



## شبیه‌سازی تحت شبکه تولید غیر متمرکز برق تجدیدپذیر در بخش روشنایی معابر شهری در چارچوب الگوی مدیریت پایدار شهری (مورد مطالعه: شهرستان مشهد)

مهدی قائمی اصل\*

استادیار گروه اقتصاد و بانکداری اسلامی، دانشکده اقتصاد، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

داود منظور

دانشیار گروه اقتصاد انرژی، دانشکده معارف اسلامی و اقتصاد، دانشگاه امام صادق (ع)، تهران، ایران

سید مهدی موسوی برودی

دانشجوی دکتری علوم اقتصادی، دانشکده معارف اسلامی و اقتصاد، دانشگاه امام صادق (ع)، تهران، ایران

دریافت: ۹۵/۰۹/۰۹ پذیرش: ۹۶/۰۴/۱۷

**چکیده:** روشنایی معابر برای رفاه شهروندان و هم‌زمان با اوج مصرف شبکه، از زمان غروب خورشید تا زمان طلوع آن برقرار می‌شود. در این پژوهش با هدف طراحی یک الگوی مدیریت پایدار شهری در زمینه تأمین انرژی روشنایی معابر، از شبیه‌سازی به‌کارگیری تکنولوژی LEDهای فتوولتاییک به‌جای لامپ‌های سدیمی و هالوژن استفاده شده است. بر این اساس در یک شبیه‌سازی سیستمی تحت شبکه، سناریوهای تعدیل ورود ظرفیت‌های مختلف فتوولتاییک به سیستم تولید تأمین‌کننده برق شهرستان مشهد، بررسی شده است. نتایج برنامه‌ریزی آنالیزی تحت شبکه به‌کارگیری این الگوی تولید غیرمتمرکز (پراکنده) نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن ظرفیت ۲۰۰ وات و ضریب بهره‌برداری ۲۰ درصدی برای هر یک از LEDهای فتوولتاییک و نصب یک LED فتوولتاییک به جای چراغ‌های سدیمی و هالوژنی، تمامی توان موردنیاز برای تأمین برق روشنایی معابر شهری با تکنولوژی خورشیدی فتوولتاییک تأمین می‌شود و با ایجاد قابلیت جانشین‌پذیری میان تولید فسیلی و تجدیدپذیر، انتشار آلاینده زیست‌محیطی نیز به میزان ۱۰۴ هزار تن کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان از این روش برای مدیریت پاک و پایدار انرژی در مقیاس مصارف شهری استفاده کرد و ضمن کمک به محیط‌زیست و کاهش آلودگی هوا، از تلفات ناشی از انتقال انرژی الکتریکی از نیروگاه به محل مصرف نیز جلوگیری نمود.

**واژگان کلیدی:** شبیه‌سازی تحت شبکه، مدیریت پایدار شهری، تکنولوژی فتوولتاییک، شهرستان مشهد

طبقه‌بندی JEL: P25, Q2, O18

\* نویسنده مسئول: m.ghaemi@khu.ac.ir

## ۱- مقدمه

انرژی برای سال‌های متمادی، توجه بسیاری از برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران را به خود معطوف نموده است؛ به طوری که توسعه و پیشرفت بسیاری از جوامع حاضر به‌ویژه کشورهای در حال توسعه، به میزان قابل توجهی، متأثر از آن خواهد بود (سعیدخانی و همکاران، ۱۳۹۵). انرژی به‌عنوان نیروی محرکه فعالیت‌های تولیدی، زیربنای اساسی فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی هر کشوری به شمار می‌رود. محدودیت انرژی‌های فسیلی و پیش‌بینی افزایش قیمت آنها، مشکلات محیط‌زیستی و آلودگی هوا، گرم شدن زمین، افزایش جمعیت و عدم امنیت در عرضه آنها در پی بحران‌های سیاسی و اقتصادی، همگی مباحثی هستند که با گستردگی تمام، اهداف برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران را در یافتن راهکارهای مناسب برای حل معضلات انرژی در جهان، به‌خصوص بحران‌های زیست‌محیطی، به خود معطوف کرده است. همچنین پژوهشگران را به توسعه منابع با آلودگی کم‌تر و تجدیدپذیری که توان بالقوه‌ای برای جانشینی انرژی‌ها و سوخت‌های فسیلی را داشته باشد، ترغیب می‌کند (تهامی‌پور و همکاران، ۱۳۹۵).

یکی از محورهای اصلی توسعه در هر کشور، چگونگی تعامل بخش انرژی، محیط‌زیست و اقتصاد است. صنعت برق، از مرحله تولید تا مصرف نهایی، مخاطرات و تبعات زیست‌محیطی بسیاری را به وجود می‌آورد، اما از سوی دیگر، از آنجا که این بخش، زیربنای اصلی کلیه فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی است، این آثار و آلودگی‌ها، محیط‌زیست انسانی و طبیعی را با تهدیدها و خطرهایی مواجه کرده است (اصغری‌زاده و همکاران، ۱۳۹۶).

در دهه‌های اخیر، آلودگی به یکی از معضلات اصلی مدیریتی کشورها تبدیل شده است؛ به طوری که کشورها علاوه بر سیاست‌ها و اقدامات درون مرزهای خود، ساماندهی آلودگی را در حوزه بین‌المللی نیز دنبال

می‌کنند. از میان مصادیق آلودگی، آلودگی‌های ناشی از گازهای گلخانه‌ای، یکی از تهدیدهای جدی پیش‌روی بسیاری از کشورها می‌باشد که با توجه به ماهیت آن، گسترش بیشتری داشته و در اکثر مناطق جهان محسوس است. بر این اساس می‌توان گفت که کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن، نقش مهمی در حفاظت از محیط‌زیست و توسعه پایدار دارد (کهنسال و شایان‌مهر، ۱۳۹۵).

یکی از ارکان اساسی توسعه پایدار، دستیابی به زیست‌شهر پایدار است که در این راستا مطالعات و برنامه‌ریزی‌های متعددی برای یافتن اصول و راهکارهای کاربردی در برنامه‌های توسعه شهری صورت گرفته و اندیشه توسعه و مدیریت پایدار شهری، از جنبه‌های بسیار گسترده مورد نقد و بررسی در راستای توسعه در سطح ملی قرار گرفته است (کاظمیان و همکاران، ۱۳۹۶).

در این پژوهش با هدف طراحی یک الگوی مدیریت پایدار شهری در زمینه تأمین انرژی روشنایی معابر، از شبیه‌سازی به‌کارگیری تکنولوژی LEDهای فتوولتاییک به‌جای لامپ‌های سدیمی و هالوژن - که معمولاً منبع اصلی تأمین انرژی آنها سوخت‌های فسیلی است - استفاده شده است. براساس الگوی مدل‌سازی پژوهش، در یک شبیه‌سازی سیستمی تحت شبکه، سناریوهای تعدیل ورود ظرفیت‌های مختلف فتوولتاییک به سیستم تولید تأمین‌کننده برق شهرستان مشهد، بررسی شده است. این تعدیل‌های مختلف و روند افزایشی ظرفیت‌های فتوولتاییک ورودی به سیستم تولید، با این هدف انجام می‌شوند که نقطه آغاز تبدیل‌شده ماهیت نوسانی برق تجدیدپذیر خورشیدی به ماهیت پایدار و مطمئن مشخص گردد و انرژی خورشیدی به طور عملیاتی و سیستمی در شبکه برق شهرستان مشهد وارد شود و روشنایی معابر شهری از این انرژی پاک تأمین گردد.

