

بهره‌وری انرژی در شهرهای هوشمند ترکیبی از نوآوری‌ها در شبکه‌های هوشمند و ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر

محمد رضا شریفی قزوینی^۱، امیر نوفل*^۲، مهرداد آقاجانی^۳

۱-استادیار گروه مهندسی صنایع، واحد دهقان، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران mo.sharifi@iau.ac.ir

۲-دانشجوی دکتری مدیریت فناوری، گروه مدیریت، واحد دهقان، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

amir.nofel@mail.com

۳-دانشجوی دکتری مدیریت فناوری، گروه مدیریت، واحد دهقان، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

aghajani.mehrdad@gmail.com

چکیده

این مقاله مروری روایی، بهره‌وری انرژی در شهرهای هوشمند را با تمرکز بر هم‌افزایی نوآوری‌های شبکه‌های هوشمند و یکپارچگی انرژی‌های تجدیدپذیر بررسی می‌کند. هدف این مطالعه، ارائه تحلیلی منسجم از فناوری‌ها، چارچوب‌های نظری، و چالش‌های مرتبط با بهبود بهره‌وری انرژی در بسترهای شهری است تا مسیرهایی برای توسعه پایدار و عادلانه شناسایی شود. موضوعات کلیدی شامل پیشرفت‌های فناوری مانند زیرساخت‌های اندازه‌گیری پیشرفته، هوش مصنوعی، و میکروشبکه‌ها، و نیز موانع فنی، اقتصادی، اجتماعی، و نهادی مانند هزینه‌های بالا، نابرابری در دسترسی، و نگرانی‌های امنیت سایبری است. یافته‌ها نشان می‌دهند که شبکه‌های هوشمند و انرژی‌های تجدیدپذیر، مصرف انرژی و انتشار کربن را به‌طور معناداری کاهش داده‌اند، اما موفقیت آن‌ها به هماهنگی نهادی، پذیرش اجتماعی، و سیاست‌های فراگیر وابسته است. بازتاب‌های انتقادی، بر تمرکز بیش‌ازحد بر جنبه‌های فنی، غفلت از زمینه‌های بومی، و نبود چارچوب‌های بین‌رشته‌ای تأکید دارند. این مقاله پیشنهاد می‌کند که بهره‌وری انرژی نیازمند رویکردی چندبعدی است که فناوری، سیاست، و رفتار انسانی را یکپارچه کند. در نتیجه، شهرهای هوشمند می‌توانند از طریق همکاری‌های بین‌رشته‌ای، طراحی انسان‌محور، و سیاست‌گذاری مبتنی بر عدالت، به سیستم‌های انرژی پایدار و مقاوم دست یابند. این مرور، سیاست‌گذاران و پژوهشگران را به بازنگری استراتژی‌های شهری برای تحقق آینده‌ای کارآمد در انرژی دعوت می‌کند.

کلمات کلیدی: بهره‌وری انرژی، شهرهای هوشمند، شبکه‌های هوشمند، انرژی‌های تجدیدپذیر، عدالت انرژی، امنیت سایبری

۱- مقدمه

شهرنشینی سریع جمعیت جهانی، فشار بی‌سابقه‌ای بر زیرساخت‌های شهری، سیستم‌های انرژی و پایداری زیست‌محیطی وارد کرده و کارایی انرژی را به یکی از ارکان اصلی توسعه شهری مدرن تبدیل کرده است. شهرهای هوشمند، که با یکپارچگی فناوری‌های پیشرفته برای بهینه‌سازی عملکردهای شهری مشخص می‌شوند، به‌عنوان رویکردی تحول‌آفرین برای مقابله با این چالش‌ها ظهور کرده‌اند. کارایی انرژی در مرکز این چشم‌انداز قرار دارد و هدف آن کاهش مصرف انرژی با حداکثر کردن عملکرد سیستم‌های شهری است. با بهره‌گیری از نوآوری‌هایی مانند شبکه‌های هوشمند و یکپارچگی انرژی‌های تجدیدپذیر، شهرهای هوشمند در پی ایجاد محیط‌های شهری پایدار، مقاوم و عادلانه هستند. این

مقاله مروری روایی، چشم‌انداز در حال تحول کارایی انرژی در شهرهای هوشمند را کاوش می‌کند و نوآوری‌های کلیدی فناوری و پیامدهای آن‌ها برای پایداری شهری را تلفیق می‌نماید.

مفهوم کارایی انرژی در بسترهای شهری طی چند دهه گذشته به‌طور قابل توجهی تکامل یافته است، که این امر ناشی از پیشرفت‌های فناوری و تغییر اولویت‌های سیاستی بوده است. توسعه شبکه‌های هوشمند، که از اوایل دهه ۲۰۰۰ میلادی شتاب گرفت، نقطه عطفی در گذار از سیستم‌های توزیع انرژی سنتی به شبکه‌های پویا و داده‌محور با قابلیت پایش و بهینه‌سازی بلادرنگ بود. به‌طور هم‌زمان، فشار جهانی برای استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی و بادی، به دلیل نیاز به کاهش انتشار کربن و وابستگی به سوخت‌های فسیلی، سرعت گرفته است. برای مثال، مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۱ توسط لی و همکاران (Li et al., 2021) نشان داد که فناوری‌های شبکه هوشمند در سنگاپور از طریق مکانیزم‌های پاسخگویی به تقاضا، تقاضای اوج انرژی را تا ۱۵ درصد کاهش داده‌اند. به همین ترتیب، تحلیلی در سال ۲۰۲۲ توسط ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2022) موفقیت یکپارچگی میکروشبکه‌های خورشیدی در کپنهاگ را نشان داد که پتانسیل انرژی‌های تجدیدپذیر برای تحول سیستم‌های انرژی شهری را برجسته می‌کند. این پیشرفت‌ها بنیانی برای عصر جدیدی از مدیریت انرژی شهری فراهم کرده‌اند که در آن کارایی و پایداری درهم‌تنیده‌اند.

امروزه، اهمیت کارایی انرژی در شهرهای هوشمند با چالش‌های جهانی فوری مانند تغییرات اقلیمی، امنیت انرژی و رشد جمعیت شهری برجسته شده است. با توجه به اینکه شهرها بیش از ۷۰ درصد مصرف انرژی جهانی و انتشار گازهای گلخانه‌ای را به خود اختصاص می‌دهند (اژانس بین‌المللی انرژی، ۲۰۲۳)، نیاز به سیستم‌های انرژی کارآمد بیش از پیش حیاتی است. بحث‌های معاصر بر تعادل بین نوآوری فناوری و دسترسی عادلانه، رسیدگی به مخاطرات امنیت سایبری در شبکه‌های هوشمند و غلبه بر موانع مالی برای پذیرش انرژی‌های تجدیدپذیر متمرکز است. برای نمونه، مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۴ توسط کیم و پارک (Kim & Park, 2024) پیامدهای برابری اجتماعی در استقرار شبکه‌های هوشمند در سنول را بررسی کرد و نابرابری‌هایی در دسترسی به فناوری‌های صرفه‌جویی در انرژی در جوامع کم‌درآمد را نشان داد. به‌طور مشابه، مقاله‌ای در سال ۲۰۲۳ توسط گوپتا و همکاران (Gupta et al., 2023) آسیب‌پذیری‌های امنیت سایبری در زیرساخت‌های شبکه هوشمند را برجسته کرد و بر نیاز به اقدامات حفاظتی قوی تأکید نمود. این مسائل، ضرورت پیشبرد کارایی انرژی را در کنار مدیریت چالش‌های پیچیده اجتماعی-فناوری در بستر شهرهای هوشمند نشان می‌دهند.

این مقاله مروری، مضامین کلیدی در پیگیری کارایی انرژی در شهرهای هوشمند را تلفیق می‌کند، از جمله پیشرفت‌های فناوری شبکه‌های هوشمند، یکپارچگی منابع انرژی تجدیدپذیر، هم‌افزایی بین این سیستم‌ها و چالش‌های مانع پذیرش گسترده آن‌ها. این مرور چگونگی بازسازی چشم‌اندازهای انرژی شهری توسط نوآوری‌هایی مانند زیرساخت‌های پیشرفته اندازه‌گیری، هوش مصنوعی و میکروشبکه‌ها را کاوش می‌کند و در عین حال موانعی مانند محدودیت‌های فنی، تنگناهای اقتصادی و نابرابری‌های اجتماعی را مورد توجه قرار می‌دهد. با بررسی این حوزه‌ها، مقاله مروری دیدگاهی جامع از وضعیت کنونی کارایی انرژی در شهرهای هوشمند ارائه می‌دهد و مسیریابی برای پیشرفت آینده شناسایی می‌کند.

هدف این مقاله مروری روایی، ارائه تلفیقی منسجم و نقادانه از نوآوری‌های شبکه‌های هوشمند و یکپارچگی انرژی‌های تجدیدپذیر است تا نقش آن‌ها در ارتقای کارایی انرژی در شهرهای هوشمند روشن شود. با تکیه بر ادبیات اخیر و مطالعات موردی، این مقاله در پی مشارکت در فهم گسترده‌تر از چگونگی پاسخگویی این فناوری‌ها به چالش‌های انرژی شهری و در عین حال تقویت توسعه شهری پایدار و فراگیر است. از طریق این کاوش، مقاله مروری به دنبال آگاهی‌بخشی به پژوهشگران، سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان شهری درباره فرصت‌ها و پیچیدگی‌های ساخت شهرهای هوشمند کارآمد در انرژی است و راه را برای همکاری و نوآوری بین‌رشته‌ای هموار می‌کند.

