بهینه سازی روشنائی معابر

حسین محسنی مهرداد صمدی فرهنگ قاسمی افشار

دانشگاه تهران

چکیده:

روشنائی معابر یکی از مصارف مهم انرژی برق است. باتوجه به این نکته که این مصرف در ساعتهای اولیه شب شروع می شود، بهینه سازی آن ضمن بهبود کیفی روشنائی معابر، در پائین آوردن قله بار مؤثر است. ضمناً پرداختن به مسئله روشنائی، از دیدگاه های مهندسی، اقتصادی، معماری و ایمنی معابر، خصوصاً در شهرهای بزرگ، باتوجه به ارتباط بین روشنائی معابر و ایمنی ترافیک، درخور اهمیت فراوان است. کنترل کیفیت لامپ ها و چراغها مبنای بهبود آنها و کاهش مصرف برق می‌باشد.

در این مقاله ضمن بررسی برخی مسائل در رابطه با روشنائی معابر، به بیان روشهائی در بهینه‌سازی سیستم روشنائی با استفاده از کامپیوتر به عنوان یک ابزار مؤثر و کارآمد خواهیم پرداخت.

۱- شرح مقاله

در راستای بهینه سازی سیستم های روشنائی معابر، ابتدا لازم است مشکلات و کاستی ها را بدانیم و سپس به انتخاب بهترین روشها درجهت رفع آن مشکلات بپردازیم. با توجه به این نکته، ابتدا به بررسی مسائل سیستم روشنائی از سه دیدگاه مورد بحث یعنی مهندسی، اقتصادی و معماری خواهیم پرداخت. سپس به معرفی یک روش کامپیوتری که برای استخراج و اندازه گیری پارامترهای فتومتریک منابع روشنائی، اعم از چراغهای خیابانی و یا منابع روشنائی می پردازیم. همچنین در رابطه با دستگاهی جهت استخراج مؤلفه های هارمونیک جریان یک مصرف کننده، مانند یک چراغ خیابانی، گزارش می شود.

لازم به توضیح است که کلیهٔ قسمت‌های مربوط به این دستگاه‌ها، در آزمایشگاه روشنایی دانشکده فنی دانشگاه تهران با تشویق‌های مادی و معنوی مسئولین وزارت نیرو و شرکت‌های برق‌های منطقه‌ای تهران، اصفهان، خراسان و مازندران انجام شده است و در بخش‌های مختلف صنعت، خصوصاً روشنایی معابر قابل بهره‌برداری می‌باشد.

۲ - بهینه‌سازی روشنایی معابر از دیدگاه مهندسی

پارامترهای تعیین‌کنندهٔ کیفیت یک چراغ خیابانی را می‌توان از نظر مهندسی به سه بخش زیر تقسیم‌بندی نمود:

- پارامترهای فتومتریک
- پارامترهای الکتریکی
- پارامترهای مکانیکی و پارامترهای مربوط به مواد اجزاء تشکیل دهنده چراغ

۲ - ۱ پارامترهای فتومتریک

پارامترهای فتومتریک شامل منحنی‌های پخش نور قطبی، چگونگی توزیع شدت روشنایی در سطوح قائم و افقی، منحنی‌های ایزولوکس و ایزوکاندلا، بهرهٔ نوری چراغ در طرف خیابان و طرف پیاده‌رو می‌باشد. برای قضاوت درباره کیفیت فنی یک چراغ خیابانی لازم است پارامترهای فوق استخراج و مورد بررسی واقع شوند.

چنان که می‌دانیم از دید مهندسی روشنایی یک سیستم خوب باید شرایطی چون کافی بودن

میزان نور رسیده به سطح خیابان، یکنواخت بودن توزیع نور در سطح خیابان و نیز عدم خیرگی چشم رانندگان توسط منابع نوری را برآورده نماید. بنابراین، توجه به نکات زیر در مورد چراغهای خیابانی و همچنین طراحی سیستم روشنایی ضروری است.