## ۲- پیشینه پژوهش

### الف) پژوهش‌های خارجی

و<sup>۱</sup> و همکارانش (۲۰۰۹) یک سیستم خورشیدی LED طراحی و هزینه اجرای این طرح برای ۱۰ کیلومتر بزرگراه دوطرفه را بررسی کرده‌اند. هزینه اجرای طرح با لامپ LED با برق شبکه، ۲۲ میلیون دلار، لامپ LED با انرژی خورشیدی، ۲۶ میلیون دلار و لامپ جیوه‌ای، ۱۸ میلیون دلار تخمین زده شده است. این در حالی است که انرژی صرفه‌جویی شده توسط سیستم فوتولتائیک به حدود ۱۱۶۸۰۰۰ KWh در سال و کاهش تولید دی‌اکسیدکربن به میزان ۷۷۰۸۸۰ کیلوگرم در سال می‌رسد. بنابراین طبق محاسبات این مطالعه زمان لازم برای جبران هزینه‌های اضافی در سیستم LED با برق شبکه ۲/۲ سال و سیستم LED فوتولتائیک ۳/۳ سال در نظر گرفته می‌شود. همچنین عمر مفید سیستم‌های LED حدود ۱۰ سال است. پس با توجه به زمان طول عمر مفید و زمان جبران هزینه‌ها، استفاده از سیستم‌های LED چه با برق شهری و چه با انرژی خورشیدی از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است.

علی<sup>۲</sup> و همکارانش (۲۰۱۱) در پژوهشی تحت عنوان «طراحی و ساخت سیستم روشنایی LED معابر با انرژی رایگان خورشیدی»، به بررسی تغییرات مصرف انرژی در خیابان‌های مصر پرداختند. این سیستم شامل یک پنل PV، سیستم ذخیره انرژی، لامپ LED، سیستم تهویه قدرت و کنترلر می‌باشد. از مزایای این سیستم می‌توان به مصرف انرژی پایین، هزینه کم، عدم تولید دی‌اکسیدکربن و سازگاری با محیط‌زیست اشاره کرد. به گفته این گروه در سال ۲۰۰۹/۲۰۰۸ روشنایی معابر در مصر، حدود ۶/۲ درصد یعنی ۶۹۸۲ GWh از مصرف انرژی کل سال بوده است. آن‌ها برای کاهش مصرف انرژی دو راه‌حل در نظر گرفتند: پیشنهاد اول استفاده از لامپ‌های کم‌مصرف LED (80W) به جای

لامپ‌های HPS (150W) می‌باشد؛ در این روش مصرف انرژی برای روشنایی معابر به ۳۷۲۴ GWh در سال کاهش یافت. پیشنهاد دوم استفاده از سیستم PV طراحی شده می‌باشد که کل مصرف ۶/۲ درصدی را جبران کرده و مصرف انرژی با این سیستم به صفر می‌رسد.

آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر (IREA)<sup>۳</sup> در سال ۲۰۱۳ در مطالعه‌ای تحت عنوان «روشنایی معابر»، به بررسی میزان مصرف انرژی و تولید گازهای گلخانه‌ای در روش‌های مختلف روشنایی در دو شهر سیدنی و نگپور پرداخته است. نتایج نشان دادند در شهر سیدنی با جایگزینی لامپ‌های LED به جای لامپ‌های پرمصرف قدیمی، کاهش سالانه مبلغ ۸۳۰۰۰۰ دلار در مصرف انرژی (کاهش ۵۱ درصدی در مصرف انرژی روشنایی معابر) و میزان ۲۱۸۵ تن دی‌اکسیدکربن تولیدی مشاهده شده است. این لامپ‌ها مصرف انرژی کمتری داشته و طول عمر طولانی‌تری دارند. به دلایل مختلفی از جمله هزینه بالا در مقایسه با سایر سیستم‌های موجود در این شهر، سیستم PV در این شهر اجرا نشد. طبق آمار سال ۲۰۰۹ در نگپور، ۳۰ درصد از مصرف انرژی مربوط به روشنایی معابر می‌باشد. در مقایسه با سایر شهرهای هند، نگپور تابش خورشیدی فراوانی دریافت می‌کند؛ حدود ۳۰۰ روز خورشیدی در سال. بنابراین با استفاده از سیستم خورشیدی برای روشنایی معابر در سال ۲۰۰۷-۲۰۰۶، کاهش حدوداً ۷۸۲۷ کیلووات ساعت انرژی و تولید ۶/۳۴ تن دی‌اکسیدکربن نتیجه شده است.

دس<sup>۴</sup> و همکارانش (۲۰۱۵) در مطالعه‌ای در خصوص تحلیل هزینه-فایده اقتصادی استفاده از سیستم روشنایی فوتولتائیک نسبت به سیستم‌های روشنایی کلاسیک (سدیمی) با استفاده از نرم‌افزار HOMER به آنالیز داده‌های کشور هند پرداختند. آن‌ها

3- International Renewable Energy Agency

4- Das

1- Wu

2- Ali

حمایت‌های دولتی، این طرح، توجیه اقتصادی دارد. همچنین نتایج این مطالعه با توجه به فروض در نظر گرفته شده در مطالعه، حاکی از آن است که طی صد سال، قیمت برق با لحاظ کردن هزینه‌های آلودگی اجتماعی، به ۳۰۰۰۰ ریال به ازای هر کیلووات ساعت می‌رسد.

قائمی‌اصل و همکاران (۱۳۹۵) در مطالعه‌ای، الگوی ایجاد یک شهر زیست‌محیطی کم‌کربن در بخش شهری شهرستان مشهد مقدس با محوریت تأمین پایدار انرژی الکتریکی را ارائه کرده‌اند. نتایج پژوهش نشان داد که تکنولوژی زیست‌توده با نوسان‌پذیری کمتر و هزینه تولید پایین‌تر، تکنولوژی برتر برای طراحی شهر زیست‌محیطی کم‌کربن می‌باشد.

حاتمی و همکارانش (۱۳۹۳) در مطالعه‌ای، به ارزیابی اقتصادی استفاده از سیستم فتوولتائیک مستقل از شبکه برای روستاهای تهران به جای توسعه شبکه برق سراسری پرداختند. نتایج نشان دادند که استفاده از سیستم فتوولتائیک به جای برق شبکه سراسری برای برق‌رسانی به روستاها، از توجیه و صرفه اقتصادی خوبی برخوردار است. در بدترین حالت، بیشترین هزینه سیستم فتوولتائیک؛ یعنی نرخ تنزیل ۱۸ درصد و تعداد خانوار ۵۰ و تعداد روز ابری ۳ بار در فاصله ۷۶ کیلومتری روستا از شبکه توزیع برقی، استفاده از سیستم فتوولتائیک از توسعه شبکه برق سراسری، اقتصادی‌تر است؛ لذا همیشه برای روستاهای زیر ۵۰ خانوار وقتی که فاصله روستا از شبکه توزیع بیش از ۷۶ کیلومتری باشد، برق فتوولتائیک نسبت به شبکه توزیع سراسری برای دولت، اقتصادی‌تر می‌باشد. مهدوی عادل و همکاران (۱۳۹۳) در مطالعه‌ای، به امکان‌سنجی استفاده از یک سیستم فتوولتائیک به منظور تأمین بار الکتریکی مورد نیاز یک مجتمع مسکونی در شهر مشهد به عنوان موردی از مصارف خانگی با استفاده از آمار و اطلاعات واقعی یک واحد مسکونی تجهیز شده به سیستم فتوولتائیک با نام خانه سبز در مشهد و در سال ۱۳۹۱ پرداخته‌اند. نتایج این

به این نتیجه رسیده‌اند که با استفاده از لامپ‌های LED علاوه بر ارائه روشنایی بهتر در محیط‌های بیرونی، زاویه روشنایی و دقت بالاتر در روشن کردن یک محیط به‌خصوص دارای هزینه کمتر، بهره‌وری انرژی بالاتر و دوام و روشنایی بیشتری هستند و پیش‌بینی شده است که استفاده از تأمین انرژی از طریق سیستم‌های فتوولتائیک در آینده بیش از پیش خواهد بود.

گالویو<sup>۱</sup> و همکارانش (۲۰۱۵) در مطالعه‌ای در خصوص سیستم‌های انرژی مؤثر برای شهرهای هوشمند در اتحادیه اروپا به این نتیجه دست یافتند که با توجه به رشد روزافزون هزینه‌های برق و گاز طبیعی، ضرورت استفاده از سیستم‌های جایگزین در شهرهای هوشمند آینده بیشتر احساس می‌گردد. در این مطالعه نشان داده شده است که روشنایی عمومی با استفاده از تکنولوژی LED، کمک قابل‌توجهی به صرفه‌جویی در انرژی و حفظ و افزایش درخشندگی دارد. نتایج این تحقیق نشان دادند که حتی در بدترین ماه‌های سال برای شارژ باتری‌مستمان می‌توان از فناوری LED برای روشنایی معابر استفاده کرد.

