تبیین مؤلفه‌های معماری داخلی مبتنی بر روشنایی غیر بصریِ هدفمند

(موردپژوهی: کلاس درس دبستان‌های تهران)

محیا چشمه نور[1]، سید عباس یزدانفر[2] و فاطمه مهدیزاده سراج[3*]

تاریخ دریافت: 1402/04/04
تاریخ پذیرش: 1402/11/29
(صفحات 206-183)

چکیده:

مقدمه: روشنایی غیر بصری موضوعی است که ریشه در مطالعات علوم پزشکی دارد و اهمیت بهره‌گیری از آن در سال‌های اخیر در حوزه بین‌المللی معماری، مطرح و روبه‌رشد است. اما بررسی‌های اولیه نشانگر شناخت اندک از این موضوع در مطالعات معماری داخل کشور است. هدف این تحقیق تبیین مؤلفه‌های روشنایی غیر بصری و بهره‌گیری از برخی عوامل آن در معماری است. مرور محتوایی بر مبانی نظری نشان می‌دهد پارامترهای طیف، شدت، زمانبندی، مدت‌زمان، جهت و سابقه نور برای اثربخشی در روشنایی غیر بصری بسیار متفاوت از روشنایی شناخته شده بصری است.

روش تحقیق: این پژوهش نخست با مطالعه‌ای کتابخانه‌ای و مروری محتوایی بر پیشینه موضوع و مبانی نظری موجود، عوامل مؤثر طراحی بر روشنایی غیر بصری را شناسایی و سپس در بین این عوامل، اثر رنگ سطوح داخلی را در مدل کلاس درس با شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار آلفا[1] (پلاگین راینو برای تحلیل‌های روشنایی غیر بصری) بررسی کرده است. همچنین در این پژوهش، عوامل جهت دید و فاصله از پنجره در آزمایشی میدانی در یک کلاس درس با اندازه‌گیری توسط دستگاه اسپکترومتر (طیف‌سنج) ارزیابی شد. در پایان، اثر این عوامل توسط برخی از شاخص‌های روشنایی غیر بصری نظیر روشنایی معادل ملانوپیک (EML[2])، روشنایی نور روز معادل ملانوپیک (M-EDI[3]) و محرک سیرکادین (CS[4]) اندازه‌گیری شد.

نتایج و بحث: در بین مؤلفه‌های تحقیق بررسی بر روی رنگ سطوح، جهت دید و فاصله ناظر از پنجره نشان می‌دهند رنگ‌های زرد و سبز با وجود تولید روشنایی بصری لازم برای 100% نقاط مورد مطالعه در فضا، در ایجاد برخی شاخص‌های روشنایی غیر بصری کافی برای تمام فضا ناکارآمدند (تأمین EML استاندارد برای 90% و 81% فضا توسط رنگ سبز و زرد). رنگ آبی نیز روشنایی بصری و EML لازم را به ترتیب برای حدودا 72% و 96% از نقاط مورد بررسی در فضا تأمین می‌کند که در ایجاد روشنایی بصری کافی پایین‌ترین عملکرد را دارد، اما در تأمین EML در نقاط منتخب مورد مطالعه نسبت به سبز و زرد قابلیت بهتری دارد. رنگ سفید با تأمین 100% روشنایی بصری و غیر بصری مناسب‌ترین انتخاب است. همچنین در میزان روشنایی غیر بصری دریافتی ناظر در جهت دید رو به پنجره نسبت به جهت دید رو به تخته اختلاف قابل‌توجهی وجود دارد. جهت دید رو به پنجره و نزدیک به پنجره دریافت بیشتری از اثرات غیر بصری نور دارند که در صورت استفاده از پنجره‌های جنوبی لازم است ملاحظات خیرگی لحاظ شود.

نتیجه‌گیری: در مجموع، نتایج به‌دست آمده اهمیت نقش عوامل بررسی شده در میزان اثرات غیر بصری نور را نشان می‌دهند.

واژگان کلیدی: روشنایی غیر بصری، روشنایی معادل ملانوپیک، سیرکادین، طراحی داخلی، کلاس درس.

مقاله حاضر برگرفته از رساله دکتری نگارنده اول با عنوان " متغیرهای کالبدی اثرگذار برای دستیابی به بیشینه روشنایی نور روز معادل ملانوپیک و کمینه خیرگی؛ موردپژوهی: کلاس درس دبستان‌های تهران" تحت راهنمایی نگارندگان دوم و سوم است.

[1] **دانشجوی دکتری معماری**، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
[2] **دانشیار**، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
[3] **استاد**، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، (نویسنده مسئول) mehdizadeh@iust.ac.ir

1– مقدمه

نور و روشنایی نه تنها برای بینایی بلکه برای بسیاری از سازوکارهای غیر بینایی بدن و تنظیم هورمون‌ها مفید و مؤثر است. شب‌هنگام زمانی که هورمون ملاتونین در بدن شروع به ترشح می‌کند تا به بالاترین سطح خود برسد، فرد احساس خواب‌آلودگی می‌کند و زمانی که روشنایی نور روز پدیدار می‌شود، ترشح ملاتونین متوقف شده و سطح آن در بدن شروع به کاهش می‌کند. ملاتونین در تنظیم ریتم سیرکادین[5] و چرخه خواب‌وبیدار و عملکرد سلول های ایمنی بدن اهمیت ویژه‌ای دارد (Megha et al., 2024). کلمه سیرکادین (circadian) از ریشه لاتین "circa" به معنی حدود و "diem" به معنی روز آمده است و به ریتمی با چرخه 24 ساعته گفته می‌شود (Britannica, 2019). ریتم سیرکادین که چرخه ذاتی 24 ساعته در بدن استو توسط ناحیه کوچکی در وسط مغز کنترل می‌شود، فرآیندهای بیولوژیکی مختلفی از جمله خواب، بیداری، فعالیت گوارشی و هورمونی را کنترل یا آغاز می‌کند. تغییر از تاریکی به روشنایی در شبانه روز می‌تواند یک سیگنال طبیعی برای الگوی سیرکادین باشد (Britannica, 2020).

مطالعات نشان می‌دهند که انسان در طول روز زمان زیادی را در فضای داخل سپری می‌کند (Walden, 2018). به همین جهت مکان‌ها و ساختمان‌هایی که روشنایی کافی را تأمین نمی‌کنند، ساکنان آن‌ها با مشکل عدم هوشیاری در طول روز یا اختلال در ریتم سیرکادین خواب‌وبیداری روبرو هستند. اختلال در چرخه سیرکادین می‌تواند خطر ابتلا به بیماری‌های مختلفی از جمله سرطان را بالا ببرد (Zhou et al., 2022). اثر غیر بصری نور تنها محدود به مباحث خواب‌وبیداری نمی‌شود. مطالعات نشان می‌دهند سطح هورمون دوپامین تحت تأثیر نور تغییر می‌کند و اختلال در عملکرد آن می‌تواند باعث بروز بسیاری از بیماری‌های روحی و جسمی مانند شیزوفرنیا، پارکینسون، افسردگی، چاقی، مشکلات گوارشی و اختلال در عملکرد ذهن شود (Zia Sherrell, 2022). در یک مطالعه مروری بر روی کیفیت نور در خانه و سلامت نشان داده شد که بین نور طبیعی و بهبود سلامت جسمی، روانی و خواب ارتباط مثبت وجود دارد (Osibona et al., 2021).

به همین دلیل توجه به تأثیر غیر بصری نور روز نمی‌تواند اهمیت کمتری نسبت به اثر بصری آن در طراحی فضای زیست انسان داشته باشد. این در حالی است که نگاه اجمالی به منابع موجود نشان می‌دهد توجه به اثر غیر بصری نور سهم بسیار کمتری در مطالعات بین‌المللی روشنایی معماری داشته است. طبق آمار پایگاه وب‌اف-ساینس[6]، کشور ایران جزء 20 کشور اول در حوزه روشنایی بصری است؛ اما طبق آمار مشابه در حوزه روشنایی غیر بصری در معماری چنین جایگاهی را ندارد. احتمالا یکی از دلایل نسبت بسیار کم مطالعات حوزه روشنایی غیر بصری، مطرح شدن آن در دهه‌های اخیر است که به دلیل یافته‌های جدیدتر آن نسبت به روشنایی بصری هنوز به میزان قابل قبولی دست نیافته است. از سویی یافته‌های این حوزه که از علوم پزشکی و بیولوژی به دست می‌آیند همچنان در حال به‌روزرسانی و پیشرفتند؛ بنابراین به بیانی این موضوع در حوزه معماری می‌تواند به عنوان موضوعی پیشرفته[7] قلمداد شود. همچنین بررسی‌های بیشتر نیز در بین پایگاه‌های داخلی نظیر مگیران، پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID) و نورمگز نشان می‌دهند که موضوعاتی چون روشنایی و تغییرات ملاتونین، ریتم سیرکادین خواب‌وبیدار بدن و هوشیاری در حوزه معماری تا حدودی مهجور مانده‌اند؛ عمده‌ترین رویکرد مطالعات داخلی به موضوع غیر بصری نور محدود به اثرات کیفی روان‌شناختی است که عموما با مقیاس‌ها و روش‌های متداول اندازه‌گیری روشنایی بصری بررسی‌شده‌اند و ارزیابی بعد بیولوژیکی نور که به طور جدی‌تری بر پایه داده‌های کمی و یافته‌های علمی علوم پزشکی است کم‌رنگ می‌نماید.

بنابراین، در گام نخست لازم است شناخت مناسبی از این موضوع پدید آید؛ لذا سوألی که مطرح می‌شود این است که روشنایی غیر بصری چیست و چگونه می‌توان از آن در معماری بهره جست؟ با شناسایی و استخراج مؤلفه‌های روشنایی غیر بصری و عوامل مؤثر طراحی داخلی بر این روشنایی، در گام دوم یک نمونه فضای

داخلی تحت ارزیابیِ اثر برخی از این عوامل با روش شبیه‌سازی و برداشت میدانی قرار می‌گیرد. تحقیقات پیمایشی نشانگر اهمیت توجه به روشنایی در فضاهای آموزشی از نظر کاربران است. میزان و شدت نور در فضای داخلی نقش مؤثری در کیفیت فضاهای آموزشی و رضایت کاربران دارد (Behzadpour and Khakzand, 2021). همچنین میزان رضایتمندی از کیفیت روشنایی کلاس ارتباط بالایی با موفقیت تحصیلی نشان می‌دهد (Vaziri and karamati, 2017). از این رو یک مدل و نمونه کلاس درس به عنوان نمونه فضای داخلی در این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

علاوه بر این، ازآنجاکه تاکنون روشنایی متداول بصری و شاخصه‌های اندازه‌گیری آن معرفی و بررسی شده‌اند، این پژوهش تلاش نموده با کمک مقایسه موردی عوامل روشنایی بصری با غیر بصری ، تفاوت‌ها و شاخص‌های مرتبط با روشنایی غیر بصری را بهتر تبیین نماید.

1-1- پیشینه تحقیق

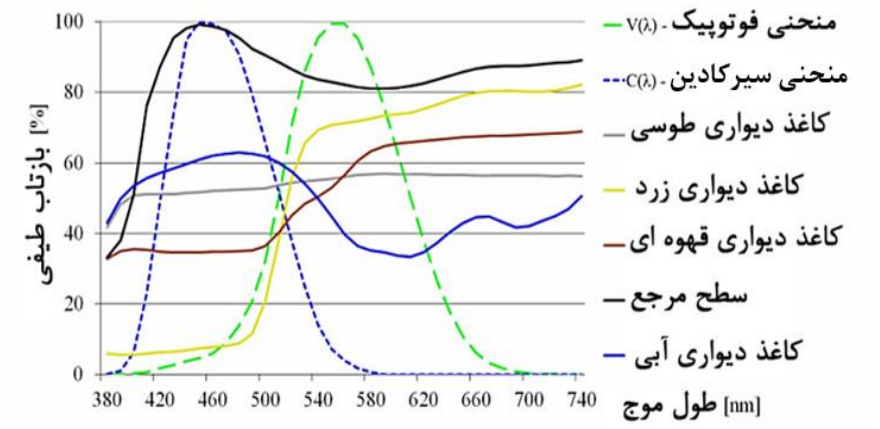
مطالعات انجام شده در زمینه روشنایی غیر بصری در دو حوزه علوم پزشکی و معماری قابل بررسی‌اند. مطالعات حوزه علوم پزشکی تمرکز بر اثر روشنایی بر حالات مختلف روحی-روانی و فیزیولوژیکی بدن دارند. این حالات شامل بررسی اثر روشنایی بر برخی هورمون‌ها، هوشیاری ذهنی و عملکردی، فعالیت نواحی مختلف مغز، ریتم‌های سیرکادین بدن نظیر چرخه خواب‌وبیداری است. در مطالعات مروری که در این حوزه انجام شده اثر طیف‌های مختلف نور با توجه به شدت و زمان تابش آن‌ها بر حالات بیولوژیکی بدن بررسی شده است (Golmohammadi et al., 2021; Tähkämö et al., 2019; Xiao et al., 2021). به عنوان مثال در پژوهش مروری نشان داده شد که طیف نور مختلف متناسب با زمان در معرض قرار گرفتن آن، اثرات متفاوتی بر میزان هوشیاری ذهنی و عملکردی می‌گذارد (Cheshmeh Noor et al., 2023) و یا نور با طول موج های کوتاه‌تر (دارای نمود آبی)، شدت بیشتر و دمای رنگ بالاتر منجر به افزایش توجه و زمان واکنش سریع‌تر می‌شود (Golmohammadi et al., 2021). همچنین برخی مطالعات این حوزه به بررسی پاسخ سلول‌های گیرنده نوری چشم و مشارکت آن‌ها در این مکانیسم‌های غیر بصری می‌پردازند (Bhoi et al., 2022; Tekieh et al., 2020). در این‌گونه مطالعات عموما منبع نور با ویژگی طیفی متناسب با حساسیت طیفی سلول‌ها (مانند رنگ‌های نور زرد، آبی، سبز، قرمز و سفید) مورد بررسی قرار می‌گیرند. جالب توجه است که مطالعات پژوهشی حوزه علوم پزشکی عموما با روش‌ها و شرایط آزمایشگاهی از قبیل قرارگیری منبع نور در مقابل چشم و کنترل شرایط آزمایش‌شوندگان انجام می‌گیرد که نیازمند تسهیل بیشتر ترجمه دانش آزمایشگاهی به محیط‌های خانگی و محل کار است (Vetter et al., 2022) .بنابراین با توجه به وابسته بودن اثر غیر بصری نور به شش مؤلفه توزیع توان طیفی، شدت، زمان، مدت‌زمان، جهت (توزیع فضایی) و سابقه آن، لازم است رویکرد طراحی فضا یا ارزیابی آن از منظر روشنایی غیر بصری با در نظر گرفتن این مؤلفه‌ها صورت پذیرد (Khademagha et al., 2016).