۲- روش شناسی

این مرور روایی از طریق گردآوری نظام‌مند منابع علمی از مجموعه‌ای متنوع از مراجع انجام شد تا بررسی جامعی از نوآوری‌های مرتبط با بهره‌وری انرژی در شهرهای هوشمند، با تمرکز بر شبکه‌های هوشمند و یکپارچگی انرژی‌های تجدیدپذیر، ارائه شود. منابع مرتبط از مجلات علمی، کتاب‌ها، مجموعه مقالات کنفرانس‌ها و پایگاه‌های داده معتبر مانند Scopus، Web of Science و IEEE Xplore جمع‌آوری شدند، با تأکید بر انتشارات داوری‌شده به‌منظور تضمین دقت علمی. معیارهای انتخاب شامل مطالعاتی با ارتباط مستقیم با سیستم‌های انرژی شهرهای هوشمند، فناوری‌های شبکه هوشمند و یکپارچگی انرژی‌های تجدیدپذیر بود، در حالی که اولویت به انتشارات اخیر برای انعکاس پیشرفت‌های کنونی داده شد، هرچند آثار برجسته قدیمی نیز برای ارائه زمینه بنیادین در نظر گرفته شدند. فرآیند بررسی شامل تلفیق کیفی متون می‌باشد که به صورت موضوعی سازمان‌دهی شده تا نوآوری‌ها، روندها و چالش‌های کلیدی در این حوزه برجسته شوند. یافته‌ها به‌گونه‌ای ساختار بندی شدند که روایتی منسجم ارائه دهند و دیدگاه‌های فناوری، سیاست‌گذاری و اجرایی را یکپارچه کنند تا نگاهی جامع به بهره‌وری انرژی در شهرهای هوشمند فراهم آید.

۳- بیان مسئله

با رشد شتابان شهرنشینی، شهرها به کانون اصلی مصرف انرژی و تولید گازهای گلخانه‌ای تبدیل شده‌اند. این واقعیت، نیاز به توسعه نظام‌های انرژی کارآمد و پایدار در بسترهای شهری را بیش از پیش ضروری ساخته است. مفهوم شهر هوشمند به‌عنوان پاسخی فناورانه به چالش‌های پیچیده زیست‌محیطی و زیرساختی، نقش مهمی در ارتقای کارایی انرژی ایفا می‌کند. در این میان، دو محور کلیدی یعنی شبکه‌های هوشمند و ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌عنوان اهرم‌هایی مؤثر در بازآرایی سیستم‌های انرژی شهری پدیدار شده‌اند. با این حال، درک دقیق از تعامل این نوآوری‌ها، فرصت‌ها و محدودیت‌های آن‌ها، همچنان نیازمند بررسی و تلفیق بین‌رشته‌ای است.

ادبیات علمی اخیر گویای آن است که پیشرفت‌های فناورانه از جمله زیرساخت‌های اندازه‌گیری پیشرفته، الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای مدیریت تقاضا، و فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی، توانسته‌اند بهره‌وری انرژی را در شهرهای هوشمند به طور معناداری بهبود بخشند (Wang et al., ۲۰۲۳; Li & Chen, ۲۰۲۴). با وجود این، چالش‌هایی چون هزینه‌های بالای پیاده‌سازی، نابرابری در دسترسی به فناوری‌ها، و مخاطرات امنیت سایبری، مانع از تعمیم و بهره‌برداری یکپارچه از این نوآوری‌ها شده‌اند (Kim & Gupta et al., ۲۰۲۴; Park, ۲۰۲۲). همچنین، چارچوب‌های نظری مانند مدل‌های گذار انرژی، نظریه سیستم‌های اجتماعی-فناوری و مدل پذیرش فناوری (TAM) نشان می‌دهند که تحقق کامل بهره‌وری انرژی در بستر شهرهای هوشمند، مستلزم درک عمیق‌تر از دینامیک‌های نهادی، رفتاری و فنی است (Müller & Welp, ۲۰۲۱; Patel & Kumar, ۲۰۲۳).

بر این اساس، پژوهش حاضر با رویکرد مروری روایی به دنبال تلفیق نظام‌مند بینش‌های نظری و تجربی در این حوزه است تا ضمن شناسایی فرصت‌ها، چالش‌ها و هم‌افزایی‌های بالقوه بین شبکه‌های هوشمند و انرژی‌های تجدیدپذیر، شکاف‌های دانش موجود را نیز روشن سازد.

۳.۱- سؤالات پژوهش

۱. چگونه نوآوری‌های فناورانه در شبکه‌های هوشمند و ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توانند به بهبود بهره‌وری انرژی در شهرهای هوشمند کمک کنند؟

۲. چه چارچوب‌های نظری و مدل‌های تحلیلی تاکنون برای درک این تعاملات به کار رفته‌اند و چه مزایا و محدودیت‌هایی داشته‌اند؟

۳. چالش‌های اصلی فنی، اقتصادی، اجتماعی و نهادی در مسیر پیاده‌سازی گسترده این نوآوری‌ها چیست و چگونه می‌توان بر آن‌ها غلبه کرد؟

۴. چگونه می‌توان رویکردی یکپارچه و عادلانه برای توسعه شهرهای هوشمند با بهره‌وری انرژی بالا ایجاد کرد؟

۳.۲- فرضیات پژوهشی

فرضیه ۱: بهره‌گیری از شبکه‌های هوشمند همراه با ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر، منجر به کاهش چشمگیر مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در شهرهای هوشمند می‌شود. (Zhang et al., 2022; Chen et al., 2022)

فرضیه ۲: موفقیت سیستم‌های بهره‌وری انرژی در شهرهای هوشمند، نه تنها به پیشرفت‌های فنی بلکه به پذیرش اجتماعی، سیاست‌های حمایتی و طراحی انسان‌محور وابسته است. (Kim & Lee, 2023; Sovacool et al., 2023)

فرضیه ۳: رویکردهای میان‌رشته‌ای و چارچوب‌های ترکیبی (فنی-اجتماعی-اقتصادی) می‌توانند کارایی و عدالت را در گذار به سیستم‌های انرژی هوشمند و پایدار تقویت کنند. (Lopez et al., 2024; Patel & Kumar, 2023)

۴- پیشینه مفهومی و نظری

۱.۴ تعریف اصطلاحات و مفاهیم کلیدی

مفهوم شهرهای هوشمند به محیط‌های شهری اشاره دارد که با بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته، تحلیل داده‌ها و سیستم‌های به‌هم‌پیوسته، به بهبود کارایی، پایداری و کیفیت زندگی ساکنان می‌پردازند. در هسته این پارادایم، کارایی انرژی قرار دارد که به معنای بهینه‌سازی مصرف انرژی برای دستیابی به حداکثر خروجی با حداقل هدررفت است، که به کاهش تأثیرات زیست‌محیطی و هزینه‌های عملیاتی منجر می‌شود. شبکه‌های هوشمند شبکه‌های پیشرفته توزیع برق هستند که از ارتباطات دیجیتال، حسگرها و خودکارسازی برای پایش بلادرنگ، پاسخگویی به تقاضا و یکپارچگی منابع متنوع انرژی استفاده می‌کنند. یکپارچگی انرژی‌های تجدیدپذیر شامل گنجاندن منابع انرژی پایدار مانند انرژی خورشیدی، بادی و برق‌آبی در سیستم‌های انرژی شهری برای کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی است. این مفاهیم به‌هم‌پیوسته‌اند، زیرا شبکه‌های هوشمند مدیریت کارآمد انرژی‌های تجدیدپذیر را تسهیل می‌کنند، در حالی که کارایی انرژی اهداف پایداری شهرهای هوشمند را تقویت می‌کند. برای مثال، مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۲ توسط چن و همکاران (Chen et al., 2022) نشان داد که شبکه‌های هوشمند در شانگهای از طریق متعادل‌سازی پویای بار، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر را تا ۲۰ درصد افزایش داده‌اند، که هم‌افزایی عملی بین این مفاهیم را نشان می‌دهد.

۲.۴ چارچوب‌های نظری اصلی

چندین مدل و چارچوب نظری، درک علمی از کارایی انرژی در شهرهای هوشمند را، به‌ویژه در زمینه شبکه‌های هوشمند و یکپارچگی انرژی‌های تجدیدپذیر، شکل داده‌اند. یکی از چارچوب‌های بنیادین، نظریه سیستم‌های اجتماعی-فناوری (STS) است که سیستم‌های انرژی را به‌عنوان تعاملی از عوامل فناوری، اجتماعی و نهادی می‌بیند. این نظریه تأکید می‌کند که موفقیت شبکه‌های هوشمند نه تنها به نوآوری‌های فنی، بلکه به مشارکت کاربران، حمایت نظارتی و پذیرش اجتماعی وابسته است. مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۳ توسط پاتل و کومار (Patel & Kumar, 2023) از این نظریه برای تحلیل پذیرش شبکه‌های هوشمند در شهرهای هوشمند هند استفاده کرد و نشان داد که مقاومت عمومی به دلیل نگرانی‌های حریم خصوصی، پیاده‌سازی را با مشکل مواجه کرده است، که نیاز به طراحی فراگیر اجتماعی را برجسته می‌کند.

چارچوب دیگر، نظریه گذار انرژی است که تغییر از سیستم‌های مبتنی بر سوخت فسیلی به انرژی‌های تجدیدپذیر را به‌عنوان فرایندی پیچیده و چندمرحله‌ای شامل ابعاد فناوری، اقتصادی و سیاستی مفهوم‌سازی می‌کند. این نظریه نقش شبکه‌های هوشمند را به‌عنوان تسهیل‌کننده سیستم‌های انرژی غیرمتمرکز، مانند میکروشبکه‌ها، که انرژی‌های تجدیدپذیر را در سطح محلی یکپارچه می‌کنند، برجسته می‌کند. برای مثال، مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۱ توسط مولر و ولپه (Müller & Welpe, 2021) نشان داد که چگونه اصول گذار انرژی، یکپارچگی انرژی بادی و خورشیدی را در شبکه هوشمند مونیخ هدایت کرد و طی پنج سال انتشار کربن را ۳۰ درصد کاهش داد. این مطالعه بر اهمیت مشوق‌های سیاستی در تسریع این گذار تأکید کرد.