۲ - ۱ - ۱ پائین بودن بهرهٔ نوری چراغها

نسبت شار نوری پخش شده توسط چراغ به شار تولید شده بوسیلهٔ لامپ، بهره نوری چراغ نامیده می‌شود. کم بودن این نسبت یکی از عمده‌ترین مشکلات چراغهایی است که در روشنایی معابر مورد استفاده قرار می‌گیرند. یعنی انرژی الکتریکی توسط لامپ به انرژی تابشی تبدیل می‌شود اما مقداری از آن (که معمولاً درصد قابل توجهی است) پیش از استفاده یعنی قبل از خروج از چراغ به صورت انرژی گرمایی درمی‌آید و عملاً از بین می‌رود.

گاهی بهرهٔ نوری چراغهایی که بدون آزمایش مورد استفاده قرار می‌گیرند از ٪ ۶۰ تجاوز نمی‌کند، یعنی بیش از ٪ ۴۰ انرژی تابشی لامپ تلف می‌شود. البته این در حالتی است که چراغ نو و تمیز باشد؛ چراکه عاملی چون آلودگی و فرسودگی درپائین آوردن بهرهٔ نوری چراغ بسیار مؤثراست.

۲ - ۱ - ۲ عدم یکنواختی توزیع نور در سطح معابر

چنان که بیان شد، لازم است توزیع روشنایی در سطح معابر یکنواخت باشد یعنی نسبت مقدار ماکزیمم شدت روشنایی به مقدار مینیمم آن زیاد نباشد. این عدم یکنواختی یکی از مشکلات سیستم روشنایی است و علت آن عمدتاً عدم دسترسی طراح به منحنی پخش نور چراغها و نیز نامناسب بودن نحوهٔ پخش نور چراغهای به کار رفته در طرح می‌باشد.

۲ - ۱ - ۳ پخش نامناسب نور توسط چراغها

چگونگی پخش نور چراغهای خیابانی توسط استانداردهای روشنایی تعیین شده است. معمولاً این چراغها باید نور را در طول خیابان متمرکز نمایند تا با تعداد کمتری چراغ بتوان طول بیشتری از خیابان را روشن کرد، ولی اغلب چراغهایی که بدون انجام آزمایش از خارج خریداری می‌شوند و یا در داخل کشور ساخته می‌شوند قسمت اعظم نور را در زیر چراغ متمرکز می‌کنند و این باعث می‌شود نور راکمتر در طول خیابان بتابانند و قسمت پشت چراغها بیش از حد لازم روشن

شود. این مسأله خود باعث بروز مشکلاتی در امر طراحی صحیح سیستم روشنایی می‌باشد.

۲ - ۲ پارامترهای الکتریکی

چنان که پیش از این نیز بیان شد سیستم‌های روشنایی میزان قابل توجهی از مصرف انرژی الکتریکی را به خود اختصاص می‌دهند. با توجه به این نکته که سیستم روشنایی معابر از تعداد بسیار زیادی چراغ خیابانی تشکیل می‌شود، مناسب است ویژگی یک چراغ خیابانی از نظر چگونگی مصرف انرژی الکتریکی مورد توجه قرار گیرد. در این زمینه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد :

۲ - ۲ - ۱ مشخصات ولتاژ و جریان و توان مصرفی تجهیزات

این ویژگی‌ها توسط استانداردهای مربوط به مسائل روشنایی فنی بیان می‌شوند. بدیهی است که سازندگان باید با توجه به مقادیر ذکر شده در استانداردها اقدام به طراحی اجزاء الکتریکی چراغ خیابانی بنمایند. در این میان ذکر دو نکته را پیرامون ویژگی‌های الکتریکی چراغ خیابانی ضروری می‌دانیم. یکی لزوم توجه به امپدانس چُک استفاده شده در چراغ خیابانی است و دیگری توجه به‌ضریب قدرت یا $\cos\varphi$ چراغ می‌باشد. غالباً مشاهده می‌شود امپدانس چُک‌هایی که در داخل کشور ساخته می‌شوند و یا بدون بررسی و آزمایش از خارج وارد می‌گردند، بیش از حد استاندارد است. بزرگی امپدانس چُک باعث افزایش افت ولتاژ روی آن می‌شود در نتیجه دو سر لامپ ولتاژ کمتری افت می‌کند. کم شدن این ولتاژ سبب می‌شود شار نوری تولید شده توسط لامپ و به دنبال آن چراغ کمتر از حد نامی خود باشد. مشکل دیگری که وجود دارد عدم توجه برخی سازندگان به مسأله اصلاح $\cos\varphi$ است. عملاً فقدان خازنهای اصلاح‌کنندهٔ ضریب قدرت باعث می‌شود سیستم روشنایی مقدار زیادی بار راکتیو از شبکه بگیرد. افزایش بیش از حد بار راکتیو زیان‌هایی را به شبکه توزیع وارد می‌آورد.

