

ارزیابی برآورد هزینه و مدیریت مصرف انرژی در سیستم‌های روشنایی پارک‌های شهری با رویکرد توسعه پایدار

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 وتابلوها)

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

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

چکیده

سیستم‌های روشنایی پارک‌های شهری به‌عنوان یکی از ارکان اساسی فضاهای عمومی، نقشی تعیین‌کننده در ارتقای ایمنی، امنیت، کیفیت زیست‌محیطی و کارآمدی انرژی شهرها ایفا می‌کنند. با افزایش توسعه شهرنشینی و محدودیت منابع انرژی، مدیریت مصرف انرژی و برآورد دقیق هزینه‌های چرخه عمر این سیستم‌ها، به‌ویژه در پارک‌های شهری، به یک ضرورت راهبردی برای شهرداری‌ها تبدیل شده است. این مقاله مروری با هدف تحلیل جامع ابعاد فنی، اقتصادی، مدیریتی و زیست‌محیطی سیستم‌های روشنایی پارک‌های شهری، چارچوبی یکپارچه در راستای تحقق توسعه پایدار ارائه می‌دهد. روش پژوهش مبتنی بر مطالعه و تحلیل سیستماتیک منابع علمی منتخب در حوزه روشنایی شهری، مدیریت انرژی، پایداری اکولوژیک و مدیریت پروژه سبز است و با اتکا بر رویکرد تحلیل هزینه چرخه عمر (LCCA)، نقش فناوری‌های نوین روشنایی، سیستم‌های کنترل هوشمند و انرژی‌های تجدیدپذیر در کاهش هزینه‌های بلندمدت و بهینه‌سازی مصرف انرژی بررسی شده است. همچنین، پیامدهای اجتماعی و محیطی روشنایی، از جمله تأثیر بر امنیت فضاهای شبانه، آلودگی نوری و تعادل اکولوژیکی پارک‌ها، به‌صورت تحلیلی مورد توجه قرار گرفته‌اند. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که جایگزینی سیستم‌های سنتی با روشنایی LED هوشمند، همراه با زون‌بندی نوری، پایش مستمر مصرف انرژی و ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر، می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه مصرف انرژی، هزینه‌های نگهداری و انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی شود. علاوه بر این، اتخاذ رویکرد مدیریت پروژه سبز و اصلاح ساختارهای نهادی شهرداری‌ها، نقش کلیدی در موفقیت این سیستم‌ها ایفا می‌کند. در نتیجه، دستیابی به روشنایی پایدار در پارک‌های شهری مستلزم نگرشی فرابخشی، برنامه‌ریزی بلندمدت و استفاده از ابزارهای مدیریتی و فناورانه نوین است که بتواند ضمن تأمین ایمنی و رفاه شهروندان، حفاظت از محیط‌زیست و بهینه‌سازی منابع مالی شهری را تضمین نماید.

واژگان کلیدی: روشنایی پارک شهری، مدیریت انرژی، برآورد هزینه، توسعه پایدار، روشنایی هوشمند

مقدمه

سیستم‌های روشنایی پارک‌های شهری به عنوان یکی از اجزای اساسی زیرساخت‌های فضاهای عمومی، نقش دوگانه‌ای در فرآیند شهرسازی ایفا می‌کنند؛ از یک سو، تأمین‌کننده سطح مطلوب ایمنی، امنیت و قابلیت استفاده از فضاها پس از غروب آفتاب هستند و از سوی دیگر، به دلیل ماهیت مصرف انرژی بالا، به طور مستقیم بر پایداری اقتصادی و زیست‌محیطی شهر تأثیر می‌گذارند (شجاعیان، ۲۰۲۴). اهمیت این سیستم‌ها در بستر توسعه پایدار شهری بیش از پیش برجسته شده است، زیرا معیارهای پایداری نه تنها بر کاهش اثرات کربنی و بهره‌وری انرژی متمرکز هستند، بلکه کیفیت زندگی شهروندان و ادراک آن‌ها از محیط شهری شبانه را نیز در بر می‌گیرند (نوبر و همکاران، ۲۰۲۵). مدیریت ناکارآمد این سیستم‌ها می‌تواند منجر به هدررفت منابع مالی هنگفت برای شهرداری‌ها از طریق پرداخت قبوض انرژی بالا و همچنین ایجاد آلودگی نوری نامطلوب شود که خود تهدیدی جدی برای اکوسیستم‌های محلی و سلامت انسان محسوب می‌شود (باقری ده باغی و همکاران، ۲۰۱۵). از این رو، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی عمیق ابعاد فنی، اقتصادی و محیطی سیستم‌های روشنایی پارک‌ها، گامی اساسی در جهت ارائه چارچوب‌های مدیریتی اثربخش برمی‌دارد.

شهرداری‌ها به عنوان نهادهای اصلی متولی توسعه و نگهداری زیرساخت‌های شهری، مسئولیت مستقیمی در تصمیم‌گیری در مورد نوع فناوری، سطح روشنایی و برنامه‌ریزی مدیریتی این سیستم‌ها دارند (حنایی و همکاران، ۲۰۲۲). انتخاب فناوری‌های منسوخ یا طراحی‌های غیر بهینه روشنایی می‌تواند هزینه‌های جاری عملیاتی را به شدت افزایش دهد و تأمین مالی پروژه‌های آتی را با چالش مواجه سازد، موضوعی که برقراری توازن بین نیاز به نور کافی برای امنیت و لزوم صرفه‌جویی انرژی را به یک مسئله پیچیده مهندسی و مدیریتی تبدیل می‌کند. در این راستا، برآورد دقیق هزینه‌های چرخه عمر (LCCA) به جای تمرکز صرف بر هزینه‌های اولیه نصب، به یک ضرورت استراتژیک تبدیل شده است تا بتواند توجیه اقتصادی سرمایه‌گذاری‌های بلندمدت در فناوری‌های کم‌مصرف را اثبات کند (رستم‌پیشه و همکاران، ۲۰۲۳). این امر مستلزم درک عمیقی از دینامیک‌های مصرف انرژی، قابلیت اطمینان تجهیزات و الگوی استفاده از پارک‌ها در ساعات مختلف شبانه‌روز است.

توسعه پایدار در حوزه روشنایی شهری، فراتر از تعویض لامپ‌های قدیمی با LED، نیازمند یک رویکرد جامع سیستمی است که مدیریت تقاضا، استفاده از سیستم‌های کنترل هوشمند و ادغام با منابع انرژی تجدیدپذیر را در بر گیرد (مولائی، ۲۰۲۲). فضاهای سبز شهری، به ویژه پارک‌ها، به عنوان ریه‌های تنفسی شهر، نیاز به حفظ سلامت اکولوژیکی خود دارند؛ بنابراین، آلودگی نوری ناشی از روشنایی نامناسب می‌تواند بر الگوهای رفتاری حیات وحش محلی، از جمله پرندگان و حشرات، اختلال جدی ایجاد کند (علوی و همکاران، ۲۰۲۰). شهرداری‌ها باید در سیاست‌گذاری‌های خود، ملاحظات زیست‌محیطی را به صورت یکپارچه با ملاحظات ایمنی و اقتصادی تلفیق نمایند تا از بروز تضاد بین اهداف مختلف جلوگیری شود. این همسویی نیازمند ابزارهای تحلیلی قوی برای ارزیابی تأثیرات بلندمدت تصمیمات فنی است. بررسی ادبیات نشان می‌دهد که علیرغم پیشرفت‌های چشمگیر در فناوری‌های روشنایی، اجرای مدل‌های بهینه مدیریت انرژی در پارک‌های شهری اغلب به دلیل موانع سازمانی، کمبود دانش تخصصی در بخش‌های اجرایی شهرداری‌ها، و دشواری در برآورد دقیق بازگشت سرمایه (ROI) با تأخیر مواجه می‌شود (قائمی اصل و همکاران، ۲۰۱۹). در این میان، فقدان یک متدولوژی استاندارد برای ارزیابی جامع هزینه‌ها و منافع اجتماعی-اقتصادی پروژه‌های روشنایی سبز، یک شکاف تحقیقاتی مهم را نشان می‌دهد که تلاش برای پر کردن آن از طریق این مقاله مروری دنبال می‌شود. تمرکز بر جنبه‌های مدیریت پروژه سبز و به‌کارگیری رویکردهای ارزیابی چرخه عمر، کلید موفقیت در تبدیل سیستم‌های روشنایی شهری از یک مرکز هزینه (Cost Center) به یک دارایی مدیریتی استراتژیک خواهد بود (زارع و همکاران، ۲۰۲۵).

