

تحلیل نقش مدیریت بهینه روشنایی معابر شهری در کاهش مصرف انرژی و ارتقای ایمنی شهری

محمد رضا اردشیری^۱، جعفر موذن^۲، حاج علی منفرد^۳، پیمان افشارپور^۴

۱- کارشناسی مدیریت امور فرهنگی، دانشگاه علمی کاربردی فرهنگ. (جمع دار اموال - سازمان مدیریت پسماندها)

۲- لیسانس مهندسی تکنولوژی برق قدرت، دانشگاه اهرم. (کارشناس نصب علائم و تابلوها)

۳- لیسانس عمران، دانشگاه علمی کاربردی. (جمع دار امین اموال و انبار شهرداری)

۴- کارشناسی، دانشگاه علمی کاربردی. (پست سازمانی کار پرداز)

چکیده

رشد شتابان شهرنشینی و افزایش فعالیت‌های شهری در ساعات شب، اهمیت روشنایی معابر به عنوان یکی از زیرساخت‌های بنیادین خدمات شهری را دوچندان کرده است. سیستم‌های روشنایی علاوه بر نقش اساسی در تأمین ایمنی تردد عابران و وسایل نقلیه و کاهش وقوع جرائم شهری، یکی از پرمصرف‌ترین بخش‌های انرژی در بودجه عملیاتی شهرداری‌ها محسوب می‌شوند. از این رو، مدیریت بهینه روشنایی معابر شهری به عنوان راهبردی کلیدی در تحقق توسعه پایدار، کاهش مصرف انرژی و ارتقای کیفیت زندگی شهری مطرح می‌شود. هدف این مقاله، تحلیل جامع نقش مدیریت بهینه روشنایی معابر در کاهش مصرف انرژی الکتریکی و ارتقای ایمنی شهری با تأکید بر رویکردهای داده‌محور، مدیریتی و فناورانه است. روش تحقیق مقاله به صورت مروری-تحلیلی انجام شده و بر پایه تحلیل کیفی مطالعات علمی داخلی مرتبط با روشنایی شهری، مدیریت انرژی، ایمنی فضاهای شهری و پایداری زیست‌محیطی استوار است. در این راستا، رویکردهای نوین نظیر گذار به فناوری LED، استفاده از سیستم‌های کنترل هوشمند، به کارگیری سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS)، مدیریت مبتنی بر داده، و الگوریتم‌های دیمینگ تطبیقی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین ارتباط میان کیفیت روشنایی، یکنواختی نور، طیف نوری و ادراک ایمنی شهروندان تحلیل شده است. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که مدیریت هوشمند روشنایی، در صورت یکپارچه‌سازی با زیرساخت‌های اطلاعاتی و مدیریتی شهرداری، می‌تواند ضمن دستیابی به صرفه‌جویی قابل توجه انرژی، سطح ایمنی عینی و ذهنی شهروندان را بهبود بخشد. همچنین توجه به ملاحظات زیست‌محیطی مانند کاهش آلودگی نوری و حفظ شب‌زیست‌پذیری، نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری بلندمدت سیستم‌های روشنایی دارد. در نتیجه، مدیریت بهینه روشنایی معابر شهری نه تنها یک اقدام فنی در حوزه انرژی، بلکه راهبردی چندبعدی در ارتقای ایمنی، کاهش هزینه‌های شهری و تحقق شهر پایدار است که نیازمند نگاه سیستمی، سیاست‌گذاری یکپارچه و ظرفیت‌سازی تخصصی در بدنه مدیریت شهری می‌باشد.

واژگان کلیدی: روشنایی هوشمند، بهره‌وری انرژی، ایمنی شهری، مدیریت دارایی، پایداری شهری

. مقدمه

توسعه پایدار شهری، مفهوم محوری برنامه‌ریزی و مدیریت کلان‌شهرهای معاصر را تشکیل می‌دهد و در این میان، زیرساخت‌های عمومی از جمله سیستم روشنایی معابر، به عنوان یکی از ارکان حیاتی خدمات شهری، نقشی دوگانه ایفا می‌کنند؛ از یک سو، تأمین روشنایی کافی برای تسهیل حرکت ایمن وسایل نقلیه و عابران پیاده در طول ساعات شبانه ضروری است و از سوی دیگر، این سیستم‌ها غالباً یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی در بودجه عملیاتی شهرداری‌ها به شمار می‌روند. در دهه‌های اخیر، با توجه به افزایش قیمت حامل‌های انرژی و تعهدات بین‌المللی در زمینه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، لزوم بازنگری اساسی در معماری و نحوه بهره‌برداری از شبکه‌های روشنایی شهری بیش از پیش نمایان شده است (رستم‌پیشه و همکاران، ۲۰۲۳). این گذار از سیستم‌های سنتی با توان ثابت و ساعات کار ثابت، به سمت سامانه‌هایی که پاسخگوی نیاز واقعی محیط هستند، یک پارادایم مدیریتی جدید را تعریف می‌کند که مستلزم درک عمیق از فناوری‌های نوین و تأثیرات چندوجهی آن‌ها بر محیط زیست شهری و کیفیت زندگی شهروندان است. ضرورت این تحول نه تنها از منظر اقتصادی صرف، بلکه از منظر زیست‌محیطی و اجتماعی نیز اهمیت یافته است، چرا که نورپردازی نامناسب می‌تواند منجر به آلودگی نوری، اختلال در اکوسیستم شبانه و کاهش ادراک ایمنی در فضاهای عمومی شود (مولائی، ۲۰۲۲). این مقاله با تمرکز بر دیدگاه مهندسی و مدیریتی شهرداری، به بررسی ابعاد فنی و استراتژیک پیاده‌سازی مدیریت بهینه روشنایی می‌پردازد.

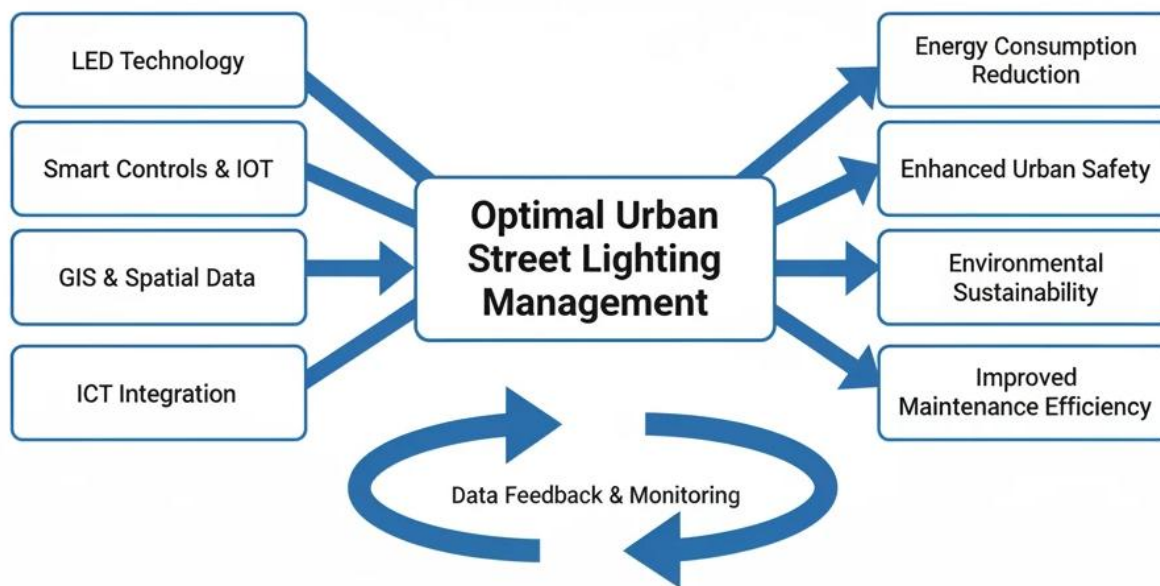
فناوری‌های نوین روشنایی، به‌ویژه گذار به چراغ‌های دیود ساطع‌کننده نور (LED)، صرفه‌جویی‌های انرژی اولیه قابل توجهی را به ارمغان آورده‌اند، اما پتانسیل واقعی بهینه‌سازی زمانی محقق می‌شود که این سخت‌افزار جدید با سیستم‌های کنترل هوشمند و راهکارهای نرم‌افزاری یکپارچه همراه شود (شجاعیان، ۲۰۲۴). این سیستم‌های کنترل می‌توانند از طریق جمع‌آوری داده‌های محیطی نظیر وضعیت آب و هوا، میزان روشنایی طبیعی موجود، و الگوهای تردد، تنظیمات روشنایی را به صورت لحظه‌ای تغییر دهند تا سطح روشنایی مطلوب تنها در مکان و زمان مورد نیاز تأمین شود و از اتلاف انرژی ناشی از روشنایی بیش از حد (Over-illumination) جلوگیری شود. مدیران شهری در این مسیر باید به توازن دقیقی میان سه عامل اصلی دست یابند: حداکثر صرفه‌جویی انرژی، حفظ حداقل استانداردهای ایمنی روشنایی معابر (Luminance Levels)، و به حداقل رساندن اثرات منفی زیست‌محیطی نظیر آلودگی نوری که خود بر سلامت روانی شهروندان تأثیرگذار است (نوبر و همکاران، ۲۰۲۵). این پیچیدگی نیازمند چارچوبی مدیریتی است که بتواند داده‌های فنی را به تصمیمات عملیاتی تبدیل کند.

