

اصول منابع روشنایی

۱. مقدمه

توسعه و اصول منابع روشنایی مدرن، به ویژه فناوری دیودهای ساطع کننده نور (LED)، نیازمند درک عمیقی از پارامترهای کوانتیتاتیو و کوالیتیو است که فراتر از مفاهیم سنتی شدت نور و شار نوری قرار می‌گیرد. این سند بازنگری شده با هدف ارائه یک چارچوب تحلیلی و مهندسی برای ارزیابی دقیق منابع روشنایی، به‌ویژه در پروژه‌های معماری و فضاهای حساس، تدوین شده است. تمرکز اصلی بر روی یکپارچه‌سازی درک کمیت‌های فیزیکی نور با معیارهای کیفیت بصری، پایداری عملکردی و ملاحظات طراحی سیستم (System Design) است. هدف، ارائه مستنداتی است که مبنای تصمیم‌گیری‌های دقیق برای معماران، طراحان روشنایی و مهندسان برق فراهم آورد تا از انطباق سیستم‌های روشنایی با استانداردها و انتظارات عملکردی اطمینان حاصل شود. این بازنگری شامل حذف ابهامات فرمول نویسی نمایشی و تأکید بر درک مفهومی پارامترها در بافت مهندسی نورپردازی است.

۲. کمیت‌های نور (تعاریف مهندسی)

کمیت‌های نور، معیارهای بنیادینی هستند که توصیف فیزیکی و کمی رفتار منابع روشنایی را ممکن می‌سازند. در مهندسی نور، این کمیت‌ها مستقیماً بر میزان روشنایی ادراک‌شده و کارایی انرژی سیستم تأثیر می‌گذارند.

شار نوری (Luminous Flux)

شار نوری، که با واحد لومن (lm) اندازه‌گیری می‌شود، معیاری برای کل توان نوری خروجی از یک منبع نور در تمام جهات است. این کمیت با در نظر گرفتن حساسیت چشم انسان به طول موج‌های مختلف (تابع لومینوسیت استاندارد) محاسبه می‌شود. این کمیت نشان دهنده ظرفیت کلی یک لامپ برای تولید نور مرئی است.

شدت نور: (Luminous Intensity)

شدت نور، که با واحد کاندلا (cd) بیان می‌شود، معیاری برای شار نوری خروجی منبع در یک جهت فضایی مشخص است. این کمیت برای محاسبه توزیع نور در یک فضا و تعیین میزان نور متمرکز یا پخش‌شده اهمیت حیاتی دارد.

شدت روشنایی: (Illuminance)

شدت روشنایی، که با واحد لوکس (lx) اندازه‌گیری می‌شود، میزان شار نوری فرودی بر واحد سطح است. این کمیت

معیاری برای میزان نوری است که به یک سطح مشخص برخورد می‌کند و ارتباط مستقیم با سطح روشنایی مورد نیاز برای یک کاربرد خاص دارد.

درخشندگی: (Luminance)

درخشندگی، که با واحد کاندلا بر متر مربع (cd/m^2) یا نیت (nit) اندازه‌گیری می‌شود، نمایانگر میزان نوری است که از یک سطح خاص در یک جهت مشخص ساطع یا بازتاب می‌شود و مستقیماً با ادراک روشنایی توسط ناظر ارتباط دارد. این کمیت پارامتر کلیدی در ارزیابی خیرگی و کنتراست است.

کارایی نوری: (Luminous Efficacy)

کارایی نوری، که با واحد لومن بر وات (lm/W) بیان می‌شود، نسبت شار نوری خروجی به توان الکتریکی مصرفی منبع نور است. این کمیت معیار اصلی سنجش بهره‌وری انرژی یک منبع روشنایی است.

۳. کیفیت رنگ نور

کیفیت رنگ نور فراتر از کمیت محض شار نوری است و شامل ویژگی‌های طیفی و ادراکی نوری است که محیط را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

CRI (Color Rendering Index) تحلیل انتقادی

شاخص نمود رنگ (CRI)، معیاری است که توانایی یک منبع نوری در بازنمایی صادقانه رنگ اشیاء در مقایسه با یک مرجع ایده‌آل (مانند تابش جسم سیاه یا نور خورشید) را ارزیابی می‌کند. CRI بر اساس تست ۹ رنگ مرجع استاندارد (R1 تا R9 محاسبه می‌شود).