مطالعات معماری حوزه روشنایی غیر بصری نیازمند در نظرگرفتن ملاحظات طراحی است. در فضای داخلی نور نشأت گرفته از منبع روشنایی، پس از بازتاب از سطوح، به چشم انسان می‌رسد که رنگ سطوح داخلی و نازک‌کاری بر ترکیب طیفی نور بازتاب‌شده یا پراکنده‌شده تأثیر می‌گذارد (Kim et al., 2017). رنگ شیشه نیز بر ترکیب طیفی نوری که از خود عبور می‌دهد مؤثر است. در مطالعه‌ای نشان داده شد که شیشه با ضریب انتشار کم و شفافیت بصری بالا و همچنین دیوار آبی می‌تواند به طور مؤثری اثر غیر بصری نور را تقویت و از سوی دیگر، شیشه‌های برنزی محافظ خورشیدی و دیوار نارنجی این اثر را تضعیف می‌کند (Potočnik and Košir, 2020). علاوه بر این، شیشه آبی تیره با محرک سیرکادین پایین، تأثیر کمی در تنظیم ریتم سیرکادین دارد، درحالی‌که شیشه سبز و روشن، عملکرد و زمان واکنش را به میزان قابل توجهی بهبود می‌بخشد (Chen et al., 2019). در پژوهشی طی روش شبیه‌سازی با نرم‌افزار آلفا و با هدف ارزیابی تأثیر طراحی پارتیشن در دفاتر پلان باز بر روی روشنایی سیرکادین نشان داده شد که قابلیت اثر سیرکادین نور در فضای اداری با افزایش

انعکاس ملانوپیک جنس پارتیشن و کاهش ارتفاع پارتیشن افزایش می‌یابد (Anaraki et al., 2023).

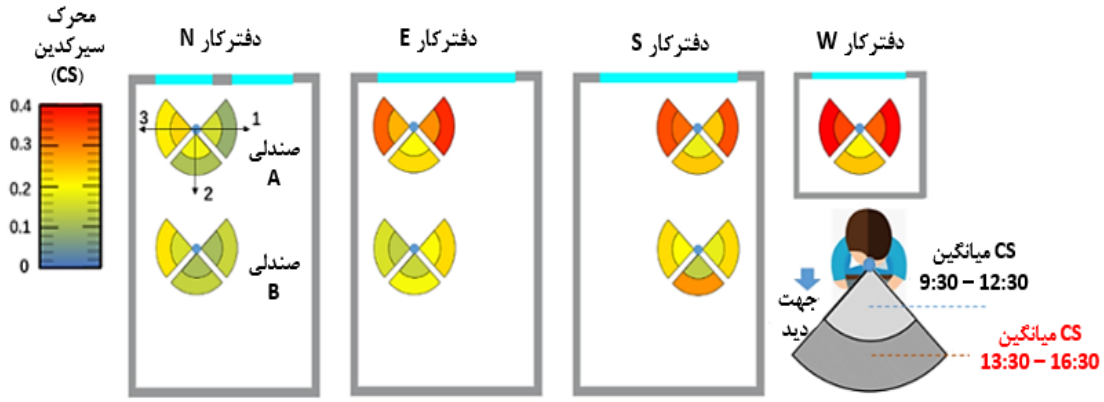
در مطالعه‌ای تجربی، راندمان سیرکادین پراکنش نور روز[8] تولید شده بر اساس بازتاب طیفی دیوارهایی با رنگ‌های مختلف توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان می‌دهند که رنگ زرد دیوارها با آن که دارای بازتاب بالای فوتوپیک (روشنایی بصری) (0.65) هستند اما بازتاب سیرکادین پایینی (0.15) را تولید می‌کند (Hartman et al., 2016). از سویی با آن که روشنایی فوتوپیک در مدلِ دارای دیوارهای آبی، پایین است، اما روشنایی سیرکادین بالایی دارد (شکل 1).

در مطالعه‌ای میدانی (Zeng et al., 2021) در اتاق‌های اداری با چهار جهت‌گیری جغرافیایی، تأثیر جهت دید و فاصله از پنجره بر روشنایی محرک سیرکادین توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر سنجیده شد. این پژوهش تحت شرایط آسمان صاف و ابری در ساعات مختلف روز انجام شد. نتایج نشان می‌دهند فضای کار نزدیک پنجره و جهت خط دید موازی با پنجره محرک سیرکادین بالاتری نسبت به بقیه دیدها تحت دو شرایط آسمان مورد مطالعه را دارند (مطابق شکل 2). در این پژوهش نویسندگان اذعان کردند زمانبندی، مدت زمان و سابقه در معرض روشنایی قرار گرفتن نیز در ارزیابی‌های اثر غیر بصری نور باید لحاظ شوند.



شکل 1- بازتاب طیف نور از سطوح مختلف از نظر اثر سیرکادین (Hartman et al., 2016)

Fig. 1- Reflection of light spectrum from different surfaces in terms of circadian effect



شکل 2- میانگین محرک سیرکادین برای هر جهت دید تحت شرایط آسمان ابری و روشنایی الکتریکی (Zeng et al., 2021)

Fig. 2- Average CS for each view direction under overcast sky and electric light condition

در تحقیقی با استفاده از روش شبیه‌سازی در نرم‌افزار آلفا نشان داده شد که نسبت سطح پنجره به دیوار و قابلیت عبور نور از شیشه، عوامل بسیار مؤثری در کیفیت بصری و غیر بصری نور فضای داخل هستند، اما اثر این عوامل وابسته به کاربری، عمق و هندسه فضا و جهت دید می‌باشند (Potočnik and Košir, 2021). در تحقیقی دیگر (Konis, 2016) در تعیین کیفیت روشنایی مدل کلاس درس، محقق با در نظر گرفتن ویژگی‌های کیفی نور در شش مورد طیف نور، جهت، زمان‌بندی و مدت‌زمان، سابقه و شدت نور و با تغییر سه متغیر ابعاد پنجره، نوع سایبان و جهت چیدمان میزهای مدرسه تلاش کرده تا بهترین حالت دریافت کیفیت نور را با روش شبیه‌سازی و آنالیزهای روشنایی با نرم‌افزار رادیانس و دیسیم به دست آورد. در این پژوهش درصدی از سال که حداقل آستانه محرک سیرکادین برای حداقل پنج روز در هفته (7 تا 10 صبح) به دست می‌آید، برررسی شده است.

علاوه بر تأثیر عوامل ذکر شده طراحی داخلی بر میزان دریافت روشنایی غیر بصری ، بافت شهری پیرامونی و انسداد بصری نسبت به آسمان می‌توانند قابلیت اثر سیرکادین نور در فضا را به طور قابل‌توجهی کاهش دهند (Altenberg Vaz and Inanici, 2021). به طور کل، عوامل طراحی و محیطی اثرگذار بر ویژگی های فیزیکی ذکر شده نور در شکل 3 آمده‌اند.

2-1- مبانی نظری پژوهش

همان‌طور که بیان شد، طیف نور، شدت نور، زمان‌بندی تابش نور، مدت‌زمان تابش نور، جهت نور و سابقه در معرض نور بودن، شش مؤلفه‌ای هستند که بر اثرات غیر بصری نور مؤثرند و طراحان می‌کوشند تا با درنظرگرفتن این شش ویژگی و ارتباط آن‌ها با طراحی معماری و یا رفتار انسان در فضا در جهت ارتقا روشنایی غیر بصری گام بردارند. بر این اساس، لازم است تا این ویژگی‌ها و نحوه بهره‌گیری از آنها شناسایی و تبیین شوند.

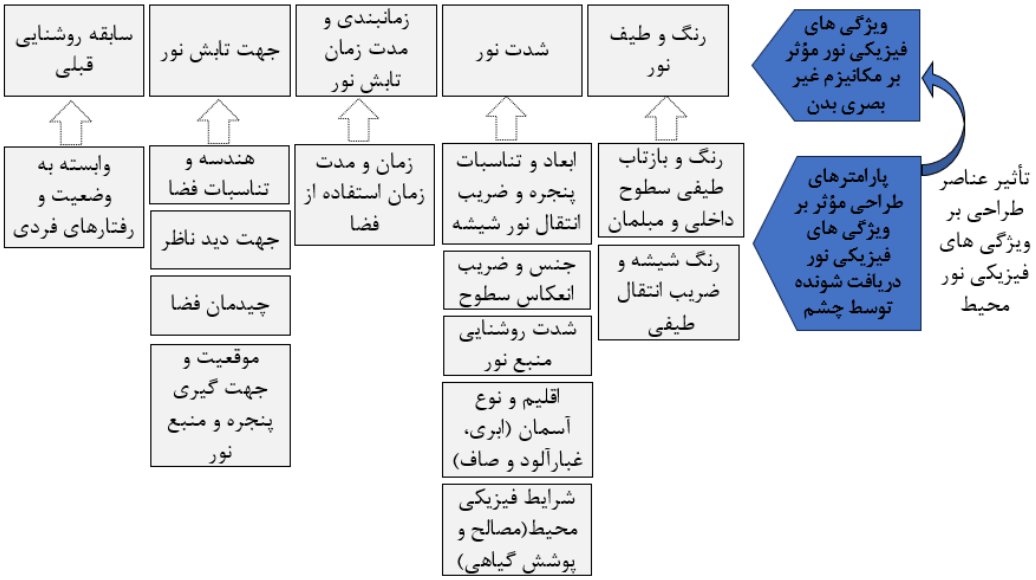
1-2-1- طیف نور

نوری که قابل رؤیت است، قسمتی از طیف الکترومغناطیس است که تقریبا در بازه طول موج‌های 400 تا 750 نانومتر قرار گرفته و به آن طیف مرئی می‌گویند (Lewis, 2023) (شکل 4). طول موج های نور هر کدام دارای رنگ مخصوص به خود هستند. چشم انسان نسبت به طول موج‌های مختلف از طیف مرئی نور، حساسیت و واکنش یکسانی را نشان نمی‌دهد و همین امر موجب شده تا شاخص‌ها و معیارهای اندازه‌گیری شدت نوری که توسط چشم انسان دریافت می‌شود، بر مبنای این تفاوت حساسیت‌ها و پاسخ‌های طیفی، تنظیم و وزن‌دهی شوند.

به بیان دقیق‌تر، نور در چشم انسان توسط سلول‌هایی موسوم به سلول‌های گیرنده نوری[9] دریافت می‌شود که به انواع میله‌ای[10]، مخروطی[11] و گانگلیونی شبکیه حساس به نورِ[12] دارای ملانوپسین[13] تقسیم می‌شوند.

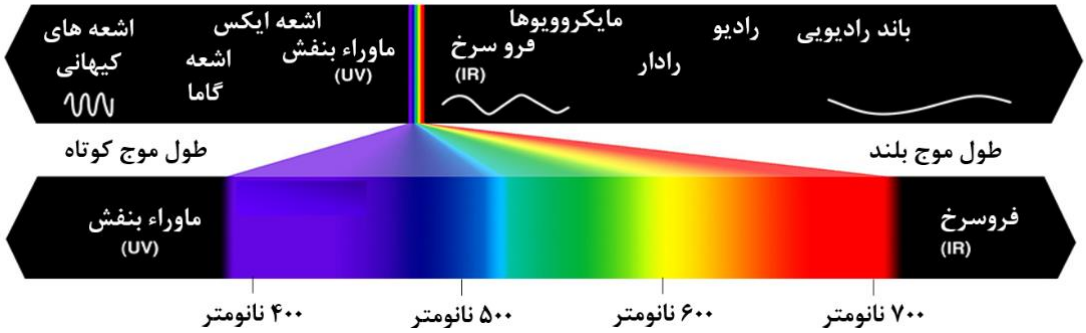
گیرنده‌های مخروطی خود به سه نوعِ حساس به نور با طول موج کوتاه[14]، متوسط[15] و بلند[16] دسته‌بندی می‌شوند. این 5 نوع گیرنده‌های نوری چشم از اجزائی به نام فوتوپیگمنت[17] تشکیل شده‌اند که به‌واسطه حساسیت آن‌ها نسبت به نور، نسبت به طیف خاصی از نور بیشترین واکنش را از خود نشان می‌دهند. فوتوپیگمنتِ گیرنده‌های میله‌ای، مخروطی و گانگلیونی به ترتیب میله‌ای، مخروطی و ملانوپسین نام دارند (Hart, 2009).

خاصیت فیلترکنندگی لنز مردمک چشم، طول موج وارده را تغییر می‌دهد که با در نظر گرفتن این ویژگی، سلول‌های میله‌ای در طول موج 507 نانومتر بیشترین حساسیت طیفی را نشان می‌دهند. همچنین بیشترین حساسیت طیفی سلول‌های مخروطی حساس به نور با طول موج کوتاه، متوسط و بلند به ترتیب در طول موج های 440، 545 و 565 نانومتر یافت می‌شود. سلول‌های ملانوپسین نیز در طول موج 480 نانومتر بیشترین حساسیت را نشان می‌دهند (Lucas et al., 2014) که با در نظر گرفتن خاصیت فیلترکنندگی لنز مردمک چشم بیشترین واکنش ملانوپسین به 490~ نانومتر می‌رسد (Brown et al., 2022) (شکل 5).