درک اهمیت این موضوع از منظر ایمنی، حیاتی است؛ روشنایی ناکافی مستقیماً با افزایش نرخ تصادفات رانندگی و جرائم شهری مرتبط است (باقری ده باغی و همکاران، ۲۰۱۵). بنابراین، مدیریت بهینه نباید به معنای صرفاً کم کردن مصرف انرژی باشد، بلکه به معنای توزیع هوشمند و کارآمد نور در مکان‌هایی است که بیشترین نیاز به دید را فراهم می‌آورد. در این راستا، استفاده از ابزارهای مکانی-اطلاعاتی مانند GIS برای نقشه‌برداری دقیق از نقاط حادثه‌خیز و تحلیل توزیع شدت نور (Illuminance Distribution)، به مدیران امکان می‌دهد تا با دقت بالا، نقاط نیازمند ارتقا یا تنظیم مجدد را شناسایی کنند و از تخصیص منابع نوری به مناطق کم‌کارکرد اجتناب نمایند (خاکپور و همکاران، ۲۰۱۰). این رویکرد داده‌محور، مبنای اتخاذ تصمیمات سرمایه‌گذاری هوشمند در بازسازی زیرساخت‌ها و اجرای طرح‌های کنترلی خواهد بود.

نکته کلیدی دیگر در مدیریت بهینه، بحث نگهداری و بهره‌برداری (O&M) تجهیزات است. سیستم‌های روشنایی سنتی نیاز به بازرسی‌های دوره‌ای پرهزینه و زمان‌بر داشتند که غالباً منجر به تأخیر در تعویض لامپ‌های سوخته یا کم‌بازده می‌شد و این امر خود عاملی برای کاهش موقت ایمنی و افزایش اتلاف انرژی بود. با پیاده‌سازی سیستم‌های مدیریت متمرکز مبتنی بر اینترنت اشیا، امکان پایش لحظه‌ای وضعیت هر چراغ (شامل ولتاژ، جریان، دمای کارکرد و زمان عمر باقی‌مانده) فراهم شده است

(امیدی و همکاران، ۲۰۲۴). این قابلیت، امکان برنامه‌ریزی برای نگهداری پیشگیرانه (Predictive Maintenance) را میسر می‌سازد که به شدت هزینه‌های عملیاتی را کاهش داده و اطمینان از کارکرد مستمر سیستم را تضمین می‌کند.

یکی از ابعاد پیچیده‌ای که مدیریت شهری باید در نظر بگیرد، تأثیرات شب‌زیست‌پذیری (Urban Nocturnality) و ملاحظات اکولوژیکی است. نورپردازی نامناسب، به‌ویژه طیف نوری با دمای رنگ بالا (CCT بالا) در فناوری LED، می‌تواند بر ریتم شبانه‌روزی (Circadian Rhythm) انسان‌ها و حیات وحش محلی، به‌ویژه حشرات و پرندگان، تأثیر منفی بگذارد (زارع و همکاران، ۲۰۲۵). مدیریت بهینه مستلزم انتخاب دقیق شاخص نمود رنگ (CRI) و دمای رنگ همبسته (CCT) است به نحوی که تعادلی میان کیفیت دید مورد نیاز برای رانندگی و کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی حفظ شود. تأکید بر نقش مدیریت انرژی در این میان، محدود به صرفه‌جویی در مصرف برق نیست، بلکه شامل مدیریت کامل چرخه عمر دارایی‌ها (Asset Lifecycle Management) نیز می‌شود. این امر مستلزم یک رویکرد سیستمی است که از مرحله طراحی و انتخاب تجهیزات آغاز شده و تا مرحله بهره‌برداری و نوسازی ادامه می‌یابد؛ یک تصمیم اشتباه در مرحله طراحی می‌تواند منجر به دهه‌ها مصرف انرژی نامطلوب و هزینه‌های بالای جایگزینی گردد (فروتن و صدراآبادی، ۲۰۱۸). بنابراین، کارمندان شهرداری با تحصیلات مهندسی برق باید از دانش تخصصی لازم برای ارزیابی فنی-اقتصادی فناوری‌های جدید بهره‌مند باشند. در نهایت، این مقاله بر این فرض استوار است که دستیابی به مدیریت بهینه، تنها از طریق یکپارچه‌سازی فناوری اطلاعات و ارتباطات (ICT) با زیرساخت‌های سنتی روشنایی، تحت یک بستر مدیریتی واحد و مبتنی بر داده‌ها، میسر خواهد بود. این بستر باید قابلیت‌های پیش‌بینی، کنترل از راه دور، و گزارش‌دهی تحلیلی جامع را برای مدیران فراهم آورد تا بتوانند پاسخگوی نیازهای متغیر شهری در کوتاه‌مدت و بلندمدت باشند و شهر را به سمت پایداری انرژی و ایمنی افزون‌تر هدایت نمایند.



شکل ۱. مدل مفهومی مدیریت بهینه روشنایی معابر شهری و پیامدهای آن در کاهش مصرف انرژی و ارتقای ایمنی شهری

این شکل، چارچوب مفهومی مدیریت بهینه روشنایی معابر شهری را نشان می‌دهد که در آن مجموعه‌ای از ورودی‌های فناورانه و مدیریتی شامل فناوری ال‌ای‌دی (LED Technology)، سیستم‌های کنترل هوشمند و اینترنت اشیاء (Smart Controls & IoT)، داده‌های مکانی و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS & Spatial Data) و یکپارچه‌سازی فناوری اطلاعات و ارتباطات (ICT)

Integration)، به صورت هم افزا در یک بستر مدیریتی واحد تجمیع شده اند. این ورودی ها منجر به شکل گیری نظام «مدیریت بهینه روشنایی معابر شهری» می شوند که قادر است تصمیمات روشنایی را مبتنی بر داده، شرایط محیطی و نیاز واقعی فضاهای شهری اتخاذ نماید. خروجی های این نظام شامل کاهش مصرف انرژی الکتریکی، ارتقای ایمنی شهری، بهبود پایداری زیست محیطی و افزایش کارایی نگهداری و بهره برداری است که همگی اهداف کلیدی مدیریت شهری پایدار محسوب می شوند. در بخش پایینی مدل، حلقه بازخورد «پایش و بازخورد داده ها» (Data Feedback & Monitoring) نمایش داده شده است که بیانگر نقش پایش مستمر عملکرد سیستم در اصلاح تنظیمات روشنایی، بهینه سازی تصمیمات مدیریتی و حرکت تدریجی سیستم به سمت کارایی بالاتر و پاسخگویی پویا به تغییرات محیط شهری می باشد.