تحلیل انتقادی :

در حالی که CRI، به‌ویژه مقدار $\$R_a\$$ (میانگین ۹ رنگ)، یک شاخص رایج است، رویکرد آن برای منابع نوری مدرن به ویژه LEDهای دارای فسفر متفاوت (محدودیت‌هایی دارد CRI). صرفاً میانگین عملکرد در ۹ طیف محدود را نشان می‌دهد و ممکن است برای رنگ‌های خاص، به ویژه رنگ‌های اشباع و زنده) مانند R9 که قرمز پررنگ است، دقت کافی نداشته باشد. منابعی با CRI یکسان می‌توانند در نحوه بازنمایی کلی فضا تفاوت‌های چشمگیری داشته باشند.

SPD به عنوان DNA نور (توصیفی و تحلیلی)

منحنی توزیع طیفی توان (Spectral Power Distribution - SPD)، قلب فیزیکی هر منبع نور است SPD. یک نمودار

است که توزیع توان تابشی منبع در هر طول موج طیف مرئی را نشان می‌دهد. این منحنی در واقع "اثر انگشت" یا "DNA" نور است.

تحلیل SPD برای طراحان و مهندسان ضروری است زیرا مشخص می‌کند منبع نور چگونه طیف‌های مختلف را تقویت یا تضعیف می‌کند. به عنوان مثال، در LED های سفید معمولی، SPD دارای یک پیک تیز در ناحیه آبی (ناشی از تداخل لایه نیتريد گاليم و فسفر) و یک پیک پهن‌تر در ناحیه سبز-زرد (ناشی از فسفر) است. رنگ نهایی و کیفیت ادراک شده نور، مستقیماً تابعی از شکل این منحنی است.

TM-30 توضیح مفهومی شاخص‌های Rf و (Rg)

با توجه به محدودیت‌های CRI، سیستم ارزیابی رنگ جدید (TM-30 توسعه یافته توسط IES معرفی شده است. این سیستم دو شاخص اصلی ارائه می‌دهد:

شاخص بازتولید رنگ : (Rf - Color Rendering Fidelity)

Rf بر اساس روشی مشابه CRI، اما با استفاده از مجموعه گسترده‌تر و پیشرفته‌تری از ۹۹ رنگ مرجع (GretagMacbeth Color Checker) محاسبه می‌شود. Rf نمایانگر میزان وفاداری منبع نور در بازتولید دقیق رنگ‌ها است. مقدار بالاتر Rf (نزدیک به ۱۰۰) نشان‌دهنده بازتولید رنگی دقیق‌تر است.

شاخص اشباع رنگ : (Rg - Color Gamut Index)

Rg توانایی منبع نور در اشباع کردن یا تقویت رنگ‌ها را اندازه‌گیری می‌کند. این شاخص بر خلاف Rf، میزان کشش یا فراتر رفتن از وفاداری کامل را نشان می‌دهد. مقدار Rg بالاتر از ۱۰۰ به این معناست که رنگ‌ها زنده‌تر و اشباع شده‌تر به نظر می‌رسند، در حالی که Rg پایین‌تر از ۱۰۰ نشان‌دهنده رنگ‌های کسل‌تر است.

Duv و اثرات ادراکی

شاخص Duv (Distance from the Blackbody Locus) یک پارامتر مهم در تحلیل هم‌ترازی رنگ منبع نور با دمای رنگ همبسته (CCT) است. CCT، موقعیت منبع نور را بر روی منحنی جسم سیاه (Blackbody Locus) در دیاگرام رنگی تعیین می‌کند.

اگر منبع نور دقیقاً روی منحنی جسم سیاه قرار گیرد، Duv برابر با صفر است. مقادیر مثبت Duv نشان‌دهنده گرایش رنگ به سمت سبز (Green Bias) و مقادیر منفی نشان‌دهنده گرایش به سمت ارغوانی یا صورتی (Magenta Bias) است. این انحراف، به ویژه در فضاهای معماری که نیاز به ثبات رنگ دارند، تأثیر مستقیمی بر ادراک فضایی و راحتی بصری دارد.

۴. یکنواختی رنگ و بینینگ LED

یکی از چالش‌های اصلی در طراحی سیستم‌های روشنایی مبتنی بر LED، مدیریت و کنترل تنوع رنگی ناشی از فرآیند تولید است.