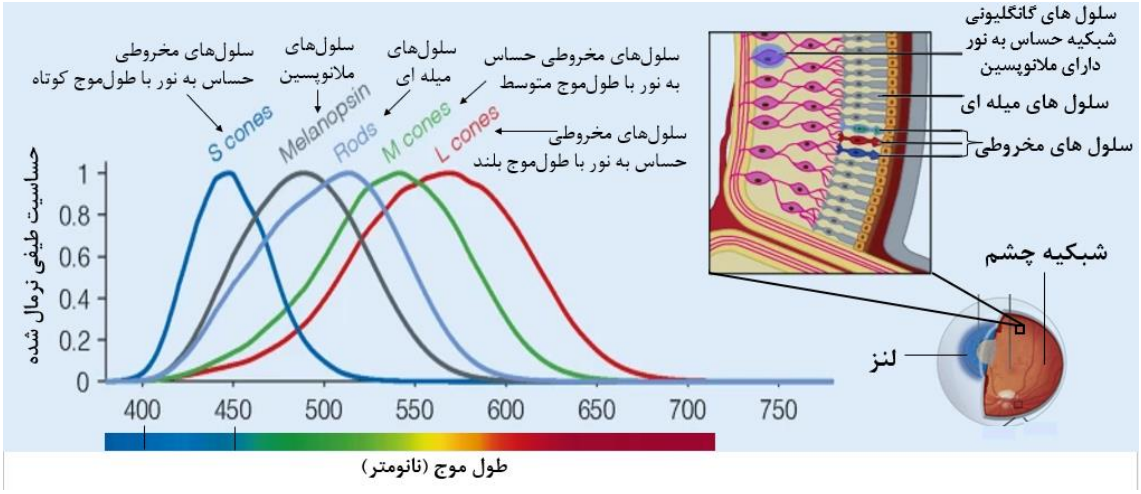
شکل 3- اثر عناصر طراحی و محیطی بر ویژگی‌های فیزیکی نور

Fig. 3- The impact of design and environmental elements on the physical properties of light



شکل 4- طیف الکترومغناطیس و بازه طیف مرئی (Lewis, 2023)

Fig. 4- Electromagnetic spectrum and visible spectrum range



شکل 5- برش شماتیک از گیرنده‌های نوری چشم و منحنی حساسیت طیفی هر کدام نسبت به نور (Blume et al., 2019)

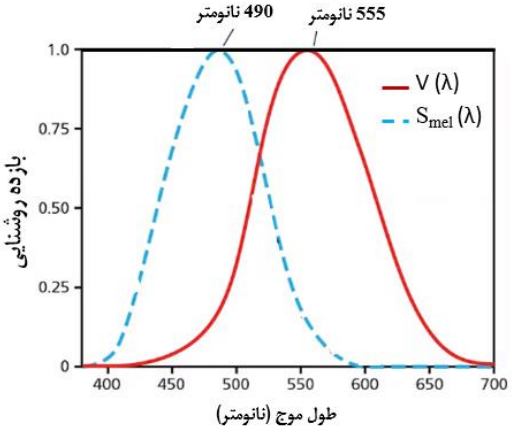
Fig. 5- Schematic section of the eye's photoreceptors and the spectral sensitivity curve of each to light

این سلول‌های گیرنده نور هر کدام با ارسال پیام به مغز سبب به راه افتادن مکانیزم‌های مختلفی در مغز و بدن می‌شوند که این مکانیزم‌ها به دو گروه کلی مکانیزم‌های بصری و غیر بصری تقسیم می‌شوند. به طور مثال، سلول‌های میله‌ای و مخروطی به عنوان سلول‌های بینایی شناخته می‌شوند. چشم انسان در عملکرد بینایی بیشترین حساسیت طیفی نسبت به نور را در 555 نانومتر که طیف نور سبزرنگ است، نشان می‌دهد. میزان روشنایی متداول بصری ("روشنایی فوتوپیک") بر مبنای "تابع بازده روشنایی فوتوپیک[18]" متعلق به منبع نور محاسبه می‌شود. تابع بازده روشنایی فوتوپیک با $V(\lambda)$ نشان داده می‌شود. $V(\lambda)$ درخشندگی نوری که انسان از لحاظ بصری می‌تواند درک کند را توصیف می‌کند و در 555 نانومتر بیشترین بازدهی را دارد که در حقیقت برآیند حساسیت طیفی سلول‌های مخروطی حساس به طول موج بلند و متوسط را نشان می‌دهد.

سلول‌های ملانوپسین نیز در پاسخ‌های غیر بصری چشم به نور برای راه‌اندازی برخی مکانیسم‌های بدن نظیر کاهش ملاتونین و خواب‌آلودگی و یا تنظیم ریتم خواب‌وبیدار بدن نقش ویژه‌ای دارند. بر همین اساس تابع وزن‌دهی طیفی ملانوپیک[19] نور (با نماد $S_{mel}(\lambda)$) با بیشترین حساسیت در 490 نانومتر (حساسیت طیفی حداکثر ملانوپسین پس از فیلترکنندگی لنز چشم) تعریف می‌شود. "روشنایی ملانوپیک" برای سنجش اثر روشنایی بر ملانوپسین مطرح شده است (Enezi et al., 2011). در حقیقت تفاوتی که بین روشنایی فوتوپیک و روشنایی ملانوپیک وجود دارد این است که روشنایی فوتوپیک بر اساس توزیع شدت طیف نور[20] در بازه حساسیت سلول‌های مخروطی با حداکثرِ پاسخ در 555 نانومتر تعریف می‌شود اما روشنایی ملانوپیک شدت نور را نسبت به حساسیت سلول‌های ملانوپسین با حداکثر پاسخ در بازه طیفی 490 نانومتر می‌سنجد[21] (شکل 6).

2-2-1- شدت نور

تاکنون شاخص‌ها و متریک‌های متنوعی برای اندازه‌گیری اثر روشنایی غیر بصری معرفی شده‌اند که عموما برای ریتم‌های سیرکادین خواب‌وبیداری بدن، کاهش ملاتونین و خواب‌آلودگی طراحی شده‌اند (Noor et al., 2023). در ذیل برخی از مهم‌ترین و پرکاربردترین این شاخص‌ها آمده‌اند:



شکل 6- منحنی توزیع طیفی تعریف شده برای تابع بازده روشنایی فوتوپیک $V(\lambda)$ (منحنی قرمز) و تابع وزن‌دهی طیفی ملانوپیک $S_{mel}(\lambda)$ (منحنی خط‌چین آبی) بر اساس حساسیت طیفی سلول‌های مرتبط با آن‌ها (M. Rea, 2020)

Fig. 6- Spectral distribution curve defined for photopic luminous efficiency function (V(λ)) (red curve) and melanopic spectral weighting function (Smel(λ)) (blue dashed curve) based on the spectral sensitivity of their corresponding cells.

-روشنایی ملانوپیک (m-lux) **/ روشنایی معادل ملانوپیک** (EML)

به دلیل عملکرد مهم و چشم‌گیر سلول‌های ملانوپسین در برخی مکانیسم‌های کلیدی بدن، روشنایی ملانوپیک جزء اصلی‌ترین شاخص‌های روشنایی غیر بصری شناخته می‌شود. تا قبل از سال 2015 روشنایی ملانوپیک (Enezi et al., 2011) یا در مدلی دیگر، روشنایی معادل ملانوپیک (Lucas et al., 2014) بر حسب لوکس محاسبه می‌شد اما بعد از آن انجمن بین‌المللی استاندارد روشنایی این واحد را بر حسب سیستم بین‌المللی واحدها تصحیح کرد و واحد رادیومتریکِ وات بر مترمربع ($W{\cdot}m^{-2}$)را واحد اندازه‌گیری روشنایی ملانوپیک بر روی سطح تعیین کرد (CIE, 2015; Lucas et al., 2014).

روشنایی ملانوپیک ($E_{e,mel}$) را می‌توان با ضرب شدت نور در آن موج خاص ($E_{e,\lambda}(\lambda)$ ($W{\cdot}m^{-2}$)، در میزان حساسیت طیفی ملانوپسین ($S_{mel}(\lambda)$) در آن طول موج محاسبه کرد. $d\lambda$ فواصل طول موج است (CIE, 2015) (فرمول 1).

$E_{e,\,mel} = \int E_{e,\lambda}(\lambda)\, S_{mel}(\lambda)\, d\lambda$ (فرمول 1)

هرچند توصیه شده روشنایی ملانوپیک بر اساس واحد رادیومتریک (وات بر مترمربع) بیان شود؛ ولی برخی استانداردهای روشنایی و نرم‌افزارهای تحلیل روشنایی، روشنایی ملانوپیک را بر حسب سیستم پیشین یعنی لوکس اندازه‌گیری می‌کنند. به عنوان مثال استاندارد ساختمان سالم، روشنایی معادل ملانوپیک برای کلاس درس را 125 لوکس و برای ادارات 200 لوکس را برای حداقل 75% یا بیشتر فضای کار بر روی صفحه عمودی با فاصله 1.2 متر (دید ناظر) نسبت به سطح زمین تعیین کرده است (WELL, 2020).

روشنایی نور روزِ (D65) معادل ملانوپیک (M-EDI ((D65)

امروزه پژوهشگران برای آنکه بتوانند روشنایی ملانوپیک را که بر حسب واحد رادیومتریکِ وات بر مترمربع است را به شکل درستی بر حسب واحد فوتومتریک (لوکس) بیان کنند، روشنایی نور روزِ (D65) معادل ملانوپیک (M-EDI (D65)) را به عنوان شاخص اندازه‌گیری جایگزین معرفی کرده‌اند که بر حسب لوکس سنجیده می‌شود. نور روز D65 معرف نور روز استاندارد تعیین شده در انجمن بین‌المللی روشنایی است (CIE DIS 026, 2018).

نور روز به عنوان روشنایی طبیعی و اکولوژیکی یک معیار مناسب برای سنجش و مقایسه کیفیت روشنایی طبیعی و یا مصنوعی موجود در فضاهای داخلی محسوب می‌شود. روشنایی نور روزِ (D65) معادل ملانوپیک، میزان روشنایی مورد نیاز نور روز استانداردی (D65) است که بتواند شدتی برابر شدت ملانوپیک منبع نور مورد نظر را تولید کند و از طریق فرمول 2 محاسبه می‌شود (Schlangen and Price, 2021). $E_{v,mel}^{D65}$، روشنایی نور روزِ (D65) معادل ملانوپیک بر حسب لوکس است. E_{mel} روشنایی ملانوپیک بر حسب وات بر مترمربع است. $K_{mel,v}^{D65}$، توان ملانوپیک روشنایی بصری نور روز است که مقدار آن برابر 1.3262 (mW/lm) است (CIE DIS 026, 2018).

فرمول (2) $E_{v,mel}^{D65} = \frac{E_{mel}}{K_{mel,v}^{D65}}$

امروزه به‌جای "روشنایی معادل ملانوپیک (EML)"، استفاده از "روشنایی نور روزِ (D65) معادل ملانوپیک (M-EDI)" توصیه می‌شود که قابل‌تبدیل به یکدیگر هستند. می‌توان با ضرب EML در مقدار ثابت "0.9058" (که بیانگر نسبت اثربخشی نور روز آلفا - اُپیک منبع نور E است[22]) M-EDI را به دست آورد (Schlangen and Price, 2021). به عنوان مثال اگر EML، 100 لوکس باشد، M-EDI، 90.58 لوکس خواهد بود. همچنین M-EDI با داشتن شدت طیفی نور در هر طول موج توسط جعبه ابزار آلفا-اُپیک[23] (CIE S 026, 2020) قابل محاسبه است. در هنگام روز پیشنهاد می‌شود حداقل میزان روشنایی (M-EDI) برابر 250 لوکس بر صفحه عمودی منطبق بر سطح چشم در ارتفاع 1.2 متر (ارتفاع دید فرد نشسته) رعایت گردد (Brown et al., 2022).

نسبت ملانوپیک به فوتوپیک (M/P [24])

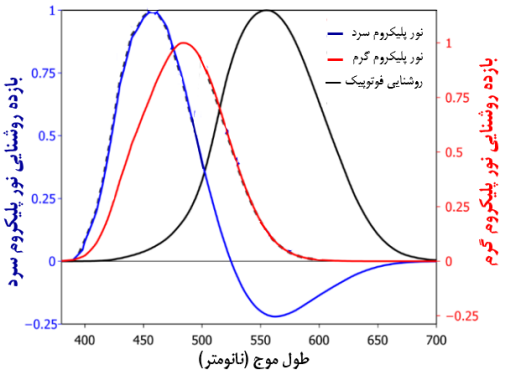
نسبت ملانوپیک به فوتوپیک (M/P) روشنایی، شاخصی است که اثر ملانوپیک نور را با توانایی منبع نور برای تولید روشنایی فوتوپیک مقایسه می‌کند (Miller and Irvin, 2019). نرم‌افزار آلفا که بر مبنای استانداردهای روشنایی غیر بصری تحلیل‌های روشنایی را انجام می‌دهد، برای سنجش این نسبت عدد 0.9 و بیشتر را به عنوان روشنایی غنی‌شده از نور آبی که نشانگر شدت بیشتر در بازه طیف سلول‌های ملانوپسین است، تعیین می‌کند. همچنین عدد کمتر از 0.3 را نیز به عنوان روشنایی عاری از نور آبی نشان می‌دهد (Solemma, 2022).

محرک سیرکادین (CS)

محرک سیرکادین شاخصی است که محرک مؤثر نور را برای سیستم سیرکادین بدن بر پایه کاهش ملاتونین اندازه‌گیری می‌کند (Rea et al., 2010). محرک سیرکادین (CS) هر منبع نور (نور پلی کروم سرد یا گرم) بر اساس بازده روشنایی آن منبع نسبت به حساسیت طیفی سیستم سیرکادین انسان به نور تعریف می‌شود (M. S. Rea et al., 2021). محققان متوجه شدند که تنها

سلول‌های ملانوپسین در مکانیسم‌های سیرکادین بدن انسان شرکت نمی‌کنند، بلکه بقیه سلول‌های چشم نیز شرکت می‌کنند. ازاین‌رو تابع وزن دهی برای حساسیت طیفی سلول ملانوپسین $S_{mel}(\lambda)$ که برای روشنایی ملانوپیک استفاده می‌شد کافی نبود. در همین راستا، تابع جدیدی برای حساسیت طیفی سیستم سیرکادین انسان برای نور سرد و گرم به طور جداگانه تعریف کردند (شکل 7) (M. S. Rea et al., 2021).