۲. مبانی فنی و گذار فناوری روشنایی

تحول بنیادین در زیرساخت روشنایی معابر شهری از لامپ های تخلیه الکتریکی (مانند بخار سدیم فشار بالا و جیوه) به فناوری LED، نه تنها یک ارتقاء فنی، بلکه یک نقطه عطف در استراتژی های مدیریت انرژی شهری محسوب می شود. لامپ های سنتی به دلیل بازده نوری پایین، عمر کوتاه، تأخیر در روشن شدن کامل و تولید طیف نوری با کیفیت پایین، منبع اصلی اتلاف انرژی و چالش های عملیاتی بودند (مودت و همکاران، ۲۰۲۳). در مقابل، چراغ های LED با بازده نوری بسیار بالاتر (که می تواند از ۱۰۰ لومن بر وات فراتر رود)، طول عمر بیش از ۵۰,۰۰۰ ساعت، پاسخ سریع و امکان کنترل پذیری دقیق، فرصتی بی نظیر برای کاهش بار الکتریکی شبکه شهری فراهم آوردند. این مزیت ذاتی LED در کاهش مصرف انرژی، اولین گام در مسیر بهینه سازی است، اما این پتانسیل تنها با پیاده سازی مکانیزم های کنترلی هوشمند به طور کامل فعال می گردد.

اهمیت بازده نوری (Luminous Efficacy) در تحلیل اقتصادی-انرژی بسیار بالاست؛ اگرچه هزینه اولیه نصب تجهیزات LED بالاتر است، اما نرخ بازگشت سرمایه (ROI) به دلیل صرفه جویی قابل توجه در مصرف سالانه و کاهش هزینه های نگهداری، به سرعت توجیه اقتصادی می یابد (فروتن و صدرآبادی، ۲۰۱۸). با این حال، مهندسين برق در شهرداری باید فراتر از بازده اسمی چراغ، به مفهوم "روشنایی مؤثر" (Effective Illumination) توجه کنند که شامل تلفات نوری در اپتیک ها، اتلاف های الکتریکی درایور و تأثیر دمای محیط بر عملکرد LED است. مدیریت بهینه نیازمند آن است که از ظرفیت کامل این تجهیزات بهره برداری شود، که این امر مستلزم حفاظت حرارتی مناسب و انتخاب درایورهای با ضریب توان (Power Factor) بالا برای کاهش هارمونیک ها و افزایش راندمان شبکه توزیع است. پتانسیل واقعی LED زمانی آشکار می شود که سیستم های کنترل مبتنی بر ارتباطات (Communication-based Controls) به کار گرفته شوند؛ این کنترل ها شامل دیمینگ تطبیقی (Adaptive Dimming) هستند که شدت نور را بر اساس معیارهای از پیش تعیین شده یا داده های سنسوری تنظیم می کنند (شجاعیان، ۲۰۲۴). به عنوان مثال، در ساعات اوج ترافیک شبانه، روشنایی کامل حفظ می شود، اما پس از نیمه شب و با کاهش محسوس تردد، شدت نور می تواند به ۵۰ تا ۷۰ درصد کاهش یابد بدون اینکه ایمنی به خطر بیفتد. این تنظیمات می توانند بر اساس زمان بندی نجومی (Astronomical Timetable) یا از طریق سنسورهای حرکتی و نوری محلی اعمال گردند.

نقش GIS در تحلیل توزیع روشنایی به عنوان یک ابزار حیاتی برای اعتبارسنجی کارایی این سیستم ها مطرح می شود. نقشه برداری دقیق مکان هر پایه روشنایی و پارامترهای نوری آن (شامل زاویه تابش، شدت نور و دمای رنگ)، شهرداری می تواند مدل های شبیه سازی نور را با داده های واقعی مقایسه کند و عدم انطباق ها را شناسایی نماید (خاکپور و همکاران، ۲۰۱۰). این امکان به ویژه در مناطق با توپوگرافی نامنظم یا معابری با هندسه پیچیده، برای اطمینان از پوشش یکنواخت نوری و جلوگیری از سایه های شدید که تهدیدی برای ایمنی هستند، ضروری است. یکی از ملاحظات کلیدی در مدیریت طیف نوری، مسئله

آلودگی نوری است که مولائی (۲۰۲۲) به تفصیل به آن پرداخته است. نور آبی با طول موج کوتاه‌تر که در برخی LEDهای با دمای رنگ بالا رایج است، پتانسیل بیشتری برای پراکندگی در اتمسفر دارد و منجر به افزایش روشنایی آسمان شب می‌شود. مدیریت بهینه ایجاب می‌کند که در مناطقی که نیاز به درک دقیق رنگ‌ها نیست (مانند بزرگراه‌ها)، از LEDهایی با CCT پایین‌تر (مثلاً ۳۰۰۰ K یا کمتر) استفاده شود تا ضمن حفظ دید مناسب، اثرات زیست‌محیطی کاهش یابد و راحتی بصری برای رانندگان و ساکنین فراهم آید.

سیستم‌های مدیریت روشنایی هوشمند (SLMS - Smart Lighting Management Systems) فراتر از کنترل دیمینگ عمل می‌کنند و یک شبکه سنسوری گسترده را شامل می‌شوند که می‌تواند داده‌های محیطی حیاتی دیگری را نیز جمع‌آوری کند (نوبر و همکاران، ۲۰۲۵). این داده‌ها شامل کیفیت هوا، سطح صدا و حتی شمارش وسایل نقلیه یا عابران پیاده است، که این امر روشنایی را از یک سیستم مجزا به بخشی از زیرساخت اطلاعاتی شهر هوشمند تبدیل می‌کند و امکان تحلیل‌های متقابل بخش‌ها را فراهم می‌آورد. استانداردسازی و به‌روزرسانی مستمر مشخصات فنی تجهیزات بر اساس استانداردهای بین‌المللی و ملی، یک وظیفه مداوم برای تیم‌های فنی شهرداری است؛ چرا که فناوری LED و سیستم‌های کنترلی به سرعت در حال تکامل هستند (زارع و همکاران، ۲۰۲۵). عدم انطباق با آخرین استانداردهای روشنایی نه تنها منجر به اتلاف انرژی می‌شود، بلکه ممکن است شهرداری را در معرض ریسک‌های قانونی مربوط به عدم رعایت الزامات ایمنی قرار دهد، به‌ویژه پس از وقوع حوادث مرتبط با کمبود روشنایی. در نهایت، رویکرد مدیریتی باید مبتنی بر تحلیل چرخه عمر کامل تجهیزات باشد؛ این تحلیل شامل برآورد دقیق هزینه‌های سرمایه‌ای (CAPEX) برای خرید و نصب و هزینه‌های عملیاتی (OPEX) شامل انرژی مصرفی و هزینه‌های نگهداری در طول عمر مفید تجهیزات است (باقری ده باغی و همکاران، ۲۰۱۵). تنها با ارزیابی جامع این سه پارامتر اصلی است که می‌توان فناوری‌های نوری را به درستی اولویت‌بندی و جایگزینی نمود تا منابع محدود بودجه‌ای شهرداری به بهینه‌ترین شکل ممکن به کار گرفته شوند.

۳. نقش داده‌محوری و GIS در مدیریت روشنایی

مدیریت بهینه روشنایی معابر شهری امروزه به شدت وابسته به قابلیت جمع‌آوری، پردازش و استفاده استراتژیک از داده‌ها است؛ در این زمینه، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) به عنوان ستون فقرات این رویکرد داده‌محور عمل می‌کند (خاکپور و همکاران، ۲۰۱۰). GIS این امکان را فراهم می‌آورد که موقعیت مکانی دقیق هر دارایی نوری (پایه چراغ، نوع لامپ، مشخصات درایور و تاریخ نصب) در یک بستر نقشه مرجع قرار گیرد و این اطلاعات با داده‌های عملکردی سیستم‌های کنترلی تلفیق شوند. این یکپارچه‌سازی، تحلیل‌های فضایی پیچیده‌ای را ممکن می‌سازد که فراتر از گزارش‌های صرفاً مبتنی بر تعداد چراغ‌های فعال یا مصرف کلی انرژی است.