SDCM و MacAdam Ellipse توضیح کلامی

منحنی ماک‌آدام (MacAdam Ellipse) در فضای رنگی مشخص معمولاً در دیاگرام رنگی (CIE 1931) مرزهای قابل تحمل برای تفاوت رنگ بین دو نور را تعریف می‌کند. این بیضی‌ها نشان‌دهنده محدوده‌ای هستند که در آن تفاوت‌های رنگی قابل تشخیص توسط چشم انسان نیست یا کمتر قابل توجه است.

SDCM (Standard Deviation of Color Matching) :

SDCM واحد اندازه‌گیری این تفاوت رنگی است. یک محدوده SDCM مشخص (مثلاً ۳ یا ۵ مرحله در بیضی ماک‌آدام) نشان‌دهنده مقدار مجاز تنوع رنگی بین نمونه‌های یک چراغ یا بین چراغ‌های مختلف یک پروژه است. در کاربردهای دقیق، مانند فضاهای هنری یا طراحی فضاهای داخلی که نیاز به هم‌شکلی کامل رنگ دارند، انتخاب منابع با SDCM پایین (مثلاً ۱ یا ۲) حیاتی است.

Manufacturing-Aware Design در چراغ‌های خطی

در طراحی چراغ‌های خطی (مانند پنل‌های بزرگ یا نورپردازی‌های پیوسته)، ترکیب منابع نوری متعدد مانند ردیفی از چیپ‌های LED نیازمند رویکردی است که این تنوع ساخت (Manufacturing Variation) را در نظر بگیرد.

طراحی آگاه از ساخت (Manufacturing-Aware Design)

بدین معناست که طراح باید از دیتاشیت‌های تولیدکنندگان، دسته‌بندی‌های رنگی (Binning) و تحمل‌های مجاز برای CCT و SDCM آگاه باشد. در یک چراغ خطی، اگر منابع با بینینگ‌های متفاوت در یک خط قرار گیرند، منجر به ایجاد تغییر رنگ تدریجی (Color Gradient) در طول خط می‌شود. طراحی مؤثر نیازمند انتخاب منابعی از یک دسته‌بندی نزدیک یا استفاده از الگوریتم‌های کنترلی برای تعدیل خروجی رنگی در طول مسیر نصب است تا یکنواختی بصری تضمین گردد.

۵. عمر، حرارت و قابلیت اطمینان

عملکرد بلندمدت منابع LED به شدت تحت تأثیر مدیریت حرارتی و شرایط عملیاتی است.

LM-80 (Luminous Flux Maintenance of LED Light Sources)

این استاندارد روشی برای تست آزمایشگاهی و تعیین نرخ افت شار نوری در طول زمان را تعریف می‌کند. در این تست، قطعات نوری LEDs یا ماژول‌ها (در شرایط دمایی ثابت) معمولاً دمای بستر یا (Junction Temperature) و برای دوره‌های طولانی (معمولاً ۶۰۰۰ ساعت) تحت جریان ثابت کار می‌کنند تا داده‌های مربوط به افت روشنایی جمع‌آوری شود.

TM-21 (Projected Lumen Maintenance of LED Light Sources)

این استاندارد، روشی برای برون‌یابی (Extrapolation) داده‌های جمع‌آوری شده از تست LM-80 برای تخمین طول عمر نوری منبع در شرایط عملیاتی واقعی است. TM-21 امکان پیش‌بینی مدت زمانی را فراهم می‌آورد که طی آن، شار نوری منبع به یک درصد مشخصی از مقدار اولیه خود کاهش یابد.

L70 / B50

این اصطلاحات معیارهای رایج برای تعریف طول عمر مفید منابع LED هستند:

• L70

نشان‌دهنده مدت زمانی است که در آن، شار نوری منبع به ۷۰ درصد مقدار اولیه خود کاهش می‌یابد.

• B50

نشان‌دهنده متوسط تعداد منابعی است که تا رسیدن به معیار L70 دچار خرابی نوری می‌شوند؛ در اینجا، ۵۰ درصد منابع مورد آزمایش.

بنابراین، عبارت L70/B50 به این معناست که انتظار می‌رود ۵۰ درصد از چراغ‌ها حداقل ۷۰ درصد روشنایی اولیه خود را پس از مدت زمان تعیین شده توسط برون‌یابی TM-21 حفظ کنند.