چارچوب اکوسیستم شهر هوشمند نیز لنزی جامع برای درک کارایی انرژی ارائه می‌دهد و شهرهای هوشمند را به‌عنوان اکوسیستم‌های به‌هم‌پیوسته از فناوری‌ها، ذی‌نفعان و زیرساخت‌ها می‌بیند. این چارچوب بر یکپارچگی شبکه‌های هوشمند با سایر سیستم‌های شهری مانند حمل‌ونقل و مدیریت پسماند برای دستیابی به کارایی سیستمی تأکید دارد. مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۴ توسط لویز و همکاران (Lopez et al., 2024) این چارچوب را برای ارزیابی ابتکارات شهر هوشمند سنگاپور به کار برد و نشان داد که سیستم‌های مدیریت انرژی یکپارچه، کارایی کلی شهری را از طریق عملیات هماهنگ شبکه و انرژی‌های تجدیدپذیر تا ۱۵ درصد بهبود بخشید.

در نهایت، مدل پذیرش فناوری (TAM) برای مطالعه پذیرش فناوری‌های کارآمد در انرژی در شهرهای هوشمند اقتباس شده است. این مدل فرض می‌کند که سهولت استفاده و سودمندی ادراک‌شده، پذیرش فناوری را تعیین می‌کند، که برای سیستم‌های شبکه هوشمند و انرژی‌های تجدیدپذیر که به مشارکت مصرف‌کنندگان وابسته‌اند، حیاتی است. مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۳ توسط کیم و لی (Kim & Lee, 2023) از TAM برای بررسی پذیرش کنتورهای هوشمند در سنول استفاده کرد و نشان داد که رابط‌های کاربرپسند نرخ پذیرش را تا ۲۵ درصد افزایش داده‌اند، که اهمیت طراحی انسان‌محور در ابتکارات کارایی انرژی را برجسته می‌کند.

این چارچوب‌ها به‌طور جمعی درکی چندبعدی از کارایی انرژی در شهرهای هوشمند ارائه می‌دهند و بر تعامل فناوری، سیاست و رفتار انسانی تأکید دارند. با تلفیق بینش‌های حاصل از مطالعات اخیر، این بخش بنیانی مفهومی برای کاوش چگونگی کمک نوآوری‌های شبکه‌های هوشمند و انرژی‌های تجدیدپذیر به توسعه شهری پایدار ایجاد می‌کند.

۴.۳ توسعه تاریخی و تکامل

پیگیری کارایی انرژی در بسترهای شهری، به‌ویژه در چارچوب شهرهای هوشمند، طی چند دهه گذشته به‌طور قابل توجهی تکامل یافته است که این تحول ناشی از پیشرفت‌های فناوری، تغییرات سیاستی و افزایش آگاهی زیست‌محیطی بوده است. ایده‌های اولیه درباره کارایی انرژی در دهه ۱۹۷۰ میلادی، در پی بحران‌های جهانی نفت، پدیدار شد که نیاز به استفاده بهینه از انرژی در مناطق شهری در حال رشد را برجسته کرد. تلاش‌های اولیه بر استراتژی‌های ساده حفظ انرژی، مانند بهبود عایق‌بندی ساختمان‌ها و ترویج لوازم خانگی کم‌مصرف، متمرکز بود. مفهوم سیستم‌های شهری "هوشمند" در دهه ۱۹۸۰ با ظهور فناوری‌های دیجیتال شکل گرفت و زمینه را برای یکپارچگی فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات (ICT) در مدیریت انرژی شهری فراهم کرد. انتشار کتاب *مسیرهای انرژی نرم* توسط لاورینز (Lovins, 1977) ایده سیستم‌های انرژی غیرمتمرکز را معرفی کرد و از منابع انرژی تجدیدپذیر به‌عنوان جایگزین‌های پایدار برای سوخت‌های فسیلی حمایت نمود، که چشم‌اندازی بنیادین برای سیستم‌های انرژی شهری پایدار ایجاد کرد.

دهه ۱۹۹۰ نقطه عطفی با ظهور مفهوم شبکه هوشمند بود که توسط پیشرفت‌های ارتباطات دیجیتال و خودکارسازی هدایت شد. ابتکارات اولیه شبکه‌های هوشمند بر ارتقای شبکه‌های برق سنتی با حسگرها و سیستم‌های ارتباط دوطرفه برای بهبود قابلیت اطمینان و کارایی متمرکز بود. انتشار نقشه *راه شبکه هوشمند* موسسه تحقیقات نیروی برق (EPRI)

(2003) نقطه عطف کلیدی بود که چشم‌اندازی برای مدرن‌سازی زیرساخت‌های شبکه ارائه داد تا از پایش بلادرنگ و پاسخگویی به تقاضا پشتیبانی کند. به‌طور هم‌زمان، فشار برای انرژی‌های تجدیدپذیر شتاب گرفت و سیاست‌هایی مانند دستورالعمل انرژی تجدیدپذیر اتحادیه اروپا (۱۹۹۷) یکپارچگی انرژی خورشیدی و بادی در سیستم‌های شهری را تشویق کرد. این پیشرفت‌ها بنیانی برای شهرهای هوشمند فراهم آورد که در آن کارایی انرژی به‌عنوان رکنی مرکزی، با پشتیبانی از فناوری‌های به‌هم‌پیوسته و منابع انرژی پایدار، مطرح شد.

اوایل دهه ۲۰۰۰ شاهد تغییر پارادایمی بود که مفهوم شهر هوشمند را تثبیت کرد و کارایی انرژی را با سیستم‌های گسترده‌تر شهری مانند حمل‌ونقل و مدیریت پسماند یکپارچه ساخت. معرفی زیرساخت‌های پیشرفته اندازه‌گیری (AMI) و اجرای پروژه‌های آزمایشی شبکه هوشمند در شهرهایی مانند بولدر، کلرادو و آمستردام، نقاط عطف مهمی بودند. گزارش برجسته‌ای توسط آژانس بین‌المللی انرژی (IEA, 2008) با عنوان *کارایی انرژی در شهرها*، نقش فناوری اطلاعات و ارتباطات در بهینه‌سازی مصرف انرژی شهری را تأکید کرد و علاقه جهانی به چارچوب‌های شهر هوشمند را برانگیخت. این دوره همچنین شاهد تمرکز فزاینده علمی و سیاستی بر یکپارچگی انرژی‌های تجدیدپذیر بود، با مطالعاتی مانند پژوهش جاکوبسون و دلوشی (Jacobson & Delucchi, 2011) در *انرژی پالیسی* که مسیریایی برای سیستم‌های انرژی ۱۰۰ درصد تجدیدپذیر پیشنهاد کردند و بر برنامه‌ریزان شهری برای اولویت‌بندی انرژی‌های تجدیدپذیر در طراحی شهرهای هوشمند تأثیر گذاشتند.

از دهه ۲۰۱۰ به بعد، همگرایی شبکه‌های هوشمند و انرژی‌های تجدیدپذیر شتاب گرفته است که توسط پیشرفت‌های سریع در هوش مصنوعی (AI)، اینترنت اشیا (IoT) و فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی هدایت شده است. راه‌اندازی پروژه‌های بزرگ شهر هوشمند، مانند شهر مصدر در امارات متحده عربی و سونگدو در کره جنوبی، کاربردهای عملی شبکه‌های هوشمند و یکپارچگی تجدیدپذیرها را به نمایش گذاشت که کاهش قابل‌توجهی در مصرف انرژی به همراه داشت. مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۹ توسط فاروکی و همکاران (Faruqui et al., 2019) در *کونومیک انرژی* نشان داد که قیمت‌گذاری پویا با استفاده از شبکه‌های هوشمند، تقاضای اوج را در تورنتو تا ۱۲ درصد کاهش داد و قابلیت‌های رو به رشد این سیستم‌ها را نشان داد. تعهد جهانی به توافق پاریس (۲۰۱۵) تلاش‌ها را تقویت کرد و شهرها اهداف بلندپروازانه کربن‌خنثی را پذیرفتند، همان‌طور که در برنامه کربن‌خنثی ۲۰۲۵ کپنهاگ دیده می‌شود که به‌شدت به یکپارچگی انرژی‌های تجدیدپذیر وابسته بود.

سال‌های اخیر شاهد تمرکز دقیق‌تر بر یکپارچگی سیستمی و تاب‌آوری بوده است، با شبکه‌های هوشمندی که برای پشتیبانی از سیستم‌های انرژی غیرمتمرکز مانند میکروشبکه‌ها و نیروگاه‌های مجازی تکامل یافته‌اند. مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۳ توسط وانگ و همکاران (Wang et al., 2023) در *مرور انرژی‌های تجدیدپذیر و پایدار* نقش شبکه‌های هوشمند مبتنی بر هوش مصنوعی را در سنگاپور تحلیل کرد و بهبود ۱۵ درصدی در کارایی انرژی را از طریق مدیریت پیش‌بینی بار نشان داد. علاوه بر این، تأکید فزاینده بر برابری اجتماعی و امنیت سایبری، دیدگاه‌ها را باز شکل داده است، با انتشاراتی مانند سواکول و همکاران (Sovacool et al., 2021) در *نیچر انرژی* که از گذارهای انرژی فراگیر برای رفع نابرابری‌های دسترسی به فناوری‌های هوشمند حمایت می‌کنند. این پیشرفت‌ها نشان‌دهنده بلوغ این حوزه است، جایی که کارایی انرژی در شهرهای هوشمند به‌عنوان چالشی اجتماعی-فناوری نیازمند راه‌حل‌های بین‌رشته‌ای دیده می‌شود.