یکی از حیاتی‌ترین کاربردهای GIS، تحلیل "ناحیه پوشش نوری" (Light Footprint Analysis) است؛ با استفاده از مدل‌های توزیع نور (مانند مدل‌های فوتومتریک چراغ‌ها)، می‌توان شبیه‌سازی دقیق میزان روشنایی (Illuminance) و یکنواختی (Uniformity) را در سطح زمین مدل‌سازی کرد (قائمی اصل و همکاران، ۲۰۱۹). این شبیه‌سازی‌ها به مدیران اجازه می‌دهند تا مناطقی که با استانداردهای ایمنی فاصله دارند، حتی قبل از نصب یا پس از تغییر تنظیمات دیمینگ، شناسایی شوند. تحلیل‌های فضایی می‌توانند به سادگی نقاطی که به دلیل تداخل درختان یا سازه‌های شهری، دچار کاهش شدت نور شده‌اند را مشخص سازند و راهکارهای اصلاحی متمرکز را پیشنهاد دهند. سیستم‌های هوشمند مبتنی بر حسگرها، حجم عظیمی از داده‌های لحظه‌ای را تولید می‌کنند که بدون یک پلتفرم GIS یکپارچه، تفسیر آن‌ها دشوار و کند خواهد بود (امیدی و همکاران،

۲۰۲۴). این داده‌ها شامل زمان‌های فعالیت، سطوح جریان مصرفی، گزارش‌های خطا و میزان کاهش شدت نور به دلیل فرسودگی (Lumen Depreciation) هستند. نقش GIS در اینجا تبدیل شدن به یک داشبورد مدیریتی است که با استفاده از رنگ‌بندی‌های جغرافیایی، وضعیت کلی شبکه را به صورت بصری در اختیار کاربر قرار می‌دهد؛ به طوری که یک ناظر می‌تواند تنها با مشاهده نقشه، متوجه شود کدام خیابان‌ها در حال حاضر با روشنایی کمتر از حد مجاز کار می‌کنند یا کدام تجهیزات در آستانه خرابی قرار دارند.

مدیریت نگهداری و تعمیرات (Maintenance Management) یکی دیگر از بخش‌هایی است که به شدت از رویکرد GIS-محور بهره می‌برد. در سیستم‌های قدیمی، تیم‌های نگهداری باید مسیرهای مشخصی را به صورت رندوم یا بر اساس گزارشات مردمی پیمایش می‌کردند که ناکارآمد بود. اکنون، با استفاده از GIS و داده‌های حسگرها، می‌توان تعمیرات را به صورت کاملاً "پیشگیرانه" و "مبتنی بر مکان دقیق" برنامه‌ریزی کرد (رستم‌پیشه و همکاران، ۲۰۲۳). برای مثال، هنگامی که سیستم تشخیص می‌دهد یک چراغ خاص در یک تقاطع کلیدی ۲۰ درصد کاهش نوردهی داشته است، یک سفارش کار خودکار با مختصات دقیق به تیم فنی مربوطه ارسال می‌شود، که این امر زمان پاسخگویی را به حداقل می‌رساند. تحلیل الگوهای ترافیکی و ایمنی شهر با استفاده از GIS یک رابطه علّی و معلولی را آشکار می‌سازد (باقری ده باغی و همکاران، ۲۰۱۵). با همپوشانی داده‌های آمار تصادفات یا گزارش‌های جرم و جنایت با نقشه‌های روشنایی، می‌توان مشخص ساخت که آیا در مناطقی که روشنایی استاندارد رعایت نشده، ریسک وقوع حوادث بالاتر است یا خیر. این تحلیل‌ها، شواهد عینی برای توجیه سرمایه‌گذاری‌های آتی در ارتقاء روشنایی مناطق پرخطر را فراهم می‌آورد و بودجه‌بندی را مبتنی بر شواهد (Evidence-Based Budgeting) می‌سازد.

بهینه‌سازی مصرف انرژی نیز از منظر فضایی توسط GIS مدیریت می‌شود. به جای اعمال یک پروفایل کاهش نور سراسری (Global Dimming Profile)، GIS امکان تعریف "مناطق کنترلی" (Control Zones) با نیازهای متفاوت را فراهم می‌کند؛ برای مثال، یک منطقه تجاری مرکزی ممکن است به دلیل فعالیت شبانه، نیازمند پروفایل روشنایی متفاوتی نسبت به یک بلوک مسکونی باشد (مودت و همکاران، ۲۰۲۳). GIS ابزاری است که این تعاریف منطقه‌ای و اعمال الگوریتم‌های کنترلی متمایز را بر اساس مرزهای جغرافیایی و کاربری زمین تسهیل می‌نماید. علاوه بر این، GIS در فرآیندهای برنامه‌ریزی بلندمدت توسعه شهری نیز نقشی حیاتی ایفا می‌کند. هنگامی که شهر در حال برنامه‌ریزی برای احداث یک مسیر جدید یا توسعه یک منطقه صنعتی است، مدل‌سازی اولیه اثرات روشنایی و برآورد میزان انرژی مورد نیاز بر اساس نوع کاربری زمین از پیش تعیین‌شده در GIS، به مدیران شهری کمک می‌کند تا طراحی زیرساخت را از ابتدا به صورت بهینه انجام دهند و از هزینه‌های اصلاحات آتی جلوگیری نمایند (فروتن و صدرآبادی، ۲۰۱۸). در نهایت، یکپارچه‌سازی داده‌های GIS با داده‌های آب و هوایی و آلودگی نوری (مانند داده‌های حسگرهای آسمان شب) امکان ایجاد مدل‌های پیش‌بینی پیشرفته‌تری را فراهم می‌کند (زارع و همکاران، ۲۰۲۵). این مدل‌ها می‌توانند تأثیر تغییرات فصلی در ساعت غروب و طلوع خورشید، و همچنین تأثیر شرایط جوی (مانند مه یا بارندگی که بر پراکندگی نور تأثیر می‌گذارد) را در محاسبات مصرف و ایمنی لحاظ کنند و رویکرد مدیریت را از واکنش‌پذیری به سمت پیش‌بینی فعال سوق دهند.

۴. مدیریت انرژی و کاهش مصرف در سیستم‌های هوشمند

مبحث مدیریت انرژی در روشنایی معابر شهری، پس از به‌کارگیری LEDها، وارد مرحله جدیدی شده که تمرکز آن از "کاهش مصرف تجهیزات" به "بهینه‌سازی الگوریتم‌های کنترلی" معطوف شده است؛ این مرحله بیشترین پتانسیل صرفه‌جویی را، اغلب

با سرمایه‌گذاری‌های نرم‌افزاری، فراهم می‌آورد (شجاعیان، ۲۰۲۴). سیستم‌های مدیریت روشنایی هوشمند (SLMS) با هدف کاهش مصرف انرژی الکتریکی تا ۳۰ تا ۵۰ درصد اضافی بر صرفه‌جویی ناشی از تبدیل LED، طراحی شده‌اند، که این امر از طریق تنظیم پویا و مبتنی بر نیاز، محقق می‌شود. الگوریتم دیمینگ تطبیقی (Adaptive Dimming) هسته اصلی این مدیریت انرژی است. در این رویکرد، شدت نور یک پایه روشنایی به صورت پیوسته یا گام به گام در طول شب بر اساس پروفایل‌های زمان‌بندی شده کاهش می‌یابد؛ به عنوان مثال، ممکن است شدت نور از ۱۰۰ درصد در غروب به ۸۰ درصد پس از ۱۱ شب و سپس به ۵۰ درصد پس از ۱ بامداد کاهش یابد (مودت و همکاران، ۲۰۲۳). این امر نیازمند یکپارچه‌سازی نرم‌افزار کنترل مرکزی با تایمرهای دقیق و قابلیت کنترل هر واحد نوری به صورت مجزا است، که معمولاً از طریق شبکه‌های بی‌سیم کم‌مصرف مانند LoRaWAN یا ZigBee برقرار می‌شود.

