضور	قوی	0.001	+0.72	احساس حضور
کاهش یکنواخت نشانه‌های بیماری در دمای رنگ نور ۴۰۰۰ کلوین	قوی	0.001	-0.75	بیماری واقعیت مجازی
تفاوت معنادار اما ثانویه بین گروه‌های جنسیتی	متوسط	0.018	+0.41	جنسیت * احساس حضور
حساسیت متفاوت جنسیتی به ناراحتی بصری	متوسط	0.024	-0.38	جنسیت * بیماری واقعیت مجازی

جنسیت متغیر کنترل توصیفی بوده است و تحلیل استنباطی اصلی روی آن انجام نگرفته است.

فرضیه سوم: دمای رنگ نور بر میزان بیماری واقعیت مجازی کاربران تأثیر معنادار دارد.

به منظور آزمون این فرضیه، از ضریب همبستگی اسپیرمن استفاده شد؛ زیرا متغیر بیماری واقعیت مجازی مبتنی بر پرسشنامه بوده و ماهیت غیرپارامتریک دارد. نتایج این آزمون در جدول ۴ نشان داد که بین دمای رنگ نور و بیماری واقعیت مجازی رابطه‌ای معنادار و معکوس وجود دارد ($p < 0.05$)، به‌گونه‌ای که در دمای رنگ نور ۴۰۰۰ کلوین، نشانه‌های بیماری واقعیت مجازی کاهش یافته‌اند. بر این اساس، فرضیه سوم تأیید می‌شود.

فرضیه چهارم: بین شرایط مختلف دمای رنگ نور از نظر عملکرد مسیریابی و تجربه ادراکی کاربران تفاوت معنادار وجود دارد.

برای مقایسه هم‌زمان شاخص‌های عملکردی و ادراکی در شش حالت مختلف دمای رنگ نور، از آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه (One-Way ANOVA) استفاده شد. نتایج این آزمون که در جدول ۵ ارائه شده است، نشان داد که تفاوت معناداری بین شرایط نوری مختلف از نظر زمان پیمایش، تعداد خطا، تمرکز نگاه، احساس حضور و بیماری واقعیت مجازی وجود دارد ($p < 0.05$). نتایج این آزمون نشان داد دمای رنگ ۴۰۰۰ کلوین به‌طور معناداری عملکرد بهتری نسبت به سایر شرایط نوری دارد.

فرضیه پنجم: جنسیت کاربران بر عملکرد و تجربه ادراکی آن‌ها تأثیر معناداری ندارد.

برای بررسی نقش جنسیت، از آزمون همبستگی اسپیرمن استفاده شد. نتایج نشان داد که اگرچه در برخی شاخص‌ها تفاوت‌های معنادار مشاهده شد ($p < 0.05$)، اما اثر دمای رنگ نور نسبت به جنسیت قوی‌تر و غالب‌تر است. بنابراین، جنسیت به‌عنوان یک متغیر کنترلی در نظر گرفته شد.

جمع‌بندی فرضیه‌ها

به‌طور کلی، برای سنجش فرضیه‌های پژوهش از ترکیب آزمون‌های زیر استفاده شد: ضریب همبستگی پیرسون برای متغیرهای پارامتریک و پیوسته و ضریب همبستگی اسپیرمن برای متغیرهای غیرپارامتریک و رتبه‌ای و آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه (One-Way ANOVA) برای مقایسه عملکرد و تجربه کاربران در شش شرایط مختلف دمای رنگ نور. نتایج تمامی آزمون‌ها نشان داد

جدول ۵. نتایج آزمون تحلیل واریانس یکطرفه (One-Way ANOVA) برای مقایسه شاخص‌های عملکردی و ادراکی در دماهای رنگ مختلف نور.

