

بررسی و تحلیل کارایی شاخص‌های پویای ارزیابی عملکرد نور روز (کفایت نور روز و روشنایی مفید نور روز) از طریق تحلیل حساسیت، مورد مطالعاتی: کلاس درس ابتدایی در تهران*

فیروزه محمدی^۱ - سید مجید مفیدی شمیرانی^{۲*} - منصوره طاهباز^۳

۱. دکتری معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.
۲. استادیار گروه شهرسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران (نویسنده مسئول).
۳. دانشیار گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۲/۰۴ تاریخ اصلاحات: ۹۷/۱۲/۲۶ تاریخ پذیرش نهایی: ۹۸/۰۲/۱۵ تاریخ انتشار: ۹۹/۰۶/۳۱

چکیده

حرکت به سوی ساختمان‌های پایدار و کم انرژی نیازمند تأکید بیشتری بر ارزیابی دقیق عملکرد نور روز است. بدین منظور محققین در چند سال گذشته جهت غلبه بر محدودیت‌های شاخص‌های ارزیابی ایستا به‌طور قابل ملاحظه‌ای به سمت شاخص‌های پویای پیشرفته‌تر حرکت کرده‌اند. در حال حاضر شاخص‌های کفایت نور روز (DA)^۱ و روشنایی مفید نور روز (UDI)^۲ و شاخص‌های توسعه‌یافته مبتنی بر این دو به‌عنوان شناخته‌شده‌ترین شاخص‌های پویای ارزیابی شدت روشنایی نور روز در سطح بین‌المللی هستند که دارای اعتبار یکسانی از نظر کارایی در میان متخصصین مختلف نیستند. هدف از این مقاله مقایسه توانایی این شاخص‌ها جهت به‌کارگیری در ارزیابی نور روز در ساختمان‌های آموزشی است. برای رسیدن به این هدف تجزیه و تحلیل پارامتریک با استفاده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار گرسهاپر با استفاده از پلاگین لیدی باگ^۳ و هانی بی^۴، جهت نشان دادن رابطه بین شاخص‌های DA، sDA، cDA، sUDI، DA از طریق نحوه تأثیر آن‌ها از تغییرات مؤلفه نسبت مساحت پنجره به دیوار (WWR)^۵ در مدل کلاس درس یک دبستان نمونه در شهر تهران انجام شد. نتایج نشان می‌دهند عدم وجود حد بالا برای شاخص DA و شاخص‌های مبتنی بر آن ارتباط آن‌ها را با مؤلفه‌های مربوط به آسایش ساکنین از بین می‌برد. در مقایسه شاخص UDI به علت همبستگی با شاخص‌های خیرگی و انرژی می‌تواند نشان‌دهنده میزان تمایل به وقوع عدم آسایش ساکنین و همچنین میزان مصرف انرژی باشد. همچنین در میان شاخص‌های مبتنی بر UDI شاخص sUDI جهت دستیابی به دقتی مشابه شاخص UDI avg به افزایش تراکم شبکه نقاط حسگر نیازمند است که زمان محاسبه را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. بنابراین شاخص UDI avg برای واحدهای کوچک فضایی که تعداد نقاط سنور کاملاً محدود است مناسب‌تر است.

واژگان کلیدی: عملکرد نور روز، شاخص‌های پویا، کفایت نور روز، روشنایی مفید نور روز، کلاس درس.

* این مقاله مستخرج از رساله دکتری معماری با عنوان «تبیین اصول طراحی فضاهای درونی آموزشی به منظور بهبود شرایط بهره‌گیری از نورروز در اقلیم نیمه گرم و خشک» است که با راهنمایی نویسنده دوم و مشاوره نویسنده سوم در دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران انجام گرفته است.

** E_mail: s_m_mofidi@iust.ac.ir

۱. مقدمه

پیشگویی کننده بهتری برای ایجاد شرایط مطلوب می‌باشند را تقویت می‌نماید. دلیل این امر تفاوت‌های کاربردی است که هر کدام از این شاخص‌ها دارند. همچنین بررسی متون آشکار می‌کند که تحقیقات در مورد ارزیابی‌ها با استفاده از شاخص‌های پویا هنوز بالغ نشده است و بررسی و مطالعات بیشتری در این زمینه مورد نیاز است. هدف این مقاله مقایسه توانایی ارزیابی دو شاخص ارزیابی نور روز (کفایت نور روز و روشنایی مفید نور روز) و شاخص‌های مبتنی بر آن‌ها از طریق بررسی حساسیت آن‌ها نسبت به تغییرات در طراحی ساختمان است. بنابراین مقاله در ابتدا به معرفی شاخص‌های نور روز از طریق بررسی ادبیات و در مرحله دوم، ارزیابی عملکرد تنظیمات مختلف WWF پنجره از طریق این شاخص‌ها می‌پردازد.

۲. ارزیابی عملکرد نور روز

حرکت به سوی ساختمان‌های پایدار و کم انرژی نیازمند آن است تا تأکید بیشتری بر ارزیابی دقیق عملکرد نور روز شود. در حالی که توجه زیادی به هدف ارائه فضاهای دارای نور روز در ساختمان‌های ما وجود دارد، توانایی ما برای توصیف متغیرهای یک فضای دارای نور روز مطلوب در چند دهه گذشته پیشرفت نکرده است. همواره این سؤال مطرح بوده است که نور روز توسط کدام شاخص به طور کامل توصیف می‌شود؟ این سؤال نمی‌تواند صراحتاً پاسخ داده شود چرا که هر یک از اهداف و ذینفعان مربوطه در زمینه نور روز نیازهای اندکی متفاوت از لحاظ سطح جزئیات، دقت و فرمت ورودی و خروجی دارند که یک شاخص نور روز مفید را تشکیل می‌دهند. هدف یک شاخص ترکیب عوامل مختلفی است که نتایج عملکردی بهتر یا بدتری را پیش‌بینی کنند و در نتیجه تصمیم‌گیری را ممکن سازند. شاخص‌های مفیدتر معنای ادراکی برای کاربران خود دارند و همچنین می‌توانند به طور مستقیم برای اعتبار سنجی مورد سنجش قرار گیرند. این بدان معناست که در انتخاب شاخص اولویت سادگی است تا بتوان آن‌ها را به طور شهودی درک کرد و به نتایج قابل اندازه‌گیری مستقیم رسید.

شمار محققان فعال در زمینه تعیین و ارزیابی شاخص‌های نور روز به طور پیوسته در حال رشد است. در سال ۲۰۰۷ کمیته فرعی برای توسعه شاخص‌های نور روز توسط انجمن مهندسی روشنایی آمریکای شمالی^۱ تأسیس شد که نظارت بر پروژه شاخص‌های نور روز را انجام می‌دهد. هدف این کمیته هدایت توسعه شاخص‌های نور روز و انتشار توصیه‌هایی برای استفاده از آن‌ها است. در حالی که چند شاخص کاندید پیشنهاد شده‌اند، همچنان این پرسش که آیا یک یا چند عدد از آن‌ها می‌توانند تمام نیازهای ذینفعان در این حوزه را در نظر بگیرند، باقیست (Mardaljevic, Heschong, & Lee, 2009, p. 265).