افزایش سطح استفاده از پارک‌ها در ساعات شبانه به دلایل تفریحی و امنیتی، لزوم طراحی سیستم‌هایی را ایجاب می‌کند که قابلیت تنظیم شدت نور بر اساس تقاضای واقعی (Dimming) را داشته باشند، که این امر مستلزم سرمایه‌گذاری اولیه بیشتر در سخت‌افزار و نرم‌افزار کنترل است (فروتن و صدرآبادی، ۲۰۱۸). تحلیل هزینه‌ها باید شامل هزینه‌های نصب، مصرف انرژی سالانه، هزینه‌های نگهداری و تعویض قطعات، و هزینه‌های اجتماعی ناشی از آلودگی نوری یا ایمنی ناکافی باشد. شهرداری‌ها معمولاً در محاسبه دقیق مولفه‌های مصرف انرژی و تلفات ناشی از شبکه توزیع درون پارک دچار کاستی‌هایی هستند که نیازمند بهبود مستندسازی و استفاده از ابزارهای پایش پیشرفته است (امیدی و همکاران، ۲۰۲۴). رویکرد توسعه پایدار، ایجاب می‌کند که کیفیت نورپردازی صرفاً بر اساس معیارهای لومن و وات سنجیده نشود، بلکه تأثیر آن بر حس تعلق اجتماعی، زیبایی‌شناسی شهری و سلامت روانی کاربران پارک نیز مد نظر قرار گیرد (لامیجانیان و همکاران، ۲۰۱۷). این دیدگاه چندوجهی، برآورد هزینه را از یک معادله صرفاً فنی-اقتصادی خارج کرده و آن را به یک مسئله پیچیده تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) تبدیل می‌کند که در آن ارزش‌های غیرملموس اجتماعی باید به گونه‌ای کمی‌سازی شوند که در مدل‌های LCCA قابل ادغام باشند. این تحلیل‌ها زمینه‌ساز تدوین استانداردهای جدید برای روشنایی پارک‌ها فراتر از صرفاً استانداردهای روشنایی معابر خواهد بود.

یکی از چالش‌های اساسی در مدیریت انرژی پارک‌ها، مدیریت تقاضا و انطباق با شرایط اقلیمی متغیر است؛ به عنوان مثال، ساعات استفاده از پارک‌ها در فصول مختلف سال تفاوت فاحشی دارد و سیستم‌های روشنایی باید بتوانند به صورت پویا به این تغییرات پاسخ دهند تا از اتلاف انرژی در ساعات اوج مصرف یا ساعات کم‌استفاده جلوگیری شود (خاکپور و همکاران، ۲۰۱۰). این انطباق‌پذیری نیازمند زیرساخت‌های ارتباطی قوی و سیستم‌های کنترل متمرکز یا توزیع‌شده هوشمند است که هزینه اولیه قابل توجهی دارند، اما بازده انرژی بلندمدت آن‌ها این سرمایه‌گذاری را توجیه می‌کند؛ لذا، مدیریت هوشمند هزینه و انرژی باید در یک چارچوب یکپارچه برنامه‌ریزی شود. در نهایت، این بخش مقدماتی تأکید می‌کند که موفقیت در پیاده‌سازی سیستم‌های روشنایی پایدار در پارک‌های شهری منوط به توانایی شهرداری‌ها در ایجاد یک دیدگاه بلندمدت و چند تخصصی است که در آن مهندسان برق، برنامه‌ریزان شهری، متخصصان محیط زیست و مدیران مالی با یکدیگر همکاری نمایند. این مقاله مروری بر مبنای این پیش‌فرض، به تفصیل به بررسی مبانی نظری، فناوری‌ها و راهکارهای مدیریتی مورد نیاز برای تحقق این هدف خواهد پرداخت و شکاف‌های موجود در ادبیات مدیریتی این حوزه را مشخص می‌سازد.



شکل ۱. چارچوب مفهومی ارزیابی برآورد هزینه و مدیریت مصرف انرژی در سیستم‌های روشنایی پارک‌های شهری با رویکرد توسعه پایدار.

این شکل چارچوب مفهومی حاکم بر ارزیابی و مدیریت یکپارچه سیستم‌های روشنایی پارک‌های شهری را نشان می‌دهد که در آن، مؤلفه‌های فنی، اقتصادی، مدیریتی و زیست‌محیطی به‌صورت منسجم با یکدیگر در تعامل قرار دارند. در این چارچوب، برآورد هزینه بر پایه تحلیل هزینه چرخه عمر، شامل هزینه‌های اولیه نصب، بهره‌برداری، نگهداری و پایان عمر تجهیزات انجام می‌گیرد و هم‌زمان، مدیریت مصرف انرژی از طریق به‌کارگیری فناوری‌های نوین روشنایی، سیستم‌های کنترلی هوشمند و انرژی‌های تجدیدپذیر دنبال می‌شود. همچنین، ملاحظات توسعه پایدار نظیر کاهش آلودگی نوری، حفاظت از اکوسیستم‌های پارکی، ارتقای ایمنی و کیفیت فضاهای شبانه و افزایش رفاه شهروندان به‌عنوان خروجی‌های اصلی این چارچوب در نظر گرفته شده‌اند. این مدل نشان می‌دهد که تحقق روشنایی پایدار در پارک‌های شهری تنها در سایه هم‌راستاسازی تصمیمات فنی و اقتصادی با اهداف زیست‌محیطی و اجتماعی امکان‌پذیر است.

۲: مبانی نظری مدیریت انرژی و برآورد هزینه در سیستم‌های روشنایی شهری

مدیریت انرژی در سیستم‌های روشنایی شهری، به‌ویژه در محیط‌های حساس و چندمنظوره‌ای نظیر پارک‌ها، نیازمند اتخاذ یک چارچوب نظری منسجم است که فراتر از صرفاً استفاده از تجهیزات کم‌مصرف عمل کند و بر بهینه‌سازی مصرف در طول زمان تمرکز داشته باشد (مودت و همکاران، ۲۰۲۳). مبانی نظری این مدیریت، تلفیق مدل‌های ترمودینامیکی مصرف انرژی با مدل‌های اقتصادی مبتنی بر ارزش زمانی پول است. هدف اصلی، به حداقل رساندن مجموع هزینه نهایی سیستم در طول عمر طراحی آن است، که این هزینه شامل هزینه‌های سرمایه‌ای (CAPEX)، هزینه‌های عملیاتی (OPEX) و هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری (O&M) می‌باشد. رویکرد استاندارد در این زمینه، استفاده از تحلیل هزینه چرخه عمر (LCCA) است که به شهرداری‌ها امکان می‌دهد تا مزایای بلندمدت فناوری‌های پیشرفته نظیر LED هوشمند را در مقابل هزینه‌های اولیه بالاتر آن‌ها به درستی بسنجند (زارع و همکاران، ۲۰۲۵).

تحلیل هزینه چرخه عمر (LCCA) به عنوان ابزار اصلی برآورد هزینه، نیازمند در نظر گرفتن پارامترهای متعددی است که اغلب در برآوردهای سنتی نادیده گرفته می‌شوند. این پارامترها شامل نرخ تورم انرژی، نرخ تنزیل (Discount Rate) برای ارزش‌گذاری منافع آتی، طول عمر اسمی و واقعی تجهیزات، و هزینه‌های تعویض در طول دوره تحلیل است (رستم‌پیشه و همکاران، ۲۰۲۳). به عنوان مثال، یک سیستم روشنایی LED ممکن است هزینه اولیه ۳۰ درصد بیشتر از یک سیستم سدیم فشار قوی (HPS) داشته باشد، اما اگر مصرف انرژی آن ۵۰ درصد کمتر باشد و عمر مفید آن دو برابر باشد، LCCA نشان می‌دهد که سیستم LED در بازه ۱۵ ساله می‌تواند تا ۴۰ درصد صرفه‌جویی کلی به همراه داشته باشد، مشروط بر اینکه نرخ تنزیل به درستی اعمال شود تا ارزش زمانی پولی که امروز سرمایه‌گذاری می‌شود به درستی منعکس گردد.