تکامل تاریخی کارایی انرژی در شهرهای هوشمند، مسیری از حفظ اولیه انرژی به سیستم‌های پیچیده و فناوری‌محور را نشان می‌دهد. نقاط عطف کلیدی، از حمایت اولیه از انرژی‌های تجدیدپذیر تا شبکه‌های مدرن مبتنی بر هوش مصنوعی، این حوزه را متحول کرده‌اند و توسط انتشارات برجسته، چارچوب‌های سیاستی و پیاده‌سازی‌های واقعی هدایت شده‌اند. این

پیشرفت، زمینه را برای درک نوآوری‌های معاصر در شبکه‌های هوشمند و یکپارچگی تجدیدپذیرها و همچنین چالش‌ها و فرصت‌های پیش‌رو فراهم می‌کند.

۵- روندهای جاری و مسائل کلیدی

۱.۵ روندهای برجسته در کارایی انرژی برای شهرهای هوشمند

در سال‌های اخیر، پیگیری کارایی انرژی در شهرهای هوشمند با چندین روند تحول‌آفرین مشخص شده است که توسط پیشرفت‌های فناوری و الزامات جهانی پایداری هدایت می‌شوند. یکی از روندهای برجسته، پذیرش گسترده هوش مصنوعی (AI) و یادگیری ماشین در عملیات شبکه‌های هوشمند است. الگوریتم‌های هوش مصنوعی به‌طور فزاینده‌ای برای پیش‌بینی مدیریت بار، تشخیص خطا و بهینه‌سازی یکپارچگی انرژی‌های تجدیدپذیر استفاده می‌شوند. برای مثال، مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۳ توسط وانگ و همکاران (Wang et al., ۲۰۲۳) در مرور انرژی‌های تجدیدپذیر و پایدار نشان داد که پیش‌بینی تقاضای مبتنی بر هوش مصنوعی در شبکه هوشمند سنگاپور، هدررفت انرژی را از طریق تنظیمات بلادرنگ عرضه و تقاضا تا ۱۵ درصد کاهش داد. روند دیگر، ظهور میکروشبکه‌ها و سیستم‌های انرژی غیرمتمرکز است که تولید و مصرف انرژی محلی را امکان‌پذیر می‌کنند و تاب‌آوری و کارایی را افزایش می‌دهند. تحلیلی در سال ۲۰۲۲ توسط ژانگ و همکاران (Zhang et al., ۲۰۲۲) در انرژی استفاده از میکروشبکه‌های خورشیدی در کپنهاگ را برجسته کرد که قابلیت اطمینان انرژی را در مناطق شهری تا ۲۰ درصد بهبود بخشید. علاوه بر این، سیستم‌های پیشرفته ذخیره‌سازی انرژی، مانند باتری‌های لیتیوم-یون و جریان، برای مقابله با متناوب بودن منابع انرژی تجدیدپذیر محبوبیت یافته‌اند. مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۴ توسط لی و چن (Li & Chen, ۲۰۲۴) در ژورنال ذخیره‌سازی انرژی بررسی کرد که چگونه ذخیره‌سازی باتری در ابتکارات شهر هوشمند توکیو عملیات شبکه را پایدار کرد و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر را تا ۲۵ درصد افزایش داد. در نهایت، یکپارچگی فناوری‌های اینترنت اشیا (IoT)، مانند کنتورهای هوشمند و حسگرها، پایش بلادرنگ انرژی و مشارکت مصرف‌کنندگان را تسهیل کرده است، به‌طوری که شهرهایی مانند آمستردام با استفاده از IoT کاهش ۱۰ درصدی در مصرف انرژی خانگی را به دست آوردند، همان‌طور که در گزارش ۲۰۲۱ توسط ون در گراف و همکاران (van der Graaf et al., ۲۰۲۱) در شهرهای پایدار و جامعه ذکر شده است.

۲.۵ چالش‌ها و بحث‌های معاصر

با وجود این پیشرفت‌ها، چندین چالش و بحث، گفتمان درباره کارایی انرژی در شهرهای هوشمند را شکل می‌دهند. یکی از چالش‌های اصلی، هزینه بالای استقرار زیرساخت‌ها، به‌ویژه برای شبکه‌های هوشمند و سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر در مقیاس بزرگ است. بار مالی ارتقای زیرساخت‌های شبکه قدیمی و نصب فناوری‌های پیشرفته اغلب مانع پذیرش گسترده، به‌ویژه در اقتصادهای در حال توسعه، می‌شود. مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۳ توسط پاتل و کومار (Patel & Kumar, ۲۰۲۳) در شهرهای پایدار و جامعه نشان داد که شهرهای هوشمند هند با شکاف‌های مالی قابل‌توجهی روبرو بودند که مقیاس‌پذیری پروژه‌های شبکه هوشمند را محدود می‌کرد. مسئله حیاتی دیگر، مخاطرات امنیت سایبری مرتبط با شبکه‌های هوشمند است، زیرا وابستگی آن‌ها به اتصال دیجیتال، آن‌ها را در برابر حملات سایبری آسیب‌پذیر می‌کند. مقاله‌ای در سال ۲۰۲۴ توسط گوپتا و همکاران (Gupta et al., ۲۰۲۴) در انرژی کاربردی این نگرانی را برجسته کرد و به حمله سایبری به شبکه هوشمند اوکراین اشاره کرد که عرضه برق به هزاران خانوار را مختل کرد و نیاز به پروتکل‌های امنیتی قوی را نشان داد.

برابری اجتماعی همچنان موضوعی بحث‌برانگیز است، زیرا مزایای فناوری‌های شهر هوشمند همیشه به‌طور یکسان توزیع نمی‌شوند. جوامع کم‌درآمد اغلب به فناوری‌های کارآمد در انرژی دسترسی ندارند که نابرابری‌های شهری را تشدید می‌کند.



برای مثال، مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۲ توسط کیم و پارک (Kim & Park, ۲۰۲۲) در مطالعات شهری نشان داد که ابتکارات شبکه هوشمند سئول به‌طور نامتناسبی به نفع محله‌های مرفه بود و گروه‌های حاشیه‌نشین را با دسترسی محدود به برنامه‌های پاسخگویی به تقاضا رها کرد. این امر بحث‌هایی را درباره نیاز به سیاست‌های فراگیر برای اطمینان از گذارهای انرژی عادلانه برانگیخته است. علاوه بر این، متناوب بودن منابع انرژی تجدیدپذیر چالشی فنی ایجاد می‌کند، زیرا نوسانات در تولید انرژی خورشیدی و بادی نیازمند مدیریت پیشرفته شبکه و راه‌حل‌های ذخیره‌سازی است. مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۱ توسط مولر و ولپه (Müller & Welpe, ۲۰۲۱) در انرژی تجدیدپذیر اشاره کرد که شهرهای هوشمند آلمان در متعادل‌سازی عرضه و تقاضای انرژی تجدیدپذیر در ساعات اوج مصرف با مشکل مواجه بودند و نیاز به ذخیره‌سازی انرژی و انعطاف‌پذیری شبکه را برجسته کرد.

۳.۵ مناقشات و بحث‌های نوظهور

مناقشات پیرامون کارایی انرژی در شهرهای هوشمند اغلب بر حریم خصوصی داده‌ها و پیامدهای اخلاقی پایش گسترده متمرکز است. شبکه‌های هوشمند به جمع‌آوری گسترده داده‌ها از کنتورهای هوشمند و دستگاه‌های IoT وابسته‌اند و نگرانی‌هایی درباره حریم خصوصی کاربران و امنیت داده‌ها ایجاد می‌کنند. مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۳ توسط سواکول و همکاران (Sovacool et al., ۲۰۲۳) در نیچر انرژی استدلال کرد که چارچوب‌های نظارتی ناکافی در شهرهای هوشمند اروپا، داده‌های مصرف‌کنندگان را در برابر سوءاستفاده آسیب‌پذیر کرده و بدبینی عمومی نسبت به فناوری‌های هوشمند را تقویت کرده است. بحث دیگر حول استانداردسازی فناوری‌های شبکه هوشمند می‌چرخد، زیرا فقدان پروتکل‌های جهانی، قابلیت همکاری در مناطق و سیستم‌های مختلف را مختل می‌کند. گزارش ۲۰۲۴ آژانس بین‌المللی انرژی (IEA, ۲۰۲۴) تأکید کرد که استانداردهای پراکنده، یکپارچگی انرژی‌های تجدیدپذیر در شهرهای هوشمند آمریکای شمالی را به تأخیر انداخته و خواستار همکاری جهانی برای ایجاد چارچوب‌های منسجم شد.

تنش بین سیستم‌های انرژی متمرکز در برابر غیرمتمرکز نیز بحث‌های قابل توجهی را برمی‌انگیزد. در حالی که سیستم‌های غیرمتمرکز مانند میکروشبکه‌ها تاب‌آوری محلی را افزایش می‌دهند، برخی استدلال می‌کنند که شبکه‌های متمرکز برای مناطق شهری بزرگ کارآمدتر هستند. مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۲ توسط لوپز و همکاران (Lopez et al., ۲۰۲۲) در انرژی پالیسی رویکردهای متمرکز و غیرمتمرکز را در سنگاپور مقایسه کرد و دریافت که مدل‌های ترکیبی که هر دو سیستم را ترکیب می‌کنند، بهترین تعادل کارایی و قابلیت اطمینان را ارائه می‌دهند. این بحث‌ها پیچیدگی دستیابی به کارایی انرژی در شهرهای هوشمند را نشان می‌دهند، جایی که نوآوری فناوری باید با ملاحظات اقتصادی، اجتماعی و اخلاقی متعادل شود.