بهر برداری از نور روز به عنوان وسیله‌ای مناسب برای کاهش نیازهای نورپردازی مصنوعی ساختمان‌های غیرمسکونی شناخته شده است. همچنین نور روز منبعی برای دستیابی به کیفیت محیط داخلی و کارایی انرژی در ساختمان‌های آموزشی و در نتیجه ارتقاء پایداری آن‌هاست. در زمینه ارزیابی‌های مربوط به عملکرد نور روز شاخص‌های ایستایی چون فاکتور نور روز^۲ و یکنواختی^۳ برای سال‌ها رواج داشته‌اند؛ اما در سال‌های اخیر با توجه به اقلیم واقعی (مقدار و ماهیت تغییرات روزانه و فصلی نور روز) برای یک ساختمان مفروض همراه با رویدادهای نامنظم آب‌وهوایی شاخص‌های پویای عملکرد نور روز به منظور غلبه بر محدودیت‌های شاخص‌های ایستا معرفی شده‌اند (Carlucci, Causone, De Rosa, & Paglia-, 2015, p. 1016). این شاخص‌های پویا را می‌توان از مدل‌سازی نور روز مبتنی بر اقلیم (CBD^۴) و شبیه‌سازی به‌دست آورد. شاخص‌های کفایت نور روز (DA) و روشنایی مفید نور روز (UDI) به عنوان مطرح‌ترین شاخص‌های پویا اخیراً به‌طور گسترده‌ای تحت شرایط مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند و هر دو برای ارزیابی کیفیت فضای معماری از نظر نور روز مفید هستند^۵. اما در حال حاضر، این دو شاخص در سطح بین‌المللی ارزش‌های طراحی مورد توافقی ندارند (Cantin & Dubois, 2011, pp. 291–307). همچنین در ادامه شاخص‌های پویای دیگری مبتنی بر این دو شاخص معرفی شده‌اند که در بخش مرور ادبیات توضیح داده خواهند شد. تحقیقات اندکی تلاش کرده‌اند تا نتایج شبیه‌سازی‌های پویای نور روز بر اساس شاخص‌های مختلف را مقایسه و تحلیل کنند. تحقیق صورت گرفته توسط رینهارت و ویس من شاخص‌های نور موجود و در حال ظهور را در یک فضای استودیویی در کمبریج ایالات متحده آمریکا مورد آزمایش قرار داد. نتایج نشان داد که شاخص‌های پویای کفایت فضای نور ارزیابی دانش آموزان در مورد نور در استودیو را با دقت بیشتری نسبت به شاخص‌های دیگر نشان می‌دهد. با این حال، نویسندگان پیشنهاد کرده‌اند که نتایج باید مورد آزمایش بیشتری قرار گیرد و در فضاهای دیگر ارزیابی شود (Weissman & Reinhart, 2012, p. 155). پژوهش دیگری، شبیه‌سازی‌ها را در ۱۱ مدرسه در برزیل (۲)، کانادا (۱)، مصر (۱) و ایالات متحده (۷) انجام داد و نتایج را با ارزیابی دانش‌آموزان مقایسه کرد و نشان داد که همبستگی رضایت‌بخشی بین کفایت نور روز مبتنی بر شبیه‌سازی و ارزیابی دانش آموزان وجود دارد (Reinhart, Rakha, & Weissman, 2014, p. 200).

با وجود رشد روز افزون این شاخص‌ها هنوز هیچ کدام ارزش‌های طراحی مورد توافقی در سطح بین‌المللی ندارند. نتایج این مطالعات این فرضیه را که برخی از این شاخص‌ها در شرایط کلاس‌های درس در ساختمان‌های آموزشی

۲-۱- پارادایم شیفیت در ارزیابی عملکرد نور روز

برای ارزیابی عملکرد نور روز، شاخص‌های ایستا برای مدت زمان طولانی رایج بوده‌اند (Reinhart, Rakha, & Weiss, 2004, p. 200). بعد از گذشت پنجاه سال از زمانی که شاخص عامل نور روز (DF) برای اولین بار مطرح شد، این شاخص به دلیل سادگی ذاتی آن به جای واقعیت آن همچنان، به‌عنوان معیار ارزیابی غالب، مطرح است. در حوزه ساختمان، متخصصین غالباً با دستورالعمل‌ها و توصیه‌هایی برای مقادیر DF هدف روبرو می‌شوند که می‌دانند احتمالاً در ساختمان‌هایی با شیشه کاری زیاد با دریافت تابش و یا اتلاف حرارت فراوان تأمین خواهند شد. طبیعت DF در زمینه عدم حساسیت به جهت‌گیری و اقلیم نقطه ضعف بزرگی است. مفاهیم یکنواختی روشنایی نیز همانند DF ناشی از استفاده از رویکرد آسمان تمام ابری استاندارد است و برای شرایط واقع‌بینانه که در آن سهم نور مستقیم خورشید منجر به اختلافات بزرگ بین حداکثر و حداقل مقدار نور روز می‌شود، قابل استفاده نیست.

اما واقعیت این است که مقادیر روشنایی نور روز در یک فضا پویا است و دائماً در شدت و الگوی توزیع فضایی- زمانی در حالی که دو منبع متغیر نور روز (خورشید و آسمان) با هندسه و خواص فیزیکی فضا، زمینه بیرونی و شرایط داخلی تعامل می‌کنند، در حال تغییر است. این موضوع حتی برای اقلیم‌هایی که آسمان آن‌ها عمدتاً تمام ابری هستند و بنابراین استفاده از DF به‌عنوان مبنایی برای ارزیابی موجه است نیز صادق است. شرایط روشنایی نور روز واقعی به طور قابل توجهی از پارادایم آسمان تمام ابری متفاوت است. نور طبیعی نوری با طیف کامل است که در طول روز و در هر روز از سال متغیر است. بر این اساس اصطلاح مدل سازی نور روز مبتنی بر اقلیم (CBDM)، اولین بار توسط مردالجویک در عنوان مقاله‌ای که در کنفرانس ملی 2006 CIBSE ارائه شد، شکل گرفت (Reinhart, Mardaljevic, & Rogers, 2006). روش CBDM پیش‌بینی مقادیر مختلف نور روز با استفاده از شرایط واقعی خورشید و آسمان است که از مجموعه داده‌های استاندارد سالانه هواشناسی مشتق شده است. این روش پیش‌بینی‌هایی از مقادیر مطلق (به‌عنوان مثال روشنایی) را فراهم می‌کند که به منطقه و جهت‌گیری بازوها و همچنین هندسه فضا و خواص مصالح بستگی دارد. در سال‌های اخیر این روش محاسباتی به خوبی پیشرفت کرده است. تمام مقادیر فیزیکی مرتبط با آسایش بصری می‌توانند با درجه‌های مختلف، با دقت بالا با استفاده از این تکنیک‌های شبیه‌سازی روشنایی اعتبارسنجی شده و پیش‌بینی شوند. حتی بدون مقادیر متداول توافق شده برای شاخص‌های کاندید، مطالعات نور روز مبتنی بر اقلیم که برای شرایط موجود ساختمان‌های واقعی انجام شده‌اند، بینش ارزشمند و مشاوره طراحی ملموسی را به طراحان ارائه می‌دهند. پیش‌بینی‌های روشنایی متغیر بر

اساس زمان، مانند CBDM یک گزارش بسیار واقع‌گرایانه از شرایط واقعی نور روز را نسبت به رویکرد ایده‌آل‌گرایانه عامل نور روز فراهم می‌کند.

مبتنی بر این رویکرد محققین در چند سال گذشته به طور قابل ملاحظه‌ای به سمت شاخص‌های پویای پیشرفته‌تر حرکت کرده‌اند که به معنی توجه به تغییر نور روز با زمان در هنگام تغییر شرایط آسمان است (Bourgeois, Reinhart, & Ward, 2008, p. 72). مزایای شاخص‌های پویا نسبت به شاخص‌های ایستای مرسوم عملکرد نور روز، در مطالعات متعددی مورد بررسی قرار گرفته است. بر خلاف شاخص‌های ایستا، شاخص‌های پویا تغییرات نور را با تغییرات سالانه و فصلی در نظر می‌گیرند و معمولاً برای آسایش ساکنین محاسبه می‌شوند. طبق مطالعه رینهارت، مردالویچ و راجرز، شاخص‌های عملکرد پویا در تمام طول سال میزان و ماهیت تغییرات روزانه و فصلی نور روز برای یک ساختمان مشخص، و همچنین رویدادهای غیرمعمول آب و هوایی را در نظر می‌گیرند و بنابراین رویکرد جامع‌تری را برای تجزیه و تحلیل نور در یک فضا اتخاذ می‌کنند (Reinhart, Mardaljevic, & Rogers, 2006, p. 15). در واقع آن‌ها کاملاً بر اساس مکان، جهت‌گیری و الگوی اشغال ساختمان‌ها نور روز را ارزیابی می‌کنند (Pider, Moreno & Labarca, 2015, p. 885). مناسب بودن شاخص‌های پویا برای برنامه‌های کاربردی طراحی معماری و طراحی شهری همچنین توسط بسیاری از مقالات تأیید شده است، زیرا آن‌ها به طراح فرصت می‌دهند که با نور از دیدگاه سالانه برخورد کنند و طرح‌های خود را بر اساس داده‌های عملکردی تغییر و توسعه دهند (Mardaljevic, Heschong, & Lee, 2009, p. 270).