تحلیل مسیر حرارتی و اثر آن بر پایداری رنگ

مدیریت حرارتی (Thermal Management) برای حفظ پایداری نه تنها شار نوری بلکه کیفیت رنگ LED نیز حیاتی است. افزایش دمای بستر (Junction Temperature) به دلایل زیر بر رنگ تأثیر می‌گذارد:

1. تغییر در عملکرد فسفر:

دمای بالاتر، کارایی تبدیل نور آبی به طیف‌های طولانی‌تر (زرد/قرمز) توسط فسفر را تغییر می‌دهد، که منجر به کاهش خروجی رنگ‌های گرم‌تر و تغییر CCT می‌شود (معمولاً به سمت آبی‌تر شدن).

2. تغییر در نیمه‌هادی:

دمای بالاتر بر کارایی ساطع‌کننده نیمه‌هادی تأثیر می‌گذارد و توزیع SPD را دگرگون می‌سازد.

طراحی مسیر حرارتی مناسب برای حفظ دمای بستر در محدوده ایمن به ویژه پایین‌تر از نقطه تعریف شده در تست-LM 80 برای اطمینان از پایداری رنگ در طول عمر مورد نظر ضروری است.

۶. درایور، دیمینگ و فلیکر

درایورهای LED نقش حیاتی در کنترل جریان، ولتاژ و در نتیجه کیفیت نوری خروجی منابع دارند. نحوه دیمینگ (کاهش شدت نور) یکی از مهم‌ترین عوامل در ایجاد عوارض بصری ناخواسته است.

Hybrid Dimming, CCR, PWM

PWM (Pulse Width Modulation):

درایورهای PWM با تغییر سریع روشن و خاموش کردن منبع نور با فرکانس بالا، شدت نور متوسط را کنترل می‌کنند. اگرچه این روش دیمینگ بسیار کارآمد است، اما اگر فرکانس سوئیچینگ پایین باشد، می‌تواند باعث پدید آمدن پدیده فلیکر (سوسو زدن) قابل مشاهده شود.

Analog Dimming یا CCR (Constant Current Reduction)

این روش با کاهش جریان مستقیم عبوری از LED، شدت نور را کاهش می‌دهد. این تکنیک معمولاً فلیکر ایجاد نمی‌کند، اما ممکن است کارایی نوری (lm/W) را در سطوح دیمینگ پایین کاهش دهد و اندکی تغییر رنگ تغییر (CCT) ایجاد کند.

ترکیبی (Hybrid Dimming):

درایورهای پیشرفته از ترکیب این دو روش استفاده می‌کنند. برای دیمینگ‌های جزئی (مثلاً از ۱۰۰٪ تا ۳۰٪)، از CCR استفاده می‌شود تا کیفیت رنگ و عدم وجود فلیکر حفظ شود. هنگامی که کاهش بیشتری مورد نیاز است (مثلاً زیر ۳۰٪)، به PWM سوئیچ می‌شود.

Pst LM و Flicker

فلیکر (Flicker) یا سوسو زدن، تغییرات ناخواسته در شار نوری در یک بازه زمانی مشخص است که می‌تواند منجر به خستگی چشم، سردرد و حتی اثر استروبواسکوپیک شود.

Pst LM (Pst Light Flicker Metric)

این شاخص، معیاری استاندارد برای ارزیابی شدت و تأثیر فلیر بر ادراک بصری انسان است. این شاخص، شدت فلیر را در یک بازه فرکانسی مشخص (معمولاً ۰.۱ تا ۱۰۰ هرتز) اندازه‌گیری می‌کند. مقادیر Pst پایین‌تر (نزدیک به صفر) نشان‌دهنده عدم وجود فلیر قابل ادراک هستند. در محیط‌های کاری و فضاهای آموزشی، رعایت محدودیت‌های سختگیرانه برای Pst LM (معمولاً کمتر از ۱) الزامی است.

۷. جمع‌بندی مهندسی و چک‌لیست نهایی انتخاب منبع نور

انتخاب بهینه منبع روشنایی نیازمند یک ارزیابی چندوجهی است که پارامترهای کوانتیتاتیو و کیفیتی را یکپارچه سازد.