۲ - ۲ - ۲ بالا بودن درصد هارمونیک‌های جریان

بالا بودن درصد هارمونیک‌های جریانِ چُک‌ها از دیگر مشکلات سیستم روشنایی است. در طراحی و ساخت این چُک‌ها باید روشهائی پیش گرفته شود که تا حد ممکن سبب تضعیف هارمونیک‌های جریان شوند. وجود مؤلفه‌های هارمونیک در جریان مصرف‌کننده‌ها سبب ایجاد

جریان گردشی در ترانسفورماتورهای توزیع و انتقال می‌گردد. این جریانها ضمن اتلاف انرژی الکتریکی باعث صدمه رساند به ترانسفورماتورها و تغییر شکل ولتاژ یعنی کاهش کیفیت انرژی الکتریکی می‌شوند.

۳ - پارامترهای مکانیکی و مواد اجزاء تشکیل دهنده چراغ

این پارامترها شامل استقامت مکانیکی در قبال تغییرات درجه حرارت، رطوبت و فشار و مقاومت در قبال ضربه‌های مکانیکی می‌باشد. انتخاب آلیاژهای مناسب در ساخت بدنهٔ چراغها ضمن برآورده ساختن موارد فوق، نقش مؤثری در تبادل حرارت چراغ با محیط نیز خواهد داشت. این تبادل حرارت مناسب، خود باعث افزایش عمر اجزاء مختلف چراغ می‌شود. توجه به جنس رفلکتور و حباب و نیز شکل ظاهری آنها در بالا بردن بهره نوری چراغ و همچنین در بهبود بخشیدن به پخش نور چراغ بسیار مؤثر است.

٤ - بهینه‌سازی روشنایی معابر از دیدگاه اقتصادی

مقدار قابل توجهی از انرژی تابشی که بوسیلهٔ لامپ تولید می‌شود توسط اجزاء چراغ جذب و به حرارت تبدیل می‌گردد. جذب انرژی تابشی و تبدیل آن به انرژی گرمایی عملاً باعث اتلاف انرژی الکتریکی می‌شود. فاکتور بهرهٔ نوری نشان‌دهندهٔ میزان اتلاف انرژی توسط چراغ است. چنانکه پیش از این ذکر شد پائین بودن میزان این شاخص در چراغها یکی از مشکلات سیستم روشنایی است. در اینجا به بررسی اثر بهره نوری چراغ در میزان اتلاف انرژی خواهیم پرداخت.

۵ - اثر بهره نوری چراغ در میزان تلف انرژی

اگر بهرهٔ نوری یک چراغ خیابانی x% باشد و در آن از لامپی استفاده شود که با توان مصرفی P_1 [W] ، شار نوری Φ_1 [lm] را تولید می نماید، شار نوری تولید شده توسط چراغ برابر است با:

$$\text{شار نوری چراغ} = \Phi \times x/100 \qquad (۱)$$

اکنون فرض کنیم بتوان به روشی بهره نوری چراغ را a% افزایش داد. حال اگر بخواهیم چراغ همان شارنوری قبلی را تولید نماید، باید شارنوری لامپ به Φ_2 کاهش پیدا کند. دراین صورت داریم:

$$\text{شار نوری چراغ} = \Phi_1 \times x/100 = \Phi_2 \times (x+a)/100 \qquad (۲)$$

یعنی

$$\Phi_2 = \Phi_1 \times x/(x+a) \qquad (۳)$$

با افزایش بهرهٔ نوری چراغ می توان با تولید شار نوری کمتری در درون چراغ، همان شار نوری خروجی قبلی را تولید نمود.