مقدار شاخص محرک سیرکادین (CS) رابطه مستقیم و خطی با کاهش ملاتونین - که جزء اصلی‌ترین نشانگرهای تنظیم و تغییر ریتم سیرکادین خواب‌وبیدار - است، دارد. بدین شکل که CS = 0 نشانگر زمان شروع کاهش ملاتونین و CS = 0.7 نشانگر کاهش 70% ملاتونین در بدن است. بر همین اساس بازه این شاخص بین صفر (آستانه فعال‌سازی سیستم سیرکادین) تا 0.7 (اشباع پاسخ) برای 1 ساعت قرارگیری در معرض روشنایی تعیین می‌شود (Figueiro, 2017). محرک سیرکادین (CS) در صورت دانستن ویژگی‌های منبع نور و یا شدت توزیع طیفی نور از طریق وب‌سایت آن[25] قابل محاسبه است.



شکل 7- بازده حساسیت طیفی تعریف شده برای سیستم سیرکادین انسان بر اساس مشارکت طیفی نور پلی کروم سرد (آبی‌رنگ) و نور پلی کروم گرم (زردرنگ) در سیستم سیرکادین. تابع بازده روشنایی فوتوپیک با رنگ مشکی جهت مقایسه مشخص شده است (M. S. Rea et al., 2021)

Fig. 7- Spectral sensitivity efficiency defined for the human circadian system based on the spectral contribution of cold polychromatic light (blue) and warm polychromatic light (yellow) in the circadian system. The photopic luminous efficiency function is marked in black for comparison.

3-2-1- زمان‌بندی و مدت‌زمان تابش نور

برخلاف سیستم بصری که به محض ورود نور به داخل چشم، بینایی اتفاق می‌افتد، مکانیسم‌های غیر بصری حاصل از نور، پس از مدت‌زمان مشخصی به کار می‌افتند که این اثر وابسته به طیف و شدت نور نیز است. به عنوان مثال، مطالعات نشان می‌دهند برای روشنایی 258 و 393 لوکس به ترتیب 2 ساعت و نیم ساعت زمان لازم است تا ملاتونین کاهش پیدا کند (Aoki et al., 1998). این بازه زمانی، متناسب با طول موج نیز تغییر می‌کند. هورمون ملاتونین پس از 35 دقیقه قرار گرفتن در معرض نور با طول موج کوتاه (با شدت $\sim 12\ \mu W/cm^2$) و پس از 60 دقیقه نور با طول موج متوسط (با شدت $\sim 10\ \mu W/cm^2$) به طور چشم‌گیرتری سرکوب می‌شود (Cajochen et al., 2005).

علاوه بر مدت‌زمان تابش نور، زمان آن نیز یکی دیگر از عوامل اثرگذار بر مکانیسم‌های غیر بصری است. بدن دارای زمان بیولوژیکی حدودا 24 ساعته است که با تغییرات ریتم‌های سیرکادین بدن و ملاتونین همراه است. این ریتم‌ها توسط ناحیه‌ای در مغز به نام هسته سوپراکیاسماتیک[26] کنترل می‌گردند که تحت تأثیر نور تحریک می‌شوند (Weaver and Emery, 2013) انجمن بین‌المللی روشنایی (CIE, 2019) پیشنهاد می‌کند که شدت زیاد روشنایی نور روز معادل ملانوپیک (M-EDI) در طول روز از هوشیاری و ریتم سیرکادین حمایت می‌کند، درحالی‌که مقدار کم آن در هنگام عصر و شب کیفیت خواب را بهبود می‌بخشد. بر این اساس مهم‌ترین تفاوتی که در بهره‌گیری از عامل زمان برای تعیین متریک‌ها و شاخص‌های روشنایی بصری و غیر بصری وجود دارد آن است که در روشنایی بصری کارایی روشنایی بر اساس زمان‌های اشغال فضا نسبت به طول سال سنجیده می‌شود. ولی در روشنایی غیر بصری به دلیل تغییرات زیستی بدن در چرخه بیولوژیکی 24 ساعت خود، روشنایی نسبت به اوقات بیولوژیک روز برای انسان سنجیده می‌شود. به‌عنوان‌مثال متریک یا شاخص دریافت سالیانه نور مستقیم خورشید (ASE[27])، استقلال فضایی نور روز (sDA[28]) و روشنایی مفید نور روز (UDI[29]) از جمله شاخص‌های پویای بصری هستند که

به شکل درصدی از طول سال محاسبه می‌گردند (IES, 2021; Nabil and Mardaljevic, 2005) اما شدت روشنایی غیر بصری برای ابتدای صبح و طول صبح، ظهر، غروب و شب به شکل متفاوتی تعیین می‌شود. تفاوت دیگری که عامل زمان برای تعیین روشنایی غیر بصری در مقایسه با روشنایی بصری در طول روز ایجاد می‌کند آن است که علاوه بر شدت نور، طیف نور نیز باید متناسب با زمان بیولوژیک چرخه بیداری تغییر کند. روشنایی جهت افزایش هوشیاری (یا کاهش خواب-آلودگی) در ابتدای صبح و طول روز باید شدت بیشتری در طول موج کوتاه طیف خود (حدود 480 نانومتر، نزدیک به حساسیت سلول‌های ملانوپسین) داشته باشد. اما در شب‌هنگام (حدود 3 ساعت قبل خواب) حتی‌المقدور باید طیفی فاقد طول موج کوتاه (آبی‌رنگ) داشته باشد (Brown et al., 2022) تا منجر به سرکوب ترشح ملاتونین (هورمون خواب) نشود. در مجموع، مقادیر استاندارد شاخص‌های معرفی شده در این پژوهش، در جدول 1 آمده‌اند.

4-2-1- جهت تابش نور

عمده‌ترین تفاوتی که بین روشنایی بصری و غیر بصری وجود دارد این است که در روشنایی بصری، روشنایی سطح کار که غالبا افقی است مورد سنجش قرار می‌گیرد؛ درحالی‌که در روشنایی غیر بصری ، نوری که بر روی قرنیه می‌افتد تا به داخل چشم نفوذ کند مهم است. از سویی برخلاف آزمایش‌های علوم پزشکی که منبع نور در مقابل چشم قرار می‌گیرد، در یک محیط واقعی، نور پس از بازتاب یا پراکنش از سطوح محیط به چشم می‌رسد.

جدول 1- شاخص‌های اندازه‌گیری برای روشنایی غیر بصری (* نشانگر واحد اندازه‌گیری متداول در استانداردها)
Tab. 1- Measurement indices for non-visual lighting (* indicates common unit of measurement in the standards)

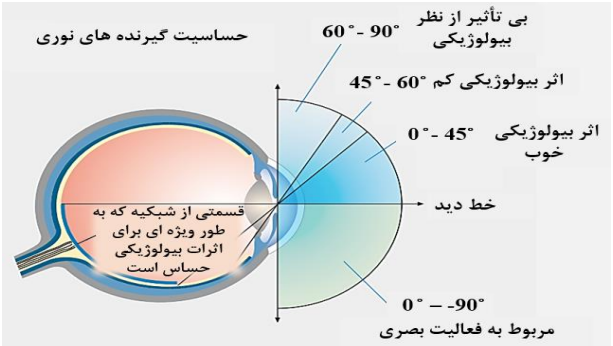
متریک یا شاخص	علامت اختصاری	واحد اندازه‌گیری	مبنای محاسبه	مقدار استاندارد مورد نیاز	زمان
روشنایی معادل ملانوپیک	EML	لوکس (lux)*	تابع حساسیت طیفی ملانوپسین $S_{mel}(\lambda)$	در کلاس درس حداقل 125 لوکس برای حداقل 75% از کل نیمکت‌ها (WELL, 2020)	حداقل 4 ساعت در هرروز از سال
				در فضای اداری حداقل 200 لوکس برای حداقل 75% از کل فضای کار (WELL, 2020).	برای حداقل ساعات بین 9 صبح تا 1 بعدازظهر در هرروز از سال
روشنایی نور روزِ (D 65) معادل ملانوپیک	M-EDI (D65)	لوکس (lux)	روشنایی ملانوپیک بر حسب وات بر مترمربع و توان ملانوپیک روشنایی بصری نور روز	حداقل 250 لوکس (Brown et al., 2022)	برای روز
				حداکثر 10 لوکس (Brown et al., 2022)	برای شب (3 ساعت قبل خواب)
				حداکثر 1 لوکس (Brown et al., 2022)	هنگام خواب
نسبت ملانوپیک به فوتوپیک	M/P	-	نسبت روشنایی ملانوپیک به فوتوپیک	0.9 و بیشتر به عنوان روشنایی غنی‌شده از نور آبی (Solemma, 2022)	روز
				کمتر از 0.35 به عنوان روشنایی عاری از نور آبی (Solemma, 2022)	شب
محرک سیرکادین	CS	-	حساسیت طیفی سیستم سیرکادین (سلول‌های مختلف)	0.3 و بیشتر برای 1 ساعت قرارگیری در معرض روشنایی (UL, 2019)	7 صبح تا 4 بعدازظهر برای حداقل 2 ساعت
				0.2 و کمتر برای 1 ساعت قرارگیری در معرض روشنایی (UL, 2019)	5 بعدازظهر تا 7 عصر
				0.1 و کمتر برای 1 ساعت قرارگیری در معرض روشنایی (UL, 2019)	8 شب به بعد

بنابراین در سنجش روشنایی غیر بصری ، پارامترهای روشنایی عمودی روی سطح چشم به جای روشنایی افقی سطح کار یا روشنایی منبع نور بررسی می‌شود. ازآنجایی‌که چشم از روبرو شدن با تابش مستقیم نورِ منبع روشنایی به دلیل پدیده خیرگی خودداری می‌کند، در سنجش کیفیت روشنایی غیر بصری عمدتا نور فضایی بازتاب شده از محیط مطرح می‌شود. این در حالی است که در فضاهای داخلی نه‌تنها رنگ سطوح بر ضریب طیفی نور بازتاب شده اثر می‌گذارد، بلکه جهت‌گیری و جنس مصالح سطوح داخلی بر شدت نور بازتاب شده از آن‌ها تأثیر می‌گذارد. تحقیقات نشان می‌دهند جهت نور وارد بر چشم انسان بر پاسخ‌های غیر بصری بسیار تأثیرگذار است. سلول‌های ملانوپسین در عملکرد مردمک چشم به نور، بیشتر در میدان دید (0 درجه) نسبت به میدان دید محیطی (20 درجه) مشارکت می‌کنند (Joyce et al., 2016). بر همین اساس سطح ملاتونین هنگامی‌که قسمت جلویی چشم در مقایسه با قسمت جانبی در معرض نور قرار می‌گیرد، به طور قابل توجهی تغییر می‌کند (Visser et al., 1999). طبق شکل 8 جهت مورد نیاز روشنایی بصری در ارتباط با نیم‌کره پایین میدان دید چشم مطرح می‌شود اما روشنایی غیر بصری در زاویه مستقیم عمود بر چشم تا 45 درجه به جهت بالا سنجیده می‌شود (Licht, 2018)

5-2-1- سابقه روشنایی قبلی

زمانی که انسان در معرض نور قرار می‌گیرد، تأثیر نور محیط بر مکانیسم‌های غیر بصری بدن او تحت تأثیر اثرات روشنایی محیط قبلی است که هنوز در بدن او باقی مانده است. در این صورت شرایط روشنایی محیط قبلی می‌تواند اثرات محیط جدید را تحت‌الشعاع خود قرار دهد. در تحقیقی یک هفته قبل از انجام آزمایش ملاتونین، یک گروه را در معرض تاریکی (نور کم، حدود 1 لوکس) و گروه دیگر را در معرض روشنایی (نور معمولی اتاق، حدود 90 لوکس) قرار دادند. نتایج نشان داد که سابقه نور بسیار کم، سیستم زمان‌بندی سیرکادین را نسبت به اثرات تغییر فاز و سرکوب ملاتونین 60% تا 70% در مقایسه با سابقه نور معمولی اتاق، به روشنایی بعدی حساس‌تر می‌کند (Chang et al., 2011). در مطالعه‌ای دیگر بر روی دانش‌آموزان مدرسه‌ای مشخص شد که قرار گرفتن در معرض نور، 2 ساعت قبل از خواب می‌تواند شروع ترشح ملاتونین و در نتیجه خواب آن‌ها را به تعویق بیندازد (Akacem et al., 2016)؛ این موضوع بر روی ریتم سیرکادین خواب‌وبیداری بدن مؤثر است. بنابراین توجه به روشنایی که کاربران از قبل در معرض آن بودند، در لحاظ کردن ملاحظات نورپردازی و تأثیرات غیر بصری آن می‌تواند حائز اهمیت باشد. این در حالی است که در روشنایی بصری سازگاری چشم‌ها با روشنایی محیط جدید در مدت‌زمان کوتاهی اتفاق می‌افتد و تقریبا در مقایسه با اثرات غیر بصری نور آثار متأخر ندارد. به همین دلیل عموما سابقه روشنایی در محاسبات کارآیی روشنایی بصری لحاظ نمی‌شود.

در مجموع با کمک مقایسه‌ای تطبیقی بین شاخص‌ها و مؤلفه‌های کاربردی روشنایی غیر بصری و تفاوت آن‌ها با روشنایی بصری تلاش شده تا مبانی نظری پژوهش در راستای به‌کارگیری در حوزه معماری بهتر تبیین شوند. شکل 9، نگاهی کلی به این موضوع را ارائه می‌دهد.