عامل کلیدی دیگر در بهینه‌سازی مصرف انرژی، استفاده از بازخورد سنسورهای محیطی است که به سیستم اجازه می‌دهد تا روشنایی را بر اساس "نور محیطی موجود" تنظیم کند (نوبر و همکاران، ۲۰۲۵). در شب‌های ماه کامل یا در مناطقی که روشنایی محیطی بالا است (مانند نزدیکی مراکز تجاری پر نور)، سیستم می‌تواند شدت خروجی چراغ‌های شهری را به صورت خودکار کاهش دهد تا مجموع روشنایی محیط به سطح استاندارد برسد و از هدر رفت انرژی جلوگیری شود. این قابلیت، نیازمند حسگرهای نوری (Photocells) دقیق و کالیبره شده در سطح شهر است که با سنسورهای اصلی کنترلرها یکپارچه شده باشند. تحلیل فنی-اقتصادی نشان می‌دهد که صرفه‌جویی انرژی باید در برابر تأثیر آن بر ایمنی سنجیده شود؛ به همین دلیل، مدیریت بهینه با تکیه بر داده‌های ترافیکی GIS، سطوح دیمینگ را در مناطقی که دوربین‌های ترافیکی یا سنسورهای شمارش ترافیک، تراکم بالا را ثبت می‌کنند، به صورت موقت به سطح حداکثری بازمی‌گرداند (باقری ده باغی و همکاران، ۲۰۱۵). این "پاسخگویی به تقاضا" (Demand Response) اطمینان می‌دهد که هرگونه صرفه‌جویی در انرژی، بر اساس نیازهای لحظه‌ای ایمنی، قابل بازگشت فوری باشد و ریسک‌های ایمنی افزایش نیابد.

نقش مدیریت شهرداری در این مرحله، تعریف دقیق "پروفایل‌های دیمینگ" (Dimming Profiles) برای هر تیپ از معابر (بزرگراه، خیابان اصلی، کوچه فرعی، فضای سبز) است؛ این پروفایل‌ها باید بر اساس مطالعات کاربردی و نه صرفاً حدس و گمان تعیین شوند (قائمی اصل و همکاران، ۲۰۱۹). شهرداری باید مطمئن شود که در پایین‌ترین سطح روشنایی مجاز، همچنان حداقل‌های استاندارد مربوط به کنتراست و دید محیطی برای رانندگان و عابران حفظ می‌شود تا از بروز تصادفات ناشی از تاریکی‌های موضعی جلوگیری شود.

مدیریت انرژی همچنین شامل مدیریت توان راکتیو و کیفیت توان شبکه توزیع است که مستقیماً بر تلفات توان در خطوط تأثیر می‌گذارد (علوی و همکاران، ۲۰۲۰). درایورهای الکترونیکی LED باید دارای ضریب توان (PF) نزدیک به یک باشند تا بار سیستم بر شبکه توزیع، خالص و سینوسی باقی بماند. مدیریت ضعیف این پارامترها، حتی در صورت کاهش مصرف توان اکتیو، می‌تواند منجر به افزایش تلفات توان در کابل‌ها و ترانسفورماتورهای توزیع گردد که این امر به طور غیرمستقیم هزینه‌های عملیاتی را بالا می‌برد. یکی از راهکارهای پیشرفته، پیوند دادن سیستم SLMS به شبکه انرژی شهری (Smart Grid) است (امیدی و همکاران، ۲۰۲۴). این یکپارچه‌سازی اجازه می‌دهد تا در زمان‌هایی که تقاضای کلی شبکه شهری بسیار بالاست (پیک بار)، شهرداری به طور خودکار و موقت، میزان روشنایی را در مناطق غیربحرانی کاهش دهد و در ازای آن، از مشوق‌های اقتصادی شبکه بهره‌مند شود. این قابلیت مدیریت بار (Load Shedding)، اهمیت استراتژیک سیستم روشنایی را به عنوان یک ذخیره انرژی انعطاف‌پذیر شهری افزایش می‌دهد. در نهایت، فرآیندهای نگهداری و تعویض باید با محوریت انرژی مدیریت شوند؛ به جای تعویض لامپ‌ها صرفاً بر اساس زمان کارکرد، باید تعویض بر اساس کاهش کارایی نوری (Lumen Depreciation) و افزایش

مصرف انرژی به دلیل فرسودگی قطعات الکترونیکی انجام شود (رستم‌پیشه و همکاران، ۲۰۲۳). این رویکرد مبتنی بر عملکرد، عمر مفید تجهیزات را به حداکثر می‌رساند و اطمینان می‌دهد که حتی در انتهای عمر مفید، چراغ همچنان سطح بازدهی مورد نظر شهرداری را حفظ می‌کند.

۵. ارتقای ایمنی شهری از منظر روشنایی

تأمین روشنایی کافی و با کیفیت در معابر شهری، کارکردی حیاتی در حفظ نظم عمومی و ارتقای ایمنی شهروندان در برابر حوادث ترافیکی و جرائم دارد؛ این نقش فراتر از صرفاً "دیدن" است و شامل "ادراک ایمنی" (Perception of Safety) نیز می‌شود که عاملی روانی در استفاده از فضاهای شهری پس از تاریکی است (باقری ده باغی و همکاران، ۲۰۱۵). مدیریت بهینه روشنایی به دنبال آن است که بدون به خطر انداختن صرفه‌جویی انرژی، بالاترین سطح ایمنی بصری را فراهم آورد، که این امر نیازمند دقت در پارامترهای نوری و استراتژی‌های کنترلی هدفمند است. یکی از ابعاد کلیدی ایمنی، یکنواختی روشنایی (Uniformity) است. سایه‌های عمیق و مناطق تاریک متناوب (پدیده‌ای که در سیستم‌های قدیمی رایج بود) می‌توانند باعث شوند که عابرین پیاده یا موانع در تاریکی گم شوند و ریسک تصادفات را به شدت افزایش دهند (قائمی اصل و همکاران، ۲۰۱۹). مدیریت بهینه با استفاده از مدل‌های GIS، توزیع نور را به گونه‌ای تنظیم می‌کند که نسبت حداقل روشنایی (E_{min}) به میانگین روشنایی (E_{avg}) در محدوده قابل قبولی باقی بماند، که این امر از طریق بهینه‌سازی محل قرارگیری پایه چراغ‌ها و تنظیمات زاویه‌ای اپتیک‌ها در هنگام نصب یا نوسازی حاصل می‌شود.

تأثیر طیف نوری بر ایمنی رانندگی نیز یک ملاحظه مهندسی مهم است (مولائی، ۲۰۲۲). چراغ‌های با دمای رنگ پایین‌تر (نور گرم‌تر) به دلیل کاهش پراکندگی رامان در چشم و کمتر بودن خیرگی (Glare)، اغلب دید بهتری برای رانندگان، به‌ویژه در شرایط آب و هوایی نامساعد مانند مه یا باران شدید، فراهم می‌کنند. در حالی که LEDهای با نور سفید مایل به آبی (دمای رنگ بالا) ممکن است از نظر بازده نوری کمی برتر باشند، اما مدیریت ایمنی حکم می‌کند که در محورهای اصلی ترافیکی، اولویت با کیفیتی باشد که کمترین خیرگی را ایجاد کرده و کنتراست مورد نیاز را فراهم آورد. کنترل مبتنی بر سنسورهای حرکتی (Motion-Sensing Controls) در مناطق کم تردد، یک رویکرد مؤثر برای ارتقای ایمنی در عین صرفه‌جویی انرژی است (نوبر و همکاران، ۲۰۲۵). به عنوان مثال، در یک پارک یا کوچه فرعی، روشنایی می‌تواند در حالت دیمینگ پایه (مثلاً ۳۰ درصد) باقی بماند و تنها در صورت تشخیص حرکت عابر پیاده یا وسیله نقلیه، به سرعت و به صورت محلی به ۱۰۰ درصد افزایش یابد. این قابلیت، نه تنها مصرف انرژی را به شدت کاهش می‌دهد، بلکه حضور ناگهانی نور کامل می‌تواند به عنوان یک عامل بازدارنده قوی در برابر فعالیت‌های مجرمانه عمل کند.