حال اگر فرض کنیم بهرهٔ نوری لامپ A [lm/W] باشد، مقدار شار نوری Φ_1 برابر است با:

$$\Phi_1 = P_1 \times A \ [lm] \qquad (۴)$$

اکنون اگر بخواهیم لامپ شار Φ_2 [lm] را تولید نماید، پس لازم است توان P_2 [W] را مصرف کند. در این حالت رابطهٔ زیر برقرار است:

$$P_2 = \Phi_2/A = (\Phi_1/A) \times x/(x+a) \qquad (۵)$$

با توجه به رابطه (۵) می توان نوشت:

$$P_2 = P_1 \times x/(x+a) \qquad (۶)$$

در اینجا البته $P_2 < P_1$ می باشد. به اینترتیب، در این حالت چراغ قادر است شار نوری مورد نیاز را با مصرف توان کمتری تولید نماید. اکنون می توان تفاوت میزان مصرف انرژی الکتریکی یک چراغ خیابانی را که دارای بهرهٔ x % است با زمانی که بهرهٔ آن (x+a) % می باشد به صورت

$$\Delta P = P_1 - P_2 = P_1 - P_1 \times x/(x+a) = P_1 \times a/(x+a) \qquad (۷)$$

محاسبه نمود.

رابطه فوق تفاوت مقدار مصرف انرژی دو چراغ را که میزان تولید نور هردو یکسان است نشان می‌دهد. چراغی که دارای بهرهٔ x % است برای تولید مقدار نور معینی P_1' [W] مصرف می کند. حال آنکه چراغی که دارای بهرهٔ (x+a) % است برای تولید همان مقدار نور $P_1 \times a/(x+a)$ [W] کمتر مصرف می نماید. با توجه به عبارت (۷) می توان گفت:

- افزایش P_1 سبب زیاد شدن مقدار صرفه جوئی در انرژی مصرفی می شود. به این سبب هرچه توان لامپ ها بیشتر باشد اثر افزایش بهره چراغ نیز بیشتر است.
- هرچه مقدار بهره چراغها x کمتر باشد، اثر افزایش بهره درمیزان صرفه جوئی چشمگیرتر است.

این نکات با توجه به پائین بودن بهره نوری چراغهائی که در داخل کشور ساخته می شوند ویااز خارج کشور بدون آزمایش و بررسی وارد می شوند، شایان توجه است. شرایط زیر را برای یک چراغ خیابانی در نظر می گیریم:

توان مصرفی چراغ ..... $P_1 = 400$ [W]

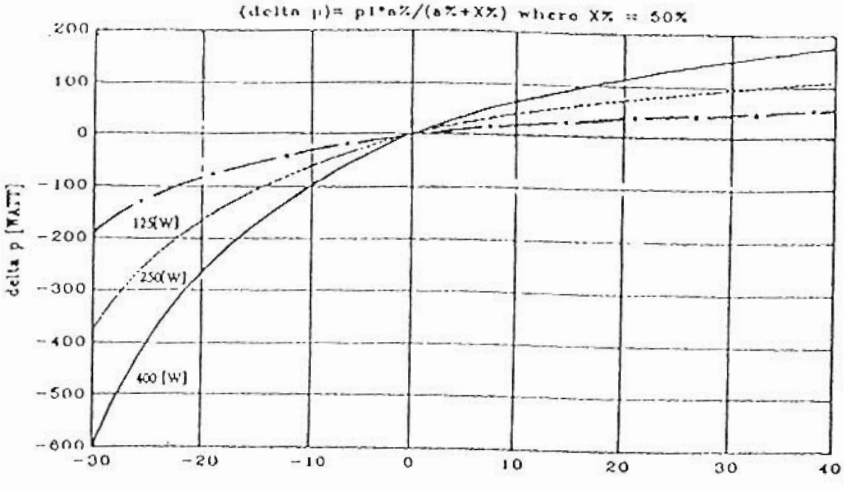
بهره اولیه چراغ ..... $x = 50$ %

میزان افزایش بهره ..... $a = 5$ %

اگر فرض کنیم این چراغ درهر شبانه روز بطور متوسط ۱۰ ساعت روشن باشد، میزان انرژی صرفه جوئی شده در مدت یک سال را مطابق روش زیر محاسبه نمود:

کاهش توان مصرفی $\Delta P = 400 \times 5/(50+5) = 36{,}36$ [W]

انرژی صرفه جوئی شده $\Delta E = 10 \times 365 \times 36{,}36 = 132727$ [Wh]



شکل(۱) : تغییرات توان مصرفی چراغ باتغییر بهره نوری به میزان a % ازمقدار ۵۰ % با فرض شار نوری ثابت چراغ

چنانکه مشاهده می‌شود با افزایش تنها ۵ درصد در بهرهٔ نوری یک چراغ می‌توان از به هدر رفتن مقدار قابل توجهی انرژی جلوگیری نمود. اکنون با درنظر گرفتن تعداد بسیار زیاد چراغهای بکار رفته در سیستم روشنایی، میزان انرژی صرفه‌جویی شده در ازای بهره‌وری چراغها قابل پیش‌بینی است.