### ب) پژوهش‌های داخلی

مهرابی بشارآبادی و همکارانش (۱۳۹۷) در مطالعه‌ای، به ارزیابی اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم‌های فتوولتائیک در تأمین انرژی برق یک برج تجاری با متوسط مصرف ۳۲۰۰۰ کیلووات ساعت برق در روز در شهر کرمان با استفاده از روش هزینه چرخه عمر پرداخته‌اند. در سناریوی اول این مطالعه، مصرف‌کننده، تمام هزینه‌های مربوط به سیستم را پرداخت می‌کند و در سناریوی دوم، فرض بر این است که ۵۰ درصد از هزینه سرمایه‌گذاری اولیه را دولت پرداخت می‌کند و مابقی آن نیز به صورت وامی با نرخ ۲ درصد با دوره بازپرداخت ده ساله، تأمین می‌شود. نتایج نشان دادند که استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک به منظور تولید برق تحت سناریو اول، توجیه اقتصادی ندارد اما با وجود

1- Galvão

حباب، عدم امکان کم‌سو کردن آن‌ها، سمی بودن جیوه موجود در تیوب و غیره، باعث روی کار آمدن تکنولوژی جدیدی به بازار صنعت روشنایی جهان گردیده است. لامپ‌های LED فتوولتاییک پتانسیل قابل‌توجهی در زمینه بهینه‌سازی مصرف انرژی دارند و معایب بیان‌شده را ندارند (عباسی‌ورده و همکاران، ۱۳۸۷).

LEDها، نیمه‌رساناهای حالت جامد هستند که انرژی الکتریکی را به نورانی تبدیل می‌کنند. هنگامی که عناصر معینی در پیکربندی خاص با یکدیگر ترکیب‌شده و جریان الکتریکی از میان آن‌ها عبور کند، فوتون و گرما تولید می‌شود. قسمت اصلی LED که Chip نامیده می‌شود از دو لایه نیمه‌رسانا تشکیل شده است: لایه نوع n (برای الکترون‌ها) و لایه نوع p (برای حفره‌ها)، به طوری که الکترون‌ها درون حفره‌ها جای می‌گیرند. اتصال واقعی لایه‌ها (که اتصال p-n نامیده می‌شود) در محلی است که الکترون‌ها و حفره‌ها در میانه ناحیه فعال به یکدیگر برخورد می‌کنند. هنگامی که الکترون‌ها و حفره‌ها دوباره با یکدیگر ترکیب می‌شوند، فوتون تولید می‌شود. مشخصات مهم LEDها عبارتند از (رجبی‌مشهدی، ۱۳۸۹):

LEDها در ایجاد نوری که رنگ طبیعی اشیاء را با دقت بسیار زیاد نشان دهد دارای توانایی فوق‌العاده‌ای هستند. همچنین LEDها دارای هیچ فیلامان یا تیوبی برای آسیب دیدن یا شکستن (در صورت افتادن آن‌ها) نیستند.

LEDها به دلیل دارا بودن اندازه کوچک و حتی انتخاب بسته‌بندی، دارای مزایای کنترل نوری فوق‌العاده‌ای هستند. با توجه به پتانسیل بالای صرفه‌جویی در مصرف انرژی، استفاده از LEDهای با زاویه تابش تعریف‌شده، مطلوب و منطقی خواهد بود.

نوع بسته‌بندی LEDها امکان تمرکز و قابلیت هدایت‌گری عالی نور را فراهم می‌کند در حالی که منابع نوری رشته‌ای و فلورسنت به‌منظور جمع‌آوری نور و هدایت آن در وضعیت دلخواه، به رفلکتور خارجی نیاز دارند.

مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از این سیستم‌ها در مجتمع‌های مسکونی سه واحدی، توجیه‌پذیر بوده؛ به طوری که با میزان سرمایه‌گذاری اولیه ۲۰۰ میلیون ریال، نرخ بازدهی داخلی در یک مجتمع مسکونی با متوسط مصرف ۴۰۰ KWH در ماه برای هر واحد، برابر با ۲۲/۸۳ درصد است و دوره بازگشت سرمایه ۱۳ سال و نیز خالص ارزش فعلی به میزان ۹۶/۳۸۰ میلیون ریال می‌باشد.

### ۳- مبانی نظری

مبانی نظری این پژوهش از دو جنبه قابل‌بررسی است: ۱- چارچوب مدیریت انرژی موردنیاز معابر شهری با تکنولوژی LEDهای فتوولتاییک ۲- مبانی نظری مدیریت پایدار شهری.

#### چارچوب مدیریت انرژی موردنیاز معابر شهری با تکنولوژی LED

در بخش روشنایی معابر، هدف تأمین روشنایی مناسب، کاهش تلفات و همچنین کاهش پیک بار و اصلاح منحنی مصرف شبکه است. استفاده از چراغ‌های مناسب و استفاده از لامپ‌های با مصرف کمتر و راندمان بیشتر و جلوگیری از تلفات انتقال با تولید غیرمتمرکز انرژی الکتریکی، از اهداف این بخش است. فعالیت‌های اجرایی (از قبیل اصلاح معایب سیستم روشنایی معابر، رفع عیب فتوسل‌ها و لامپ‌ها، شبکه تغذیه، محل نصب فتوسل و ...)، تحقق فناوری‌های دارای پتانسیل بالای صرفه‌جویی، اجرای سیستم روشنایی معابر استاندارد در معابر جدیدالتأسیس، اجرای چند نمونه اتوماسیون روشنایی معابر برای ارزیابی عملکرد آن، از راهکارهای اجرایی این اهداف است (معاونت هماهنگی توزیع شرکت توانیر، ۱۳۹۰).

در مقابل محدودیت منابع انرژی و رشد نیازهای بشر، توجه وی را به یافتن راه‌کارهای جدید در زمینه صرفه‌جویی در مصرف انرژی، معطوف داشته است. علی‌رغم وجود بعضی مزایا در منابع روشنایی کنونی، معایبی نظیر: تولید اشعه ماوراءبنفش مضر، بزرگ بودن

حرکت کردند (رازدان، ۱۳۸۵). همچنین با توجه به مصرف زیاد و فزاینده سوخت‌های فسیلی همچون زغال‌سنگ، نفت، گاز و مانند این‌ها در طی دو سده گذشته و محدود بودن منابع این نوع سوخت‌ها، لذا توجه به جایگزینی انرژی‌های تجدیدپذیر امری اجتناب‌ناپذیر است (فطرس و همکاران، ۱۳۹۱). بر این اساس جدیدترین جذب سرمایه‌گذاری‌ها از انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی، ۲۸ درصد، سوخت‌های زیستی، ۱۴ درصد، زیست‌توده و فناوری زباله، ۷ درصد منابع مالی را به خود اختصاص داده‌اند (زینل‌زاده و همکاران، ۱۳۹۱). بالا بودن هزینه در استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر نسبت به سایر انرژی‌ها، موجب می‌شود که استفاده از این گونه انرژی‌ها در صنایع نیاز به سیاست‌گذاری‌های مشخص و برنامه‌ریزی‌های بلندمدت داشته باشد (رازدان، ۱۳۸۵).