متغیر وابسته	منبع تغییرات	مجموع مربعات (SS)	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات (MS)	مقدار F	Sig. (p-value)
زمان پیمایش	بین گروه‌ها	1240.36	5	248.07	6.42	0.001
	درون گروه‌ها	1850.22	114	16.23		
	کل	3090.58	119			
تعداد خطا	بین گروه‌ها	92.48	5	18.50	5.17	0.002
	درون گروه‌ها	407.60	114	3.57		
	کل	500.08	119			
تمرکز نگاه	بین گروه‌ها	2150.75	5	430.15	7.84	0.001>
	درون گروه‌ها	6250.40	114	54.83		
	کل	8401.15	119			
احساس حضور	بین گروه‌ها	18.92	5	3.78	4.96	0.001
	درون گروه‌ها	86.92	114	0.76		
	کل	105.84	119			
بیماری واقعیت مجازی	بین گروه‌ها	145.30	5	29.06	6.11	0.001
	درون گروه‌ها	542.10	114	4.75		
	کل	687.40	119			

جدول ۶. میانگین و انحراف معیار شاخص‌های عملکردی و ادراکی در شش دمای رنگ نور.

دمای رنگ نور (K)	زمان پیمایش (ثانیه)	تعداد خطا	مدت تمرکز نگاه (ثانیه)	احساس حضور	بیماری واقعیت مجازی
۲۰۰۰	۶٫۴±۵۵٫۲	۱٫۲±۴٫۶	۴٫۸±۲۶٫۱	۰٫۶±۳٫۱	۱٫۳±۶٫۴
۳۰۰۰	۵٫۹±۴۹٫۸	۱٫۰±۳٫۸	۵٫۱±۲۹٫۴	۰٫۵±۳٫۶	۱٫۱±۵٫۲
۴۰۰۰	۵٫۱±۴۲٫۳	۰٫۹±۲٫۱	۵٫۴±۳۵٫۷	۰٫۴±۴٫۴	۰٫۹±۳٫۱
۵۰۰۰	۵٫۶±۴۶٫۹	۱٫۰±۳٫۰	۵٫۰±۳۲٫۲	۰٫۵±۴٫۰	۱٫۰±۴٫۲
۶۵۰۰	۶٫۱±۵۲٫۱	۱٫۳±۴٫۲	۴٫۹±۲۷٫۸	۰٫۶±۳٫۴	۱٫۲±۵٫۸
۸۵۰۰	۶٫۸±۵۶٫۷	۱٫۴±۴٫۹	۴٫۶±۲۴٫۵	۰٫۷±۳٫۰	۱٫۴±۶٫۷

که دمای رنگ نور تأثیر معنادار آماری ($p < 0.05$) بر عملکرد مسیریابی، احساس حضور و بیماری واقعیت مجازی دارد و دمای رنگ ۴۰۰۰ کلوین به‌عنوان نقطه بهینه عملکردی شناسایی شد.

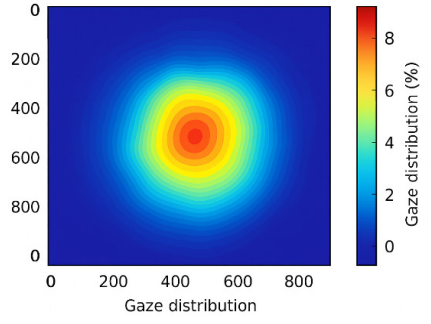
۶. بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش به روش تلفیقی (کمی-کیفی) با تکیه بر تحلیل تطبیقی نقشه‌های حرارتی و آزمون‌های آماری پرسشنامه‌ها

DOI: 10.22034/rau.2026.2076659.1277

به بررسی تأثیر ویژگی‌های محیطی، به‌ویژه دماهای رنگ نور، بر رفتار، تصمیم‌گیری و تجربه کاربران پرداخت (نحوه انجام پژوهش مطابق شکل ۲). بر اساس نتایج آزمون‌های آماری پرسشنامه‌ها و مطابق شکل‌های ۵ تا ۱۰، تحلیل داده‌های رهگیری چشم (Eye-Tracking) نشان می‌دهد که ویژگی‌های محیطی، به‌ویژه دمای رنگ نور، تأثیر معناداری بر رفتار، تصمیم‌گیری و تجربه فضایی کاربران در فرایند مسیریابی (Wayfinding) دارند. تحلیل نقشه‌های حرارتی (Heat maps) استخراج‌شده از داده‌های رهگیری چشم کاربران مطابق با نقشه حرارتی توزیع نگاه (شکل ۳)، تفاوت‌های قابل‌توجهی را در الگوهای توجه بصری و تمرکز ادراکی تحت شرایط مختلف دمای رنگ نور نشان می‌دهد.