چک‌لیست مهندسی انتخاب منبع نور:

پارامتر	واحد / معیار	ملاحظات کلیدی
شار نوری مورد نیاز	(lm) لومن	و سطح هندسی (lx) محاسبه بر اساس استاندارد شدت روشنایی فضا
کارایی نوری	lm/W	مورد CRI و CCT انتخاب منابع با بالاترین کارایی در محدوده نیاز
دمای رنگ همبسته (CCT)	(K) کلوین	انتخاب بر اساس کاربری فضا (گرم، خنثی، سرد)
نمود رنگ (CRI / TM-30)	\$R_a\$, Rf, Rg	\$R_9\$ برای ارزیابی دقیق‌تر؛ توجه ویژه به Rf و Rg استفاده از \$R_g\$ و
تنوع رنگی (Binning)	SDCM	پایین، به‌ویژه در پروژه‌های مقیاس بزرگ SDCM انتخاب منابع با
پایداری رنگ	Duv (مقدار عددی)	برای حفظ ثبات ادراکی در بلندمدت Duv حداقل‌سازی انحراف
مدیریت حرارتی	(°C) دمای بستر	بررسی پایداری حرارتی جهت جلوگیری از افت شار نوری و تغییر رنگ
طول عمر نوری	(ساعت) L70 / B50	TM-21 و برون‌یابی LM-80 ارزیابی بر اساس داده‌های معتبر
کنترل و دیمینگ	PWM / CCR / Hybrid	انتخاب درایور متناسب با نیاز دیمینگ و کنترل فلیر پروژه
شاخص فلیر	Pst LM	با الزامات استاندارد در سطوح Pst LM اطمینان از انطباق مختلف دیمینگ

۸. واژه‌نامه فنی جامع

تعریف مهندسی تخصصی	واژه (انگلیسی)	واژه (فارسی)
کل توان نوری ساطع شده از منبع در تمام جهات (لومن)	Luminous Flux	شار نوری
شار نوری در یک زاویه فضایی واحد (کاندلا)	Luminous Intensity	شدت نور
شار نوری فرودی بر واحد سطح (لوکس)	Illuminance	شدت روشنایی
میزان نور ساطع شده یا بازتاب شده از یک سطح در جهت دید ناظر (کاندلا بر متر مربع)	Luminance	درخشندگی
نسبت شار نوری خروجی به توان الکتریکی مصرفی (لومن بر وات)	Luminous Efficacy	کارایی نوری
دمایی که طیف نوری منبع را در دیاگرام رنگی به بهترین شکل شبیه سازی می کند (کلوین)	Correlated Color Temperature (CCT)	دمای رنگ همبسته
توانایی منبع در بازتولید صادقانه رنگ ها در مقایسه با مرجع ایده آل	Color Rendering Index (CRI)	شاخص نمود رنگ
نمایش گرافیکی توان منبع در طول موج های مختلف طیف مرئی (DNA) نور	Spectral Power Distribution (SPD)	توزیع طیفی توان
میزان دقت بازتولید رنگ ها بر اساس ۹۹ رنگ مرجع	Color Rendering Fidelity (Rf)	وفاداری رنگ (TM-30)
توانایی منبع در تقویت یا اشباع رنگ ها نسبت به مرجع	Color Gamut Index (Rg)	اشباع رنگ (TM-30)
فاصله رنگ منبع نور از منحنی جسم سیاه در دیاگرام رنگی	Duv	انحراف سیاهجسم
واحد اندازه گیری اندازه بیضی ماک آدام، نمایانگر تolerانس پذیری تفاوت رنگ	Standard Deviation of Color Matching (SDCM)	انحراف استاندارد تطابق رنگ
ناحیه ای در فضای رنگی که تغییرات رنگی داخل آن توسط ناظر قابل تشخیص نیست	MacAdam Ellipse	بیضی ماک آدام
کاهش تدریجی شار نوری منبع نور در طول عمر عملیاتی	Lumen Depreciation	افت شار نوری
تغییرات سریع و ناخواسته در شار نوری خروجی منبع	Flicker	سوسو زدن (فلیکر)
روش دیمینگ با کاهش جریان مستقیم الکتریکی LED	Constant Current Reduction (CCR)	کنترل جریان ثابت
روش دیمینگ با سوئیچینگ سریع روشن و خاموش کردن منبع نور	Pulse Width Modulation (PWM)	مدولاسیون عرض پالس