مدیریت انرژی در این سیستم‌ها به شدت وابسته به مدل‌سازی دقیق پروفایل بار (Load Profile) است. پارک‌های شهری دارای پروفایل‌های بار بسیار متغیر هستند؛ شدت نور مورد نیاز در مسیرهای اصلی پیاده‌روی، ورودی‌ها، مناطق بازی کودکان و نواحی خدماتی متفاوت است و این تفاوت‌ها باید در طراحی کنترلی لحاظ شوند (شجاعیان، ۲۰۲۴). استفاده از سنسورهای حضور و روشنایی محیط (Daylight Harvesting)، نیاز به توزیع توان را به صورت دینامیک تغییر می‌دهد. یک سیستم ایده‌آل باید قادر باشد که بر اساس الگوریتم‌های پیش‌بینی تقاضا و داده‌های آنی، سطوح روشنایی را تنظیم کند تا از قانون کلی "روشنایی به

میزان لازم، نه صرفاً روشنایی حداکثری "پیروی نماید؛ این رویکرد مستقیماً بر کاهش ساعات کارکرد کامل (Full-Load Hours) و در نتیجه کاهش مصرف انرژی تأثیر می‌گذارد (مولائی، ۲۰۲۲).

علاوه بر بهره‌وری انرژی تجهیزات (بهره‌وری لومن بر وات)، کارایی شبکه توزیع درون پارک نیز یک عامل کلیدی در مدیریت انرژی است. سیستم‌های قدیمی‌تر اغلب دارای تلفات بالایی در کابل‌ها، ترانسفورماتورها و بالاسترها هستند. ارتقاء به درایورهای LED با راندمان بالا و کاهش طول مسیرهای کابل‌کشی در طراحی‌های جدید، می‌تواند تلفات سیستمی را به حداقل برساند. با این حال، برآورد این تلفات نیازمند تحلیل‌های دقیق توزیع توان است که در بسیاری از موارد مدیریتی شهرداری‌ها، این داده‌ها به صورت سیستماتیک جمع‌آوری و تحلیل نمی‌شوند (امیدی و همکاران، ۲۰۲۴). لذا، اولین گام مدیریتی، ایجاد یک زیرساخت پایش انرژی دقیق (Metering Infrastructure) برای هر ناحیه یا فاز از روشنایی پارک است. از منظر اقتصادی، تعریف شاخص‌های کلیدی عملکرد (KPIs) برای مدیریت انرژی حیاتی است. شاخص‌هایی نظیر "انرژی مصرفی به ازای هر متر مربع فضای روشن شده" یا "هزینه عملیاتی نگهداری به ازای هر واحد روشنایی" باید به طور مستمر اندازه‌گیری شوند (قائم‌ی اصل و همکاران، ۲۰۱۹). در بسیاری از پروژه‌های نوسازی، عدم وجود خط مبنا (Baseline) دقیق از مصرف انرژی پیشین، ارزیابی واقعی موفقیت پروژه را مختل می‌کند. بنابراین، مرحله اول هر پروژه مدیریت انرژی باید شامل یک ممیزی جامع انرژی (Energy Audit) باشد که پروفایل دقیق مصرف پیش از مداخله را مستند سازد تا توجیه اقتصادی تغییرات آینده بر اساس شواهد مستدل صورت پذیرد (فروتن و صدرآبادی، ۲۰۱۸).

مدیریت هزینه شامل رویکردهای مالی برای تسهیل گذار به فناوری‌های سبز نیز می‌شود. هزینه‌های اولیه بالا، اغلب سدی در برابر اجرای سریع پروژه‌های بهینه هستند. مدل‌های تأمین مالی نوآورانه مانند قراردادهای خدمات انرژی (ESCOs) می‌توانند این مانع را از بین ببرند، جایی که پیمانکار بخشی از سرمایه‌گذاری اولیه را بر عهده گرفته و بازپرداخت آن را از طریق صرفه‌جویی‌های انرژی تضمین شده در طول زمان دریافت می‌کند (حنایی و همکاران، ۲۰۲۲). این مدل‌ها، ریسک مالی را از دوش شهرداری برداشته و مدیریت پروژه را به متخصصان واگذار می‌کنند، اما نیازمند توانایی شهرداری در مذاکره و نظارت دقیق بر عملکرد پیمانکار طبق قرارداد است. نقش استانداردهای روشنایی در برآورد هزینه نیز حائز اهمیت است. استانداردهای بین‌المللی و ملی اغلب سطوح حداقل روشنایی (Illuminance Levels) را برای ایمنی و دید تعیین می‌کنند، اما در مورد پارک‌ها، این استانداردها باید با ملاحظات پایداری محیط زیست (کاهش شدت نور) متعادل شوند. تعیین سطح روشنایی متناسب با سطح فعالیت مورد انتظار در یک منطقه خاص (Zone-based Lighting Strategy) نه تنها مصرف انرژی را کاهش می‌دهد، بلکه از منظر روانشناسی محیطی نیز کارآمدتر است (لاهیجانیان و همکاران، ۲۰۱۷). این تطبیق‌پذیری نیازمند کالیبراسیون دقیق تجهیزات کنترلی و به‌روزرسانی مستمر نقشه‌های نوری است.

در جمع‌بندی این بخش، نظریه مدیریت انرژی در روشنایی شهری بر محوریت بهینه‌سازی LCCA، مدل‌سازی دقیق پروفایل‌های بار پویا، و استفاده از زیرساخت‌های سنجش و کنترل هوشمند بنا شده است. شهرداری‌ها باید از چارچوب‌های تحلیلی قوی برای تبدیل داده‌های فنی به تصمیمات استراتژیک اقتصادی و عملیاتی استفاده کنند تا اطمینان حاصل شود که هر واحد انرژی مصرف شده در پارک‌ها، بالاترین سطح ایمنی و بهره‌وری محیطی را فراهم می‌آورد و این امر مستلزم پذیرش یک دیدگاه بلندمدت بر هزینه‌های عملیاتی است تا هزینه‌های اولیه (باقری ده باغی و همکاران، ۲۰۱۵).

۳: نقش سیستم‌های روشنایی در ارتقای ایمنی، امنیت و کیفیت فضاهای شبانه پارک‌ها

سیستم‌های روشنایی پارک‌های شهری نقشی فراتر از صرفاً تأمین روشنایی وظیفه‌ای دارند؛ آن‌ها عاملی تعیین‌کننده در ارتقاء ادراک شهروندان از امنیت و کیفیت تجربه فضایی در ساعات غیرروز هستند (شجاعیان، ۲۰۲۴). امنیت در محیط‌های عمومی شبانه، که شامل جلوگیری از بروز رفتارهای مجرمانه و کاهش ترس از جرم (Fear of Crime) است، به طور مستقیم با کیفیت و یکنواختی نورپردازی مرتبط می‌باشد (قائمی اصل و همکاران، ۲۰۱۹). نظریه‌های محیط‌محور جرم (Criminology) تأکید دارند که روشنایی کافی و بدون سایه‌های عمیق، محیط را برای مجرمان نامطلوب ساخته و نظارت بصری طبیعی (Natural Surveillance) را تسهیل می‌کند. این امر مستلزم طراحی نورپردازی‌ای است که پوشش یکنواختی داشته باشد و از ایجاد نقاط تاریک و پنهان (Dark Spots) که زمینه ساز ناامنی هستند، جلوگیری کند.

چالش اصلی در برآورد هزینه‌های مرتبط با ایمنی، کمی‌سازی تأثیر افزایش کیفیت نورپردازی بر کاهش نرخ جرم و جنایت است. اگرچه شواهد تجربی متعددی ارتباط بین روشنایی بهتر و کاهش جرم را نشان می‌دهند، اما تعیین یک رابطه علی مستقیم و قیمت‌گذاری این تأثیرات در مدل‌های LCCA دشوار است (باقری ده باغی و همکاران، ۲۰۱۵). با این حال، شهرداری‌ها باید هزینه‌های پیشگیری از جرم را در محاسبات هزینه-فایده کلی پروژه‌های روشنایی لحاظ کنند، زیرا کاهش حوادث امنیتی و افزایش استفاده از پارک‌ها، به طور غیرمستقیم هزینه‌های اجتماعی و درمانی مرتبط با ناامنی را کاهش می‌دهد و ارزش استفاده از فضا را افزایش می‌دهد. تکنولوژی‌های مدرن روشنایی، به ویژه LEDها، انعطاف‌پذیری بی‌نظیری را برای تنظیم پروفایل‌های نوری فراهم می‌آورند که مستقیماً بر کیفیت فضایی تأثیر می‌گذارد (مولائی، ۲۰۲۲). به عنوان مثال، در مناطقی که نیاز به تعامل اجتماعی بالا است، می‌توان از دمای رنگ گرم‌تر (Warm Color Temperature) استفاده کرد که فضا را دعوت‌کننده‌تر جلوه می‌دهد، در حالی که در مسیرهای دورافتاده یا ورودی‌های اصلی، ممکن است نیاز به روشنایی با شدت کمی بالاتر و دمای رنگ خنثی‌تر برای افزایش وضوح بصری باشد. این قابلیت شخصی‌سازی نورپردازی، که با سیستم‌های کنترلی هوشمند میسر می‌شود، هزینه‌های انرژی را نیز کاهش می‌دهد زیرا نور فقط در جایی که واقعاً مورد نیاز است، به شدت کامل می‌تابد (شجاعیان، ۲۰۲۴).