بررسی تطبیقی نقشه‌های حرارتی بیانگر آن است که دمای رنگ ۴۰۰۰ کلوین، در مقایسه با سایر شرایط نوری، منجر به شکل‌گیری الگوهای توجه بصری منسجم‌تر و هدفمندتر شده است. در این شرایط نوری، بیشترین تراکم نقاط تثبیت نگاه (Fixations) بر روی عناصر کلیدی راه‌یابی، از جمله تقاطع‌ها، نشانه‌های فضایی (Spatial Landmarks) و محورهای حرکتی اصلی مشاهده می‌شود (شکل ۷). این تمرکز بالا همراه با کاهش پراکندگی نقاط توجه، نشان‌دهنده افزایش خوانایی فضایی (Spatial Legibility) و تسهیل فرایند پردازش شناختی (Cognitive Processing) کاربران در تشخیص مسیرهای حرکتی است.

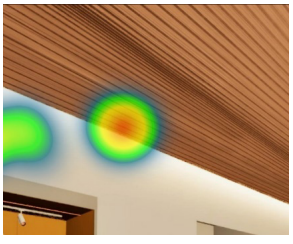


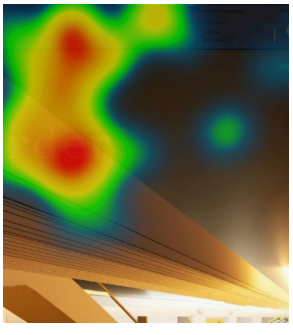
تصویر۳. نقشه حرارتی توزیع نگاه.

تصویر۴. یک کاربر در حال انجام آزمایش ردیاب چشم.

در مقابل، در دماهای رنگ پایین‌تر (نورهای گرم‌تر) تصاویر ۵ و ۶، اگرچه در برخی نواحی تمرکز بصری افزایش یافته است، اما کاهش کنتراست ادراکی (Perceptual Contrast) و غلبه کیفیت احساسی فضا، در برخی موارد به تضعیف وضوح سلسله‌مراتب فضایی منجر شده است (شکل ۵). از سوی دیگر، در دماهای رنگ بالاتر (نورهای سردتر) تصاویر ۹ و ۱۰، نقشه‌های حرارتی پراکندگی بیشتری از نقاط تثبیت نگاه را نشان می‌دهند که می‌تواند بیانگر افزایش جست‌وجوی بصری (Visual Search)، تردید در تصمیم‌گیری و افزایش بار شناختی (Cognitive Load)

تصویر۵. نقشه حرارتی تمرکز نگاه در نورپردازی بسیار گرم (Very Warm Light-2000 K).

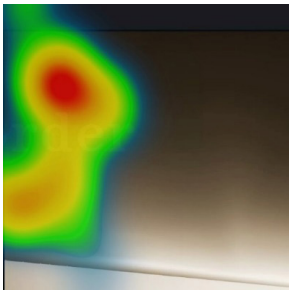

تصویر۶. نقشه حرارتی تمرکز نگاه در نورپردازی گرم (Warm Light-3000 K).


تصویر۷. نقشه حرارتی تمرکز نگاه در نورپردازی خنثی (Neutral 4000 K-).