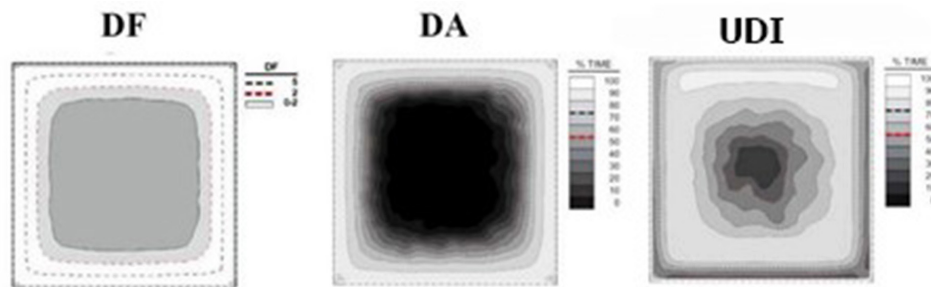
۲-۲- شاخص‌های پویای ارزیابی نور روز

شاخص‌های پویا بر اساس آنالیز سری زمانی هستند که براساس داده‌های تابش خورشیدی سالانه برای محل ساخت محاسبه می‌شوند. در حال حاضر، UDI و DA به‌عنوان شناخته‌شده‌ترین شاخص‌های پویای ارزیابی شدت روشنایی نور روز در سطح بین‌المللی مطرح هستند. تعریف این شاخص‌ها و نیز شاخص‌های مبتنی بر آن‌ها که به‌عنوان متغیر وابسته در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته‌اند به ترتیب شکل‌گیری و تحول به شرح زیر است:

- کفایت نور روز (DA avg)، (DA)

این شاخص در ابتدا توسط انجمن سوئیس دی الکتریکس در سال ۱۹۸۹ پیشنهاد شد و بین سال‌های ۲۰۰۱-۲۰۰۴ توسط کریستوف رینهارت و والکنهورست اصلاح شد (Reinhart & Walkenhorst, 2001, p. 689). این شاخص به‌عنوان درصد ساعات اشغال فضا در سال که آستانه حداقل روشنایی تنها با نور روز تأمین می‌شود به‌صورت یک مقدار واحد، تعریف شده است.

شکل ۱: آنالیز شرایط نور روز با شاخص‌های مختلف در ساختمان مرکز AON توسط بخش ساختمان دانشگاه ایداهو



می‌گیرد و همچنین یک شاخص منطقه‌ای است. به‌عنوان مثال از آنجا که سطح روشنایی مناسب در سطح کار برای خواندن و نوشتن در کلاس‌های درس غالباً ۵۰۰ لوکس است، کفایت فضایی نور روز به‌صورت (sDA500 lx50%) تعیین می‌شود (IESNAI, LM-83-12 IES, 2012).

- روشنایی مفید نور روز (UDI)، (UDI avg)

این شاخص توسط مردالویچ و نیبل در سال ۲۰۰۵ جهت ارزیابی توان بالقوه روشنایی مفید نور روز و به‌عنوان اصلاحیه‌ای بر شاخص کفایت نور روز پیشنهاد شد که سادگی تفسیری رویکرد رایج فاکتور نور روز را حفظ می‌کند. UDI با استفاده از مقادیر مطلق روشنایی نور روز با تغییر زمان برای یک دوره یک ساله کامل تعیین می‌شود. UDI به‌عنوان درصد ساعات اشغال فضا در یک سال تعریف شده است که در آن روشنایی افقی داخلی ناشی از نور روز در یک نقطه معین در محدوده آسایش تعیین شده قرار می‌گیرد. UDI نه تنها میزان تکرار سطوح مفید روشنایی نور روز در یک نقطه از یک سطح اندازه‌گیری مشخص، بلکه همچنین تکرار وقوع سطوح بالای نور روز که ممکن است باعث عدم آسایش ساکنین شود، را نیز مشخص می‌کند (Nabil & Mardaljevic, 2005, p. 47). در واقع هدف UDI تعیین محدوده‌ای از روشنایی است که نه بسیار تاریک و نه بسیار روشن باشد (Carlucci, Causone, De Rosa, & Pagliano, 2015, p. 1019). یک رویکرد دیگر در زمینه این شاخص میانگین مقدار همه نقاط اندازه‌گیری شده در منطقه مورد آنالیز برای به‌دست آوردن یک مقدار کلی است. این نتایج به میانگین روشنایی مفید نور روز (UDIavg) شاخص‌های عملکرد نور روز منجر می‌شود.

بر اساس یک تحقیق انجام شده توسط IESNA، پذیرش ۳۰۰ لوکس به‌عنوان آستانه نور روز حداقل، منجر به نتایج آماری قابل قبولی می‌شود (Standard IES LM-83-1, 2012). یک رویکرد دیگر در زمینه این شاخص میانگین مقدار همه نقاط اندازه‌گیری شده در منطقه مورد آنالیز برای به‌دست آوردن یک مقدار کلی است. این نتایج به میانگین کفایت نور روز (DAavg) منجر می‌شود (Gherri, 2015, pp. 100-104).

- کفایت نور روز پیوسته^{۱۱} (cDA)

این شاخصه نخستین بار در سال ۲۰۰۶ توسط زاچ راجرز به‌عنوان یک اصلاحیه پایه برای شاخص DA، پیشنهاد شد. اگر ۳۰۰ لوکس به‌عنوان آستانه DA مشخص شده باشد، آنگاه اگر نقطه خاصی کم‌تر از ۳۰۰ لوکس در ۵۰ درصد از زمان در طول یک سال را داشته باشد، cDA-300lux تقریباً ۵۵-۶۰ درصد خواهد بود. در واقع این شاخصه برای مقادیر کمتر از حداقل آستانه DA نیز اعتبار نسبی قائل است. برای مثال، اگر در یک نقطه داخلی شبکه نور روز معادل ۱۵۰ لوکس را دریافت کند اعتبار DA برای آن صفر خواهد بود در حالی که اعتبار cDA300 150/300 = 0.5 خواهد بود. این شاخص غالباً به‌عنوان یک شاخص تطابقی نسبت به ابزار مستقل طراحی به کار می‌رود.