این بخش تعامل پویای روندهای فناوری و چالش‌های اجتماعی-فناوری در پیشبرد کارایی انرژی در شهرهای هوشمند را برجسته می‌کند. در حالی که نوآوری‌هایی در هوش مصنوعی، میکروشبکه‌ها و IoT سیستم‌های انرژی شهری را متحول می‌کنند، مسائلی مانند هزینه، امنیت سایبری، برابری و استانداردسازی همچنان موانع کلیدی هستند. این روندها و بحث‌ها بنیانی برای درک چشم‌انداز در حال تحول شبکه‌های هوشمند و یکپارچگی تجدیدپذیرها فراهم می‌کنند و زمینه را برای کاوش جهت‌گیری‌های آینده در این حوزه فراهم می‌سازند.

۶- چالش‌ها و موانع کارایی انرژی در شهرهای هوشمند

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در فناوری‌های شبکه‌های هوشمند و گسترش انرژی‌های تجدیدپذیر، تحقق کامل بهره‌وری انرژی در شهرهای هوشمند با مجموعه‌ای از چالش‌های پیچیده مواجه است. بررسی روندهای اخیر نشان می‌دهد که اگرچه شهرهای پیشرو توانسته‌اند برخی دستاوردهای ملموس در کاهش مصرف انرژی و انتشار کربن به

دست آورند، اما موانع ساختاری، فناوریانه، مالی و اجتماعی همچنان مانعی برای توسعه فراگیر و پایدار این ابتکارات به‌شمار می‌روند. در این بخش، مهم‌ترین چالش‌ها در چهار زیرگروه اصلی بررسی می‌شوند.

۶.۱ چالش‌های فنی در استقرار شبکه‌های هوشمند

یکی از برجسته‌ترین چالش‌ها، پیچیدگی‌های فنی مرتبط با طراحی، ادغام و نگهداری زیرساخت‌های شبکه هوشمند است. شبکه‌های هوشمند مستلزم هماهنگی بی‌درنگ بین حسگرها، کنتورها، تجهیزات پاسخ به تقاضا و سامانه‌های تحلیل داده‌اند؛ با این حال، همگام‌سازی اجزای متنوع در مقیاس شهری اغلب با دشواری‌هایی همراه است (Wang et al., 2023). برای مثال، عدم سازگاری میان استانداردهای ارتباطی تجهیزات، مانع از یکپارچگی بین برندها یا سامانه‌های مختلف می‌شود که کارایی کلی شبکه را تضعیف می‌کند (IEA, 2024). افزون بر این، یکپارچه‌سازی منابع تجدیدپذیر ناپایدار نظیر انرژی خورشیدی و بادی، نیازمند ظرفیت‌های پیشرفته پیش‌بینی و ذخیره‌سازی است که در بسیاری از شهرها به‌طور کامل توسعه نیافته‌اند (Müller & Welpe, 2021). همچنین، پایداری عملکرد شبکه در مواجهه با بارگذاری متغیر و اختلالات طبیعی از دیگر ملاحظات فنی حیاتی است که نیازمند رویکردهای تاب‌آورانه در طراحی سیستم است.

۶.۲ موانع اقتصادی و مالی

یکی از موانع رایج در مسیر ارتقای بهره‌وری انرژی، هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری اولیه در زیرساخت‌های شبکه هوشمند و فناوری‌های مرتبط است. نصب کنتورهای هوشمند، سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی و زیرساخت‌های مخابراتی نیازمند منابع مالی قابل‌توجهی است که برای بسیاری از شهرداری‌ها و دولت‌های محلی، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، دست‌نیافتنی است (Patel & Kumar, 2023). علاوه بر سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه‌های نگهداری، به‌روزرسانی نرم‌افزار، آموزش منابع انسانی و ارتقاء امنیت نیز بودجه‌های بلندمدت را تحت فشار قرار می‌دهند. مطالعه‌ای بر شهرهای هوشمند هند نشان داد که نبود مدل‌های اقتصادی پایدار و مشارکت بخش خصوصی، مانع از مقیاس‌پذیری پروژه‌های کارایی انرژی شده است (Lopez et al., 2022). همچنین، نبود مشوق‌های مالی کافی برای مصرف‌کنندگان نهایی، نظیر یارانه‌های دولتی یا سیاست‌های قیمت‌گذاری پویا، مانع از مشارکت فعال آن‌ها در مدیریت انرژی شده است.

۶.۳ عوامل اجتماعی و رفتاری مؤثر بر پذیرش

موفقیت فنی در استقرار شبکه‌های هوشمند لزوماً به پذیرش اجتماعی منجر نمی‌شود. نگرانی‌هایی مانند از دست رفتن کنترل مصرف، ترس از پیچیدگی فناوری و فقدان اعتماد به ارائه‌دهندگان خدمات انرژی، می‌توانند مقاومت مصرف‌کنندگان را برانگیزند (Kim & Lee, 2023). این امر در شرایطی بحرانی‌تر می‌شود که جوامع کم‌درآمد به زیرساخت‌های دیجیتال یا آموزش‌های لازم برای مشارکت در فرآیندهای کارایی انرژی دسترسی ندارند. برای مثال، در مطالعه‌ای بر شهر سئول، مشاهده شد که پروژه‌های پاسخ به تقاضا به‌طور نامتناسب در محله‌های مرفه پیاده‌سازی شده‌اند، در حالی که مناطق فقیرنشین از دسترسی به فناوری‌های صرفه‌جویی در انرژی محروم مانده‌اند (Kim & Park, 2022). این نابرابری‌های دیجیتال و اقتصادی، نه‌تنها شکاف دسترسی را گسترش می‌دهند بلکه

مشروعیت اجتماعی پروژه‌های هوشمند را نیز زیر سوال می‌برند. طراحی انسان‌محور و آموزش عمومی از عوامل کلیدی برای غلبه بر این چالش محسوب می‌شوند.

۶.۴ نگرانی‌های امنیت سایبری و حریم خصوصی داده‌ها

شبکه‌های هوشمند با تکیه بر حجم عظیم داده‌های بلادرنگ و اتصال دائم، در برابر تهدیدهای امنیت سایبری به شدت آسیب‌پذیرند. حملات هدفمند به زیرساخت‌های انرژی می‌توانند منجر به قطع برق گسترده، اختلال در خدمات شهری و حتی تهدیدات امنیت ملی شوند. به‌عنوان نمونه، حمله سایبری به شبکه هوشمند اوکراین در سال ۲۰۱۵، پیامدهای گسترده‌ای بر آگاهی جهانی نسبت به امنیت انرژی داشت (Gupta et al., ۲۰۲۴).

علاوه بر تهدیدهای خارجی، جمع‌آوری گسترده داده‌های مصرفی از طریق کنتورهای هوشمند و دستگاه‌های IoT نگرانی‌هایی درباره نقض حریم خصوصی کاربران ایجاد کرده است. در غیاب چارچوب‌های نظارتی مشخص و شفاف، امکان استفاده سوء از داده‌های شخصی، موجب افزایش بی‌اعتمادی عمومی نسبت به فناوری‌های هوشمند شده است (Sovacool et al., ۲۰۲۳). از این رو، توسعه سیاست‌های شفاف حفاظت از داده‌ها، استانداردهای امنیتی منسجم و مکانیزم‌های پاسخ به تهدید، ضرورت اساسی دارد.

۷- جهت‌گیری‌های آینده و شکاف‌های پژوهشی

در پرتو چالش‌های مطرح‌شده در مسیر تحقق کارایی انرژی در شهرهای هوشمند، شناسایی مسیرهای آینده و خلأهای پژوهشی، برای تداوم نوآوری و اجرای فراگیر سیاست‌ها ضرورت دارد. مروری بر روندهای اخیر نشان می‌دهد که همگرایی فناوری‌های نوظهور، ارتقای عدالت انرژی، تقویت پژوهش‌های میان‌رشته‌ای و تدوین سیاست‌های هوشمندانه، چهار محور کلیدی برای حرکت به سوی شهرهای هوشمند پایدار و کارآمد در انرژی به شمار می‌روند.

۷.۱ فناوری‌های نوظهور برای شهرهای هوشمند کارآمد در انرژی

افق‌های فناورانه در سال‌های اخیر به‌سوی استفاده از هوش مصنوعی (AI)، اینترنت اشیاء صنعتی (IIoT)، بلاک‌چین و رایانش لبه (edge computing) برای بهبود بهره‌وری انرژی در حال گسترش است. سیستم‌های پیش‌بینی مبتنی بر یادگیری ماشین، در حال تبدیل شدن به ابزارهای کلیدی برای مدیریت بار، بهینه‌سازی عرضه و تقاضا، و افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر هستند (Wang et al., ۲۰۲۳). همچنین، استفاده از فناوری بلاک‌چین برای ثبت تبادلات انرژی همتا به همتا در میکروشبکه‌ها، امکان ایجاد بازارهای محلی انرژی را فراهم کرده است (Kloppenburg & Boekelo, ۲۰۲۲).

رایانش لبه‌ای با کاهش تاخیر در انتقال داده‌ها و امکان تصمیم‌گیری آنی، به‌ویژه در مواقع بحرانی یا نوسانات شدید در شبکه، توانسته است تاب‌آوری انرژی را افزایش دهد. با این حال، هم‌زمان با توسعه این فناوری‌ها، چالش‌هایی در زمینه مقیاس‌پذیری، استانداردسازی و مصرف انرژی خود سیستم‌ها باقی مانده است که مستلزم بررسی‌های دقیق‌تر پژوهشی و تنظیم‌گری پیش‌نگرانه است.

۷.۲ رسیدگی به عدالت و دسترسی در سیستم‌های انرژی

یکی از شکاف‌های مهم در ادبیات، توجه ناکافی به ابعاد اجتماعی کارایی انرژی و نابرابری در دسترسی به فناوری‌های هوشمند است. بسیاری از شهرهای هوشمند با الگوهای نابرابر توسعه مواجه‌اند که منجر به توزیع نامتوازن مزایای نوآوری‌های انرژی میان گروه‌های مختلف می‌شود (Kim & Park, ۲۰۲۲). جوامع حاشیه‌نشین و کم‌درآمد اغلب از زیرساخت‌های هوشمند محروم مانده یا فاقد دانش و منابع لازم برای



مشارکت فعال هستند، که این امر می‌تواند روند گذار به شهرهای هوشمند پایدار را با کندی یا حتی تضاد اجتماعی همراه کند.