از سوی دیگر، در اکثر کشورهای پیشرفته در زمینه صنعت برق، تحول عظیمی در سیستم‌های تولید و انتقال انرژی به وجود آمده است که تمام نیازها و مزایای پایه تولید و انتقال در موارد فنی، آکادمیک و بازرگانی را برآورده می‌کند. این سیستم نوین تولید صنعت انرژی را تولید پراکنده انرژی می‌گویند. این روش اعتبار و اطمینان تهیه برق را نیز بسیار بهبود بخشیده و سبب شده است که سرمایه‌گذاری قابل‌توجهی در راستای به‌کارگیری واحدهای تولید پراکنده صورت پذیرد. افزایش تولید پراکنده، نیازمند تغییر در فناوری موردنیاز برای مدیریت انتقال و توزیع الکتریسیته است. در این صورت، نیاز فزاینده‌ای به اپراتورهای شبکه برای مدیریت شبکه‌ها به‌صورت فعال به‌جای غیرفعال وجود خواهد داشت. با افزایش مدیریت فعال، مزایای اضافی برای مصرف‌کننده‌ها به وجود خواهد آمد که این مزایا به‌صورت معرفی با حق انتخاب‌های بیشتری به نسبت خدمات تغذیه انرژی و رقابت بیشتر خواهد بود؛ اما به هر حال، رفتن به سوی مدیریتی فعال‌تر، می‌تواند مشکل باشد. شاخص‌های اصلی موردنظر در تصمیم‌گیری و به‌کارگیری تولید پراکنده عبارتند از:

سازندگان LED ادعا می‌کنند که LEDها دارای طول عمر بیش از ۵۰ هزار ساعت هستند. با توجه به این که LEDها هیچ فیلامانی ندارند، نور خروجی یک LED در طول زمان کاهش می‌یابد. این اثر که منجر به کاهش شار نوری LED می‌گردد بدون این که قابل توجه باشد در طول هزاران سال اتفاق می‌افتد. در واقع سوختن کامل یک LED (نظیر سایر وسایل روشنایی دیگر) بی‌معناست. بنابراین طول عمر لامپ به‌صورت مدت‌زمان لازم برای رسیدن شار نوری LED به درصد معینی از شار نوری اولیه آن که معمولاً ۷۰ درصد است تعریف می‌گردد.

LEDها به دلیل تولید گرمای ناچیز به‌عنوان منابع نوری سرد مطرح هستند و هنگام استفاده از دایمر، هیچ‌گونه تغییری در رنگ نور LED حاصل نمی‌شود، برخلاف لامپ‌های رشته‌ای که به رنگ زرد گرایش می‌یابد.

LEDها برای به‌کارگیری در محل‌هایی که نیاز به دفعات روشن و خاموشی دارد وسایل ایده‌آلی محسوب می‌شوند، درحالی که تعداد دفعات زیاد روشن-خاموش شدن، تأثیر زیادی در سوختن زودهنگام لامپ‌های فلورسنت دارد. در خصوص لامپ‌های HID نیز مدت‌زمانی طول می‌کشد تا لامپ روشن گردد.

LEDها به‌سرعت به حداکثر شار نوری خود می‌رسند، برخلاف لامپ‌های فلورسنت فشرده به جیوه نیاز ندارند و منجر به کاهش انتشار CO<sub>2</sub> - که تأثیر بسزایی در تولید گازهای گلخانه‌ای دارد- می‌شوند. همچنین برخلاف لامپ‌های رشته‌ای و فلورسنت، اعمال شوک‌های خارجی باعث آسیب رساندن به LED نمی‌شود.

#### مدیریت پایدار شهری

پس از بحران انرژی در دهه ۱۹۷۰، کشورهای ایالات‌متحده آمریکا، آلمان، دانمارک و ژاپن که از عمده‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی فسیلی در جهان به‌حساب می‌آیند، به‌منظور کاهش وابستگی به انرژی‌های فسیلی و در نتیجه نگرانی‌های ناشی از تغییرات قیمتی آن، به سمت توسعه فناوری انرژی‌های تجدیدپذیر



شهر فشرده و شهر بدون اتومبیل، از آثار عملی این دیدگاه شناخته می‌شوند (حسینی و همکاران، ۱۳۸۸). در راستای اولین و سومین مؤلفه توسعه پایدار شهری برای حفظ محیط‌زیست به ویژه محیط‌زیست شهری و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر (انرژی فتوولتائیک)، در این پژوهش الگوی کاربردی- عملیاتی مرتبط با برنامه‌ریزی پایدار انرژی بخش شهری مشهد، طراحی و شبیه‌سازی شده است.

#### ۴- روش تحقیق

با توجه به ماهیت نوسانی برق تجدیدپذیر باید برنامه‌ریزی تحت شبکه با در نظر گرفتن ماهیت نوسانی تولید برق تجدیدپذیر فتوولتائیک و توزیع لحظه‌ای-ساعتی، تولید و مصرف برق انجام شود تا در صورت لزوم ظرفیت پشتیبان فسیلی بتواند نیاز شبکه را تأمین کند. در این پژوهش برای شبیه‌سازی سیستم تولید هیبرید فسیلی-خورشیدی، از روش برنامه‌ریزی آنالیزی با رویکرد توأم توصیفی-تجویزی استفاده شده است. برنامه‌ریزی آنالیزی، یکی از روش‌های نوین بهینه‌یابی عددی است که مبانی آن اولین بار توسط زلینکا<sup>۱</sup> (۲۰۰۱) و ۲۰۰۲ a و b) ارائه شد. اتکای اصلی برنامه‌ریزی آنالیزی این پژوهش بر رویکرد داده-ستاده در مدل‌سازی پایین-بالای سیستم تولید هیبرید قرار دارد که ماژول‌های شبیه‌سازی سیستم‌های هیبرید انرژی براساس مدل‌های پیشرفته EnergyPLAN<sup>۲</sup> نسخه ۱۱/۴ طراحی شده‌اند<sup>۳</sup>. به‌علاوه از آنجایی که امکان ایجاد یک تبادل منبع باز در مدل‌های رایج وجود دارد، ارتباط و تبادل نرم‌افزاری و خروجی‌های مدل‌های فوق با استفاده از بستر نرم‌افزاری

۱- بهره‌برداری از ظرفیت‌های موجود  
 ۲- امکان طراحی و در صورت امکان، ساخت در داخل کشور  
 ۳- استفاده از انرژی اولیه مناسب‌تر با آلودگی کمتر (مثل انرژی‌های تجدیدپذیر)  
 ۴- دارا بودن صرفه اقتصادی نسبت به سایر منابع. هر دو جنبه توجه ویژه به انرژی‌های تجدیدپذیر و تولید پراکنده انرژی الکتریکی، در زیرمجموعه مفهوم توسعه پایدار و شهر پایدار، قابل بررسی و اجرا هستند (قائمی‌اصل و همکاران، ۱۳۹۵).

توسعه پایدار و توسعه پایدار شهری، طی دهه‌های اخیر، به تدریج به پارادایم نوین و مسلطی در ادبیات نظری و علمی رایج در مورد توسعه و برنامه‌ریزی شهری، تبدیل شده است. این الگوواره، ناظر به برداشتها و تفسیرهای گوناگون است اما در مجموع، بر پایداری و استمرار توسعه برای همگان و نسل‌های آینده طی زمان و بر همه‌جانبه‌نگری ابعاد پیچیده اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی فرایند توسعه در سطح یک کشور یا شهر، تأکید دارد. کمیسیون برانت‌لند در سال ۱۹۸۷، مفهوم توسعه پایدار را چنین تشریح کرده است: توسعه پایدار، توسعه‌ای است که بتواند نیازهای نسل حاضر را بدون آسیب رساندن به برآورده ساختن نیازهای نسل‌های آینده و سازگار با منافع آنها برآورده سازد (نوابخش و ثابتی، ۱۳۹۴). توسعه پایدار شهری در دهه‌های اخیر در دستورکار بسیاری از جنبش‌های شهرسازی نظیر دستورکار ۲۱ سازمان ملل، (کنفرانس ریو درباره توسعه پایدار، گزارش توسعه انسانی ۲۰۰۳ سازمان ملل و منشور شهرگرایی نوین در جوامع صنعتی و درحال توسعه قرار گرفته است. توسعه پایدار شهری برای حفظ محیط‌زیست شهری در مقیاس کلان، مؤلفه‌هایی از قبیل: کاهش آلودگی‌ها، حفظ منابع طبیعی، کاربرد انرژی‌های جایگزین و طبیعی، بازیافت زباله و افزایش دسترسی‌های شهری را دنبال می‌کند. الگوهای نوین طراحی شهری؛ همچون شهر اکولوژیک،

1- Zelinka

۲- نسخه جدید از مدل EnergyPLAN در تاریخ ۲۴ می سال ۲۰۱۴ منتشر و در دسترس کاربران قرار گرفته است.

۳- مدل‌های پیشرفته EnergyPLAN و energyPRO با همکاری گروه تحقیقاتی برنامه‌ریزی انرژی پایدار دانشگاه آلبورگ و گروه PlanEnergi دانشگاه بیرمنگام و مدل WASP نیز توسط آژانس بین‌المللی انرژی اتمی طراحی شده‌اند.