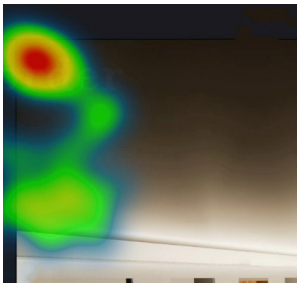
در فرایند مسیریابی (Wayfinding) باشد. یافته‌های این پژوهش بر اهمیت انتخاب آگاهانه دمای رنگ نور در طراحی نورپردازی معماری تأکید می‌کند، به‌ویژه در فضاهای تجاری و محیط‌های شبیه‌سازی‌شده مجازی (مطابق با شکل ۱۱) که فرایند تصمیم‌گیری فضایی به‌شدت وابسته به نشانه‌های دیداری است.

هدف اصلی این پژوهش بررسی تأثیر دمای رنگ نور بر عملکرد مسیریابی و تجربه ادراکی کاربران در محیط‌های معماری مجازی بود. نتایج حاصل از آزمون‌های همبستگی پیرسون و اسپیرمن، در کنار تحلیل واریانس نشان داد که دمای رنگ نور نقشی تعیین‌کننده در بهینه‌سازی هم‌زمان شاخص‌های عملکردی و ادراکی کاربران ایفا می‌کند. نتایج آزمون همبستگی پیرسون برای داده‌های پارامتریک نشان داد که دمای رنگ نور با شاخص‌هایی نظیر زمان پیمایش، تعداد خطا و مدت تمرکز نگاه رابطه‌ای قوی و معنادار دارد ($p < 0.05$). این یافته‌ها بیانگر آن است که تنظیمات نوری مناسب می‌تواند بار شناختی کاربران را کاهش داده و موجب تسهیل تصمیم‌گیری فضایی شود. کاهش زمان پیمایش و خطا در شرایط نوری بهینه نشان می‌دهد که نور نه‌تنها یک عامل زیبایی‌شناختی، بلکه عنصری عملکردی در طراحی محیط‌های معماری مجازی است.

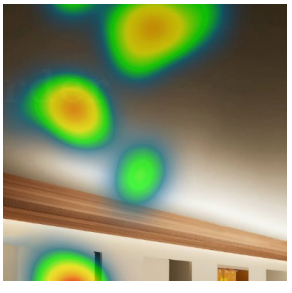
از سوی دیگر، نتایج آزمون اسپیرمن برای داده‌های غیرپارامتریک نشان داد که بین دمای رنگ نور و متغیرهای ادراکی شامل احساس حضور و بیماری واقعیت مجازی روابط یکنواخت و معناداری وجود دارد ($p < 0.05$). شدت ضرایب اسپیرمن نسبت به پیرسون بالاتر بود که این موضوع نشان‌دهنده ماهیت غیرخطی این روابط است. به‌عبارت دیگر، اثر دمای رنگ نور بر تجربه کاربر به‌صورت تدریجی و خطی افزایش یا کاهش نمی‌یابد، بلکه دارای یک بازه بهینه عملکردی است. در این میان، نور خنثی با دمای رنگ ۴۰۰۰ کلوین به‌طور معناداری بهترین عملکرد را در تمامی شاخص‌ها نشان داد. در این شرایط نوری، کاربران سریع‌تر مسیرها را شناسایی کردند، خطاهای کمتری داشتند، تمرکز نگاه بالاتری نشان دادند و در عین حال، احساس حضور بیشتری را همراه با کاهش نشانه‌های بیماری واقعیت مجازی تجربه کردند.



تصویر۸.نقشه حرارتی تمرکز نگاه در نورپردازی خنثی(Neutral -5000 K).



تصویر۹.نقشه حرارتی تمرکز نگاه در نورپردازی سرد (Cool Light-6500 K).



تصویر۱۰. نقشه حرارتی تمرکز نگاه در نورپردازی خیلی سرد (Very Cool Light- 8000-9000 K).

تصویر۱۱. نمونه فضای طراحی‌شده برای آزمون واقعیت مجازی.