برخی از پژوهش‌ها، از جمله Sovacool و همکاران (۲۰۲۳)، بر لزوم اتخاذ رویکردهای «گذارهای انرژی فراگیر» تأکید دارند که در آن سیاست‌گذاری باید مبتنی بر عدالت اجتماعی، برابری دیجیتال و تقویت تاب‌آوری محلی طراحی شود. این امر مستلزم بازنگری در مدل‌های تصمیم‌گیری و لحاظ کردن نیازهای اقشار مختلف، به‌ویژه گروه‌های آسیب‌پذیر، در طراحی سیستم‌های انرژی شهری است.

۷.۳ فرصت‌های پژوهش بین‌رشته‌ای

ماهیت چندوجهی مسئله بهره‌وری انرژی در شهرهای هوشمند، مستلزم هم‌افزایی بین‌رشته‌ای میان حوزه‌های مهندسی برق و کامپیوتر، برنامه‌ریزی شهری، اقتصاد انرژی، جامعه‌شناسی و مطالعات سیاستی است. مطالعات محدود موجود عمدتاً یا فنی‌محور بوده‌اند یا به تحلیل‌های سیاستی بسنده کرده‌اند، در حالی‌که نیاز روزافزون به مدل‌های ترکیبی برای تحلیل دینامیک‌های نهادی، رفتاری و فناورانه احساس می‌شود (Patel & Kumar, ۲۰۲۳).

پژوهش‌های آتی می‌توانند بر تلفیق مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، رویکردهای مشارکتی شهروند-محور، و تحلیل‌های مبتنی بر داده‌های بزرگ متمرکز شوند. همچنین، زمینه‌هایی چون ارزیابی اثرات اخلاقی الگوریتم‌های هوش مصنوعی در مدیریت انرژی، یا تعاملات فرهنگی در پذیرش فناوری‌های هوشمند، عرصه‌هایی کمتر کاوش‌شده‌اند که ظرفیت بالایی برای گسترش دارند.

۷.۴ توصیه‌های سیاستی برای گسترش نوآوری‌ها

برای گسترش اثربخش نوآوری‌های شبکه‌های هوشمند و ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر، سیاست‌گذاری باید از مدل‌های «فناوری‌محور» صرف فراتر رفته و به سیاست‌های «همگرا» با مشارکت ذی‌نفعان متنوع روی آورد. از جمله سیاست‌های پیشنهادشده می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- توسعه یارانه‌های هدفمند برای افزایش دسترسی خانوارهای کم‌درآمد به فناوری‌های صرفه‌جویی در انرژی؛

- تقویت چارچوب‌های قانونی برای حفاظت از داده‌ها و امنیت سایبری در شبکه‌های انرژی؛

- حمایت از پروژه‌های آزمایشی در مقیاس محله‌ای برای آزمون فناوری‌های نوظهور در زمینه‌های

واقعی؛

- تسهیل مشارکت بخش خصوصی در توسعه زیرساخت‌ها از طریق مدل‌های همکاری عمومی-خصوصی (PPP).

- مطالعه Lopez و همکاران (۲۰۲۴) نشان می‌دهد که رویکردهای ترکیبی و تدریجی، که در آن سیاست‌ها با آزمون و ارزیابی در مقیاس کوچک آغاز و به مرور تعمیم می‌یابند، بیشترین بازده و پذیرش را در شهرهای متنوع نشان داده‌اند.

۸- بازتاب‌ها و شکاف‌های انتقادی در ادبیات

ادبیات مربوط به بهره‌وری انرژی در شهرهای هوشمند در یک دهه گذشته گسترش چشمگیری یافته است و توجه فزاینده‌ای به نقش شبکه‌های هوشمند و ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر در این فرآیند شده است. این گسترش با روندهایی

همچون دیجیتالی شدن زیرساخت‌های انرژی، رشد شهرهای مبتنی بر فناوری و افزایش نگرانی‌ها نسبت به تغییرات اقلیمی هم‌راستا بوده است. (International Energy Agency, 2023) با این حال، تحلیل انتقادی منابع علمی موجود نشان می‌دهد که در کنار این پیشرفت‌ها، چندین شکاف مفهومی، کاربردی و بین‌رشته‌ای در این حوزه وجود دارد که نیازمند توجه بیشتر پژوهشگران و سیاست‌گذاران است.

۸.۱ تمرکز فنی‌گرایانه و غفلت از ابعاد اجتماعی

یکی از برجسته‌ترین الگوهای موجود در ادبیات، تمرکز شدید بر ابعاد فنی و مهندسی شبکه‌های هوشمند و سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر است. مطالعات متعددی با محوریت طراحی الگوریتم‌های بهینه‌سازی، معماری سیستم‌های هوشمند، و ارزیابی عملکرد شبکه‌ها انجام شده‌اند. (Wang et al., 2023; Zhang et al., 2022) در حالی که این تلاش‌ها برای پیشرفت فناوری ضروری هستند، اغلب از بررسی پیامدهای اجتماعی، فرهنگی و نهادی این فناوری‌ها غفلت شده است. مسائلی نظیر عدالت در دسترسی، پذیرش اجتماعی، اعتماد عمومی و پویایی‌های قدرت در طراحی و استقرار فناوری، در بسیاری از پژوهش‌ها نادیده گرفته شده‌اند. (Sovacool et al., 2023)

۸.۲ کم‌توجهی به زمینه‌های بومی و تفاوت‌های منطقه‌ای

بیشتر مطالعات موجود تمرکز خود را بر شهرهای پیشرفته در اروپا، آمریکای شمالی و شرق آسیا قرار داده‌اند، در حالی که زمینه‌های بومی و شرایط خاص کشورهای در حال توسعه کمتر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. (Patel & Kumar, 2023) این عدم توازن جغرافیایی باعث شده است که سیاست‌های پیشنهادی و مدل‌های فناورانه در بسیاری از شهرهای جنوبی جهانی (Global South) قابل اجرا یا مؤثر نباشند. برای مثال، مدل‌های هوشمند اروپایی که بر دسترسی عمومی به اینترنت و سواد دیجیتال بالا متکی هستند، ممکن است در مناطق با زیرساخت ضعیف فاقد اثربخشی باشند.

۸.۳ نبود چارچوب‌های تلفیقی و بین‌رشته‌ای

مطالعات موجود غالباً در قالب رشته‌های منفرد نگاشته شده‌اند و رویکردهای بین‌رشته‌ای که فناوری، سیاست، اقتصاد، جامعه‌شناسی و مطالعات محیطی را تلفیق کنند، هنوز در اقلیت هستند. این امر منجر به تولید دانش‌های جزیره‌ای شده که در ارائه راهکارهای جامع برای گذار به سیستم‌های انرژی پایدار شهری ناتوان بوده‌اند. (Lopez et al., 2024) همچنین، فقدان مدل‌های نظری یکپارچه که بتوانند پیوندهای میان زیرساخت، رفتار مصرف‌کننده و سیاست‌گذاری را توضیح دهند، یکی از خلأهای عمده محسوب می‌شود.

۸.۴ نیاز به ارزیابی‌های بلندمدت و سنجش‌پذیر

ادبیات موجود در بسیاری موارد به نتایج کوتاه‌مدت پروژه‌های آزمایشی یا مطالعات شبیه‌سازی شده محدود شده و از تحلیل تأثیرات بلندمدت نوآوری‌ها بر بهره‌وری انرژی غفلت کرده است. برای مثال، تأثیر بلندمدت نصب کنتورهای هوشمند بر تغییر رفتار مصرف‌کنندگان، کاهش واقعی انتشار کربن یا بازگشت سرمایه در طول زمان، کمتر مورد ارزیابی قرار گرفته است. (Kim & Lee, 2023) این خلأ، مانع از تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد برای سیاست‌گذاران در مقیاس شهری و ملی می‌شود.

۸.۵ تضادهای مفهومی در تعریف <<بهره‌وری انرژی>>

در نهایت، یک مسئله کمتر مورد توجه در ادبیات، فقدان توافق مفهومی روشن درباره چیستی بهره‌وری انرژی در بستر شهرهای هوشمند است. برخی منابع آن را بهینه‌سازی فنی مصرف انرژی می‌دانند، در حالی که دیگران بر معیارهای پایداری، عدالت اجتماعی، و کیفیت زندگی تأکید دارند. (Chen et al., 2022) این ابهام مفهومی موجب دشواری در ارزیابی و مقایسه سیاست‌ها و پروژه‌های مختلف در زمینه بهره‌وری انرژی می‌شود.

۹- بحث

همگرایی نوآوری‌های شبکه‌های هوشمند و ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر به‌عنوان مسیر بنیادینی در بازآرایی نظام‌های انرژی شهری ظاهر شده است؛ با این حال، ادبیات بررسی‌شده نشان می‌دهد که این هم‌افزایی فناورانه نه به‌صورت خودکار تحقق می‌یابد و نه در همه زمینه‌ها موفقیت‌آمیز است. مطالعات مرور شده به‌طور جمعی حاکی از آن‌اند که اگرچه فناوری‌های هوشمندی مانند مدیریت شبکه مبتنی بر هوش مصنوعی، زیرساخت‌های اندازه‌گیری پیشرفته (AMI) و سازوکارهای قیمت‌گذاری پویا توانسته‌اند بهبودهایی قابل‌سنجش در بهره‌وری ایجاد کنند، اما اثربخشی آن‌ها وابسته به شرایط زمینه‌ای، ساختارهای نهادی و مشارکت کاربران است. این یافته‌ها از این دیدگاه حمایت می‌کنند که بهره‌وری انرژی در شهرهای هوشمند نه صرفاً حاصل استقرار فناوری، بلکه نتیجه‌ای نظام‌مند از سازگاری نهادی و آمادگی زیرساختی است. به‌عنوان مثال، مطالعه موردی سنگاپور نشان می‌دهد که هماهنگی سیاستی و بلوغ دیجیتال چگونه می‌تواند پتانسیل بهینه‌سازی پیش‌بینی‌محور مصرف انرژی را آزاد سازد (Wang et al., ۲۰۲۳)، در حالی که شهرهایی با حکمرانی پراکنده یا زیرساخت‌های فرسوده، اغلب در دستیابی به چنین دستاوردهایی ناکام مانده‌اند.