OSEMOSYS<sup>۱</sup> انجام شده است و شبیه‌سازی داده‌های ساعتی با فراوانی ۸۷۸۴ ساعت در سال (مثل تقاضا، قیمت یا تولیدات تفکیکی نیروگاهی)، در این نرم‌افزار انجام شده است. داده‌های توان، تولید، تقاضا و هزینه نیروگاه‌های محدوده شهرستان مشهد براساس اطلاعات و آمار سال پایه ۱۳۹۱ در سیستم شبیه‌سازی وارد شده‌اند. براساس آمار تفصیلی صنعت برق ایران (۱۳۹۱)، انرژی الکتریکی مصرفی بخش شهری شهرستان مشهد<sup>۲</sup> در سال ۱۳۹۱، بالغ بر ۴۸۸۸ گیگاوات ساعت است. محاسبه قیمت تمام‌شده تولید - که براساس مجموع هزینه نهایی تولید در لحظه  $t$  محاسبه می‌شود - از روش هزینه‌های هم‌تراز سازی شده تولید استفاده شده است. اقلام هزینه‌ای تولید شامل؛ هزینه‌های عملیاتی (متغیر و ثابت) و هزینه‌های سرمایه‌گذاری می‌باشند. مراجع کسب اطلاعات لازم برای شبیه‌سازی سیستم، دفتر بودجه معاونت برنامه‌ریزی و تحقیقات شرکت برق منطقه‌ای خراسان، دفتر بازار برق، دفتر فنی نظارت بر تولید معاونت بهره‌برداری شرکت برق منطقه‌ای خراسان، دفتر اطلاعات و آمار شرکت برق منطقه‌ای خراسان و شرکت مدیریت تولید نیروی برق خراسان (نیروگاه‌ها) هستند.

در این پژوهش برای برنامه‌ریزی آنالیزی سیستم تولید برق - که براساس الگوی لوند<sup>۳</sup> (۲۰۱۴) طراحی شده است - ابتدا تقاضای لحظه‌ای - ساعتی برق که دفتر بازار برق و دفتر اطلاعات و آمار شرکت برق منطقه‌ای خراسان، به‌طور دقیق محاسبه کرده است به‌صورت مفروض و داده شده به سیستم تولید برخورد از نیروگاه‌های در محدوده شهرستان مشهد، معرفی می‌شود.

پس از اینکه شرایط داده شده تقاضا و محدودیت‌های حداقل و حداکثر تولید در نیروگاه‌های فسیلی تعیین شد، براساس الگوی برنامه‌ریزی آنالیز لوند (۲۰۱۴)، نیروگاه‌های در دسترس، براساس اولویت

کمترین هزینه نهایی کوتاه‌مدت برای پوشش تقاضای لحظه‌ای - ساعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند ولی قیمت در هر لحظه - ساعت براساس هزینه نهایی بلندمدت نیروگاهی که برای پوشش تقاضای هر لحظه - ساعت مورد استفاده قرار می‌گیرد، تعیین خواهد شد.

در رهیافت برنامه‌ریزی آنالیزی، با فرض اینکه تقاضای لحظه‌ای - ساعتی در هر بازه زمانی، معین یا قابل پیش‌بینی باشد، ماژول محاسبه قیمت سیستم تولید، از الگوی قیمت لحظه‌ای - ساعتی پیروی می‌کند و بر این اساس، قیمت در هر بازه زمانی براساس اجزای زیر تعیین می‌شود:

هزینه سوخت تولیدکننده ژام برای تولید  $g_j(t)$  در ساعت  $t$   $(G_{j,F}[g_j(t)])$ .

هزینه بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری تولیدکننده ژام در سطح تولید  $g_j(t)$  در ساعت  $t$   $(G_{j,M}[g_j(t)])$ .

هزینه‌های سرمایه‌گذاری و توسعه ظرفیت تولیدکننده ژام در سطح تولید  $g_j(t)$  در ساعت  $t$   $(G_{j,I}[g_j(t)])$ .

در برخی از مدل‌ها هزینه‌های سرمایه‌گذاری و توسعه ظرفیت در مدل نادیده گرفته می‌شود که در الگوی برنامه‌ریزی آنالیزی لوند (۲۰۱۴) برای شبیه‌سازی سیستم تولید، این نوع هزینه‌ها نیز در محاسبه قیمت متوسط سیستم تولید مدنظر قرار می‌گیرد. با توجه به اجزای هزینه‌ای سیستم تولید، مجموع هزینه سوخت، بهره‌برداری، تعمیر، نگهداری و هزینه سرمایه‌گذاری و توسعه ظرفیت برای تولیدکننده ژام در ساعت  $t$  به‌صورت رابطه ۱ خواهد بود:

$$G_{j,FMI}[g_j(t)] = G_{j,F}[g_j(t)] + G_{j,M}[g_j(t)] + G_{j,I}[g_j(t)] \quad (1)$$

مجموع کل هزینه سوخت، کل هزینه بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری و کل هزینه سرمایه‌گذاری و توسعه ظرفیت در ساعت  $t$  برای تولید  $g(t)$  به‌صورت رابطه ۲ خواهد بود که نشان‌دهنده هزینه کل (TC) تولید است.

۱- The Open Source Energy Modeling System

۲- مصرف بخش روستایی و آزاد تفکیک شده‌اند.

3- Lund



$$P(t) = \frac{\partial G_F[g(t)]}{\partial g(t)} + \frac{\partial G_M[g(t)]}{\partial g(t)} + \frac{\partial G_I[g(t)]}{\partial g(t)} \quad (7)$$

مجموع این سه عبارت در اصطلاح، لامبدای سیستم<sup>۱</sup> نامیده می‌شود.

$$\lambda(t) = \frac{\partial G_{FMI}[g(t)]}{\partial g(t)} = \gamma_F(t) + \gamma_M(t) + \gamma_I(t) \quad (8)$$

ارقام مربوط به میزان انتشار آلاینده و مالیات بر انتشار از آژانس انرژی دانمارک<sup>۲</sup> (۲۰۱۲) استخراج شده و بر این اساس، مالیات انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی، ۴۹۳۰۲۷/۲ ریال در هر تن محاسبه شده است. در این پژوهش برای شاخص تغییرات انتشار آلاینده زیست‌محیطی، از آلاینده دی‌اکسید کربن (CO<sub>2</sub>) استفاده شده است. در مورد هزینه تولید برق تجدیدپذیر خورشیدی نیز از اطلاعات دفتر بودجه معاونت برنامه‌ریزی و تحقیقات شرکت برق منطقه‌ای خراسان استفاده شده است که براساس جداول آماری این دفتر، هزینه سرمایه‌گذاری LEDهای فتوولتائیک (با در نظر گرفتن هزینه باتری و تجهیزات تبدیل) در هر کیلووات توان، ۱۰۴/۵ میلیون ریال و هزینه ثابت و متغیر عملیات و نگهداشت برق خورشیدی در هر مگاوات ساعت، ۶۳۶ ریال محاسبه شده است. لازم به ذکر است که این آمار براساس تجهیزات قابل دسترسی برای شرکت برق منطقه‌ای خراسان و متناسب با شرایط اقلیمی-تجاری شرکت برق منطقه‌ای خراسان محاسبه شده است و آمار بین‌المللی یا ملی (در سایر مناطق کشور) می‌تواند تفاوت‌هایی با این آمار داشته باشد. کنتورهای روشنایی معابر شهرستان مشهد شامل ۳۷۳۷ مشترک می‌باشند که هر یک از خطوط روشنایی معابر زیرمجموعه یکی از این کنتورها قرار می‌گیرد. در شهرستان مشهد از سه ظرفیت مختلف برای روشنایی معابر، استفاده می‌شود: ۱۴۰ وات، ۲۶۵ وات و ۴۱۵ وات<sup>۳</sup>. در مجموع میزان انرژی مصرفی در بخش روشنایی معابر شهری مشهد در

$$G_{FMI}[g(t)] = \sum_j G_{j,F}[g_j(t)] + \sum_j G_{j,M}[g_j(t)] + \sum_j G_{j,I}[g_j(t)]$$

$$G_{FMI}[g_j(t)] = G_F[g(t)] + G_M[g(t)] + G_I[g(t)] \quad (9)$$

بنابراین قیمت لحظه‌ای- ساعتی برای مصرف‌کننده kام در چنین سیستم تولیدی برابر خواهد بود با:

$$P_k(t) = \frac{\partial(TC)}{\partial d_k(T)}$$

(۳)