- کفایت فضایی نور روز^{۱۲} (sDA)

شاخص sDA بیانگر درصدی از مساحت کف فضا است که بیش از یک سطح شدت روشنایی مشخص برای یک مقدار مشخص از ساعت‌های سالانه (به‌عنوان مثال، ۵۰ درصد ساعات بین ۸ صبح تا ۶ بعد از ظهر) را دارند. این شاخصه که نخستین بار توسط لیزا هشونگ^{۱۳} مطرح شد، هر دو ویژگی‌های فضایی و زمانی عملکرد نور روز را در نظر

شکل ۲: اعتبار نور روز / کفایت فضایی نور روز

100%	-	C	B	A	A	A	+	+	+	+	
90%	-	-	C	B	B	A	A	A	+	+	
80%	-	-	-	C	C	B	B	A	A	+	
70%	-	-	-	-	C	C	B	A	A	+	
60%	-	-	-	-	-	C	B	B	A	A	
50%	-	-	-	-	-	C	C	B	A	A	
40%	-	-	-	-	-	-	C	B	A	A	
30%	-	-	-	-	-	-	C	B	B	A	
20%	-	-	-	-	-	-	-	C	B	A	
10%	-	-	-	-	-	-	-	C	B	A	
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

مساحت کف

A: ۷۵٪ مساحت کف > میزان نور روز قابل قبول

B: ۵۵٪ مساحت کف > میزان نور روز قابل قبول

C: میزان ناکافی نور روز

- : عدم وجود نور روز

(Gherri, 2015, p. 115)

شبیه‌سازی در نرم‌افزار گرسهپار با استفاده از پلاگین لیدی باگ و هانی بی جهت نشان دادن رابطه بین شاخص‌های cDA, sDA, DA, sUDI, UDI از طریق نحوه تأثیر آن‌ها از تغییرات مؤلفه نسبت مساحت پنجره به دیوار (WWR) در مدل کلاس درس یک دبستان نمونه در شهر تهران انجام شد.

۳-۱- مشخصات اقلیمی و جغرافیایی سایت

در این پژوهش یک ساختمان مدرسه معمولی سه طبقه در تهران (51°19'_E, 35°40'_N) به‌عنوان مدل پایه انتخاب شده است، که بر طبق دسته‌بندی اقلیمی کوپن گیگر در منطقه Bsk (شرایط اقلیمی نیمه گرم و نیمه خشک)، قرار دارد. این شهر در ارتفاع ۷۵۰ متری از سطح دریا واقع شده است. متوسط دما در طول سال ۱۷ درجه سانتی‌گراد است. میانگین بارندگی سالانه بین ۱۰۰۰ تا ۳۵۰۰ میلی‌متر است. آب و هوا به طور کلی ملایم در بهار گرم و خشک در تابستان، مطلوب در پاییز و سرد در زمستان است. داغ‌ترین ماه مرداد است و سردترین ماه بهمن است (متوسط حداقل و حداکثر درجه حرارت، ۲۳ درجه سانتی‌گراد و ۳۶ درجه سانتی‌گراد در ماه مرداد، ۱- درجه سانتی‌گراد و ۸ درجه سانتی‌گراد در ماه بهمن). فایل‌های اطلاعات سالانه آب‌وهوایی در قالب epw برای شبیه‌سازی استفاده شده است. براساس داده‌های آب و هوایی، آسمان تهران ۶۷ درصد صاف، ۲۴ درصد نیمه ابری و ۹ درصد تمام ابری در طول سال است. بنابراین پتانسیل تابش خورشیدی جهانی در تهران قابل توجه است. حداکثر و حداقل تابش مستقیم به ترتیب در ماه تیر و دی رخ می‌دهد. در حالی که حداکثر تابش انتشاری خورشید در ماه مرداد و حداقل آن در ماه آذر رخ می‌دهد.

- روشنایی فضایی مفید نور روز^{۱۴} (sUDI)

این شاخص که به تازگی معرفی شده است، بیانگر درصدی از مساحت کف فضا است که روشنایی افقی داخلی ناشی از نور روز در محدوده آسایش تعیین شده برای یک مقدار مشخص از ساعت‌های سالانه (به‌عنوان مثال، ۵۰ درصد ساعات بین ۸ صبح تا ۶ بعد از ظهر) قرار دارد. این شاخص نیز هر دو ویژگی‌های فضایی و زمانی عملکرد نور روز را در نظر می‌گیرد (Konis, Gamas, & Kensek, 2016, p.).

بر اساس تعاریف ارائه شد می‌توان مشاهده نمود که شاخص‌های ارزیابی مختلف ادراکات متفاوتی از شرایط نورروز در فضا را ارائه می‌دهند. از سویی دیگر از آنجا که عملکرد نورروز در هر گونه فضایی بستگی به جنبه‌های مختلفی دارد یک طراحی خوب نورروز باید با استفاده از شاخص‌های مناسب برای جمع آوری اطلاعات در مورد تمام اثرات نورروز ممکن در آن فضا صورت گیرد. اکثر پژوهش‌ها در این زمینه، از این رویکرد پیروی نکرده و نتایج آن‌ها بر اساس یک شاخص و بنابراین برجسته کردن یک جنبه از مساله صورت گرفته است و پژوهش‌های کمتری چندین شاخص نورروز را به طور مؤثر ارزیابی کرده‌اند که منجر به انتخاب شاخص مناسب جهت طراحی بهینه نورروز در گونه‌های مختلف فضایی شده است. از این رو در این پژوهش به بررسی کارایی شاخص‌های ارزیابی نور روز مطرح جهت تعیین تطابق آن‌ها با نیازهای کلاس درس در جهت انتخاب همگرا ترین شاخص با اهداف عملکردی در این گونه از فضاهای آموزشی پرداخته می‌شود.

۳. روش پژوهش

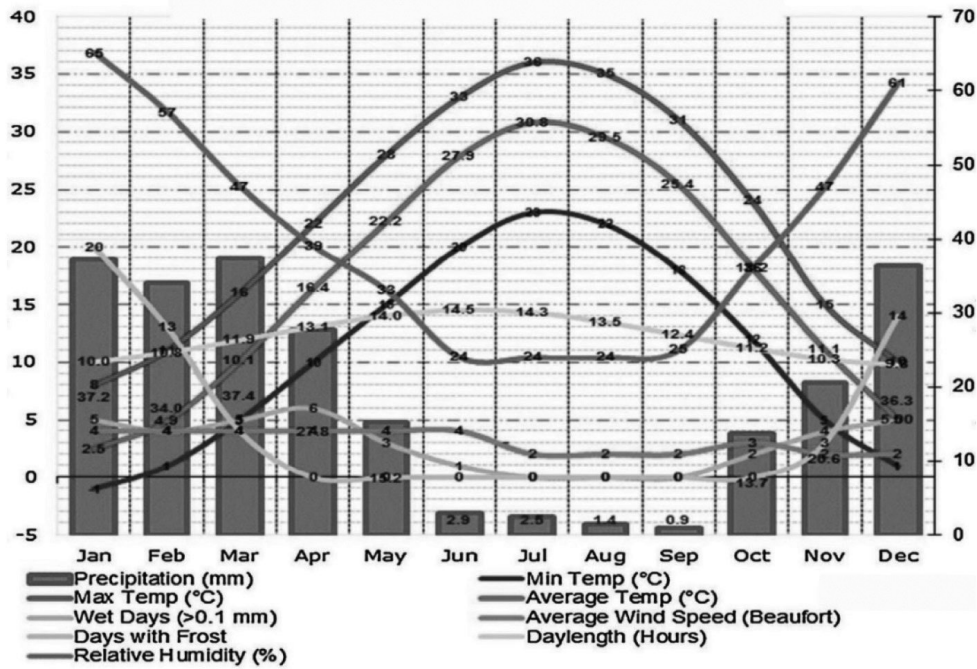
در این پژوهش تجزیه و تحلیل پارامتریک با استفاده از

جدول ۱: تعداد ساعات آفتابی در شهر تهران^{۱۵}

سالانه	دسامبر	نوامبر	اکتبر	سپتامبر	آگوست	جولای	جون	می	آوریل	مارچ	فوریه	ژانویه
۱۲:۰۰	۰۹:۴۷	۱۰:۱۵	۱۱:۱۲	۱۲:۲۲	۱۳:۲۸	۱۴:۱۸	۱۴:۳۱	۱۴:۰۲	۱۳:۰۴	۱۱:۵۵	۱۰:۵۰	۱۰:۰۲
۵۴.۷	۳۰.۹	۳۴.۳	۴۳.۵	۵۵	۴۶.۶	۷۴.۷	۷۷.۷	۷۴.۵	۶۶.۲	۵۴.۵	۴۳.۷	۳۴.۴

ارتفاع خورشید در
ظهر خورشیدی در
روز ۲۱م (درجه).