شکل ۱ نشان می‌دهد که اگر بهرهٔ نوری یک چراغ از مقدار ۵۰ درصد به میزان a درصد کم یا

زیاد شود، توان مصرفی چراغ چه میزان تغییر می‌کند. در این نمودار فرض شده است که شار نوری چراغ ثابت مانده است.

۶- بهینه‌سازی روشنایی معابر از دیدگاه معماری

یکی از نکات مهم در سیستم روشنایی مسأله ایمنی معابر است. غیریکنواختی توزیع روشنایی در سطح معابر و در برخی موارد خیرگی چشم رانندگان توسط چراغهایی که در دید مستقیم قرار می‌گیرند، از میزان ایمنی معابر می‌کاهد. این مشکل عمدتاً به دلیل در دسترس نبودن منحنی پخش نور منابع به کار رفته در سیستم روشنایی ایجاد می‌شود. به این ترتیب مهندس طراح نمی‌تواند با درنظر گرفتن کلیه پارامترهای دخیل در امر طراحی، به یک طراحی درست بپردازد.

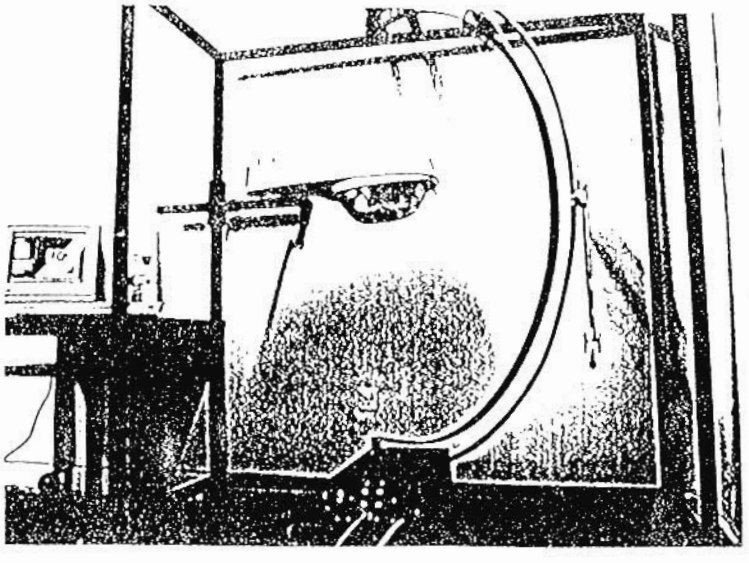
۷- ضرورت تست چراغهای خیابانی

با بررسی نکات بیان شده مشخص می‌گردد که منابع نور باید از نظر ویژگی‌های فتومتریک، الکتریکی و مکانیکی درست و اصولی طراحی شوند. به این ترتیب علاوه بر اینکه چراغها با مصرف انرژی کمتری قادر به تولید نور مناسب خواهند بود، در ضمن چگونگی پخش نور آنها نیز اصلاح می‌گردد. زیرا تنها هنگامی می‌توان به یک طراحی خوب در سیستم روشنایی معابر پرداخت که نحوهٔ پخش نور چراغهای استفاده شده با طرح موردنظر سازگار باشد. با توجه به نکات یاد شده، ضرورت تست چراغهای خیابانی چه در هنگام ساخت و چه پس از مدتی کار، مشخص می‌گردد. در این راستا لازم است این چراغها و منابع نوری و ترکیب آنها از نظر ویژگی‌های فتومتریک و نیز مشخصات الکتریکی مورد آزمایش واقع شوند. البته توجه به ویژگی‌های مکانیکی چراغها نیز با اهمیت است ولی از گستره کار این مقاله خارج می‌باشد.