DOI: 10.22034/rau.2026.2076659.1277

در مقابل، نورهای بسیار گرم و بسیار سرد با افت عملکرد شناختی و افزایش ناراحتی کاربران همراه بودند. نورهای گرم موجب کاهش وضوح بصری و کندی پردازش فضایی شدند، در حالی که نورهای سرد با تحریک بیش‌ازحد سیستم بینایی، افزایش خستگی و تشدید نشانه‌های بیماری واقعیت مجازی را به دنبال داشتند. این نتایج نشان می‌دهد که افراط (دمای نامتعادل) در هر دو سوی طیف دمای رنگ می‌تواند تجربه کاربر را تضعیف کند. بررسی نقش جنسیت نیز نشان داد که اگرچه تفاوت‌های معناداری در برخی شاخص‌های ادراکی بین گروه‌های جنسیتی مشاهده شد ($p < 0.05$)، اما اثر دمای رنگ نور در مقایسه با جنسیت قوی‌تر و غالب‌تر بود. این یافته بیانگر آن است که تنظیم صحیح نورپردازی می‌تواند به‌عنوان یک عامل فراگیر، تجربه کاربران با ویژگی‌های فردی متفاوت را بهبود بخشد. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش تأکید می‌کند که استفاده صرف از مدل‌های همبستگی خطی برای تحلیل تأثیر نور کافی نیست و به‌کارگیری ترکیبی از آزمون‌های پارامتریک، ناپارامتریک برای آشکارسازی الگوی «نقطه بهینه» ضروری است.

نتایج این پژوهش نشان داد که دمای رنگ نور تأثیر معناداری ($p < 0.05$) بر عملکرد مسیریابی، احساس حضور و میزان بیماری واقعیت مجازی در محیط‌های معماری مجازی دارد. یافته‌ها حاکی از آن است که رابطه بین دمای رنگ نور و تجربه کاربر ماهیتی غیرخطی داشته و از الگوی «نقطه بهینه» پیروی می‌کند. بر اساس تحلیل‌های آماری انجام‌شده، نور خنثی با دمای رنگ ۴۰۰۰ کلوین به‌عنوان مناسب‌ترین شرایط نوری شناسایی شد؛ شرایطی که در آن، کاربران بهترین عملکرد شناختی را از نظر سرعت و دقت مسیریابی نشان داده و در عین حال، تجربه ادراکی مطلوب‌تری شامل افزایش احساس حضور و کاهش نشانه‌های بیماری واقعیت مجازی داشته‌اند. این هم‌زمانی بهینه‌سازی عملکرد و تجربه، اهمیت انتخاب دقیق دمای رنگ نور در طراحی محیط‌های واقعیت مجازی معماری را برجسته می‌کند.

از منظر کاربردی، نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای طراحی نورپردازی انسان‌محور در شبیه‌سازی‌های معماری، آموزش طراحی، و ارزیابی پیش از ساخت فضاهای پیچیده مورد استفاده قرار گیرد. انتخاب دمای رنگ مناسب نه‌تنها موجب ارتقای کیفیت تجربه کاربر می‌شود، بلکه می‌تواند کارایی شناختی و ایمنی تصمیم‌گیری فضایی را نیز بهبود بخشد. درنهایت، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، اثر دمای رنگ نور در تعامل با سایر متغیرهای محیطی مانند شدت روشنایی، توزیع نور، رنگ سطوح و ویژگی‌های فردی کاربران در مقیاس‌های زمانی و جمعیتی متنوع‌تر بررسی شود تا چارچوب‌های جامع‌تری برای طراحی نور در محیط‌های معماری واقعی و مجازی ارائه گردد.