با توجه به اینکه در برنامه‌ریزی آنالیزی این پژوهش، تقاضا به صورت تجمعی و با توزیع لحظه‌ای-ساعتی تمامی مشترکین شبکه در هر ساعت در مدل وارد می‌شود، هزینه کل سیستم تولید به صورت رابطه ۴ خواهد بود:

$$P(t) = \frac{\partial(TC)}{\partial d(T)} \quad (4)$$

اکنون با در نظر گرفتن بازه‌های زمانی یکسان و یک‌ساعته، می‌توان رابطه ۴ را به صورت رابطه ۵ بازنویسی کرد:

$$P(t) = \frac{\partial G_{FMI}[g(t)]}{\partial d(t)} \quad (5)$$

محدودیتی که مدل را تحت تأثیر قرار می‌دهد، تعادل عرضه و تقاضاست که براساس آن کل انرژی عرضه‌شده در ساعت t باید با کل مقدار تقاضا در ساعت t برابر باشد. در صورتی که میزان تقاضا به‌طور ناگهانی از میزان پیش‌بینی‌شده کمتر شود، زمینه لازم برای ذخیره‌سازی مازاد عرضه انرژی الکتریکی موجود در سیستم تولید فراهم خواهد شد.

قیمت لحظه‌ای- ساعتی سیستم تولید در ساعت t با مجموع جزء سوخت قیمت  $(\gamma_F(t))$ ، جزء بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری  $(\gamma_M(t))$  و جزء سرمایه‌گذاری و توسعه ظرفیت  $(\gamma_I(t))$  قابل محاسبه خواهد بود:

$$P(t) = \gamma_F(t) + \gamma_M(t) + \gamma_I(t) \quad (6)$$

با توجه به تعریف اجزای قیمت لحظه‌ای- ساعتی سیستم تولید، می‌توان رابطه ۶ را به صورت رابطه ۷ بازنویسی کرد:

1- System Lambda

2- Danish Energy Agency

۳- در یک توزیع متداول در سطح شهرستان مشهد، در هر ۶۰ هزار لامپ، ۳۸۰۰۰ لامپ ۱۴۰ وات، ۱۶۰۰۰ لامپ ۲۶۵ وات و ۶۰۰۰ لامپ ۴۱۵ وات در سطح شهر توزیع شده است.

## ۵- یافته‌های تحقیق

براساس شبیه‌سازی سیستم تولید مبتنی بر برنامه‌ریزی آنالیزی، نتایج شبیه‌سازی سیستم تولید هیبرید فسیلی - خورشیدی محاسبه و در جدول ۱ گزارش شده است.

سال ۱۳۹۱، معادل ۱۴۶ گیگاوات ساعت بوده است که همین رقم، نشان‌دهنده میزان هدف‌گذاری تأمین انرژی با تکنولوژی LEDهای فتولتاییک و به‌کارگیری آن‌ها به‌جای لامپ‌های سدیمی و هالوژن است.

جدول ۱- نتایج شبیه‌سازی سیستم تولید پایه و سیستم تولید هیبرید فسیلی - تجدیدپذیر

تعدیل ۵۵۰ کیلوواتی فتولتاییک	تعدیل ۴۴۰ کیلوواتی فتولتاییک	تعدیل ۳۳۰ کیلوواتی فتولتاییک	تعدیل ۲۲۰ کیلوواتی فتولتاییک	تعدیل ۱۱۰ کیلوواتی فتولتاییک <sup>۲</sup>	مدل پایه <sup>۱</sup> (شرایط اولیه سیستم تولید)	سناریو شاخص
۱۹۲۱/۵۷۵	۱۹۲۱/۳۱۶	۱۹۲۰/۰۵۷	۱۹۲۰/۷۹۸	۱۹۲۰/۵۳۹	۱۹۲۰/۲۸۰	متوسط قیمت (ریال بر کیلووات ساعت)
۳۲۹۵۳۵۰	۳۲۹۵۴۸۷	۳۲۹۵۶۲۴	۳۲۹۵۷۶۲	۳۲۹۵۸۹۹	۳۲۹۶۰۰۱	انتشار آلاینده زیست‌محیطی (تن)
۰/۹۶	۰/۷۷	۰/۵۸	۰/۳۹	۰/۱۹	۰/۰۰	تولید بهینه برق فتولتاییک (گیگاوات ساعت)
۴۸۸۷/۶۵۰	۴۸۸۷/۸۴۰	۴۸۸۸/۰۳۰	۴۸۸۸/۲۳۰	۴۸۸۸/۴۲۰	۴۸۸۸/۶۱	تولید بهینه برق فسیلی (گیگاوات ساعت)

همین دلیل شبیه‌سازی ظرفیت‌های ۲۰ تا ۸۰ مگاواتی، محاسبه و در جدول ۲ ارائه شده است. به دلیل اینکه در ظرفیت ۸۰ مگاواتی، انرژی تولیدی با رقم موردنیاز هدف‌گذار تا حدود زیادی به یکدیگر نزدیک شده‌اند، تمام ظرفیت‌های ۸۰ تا ۸۵ مگاواتی فتولتاییک نیز با تغییر دامنه ۰/۵ مگاواتی محاسبه شده‌اند که در این میان ظرفیت ۸۳/۵ مگاواتی، نزدیک‌ترین رقم ممکن به هدف‌گذاری ۱۴۶ گیگاوات ساعتی را به خود اختصاص داده است. از این رو در ستون انتهایی جدول ۲ ارقام مربوط به ظرفیت ۸۳/۵ مگاواتی نیز گزارش شده است.

نتایج ارائه شده در جدول ۱، نشان می‌دهد که در ظرفیت‌های این‌چنینی به‌هیچ‌وجه نمی‌توان میزان انرژی موردنیاز برای روشنایی معابر شهری را فراهم کرد و لازم است که ظرفیت تولید به ارقام بالاتری افزایش یابد. تعدیل‌های مختلف و روند افزایشی ظرفیت‌های فتولتاییک ورودی به سیستم تولید، با این هدف انجام می‌شوند که نقطه آغاز تبدیل شده ماهیت نوسانی برق تجدیدپذیر خورشیدی به ماهیت پایدار و مطمئن مشخص گردد و انرژی خورشیدی به‌طور عملیاتی و سیستمی در شبکه برق شهرستان مشهد وارد شود. به

۱ - در مدل پایه صرفاً ظرفیت فسیلی نیروگاه‌های تأمین‌کننده برق شهرستان مشهد و ظرفیت ۱۱۰ کیلوواتی نیروگاه خورشیدی به‌صورت خارج از شبکه مورد استفاده قرار گرفته است (نیروگاه خورشیدی الهیه که در سال ۱۳۹۱ با ظرفیت ۴۳/۲ کیلوواتی در محل دفتر مرکزی شرکت برق منطقه‌ای خراسان آغاز به کار کرده است و در سال ۱۳۹۳ فرایند تأسیس و راه‌اندازی آن با ظرفیت ۱۱۰ کیلووات به‌طور کامل به پایان رسید).

۲- در مدل پایه صرفاً ظرفیت فسیلی نیروگاه‌های تأمین‌کننده برق شهرستان مشهد وارد شبکه شده است و ظرفیت ۱۱۰ کیلوواتی نیروگاه خورشیدی الهیه وارد شبکه شده است.