شکل ۳: نمودار اقلیمی شهر^{۱۶}



امتداد محور مرکزی فضا انجام شده است. این فضا در روزهای شنبه تا چهارشنبه، از ساعت ۰۸:۰۰ تا ۱۳:۰۰، اشغال می‌شود. همچنین لازم به ذکر است که تعطیلات معمولی فضاهای آموزشی در طول سال نیز در نظر گرفته می‌شود. روشنایی مصنوعی با چگالی قدرت روشنایی $9W/m^2$ و کنترل نورپردازی به صورت سیستم کاهنده برای تأمین روشنایی هدف ۳۰۰ لوکس تنظیم شد. فتوسل‌ها روشنایی مصنوعی را تا وقتی که میزان روشنایی کلی سطح کار (نور روز و نور الکتریکی) به حداقل آستانه روشنایی برسد کاهش می‌دهند. در ادامه ترکیب‌بندی‌های مختلف پنجره با تغییر پارامترهای پنجره مدل‌سازی شدند. در جدول ۴ سطوح این تغییرات تعیین و میزان مربوط به پارامترها در مدل پایه نیز مشخص شده است.

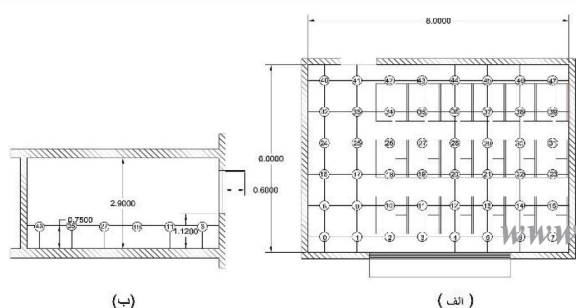
شکل ۵: جهت‌گیری شرقی - غربی ساختمان مدرسه و قرارگیری پنجره‌های کلاس‌ها در جبهه شمالی و جنوبی



۲-۳- مدل‌سازی نمونه پایه

مدل پایه در این مطالعه به صورت یک کلاس درس با شباهت تقریبی به شرایط واقعی مدل‌سازی شده است که با مساحت ۴۸ مترمربع در جبهه جنوبی در طبقه دوم ساختمانی با ارتفاع ۳ طبقه با جهت‌گیری شرقی غربی، که در آن کلاس‌های درس در امتداد یک راهرو مرکزی قرار گرفته‌اند، واقع شده است. فضای داخلی از طریق یک پنجره در جبهه جنوبی با فضای خارجی در ارتباط است. پنجره به صورت تک جداره با انتقال مرئی ۰.۸۸ با یک رف نوری بدون مبلمان و لوازم جانبی دیگر در فضا در نظر گرفته شد. خواص نوری سطوح در جدول ۱ ارائه شده است. تجزیه و تحلیل پارامتریک در ارتفاع ۰.۷۵ متر (سطح کار) (Ruck et al., 2000, pp.103-1030). در

شکل ۴: پلان و مقطع کلاس درس در جبهه جنوبی در طبقه دوم ساختمان مدرسه



جدول ۲: خواص نوری سطوح مدل پایه

عناصر ساختمانی	خواص نوری سطوح
سقف	بازتاب ۸۵٪
کف	بازتاب ۴۰٪
دیوار داخلی	بازتاب ۴۵٪
دیوار خارجی	بازتاب ۶۰٪
سایه بان	بازتاب ۸۰٪

جدول ۳: تنظیمات پارامترهای شبیه‌سازی در دیسیم

Ambient Bounces (ab)	Ambient Divisions (ad)	Ambient Super-samples (as)	Ambient Accuracy (aa)	Ambient Resolution (ar)	Direct Relay (dr)	Direct Sampling (ds)
۶	۲۰۴۸	۲۰۴۸	۰.۲	۶۴	۲	۰.۲۵

۳-۳- اندازه‌گیری میدانی

قابل اطمینان‌تر، چراغ‌ها خاموش شدند و پرده‌ها عقب کشیده شدند. مقایسه سطوح روشنایی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده متوسط خطای^{۱۷} (MBE) ۰.۱۹ را نشان می‌دهد که در دامنه قابل قبولی است. خطای ± 0.20 ، برای بیشتر اهداف طراحی کافی است. MBE از طریق معادله ۱ محاسبه می‌شود، جایی که N تعداد نقاط حسگر، Es روشنایی شبیه‌سازی شده و Em روشنایی اندازه‌گیری شده است (Ibarra, 2013, pp. 1126-1135).

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (Es - Em/Em) \quad (1)$$

برای اطمینان از صحت نتایج شبیه‌سازی، ابتدا نتایج از طریق مطالعات میدانی اعتبارسنجی شدند. اندازه‌گیری‌های میدانی در یک روز آفتابی انجام شد (۱ دی ماه ۱۳۹۶). سطح روشنایی توسط نورسنج (accura- cy: 5% 10d (<10,000 Lux/fc ST-1301) در سه نقطه در سه منطقه جلو (A)، میانه (B) و دور (C) از پنجره بر روی سطوح میز (۰.۷۵ متر) هر ساعت از ۸:۰۰ تا ۱۳:۰۰ بعد از ظهر مورد سنجش قرار گرفت. برای دستیابی به نتایج

جدول ۴: سطوح روشنایی در شبیه‌سازی و اندازه‌گیری میدانی در مدل پایه در ۱ دی ماه

ساعت‌های اندازه‌گیری در تاریخ ۱ دی ماه	سطح روشنایی (لوکس)	نقطه A	نقطه B	نقطه C
۸:۰۰	اندازه‌گیری میدانی	۱۲۵.۰۲	۳۴.۷۷	۱۳.۱۵
	شبیه‌سازی	۱۴۵.۴۰	۴۲.۸۸	۱۵.۷۶
۹:۰۰	اندازه‌گیری میدانی	۳۱۲۱.۱۳	۴۳۰۱.۹۱	۷۲۸.۰۹
	شبیه‌سازی	۳۳۵۴.۲۰	۴۵۷۶.۹۹	۷۵۵.۲۳
۱۰:۰۰	اندازه‌گیری میدانی	۸۵۵۹.۲۴	۶۹۲۸.۲۵	۱۷۲۳.۷۱
	شبیه‌سازی	۸۹۰۰.۶۰	۷۱۰۲.۷۴	۱۹۵۷.۸۲
۱۱:۰۰	اندازه‌گیری میدانی	۸۷۸۷.۸۷	۱۰۰۱۸.۴۹	۲۰۱۶.۱۵
	شبیه‌سازی	۹۱۵۰.۶۳	۱۰۲۰۱.۲۲	۲۱۲۰.۰۶
۱۲:۰۰	اندازه‌گیری میدانی	۱۲۴۶۸.۵۱	۱۲۰۸۲.۴	۲۲۸۴.۴۱
	شبیه‌سازی	۱۲۸۷۰.۳۲	۱۲۱۱۰.۴۹	۲۵۷۳.۳۵
۱۳:۰۰	اندازه‌گیری میدانی	۱۰۰۸۳.۵۱	۱۲۰۴۱.۵۲	۲۲۷۴.۴۵
	شبیه‌سازی	۱۰۴۰۳.۷۶	۱۲۱۰۵.۳۹	۲۵۸۰.۰۹

برای کنترل پارامترهای هندسی استفاده شد. به طور پیوسته، پلاگین هانی بی و لیدی باگ برای شبیه‌سازی نور روز استفاده شد و بعد نتایج به دی سیم وارد شد تا تحلیل سالانه نور روز با استفاده از وضوح شبکه ۱ متر و گام زمانی ساعتی در ۴۸ نقطه انجام شود. پارامترهای شبیه‌سازی در دی سیم همان‌گونه که در جدول ۳ نشان داده شده است تنظیم شده است. شبیه‌سازی بر روی رایانه‌ای با پردازنده core i7 با RAM: 16 GB و گرافیک 1.70 و hard SSD (WWR) 256، انجام شد. نسبت مساحت پنجره به دیوار (WWR) به‌عنوان تنها متغیر مستقل تنظیم شد.