شکل 8- عملکرد نواحی چشم در رابطه با تابش نور (Licht, 2018)

Fig. 8- The function of the eye areas in relation to light radiations

	مؤلفه‌های روشنایی برای عملکرد بصری	مؤلفه‌های روشنایی برای عملکرد غیر بصری ناشی از کاهش ملاتونین			
شاخص روشنایی (واحد اندازه‌گیری)	روشنایی فوتوپیک	روشنایی معادل ملاتوپیک "EML" (Lux)	روشنایی ملاتوپیک معادل نور روزِ D65 "M-EDI (D65)" (Lux)	نسبت ملاتوپیک به فوتوپیک "M/P"	محرک سیرکادین "CS"
آستانه لازم*	حدود 300 lux	حدود 200 lux	بیش از 250 lux	بیش از 0.35	بیش از 0.3
طیف اثرگذار نور	بیشترین حساسیت در طول‌موج متوسط و بلند (~ 555 nm)	بیشترین حساسیت در طول‌موج کوتاه (~ 480nm)		حساسیت طیفی روشنایی ملاتوپیک و فوتوپیک	حساسیت طیفی سیستم سیرکادین
مکانیسم مورد نظر	بینایی	کاهش ملاتونین و افزایش هوشیاری		نسبت عملکرد غیر بصری به بصری	تنظیم ریتم سیرکادین
زمان مورد نیاز برای راه‌اندازی مکانیزم‌ها	رؤیت شیء به محض ورود نور به چشم	حداقل 30 دقیقه زمان مورد نیاز برای راه‌اندازی مکانیسم‌های غیربصری (وابسته به شدت و طیف نور)			حدود 1 ساعت
جهت تابش نور	مستقل از جهت دید	بهترین حالت در قسمت جلویی چشم			
سطح مورد بررسی روشنایی	روشنایی سطح کار (عموماً صفحه افقی)	روشنایی روی مردمک چشم (عموماً سطح عمودی)			
سابقه روشنایی محیط قبلی	بی‌تأثیر بر عملکرد بصری	مؤثر بر عملکرد غیر بصری در شرایط جدید			
ابزارهای مهم اندازه‌گیری	لوکس‌متر، محل قرارگیری غالباً بر روی سطح افقی کار	اسپکترومتر (طیف‌سنج نور) + لوکس متر، محل قرارگیری در زاویه مناسب هم‌ارتفاع و هم‌جهت چشم			

شکل 9- مقایسه روشنایی بصری با غیر بصری. *آستانه لازم روشنایی در نظرگرفته شده برای عملکرد غیر بصری بر مبنای زمان صبح است. زیرا در زمان‌های دیگر روز آستانه روشنایی لازم غیر بصری متفاوت است. همچنین آستانه روشنایی متناسب با کاربری نیز متفاوت است.

Fig. 9- Comparison of visual and non-visual lighting. *The required illuminance threshold considered for non-visual performance is based on the morning time because, at the other times of the day, the required non-visual illuminance thresholds are different. Also, the illuminance threshold is different according to the application.

2– روش تحقیق

روش‌های اندازه‌گیری روشنایی غیر بصری در پیشینه پژوهش، به روش‌های تجربی و شبیه‌سازی دسته‌بندی می‌شوند. روش‌هایی که به صورت تجربی روشنایی غیر بصری را اندازه‌گیری می‌کنند، به طور کل به دو روش آزمایشگاهی کنترل شده و میدانی محیطی دسته‌بندی می‌شوند که بر این اساس، اهداف، ابزارها و تنظیمات اندازه‌گیری متفاوت‌اند (Knoop et al., 2019). معمولا در روش‌های تجربی با اندازه‌گیری‌های میدانی با کمک دستگاه اسپکترومتر و یا سایر دستگاه‌های سنجش روشنایی، ویژگی‌های فیزیکی نور در فضا نظیر شدت، طیف، جهت و یا توزیع نور را در مکان و زمان مشخص می‌سنجند، سپس با قراردادن پارامترهای به‌دست آمده در فرمول‌های ریاضی، شاخص‌های روشنایی مورد نظر را به دست می‌آورند.

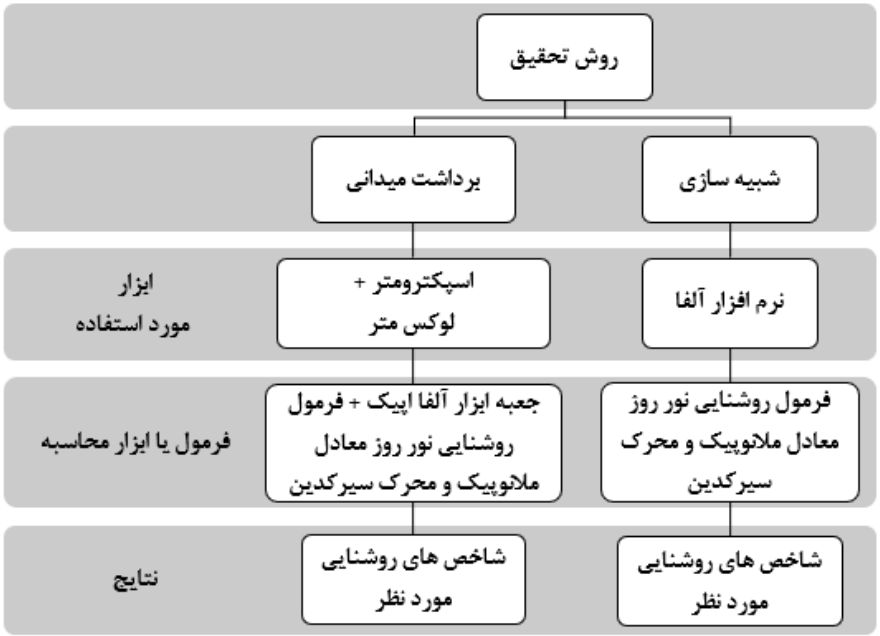
در روش شبیه‌سازی باید توجه داشت که نرم‌افزارهای سنجش کیفیت بصری نور احتمالا در سنجش روشنایی غیر بصری دقیق نیستند. زیرا ممکن است برخی ویژگی‌های طراحی مانند جهت دید یا بازتاب طیفی متأثر از جنس و رنگ سطوح در این نرم‌افزارها لحاظ نشده باشند. نرم‌افزار آلفا یکی از نرم‌افزارهایی است که با هدف سنجش روشنایی غیر بصری بر پایه موتور رادیانس طراحی شده (Solemma, 2022) و می‌تواند طیف، جهت و شدت نور متناسب با جهت چشم بیننده را با در نظر گرفتن بازتاب طیفی مصالح بررسی کند. مقایسه نتایج شبیه‌سازی با اندازه‌گیری واقعی در تحلیلی قیاسی نشان

می‌دهد که آلفا عملکرد بهتری نسبت به دیالوکس در بررسی اثرات غیر بصری نور دارد، هر چند در برخی شرایط نوری این نرم افزارها خطاهای بالایی را نشان می‌دهند (Bellia et al., 2023). بنابراین این نرم افزارها که از جمله نرم افزارهای متداول هستند، نیاز به رشد و توسعه بیشتری دارند.

پژوهش حاضر با روش شبیه‌سازی و اندازه‌گیری میدانی مطابق مراحل شکل 10، اثر متغیرهای رنگ سطوح داخلی، فاصله نسبت به پنجره و جهت دید ناظر را بر میزان شاخص‌های موردنظر روشنایی غیر بصری سنجیده است. با توجه به اینکه وجود روشنایی مصنوعی می‌تواند بر نقش متغیرهای مورد بررسی در کیفیت روشنایی غیر بصری تأثیر بگذارد، سنجش‌ها تحت روشنایی طبیعی و بدون استفاده از روشنایی مصنوعی انجام شده‌اند.

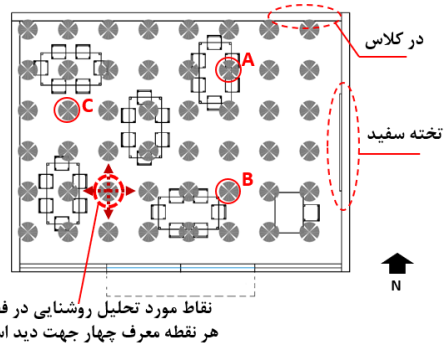
1-2- روش شبیه‌سازی

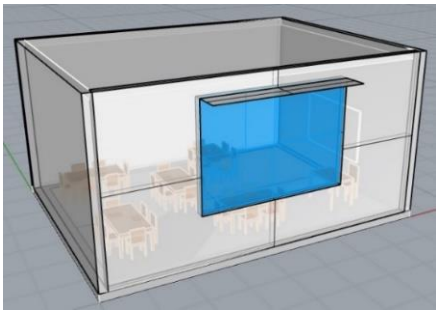
در روش شبیه‌سازی مدل مورد مطالعه، یک کلاس درس ابتدایی به ابعاد 8.4 در 6.4 به ارتفاع 4.4 با پنجره جنوبی است. ابعاد انتخابی تقریبا منطبق با حداکثر ابعاد استاندارد کلاس درس در راهنمای سازمان نوسازی مدارس (Deputy director of technical and supervision technical department of architecture, 2007) است (شکل 11). ابعاد پنجره کلاس (WWR) نیز منطبق با ابعاد پیشنهادی بهینه برای روشنایی مناسب فعالیت بصری کلاس درس در تهران برابر با 30% است (Mohammadi and Mofidi Shemirani, 2021). روز 1 دی (زمان بحرانی سردترین روز سال) و ساعت 8 صبح (ابتدای صبح بیولوژیکی دانش‌آموزان) به عنوان نمونه برای آزمایش انتخاب شد. برای تحلیل‌های دقیق‌تر روشنایی سه نقطه بر مبنای فاصله از پنجره و جهت تابش خورشید در زمان‌های مورد نظر انتخاب شدند. هر نقطه معرف چهار جهت دید است که در اینجا دید رو به تخته مورد بررسی قرار گرفته است. متغیر مورد مطالعه در روش شبیه‌سازی رنگ سطوح داخلی است که مطابق با حساسیت طیفی چشم در مبانی نظری ذکر شده زرد، سبز، آبی و سفید هستند. مصالح مورد استفاده و میزان بازتاب طیفی فوتوپیک (منطبق با پاسخ بصری چشم) و بازتاب طیفی ملانوپیک (منطبق با پاسخ غیر بصری مورد نظر چشم) مربوط به آن‌ها در جدول 2 آمده است.



شکل 10- جزئیات روش تحقیق

Fig. 10- Details of the research method



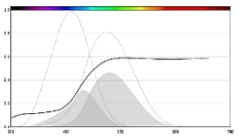
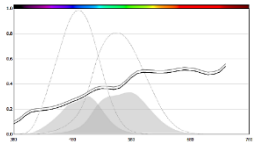
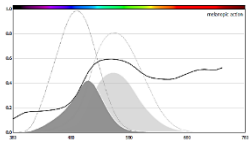
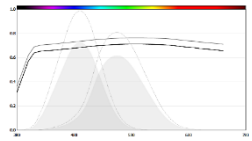
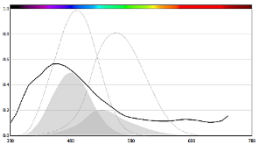
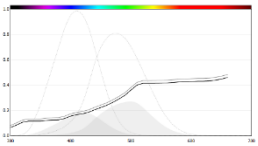
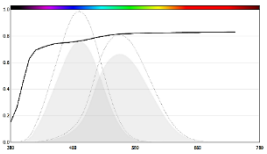
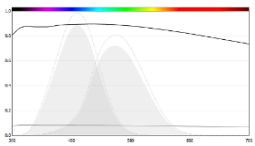


شکل 11- نمای سه‌بعدی و سه نقطه منتخب A، B و C با جهت دید رو به تخته کلاس برای تحلیل در پلان موردمطالعه

Fig. 11 - 3D view and three selected points A, B, and C with view direction facing the class board, for analyzing in the studied plan

جدول 2- بازتاب طیفی مصالح مورد استفاده از کتابخانه متریال نرم‌افزار آلفا (Solemma, 2022) (برای شیشه ضریب انتقال فوتوپیک و ضریب انتقال ملانوپیک لحاظ شده است)

Tab. 2 - Spectral reflectance of the materials used from the ALFA material library (photopic transmittance and melanopic transmittance are taken into account for glass)

رنگ سطوح	M/P	بازتاب فوتوپیک	بازتاب ملانوپیک	منحنی بازتاب طیفی مصالح	رنگ سطوح	M/P	بازتاب فوتوپیک	بازتاب ملانوپیک	منحنی بازتاب طیفی مصالح
زرد	0.53	%52	%27.3		در چوبی قهوه‌ای کم‌رنگ	0.72	%41.9	%30.2	
سبز	0.67	%52.5	%35.2		تخته سفید	0.97	%75.7	%73.5	
آبی	1.98	%22.4	%44.3		میز و صندلی چوبی قهوه‌ای	0.59	%31.9	%18.9	
سفید	0.95	%81.2	%76.8		شیشه* بی‌رنگ	1.01	%88.3	%89	

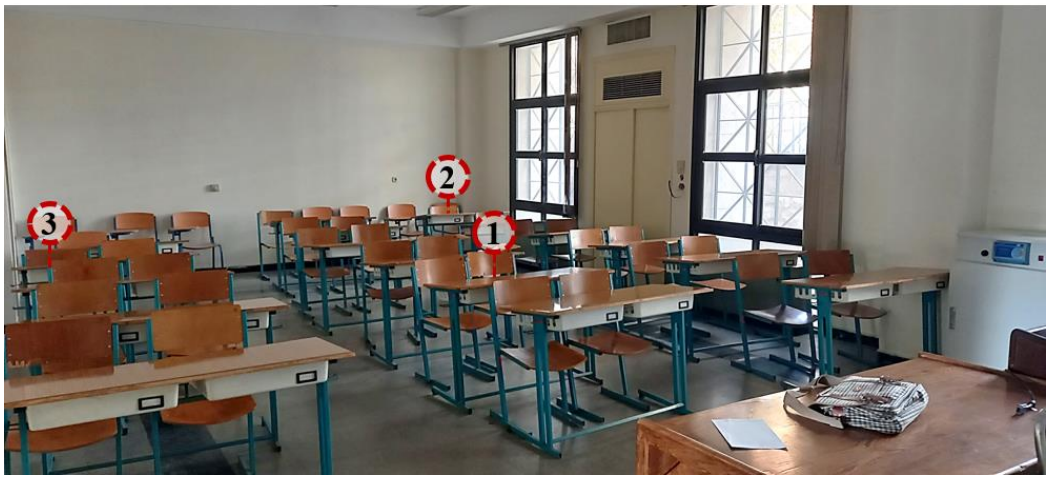
2-2- روش میدانی

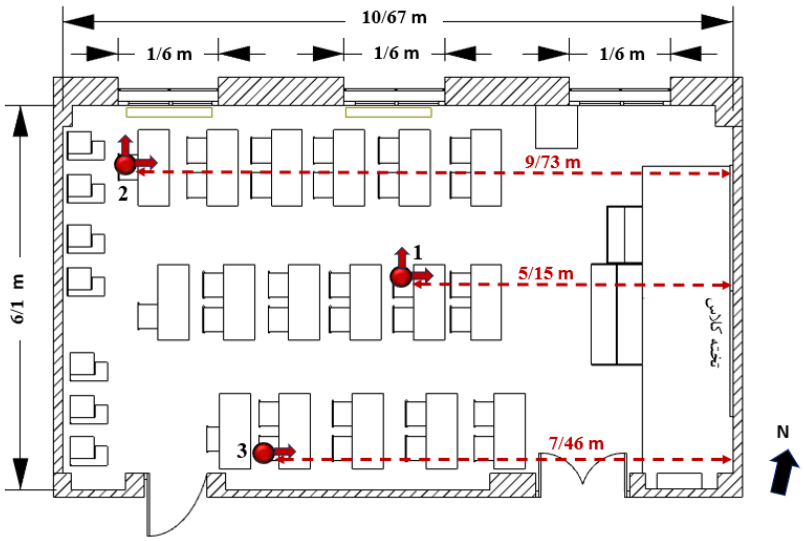
در برداشت میدانی، شدت طیفی و شدت روشنایی طبیعی نقاط مشخصی در یک نمونه کلاس درس واقع در آزمایشگاه روشنایی دانشگاه تهران در روز 8 آذرماه 1402 بین ساعات 12:30 تا 12:40 بعدازظهر اندازه‌گیری شد (شکل 12) .