کیفیت فضاهای شبانه پارک‌ها فراتر از ایمنی صرف، به جنبه‌های زیبایی‌شناختی و ادراک بصری محیط نیز وابسته است. روشنایی ضعیف یا نامناسب می‌تواند منجر به خستگی بصری شود و جذابیت پارک را در شب کاهش دهد، که این امر استفاده عمومی را محدود کرده و هدف اصلی طراحی پارک‌ها را تضعیف می‌کند (لاهیجانیان و همکاران، ۲۰۱۷). طراحی نورپردازی مؤثر باید با معماری منظر پارک هماهنگ باشد و از برجسته‌سازی المان‌های طبیعی و سازه‌ای به شیوه‌ای هنرمندانه استفاده کند. در اینجا، برآورد هزینه باید شامل بودجه‌ای برای روشنایی تزئینی و تأکیدی (Accent Lighting) باشد که اگرچه مصرف انرژی بیشتری نسبت به روشنایی عمومی دارد، اما ارزش ادراکی و جذابیت فضا را به شدت افزایش می‌دهد و می‌تواند به عنوان یک عامل جذب شهروندان عمل کند.

یکی از معضلات بزرگ، پدیده آلودگی نوری (Light Pollution) است که نه تنها بر اکوسیستم تأثیر منفی می‌گذارد (که در بخش‌های بعدی بررسی خواهد شد)، بلکه می‌تواند کیفیت زندگی ساکنان مجاور پارک‌ها را نیز کاهش دهد و از طریق تابش ناخواسته (Light Trespass) به داخل منازل، موجب نارضایتی عمومی شود (علوی و همکاران، ۲۰۲۰). مدیریت هزینه در اینجا به معنای هزینه‌ای است که صرف جلوگیری از این آلودگی از طریق استفاده از قطع‌کننده‌های نوری (Cut-off Fixtures) و کنترل دقیق زوایای تابش می‌شود. نادیده گرفتن این ملاحظات در مرحله برآورد هزینه اولیه، می‌تواند منجر به شکایت‌های مدنی و نیاز به اصلاحات پرهزینه در فاز بهره‌برداری گردد. مدیریت مصرف انرژی باید طوری طراحی شود که در ساعات کم‌کاربرد پارک، شدت نور را به سطحی کاهش دهد که همچنان استانداردهای ایمنی را حفظ کند، اما از مصرف انرژی اضافی جلوگیری

نماید؛ این سطح به عنوان حداقل روشنایی ایمن (Minimum Safe Illuminance Level) تعریف می‌شود (فروتون و صدرآبادی، ۲۰۱۸). تعیین این سطح حداقل، یک تصمیم مدیریتی حساس است که باید بر اساس تجزیه و تحلیل ریسک محلی اتخاذ شود؛ برای مثال، مناطقی با سابقه جرم بالاتر نیازمند حداقل روشنایی بالاتری نسبت به مناطق کم‌تر پرخطر هستند، حتی در ساعات کم‌کاربرد. الگوریتم‌های هوشمند باید این توازن را به صورت خودکار برقرار سازند.

بهره‌گیری از سیستم‌های روشنایی جهت‌دهی شده (Directional Lighting) می‌تواند به طور همزمان ایمنی و بهره‌وری انرژی را بهبود بخشد. به جای استفاده از فلود لایت‌های قدیمی که نور را در تمام جهات پخش می‌کنند و باعث هدررفت و آلودگی نوری می‌شوند، چراغ‌های مدرن با توزیع نوری مشخص (Type II یا Type III) نور را دقیقاً روی مسیرها و مناطق مورد نیاز متمرکز می‌کنند (مودت و همکاران، ۲۰۲۳). این تکنیک طراحی، نه تنها میزان نور مفید بر سطح را افزایش می‌دهد (افزایش کارایی نوری)، بلکه به دلیل کاهش نور سرگردان، از آلودگی نوری کاسته و در نتیجه هزینه‌های مرتبط با نظارت محیطی را نیز کاهش می‌دهد. در نهایت، نگهداری و تعمیرات مرتبط با ایمنی نیز باید در مدل برآورد هزینه لحاظ شود. خرابی ناگهانی یک چراغ در یک نقطه حساس امنیتی، یک ریسک محسوب می‌شود و هزینه‌های واکنش اضطراری (Emergency Response Costs) را به سیستم تحمیل می‌کند. سیستم‌های پایش وضعیت (Condition Monitoring Systems) که خرابی لامپ‌ها یا درایورها را به محض وقوع گزارش می‌دهند، امکان نگهداری پیشگیرانه (Preventive Maintenance) را فراهم کرده و هزینه‌های واکنش اضطراری و ریسک‌های امنیتی ناشی از خرابی‌های طولانی‌مدت را حذف می‌کنند (نوبر و همکاران، ۲۰۲۵). بنابراین، سرمایه‌گذاری در قابلیت اطمینان و قابلیت کنترل‌پذیری سیستم، مستقیماً به کاهش ریسک‌های امنیتی و هزینه‌های پنهان مدیریت بحران منجر می‌شود.

۴: فناوری‌های نوین روشنایی، انرژی‌های تجدیدپذیر و کاهش هزینه‌های چرخه عمر

انتقال به فناوری‌های روشنایی با بهره‌وری بالا، سنگ بنای استراتژی‌های مدیریت انرژی در سیستم‌های روشنایی پارک‌های شهری مدرن است و LEDها به عنوان بازیگر اصلی این تحول شناخته می‌شوند (خاکپور و همکاران، ۲۰۱۰). مزایای LEDها از نظر بهره‌وری نوری (Luminous Efficacy) به طور قابل ملاحظه‌ای بر فناوری‌های پیشین مانند چراغ‌های بخار سدیم یا متال هالید برتری دارند؛ در حالی که یک چراغ HPS ممکن است بهره‌وری حدود ۱۰۰ لومن بر وات داشته باشد، LEDهای کارآمد کنونی می‌توانند به بهره‌وری‌هایی بیش از ۱۵۰ لومن بر وات دست یابند (باقری ده باغی و همکاران، ۲۰۱۵). این افزایش بهره‌وری مستقیماً به کاهش مصرف انرژی الکتریکی برای دستیابی به سطح روشنایی یکسان منجر می‌شود و در مدل‌های LCCA، بزرگ‌ترین عامل کاهش دهنده OPEX را تشکیل می‌دهد. با این حال، کاهش هزینه‌های چرخه عمر تنها با جایگزینی صرف لامپ‌ها محقق نمی‌شود؛ بلکه نیازمند یک رویکرد سیستمی است که شامل اجزای کنترلی هوشمند و پایداری اکولوژیک از طریق انرژی‌های تجدیدپذیر باشد (زارع و همکاران، ۲۰۲۵). سیستم‌های کنترل روشنایی، شامل سنسورهای نوری و حرکتی، به طور هوشمند مصرف انرژی را بر اساس حضور کاربران و میزان نور طبیعی موجود تنظیم می‌کنند. یک سیستم کنترل هوشمند، می‌تواند در ساعات کم تردد (مثلاً ۱ تا ۴ صبح) شدت نور را تا ۳۰ درصد سطح طراحی کاهش دهد بدون اینکه ایمنی به خطر بیفتد، در حالی که قابلیت بازیابی سریع به سطح کامل را در صورت تشخیص حرکت حفظ می‌کند؛ این تنظیم پویا، بازدهی سیستم LED را دوجندان می‌کند (مودت و همکاران، ۲۰۲۳).

یکی از مهم‌ترین پیشرفت‌ها در کاهش هزینه‌های بلندمدت، افزایش طول عمر تجهیزات و کاهش دفعات تعویض است. طول عمر نامی (Rated Life) یک چراغ LED مدرن می‌تواند تا ۵۰,۰۰۰ تا ۱۰۰,۰۰۰ ساعت باشد، در مقایسه با حدود ۱۵,۰۰۰ تا

۲۴,۰۰۰ ساعت برای فناوری‌های سنتی (قائمی اصل و همکاران، ۲۰۱۹). این افزایش چشمگیر در عمر مفید، هزینه‌های نگهداری و نیروی انسانی مورد نیاز برای تعویض را به شدت کاهش می‌دهد و یک صرفه‌جویی قابل توجه در مؤلفه O&M مدل LCCA ایجاد می‌کند. با این حال، مدیریت این طول عمر نیازمند پایش دقیق پارامترهای عملکردی مانند جریان درایورها و دمای محل نصب است، زیرا گرمای بیش از حد می‌تواند به سرعت عمر مفید درایور و خود LED را کاهش دهد.

ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر، به ویژه پنل‌های خورشیدی فتوولتائیک (PV)، در سیستم‌های روشنایی پارک‌ها، رویکردی استراتژیک برای دستیابی به پایداری زیست‌محیطی و استقلال انرژی است (مولائی، ۲۰۲۲). سیستم‌های روشنایی خورشیدی مستقل (Off-grid Solar Lighting) برای مکان‌هایی که دسترسی به شبکه برق دشوار یا پرهزینه است، بسیار مناسب‌اند. برای پارک‌های شهری بزرگ، می‌توان یک سیستم PV متمرکز یا توزیع‌شده ایجاد کرد که علاوه بر تأمین انرژی روشنایی، انرژی مورد نیاز سایر تجهیزات کم‌مصرف پارک (مانند سنسورها و دوربین‌های امنیتی) را نیز فراهم کند. برآورد هزینه در این حالت، نیازمند محاسبه دقیق هزینه نصب باتری‌ها، مبدل‌ها و پنل‌ها، و در نظر گرفتن هزینه‌های تعویض باتری‌ها در طول عمر ۲۰ ساله سیستم است. تحلیل هزینه‌های چرخه عمر سیستم‌های خورشیدی نیازمند توجه ویژه به سرمایه‌گذاری اولیه بالاتر (CAPEX) و کاهش کامل هزینه‌های انرژی (OPEX صفر برای برق شبکه) است (حنایی و همکاران، ۲۰۲۲). در مناطقی که تعرفه برق شبکه بالا است، دوره بازگشت سرمایه (Payback Period) برای سیستم‌های خورشیدی کوتاه‌تر خواهد بود. این برآوردها باید شامل تحلیل تابش خورشیدی منطقه‌ای (Solar Irradiance Data) برای تعیین ظرفیت بهینه پنل و باتری باشد تا از خاموشی‌های ناشی از کمبود شارژ در روزهای ابری متوالی جلوگیری شود؛ این موضوع یک ریسک فنی است که باید در طراحی سیستم مدیریت انرژی لحاظ گردد.

فناوری‌های نوین همچنین شامل سیستم‌های مدیریت روشنایی مبتنی بر اینترنت اشیا (IoT) می‌شوند که امکان نظارت از راه دور (Remote Monitoring) و عیب‌یابی پیشگیرانه را فراهم می‌آورند (نوبر و همکاران، ۲۰۲۵). این سیستم‌ها با ارسال داده‌های لحظه‌ای در مورد جریان، ولتاژ و دما، به مدیران شهری اجازه می‌دهند تا قبل از خرابی کامل یک قطعه، نسبت به تعویض آن اقدام نمایند. این قابلیت، نگهداری واکنشی (Reactive Maintenance) را به نگهداری پیشگويانه (Predictive Maintenance) تبدیل می‌کند، که از منظر اقتصادی، هزینه‌های نیروی انسانی اعزام شده برای بررسی خرابی‌های گزارش نشده را به شدت کاهش می‌دهد. استفاده از مواد با دوام و مقاوم در برابر شرایط محیطی پارک (مانند خوردگی، اشعه UV و ضربه) نیز در کاهش هزینه‌های O&M نقش دارد (شجاعیان، ۲۰۲۴). انتخاب بدنه‌های چراغ از آلومینیوم ریخته‌گری با کیفیت بالا یا پلیمرهای مقاوم، تضمین می‌کند که تجهیزات در برابر آسیب‌های محیطی مقاومت بیشتری داشته باشند و نیاز به تعمیرات ساختاری ناشی از فرسایش زودرس را کاهش دهند. این ملاحظات باید در تخصیص بودجه اولیه سخت‌افزار در مدل LCCA گنجانده شوند. در نهایت، مدیریت موفقیت‌آمیز این فناوری‌ها نیازمند توسعه مهارت‌های فنی در بدنه شهرداری‌ها است. فناوری‌های هوشمند پیچیدگی‌های نرم‌افزاری و ارتباطی را به همراه دارند که نیازمند تخصص در زمینه شبکه‌های مخابراتی، تحلیل داده و امنیت سایبری است (امیدی و همکاران، ۲۰۲۴). سرمایه‌گذاری در آموزش کارکنان برای بهره‌برداری مؤثر از این پلتفرم‌های مدیریتی، یک مولفه پنهان اما حیاتی در برآورد هزینه بلندمدت است که تضمین می‌کند سرمایه‌گذاری انجام شده در سخت‌افزار هوشمند، به طور کامل از پتانسیل خود استفاده کند و هدررفت ناشی از عدم استفاده یا استفاده نادرست به حداقل برسد.

۵: مدیریت پروژه سبز و رویکردهای پایداری در طراحی و بهره‌برداری روشنایی پارک‌ها

اجرای سیستم‌های روشنایی در پارک‌های شهری باید ذیل چارچوب مدیریت پروژه سبز (Green Project Management) قرار گیرد تا تضمین شود که اهداف زیست‌محیطی و اجتماعی به اندازه اهداف اقتصادی در اولویت قرار دارند (خاکپور و همکاران، ۲۰۱۰). این رویکرد، فراتر از انتخاب فناوری‌های کم‌مصرف، بر کل چرخه حیات پروژه، از مرحله تعریف نیاز تا تخریب و بازیافت تجهیزات، تمرکز دارد. در مرحله طراحی، مدیریت پروژه سبز ایجاب می‌کند که تحلیل‌های دقیقی بر اساس معیارهای ارزیابی چرخه عمر (Life Cycle Assessment - LCA) انجام شود تا اثرات زیست‌محیطی کل سیستم، از استخراج مواد اولیه تا تولید، حمل و نقل، بهره‌برداری و دفع نهایی، به طور جامع ارزیابی گردد (زارع و همکاران، ۲۰۲۵). یکی از جنبه‌های کلیدی پایداری در طراحی روشنایی پارک‌ها، رویکرد "نورپردازی بر اساس نیاز فضایی" است که در بخش‌های پیشین اشاره شد. در مدیریت پروژه سبز، این رویکرد به معنای تعریف دقیق "منطقه‌های نوری" (Lighting Zones) بر اساس الگوهای استفاده، اهمیت امنیتی و حساسیت اکولوژیکی هر بخش از پارک است (لاهیجانیان و همکاران، ۲۰۱۷). به عنوان مثال، یک منطقه حفاظت‌شده یا زیستگاه پرندگان نیازمند کمترین سطح روشنایی ممکن، حتی در شب، خواهد بود؛ در حالی که مسیرهای اصلی پیاده‌روی به استاندارد بالاتری نیاز دارند. شهرداری‌ها باید نقشه‌های کاربری فضایی شبانه را به عنوان ورودی اساسی در مدل‌سازی سیستم کنترل وارد کنند.

برآورد هزینه‌ها در مدیریت پروژه سبز باید شامل مولفه‌هایی برای کاهش اثرات زیست‌محیطی باشد. این شامل هزینه‌های مرتبط با انتخاب تأمین‌کنندگان محلی برای کاهش انتشار کربن ناشی از حمل و نقل تجهیزات، و همچنین هزینه‌های مربوط به استفاده از مواد قابل بازیافت یا با محتوای بازیافتی بالا در ساختار چراغ‌ها و پایه‌ها است (قائمی اصل و همکاران، ۲۰۱۹). اگرچه این انتخاب‌ها ممکن است هزینه اولیه مواد را افزایش دهند، اما در مدل‌های جامع پایداری، این هزینه‌ها به عنوان سرمایه‌گذاری برای کاهش اثرات زیست‌محیطی بلندمدت و کسب امتیازات مربوط به پروژه‌های سبز شهری توجیه‌پذیر هستند. مدیریت ریسک در پروژه‌های سبز روشنایی پارک‌ها باید به طور خاص بر ریسک‌های مرتبط با پذیرش فناوری‌های نوین تمرکز کند. سیستم‌های هوشمند، به دلیل وابستگی به نرم‌افزار و اتصالات شبکه، آسیب‌پذیری‌های امنیتی جدیدی را ایجاد می‌کنند (نوبر و همکاران، ۲۰۲۵). مدیریت پروژه باید شامل فازهای قوی آزمایش و اعتبارسنجی (Testing and Commissioning) سیستم‌های کنترل، به ویژه در مورد سناریوهای اضطراری و امنیت سایبری باشد. عدم انجام این تست‌ها می‌تواند منجر به هدررفت انرژی در صورت از کار افتادن کنترلرها یا به خطر افتادن امنیت به دلیل دسترسی‌های غیرمجاز شود.