شکل ۶: شاخص‌بندی پنجره در مدل‌ها جهت شبیه‌سازی

WWR	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%
WWR	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%

توسط منبع نور است. به طور کلی، هر مقدار DGPs زیر ۰.۳۵ مربوط به حساسیت خیرگی «غیرمحسوس» است، بین ۰.۳۵ و ۰.۴۰ «محسوس» و بین ۰.۴۰ و ۰.۴۵ «مزاحم» است، در حالی که بالاتر از ۰.۴۵ «غیر قابل تحمل» است. در این مطالعه، فرض شده است که مقادیر بالای $DGPs > 0.35$ نه تنها با خیرگی محسوس، که منجر به عدم آسایش احتمالی بصری می‌شود، بلکه همچنین با تقاضای انرژی بالا برای سرمایش در ارتباط است، که به خاطر سادگی، به طور جداگانه محاسبه نمی‌شود.

- مصرف سالانه انرژی روشنایی^{۱۹} (EL): کل تقاضا برای انرژی الکتریکی نورپردازی در یک سال است و با واحد kWh/m^2 محاسبه می‌شود.

۴. یافته‌ها

مقادیر ماکزیمم و مینیمم و میانگین شدت روشنایی بر حسب لوکس به‌دست آمده از شبیه‌سازی مربوط به نسبت‌های مختلف WWR در شکل ۷ نشان داده شده است. همچنین مقادیر به‌دست آمده از محاسبه شاخص‌های پویای ارزیابی شدت روشنایی در شکل ۸ نشان داده شده است. نتایج در دو گروه مورد ارزیابی قرار گرفت. در قسمت اول روند تغییرات پنج شاخص پویای ارزیابی شدت روشنایی شامل UDI_{avg} , $sUDI$, DA_{avg} , sDA , cDA مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که شکل ۹ دیده می‌شود نمودار به وضوح نشان می‌دهد که با افزایش WWR، شاخص‌های ارزیابی نور روز بدون معیار حداکثر، در این مورد $sDA300lx$ ، $DA300lx$ و $cDA300lx$ نیز افزایش می‌یابند، زیرا نور روز بیشتری به داخل فضا نفوذ می‌کند. عدم وجود حد بالا برای این شاخص‌ها مقایسه عملکرد نسبت‌های بزرگ WWR را دشوار می‌سازد. در عین حال، $UDI_{avg}300-2000lx$ نیز روندی افزایشی

۳-۴- شبیه‌سازی پارامتریک

روش شبیه‌سازی پارامتریک می‌تواند برای بهبود عملکرد ساختمان مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به این روش، ورودی هر متغیر برای دیدن تأثیر بر روی اهداف طراحی تغییر داده می‌شود، در حالی که تمام متغیرهای دیگر ثابت نگاه داشته می‌شوند. این شیوه را می‌توان مکرراً با متغیرهای دیگر تکرار کرد. از آنجا که تنها چند ابزار می‌توانند شاخص‌های جدید مبتنی بر اقلیم را محاسبه کنند، برای این شبیه‌سازی، نرم‌افزار گرافیکی گرسپا

۳-۵- شاخص‌های ارزیابی نور روز

شاخص‌های پویای مورد استفاده در این پژوهش شامل شاخص DA و شاخص‌های مبتنی بر آن یعنی sDA ، cDA و همچنین شاخص UDI و شاخص مبتنی بر آن یعنی $sUDI$ می‌باشد که در بخش مقدمه معرفی شده‌اند. حد بالا و پایین شاخص‌ها بر اساس مطالعات صورت گرفته بر ادبیات موضوع به ترتیب ۲۰۰۰ و ۳۰۰ لوکس تعیین شد. در مورد انتخاب ۲۰۰۰ لوکس به‌عنوان آستانه بالا بحث‌های زیادی وجود دارد که آیا واقعا مقادیر بیش از آن موجب ایجاد خیرگی یا گرمایش بیش از حد خواهند شد یا نه. هم اکنون تحقیقات کمی برای حمایت از انتخاب ۲۰۰۰ لوکس به‌عنوان یک آستانه بالا وجود دارد. آستانه پایین در این پژوهش هماهنگ با سایر مطالعاتی که در مورد مکان‌های آموزشی انجام شده‌اند و هماهنگ با توصیه‌های استاندارد بر روی ۳۰۰ لوکس تنظیم شده است (Costanzo, Evola, Marletta, & Panarelli, 2017, pp.57-58). همچنین در راستای اهداف پژوهش جهت درک رابطه همبستگی بین شاخص‌های ارزیابی شدت روشنایی با مؤلفه‌های آسایش ساکنین دو شاخص شامل شاخص خیرگی و شاخص مصرف انرژی نیز محاسبه شده‌اند که به شرح زیر می‌باشند:

- احتمال خیرگی نور روز ساده شده^{۱۸} (DGPs): که ساده‌سازی شاخص DGP است یعنی درصد زمان اشغال شده در سال که در آن احتمال خیرگی نور روز بیش از ۰.۳۵ است. محاسبه DGPs در ارتفاع ۱.۲۰ متری بالاتر از کف فرض می‌شود، که مطابق با سطح چشم معمول هنگام نشستن است. این شاخص از طریق معادله ۲ محاسبه می‌شود.

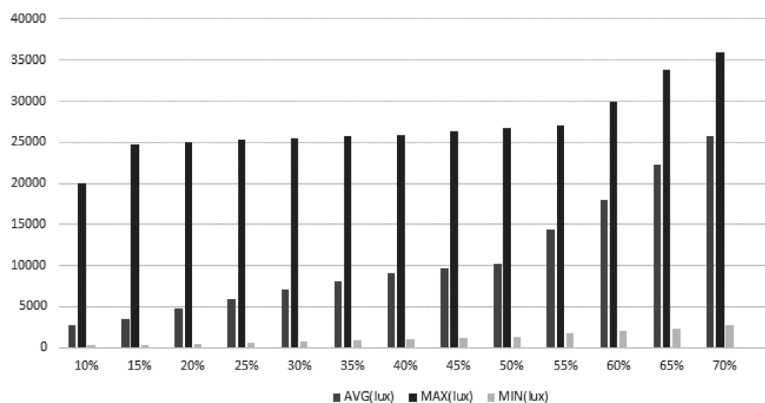
$$DGPs = 6.22 \times 10^{-5} E_v + 0.184$$

E_v نشان دهنده روشنایی عمودی چشم بر حسب لوکس

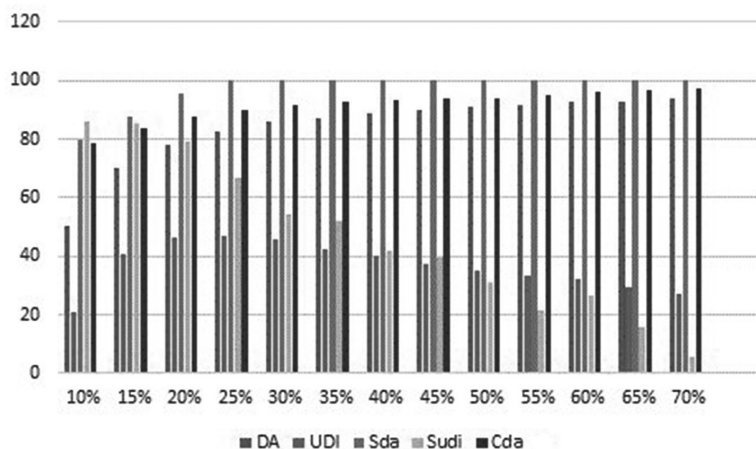
می‌شود را محاسبه می‌کند. این باعث می‌شود که SUDI نسبت به UDİ دقت کمتری داشته باشد. افزایش تراکم شبکه نقطه حسگر می‌تواند دقت SUDI را افزایش دهد، اما همچنین زمان محاسبه را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد.