شدت طیفی و شدت روشنایی سه نقطه از فضا (1- ردیف جلو وسط کلاس؛ 2- آخر کلاس نزدیک پنجره و 3- آخر کلاس دور از پنجره) با جهات دید منتخب مطابق شکل 13 توسط دستگاه اسپکترومتر برند گاسن[30] مدل M530G برداشت شد.

شکل 12- موقعیت مکان مورد مطالعه

Fig. 12- The location of the studied site





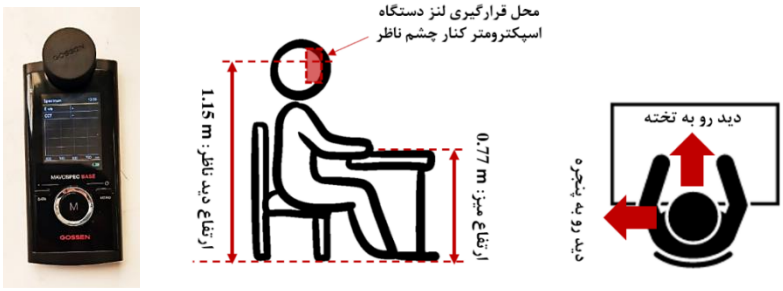
شکل 13- کلاس مورد مطالعه و پلان آن؛ نقاط 1، 2 و 3 و جهات دید مورد بررسی در شکل مشخص شده‌اند

Fig. 13- The studied class and its plan; The points 1, 2, and 3, and the studied view directions are specified in the figure

بدین شکل که دستگاه اسپکترومتر (شکل 14) در کنار چشم ناظر نشسته (به ارتفاع دید 1.15 متر)، مطابق با هر جهت دید قرار گرفت و شدت طیفی نور وارد بر لنز دستگاه اندازه‌گیری شد. سپس داده‌های به دست آمده از توزیع شدت طیفی نور، وارد جعبه‌ابزار آلفا - اُپیک شد و روشنایی نور روز معادل ملانوپیک محاسبه شد. این مقادیر به همراه روشنایی معادل ملانوپیک و محرک سیرکادین مطابق توضیحات مبانی نظری (بخش 1-2-2- شدت نور) محاسبه شدند. جدول 3 مشخصات پارامترهای کلاس درس و برداشت‌ها را نشان می‌دهد.

3- نتایج و بحث

با توجه به بازتاب طیفی سطوح انتخاب شده در روش شبیه‌سازی (جدول 2)، رنگ زرد و سبز در طول موج 480 نانومتر (بیشترین بازده روشنایی ملانوپیک) کمترین شدت طیفی نور را دارند، درحالی‌که در طول موج 555 نانومتر (بیشترین بازده روشنایی فوتوپیک) بیشترین شدت را نسبت به کل توزیع طیفی بازتاب شده دارند. رنگ آبی با وجود اینکه در طول موج 555 نانومتر کمترین بازده طیفی را دارد؛ ولی در 480 نانومتر بیشترین شدت طیفی را نشان می‌دهد. اما رنگ سفید در مجموع ضریب بازتاب یکسانی در بازه طیفی 480 و 555 نانومتر دارد و در نمونه موردمطالعه دارای ضریب انعکاس بالاست.



شکل 14- دستگاه اسپکترومتر مورد استفاده و نحوه به‌کارگیری از آن
Fig. 14- The used spectrometer and how to use it

جدول 3- مشخصات پارامترهای کلاس درس و ناظر در برداشت میدانی
Tab. 3- Characteristics of the classroom and observer parameters in the field study

	پارامترها	مقادیر
پارامترهای کلاس درس	ابعاد داخلی کلاس درس (طول × عرض × ارتفاع)	10.67 × 6.1 × 3.46 (متر)
	ابعاد پنجره (عرض × ارتفاع)	1.6 × 3.06 (متر)
	تعداد پنجره	3 عدد
موقعیت هر نقطه (جهات دید مورد برداشت)	موقعیت نقطه یک (رو به تخته و رو به پنجره)	فاصله تا تخته: 5.15 متر فاصله تا پنجره (سمت چپ): 2.64 متر
	موقعیت نقطه دو (رو به تخته و رو به پنجره)	فاصله تا تخته: 9.73 متر فاصله تا پنجره (سمت چپ): 0.95 متر
	موقعیت نقطه سه (رو به تخته)	فاصله تا تخته: 7.46 متر فاصله تا دیوار دارای پنجره (سمت چپ): 5.53 متر
درصد ضریب انعکاس مصالح سطوح داخلی	دیوار (رنگ سفید مایل به کرم)	82%
	کف (موزائیک طوسی)	22%
	سقف (سفیدرنگ)	~ 90%
	میز و صندلی (چوب - قهوه‌ای کم‌رنگ)	27%
	نمای بیرون (شامل سایبان دور پنجره) (سنگ سفید مایل به کرم)	~ 85%
درصد ضریب عبور نور از متریال شفاف	شیشه پنجره	~ 70%

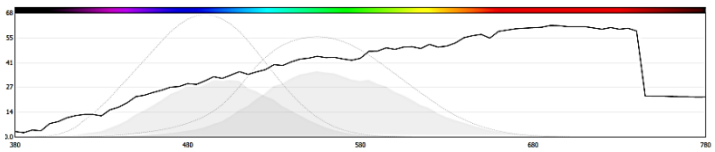
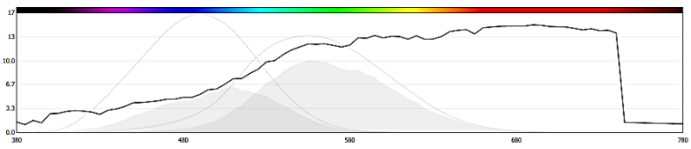
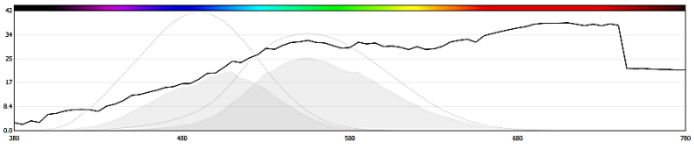
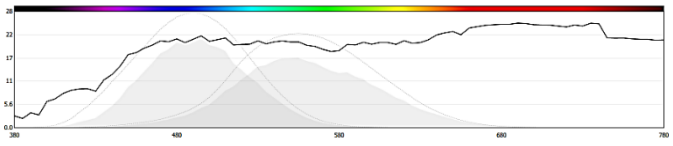
بر اساس داده‌های بالا پیش‌بینی می‌شود بازتاب طیفی سطوح در روشنایی فوتوپیک و ملانوپیک ایجاد شده در کلاس درس اثر بگذارد. جدول 4 پرسپکتیوی از فضای داخلی کلاس‌ها و شدت ترکیب طیفی نور طبیعی پراکنش شده در داخل کلاس را که در شبیه‌سازی با نرم‌افزار آلفا به دست آمده، نشان می‌دهد. در فضای داخل در کلاس آبی‌رنگ، طیف نور در طول موج 480 نانومتر بیشترین شدت را داراست. درحالی‌که در کلاس زرد و سبز کمترین شدت طیفی در 480 نانومتر دیده می‌شود. جدول 5 نیز شدت توزیع طیفی نور اندازه‌گیری شده توسط دستگاه اسپکترومتر در برداشت میدانی را نشان می‌دهد.

همان‌طور که بیان شد شدت توزیع طیفی نور به دست آمده از اندازه‌گیری میدانی، در جعبه‌ابزار آلفا - اُپیک (CIE S 026, 2020) بر اساس تابع وزن‌دهی طیفی پنج گیرنده نوری چشم مطابق توضیحات بخش "1-2-1-طیف نور"، وزن‌دهی شده و سپس مقادیر روشنایی موردنظر محاسبه می‌شود. شکل 15 نمونه نمودار خروجی وزن‌دهی شده طیف نور را برای نقطه 2 رو به پنجره نشان می‌دهد.

پس از محاسبات لازم، مجموع نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی کامپیوتری و برداشت میدانی در جدول 6 آورده شده‌اند. خانه‌های خاکستری روشنایی کمتر از حد استاندارد و خانه‌های کرم رنگ بالاترین مقادیر روشنایی را در هر ستون نشان می‌دهند.

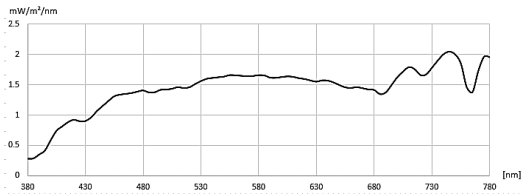
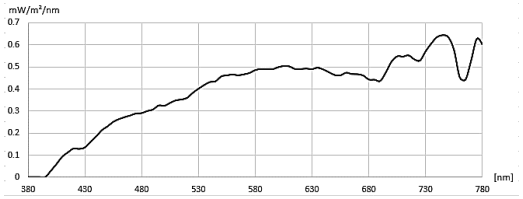
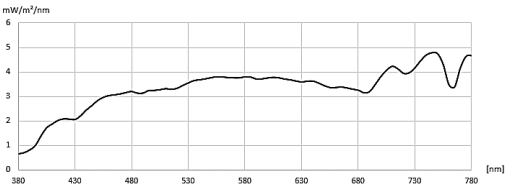
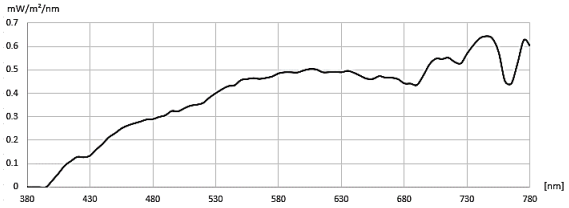
جدول 4- توزیع طیفی نور طبیعی فضایی بدست آمده از شبیه سازی در نمونه‌های مورد مطالعه

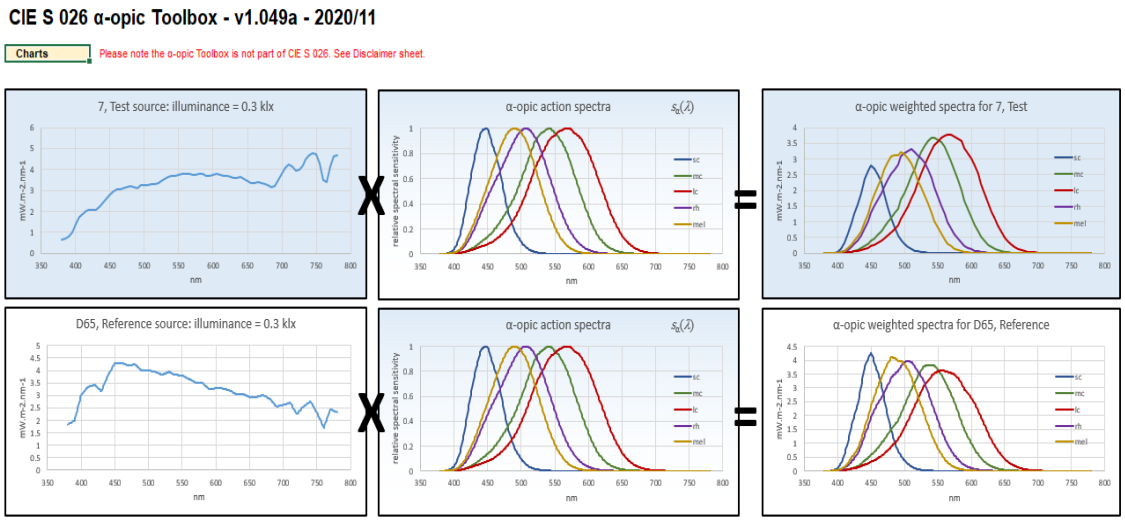
Tab. 4- Spectral distribution of the spatial natural light obtained from the simulations in the studied samples

رنگ سطوح	منحنی توزیع طیفی روشنایی فضای داخل	پرسپکتیو داخلی
سفید		
زرد		
سبز		
آبی		

جدول 5- توزیع شدت طیفی نور طبیعی حاصل از برداشت میدانی در نقاط مورد مطالعه و جهت‌های دید آن‌ها

Tab. 5- The spectral power distribution of the natural light obtained from the field study in the studied points and their view directions

شدت توزیع طیفی نور به دست آمده ($mW/m^2/nm$) در نقاط دید موردمطالعه	
نقطه 1: رو به پنجره 	نقطه 1: رو به تخته 
نقطه 2: رو به پنجره 	نقطه 2: رو به تخته
نقطه 3: رو به تخته 	



شکل 15- نمودار خروجی طیف نور وزن‌دهی شده برای نقطه 2 رو به پنجره (ردیف بالا) و وزن دهی نور روز استاندارد D65 به عنوان رفرنس (ردیف پایین) توسط جعبه ابزار آلفا-اُپیک (CIE S 026, 2020)

Fig. 15- Output diagram of the weighted light spectra for point 2 facing the window (top row) and standard daylight (D65) weighting as a reference (bottom row) by α-opic toolbox

جدول 6- نتایج تحلیل روشنایی طبیعی برای تمام نقاط فضا و نقاط منتخب. درصد روشنایی فوتوپیک (روی سطح کار) نشانگر درصدی از کل نقاط فضاست که دارای روشنایی بیش از 300 لوکس است. درصد روشنایی معادل ملانوپیک (EML) نشانگر درصد جهات دید کل نقاط فضا که دارای روشنایی معادل ملانوپیک بالای 200 لوکس است. (M-EDI (D65)): روشنایی نور روز معادل ملانوپیک؛ (M/P): نسبت روشنایی ملانوپیک به فوتوپیک؛ (CS): محرک سیرکادین.