با وجود تلاش برای طراحی دقیق مراحل پژوهش، این مطالعه با برخی محدودیت‌ها همراه بود که باید در تفسیر نتایج مورد توجه قرار گیرد. از جمله مهم‌ترین محدودیت‌ها، می‌توان به حجم نمونه نسبتاً محدود و انتخاب شرکت‌کنندگان از یک بازه سنی مشخص اشاره کرد که امکان تعمیم کامل یافته‌ها به تمامی گروه‌های کاربری را کاهش می‌دهد. همچنین، اگرچه محیط واقعیت مجازی با دقت بالایی طراحی شده است، اما همچنان قادر نیست تمامی پیچیدگی‌ها و شرایط چندحسی یک مجتمع تجاری واقعی را به‌طور کامل بازنمایی کند؛ عواملی مانند ازدحام، صدا، ویژگی‌های مصالح و بازتاب سطوح می‌توانند در محیط واقعی بر ادراک نور و رفتار بصری کاربران تأثیرگذار باشند. افزون بر این، ابزارهای رهگیری چشم مورد استفاده، با وجود دقت قابل قبول، در ثبت برخی جزئیات حرکات ظریف چشم و تغییرات سریع موقعیت سر با محدودیت‌هایی همراه بوده‌اند. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی از نمونه‌های آماری بزرگ‌تر و متنوع‌تر استفاده شود، محیط‌های مجازی با پیچیدگی فضایی و نوری بیشتر توسعه یابند، و از ابزارهای پیشرفته‌تر رهگیری نگاه یا ترکیب چند روش اندازه‌گیری بهره گرفته شود. همچنین، مقایسه داده‌های رفتاری در محیط‌های واقعی و مجازی و بررسی متغیرهای ادراکی تکمیلی مانند بار شناختی و استرس محیطی می‌تواند به تعمیق درک از مسیریابی و ادراک فضایی در محیط‌های پیچیده کمک کند.

پی‌نوشت‌ها

1. Correlated Color Temperature

۲. این پرسشنامه بر اساس و با تاثیرپذیری از «Wayfinding Questionnaire» توسط نویسندگان مقاله طراحی شده است؛ این پرسشنامه‌ای معتبر برای سنجش ادراک مسیر، اضطراب فضایی و توانایی جهت‌یابی می‌باشد. طراحی و اعتبارسنجی آن در مقاله Claessen و همکاران (۲۰۱۶) انجام شده است.

۳. Heart Rate Variability: تغییرپذیری ضربان قلب

۴. Electroencephalography: روش ثبت و اندازه‌گیری فعالیت الکتریکی مغز

5. (Correlated Color Temperature - CCT)

فهرست منابع

اسماعیلیان، سلمان؛ آپرناک، آرش (۱۴۰۲)، ارگونومی نور و رنگ در محیط کار، *کنفرانس بین‌المللی مطالعات بین رشته‌ای در مدیریت و مهندسی*، https://sid.ir/paper/1127782/fa

اعظم مسعودی، گ؛ خسرو، ا.؛ محسن، ط.؛ هادی، س.؛ مهدی، ص (۱۴۰۱)، خوانش تأثیر نور و رنگ با رویکرد امنیت احساسی در خانه‌های قاجاری تبریز، فصلنامه *مطالعات محیطی هفت حصار*، ۱۱(۴۱)، ۱۷-۳۰، https://www.magiran.com/paper/2522267

بهشتی، محمدحسین؛ حاجی‌زاده، روح اله؛ حمامی‌زاده، احسان؛ تابان، ابراهیم؛ خواجه نصیری، فرحناز؛ جعفری زاوه، مصطفی؛ جعفری‌زاده، راضیه؛ تاجپور، علی؛ فقیه نیاترشیزی، یوسف؛ سمائی، سیداحسان (۱۳۹۸)، بررسی تأثیر دمای رنگ نور بر میزان توجه انتخابی، خطا و زمان واکنش انسان، *سلامت کار ایران*، ۱۶(۶)، ۶۶-۷۸، https://sid.ir/paper/387651/fa

حافظی، اکرم (۱۳۹۶)، مدیریت رنگ و نور برای فضای آموزشی، *همایش ملی پژوهش‌های مدیریت و علوم انسانی در ایران (اولین همایش بین‌المللی و سومین همایش ملی)*، SID. https://sid.ir/paper/897707/fa

سیل سپور، عطیه؛ نقصان محمدی، محمدرضا؛ امیدواری، سمیه (۱۳۹۴)، جایگاه نور در زیبایی بصری معماری، کنفرانس سالانه پژوهش‌های معماری، *شهرسازی و مدیریت شهری*، https://sid.ir/paper/826460/fa