دارد اما در نسبت‌های WWR بالاتر از ۲۰ درصد کاهش می‌یابد. شاخص sUDI300-2000lx نیز روندی کاهشی دارد. در مقایسه SUDI و UDİ avg، شاخص UDİ avg روند کاهش ملایمی دارد، در حالی که SUDI کاهشی پر شتاب‌تری را نشان می‌دهد. این موضوع به این دلیل است که SUDI مقدار نقاط فضا که نیاز نور روز در آن‌ها تأمین

شکل ۷: مقادیر شدت روشنایی شاکله‌بندی‌های مختلف پنجره بر حسب لوکس



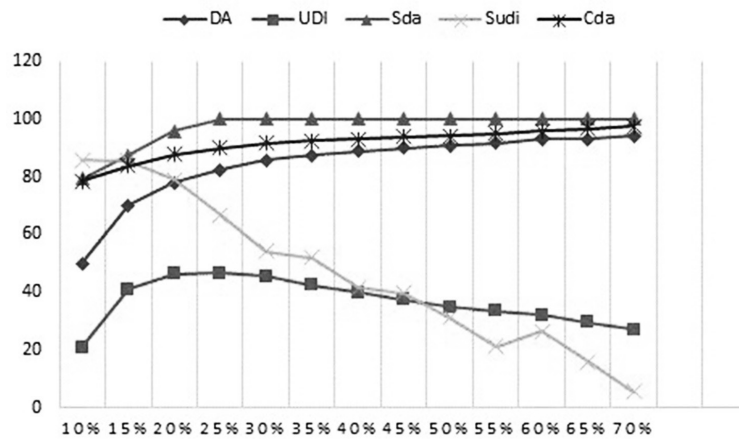
شکل ۸: مقادیر شاخص‌های پویای ارزیابی شدت روشنایی نور روز برای نسبت‌های مختلف



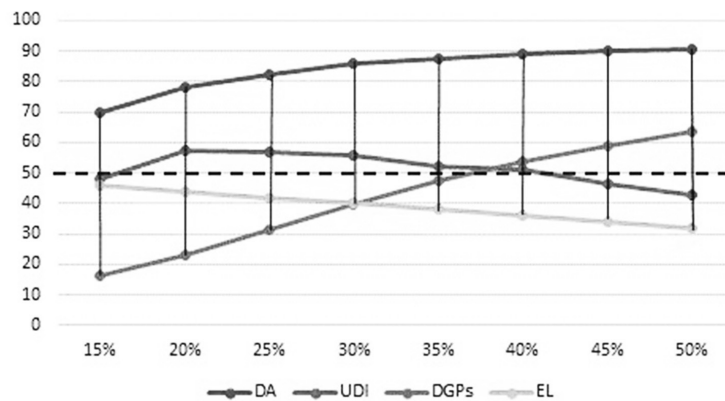
تقاضای انرژی روشنایی سالانه EL به طور طبیعی در WWR های بزرگتر کاهش می‌یابد. با این حال، اگر EL به احتمال افزایش تقاضای انرژی سرمایه‌گذاری در WWR بزرگتر اضافه شود، که با افزایش شاخص خیرگی $DGPs > 0.35$ نشان داده می‌شود، تقاضای انرژی کل نیز به طور بالقوه افزایش می‌یابد. باید توجه داشت که مقدار دقیق تقاضای انرژی سرمایه‌گذاری در این مطالعه محاسبه نشده است، زیرا هدف این است که ارتباط بین متغیرهای مرتبط با استفاده از رویکرد ساده تعیین شود.

در قسمت دوم روند تغییرات دو شاخص اصلی DA و UDİ در مقایسه با روند تغییرات شاخص خیرگی DGPs و شاخص مصرف انرژی EL مورد بررسی قرار گرفت. نمودار حاصل در شکل ۱۰ به وضوح نشان می‌دهد که با افزایش WWR، در مقابل افزایش شاخص DA300lx و در عین حال کاهش شاخص UDİ300-2000lx در نسبت‌های WWR بالاتر از ۲۰ درصد، شاخص خیرگی $DGPs > 0.35$ افزایش می‌یابد به این دلیل که نور روز بیشتری در محدوده بالاتر از 2000 lux به سطح کار می‌رسد، که نشان دهنده بیشتر شدن خطر خیرگی و گرمایش بیش از حد است.

شکل ۹: نمودار روند تغییرات شاخص‌های پویای ارزیابی شدت روشنایی نور روز بر اساس تغییرات نسبت WWR



شکل ۱۰: نمودار مقایسه تغییرات روند شاخص DA و UDI با شاخص‌های خیرگی DGPs و انرژی EL



روشنایی نور روز واقع‌بینانه که با زمان تغییر می‌کند، در نظر گرفته شده باشد، باید به طریقی برای محدوده وسیعی از مقادیر نور روز در طبیعت باشد. در واقع به جای یک مقدار آستانه (مانند: DA)، میزان وقوع یک طیف از روشنایی (مانند: UDI) شاخص مفیدتری را فراهم می‌کند. عدم وجود حد بالا برای شاخص DA و شاخص‌های مبتنی بر آن یعنی SDA و cDA ارتباط آن‌ها را با مؤلفه‌های مربوط به آسایش ساکنین از بین می‌برد. در مقایسه شاخص UDI به علت همبستگی با شاخص‌های خیرگی می‌تواند نشان دهنده میزان تمایل به وقوع عدم آسایش ساکنین و همچنین میزان مصرف انرژی باشد. شاخص UDI هم از نظر اطلاعات و هم عدم نیاز به تجهیزات ساده است و فقط کمی پیچیده‌تر از روش کفایت نور روز است، اما در عین حال می‌تواند بینش بسیار وسیع‌تری را در تغییرات فضایی- زمان روشنایی نور روز ایجاد کند. بنابراین، در مقایسه با DA و شاخص‌های مبتنی بر آن، شاخص UDI شامل عوامل نشان‌دهنده تمایل به وقوع عدم آسایش ساکنین نیز می‌باشد. همچنین در میان شاخص‌های مبتنی بر UDI شاخص sUDI جهت دستیابی به دقتی مشابه شاخص UDI avg به افزایش تراکم شبکه نقاط حسگر نیازمند است که زمان محاسبه را به‌طور قابل

خطوط روند EL و $DGPs > 0.35$ جایی در اطراف WWR ۳۰ درصد از هم عبور می‌کنند که نشان‌دهنده نقطه‌ای است که حداقل تقاضای انرژی روشنایی کل به دست می‌آید. در WWR ۳۰ درصد و ۴۰ درصد، میانگین مقادیر $UDI_{300-2000lx}$ بیشتر از معیار حداقل ۵۰ درصد است، که نشان دهنده مقدار کافی نور روز است. در جایی بین WWR ۳۵ درصد و ۴۰ درصد، $UDI_{300-2000lx}$ و $DGPs > 0.35$ مقدار ۵۰ درصد دارند. در نسبت‌های بالاتر WWR $DGPs > 0.35$ بزرگتر از ۵۰ درصد است، که در طی بیش از نیمی از زمان اشغال، خطر خیرگی و گرمایش بیش از حد را به همراه دارد.