بهره‌برداری پایدار نیازمند ایجاد یک پروتکل عملیاتی استاندارد (SOP) برای تنظیمات روشنایی است که به صورت دوره‌ای بازنگری شود (مولائی، ۲۰۲۲). شهرداری‌ها نباید پس از نصب سیستم هوشمند، آن را رها کنند؛ بلکه باید تیم‌های تخصصی برای پایش مستمر پروفایل‌های مصرف و کالیبراسیون مجدد سنسورها تشکیل دهند. این پایش منظم، امکان شناسایی زودهنگام دستگاه‌هایی که رانده‌مانشان کاهش یافته (Lumen Depreciation) یا درایورهای معیوب را فراهم می‌سازد و اجازه می‌دهد تعمیرات به صورت دقیق و هدفمند انجام شود، نه به صورت برنامه‌ریزی نشده (باقری ده باغی و همکاران، ۲۰۱۵). همچنین، مدیریت پروژه سبز باید نقش مشارکت ذی‌نفعان را پررنگ سازد. شهروندان ساکن اطراف پارک‌ها و گروه‌های فعال در زمینه محیط زیست، می‌توانند بازخوردهای ارزشمندی در مورد سطح راحتی بصری، میزان روشنایی لازم برای ایمنی در مسیرهای خاص و تأثیرات آلودگی نوری ارائه دهند (حنایی و همکاران، ۲۰۲۲). این ورودی‌ها باید در فاز طراحی و پس از اجرای آزمایشی (Pilot Phase) جمع‌آوری شوند تا اطمینان حاصل شود که سیستم نصب شده نه تنها از نظر انرژی کارآمد است، بلکه پاسخگوی نیازهای اجتماعی و ادراکی کاربران نیز می‌باشد.

از منظر مدیریت پسماند، رویکرد پایداری حکم می‌کند که در پایان عمر مفید تجهیزات، طرحی برای بازیافت یا استفاده مجدد از قطعات وجود داشته باشد (شجاعیان، ۲۰۲۴). چراغ‌های LED حاوی فلزات سنگین و مواد الکترونیکی هستند که دفع نامناسب آن‌ها می‌تواند محیط زیست را آلوده سازد. شهرداری‌ها باید در قراردادهای خرید، الزاماتی را برای بازگرداندن تجهیزات مستعمل به تولیدکنندگان یا مراکز بازیافت تخصصی بگنجانند. این مسئولیت تولیدکننده/مصرف‌کننده باید در مدل LCCA به عنوان یک هزینه نهایی (End-of-Life Cost) یا در صورت وجود برنامه‌های بازیافت، به عنوان یک ارزش باقی‌مانده (Salvage Value) لحاظ شود. رویکرد مدیریتی باید سیستمی باشد که آموزش را نیز در برگیرد. نصب تجهیزات پیشرفته بدون آموزش کافی اپراتورها، منجر به عدم بهره‌برداری کامل از قابلیت‌های هوشمند می‌شود و سرمایه‌گذاری اولیه را هدر می‌دهد (امیدی و همکاران، ۲۰۲۴). بنابراین، یک بخش ضروری از بودجه مدیریت پروژه سبز، باید به آموزش‌های عملی و مستمر کارکنان نگهداری و بهره‌برداری در مورد نحوه تعامل با پلتفرم‌های کنترل، تفسیر داده‌های عملکردی و اجرای پروتکل‌های نگهداری پیشگیرانه اختصاص یابد. این سرمایه‌گذاری در سرمایه انسانی، تضمین‌کننده پایداری عملیاتی در بلندمدت است.

۶: ارزیابی زیست‌محیطی، اکولوژیک و اثرات انرژی روشنایی پارک‌ها

تأثیرات زیست‌محیطی روشنایی پارک‌ها، به ویژه آلودگی نوری و مصرف انرژی، جنبه‌های حیاتی رویکرد توسعه پایدار هستند که مستلزم ارزیابی دقیق اکولوژیک از سوی شهرداری‌ها می‌باشند (علوی و همکاران، ۲۰۲۰). آلودگی نوری، که به نوری گفته می‌شود که بدون هدف یا بیش از حد لازم در محیط پخش می‌شود، یکی از مخرب‌ترین اثرات جانبی روشنایی شهری است. این پدیده بر ریتم‌های شبانه‌روزی (Circadian Rhythms) انسان‌ها و همچنین بر روی اکوسیستم‌های شب‌زی، به ویژه حشرات گرده‌افشان، خفاش‌ها و پرندگان مهاجر، تأثیر منفی می‌گذارد (لاهیجانیان و همکاران، ۲۰۱۷). در ارزیابی اکولوژیک، دمای رنگ (Color Temperature) نور نقش محوری ایفا می‌کند. چراغ‌های با دمای رنگ بالا (نورهای آبی-سفید، بالای ۳۰۰۰ کلوین) بیشترین اختلال را در چرخه شبانه‌روزی موجودات زنده ایجاد می‌کنند، زیرا طیف نور آبی به طور مؤثرتری ملاتونین را در پستانداران و انسان‌ها سرکوب می‌کند (فروتن و صدرآبادی، ۲۰۱۸). مدیریت پایدار ایجاب می‌کند که در نواحی حساس اکولوژیکی پارک‌ها، از منابع نوری با دمای رنگ پایین (کمتر از ۲۷۰۰ کلوین، نور کهربایی یا زرد) استفاده شود که تأثیرات بیولوژیکی مخرب کمتری دارند، حتی اگر بهره‌وری لومن بر وات آن‌ها به طور جزئی کمتر باشد؛ این یک مثال کلاسیک از اولویت‌بندی معیارهای پایداری بر معیارهای صرفاً اقتصادی است.

مدیریت انرژی سیستم روشنایی پارک‌ها، به دلیل کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، تأثیر مستقیمی بر پایداری اقلیمی شهر دارد. ممیزی انرژی که در بخش‌های پیشین ذکر شد، باید با محاسبه انتشار کربن معادل (CO₂e) همراه باشد. به عنوان مثال، اگر جایگزینی یک چراغ ۴۰۰ وات HPS با یک چراغ ۱۵۰ وات LED هوشمند، در طول عمر ۱۰ ساله، منجر به صرفه‌جویی سالانه ۲۰۰۰ کیلووات ساعت انرژی شود، میزان کاهش انتشار کربن (بر اساس شدت کربن شبکه برق محلی) باید به عنوان یک دستاورد زیست‌محیطی در گزارش‌های شهرداری مستند گردد (مودت و همکاران، ۲۰۲۳). در زمینه برآورد هزینه، باید اثرات پایداری بر ارزش‌گذاری دارایی‌های شهری لحاظ شود. پروژه‌هایی که به طور شفاف کاهش اثرات زیست‌محیطی را نشان می‌دهند، ممکن است دسترسی به وام‌های سبز، یارانه‌های انرژی یا اعتبارات کربن را برای شهرداری تسهیل کنند؛ این مزایای مالی غیرمستقیم باید در تحلیل LCCA گنجانده شوند، زیرا هزینه سرمایه‌گذاری اولیه را کاهش داده و بازگشت سرمایه را تسریع می‌بخشند (رستم‌پیشه و همکاران، ۲۰۲۳). این امر نیازمند توانایی شهرداری در مستندسازی دقیق معیارهای پایداری مطابق با استانداردهای بین‌المللی گزارش‌دهی است.

سیستم‌های کنترل هوشمند ابزاری حیاتی برای کنترل آلودگی نوری هستند، زیرا آن‌ها به طور فعال از تابش نور در جهت نامطلوب جلوگیری می‌کنند (شجاعیان، ۲۰۲۴). استفاده از فیلترهای (Reflectors) دقیق و توزیع‌کننده‌های نوری با زاویه برش (Cut-off Angle) مناسب، اطمینان می‌دهد که زاویه تابش نور بالاتر از خط افق نخواهد بود. این کنترل هندسی نور، نه تنها آلودگی نوری افقی به سمت آسمان و آلودگی نوری عرضی به سمت منازل را کاهش می‌دهد، بلکه کارایی نوری را نیز افزایش می‌دهد، زیرا تمامی انرژی نوری به سمت منطقه هدف هدایت می‌شود. مدیریت تأثیرات بر کیفیت آب و خاک نیز باید در طراحی سیستم‌های جدید لحاظ شود. در صورت استفاده از سیستم‌های روشنایی خورشیدی، محل نصب پنل‌ها نباید بر الگوی رشد گیاهان تأثیر منفی بگذارد، و طراحی پایه‌ها باید به حداقل رساندن سطح اشغال شده از زمین و اختلال در پوشش گیاهی طبیعی منجر شود (مولائی، ۲۰۲۲). در صورت لزوم، می‌توان از پایه‌هایی با کمترین اثر تخریبی بر خاک استفاده کرد و تمامی تأسیسات زیرزمینی را با رعایت الزامات زیست‌محیطی اجرا نمود.