## جدول ۲- نتایج شبیه‌سازی سیستم تولید پایه و سیستم تولید هیبرید فسیلی-تجدیدپذیر

### جدول ۲- نتایج شبیه‌سازی سیستم تولید پایه و تولید هیبرید فسیلی-تجدیدپذیر

سنا ربو شاخص	تعدیل ۲۰ مگاواتی فتوولتاییک	تعدیل ۴۰ مگاواتی فتوولتاییک	تعدیل ۶۰ مگاواتی فتوولتاییک	تعدیل ۸۰ مگاواتی فتوولتاییک	تعدیل ۸۳/۵ مگاواتی فتوولتاییک
متوسط قیمت (ریال بر کیلووات ساعت)	۱۹۶۳/۳۵۲	۲۰۱۴/۴۵۳	۲۰۵۷/۳۳۲	۲۱۰۸/۶۲۵	۲۱۱۲/۵۴۵
انتشار آلاینده زیست‌محیطی (تن)	۳۲۷۱۰۶۴	۳۲۴۶۰۹۲	۳۲۲۱۱۱۹	۳۱۹۶۱۴۷	۳۱۹۱۷۷۷
تولید بهینه برق فتوولتاییک (گیگاوات ساعت)	۳۵/۰۴	۷۰/۰۷	۱۰۵/۱۱	۱۴۰/۱۵	۱۴۶/۲۸
تولید بهینه برق فسیلی (گیگاوات ساعت)	۴۸۵۳/۵۸۰	۴۸۱۸/۵۴۰	۴۷۸۳/۵۰۰	۴۷۴۸/۴۷	۴۷۴۲/۳۴۰

نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که با ظرفیت ۸۳/۵ مگاواتی، امکان پوشش تقاضای روشنایی معابر با استفاده از برق فتوولتاییک به طور کامل وجود خواهد داشت و سیستم پایدار مدیریت انرژی شهر در بخش معابر شهری، در این نقطه به طور کامل فراهم خواهد شد.

### ۶- نتیجه‌گیری و پیشنهاد

در مجموع، در سطح شهرستان مشهد از ۴۱۵۵۲۸ چراغ برای روشنایی معابر استفاده شده است. با در نظر گرفتن ظرفیت ۲۰۰ وات برای هر یک از LEDهای فتوولتاییک و نصب یک LED فتوولتاییک به جای چراغ‌های سدیمی و هالوژنی، تمامی توان مورد نیاز برای تأمین برق روشنایی معابر شهری با تکنولوژی خورشیدی فتوولتاییک تأمین می‌شود که براساس مطالعه شرکت برق منطقه‌ای خراسان (۱۳۹۱ الف)، هر سلول خورشیدی ۲۰۰ وات، معادل کاشت ۱۴ درخت ۱۰ ساله به محیط‌زیست کمک می‌کند. این در حالی است که ضریب بهره‌برداری از LEDهای فتوولتاییک، ۲۰ درصد در نظر گرفته شده است و هزینه هر یک از LED فتوولتاییک در کنار باتری و تجهیزات موردنیاز تبدیل، در نظر گرفته شده است و امکان ذخیره‌سازی در ساعات بر خوردار از تابش بالا و مصرف اندک وجود دارد؛ به‌علاوه از آن جایی که این شبیه‌سازی به صورت تحت شبکه

انجام شده است، ظرفیت پشتیبان فسیلی کافی برای تأمین نیاز لازم در مواقع ضروری وجود دارد؛ به نحوی که چنانچه ضریب بهره‌برداری از تکنولوژی LEDهای فتوولتاییک، صفر نیز در نظر گرفته شود، با در نظر گرفتن حداکثر تقاضای برق شهرستان مشهد که رقمی معادل ۴۸۸۸،۶۱ گیگاوات ساعت (در سال پایه مطالعه) است، باز هم نیروگاه‌های فسیلی پوشش‌دهنده برق این شهرستان به راحتی قابلیت پشتیبانی از سیستم تولید انرژی پاک و پوشش تقاضای کل شبکه را دارند. این در حالی است که تنها در شرایط Black-Out سیستم تولید فتوولتاییک، لزوم به‌کارگیری انرژی فسیلی برای پشتیبانی وجود دارد و اساساً مدیریت انرژی معابر شهری به صورت تجدیدپذیر و پایدار انجام خواهد شد.

همچنین تولید غیرمتمرکز برق تجدیدپذیر در بخش روشنایی معابر شهری، باعث جلوگیری از تلفات انتقال ناشی از فاصله زیاد میان محل تولید و مصرف می‌شود و با ایجاد قابلیت جانشین‌پذیری میان تولید فسیلی و تجدیدپذیر، انتشار آلاینده زیست‌محیطی نیز به میزان ۱۰۴ هزار تن کاهش می‌یابد.

همچنین می‌توان افزایش هزینه تمام‌شده سیستم تولید را به صورت سرانه از مشترکین برق شهری که

۱- نیروگاه‌های فردوسی، توس، مشهد و شریعتی در سال ۱۳۹۱، تولیدی معادل ۱۰۰۳۴ گیگاوات ساعت داشته‌اند که رقم ۱۴۶ گیگاوات ساعتی کل برق موردنیاز برای معابر شهری را به‌راحتی پوشش می‌دهد.

تجدیدپذیر بر سرانه رشد اقتصادی واقعی ایران، پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران، ۵(۱۹)، ۵۳-۷۷.

حاتمی، مهدی؛ ناظمی، علی؛ دولت‌آبادی، اعظم؛ مصطفی‌پور، مصطفی. (۱۳۹۳). ارزیابی اقتصادی استفاده از سیستم فتوولتائیک مستقل از شبکه در روستاها با شبیه‌سازی مونت کارلو (مطالعه موردی: تهران). نشریه راهبردهای توسعه روستایی، ۱(۲)، ۱۹-۳۳.

حسینی، سیدباقر؛ رضازاده، راضیه؛ باقری، محمد؛ عظمتی، حمیدرضا؛ قنبران، عبدالحمید. (۱۳۸۸). پایداری زیست‌محیطی در فضاهای باز شهری: ارزیابی کیفی محلات مسکونی در تبریز. فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، ۴(۱۱)، ۱۸۴-۱۷۳.

خلاصه تحولات اقتصادی کشور. (۱۳۹۱). بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران، تهران.

رازدان، مهسا. (۱۳۸۵). سیاست‌های بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر غیربرق-آبی در کشورهای منتخب و جایگاه ایران. نشریه مطالعات انرژی، شماره ۱۰، ۶۸-۱۱۵.

رجبی‌مشهدی، حبیب. (۱۳۸۹). بررسی اثربخشی فعالیت‌های مدیریت مصرف در سکتورهای مختلف پس از واقعی شدن قیمت‌های برق. گزارش پروژه اینترنشیپ، شرکت برق منطقه‌ای خراسان، مشهد.

رستمی، ثریا؛ حق‌پرست کاشانی، آرش؛ لاری، حمیدرضا (۱۳۹۲). مطالعه و برآورد قیمت برق تولیدی از نیروگاه‌های بادی، خورشیدی و بیوگاز. نخستین کنفرانس ملی انجمن انرژی ایران، تهران.

زینل‌زاده، رضا؛ صادقی، زین‌العابدین؛ دهقان‌پور، محمدرضا؛ قائدی، مهدی. (۱۳۹۱). ارزیابی اقتصادی زیست‌محیطی سیستم‌های فتوولتائیک: مطالعه موردی منطقه جنوب شرق ایران. نشریه مطالعات اقتصاد انرژی، ۹(۳۳)، ۱۴۹-۱۱۵.

سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا) (۱۳۸۶). گزارش پتانسیل منابع زیست‌توده در ایران، وزارت نیرو، معاونت امور انرژی.

سعیدخانی، محمد؛ فلاحی، اسماعیل، بانسی، مهدی. (۱۳۹۵). ارائه مدل مدیریت تأمین انرژی در ایران براساس معیارهای فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی. پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران، ۵(۱۸)، ۲۹-۶۰.

بهره‌برداران اصلی روشنایی معابر به شمار می‌روند، اخذ نمود که در این صورت، افزایش هزینه برق مشترکین شهری، رقمی ناچیز خواهد بود؛ زیرا براساس آمار تفصیلی صنعت برق ایران (۱۳۹۱)، شرکت توزیع شهرستان مشهد در بخش شهری از ۱۱۳۱۰۷۱ مشترک برخوردار است که این تعداد مشترک در سال پایه مطالعه، مصرفی معادل ۴۸۸۸۶۱۱ مگاوات ساعت را به خود اختصاص داده‌اند که به‌طور متوسط هر مشترک در سال، ۴/۳ مگاوات ساعت برق مصرف می‌کند. به عبارت دیگر، مصرف برق هر مشترک شهری شهرستان مشهد در سال پایه مطالعه، ماهیانه ۳۶۰/۱۷ کیلووات ساعت بوده است که با در نظر گرفتن افزایش قیمت ۱۹۰ ریالی قیمت تمام‌شده تولید در تعدیل ۸۳/۵ مگاواتی فتوولتائیک، منجر به افزایش ۶۸۴۳۳ ریالی هزینه ماهیانه برق مشترکین شهری می‌شود. در واقع این رقم نشان‌دهنده عوارض بهینه شهرداری برای رسیدن به نقطه مدیریت پایدار انرژی معابر شهری در شهرستان مشهد است. یارانه سازمان‌های دولتی و بین‌المللی مختلف نیز در چنین شرایطی در اختیار مدیریت پایدار انرژی شهری قرار می‌گیرد و می‌توان این میزان عوارض را نیز براساس میزان همکاری و کمک سایر سازمان‌ها، به ارقام بسیار کمتری کاهش داد.