سمیه صدری، ک.؛ محمدرضا، ب.؛ مجتبی، ا. (۱۳۹۷)، کیفیت ادراک معنای فضا با دریافت نور روز، فصلنامه *هویت شهر*، ۱۲(۳۵)، ۵-۱۸، https://www.magiran.com/paper/1948074

صدری، آرش؛ افراسیابی، منا (۱۳۹۵)، نور در معماری داخلی، *کنفرانس بین‌المللی پژوهش در مهندسی، علوم و تکنولوژی*. /https://sid.ir SID. paper/870030/fa

سید موسی، د (۱۳۸۴)، فضای نور و معماری نور، *باغ نظر*، ۲(۳)، ۴۸، https://www.magiran.com/paper/694094

فرشته، ن.؛ فاطمه، ک.؛ مهرانگیز، م.؛ بهروز، ب. (۱۳۸۶)، تأثیر نور در فضاهای خالی بر کیفیت زندگی و رفتارهای اخلاقی انسان، فصلنامه *اخلاق در علوم و فناوری*، ۲(۳)، ۶۵، https://www.magiran.com/paper/636437

محیا چشمه، ن.؛ سید عباس، ی.؛ فاطمه مهدیزاده، س. (۱۴۰۲)، تبیین مولفه‌های معماری داخلی مبتنی بر روشنایی غیر بصری هدفمند، *معماری و شهرسازی پایدار*، ۱۱(۲)، ۱۸۳-۲۰۶، https://www.magiran.com/paper/2749342

Chen, R., Tsai, M.-C., & Tsay, Y.-S. (2022). Effect of Color Temperature and Illuminance on Psychology, Physiology, and Productivity: An Experimental Study. *Energies*, *15*, 4477. https://doi.org/10.3390/en15124477

Choi, K. (2020). Effects of Light Spectrum on Cognitive Performance and Alertness: Laboratory and Field Studies.

Claessen, M. H. G., Visser-Meily, J. M. A., de Rooij, N. K., Postma, A., & van der Ham, I. J. M. (2016). The Wayfinding Questionnaire as a Self-report Screening Instrument for Navigation-related Complaints After Stroke: Internal Validity in Healthy Respondents and Chronic Mild Stroke Patients. Archives of clinical neuropsychology : the official journal of the National Academy of Neuropsychologists, 31(8), 839–854. https://doi.org/10.1093/arclin/acw044

Hao, X., Zhang, X., Du, J., & Wang, M. (2022). Pedestrians' psychological preferences for urban street lighting with different color temperatures. *Frontiers in Psychology*.

Luo, W. (2023). Impact of Gradual CCT Change on Comfort and Cognitive Performance.

Mostafavi, A. (2023). *Assessing the Effects of Illuminance and Correlated Color Temperature on Emotional Responses and Lighting Preferences Using Virtual Reality / Impacts of Illuminance and CCT on Cognitive Performance: A VR-Lighting Study*. https://arxiv.org/

Namrouti, H., Sik-Lányi, C., & Guzsvinecz, T. (2025). Exploring measurement tools for color perception in virtual reality: A systematic review. *Displays*, *87*, 102937. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.displa.2024.102937

Ryan, D. J., & Hill, K. M. (2022). Public perceptions on the role of wayfinding in the promotion of recreational walking routes in greenspace—Cross-sectional survey. *Wellbeing, Space and Society*, *3*, 100111. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wss.2022.100111

Shahidi, R. (2021). Effect of warm/cool white lights on visual perception and mood in a simulated coloured workspace. *PMC Journal*.

Suzer, O. K., Olgunturk, N., & Guvenc, D. (2018). The effects of correlated colour temperature on wayfinding: A study in a virtual airport environment. *Displays*, *51*, 9-19. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.displa.2018.01.003

Yang, W., & Jeon, S. (2020). Effects of Correlated Colour Temperature of LED Light on Visual Sensation, Perception and Cognitive Performance in a Classroom Lighting Environment. *Sustainability*.