۵. بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش در راستای شناخت و مقایسه کارایی شاخص‌های پویای ارزیابی شدت روشنایی، تلاش نمود تا روند تغییرات شناخته شده‌ترین شاخص‌ها یعنی DA و UDI و شاخص‌های مبتنی بر آن‌ها شامل sUDI, DA, cDA, SDA بر اساس تغییر پارامتر WWR شاکله پنجره را از طریق تحلیل حساسیت پارامتریک بر روی مدل یک کلاس درس جنوبی در اقلیم تهران معرفی نماید. نتایج نشان دادند، هر شاخص پیشنهادی که جهت سنجش

اما نفوذ مستقیم خورشید نیز ممکن است برای گرم شدن در زمستان در آب‌وهوای سرد مطلوب باشد. بنابراین باید بررسی‌های بیشتری از طریق ارزیابی‌های میدانی رفتار ساکنین جهت سنجش کارایی شاخص‌های پویا صورت گیرد. انجام مطالعات بیشتر همچنین می‌تواند تعریف انعطاف‌پذیری از معیارهای پویا را در مناطق مختلف ارائه دهد.

توجهی افزایش می‌دهد. بنابراین شاخص UDI_{avg} برای واحدهای کوچک فضایی، که تعداد نقاط سنور کاملاً محدود است مناسب‌تر است.

همچنین باید توجه نمود که UDI به‌عنوان شاخص ارزیابی نور روز همچنین با محدودیت‌هایی در زمینه مقادیر حد روشنایی مواجه است و مقادیر آستانه از نظر تحقیقات مختلف متفاوت است. اگرچه در ابتدا حد بالای UDI برای جلوگیری از تابش خورشید ناخواسته تنظیم شد؛

پی‌نوشت

1. Daylight Autonomy
2. Useful Daylight Illuminance
3. Honeybee
4. Ladybug
5. Window- to-Wall Ratio
6. Daylight
7. Uniformity
8. Climate-Based Daylight Modelling

۹. DA توسط رینهارت و والکنهورست، به‌عنوان درصد ساعات اشغال سال که آستانه حداقل روشنایی تنها با نور روز تأمین می‌شود، تعریف شده است (Reinhart & Walkenhorst, 2001, p. 689). UDI پیشنهاد شده توسط مردالویچ و نیبل به‌عنوان کسری از زمان در یک سال تعریف شده است، که روشنایی افقی نور روز در یک نقطه داده شده در داخل در یک محدوده مشخص شده قرار دارد (Nabil & Mardaljevic, 2005, p. 47).

10. Illuminating Engineering Society of North America
11. Continuous Daylight Autonomy
12. Spatial Daylight Autonomy
13. Lisa Heschong
14. Spatial Useful Daylight Illuminance
15. <http://www.tehran.climatemps.com/sunlight.php>
16. https://fa.wikipedia.org/wiki/جغرافیای_تهران
17. Mean Bias Error
18. Daylight Glare Probability
19. Total Annual Lighting Energy Demand

REFERENCES

- Bourgeois, D., Reinhart, C., & Ward, G. (2008). Standard Daylight Coefficient Model For dynamic Daylighting Simulations, *Build. Res. Inf.*, 36(1), 68-82. DOI: [10.1080/09613210701446325](https://doi.org/10.1080/09613210701446325)
- Cantin, F., & Dubois, M.C. (2011). Daylighting Metrics Based on Illuminance, Distribution, Glare and Directivity, *Light. Res. Technol.*, 43(3), 291-307. DOI: [10.1177/1477153510393319](https://doi.org/10.1177/1477153510393319)
- Carlucci, S., Causone, F., De Rosa, F., & Pagliano, L. (2015). A Review of Indices for Assessing visual Comfort With a View to Their Use in Optimization Processes to Support building Integrated Design, *Renew. Sustainable Energy Rev.*, 47, 1016-1033. <https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v47y2015icp1016-1033.html>
- Costanzo, V., Evola, G., Marletta, L., & Panarelli, D. (2017). Static and Dynamic Strategies for Improving Daylight use in Side-Lit Classrooms: A Case Study, In Proceedings of the BSA 2017-3rd IBPSA Italy Conference, Bozen, Italy, 8-10.
- Gherri, B. (2015). Assessment of Daylight Performance in Buildings (Methods and Design Strategies), University of Parma, Italy, WIT Press, 100-220.
- Ibarra, D. (2013). Teaching Daylight Simulations Improving Modeling Workflows for Simulation Novices, Proceeding of BS2013, 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, (Chambery, France), 1126-1135.
- Konis, K., Gamas, A., & Kensek, K. (2016). Passive Performance and Building Form: An optimization Framework for Early-Stage Design Support, *Sol. Energy*, 125, 161-179.
- Mardaljevic, J., Hescong, L., & Lee, E. (2009). Daylight Metrics and Energy Savings, *Light. Res. Technol.*, 41(3), 261-283. <https://wem.lbl.gov/sites/default/files/lbnl-4585e.pdf>
- Nabil, A., & Mardaljevic, J. (2005). Useful Daylight Illuminance: A New Paradigm For assessing Daylight in Buildings, *Light. Res. Technol.*, 37(1), 41-57. DOI: [10.1191/1365782805li128oa](https://doi.org/10.1191/1365782805li128oa)
- Piderit Moreno, M.B., & Labarca, C.Y. (2015). Methodology for Assessing Daylighting design Strategies in Classroom with a Climate-Based Method. *Sustainability*, 7(1), 880-897. DOI: [10.3390/su7010880](https://doi.org/10.3390/su7010880)
- Reinhart, C., Mardaljevic, J., & Rogers, Z. (2006). Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design. *Leukos*, 3(1), 7-31. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.458.8133&rep=rep1&type=pdf>
- Reinhart, C., Rakha, T., & Weissman, D. (2014). Predicting the Daylit Area—a Comparison of Students Assessments and Simulations At Eleven Schools of Architecture. *Leukos*, 10(4), 193-206. DOI: [10.1080/15502724.2014.929007](https://doi.org/10.1080/15502724.2014.929007)
- Reinhart, C., & Walkenhorst, O. (2001). Validation of Dynamic Radiance-Based Daylight Simulations for a Test Office with External Blinds. *Energy Build.*, 33(7), 683-697. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00058-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00058-5)
- Reinhart, C., & Weissman, D. (2012). The Daylit Area—Correlating Architectural student Assessments with Current and Emerging Daylight Availability Metrics, *Build. Environ.*, 50, 155-164. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.10.024>
- Ruck, N., Aschehoug, O., Aydinli, A., Christoffersen, J., Courret, G., Edmonds, I., Jakobiak, R., Kischkoweit-Lopin, M., Klinger, M., Lee, E., Michel, L., Scartezini, J.L., & Selkowitz, S. (2000). Daylight in Buildings: A Source Book on Daylighting Systems and Components, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA, 103-1030.
- Standard IES LM-83-1. (2012). Approved Method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure, (ASE), Illuminating Engineering Society: New York, NY, USA.
- U. ASHRAE, CIBSE. (2010). Performance Measurement Protocols for Commercial Buildings.
- Zomorodian, Z.S., & Tahsildoost, M. (2017). Assessment of Window Performance in Classrooms by Long Term Spatial Comfort Metrics. *Energy Build.*, 134, 80-93. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.018>
- <http://www.tehran.climatemps.com/graph.ph>

نحوه ارجاع به این مقاله

محمدی، فیروزه؛ مفیدی شمیرانی، سید مجید و طاهباز، منصوره. (۱۳۹۹). بررسی و تحلیل کارایی شاخص‌های پویایی ارزیابی عملکرد نور روز (کفایت نور روز و روشنایی مفید نور روز) از طریق تحلیل حساسیت، مورد مطالعاتی: کلاس درس ابتدایی در تهران. نشریه معماری و شهرسازی آرمان‌شهر، ۱۳(۳۱)، ۱۴۵-۱۵۶.

DOI: 10.22034/AAUD.2020.113264

URL: http://www.armanshahjournal.com/article_113264.html