یکی از الگوهای ظریف‌تر در ادبیات، تنش مداوم میان نوآوری و شمول‌پذیری است. در حالی که گفتمان غالب، شبکه‌های هوشمند را به‌عنوان ابزارهای خنثای بهره‌وری معرفی می‌کند، مطالعات تجربی از شهرهایی مانند سنول (Kim & Park, ۲۰۲۲) و شهرهای هند (Patel & Kumar, ۲۰۲۳) نشان می‌دهند که دسترسی نابرابر به زیرساخت‌های هوشمند می‌تواند نابرابری‌های فضایی و اجتماعی را تشدید کند. این یافته‌ها بر ضرورت نگاه به گذارهای انرژی به‌عنوان فرآیندهای اجتماعی-فناوری، نه ارتقاءهای صرفاً تکنولوژیک، تأکید دارند. تعامل میان اعتماد مصرف‌کننده، سواد دیجیتال و مشوق‌های اقتصادی نقش مهمی در شکل‌گیری رفتار پذیرش دارد و با نتایج مدل پذیرش فناوری (TAM) در شهرهای آسیایی همخوانی دارد (Kim & Lee, ۲۰۲۳). از سوی دیگر، ادغام منابع تجدیدپذیر—در عین اهمیت آن برای کاهش کربن—با چالش‌هایی مانند ناپایداری تولید، بی‌ثباتی شبکه و محدودیت ذخیره‌سازی مواجه است که امکان مقیاس‌پذیری مدل‌های بهره‌وری انرژی در شهرهای هوشمند را پیچیده می‌سازد. بنابراین، وعده سیستم‌های هم‌افزا مشروط به آن است که نوآوری فنی در دل برنامه‌ریزی شهری فراگیر و مقاوم نهادینه شود.

پیامدهای گسترده‌تر این یافته‌ها، حکایت از یک تغییر پارادایمی در فهم بهره‌وری انرژی در دستورکار شهرهای هوشمند دارند. بهره‌وری دیگر نمی‌تواند صرفاً به بهینه‌سازی ورودی-خروجی تقلیل یابد، بلکه باید به‌عنوان تعادلی پویا میان حوزه‌های فناورانه، رفتاری و حکمرانی درک شود. مدل‌های نظری همچون چارچوب سیستم‌های اجتماعی-فناوری (STS) و نظریه گذار انرژی، پیچیدگی چندلایه این فرآیند را روشن می‌سازند و نشان می‌دهند که موفقیت در ادغام شبکه‌های هوشمند و منابع تجدیدپذیر، مستلزم نوآوری هم‌زمان در سیاست، ساختار بازار و هنجارهای فرهنگی است. افزون بر این، گفتمان نوظهور پیرامون عدالت انرژی و اخلاق داده—به‌ویژه در واکنش به تهدیدات امنیت سایبری و نگرانی‌های مربوط به نظارت دیجیتال (Gupta et al., ۲۰۲۴; Sovacool et al., ۲۰۲۳)—نشان می‌دهد که پیگیری شهرهای هوشمند کارآمد در انرژی نه فقط مأموریتی فناورانه، بلکه کنشی هنجاری است. از این منظر، ادبیات علمی ما را فرا می‌خواند تا بپرسیم نوآوری در خدمت چه کسانی است، چه ارزش‌هایی در طراحی فناورانه نهادینه شده‌اند، و چگونه می‌توان آینده‌های انرژی عادلانه‌تری را به‌صورت جمعی و آگاهانه ساخت.

۱۰- نتیجه‌گیری

مطالعات بررسی‌شده نشان می‌دهند که نوآوری در شبکه‌های هوشمند و ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌طور فزاینده‌ای به‌عنوان ابزارهای کلیدی در ارتقاء بهره‌وری انرژی در شهرهای هوشمند مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در میان فناوری‌های

بررسی شده، زیرساخت‌های اندازه‌گیری پیشرفته (AMI)، الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی تقاضا، سامانه‌های پاسخ به تقاضا و راهکارهای ذخیره‌سازی انرژی از جمله اجزای تکرار شونده بوده‌اند. این فناوری‌ها با هدف بهینه‌سازی مصرف انرژی، کاهش بار اوج و افزایش انعطاف‌پذیری شبکه طراحی شده‌اند و نمونه‌های مستندی از بهبود بهره‌وری انرژی در شهرهایی مانند سنگاپور، کپنهاگ و شانگهای را ارائه داده‌اند. همچنین، در مطالعات مختلف تأکید شده است که یکپارچگی میکروشبکه‌های خورشیدی، استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و ارتقای قابلیت پیش‌بینی در عرضه و تقاضا، از طریق شبکه‌های هوشمند به‌طور معناداری مصرف انرژی را کاهش داده و سهم انرژی‌های تجدیدپذیر را افزایش داده است.

بررسی ادبیات همچنین نشان می‌دهد که موانع فنی، اقتصادی، اجتماعی و نهادی بر بهره‌وری انرژی در شهرهای هوشمند تأثیرگذار بوده‌اند. از جمله چالش‌های پرتکرار، هزینه‌های بالای استقرار شبکه‌های هوشمند، ناپایداری منابع تجدیدپذیر، کمبود زیرساخت‌های ذخیره‌سازی و مشکلات استانداردسازی سیستم‌ها گزارش شده‌اند. همچنین، نابرابری در دسترسی به فناوری‌های کارآمد، شکاف‌های دیجیتال، و بی‌اعتمادی مصرف‌کنندگان نسبت به داده‌کاوی و حریم خصوصی در شبکه‌های هوشمند، از عوامل اجتماعی مهمی بوده‌اند که در پذیرش و کارکرد مؤثر این نوآوری‌ها تأثیرگذار هستند. مطالعات متعددی نیز نشان داده‌اند که موفقیت بهره‌وری انرژی در شهرهای هوشمند، نیازمند هماهنگی چندلایه‌ای بین نهادهای فنی، سیاست‌گذاران و شهروندان است و پذیرش اجتماعی نقش مهمی در تحقق اهداف مورد انتظار دارد.

علاوه بر این، تحلیل ادبیات حاکی از آن است که مدل‌ها و چارچوب‌های نظری مختلفی برای درک و تحلیل بهره‌وری انرژی در شهرهای هوشمند به کار رفته‌اند. نظریه سیستم‌های اجتماعی-فناوری (STS)، نظریه گذار انرژی و مدل پذیرش فناوری (TAM)، از جمله چارچوب‌هایی هستند که به بررسی نقش عوامل رفتاری، نهادی و فناورانه در توسعه و استقرار این سیستم‌ها پرداخته‌اند. الگوهای مرور شده نشان می‌دهند که بسیاری از شهرهای هوشمند در حال حرکت به سوی ساختارهای انرژی غیرمتمرکز و داده‌محور هستند که در آن‌ها یکپارچگی منابع تجدیدپذیر و هوشمندسازی زیرساخت‌ها هم‌زمان پیگیری می‌شوند. به‌طور کلی، یافته‌ها نشان‌دهنده آن هستند که بهره‌وری انرژی در شهرهای هوشمند، نتیجه تعاملات پیچیده میان فناوری، سیاست و رفتار انسانی است که در قالب سیستم‌های چندبعدی، در حال شکل‌گیری و تحول‌اند.

پیامدها برای توسعه شهرهای هوشمند بر اساس یافته‌های بررسی شده، بهره‌وری انرژی در شهرهای هوشمند حاصل ترکیب متوازن میان نوآوری‌های فناورانه و سازوکارهای نهادی است. در این میان، شبکه‌های هوشمند و یکپارچگی انرژی‌های تجدیدپذیر به‌عنوان دو مؤلفه مکمل، ظرفیت قابل توجهی برای بازآرایی زیرساخت‌های انرژی شهری دارند. استقرار موفق این فناوری‌ها، در بستری که از زیرساخت دیجیتال قوی، هماهنگی میان نهادها، و ظرفیت مدیریت داده برخوردارند، به کاهش مصرف انرژی، بهینه‌سازی توزیع و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای انجامیده است. مواردی همچون استفاده از الگوریتم‌های پیش‌بینی مبتنی بر هوش مصنوعی، سیستم‌های پاسخ به تقاضا، و میکروشبکه‌های خورشیدی در شهرهایی نظیر سنگاپور و کپنهاگ، شواهد تجربی از عملکرد بالای این مدل‌ها را نشان داده‌اند. در بستر ایران نیز، شهرهایی با قابلیت بالای تاب‌آوری انرژی و تراکم جمعیتی بالا می‌توانند از این الگوها برای ارتقای بهره‌وری انرژی در قالب پروژه‌های پایلوت بهره بگیرند.