Tab. 6- Results of natural lighting analysis for all points of the space and the selected points. The percentage of photopic illuminance (on the work plane) indicates the percentage of the all points in the space that have an illuminance of more than 300 lux. The percentage of melanopic equivalent illuminance indicates the percentage of the view directions of all points in the space that have equivalent melanopic illuminance of more than 200 lux. (M-EDI (D65)): Melanopic equivalent daylight (D65) illuminance; M/P: Melanopic/Photopic (M/P) ratio; CS: Circadian Stimulus.

	نقاط موردمطالعه مرتبط با رنگ سطوح داخلی	روشنایی فوتوپیک سطح کار (lux)	روشنایی معادل ملانوپیک روی چشم (EML) (lux)	M-EDI (D65) روی چشم (lux)	M/P روی چشم				CS روی چشم
					کل	> 0.9	0.9 > M/P > 0.35	< 0.35	
نتایج شبیه‌سازی	سبز (٪ از کل)	1353 (%100)	1384 (%90.6)	1253.6	0.66	%9.9	%90.1	%0	0.629
	A (دید رو به تخته)	668	187	169.3	-	-	0.57	-	-
	B (دید رو به تخته)	997	246	222.8	-	-	0.65	-	-
	C (دید رو به تخته)	2277	1436	1300	-	-	0.8	-	-
	آبی (٪ از کل)	761 (%72.9)	1431 (%96.9)	1296.1	1.5	%93.8	%6.3	%0	0.598
	A (دید رو به تخته)	283	220	199.2	-	2.05	-	-	-
	B (دید رو به تخته)	621	301	272.6	-	1.68	-	-	-
	C (دید رو به تخته)	1103	1394	1262.6	-	1.02	-	-	-
	زرد (٪ از کل)	1368 (%100)	1287 (%81.8)	1165.7	0.56	%8.3	%90.6	%1	0.624
	A (دید رو به تخته)	694	140	126.8	-	-	0.41	-	-
	B (دید رو به تخته)	1000	198	179.3	-	-	0.51	-	-
	C (دید رو به تخته)	2326	1268	1148.5	-	-	0.74	-	-
	سفید (٪ از کل)	2370 (%100)	2210(%100)	2001.8	0.73	%6.3	%93.8	%0	0.655
	A (دید رو به تخته)	1502	648	586.9	-	-	0.7	-	-
	B (دید رو به تخته)	1754	776	702.9	-	-	0.72	-	-
	C (دید رو به تخته)	3803	2012	1822.4	-	-	0.77	-	-
نتایج میدانی	نقطه 1 (دید رو به تخته)	22	22.99	20.83	-	-	0.72	-	0.025
	نقطه 1 (دید رو به پنجره)	22	100.96	91.45	-	-	0.86	-	0.148
	نقطه 2 (دید رو به تخته)	129.11	58.72	53.19	-	-	0.79	-	0.081
	نقطه 2 (دید رو به پنجره)	129.11	229.7	208.07	-	-	0.86	-	0.28
	نقطه 3 (دید رو به تخته)	33.12	24.87	20.41	-	-	0.77	-	0.06

طبق جدول 6 نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که کلاس با رنگ سفید در سطوح داخلی بالاترین مقدار روشنایی فوتوپیک و ملانوپیک را برای 100% نقاط فضا (سنسورهای تحت شبیه‌سازی) ارائه می‌دهد. هرچند مقدار حد بالای M/P کلاس آبی بیشترین است. کلاس سبز و زرد علی‌رغم بازده خوب در روشنایی فوتوپیک (100% نقاط دارای حداقل روشنایی 300 lux)، در روشنایی معادل ملانوپیک به ترتیب برای 90.6% و 81.8% از نقاط مورد بررسی در فضا، EML بیش از 200lux را تأمین می‌کنند که در بین رنگ‌های مورد بررسی کمترین میزان از تأمین EML است. رنگ‌های کلاس سبز و زرد همچنین در ایجاد M-EDI (D65)

استاندارد برای همه نقاط منتخب کارآیی کافی را ندارند (M-EDI (D65 کمتر از 250 lux). کلاس سبز و زرد در نقاطی که تحت تأثیر روشنایی حاصل از تابش مستقیم آفتاب نیست، روشنایی ملانوپیک (EML و M-EDI (D65) کمتری را نسبت به کلاس آبی و سفید تولید می‌کنند. اما کلاس آبی قابلیت تولید بالایی از روشنایی ملانوپیک را دارد. در 93.8% نقاط کلاس آبی، میزان M/P بالای 0.9 است. گرچه در این کلاس روشنایی فوتوپیک کافی تنها برای 72.9% نقاط تأمین می‌شود که ضعیفترین عملکرد را در تأمین روشنایی بصری در بین گزینه‌ها دارد. فاکتور محرک سیرکادین نیز در تمامی نمونه‌های مورد مطالعه برای کل کلاس‌ها رعایت شده است (CS بیشتر از 0.3)، اما با توجه به نقاط A و B کلاس‌های زرد و سبز رنگ که به طور غالب خارج از تابش مستقیم آفتاب قرار دارند و تأثیر روشنایی غیر مستقیم دریافتی ناشی از بازتاب طیفی سطوح در آن‌ها بیشتر می‌شود؛ پیش‌بینی می‌شود محرک سیرکادین برای این نقاط در کلاس‌های زرد و سبز رنگ همانند نتایج مقادیر روشنایی ملانوپیک، کمتر از آستانه استاندارد باشد. استاندارد سازمان نوسازی مدارس (Deputy director of technical and supervision technical department of architecture, 2007) رنگ‌های سبز و زرد یا کرم را طبق روان‌شناسی رنگ‌ها جزء موارد پیشنهادی برای دیوارهای کلاس درس ابتدایی معرفی کرده است درحالی‌که نتایج این تحقیق در کلاس درس ابتدایی مورد آزمایش، عملکرد پایین غیر بصری رنگ‌های سبز و زرد را نشان داده است. همچنین در تحقیقی پیمایشی (Shayegan, 2009). پیشنهاد شده است که جهت کاهش خواب آلودگی دانشجویان از رنگ سبز در رنگ‌آمیزی کلاس‌ها استفاده شود که طبق نتایج پژوهش حاضر این رنگ برای این منظور مناسب‌ترین گزینه نیست.

نتایج برداشت میدانی نیز در جدول 6 نشان می‌دهند که تقریبا هیچ یک از نقاط مورد برداشت نمی‌توانند حد لازم شاخص‌های روشنایی بصری و غیر بصری (EML، CS، M-EDI) را تأمین کنند. تنها در نقطه 2 در دید رو به پنجره حدنیاز EML روی چشم تا حدودی تأمین می‌شود. نتایج نشان می‌دهند مقادیر EML، CS، M-EDIدر هر دو جهت دید نقطه 2 که نسبت به جهات دید بقیه نقاط، به پنجره نزدیک‌ترند، بیشتر است و این مقادیر در نقطه 3 که در دورترین وضعیت نسبت به پنجره قرار دارد غالبا کمترینند. همچنین این مقادیر در دید رو به پنجره بیشتر از دید رو به تخته در نقاط مورد مطالعه است. هیچ یک از نقاط، M/P بیشتر از 0.9 را که نشانگر روشنایی غنی از نور آبی با اثر ملانوپیک بیشتر است را نشان نمی‌دهند. این نتایج برای این کلاس درس احتمالا به دلیل دارا بودن پنجره‌هایی با جهت‌گیری تقریبا شمالی است. از طرفی حدودا نیمی از ارتفاع پنجره‌های انتهای کلاس به دلیل شیب زمین در گودال قرار گرفته و محیط اطراف با درختان پوشیده شده است. همچنین زمان اندازه‌گیری‌ها آسمان نسبتا ابری بود. این نتایج بیانگر آن هستند که نوع آسمان، پوشش گیاهی اطراف و جهت‌گیری پنجره‌ها می‌توانند به شکل مؤثری در دریافت روشنایی غیر بصری نقش داشته باشند.

4– نتیجه‌گیری

این تحقیق، با بررسی برخی از عوامل مستخرج از مطالعات معماری و پزشکی، اهمیت و نقش رنگ سطوح داخلی، جهت دید و فاصله از پنجره را بر برخی از انواع شاخص‌های روشنایی غیر بصری نشان می‌دهد. همان‌طور که در مطالعات علوم پزشکی، طیف نور نقش قابل توجهی در اثرات غیر بصری آن دارد، در معماری نیز مصالح با رنگ و ضریب بازتاب طیفی متناسب، بر طیف نور وارده بر چشم و به‌تبع آن روشنایی غیر بصری ایجاد شده، تأثیر مهمی دارند. در اقلیم‌هایی که نور روز کافی برای ایجاد آمادگی ذهنی و هوشیاری در ابتدای صبح وجود ندارد، می‌توان با انتخاب رنگ‌های مناسب تا حدودی شرایط مناسب را ایجاد کرد. در این پژوهش رنگ سفید بهترین عملکرد را در ایجاد روشنایی بصری و غیر بصری مناسب دارد. رنگ آبی در روشنایی غیر بصری نسبت به بقیه رنگ‌ها عملکرد بهتری دارد؛ اما در روشنایی بصری نسبت به بقیه ضعیف‌تر است. از سویی، رنگ‌های زرد و سبز علی‌رغم تولید روشنایی بصری کافی روی سطح کار در ایجاد روشنایی غیر بصری مناسب برای ناظر ناکارآمدترین عملکرد را در بین گزینه‌ها دارند.

همچنین نتایج نشان می‌دهند، موقعیت مکانی هر نقطه و تفاوت زاویه دید نسبت به پنجره اثر قابل‌توجهی بر میزان شاخص‌های روشنایی غیر بصری دریافتی می‌گذارند. هر چه ناظر نزدیک به پنجره یا جهت دید به سوی پنجره باشد، روشنایی غیر بصری بهتری دریافت می‌شود. لازم به ذکر است که نمونه مورد برداشت دارای پنجره‌های شمالی است و در صورت وجود پنجره‌های جنوبی در نظرگرفتن خیرگی نیز در انتخاب جهت دید مناسب، اهمیت می‌یابد. همچنین عوامل محیطی نظیر نوع آسمان، بافت و بستر پیرامونی و پوشش گیاهی پیرامونی بر روشنایی فضای داخل اثر گذارند. پژوهش حاضر تلاشی در به کاربستن مبانی نظری ذکر شده و برخی عوامل مؤثر بر اثرات غیر بصری نور در فضای داخل بود. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی با آزمایش بر روی عوامل مستخرج از این پژوهش مانند ابعاد مختلف پنجره، هندسه گوناگون فضایی، شیشه‌های رنگی و... کیفیت نور داخلی از منظر اثرات غیر بصری آن سنجیده شود.

تقدیر و تشکر

با سپاسگزاری از آقای مهندس محسنی و خانم مهندس جبلی در آزمایشگاه روشنایی دانشگاه تهران که در روند آزمایش میدانی و فراهم نمودن تجهیزات لازم مساعدت و همراهی بی‌دریغی داشتند.