یکی از ملاحظات اکولوژیکی مهم، تأثیر روشنایی بر مصرف انرژی در زمان‌های پیک مصرف شهری است. اگر روشنایی پارک‌ها به گونه‌ای مدیریت شود که اوج مصرف آن در ساعات پیک شبکه برق شهری (معمولاً اوایل عصر) به حداقل برسد (به عنوان مثال، با شروع روشنایی با شدت پایین و افزایش تدریجی آن)، این اقدام به پایداری کلی شبکه برق کمک کرده و نیاز به راه‌اندازی واحدهای تولیدی گران‌قیمت و آلوده‌کننده برای تأمین بار پیک را کاهش می‌دهد (امیدی و همکاران، ۲۰۲۴). این "مدیریت تقاضا برای روشنایی" یک اثر مثبت دوبرگه‌ای بر محیط زیست دارد. در نهایت، ارزیابی زیست‌محیطی باید شامل تجزیه و تحلیل ریسک‌های مربوط به نشت مواد شیمیایی از باتری‌های سیستم‌های خورشیدی در صورت عدم مدیریت صحیح در پایان عمر باشد (نوبر و همکاران، ۲۰۲۵). شهرداری‌ها موظفند در قراردادهای تأمین، بندهایی را بگنجانند که مسئولیت دفع ایمن باتری‌های لیتیوم-یون یا سرب-اسید را به تأمین‌کننده محول کند و هزینه‌های احتمالی آلودگی خاک و آب ناشی از نشت الکترولیت‌ها را در تحلیل‌های بلندمدت خود لحاظ نماید.

۷: تحلیل مدیریتی و نهادی نقش شهرداری‌ها در مدیریت مصرف انرژی پارک‌ها

نقش شهرداری‌ها در فرآیند گذار به سیستم‌های روشنایی هوشمند و پایدار در پارک‌ها، نقشی چندوجهی است که شامل توانمندی‌های فنی، ساختار سازمانی، ابزارهای قانونی و استراتژی‌های مالی می‌شود (حنایی و همکاران، ۲۰۲۲). چالش اصلی در سطح نهادی، اغلب نه در حوزه فنی، بلکه در حوزه مدیریت دانش و همکاری بین بخشی (Inter-Departmental Collaboration) قرار دارد. معمولاً دپارتمان‌های فضای سبز، خدمات شهری، و مالی شهرداری‌ها به صورت جزیره‌ای عمل می‌کنند، در حالی که یک پروژه روشنایی پایدار نیازمند یکپارچگی کامل بین این بخش‌ها است؛ متخصصان فضای سبز باید نیازهای زیبایی‌شناختی را تعریف کنند، مهندسان برق کارایی انرژی را بهینه سازند، و مدیران مالی توجیه اقتصادی LCCA را تأیید نمایند (قائمی اصل و همکاران، ۲۰۱۹). ایجاد یک دفتر یا کارگروه متمرکز مدیریت انرژی پارک‌ها (Urban Park Energy Management Unit)، می‌تواند به عنوان یک نهاد هماهنگ‌کننده عمل کند تا استانداردهای یکپارچه، فرآیندهای برآورد هزینه و پروتکل‌های عملیاتی را در سطح شهر تدوین و نظارت نماید (باقری ده باغی و همکاران، ۲۰۱۵). این واحد متمرکز مسئولیت جمع‌آوری داده‌های مصرف انرژی پایه، ارزیابی پروژه‌های پیشنهادی بر اساس معیار LCCA و نظارت بر عملکرد پیمانکاران خدمات انرژی را بر عهده خواهد داشت، که این تمرکز مدیریتی از تشتت منابع و تصمیم‌گیری‌های محلی غیربهینه جلوگیری می‌کند.

موانع قانونی و مقرراتی نیز بر مدیریت انرژی تأثیرگذارند. بسیاری از شهرداری‌ها با قوانین مالی دست و پا گیری مواجه هستند که به شدت بر هزینه‌های سرمایه‌ای اولیه (CAPEX) تأکید دارند و بازده بلندمدت (OPEX Savings) را در تصمیم‌گیری‌های

بودجه‌ای نادیده می‌گیرند (شجاعیان، ۲۰۲۴). برای غلبه بر این موضوع، شهرداری‌ها باید لایحه‌هایی را به شوراهای شهری ارائه دهند که به طور رسمی تحلیل LCCA را به عنوان معیار اصلی ارزیابی پروژه‌های زیرساختی بلندمدت، از جمله روشنایی، بپذیرند. این تغییر پارادایم قانونی، راه را برای سرمایه‌گذاری در فناوری‌های گران‌تر اما کارآمدتر هموار می‌سازد. یکی از مؤثرترین راهکارهای مدیریتی برای تسریع گذار، استفاده از مدل‌های برون‌سپاری هوشمند است. قراردادهای خدمات انرژی (ESCOs) که در بخش چهارم مطرح شد، به شهرداری‌ها اجازه می‌دهند که بدون نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه سنگین و بدون نیاز به توسعه سریع تخصص فنی داخلی در حوزه سیستم‌های هوشمند، از مزایای صرفه‌جویی انرژی بهره‌مند شوند (حنایی و همکاران، ۲۰۲۲). با این حال، موفقیت این قراردادها به شدت وابسته به توانایی شهرداری در تعریف دقیق دامنه کار (Scope of Work)، تعیین معیار صرفه‌جویی قابل اندازه‌گیری (Measurement and Verification - M&V) و نظارت مستمر بر عملکرد پیمانکار است.

مدیریت ریسک بر اساس کیفیت داده‌ها، یک جنبه حیاتی نهادی است. برآورد هزینه و صرفه‌جویی‌های پیش‌بینی شده در سیستم‌های هوشمند، تنها به اندازه دقت داده‌هایی که از سنسورها و کنتورها جمع‌آوری می‌شوند، قابل اعتماد هستند (امیدی و همکاران، ۲۰۲۴). شهرداری‌ها باید سرمایه‌گذاری‌های لازم را در زیرساخت‌های اندازه‌گیری دقیق (Smart Metering) و سیستم‌های مدیریت داده مرکزی انجام دهند تا از صحت عملکرد تجهیزات اطمینان حاصل کنند و در صورت بروز اختلاف با پیمانکاران، مستندات محکمی در اختیار داشته باشند. توسعه نیروی انسانی متخصص داخلی نیز یک استراتژی مدیریتی بلندمدت است. وابستگی کامل به پیمانکاران خارجی برای بهره‌برداری از سیستم‌های هوشمند، شهرداری را در برابر نوسانات بازار و قیمت‌گذاری پیمانکاران آسیب‌پذیر می‌سازد (قائمی اصل و همکاران، ۲۰۱۹). برنامه‌های آموزشی متمرکز بر مهارت‌های مرتبط با تحلیل داده‌های انرژی، برنامه‌نویسی کنترلی پایه و نگهداری پیشگیرانه تجهیزات LED و سنسورها، باید بخشی جدایی‌ناپذیر از بودجه عملیاتی سالانه شهرداری‌ها قرار گیرد.

از منظر توسعه شهری، مدیریت روشنایی پارک‌ها باید با برنامه‌ریزی بلندمدت توسعه فضاهای سبز و طرح جامع شهری همسو باشد. تصمیمات مربوط به ارتقای روشنایی نباید به صورت واکنشی و پس از خرابی کامل سیستم‌های قدیمی اتخاذ شوند، بلکه باید به صورت پیشگیرانه و در قالب یک برنامه نوسازی چندساله تعریف شوند که پیش‌بینی‌های مالی برای تأمین CAPEX مورد نیاز را در بودجه‌های سنواتی لحاظ کند (خاکپور و همکاران، ۲۰۱۰). این رویکرد برنامه‌ریزی شده، هزینه‌های عملیاتی ناشی از نگهداری اضطراری را به شدت کاهش می‌دهد. در نهایت، شفافیت و پاسخگویی نهادی در اجرای پروژه‌ها برای حفظ اعتماد عمومی ضروری است. گزارش‌دهی منظم به عموم شهروندان درباره میزان صرفه‌جویی انرژی، کاهش انتشار کربن و بهبود سطح ایمنی ناشی از سرمایه‌گذاری‌ها، می‌تواند حمایت اجتماعی لازم برای پروژه‌های آتی را فراهم آورد (باقری ده باغی و همکاران، ۲۰۱۵). این گزارش‌ها باید بر مبنای داده‌های کمی (مانند kWh صرفه‌جویی شده و کاهش شکایات امنیتی) تنظیم شوند و به طور عمومی در دسترس قرار گیرند تا مسئولیت‌پذیری مدیریت شهری در قبال منابع عمومی اثبات شود.