۸- دستگاه اندازه‌گیری پخش نور چراغ

آزمایش فتومتریک چراغهای خیابانی علاوه بر اینکه کاری پرزحمت است، نیاز به نیروی انسانی متخصص و صرف وقت طولانی دارد. اهمیت آزمایش منابع نور و نیز وجود مشکلات فوق ما را بر آن داشت تا به طراحی و ساخت دستگاهی اقدام نمائیم که به صورت خودکار و با صرف زمانی کوتاه منبع نور مورد مطالعه را از نظر ویژگی‌های فتومتریک مورد ارزیابی قرار دهد. به‌کارگیری

کامپیوتر در ساخت این دستگاه سبب شده است استخراج اطلاعات فتومتریک چراغهای خیابانی با سرعت و با کمترین مقدار خطا امکان‌پذیر باشد. با استفاده از این دستگاه می‌توان در زمان طراحی و ساخت چراغ، به راحتی اثر تغییراتی را که برای بهینه‌سازی مشخصات نوری چراغ در رفلکتور، حباب و یا سایر اجزاء آن داده می‌شود، مشاهده نمود. حتی می‌توان با کمک نرم‌افزارهای کامپیوتری یک سیستم روشنایی متشکل از چراغهای مورد مطالعه را شبیه‌سازی نمود و اثر نور چراغ را روی کل سیستم مورد ارزیابی قرار داد.



شکل(۲) : دستگاه اندازه‌گیری پخش نور چراغ

در این دستگاه منبع نور مورد مطالعه در محلی به صورت ثابت نصب می‌شود. برای بدست آوردن مقدار نوری که در هر نقطه از چراغ خارج می‌شود، سنسوری که به شدت نور حساس است، حول نقطه‌ای به مرکز منبع نور به حرکت درمی‌آید. این سنسور روی یک کرهٔ فرضی که منبع نور در مرکز آن واقع شده است حرکت می‌کند. به این ترتیب وضعیت آن از نظر زوایای φ و θ در مختصات کروی تغییر می‌کند. در زاویه‌های مناسب φ و θ مقدار شدت نوری که به سنسور می‌رسد توسط کامپیوتر دریافت و در حافظه آن ثبت می‌شود. این مقادیر در نهایت یک جدول را تشکیل می‌دهند که

مبین چگونگی پخش نور چراغ می‌باشد. با استفاده از مقادیر این جدول و به کارگیری نرم‌افزارهای مناسب می‌توان منحنی‌های پخش نور قطبی، پخش نور افقی و عمودی، ایزوکاندلا، ایزولوکس و ... را بدست آورد و ترسیم نمود. این منحنی‌ها در کار طراحی سیستم روشنایی بسیار با ارزش هستند. شکل ۲ دستگاه مورد بحث را در حال آزمایش یک چراغ خیابانی نشان می‌دهد.

۹- دستگاه اندازه‌گیری شکل موج و هارمونیک‌های جریان لامپ

چنانکه پیش از این نیز اشاره شد بالا بودن درصد هارمونیک‌های جریان، یکی از مشکلات چراغهای خیابانی است. پس لازم است درصد هارمونیک‌های جریان یک چراغ خیابانی اندازه‌گیری شود. در این راستا اقدام به ساخت وسیله‌ای شد که به صورت همزمان از شکل موج ولتاژ و جریان چراغ نمونه‌گیری می‌کند. این مقادیر در حافظه کامپیوتر ثبت می‌شوند. با استفاده از این نمونه‌ها شکل موج ولتاژ و جریان مصرفی چراغ توسط کامپیوتر ترسیم می‌شوند. حال با در دست داشتن شکل موج ولتاژ و جریان توسط یک نرم‌افزار کامپیوتری درصد هارمونیک‌های جریان، توان مصرفی، مقدار ضریب قدرت بار و مقدار مؤثر جریان محاسبه می‌شوند.

۱۰- نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه روشنایی معابر، یک قسمت عمده مصرف در ساعت پیک بار می‌باشد و باتوجه به اهمیت روشنایی معابر از نظر ایمنی و همچنین به دلیل هارمونیک‌هایی که منابع نوری ایجاد می‌کنند، لازم است به روشنایی معابر از جنبه‌های مختلف، از جمله بهره نوری لامپ‌ها و چراغها و نحوهٔ پخش نور آنها و ایجاد هارمونیک‌ها دقت شود.