نقش GIS در تحلیل نقاط داغ جرم و جنایت (Crime Hotspots) با نقشه روشنایی، یک ابزار قدرتمند برای پلیس شهری و شهرداری است (خاکپور و همکاران، ۲۰۱۰). هنگامی که تحلیل‌های فضایی نشان می‌دهند که نرخ سرقت یا تصادفات در یک محدوده جغرافیایی خاص بالاتر است، شهرداری می‌تواند بدون اعمال تغییرات کلی در بودجه، تمرکز منابع نوری خود را برای تقویت روشنایی و بهبود کیفیت نور در آن نقاط خاص افزایش دهد؛ این یک استراتژی "ایمنی مبتنی بر مکان" است. علاوه بر ایمنی فیزیکی، مفهوم شب‌زیست‌پذیری و کیفیت زندگی نیز بر ادراک شهروندان از ایمنی تأثیر می‌گذارد (زارع و همکاران، ۲۰۲۵). فضاهای شهری که با نورپردازی مناسب و بدون تابش مستقیم نور به پنجره منازل یا آسمان طراحی شده‌اند، محیطی آرام‌تر و دلپذیرتر ایجاد می‌کنند که به طور غیرمستقیم بر کاهش استرس شهری و افزایش احساس امنیت روانی شهروندان کمک می‌کند.

مدیریت دارایی در حوزه ایمنی به معنای اطمینان از کارکرد مستمر است؛ خرابی ناگهانی یک چراغ در یک نقطه حساس (مانند ورودی پارکینگ زیرزمینی) یک خطر ایمنی فوری ایجاد می کند (امیدی و همکاران، ۲۰۲۴). سیستم های مانیتورینگ هوشمند با ارسال هشدارهای لحظه ای در مورد خرابی ها، این زمان پاسخ را به حداقل می رسانند، به گونه ای که فاصله زمانی بین خرابی لامپ و تعمیر آن به ساعات کاری محدود می شود، در حالی که در روش های سنتی این فاصله می تواند روزها یا هفته ها باشد. در نهایت، استانداردسازی فرآیند ارزیابی ایمنی پس از هرگونه تغییر در تنظیمات روشنایی ضروری است؛ این ارزیابی باید شامل تست های میدانی برای سنجش دید افقی، عمودی و میزان خیرگی باشد (حنایی و همکاران، ۲۰۲۲). مدیران شهری باید پروتکل هایی داشته باشند که در آن هرگونه کاهش شدت نور (دیمینگ) باید با تأییدیه میدانی یا شبیه سازی معتبر همراه باشد تا تضمین شود که بهبود کارایی انرژی هرگز به قیمت به خطر انداختن جان شهروندان تمام نخواهد شد.

۶. ملاحظات زیست محیطی و شب زیست پذیری شهری

مدیریت بهینه روشنایی معابر شهری دیگر صرفاً یک مسئله فنی-اقتصادی نیست، بلکه یک مؤلفه حیاتی در برنامه ریزی زیست محیطی و دستیابی به شهر پایدار محسوب می شود، که این امر به طور خاص بر اکوسیستم های شبانه و سلامت انسان تأثیرگذار است (زارع و همکاران، ۲۰۲۵). انتشار بیش از حد نور در محیط شب (Light Pollution)، شامل درخشش آسمان (Skyglow)، تجاوز نور (Light Trespass) و نفوذ بیش از حد نور به محیط های حساس (Light Clutter)، اثرات نامطلوبی بر ریتم شبانه روزی انسان ها و همچنین حیات وحش، به ویژه حشرات گرده افشان و پرندگان مهاجر، می گذارد. فناوری LED، به ویژه انواع قدیمی تر با دمای رنگ بالا (CCT بالاتر از ۴۰۰۰ کلوین)، به دلیل انتشار زیاد نور در طیف آبی، بیشترین سهم را در آلودگی نوری و اختلال در ریتم شبانه روزی (Circadian Disruption) دارند (مولائی، ۲۰۲۲). مدیریت شهری هوشمند باید با اعمال سیاست های سختگیرانه در انتخاب تجهیزات، استفاده از LEDهایی با دمای رنگ گرم تر (زیر ۳۰۰۰ کلوین) را در مناطق مسکونی و پارک ها اجباری سازد؛ این امر با حفظ دید مناسب، اثرات منفی بر تولید ملاتونین و چرخه خواب انسان ها را کاهش می دهد.

مدیریت بهینه همچنین از طریق کنترل جهت دهی نور (Light Directionality) به کاهش تجاوز نور و درخشش آسمان کمک می کند. چراغ های LED با طراحی اپتیکال مناسب (مانند Cutoff یا Full Cutoff)، اطمینان می دهند که تقریباً تمام نور به سمت سطح مسیر هدایت شده و از تابش مستقیم به آسمان یا پنجره های منازل جلوگیری شود (حنایی و همکاران، ۲۰۲۲). این توجه به "هندسه توزیع نور" به جای صرفاً شدت نور، نشان دهنده بلوغ مدیریتی در حوزه پایداری است و نیازمند همکاری نزدیک بین مهندسان برق و طراحان شهری است. اثرات اکولوژیکی نور مصنوعی بر حیات وحش، به ویژه در شهرهایی با فضاهای سبز متصل، نباید نادیده گرفته شود. زارع و همکاران (۲۰۲۵) تأکید می کنند که کاهش روشنایی در ساعات بسیار کم ترافیک (Deep Dimming) به سطوح بسیار پایین، به ویژه در نزدیکی کریدورهای زیست محیطی یا مناطق حفاظت شده، حیاتی است. این کار نه تنها انرژی را ذخیره می کند، بلکه امکان بازگشت حشرات و سایر موجودات شب فعال به محیط شهری را فراهم می آورد و بدین ترتیب به حفظ تنوع زیستی محلی کمک می کند.

از منظر مدیریت شهری، این ملاحظات زیست محیطی باید در فرآیند مناقصه و خرید تجهیزات نهادینه شوند. معیارهای ارزیابی باید شامل شاخص هایی مانند نسبت نوردهی رو به بالا (Upward Light Ratio - ULR) و طیف نوری منتشر شده باشند، نه فقط بازده نوری (Luminous Efficacy) (فروتون و صدآبادی، ۲۰۱۸). شهرداری باید برای نصب چراغ هایی که قابلیت نصب فیلترهای طیفی یا کنترلرهای رنگ در آینده را دارند، اولویت قائل شود. همچنین، مدیریت بهینه شامل پایش اثرات پس از اجرا

است؛ این امر نیازمند استفاده از دوربین‌های سنجش نور آسمان (Sky Quality Meters) در نقاط استراتژیک شهر برای اندازه‌گیری میزان واقعی درخشش آسمان قبل و بعد از اجرای طرح‌های نوسازی است (نوبر و همکاران، ۲۰۲۵). داده‌های محیطی جمع‌آوری شده از این سنسورها، عملکرد طرح‌های کنترلی را از منظر زیست‌محیطی اعتبارسنجی می‌کنند و به عنوان بازخورد برای تنظیم دقیق‌تر پروفایل‌های دیمینگ عمل می‌نمایند.

استفاده از فناوری‌های نوری جهت‌دار و کم‌انرژی در روشنایی مسیرهای پیاده‌روی و فضاهای عمومی، به ویژه در ساعات پایانی شب، می‌تواند به حفظ حس "شب‌زیست‌پذیری" کمک کند؛ این حس به معنای امکان بهره‌برداری از فضاها در شب بدون آلودگی نوری و بصری است (مولائی، ۲۰۲۲). این رویکرد متعادل بین نیازهای انسانی به امنیت و نیازهای محیط زیست به تاریکی نسبی، اساس مدیریت پایدار روشنایی است. در نهایت، هرگونه تصمیم‌گیری در مورد تغییر در پارامترهای روشنایی باید با در نظر گرفتن ابعاد بلندمدت محیطی صورت گیرد. سرمایه‌گذاری در فناوری‌هایی که انعطاف‌پذیری بیشتری در تنظیم طیف نوری دارند، به شهرداری این امکان را می‌دهد که با افزایش دانش علمی در مورد تأثیرات نور بر سلامت و اکولوژی، به سرعت پاسخگوی الزامات جدید محیط زیستی باشد، بدون نیاز به تعویض کامل سخت‌افزار (زارع و همکاران، ۲۰۲۵).