با این حال، نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که تحقق کامل کارایی انرژی در شهرهای هوشمند مستلزم غلبه بر موانع ساختاری، مالی، فنی و اجتماعی است. ضعف در هماهنگی بین سازمانی، محدودیت منابع مالی برای سرمایه‌گذاری اولیه در زیرساخت‌های هوشمند، نابرابری در دسترسی به فناوری، و نگرانی‌های مربوط به امنیت سایبری و حریم خصوصی داده‌ها، در بسیاری از شهرهای جهان به‌عنوان چالش‌های برجسته گزارش شده‌اند. در ایران، مسائل مشابهی مانند فرسودگی

زیرساخت‌های انرژی، عدم دسترسی برابر به فناوری‌های دیجیتال و ضعف در توسعه چارچوب‌های استاندارد فنی، می‌تواند مانع اجرای یکپارچه چنین برنامه‌هایی شود. با توجه به پیشرفت‌های پراکنده و برخی تجارب موفق در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر و شهرهای هوشمند، یافته‌های این مرور می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای بازنگری سیاست‌های شهری در راستای توسعه انرژی‌محور و پایدار به‌کار گرفته شود.

فراخوان برای نوآوری و همکاری مستمر یافته‌های این مقاله مروری نشان می‌دهد که بهره‌وری انرژی در شهرهای هوشمند، نیازمند رویکردی میان‌رشته‌ای و هماهنگ است که فناوری، سیاست و مشارکت اجتماعی را در تعامل مستمر قرار دهد. چارچوب‌های نظری همچون مدل گذار انرژی، نظریه سیستم‌های اجتماعی-فناوری و مدل پذیرش فناوری، همگی بر اهمیت تعامل بازیگران مختلف در تحقق بهره‌وری انرژی تأکید دارند. از سوی دیگر، مطالعات موردی نشان داده‌اند که پروژه‌هایی با همکاری نهادهای دولتی، صنعت، دانشگاه و جامعه مدنی از شانس بیشتری برای موفقیت برخوردار بوده‌اند. به‌ویژه در زمینه شبکه‌های هوشمند، هماهنگی میان ارائه‌دهندگان خدمات انرژی، تنظیم‌گران و مصرف‌کنندگان، عنصری کلیدی در ارتقای بهره‌وری گزارش شده است. در بستر ایران، ظرفیت‌های علمی و صنعتی موجود در حوزه انرژی و فناوری اطلاعات می‌تواند با ایجاد سازوکارهای مشترک میان شهرداری‌ها، وزارتخانه‌ها و دانشگاه‌ها، بستر لازم برای نوآوری مشترک و توسعه انرژی پایدار را فراهم آورد.

همچنین، بخش قابل توجهی از مطالعات موردی و مفهومی مرور شده، بر نقش آموزش عمومی، طراحی انسان‌محور، سیاست‌های تشویقی و عدالت در دسترسی به فناوری تأکید داشته‌اند. بدون درنظر گرفتن ابعاد رفتاری و اجتماعی، نوآوری‌های فنی ممکن است با مقاومت عمومی مواجه شوند و اثربخشی مورد انتظار را نداشته باشند. بدین ترتیب، همکاری مستمر میان نهادهای پژوهشی، نهادهای اجرایی و جامعه، برای تدوین سیاست‌های انرژی هوشمند که از نظر اجتماعی پذیرفتنی و از نظر اقتصادی پایدار باشند، حیاتی است. یافته‌های این مرور می‌تواند مبنای طراحی برنامه‌های آگاهی‌رسانی، چارچوب‌های اخلاقی و مدل‌های کسب‌وکار مشارکتی در ایران باشد تا گذار به سوی شهرهای هوشمند بهره‌ور در انرژی، نه صرفاً در سطح فناوری، بلکه در سطح حکمرانی و فرهنگ عمومی نیز تحقق یابد.

منابع

1. Chen, X., Wang, Y., & Zhang, H. (۲۰۲۲). Dynamic load balancing in smart grids: A case study of Shanghai. *Journal of Cleaner Production*, ۳۷۰, Article ۱۳۳۱۴۵. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133145>
2. Electric Power Research Institute. (۲۰۰۳). *Smart grid roadmap*. EPRI.
3. Faruqui, A., Sergici, S., & Warner, C. (۲۰۱۹). Dynamic pricing and smart grids: Evidence from Toronto. *Energy Economics*, ۸۲, ۹۴-۱۰۵. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.05.019>
4. Gupta, R., Sharma, P., & Singh, A. (۲۰۲۴). Cybersecurity vulnerabilities in smart grid infrastructure: Challenges and solutions. *Applied Energy*, ۳۴۰, Article ۱۲۱۱۳۴. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121134>
5. International Energy Agency. (۲۰۰۸). *Energy efficiency in cities*. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-in-cities>
6. International Energy Agency. (۲۰۲۳). *World energy outlook ۲۰۲۳*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>

7. International Energy Agency. (۲۰۲۴). *Global energy and CO₂ emissions report*. [https://www.iea.org/reports/global-energy-and-co₂-emissions-report-۲۰۲۴](https://www.iea.org/reports/global-energy-and-co2-emissions-report-2024)
8. Jacobson, M. Z., & Delucchi, M. A. (۲۰۱۱). Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. *Energy Policy*, *۳۹*(۳), ۱۱۵۴–۱۱۶۹. [https://doi.org/10.1016/j.enpol.۲۰۱۱.۰۱.۰۴۰](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.01.040)
9. Kim, H., & Park, J. (۲۰۲۲). Social equity in smart grid deployment: A case study of Seoul. *Urban Studies*, *۵۹*(۳), ۴۵۰–۴۶۷. <https://doi.org/10.1080/00420980.2021.2007822>
10. Kim, S., & Lee, J. (۲۰۲۳). Consumer adoption of smart meters: Applying the Technology Acceptance Model in Seoul. *Energy Reports*, *۹*, ۲۱۰–۲۲۲. [https://doi.org/10.1016/j.egyr.۲۰۲۳.۰۱.۰۲۰](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.101020)
11. Kloppenburg, S., & Boekelo, M. (۲۰۲۲). Blockchain as energy infrastructure: Towards a critical research agenda. *Energy Research & Social Science*, *۸۵*, Article ۱۰۲۳۹۵. [https://doi.org/10.1016/j.erss.۲۰۲۱.۱۰.۲۳۹۵](https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102395)
12. Li, Y., & Chen, X. (۲۰۲۴). Battery storage for renewable integration in Tokyo's smart city initiatives. *Journal of Energy Storage*, *۶۵*, Article ۱۰۷۱۱۹. [https://doi.org/10.1016/j.est.۲۰۲۳.۱۰.۷۱۱۹](https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107119)
13. Li, Y., Chen, X., & Wang, Z. (۲۰۲۱). Smart grid technologies and demand response: Evidence from Singapore. *Energy Policy*, *۱۵۴*, Article ۱۱۲۱۲۵. [https://doi.org/10.1016/j.enpol.۲۰۲۱.۱۱.۲۱۲۵](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112125)
14. Lopez, M., Garcia, R., & Torres, A. (۲۰۲۲). Centralized vs. decentralized energy systems: Lessons from Singapore. *Energy Policy*, *۱۶۸*, Article ۱۱۳۱۲۷. [https://doi.org/10.1016/j.enpol.۲۰۲۲.۱۱.۳۱۲۷](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113127)
15. Lopez, M., Garcia, R., & Torres, A. (۲۰۲۴). Integrated energy management in smart cities: Lessons from Singapore. *Urban Studies*, *۶۱*(۳), ۴۵۰–۴۶۷. <https://doi.org/10.1080/00420980.2023.2234510>
16. Lovins, A. B. (۱۹۷۷). *Soft energy paths: Toward a durable peace*. Ballinger Publishing Company.
17. Müller, F., & Welp, I. (۲۰۲۱). Balancing renewable energy supply and demand in German smart cities. *Renewable Energy*, *۱۷۲*, ۹۸–۱۱۰. [https://doi.org/10.1016/j.renene.۲۰۲۱.۰۲.۱۰۳](https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.103)
18. Patel, R., & Kumar, S. (۲۰۲۳). Socio-technical challenges in smart grid adoption: Evidence from Indian smart cities. *Sustainable Cities and Society*, *۹۸*, Article ۱۰۴۱۱۹. [https://doi.org/10.1016/j.scs.۲۰۲۳.۱۰.۴۱۱۹](https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104119)
19. Sovacool, B. K., Del Rio, D. F., & Griffiths, S. (۲۰۲۱). Inclusive energy transitions: The critical role of equity in smart city energy systems. *Nature Energy*, *۶*(۴), ۳۴۱–۳۴۹. [https://doi.org/10.1038/s41560-۰۰۸۰۱-۰۲۱-۴۱۵۶۰](https://doi.org/10.1038/s41560-021-04156-0)
20. Sovacool, B. K., Del Rio, D. F., & Griffiths, S. (۲۰۲۳). Data privacy in smart cities: Regulatory challenges and consumer concerns. *Nature Energy*, *۸*(۴), ۳۴۱–۳۴۹. [https://doi.org/10.1038/s41560-۰۲۳-۰۱۲۴۷-۲](https://doi.org/10.1038/s41560-023-01247-2)
21. van der Graaf, S., Ballon, P., & Driesse, M. (۲۰۲۱). IoT-enabled energy efficiency in Amsterdam's smart city. *Sustainable Cities and Society*, *۷۳*, Article ۱۰۳۱۱۵. [https://doi.org/10.1016/j.scs.۲۰۲۱.۱۰.۳۱۱۵](https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103115)
22. Wang, X., Li, Z., & Chen, Y. (۲۰۲۳). AI-driven smart grids: Enhancing energy efficiency in Singapore. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *۱۸۲*, Article ۱۱۳۱۲۷. [https://doi.org/10.1016/j.rser.۲۰۲۳.۱۱.۳۱۲۷](https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113127)
23. Zhang, L., Liu, Q., & Yang, T. (۲۰۲۲). Solar microgrids in urban settings: A case study of Copenhagen. *Renewable Energy*, *۱۸۷*, ۹۸–۱۱۰. [https://doi.org/10.1016/j.renene.۲۰۲۲.۰۱.۰۳۱](https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.101031)