در این راستا آزمایشگاه روشنایی گروه برق و کامپیوتر دانشکده فنی دانشگاه تهران در سالهای اخیر با کمک مادی و معنوی شرکتهای برق منطقه‌ای و بعضی تولیدکنندگان چراغ خیابانی گسترش یافته و دستگاه‌های جدید و ابتکاری برای اندازه‌گیری و ضبط کامپیوتری مشخصات لامپ‌ها و چراغها مانند پخش نور و بهره‌دهی لامپ، هارمونیک‌هایی که لامپ ایجاد می‌کنند ساخته است.

تشکر و قدردانی

از سرکار خانم مهندس فاطمه همداد و آقای مهندس نوید لشکریان، اعضای هیئت علمی گروه مهندسی برق و کامپیوتر دانشکده فنی دانشگاه تهران همچنین از آقای مهندس عبدالرحیم ایزدی و آقای مهندس کمال حسینی، از شرکت برق منطقه‌ای اصفهان به خاطر راهنمایی‌ها و کمک‌های ارزشمند تشکر می‌شود.

ضمیمه

معرفی کمیات روشنایی

شدت نور I

واحد شدت نور کاندلا می‌باشد [cd]، و آن عبارت از نوری است که از $1/60\ cm^2$ جسم سیاهی که تا دمای 2045 K گرم شده باشد در جهت عمود ساطع می‌شود. 2045 K دمای گداخته شدن پلاتین است.

شار نوری یا جریان نور Φ

واحد جریان نور لومن می‌باشد [lm]، یک لومن برابر جریان نوری ساطع شده از یک منبع نور نقطه‌ای شکل است که در زاویه فضایی واحد، شدت نور یک کاندلا را تولید نماید. مقدار شار نوری در حالت کلی به صورت انتگرال زیر محاسبه می‌شود:

$$\Phi = \int I(\Omega)\, d\Omega$$

زاویهٔ فضایی Ω

واحد زاویه فضایی استرادیان می‌باشد [Sr] . یک استرادیان برابر زاویه حجمی رأس مخروطی است که روی کره‌ای به مرکز رأس مخروط و به شعاع یک متر، سطح یک متر مربع را جدا کند.

مقدار نور Q

برابر است با حاصلضرب جریان نور در زمان. واحد Q برحسب [lm.h] (لومن ساعت) بیان می‌شود.

بهرهٔ نوری لامپ

عبارت است از نسبت شار نوری تولید شده توسط لامپ برحسب لومن به توان مصرفی لامپ برحسب وات. واحد بهره نوری برحسب [lm/W] بیان می‌شود.

شدت روشنایی یا چگالی شار روشنایی

شدت روشنایی یا چگالی شار روشنایی عبارت است از میزان جریان نوری که به واحد سطح می‌تابد و به صورت $E = \Phi/A$ [lm/m²] و یا به صورت کلی با رابطه $E = d\Phi/da$ تعریف می‌گردد. واحد شدت روشنایی E [Lux] یا [lm/m²] می‌باشد.

فرض می‌شود منبع نوری مورد مطالعه در مبدأ مختصات (قطبی) قرار گرفته باشد و محور قائم از مرکز آن عبور کرده باشد، در این شرایط در هر زاویه (نسبت به محور قائم)، فاصلهٔ شعاعی نقطهٔ روی منحنی از مبدأ مختصات (مرکز منبع) مبین شدت نور ساطع شده از منبع نور در آن زاویه می‌باشد.

منحنی پخش نور عمودی

این منحنی قطبی چگونگی پخش نور منبع را در یک زاویه خاص φ_m نمایش می‌دهد. φ_m زاویه‌ای است که شدت نور ماکزیمم منبع در آن اتفاق می‌افتد. به این ترتیب این منحنی خم $I(\theta,\varphi_m)$ را در اختیار قرار می‌دهد.

منحنی پخش نور افقی

این منحنی تغییرات شدت نور را در زاویه عمودی θ_m و زوایای افقی صفر تا 360 مشخص می‌سازد. θ_m زاویه عمودی است که شدت نور ماکزیمم چراغ در آن اتفاق می‌افتد.

مراجع:

[۱] کلهر: مهندسی روشنائی ، چاپ تهران
[۲] ذواشتیاق: مهندسی روشنائی ، چاپ تهران