نتیجه‌گیری نهایی و پیشنهادهای کاربردی برای شهرداری‌ها

این مقاله مروری جامع، با هدف ارزیابی دقیق ابعاد اقتصادی، فنی و محیطی مدیریت انرژی و برآورد هزینه سیستم‌های روشنایی پارک‌های شهری در چارچوب توسعه پایدار، انجام پذیرفت. یافته‌های حاصل از تحلیل مبانی نظری و ادبیات تخصصی تأکید می‌کند که رویکرد سنتی متمرکز بر هزینه‌های اولیه نصب (CAPEX) دیگر پاسخگوی الزامات مدیریت منابع در قرن بیست و یکم نیست (زارع و همکاران، ۲۰۲۵). در مقابل، یک رویکرد استراتژیک مبتنی بر تحلیل هزینه چرخه عمر (LCCA) که مزایای بلندمدت صرفه‌جویی انرژی و کاهش هزینه‌های نگهداری (O&M و OPEX) را لحاظ کند، تنها مسیر منطقی برای بهینه‌سازی

مالی سیستم‌های روشنایی پارک‌ها است (رستم‌پیشه و همکاران، ۲۰۲۳). گذار موفقیت‌آمیز به فناوری‌های LED هوشمند، با توجه به کاهش ۴۰ تا ۶۰ درصدی مصرف انرژی در مقایسه با سامانه‌های سنتی، توجیه اقتصادی قوی در بازه زمانی ۷ تا ۱۰ ساله دارد. از منظر مدیریتی و نهادی، یکی از موانع اصلی در اجرای بهینه، فقدان ساختارهای سازمانی منسجم برای هماهنگی بین بخش‌های مختلف شهرداری و کمبود دانش فنی تخصصی در زمینه کنترل هوشمند و پایش مستمر انرژی است (حنایی و همکاران، ۲۰۲۲). علاوه بر این، اثرات زیست‌محیطی روشنایی، به ویژه آلودگی نوری و اختلال در ریتم‌های شبانه‌روزی موجودات زنده، نشان داد که معیارهای فنی باید با ملاحظات اکولوژیکی، از طریق انتخاب دمای رنگ مناسب و کنترل دقیق هندسه تابش، متعادل گردند (علوی و همکاران، ۲۰۲۰). ایمنی و کیفیت فضایی نیز به طور تنگاتنگی با یکنواختی و قابلیت تنظیم هوشمند نور مرتبط هستند، که این امر نیازمند سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های سنسوری و کنترلی پیشرفته است (شجاعیان، ۲۰۲۴).

در نتیجه، دستیابی به پارک‌های شهری پایدار، نیازمند پذیرش یک پارادایم مدیریتی نوظهور است که در آن، روشنایی به عنوان یک سیستم یکپارچه و پویا دیده شود و نه مجموعه‌ای از تجهیزات مجزا. این پارادایم بر مدل‌سازی دقیق پروفایل‌های بار متغیر، ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر (مانند PV) برای کاهش وابستگی به شبکه و بهره‌گیری از داده‌های لحظه‌ای برای نگهداری پیشگیرانه تمرکز دارد (مولائی، ۲۰۲۲). اجرای موفقیت‌آمیز این تغییرات نیازمند تعهد نهادی شهرداری‌ها برای اصلاح فرآیندهای بودجه‌ریزی و سرمایه‌گذاری در توسعه سرمایه انسانی در حوزه مدیریت انرژی است.

پیشنهادهای کاربردی برای شهرداری‌ها:

۱. الزام‌آور ساختن تحلیل LCCA: شهرداری‌ها باید به صورت نهادی، استفاده از تحلیل هزینه چرخه عمر را به جای تمرکز صرف بر CAPEX، برای کلیه پروژه‌های زیرساختی روشنایی پارک‌ها الزامی سازند و نرخ تنزیل مناسب را بر اساس شرایط اقتصادی منطقه تعیین نمایند (رستم‌پیشه و همکاران، ۲۰۲۳).

۲. ایجاد زیرساخت‌های سنجش هوشمند: سرمایه‌گذاری اولیه در نصب کنتورهای هوشمند و سنسورهای محیطی برای هر زون روشنایی در پارک‌ها ضروری است. این اقدام، خط مبنای مصرف انرژی را به دقت مشخص کرده و امکان اندازه‌گیری و اعتبارسنجی (M&V) صرفه‌جویی‌ها را برای نظارت بر عملکرد پیمانکاران فراهم می‌آورد (امیدی و همکاران، ۲۰۲۴).

۳. تدوین دستورالعمل‌های پایداری نوری: باید یک دستورالعمل داخلی تدوین شود که بر اساس حساسیت اکولوژیکی هر منطقه از پارک، حداقل و حداکثر شدت نور مجاز، و دمای رنگ (CCT) مورد قبول را تعریف کند. این دستورالعمل باید استفاده از نورهای با طیف آبی بالا را در مناطق حساس اکولوژیک ممنوع سازد (علوی و همکاران، ۲۰۲۰).

۴. استفاده از مدل‌های مالی نوآورانه: شهرداری‌ها باید به فعال‌سازی قراردادهای خدمات انرژی (ESCOs) روی آورند، به ویژه برای نوسازی‌های بزرگ، تا هزینه اولیه سرمایه‌گذاری در LEDها و سیستم‌های کنترل هوشمند را از طریق صرفه‌جویی‌های تضمین شده تأمین کنند و ریسک‌های مالی را به بخش خصوصی منتقل نمایند (حنایی و همکاران، ۲۰۲۲).

۵. آموزش مستمر نیروی کار: تخصیص بودجه سالانه برای آموزش مهندسان و تکنسین‌های نگهداری در زمینه پروتکل‌های عیب‌یابی سیستم‌های کنترل IoT، تحلیل داده‌های عملکردی و مدیریت باتری‌های سیستم‌های خورشیدی برای اطمینان از بهره‌برداری مؤثر و پیشگیرانه از زیرساخت‌های جدید ضروری است (قائم‌ی اصل و همکاران، ۲۰۱۹).

۶. ادغام روشنایی و توسعه فضایی: تیم‌های طراحی روشنایی باید از ابتدا بخشی از فرآیند طراحی منظر شهری باشند و از اصول طراحی مبتنی بر تقاضا (Demand-Based Design) برای ایجاد فضاهای شبانه ایمن، کارآمد و جذاب برای جامعه استفاده کنند (لاهیجانیان و همکاران، ۲۰۱۷).
۷. برنامه‌ریزی برای پایان عمر تجهیزات: در مناقصات خرید تجهیزات، تعهدات بازافت و دفع ایمن تجهیزات مستعمل، به ویژه LEDها و باتری‌ها، باید به عنوان یک معیار ارزیابی کیفیت تأمین‌کننده گنجانده شود تا مسئولیت زیست‌محیطی در چرخه حیات کامل رعایت گردد (شجاعیان، ۲۰۲۴).
۸. تعیین KPIهای چندگانه: فراتر از صرفه‌جویی انرژی، شهرداری‌ها باید شاخص‌های کلیدی عملکردی در زمینه کاهش آلودگی نوری (مثلاً کاهش نوری در زوایای بالای ۸۰ درجه) و افزایش رضایت شهروندان از امنیت شبانه را برای سنجش موفقیت پروژه‌های نوسازی روشنایی به کار گیرند (باقری ده باغی و همکاران، ۲۰۱۵).

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 برنامه‌ریزی 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 برودی 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). برنامه‌ریزی 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)، ۴۴۵-۴۴۰.
- 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.
- امید، 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-پارک‌ها-با استفاده از روش تاپسیس-مطالعه موردی: شهر مشهد. جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، ۱۴(۸)، ۱-۲۸.

- علوی، جنتیان، نسیمه. (۲۰۲۰). شناسایی و اولویت بندی فعالیت‌ها به منظور دستیابی به مدیریت پروژه سبز از منظر ناب و پایداری در سازمان پارک‌ها 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.