#### ۷- منابع

اصغری‌زاده، عزت‌الله؛ مهرگان، محمدرضا؛ شکوری، حامد؛ مدرس‌یزدی، محمد؛ تقی‌زاده یزدی، محمدرضا. (۱۳۹۶). ارائه مدل ریاضی برای توسعه ظرفیت نیروگاه‌ها با در نظر گرفتن واحدهای تولید پراکنده و با هدف کنترل دی‌اکسیدکربن. فصلنامه مدیریت صنعتی، ۴(۹)، ۵۸۷-۶۰۸.

آمار تفصیلی صنعت برق ایران. (۱۳۹۱). توزیع نیروی برق، وزارت نیرو، شرکت مادر تخصصی توانیر، تهران.

تهامی‌پور، مرتضی؛ عابدی، سمانه؛ بابا احمدی، رضا کریمی؛ ابراهیمی‌زاده، مرتضی. (۱۳۹۵). بررسی تأثیر انرژی‌های

خانگی (مطالعه موردی مجتمع سه واحدی در شهرستان مشهد. نشریه سیاست‌گذاری اقتصادی، ۱۱)، ۱۴۷-۱۲۳.

مهرابی بشرآبادی، حسین؛ صادقی، زین‌العابدین؛ شجاع‌الدینی، حمیده. (۱۳۹۷). ارزیابی اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم‌های فتوولتائیک در کاربری تجاری و شبیه‌سازی پویای قیمت برق. نشریه اقتصاد انرژی ایران، ۷(۲۷)، ۲۰۱-۱۵۹.

نوابخش، مهرداد؛ ثابتی، مریم. (۱۳۹۴). طراحی و ارائه الگو جهت سنجش تأثیر سرمایه فرهنگی بر ابعاد توسعه پایدار شهری با تأکید بر انرژی‌های پاک. مجله مطالعات توسعه اجتماعی ایران، ۸(۱)، ۵۰-۳۷.

Ali, M., Orabi, M., Abdelkarim, E., Qahouq, J. A. A., & El Aroudi, A. (2011, December). Design and development of energy-free solar street LED light system. In *2011 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies-Middle East* (pp. 1-7). IEEE.

Bohn, R. E., Caramanis, M. C., & Schweppe, F. C. (1984). Optimal pricing in electrical networks over space and time. *The Rand Journal of Economics*, 360-376.

Danish Energy Agency. (2012). Assumptions for socio-economic analysis on energy. Danish Energy Agency.

Das, N., Pal, N., & Pradip, S. K. (2015). Economic cost analysis of LED over HPS flood lights for an efficient exterior lighting design using solar PV. *Building and Environment*, 89, 380-392.

Galvão, J. R., Moreira, L. M., Ascenso, R. M., & Leitão, S. A. (2015). Energy systems models for efficiency towards Smart Cities. In *IEEE EUROCON 2015-International Conference on Computer as a Tool (EUROCON)* (pp. 1-6). IEEE.

Lund, H. (2014) *Advanced Energy Systems Analysis Computer Model*, Documentation Version 11.4, Aalborg University, Denmark.

Smith, E., Simpson, R., & Nicola, S. (2013). Lighting up the streets, The cases of Sydney, Australia, and Nagpur, India,

شرکت برق منطقه‌ای خراسان. (۱۳۹۱ الف). گزارش اقدامات شرکت برق منطقه‌ای خراسان در زمینه توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، مشهد.

شرکت برق منطقه‌ای خراسان. (۱۳۹۱ ب). بودجه مصوب سال ۱۳۹۱، معاونت برنامه‌ریزی و تحقیقات، دفتر بودجه و مطالعات اقتصادی.

طاهری‌فرد، علی؛ شهاب، سمیه. (۱۳۸۹). بررسی جنبه‌های فنی و اقتصادی تولید برق زمین‌گرمایی. نشریه اقتصاد انرژی، شماره ۱۲۵ و ۱۲۶، ۳۹-۳۱.

عباسی‌ورده، محمدعلی؛ حنیفی، محمدفرید؛ فخاری، اکبر. (۱۳۸۷). بررسی میدانی کاربرد چراغ‌های روشنایی معابر با منبع نور LED. بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق.

فطرس، محمدحسن؛ آقازاده، اکبر؛ جبرائیلی، سودا. (۱۳۹۱). بررسی میزان تأثیر مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر بر رشد اقتصادی کشورهای منتخب درحال توسعه (شامل ایران)، دوره زمانی ۲۰۰۹ - ۱۹۸۰. نشریه مطالعات اقتصاد انرژی، ۹(۳۲)، ۷۲-۵۱.

قائمی‌اصل، مهدی؛ سلیمی‌فر، مصطفی؛ مهدوی‌عادلی، محمدحسین. (۱۳۹۵). شبیه‌سازی ایجاد شهر زیست‌محیطی کم‌کربن با بهره‌گیری از پسماندهای شهری و تکنولوژی فتوولتائیک: برنامه‌ریزی پایدار انرژی بخش شهری مشهد مقدس. نشریه اقتصاد و مدیریت شهری، ۵(۱۷)، ۸۱-۶۷.

کاظمیان، غلامرضا؛ رسولی، افشین؛ خزایی، محمد مهدی. (۱۳۹۶). جایگاه انرژی‌های نو و تجدیدپذیر در زیست‌پذیرانه کردن شهرها، مطالعه موردی شهر تهران.

فصلنامه پژوهش و برنامه‌ریزی شهری، ۸(۲۹)، ۱۱۸-۹۹. کهنسال، محمدرضا؛ شایان مهر، سمیرا. (۱۳۹۵). آثار متقابل مصرف انرژی، رشد اقتصادی و آلودگی محیط‌زیست: کاربرد الگوی معادلات همزمان فضایی داده‌های تابلویی. پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران، ۵(۱۹)، ۲۱۶-۱۷۹.

معاونت هماهنگی توزیع شرکت توانیر. (۱۳۹۰). نظام‌نامه مدیریت مصرف انرژی الکتریکی:

مهدوی‌عادلی، محمدحسین؛ سلیمی‌فر، مصطفی؛ قزلباش، اعظم. (۱۳۹۳). ارزیابی اقتصادی استفاده از انرژی برق خورشیدی (فتوولتائیک) و برق فسیلی در مصارف

- ICLEI-Local Governments for Sustainability and IRENA- International Renewable Energy Agency
- Wu, M. S., Huang, H. H., Huang, B. J., Tang, C. W., & Cheng, C. W. (2009). Economic feasibility of solar-powered led roadway lighting. *Renewable energy*, 34(8), 1934-1938.
- Zelinka, I. (2001). Analytic programming by means of new evolutionary algorithms. In *Proceedings of 1st International Conference on New Trends in Physics* (Vol. 1, pp. 210-214).
- Zelinka, I. (2002 a). Analytic programming by means of soma algorithm. In *Proceedings of the 8th International Conference on Soft Computing, Mendel* (Vol. 2, pp. 93-101).
- Zelinka, I. (2002b). Analytic programming by means of soma algorithm. Proc. 8th International Conference on Soft Computing, VUT Brno, Mendel'02 Czech Republic, 93-101.
- Zelinka, I., Oplatkova, Z., & Nolle, L. (2005). Analytic programming- symbolic regression by means of arbitrary evolutionary algorithms, In: Special Issue on Intelligent Systems of International *Journal of Simulation, Systems, Science and Technology*, 6(9), 44-55.