۷. یکپارچه‌سازی سیستم‌ها و الزامات مدیریتی برای شهرداری

دستیابی به حداکثر پتانسیل بهینه‌سازی در سیستم روشنایی شهری نیازمند خروج از حالت جزیره‌ای مدیریت زیرساخت‌ها و حرکت به سمت یک معماری یکپارچه و شبکه‌ای است که در آن، فناوری اطلاعات و ارتباطات (ICT) نقش محوری ایفا می‌کند (امیدی و همکاران، ۲۰۲۴). سیستم‌های روشنایی هوشمند باید به عنوان یک لایه فعال در پلتفرم شهر هوشمند عمل کنند و با سایر سامانه‌های حیاتی شهری مانند مدیریت ترافیک، امداد و نجات، و جمع‌آوری پسماند تعامل داشته باشند.

زیربنای این یکپارچه‌سازی، استانداردسازی پروتکل‌های ارتباطی و قالب‌های داده است؛ بدون وجود یک زبان مشترک بین کنترلرهای مختلف نصب‌شده بر روی پایه‌های روشنایی و پلتفرم مرکزی مدیریت (CMS)، جمع‌آوری داده‌ها به صورت منسجم و اعمال فرمان‌های پیچیده غیرممکن خواهد بود (رستم‌پیشه و همکاران، ۲۰۲۳). شهرداری باید بر استفاده از پروتکل‌های باز و مبتنی بر استاندارد صنعتی تأکید کند تا از وابستگی به یک تأمین‌کننده خاص (Vendor Lock-in) جلوگیری شود و امکان رقابت سالم در بازار خدمات نگهداری فراهم گردد. از دیدگاه مدیریتی، تیم‌های مهندسی برق باید ساختار سازمانی خود را برای پشتیبانی از این فناوری‌های پیچیده بازآرایی کنند؛ این امر شامل آموزش کارکنان در زمینه تحلیل داده‌های IoT، امنیت سایبری شبکه‌های کنترل، و مدیریت نرم‌افزارهای پیشرفته GIS/SLMS است (حنایی و همکاران، ۲۰۲۲). نگهداری از زیرساخت روشنایی دیگر فقط تعویض قطعه الکتریکی نیست، بلکه شامل حفظ سلامت شبکه نرم‌افزاری و امنیت داده‌ها در برابر حملات سایبری است که می‌تواند سیستم حیاتی شهری را مختل سازد.

یکپارچه‌سازی با سیستم مدیریت دارایی (Asset Management System - AMS) بر پایه GIS برای نگهداری پیشگیرانه ضروری است (خاکپور و همکاران، ۲۰۱۰). این سیستم باید به طور خودکار وضعیت هر دارایی (مانند لامپ، درایور، پایه) را بر اساس داده‌های عملکردی پایش کند و زمان دقیق تعویض یا تعمیر را بر اساس تحلیل عمر باقیمانده تخمین بزند. این رویکرد، هزینه‌های نگهداری اضطراری و ناشی از خرابی‌های غیرمنتظره را به شدت کاهش می‌دهد و باعث بهینه‌سازی لجستیک تیم‌های میدانی می‌شود. هماهنگی بین سیستم روشنایی و مدیریت ترافیک از اهمیت بالایی برخوردار است (باقری ده باغی و همکاران، ۲۰۱۵). به عنوان مثال، در صورت وقوع یک حادثه بزرگ، سیستم‌های مدیریت ترافیک باید بتوانند به طور خودکار دستور فعال‌سازی حداکثر روشنایی را در شعاع حادثه صادر کنند تا دید پلیس و نیروهای امدادی به حداکثر برسد. این تعامل نیازمند زیرساخت ارتباطی قوی و توافق‌نامه‌های عملیاتی بین بخشی است که باید توسط مدیریت ارشد شهرداری تسهیل گردد.

نقش مشاوران و پیمانکاران خارجی باید به دقت مدیریت شود؛ هنگام واگذاری پروژه‌های نوسازی، شهرداری باید مالکیت کامل داده‌های جمع‌آوری شده و نرم‌افزارهای مدیریتی را حفظ کند (فروتن و صدرآبادی، ۲۰۱۸). داده‌های جمع‌آوری شده در طول عمر سیستم، دارایی‌های غیرقابل جایگزین شهرداری هستند و نباید به پیمانکاران وابسته باشند؛ این امر اطمینان می‌دهد که شهرداری در هر زمان می‌تواند ارائه‌دهندگان خدمات نگهداری را تغییر دهد بدون اینکه دسترسی به سوابق عملکرد و کنترل‌ها را از دست بدهد. در نهایت، نیاز به تدوین مستمر آیین‌نامه‌های داخلی مبتنی بر فناوری‌های جدید وجود دارد. استانداردهای روشنایی قدیمی ممکن است برای فناوری‌های LED و سیستم‌های کنترلی تطبیقی کافی نباشند (علوی و همکاران، ۲۰۲۰). مدیران باید با همکاری سازمان‌های استاندارد ملی، فرآیندهایی را تدوین کنند که میزان قابل قبول صرفه‌جویی انرژی را در مقابل الزامات ایمنی و زیست‌محیطی تعریف کند و یک چارچوب عملیاتی شفاف برای تصمیم‌گیری در مورد سطح دیمینگ نهایی فراهم آورد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات مدیریتی

مدیریت بهینه روشنایی معابر شهری، به عنوان یک زیرساخت اساسی، کانونی است که در آن تقاطع‌های فنی مهندسی برق، اقتصادی، ایمنی عمومی و پایداری زیست‌محیطی شکل می‌گیرد. تحلیل‌های ارائه شده نشان می‌دهد که گذار صرف به فناوری LED، هرچند گام اول حیاتی بود، اما تنها توان بالقوه صرفه‌جویی انرژی را فعال ساخت؛ پتانسیل کامل این بهینه‌سازی تنها از طریق استقرار سیستم‌های مدیریت هوشمند مبتنی بر داده‌ها و ارتباطات فعال می‌شود (شجاعیان، ۲۰۲۴). این سیستم‌ها، با بهره‌گیری از معماری داده‌محور GIS و قابلیت‌های کنترل تطبیقی، امکان تنظیم دقیق و لحظه‌ای توزیع نور را فراهم می‌آورند که مستقیماً به کاهش چشمگیر مصرف انرژی، گاه تا بیش از ۵۰ درصد نسبت به پیک مصرف سیستم‌های سنتی، منجر می‌شود (مودت و همکاران، ۲۰۲۳). از منظر ایمنی، یافته‌ها تأیید می‌کنند که مدیریت بهینه مترادف با کاهش نور نیست، بلکه به معنای توزیع هوشمند و هدفمند نور است؛ استفاده از داده‌های فضایی برای شناسایی نقاط حادثه‌خیز و اعمال روشنایی متمرکز در زمان‌های نیاز، سطح ایمنی عینی و ادراک شده را افزایش می‌دهد (باقری ده باغی و همکاران، ۲۰۱۵). همچنین، ملاحظات زیست‌محیطی، از جمله مدیریت طیف نوری برای کاهش آلودگی آبی و حفظ شب‌زیست‌پذیری، به بخشی جدایی‌ناپذیر از استراتژی‌های موفق مدیریتی تبدیل شده است (زارع و همکاران، ۲۰۲۵). بنابراین، موفقیت در این حوزه مستلزم یک دیدگاه مهندسی سیستمی است که تمامی این ابعاد را همزمان در نظر بگیرد.