پی نوشت

[1] ALFA
[2] Melanopic equivalent illuminance
[3] Melanopic equivalent daylight (D65) illuminance
[4] Circadian Stimulus
[5] Circadian
[6] Web of science
[7] The state-of-the-art subject
[8] Circadian efficiency of daylight distribution
[9] Photoreceptor
[10] Rod
[11] Cone
[12] Intrinsically photosensitive retinal ganglion cells (ipRGCs)
[13] Melanopsin
[14] Short-wavelength sensitive cone (S-cone)
[15] Middle-wavelength sensitive cone (M-cone)
[16] Long-wavelength sensitive cone (L-cone)
[17] Photopigment
[18] Photopic luminous efficiency function
[19] Melanopic action spectrum or spectral weighting function
[20] Spectral irradiance
[21] لازم به ذکر است برای حساسیت طیفی هر سلول چشم، روشنایی مرتبط با آن تعریف شده است. جهت اطلاع بشتر ر.ک. (Lucas et al., 2014).
[22] α-opic daylight (D65) efficacy ratio of illuminant E
جهت اطلاعات بیشتر ر.ک. (Schlangen & Price, 2021)
[23] α-opic Toolbox:
راهنمای استفاده از این جعبه ابزار در وب سایت زیر آمده است:
https://files.cie.co.at/CIE%20S%20026%20alpha-opic%20Toolbox%20User%20Guide.pdf
[24] Melanopic/Photopic (M/P) ratio
[25] https://www.lrc.rpi.edu/cscalculator/
[26] suprachiasmatic nucleus (SCN)
[27] Annual Sunlight Exposure
[28] Spatial Daylight autonomy
[29] Useful daylight Illuminance
[30] Gossen

منابع

Akacem, L. D., Wright, K. P., Jr., & LeBourgeois, M. K. (2016). Bedtime and evening light exposure influence circadian timing in preschool-age children: A field study. Neurobiol Sleep Circadian Rhythms, 1(2), 27-31. doi:https://doi.org/10.1016/j.nbscr.2016.11.002

Altenberg Vaz, N., & Inanici, M. (2021). Syncing with the Sky: Daylight-Driven Circadian Lighting Design. LEUKOS, 17(3), 291-309. doi:10.1080/15502724.2020.1785310

Anaraki, M., Fani, M., Shahverdi, A. F., & Sadat Zomorodian, Z. (2023). Evaluation of the effects of partition design on circadian daylighting in open-plan offices. Solar Energy, 264, 112067. doi:https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112067

Aoki, H., Yamada, N., Ozeki, Y., Yamane, H., & Kato, N. (1998). Minimum light intensity required to suppress nocturnal melatonin concentration in human saliva. Neurosci Lett, 252(2), 91-94. doi:10.1016/s0304-3940(98)00548-5

Behzadpour, M., & Khakzand, M. (2021). Investigating the effect of building information modeling (BIM) on the design and arrangement of furniture in the interior spaces of educational complexes (Case study: School of Architecture - Environmental Design, Civil Engineering and Mechanics, Iran University of Science and

human performances at a workspace: A full-scale experiment in Beijing. Building and Environment, 153 .185-168 , doi:10.1016/j.buildenv.2019.02.034

Cheshmeh Noor, M., Revell, V., Mehdizadeh Saradj, F., & Yazdanfar, S.-A. (2023). The impact of wavelength on acute non-visual responses to light: A systematic review and meta-analysis. Brain Research, 1816, 148 .470 doi:https://doi.org/10.1016/j.brainres.2023.148470

CIE. (2015). CIE TN 003:2015, Report on the First International Workshop on Circadian and Neurophysiological Photometry, 2013. doi:https://www.researchgate.net/publication/280231855_CIE_TN0032015

CIE .(2019) .CIE Position Statement on Non-Visual Effects of Light. Recommending proper light at the proper time, 2nd Edition. Retrieved from https://cie.co.at/publications/position-statement-non-visual-effects-light-recommending-proper-light-proper-time-2nd

CIE DIS 026, E. (2018). CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light, CIE DIS 026/E:2018. Vienna: International Commission on Illumination (CIE).

CIE S 026. (2020). α-opic Toolbox - v1.049a. International Commission on Illumination (CIE). doi:https://doi.org/10.25039/S026.2018.TB

Deputy director of technical and supervision technical department of architecture. (2007). Rules and criteria for the design of educational spaces, third edition: Ministry of Education and Training (Organization for Renovation, Development and Equipping of Schools in the country). [in Persian].

Enezi, J., Revell, V., Brown, T., Wynne, J., Schlangen, L., & Lucas, R. (2011). A "Melanopic" Spectral Efficiency Function Predicts the Sensitivity of Melanopsin Photoreceptors to Polychromatic Lights. Journal of biological rhythms, 26, 314-323. doi:10.1177/0748730411409719

Figueiro, M. G., Rea M. (2017). Quantifying Circadian Light and Its Impact [Web page]. Retrieved from https://www.architectmagazine.com

Technology). Journal of Sustainable Architecture and Urban Design, 9(2), 198-177. doi:10.22061/jsaud.2021.7843.1877. [in Persian].

Bellia, L., Błaszczak, U., Diglio, F., & Fragliasso, F. (2023). Assessment of melanopsin-based quantities: Comparison of selected design tools and validation against on-field measurements. Building and Environment, 232, 110037. doi:https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110037

Bhoi, J. D., Goel, M., Ribelayga, C. P., & Mangel, S. C. (2022). Circadian clock organization in the retina: From clock components to rod and cone pathways and visual function. Progress in Retinal and Eye Research, 101119. doi:https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2022.101119

Blume, C., Garbazza, C., & Spitschan, M. (2019). Effects of light on human circadian rhythms, sleep and mood. Somnologie, 23(3), 147-156. doi/10.1007:s11818-019-00215-x

Britannica. (2019). "biological rhythm". In T. E. o. Encyclopaedia (Ed.): Encyclopedia Britannica.

Britannica. (2020). "circadian rhythm summary". In T. E. o. Encyclopaedia (Ed.), Encyclopedia Britannica.

Brown, T. M., Brainard ,G. C., Cajochen, C., Czeisler, C. A., Hanifin, J. P., Lockley, S. W., . . . Wright, K. P., Jr. (2022). Recommendations for daytime, evening, and nighttime indoor light exposure to best support physiology, sleep, and wakefulness in healthy adults. PLOS Biology, 20(3), e3001571. doi:10.1371/journal.pbio.3001571

Cajochen, C., Münch, M., Kobialka, S., Kräuchi, K., Steiner, R., Oelhafen, P., . . . Wirz-Justice, A. (2005). High Sensitivity of Human Melatonin, Alertness, Thermoregulation, and Heart Rate to Short Wavelength Light. The Journal of clinical endocrinology and metabolism, 90, 1311-1316. doi:10.1210/jc.2004-0957

Chang, A. M., Scheer, F. A., & Czeisler, C. A. (2011). The human circadian system adapts to prior photic history. J. Physiol., 589(Pt 5), 10-95 .1102 doi:https://doi.org/10.1113/jphysiol.2010.201194

Chen, X., Zhang, X., & Du, J. (2019). Glazing type (colour and transmittance), daylighting, and

Licht, L. d. F. G. (2018). Guide to Human Centric Lighting (HCL) for Design and Implementation In licht.wissen 21. Frankfurt am Main, Germany: licht.de, Fördergemeinschaft Gutes Licht – eine Brancheninitiative des ZVEI e.V.

Lucas, R. J., Peirson, S. N., Berson, D. M., Brown, T. M., Cooper ,H. M., Czeisler, C. A., . . . Brainard, G. C. (2014). Measuring and using light in the melanopsin age. Trends in Neurosciences, 37(1), 1-9. doi:10.1016/j.tins.2013.10.004

Megha, K. B., Arathi, A., Shikha, S., Alka, R., Ramya, P., & Mohanan, P. V .(2024) . Significance of Melatonin in the Regulation of Circadian Rhythms and Disease Management. Molecular Neurobiology. doi:10.1007/s12035-024-03915-0

Miller, N. J., & Irvin, A. L. (2019). M/P ratios – Can we agree on how to calculate them? [web page]. Retrieved from https://www.ies.org/research/fires/m-p-ratios-can-we-agree-on-how-to-calculate-them/

Mohammadi, F., & Mofidi Shemirani, S. M. (2021). Multi-Objective Optimization of Window Configuration to Provide Integrated Visual Comfort Components and Energy Efficiency by the Genetic Algorithm (The Case Study: Primary School Classroom in Tehran - Iran). Geographical journal of territory, 17(68), 20-21. doi:SID. https://sid.ir/paper/951351/en. [in Persian].

Nabil, A., & Mardaljevic, J. (2005). Useful daylight illuminance: A new paradigm for assessing daylight in buildings. Lighting Research & Technology, 37, 41-59. doi:10.1191/1365782805li128oa

Noor, M. C., Saradj, F. M., & Yazdanfar, S.-A. (2023). Analytical evolution of measurement methods for light's non-visual effects. Results in Engineering, 17, 100922. doi:https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100922

Osibona, O., Solomon, B. D., & Fecht, D. (2021). Lighting in the Home and Health: A Systematic Review. Int J Environ Res Public Health, 18(2). doi:10.3390/ijerph18020609

Potočnik, J., & Košir, M. (2020). Influence of commercial glazing and wall colours on the resulting non-visual daylight conditions of an office. Building and Environment, 171, 106627. doi:https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106627

Golmohammadi, R., Yousefi, H., Khotbesara, N., Nasrolahi, A., & Kurd, N. (2021). Effects of Light on Attention and Reaction Time: A Systematic Review. J Res Health Sci, 21, e00529-e00529. doi:10.34172/jrhs.2021.66

Hart, N. S. (2009). Photopigments. In M. D. Binder, N. Hirokawa, & U. Windhorst (Eds.), Encyclopedia of Neuroscience (pp. 3148-3151). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Hartman, P., Maňková, L., Hanuliak, P., & Krajčík, M. (2016). The Influence of Internal Coloured Surfaces on the Circadian Efficiency of Indoor Daylight. Applied Mechanics and Materials, 861, 493-500. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.861.493

IES. (2021). The IES Nomenclature Committee [Web page]. Retrieved from https://www.ies.org/standards/definitions/

Joyce, D. S., Feigl, B., & Zele, A. J. (2016). Melanopsin-mediated post-illumination pupil response in the peripheral retina. Journal of Vision, 16(8). doi:10.1167/16.8.5

Khademagha, P., Aries, M. B. C., Rosemann, A. L. P., & van Loenen, E. J. (2016). Implementing non-image-forming effects of light in the built environment: A review on what we need. Building and Environment, 108, 263-272. doi:https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.035

Kim, I. T., Choi, A. S., & Sung, M. K. (2017). Development of a Colour Quality Assessment Tool for indoor luminous environments affecting the circadian rhythm of occupants. Building and Environment, 126, 252-265. doi:10.1016/j.buildenv.2017.10.009

Knoop, M., Broszio, K., Diakite, A., Liedtke, C., Niedling, M., Rothert, I . . . ,.Weber, N. (2019). Methods to Describe and Measure Lighting Conditions in Experiments on Non-Image-Forming Aspects. LEUKOS, 15(2-3), 163-179. doi:10.1080/15502724.2018.1518716

Konis, K. (2016). A novel circadian daylight metric for building design and evaluation. Building and Environment, 113. doi:10.1016/j.buildenv.2016.11.025

Lewis, J. (2023). The visible light spectrum, Once by signify [Web page]. Retrieved from https://www.once.lighting/visible-light-spectrum/

14. doi:https://jsaud.sru.ac.ir/article_851.html. [in Persian].

Vetter, C., Pattison, P. M., Houser, K., Herf, M., Phillips, A. J. K., Wright, K. P., . . . Glickman, G. (2022). A Review of Human Physiological Responses to Light: Implications for the Development of Integrative Lighting Solutions. LEUKOS, 18(3), 387-414. doi:10.1080/15502724.2021.1872383

Visser, K., Beersma, D., & Daan, S. (1999). Melatonin Suppression by Light in Humans Is Maximal When the Nasal Part of the Retina Is Illuminated. Journal of biological rhythms, 14, 116-121. doi:10.1177/074873099129000498

Walden, S. (2018). The "Indoor Generation" and the health risks of spending more time inside. Retrieved from https://www.usatoday.com/story/sponsor-story/velux/2018/05/15/indoor-generation-and-health-risks-spending-more-time-inside/610289002/

Weaver, D. R., & Emery, P. (2013). Chapter 39 - Circadian Timekeeping. In L. R. Squire, D. Berg, F. E. Bloom, S. du Lac, A. Ghosh, & N. C. Spitzer (Eds.), Fundamental Neuroscience (Fourth Edition) (pp. 819-845). San Diego: Academic Press.

WELL. (2020). Circadian lighting design. Q4. Retrieved from https://standard.wellcertified.com/light/circadian-lighting-design

Xiao, H., Cai, H., & Li, X. (2021). Non-visual effects of indoor light environment on humans: A review☆. Physiology & Behavior, 228, 113195. doi:https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2020.113195

Zeng, Y., Sun, H., Lin, B., & Zhang, Q. (2021). Non-visual effects of office light environment: Field evaluation, model comparison, and spectral analysis. Building and Environment, 197, 107859. doi:https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107859

Zhou, L., Zhang, Z., Nice, E., Huang, C., Zhang, W., & Tang, Y. (2022). Circadian rhythms and cancers: the intrinsic links and therapeutic potentials. Journal of Hematology & Oncology, 15(1), 21. doi:10.1186/s13045-022-01238-y

Zia Sherrell, M. (2022, July 18, 2022). Dopamine deficiency: What you need to know. Retrieved from https://www.medicalnewstoday.com/articles/320637

Potočnik, J., & Košir, M. (2021). Influence of geometrical and optical building parameters on the circadian daylighting of an office. Journal of Building Engineering, 42, 102402. doi:https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102402

Rea, M. (2020). The e(M/P)ty promise (MAGAZINE) [Web page]. Retrieved from https://www.ledsmagazine.com/lighting-health-wellbeing/article/14177194/the-empty-promise-magazine

Rea, M., Figueiro, M., Bierman, A., & Bullough, J. (2010). Circadian Light. Journal of circadian rhythms, 8, 2. doi:10.1186/1740-3391-8-2

Rea, M. S., Nagare, R., & Figueiro, M. G. (2021). Modeling Circadian Phototransduction: Quantitative Predictions of Psychophysical Data. Front. Neurosci, 15(44). doi:10.3389/fnins.2021.615322

Schlangen, L., & Price, L .(2021) .The Lighting Environment, Its Metrology, and Non-visual Responses. Frontiers in Neurology, 12, 624861. doi:10.3389/fneur.2021.624861

Shayegan, F. (2009). Factors effective in students' sleepiness in class. Police Management Studies Quarterly (PMSQ), 4 .342-362 ,(3)doi:SID. https://sid.ir/paper/135306/en. [in Persian].

Solemma. (2022). ALFA [Software]. Retrieved from https://www.solemma.com/alfa

Tähkämö, L., Partonen, T., & Pesonen, A. K. (2019). Systematic review of light exposure impact on human circadian rhythm. Chronobiol Int, 36(2), 151-170. doi:10.1080/07420528.2018.1527773

Tekieh, T., Lockley, S., Robinson, P., McCloskey, S., Zobaer, M. S., & Postnova, S. (2020). Modeling melanopsin-mediated effects of light on circadian phase, melatonin suppression, and subjective sleepiness. Journal of pineal research, 69. doi:10.1111/jpi.12681

UL. (2019). UL RP 24480, Recommended Practice and Design Guideline for Promoting Circadian Entrainment with Light for Day-Active People. In: (In public review.) Northbrook ,IL: Underwriters Laboratories Inc.

Vaziri, V., & karamati, s. (2017). The effect of satisfaction from architectural quality of learning environments on the student success. Journal of Sustainable Architecture and Urban Design, 5(1), 1-