پیشنهادهای مدیریتی استراتژیک برای شهرداری:

۱. تکمیل زیرساخت داده‌محور: شهرداری باید سرمایه‌گذاری در لایه‌های ارتباطی و سنسوری سیستم روشنایی را در اولویت قرار دهد تا اطمینان حاصل شود که هر پایه چراغ به یک "نود داده‌ای" تبدیل می‌شود. یکپارچه‌سازی کامل و مستمر این داده‌ها با بستر GIS مرکزی برای اتخاذ تصمیمات عملیاتی و استراتژیک ضروری است (خاکپور و همکاران، ۲۰۱۰).

۲. بازنگری در مدل نگهداری: باید به سرعت از مدل نگهداری واکنشی به سمت "نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر عملکرد" تغییر جهت داد؛ این امر با استفاده از داده‌های لحظه‌ای خرابی قطعات و تحلیل روند کاهش کارایی نوری (Lumen Depreciation) به جای تکیه بر زمان کارکرد استاندارد، محقق می‌شود (امیدی و همکاران، ۲۰۲۴).

۳. تدوین پروفایل‌های نوری سلسله مراتبی: ضروری است که دستورالعمل‌های داخلی روشنی برای تعریف پروفایل‌های دیمینگ و طیف نوری بر اساس تیپ کاربری هر منطقه (مسکونی، تجاری، بزرگراهی) تدوین شود، با تأکید بر استفاده از دمای رنگ گرم‌تر (CCT پایین) در مناطق حساس زیست‌محیطی و مسکونی برای کاهش اثرات منفی نور آبی (مولائی، ۲۰۲۲).
۴. تمرکز بر امنیت سایبری و مالکیت داده: در پروژه‌های آتی، باید پروتکل‌های امنیتی قوی برای حفاظت از شبکه کنترل روشنایی در برابر تهدیدات سایبری تعریف شود و مالکیت انحصاری تمامی داده‌های عملیاتی و نقشه‌های روشنایی (GIS) برای تضمین استمرار خدمات پس از پایان قرارداد با پیمانکاران حفظ گردد (فروتن و صدرآبادی، ۲۰۱۸).
۵. همکاری بین‌بخشی برای ایمنی: ایجاد سازوکارهای رسمی برای تبادل داده‌های روشنایی با پلیس و سازمان ترافیک، جهت استفاده از نقشه روشنایی در تحلیل حوادث و طرح‌ریزی‌های پیشگیرانه ایمنی (قائم‌اصل و همکاران، ۲۰۱۹). این همکاری‌ها تضمین می‌کنند که اهداف صرفه‌جویی انرژی هیچ‌گاه با ریسک‌های ایمنی در تضاد قرار نگیرند.
۶. مدیریت بهینه روشنایی، در نهایت، تبلور مفهوم شهر هوشمند است؛ سیستمی که نه تنها هزینه‌های جاری را کاهش می‌دهد، بلکه کیفیت زندگی، ایمنی عمومی و تعهدات زیست‌محیطی شهر را به شیوه‌ای پایدار و قابل اندازه‌گیری بهبود می‌بخشد (نوبر و همکاران، ۲۰۲۵). کارمندان فنی شهرداری با درک این ابعاد، می‌توانند نقش محوری در تبدیل این چشم‌انداز به واقعیت عملی ایفا نمایند.

منابع

- زارع، ندیمی، نوید، ناصرعلوی، سیدصابر، خلیفه، وحید. (۲۰۲۵). شناسایی مسائل ایمنی کاربران آسیب‌پذیر در معابر شهری و بهینه‌سازی راهکارها با ادغام روش‌های قواعد انجمنی و برنامه ریزی ریاضی. پژوهشنامه حمل و نقل، ۲۲(۳)، ۱-۲۲.
- باقری ده باغی، حامدی، شاپور، باقری ده باغی. (۲۰۱۵). ارائه الگوریتم استراتژیک بهینه‌سازی و مدیریت روشنایی معابر براساس کارت امتیازی متوازن با استفاده از ArcGIS مطالعه موردی: شرکت توزیع نیروی برق کرمانشاه. معماری و شهرسازی آرمان شهر، ۸(دومین ویژه نامه نورپردازی)، ۱۵۵-۱۶۲.
- قائمی اصل مهدی، منظور داوود، موسوی بررودی سیدمهدی. (۲۰۱۹). شبیه‌سازی تحت شبکه تولید غیرمتمرکز برق تجدیدپذیر در بخش روشنایی معابر شهری در چارچوب الگوی مدیریت پایدار شهری (مورد مطالعه: شهرستان مشهد).
- شجاعیان. (۲۰۲۴). ۷. ارایه روشی برای تهیه نقشه روشنایی معابر شهری با استفاده از موبایل مپینگ (نمونه موردی: معابر شهر اهواز). فصلنامه مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه‌ای، ۵(۴)، ۸۷-۹۹.
- مولائی. (۲۰۲۲). واکاوی جایگاه کیفیت‌های طراحی شهری در طراحی ایستگاه‌های مترو با تأکید بر الگوهای بومی (نمونه موردی: ایستگاه‌های متروی امام خمینی، هفت‌تیر، میدان انقلاب تهران). برنامه ریزی فضایی، ۱۲(۱)، ۱۲۱-۱۴۸.
- رستم پیشه، اربابی سبزواری، آزاده، نویدی مجد. (۲۰۲۳). تبیین سازگاری معماری ساختمان‌های شهری با اصول پدافند غیرعامل (مورد مطالعه: شهر اسلامشهر). فصلنامه علمی دانش پیشگیری و مدیریت بحران، ۱۳(۲)، ۲۰۴-۲۲۷.
- مودت، الیاس، وثیق، امیری، سودابه. (۲۰۲۳). بررسی نقش فضاهای شبانه در جرم‌خیزی شهرها با مدل‌سازی پرومته (مطالعه موردی شهر آبادان). اقتصاد شهری، ۸(۱)، ۱۷-۳۰.
- نوبر، رحیمی، بروست، یورگن. (۲۰۲۵). ادیبل پارک‌ها راهبردی نوآورانه در ارتقای آسایش محیطی و توسعه پایدار شهری. جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۸(۹۰)، ۴۶۵-۴۴۰.

- حنایی، تکتیم، سیدالحسینی، سید مسلم، خلیلی. (۲۰۲۲). اولویت‌بندی مؤلفه‌های توسعه پایدار در برنامه‌ریزی پارک‌های اکولوژی نمونه موردی: (کوه پارک مشهد). پایداری، توسعه و محیط زیست، ۹(۱)، ۷۹.
- امیدی، مسلم، علی محمدی، افروز، صفری پور، شهریار، قربان. (۲۰۲۴). تعیین پایداری اکولوژیک پارک طبیعت پردیسان بر پایه ردپای اکولوژیک. مجله علمی پژوهشی اکولوژی کاربردی، ۱۳(۱)، ۱۷-۲۹.
- خاکپور، برات‌علی، رفیعی، صالحی‌فرد، توانگر. (۲۰۱۰). بررسی عملکرد مدیریت شهری در گسترش فضاهای سبز عمومی-پارک ها-با استفاده از روش تاپسیس-مطالعه موردی: شهر مشهد. جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، ۱۴(۸)، ۱-۲۸.
- علوی، جنتیان، نسیه. (۲۰۲۰). شناسایی و اولویت بندی فعالیت‌ها به منظور دستیابی به مدیریت پروژه سبز از منظر ناب و پایداری در سازمان پارک ها و فضای سبز اصفهان. پژوهش در مدیریت تولید و عملیات، ۱۱(۴)، ۱-۲۵.
- لاهیجانیان، اکرم الملوک، سمائی، الناز. (۲۰۱۷). بررسی نحوه برنامه ریزی و مدیریت پارکها با تاکید بر توسعه پایدار (نمونه موردی پارک بوستان گفتگو-تهران). انسان و محیط زیست، ۱۵(۴)، ۶۵-۷۲.
- فروتن، صدرآبادی. (۲۰۱۸). بررسی تاثیر پارک‌های شهری در تولید اکسیژن (مطالعه موردی: بوستان هاشمی واقع در شهر قم). انسان و محیط زیست، ۱۶(۲)، ۶۱-۶۷.