

گامنامه انجمن علمی شبکه هوشمند انرژی ایران

شماره ۱۳ - آذر ماه ۱۴۰۴

آنچه در این شماره می خوانیم:

- ❖ چارچوب هفت بعدی گذار انرژی در شهرهای هوشمند چیست؟
- ❖ نقش هاب های انرژی و رویکرد CASoS در غیرمتمرکزسازی و تاب آوری شبکه
- ❖ مردم محوری انرژی: چرا شهروندان باید در کانون گذار انرژی باشند؟





صاحب امتیاز: انجمن شبکه هوشمند انرژی ایران

مدیر مسئول: دکتر علیرضا فریدونیان

تیم اجرایی نشریه: سعید کنفش دوززاده - محمد اسلامی

❖ گذار انرژی در شهرهای هوشمند: چارچوب هفت‌بعدی (7D) برای توانمندسازی شهروندان انرژی

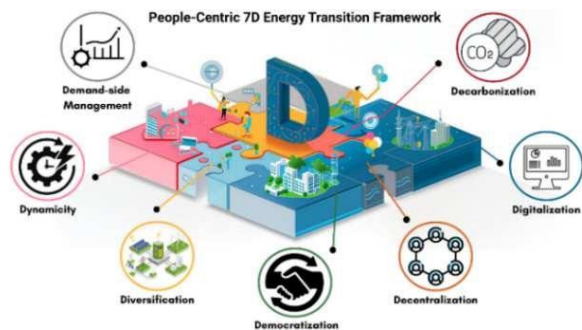
سیستم‌های انرژی این روزها تحت فشار مضاعف رشد شهرنشینی و بحران اقلیمی در حال یک دگرگونی بنیادین است. وابستگی چند دهه‌ای به سوخت‌های فسیلی، محدودیت‌های جدی از نظر پایداری زیست‌محیطی و امنیت انرژی را آشکار کرده و گذار انرژی را از یک انتخاب به یک ضرورت انکارناپذیر تبدیل کرده است. نگاهی به تاریخ نشان می‌دهد که گذارهای انرژی همواره متأثر از نیازهای اجتماعی و رخدادهای جهانی بوده‌اند؛ از عبور بریتانیای قرن هفدهم از چوب به زغال‌سنگ که وابستگی به سوخت فسیلی و رشد صنعتی را رقم زد، تا گذار به نفت، گاز طبیعی و سپس انرژی هسته‌ای که بیشتر مدیون نوآوری فناورانه بود تا کمبود منابع. شوک‌های نفتی دهه ۱۹۷۰ میلادی نیز نقطه‌عطفی بود که نگاه جهانی به امنیت انرژی، هزینه و مقیاس سوخت‌های جایگزین را برای همیشه دگرگون کرد.

گذار کنونی اما پیچیده‌ترین و فوری‌ترین دگرگونی انرژی در تاریخ بشر به شمار می‌آید، حرکت از سیستم‌های متکی بر سوخت فسیلی به سمت منابع تجدیدپذیر مانند خورشید، باد، زیست‌سوخت و هیدروژن. برخلاف گذارهای پیشین که محرک آن‌ها عمدتاً فناوری بود، این

گذار را عمدتاً نگرانی از تغییر اقلیم و اهداف خنثی‌سازی کربن به پیش می‌راند. همه‌گیری کووید-۱۹ و تنش‌های ژئوپلیتیک اخیر نیز تلاش کشورها برای دستیابی به توان تجدیدپذیر بومی را شتاب بخشیده‌اند. پژوهش‌های تازه نشان می‌دهند که گذار انرژی موفق باید فراتر از راه‌حل‌های صرفاً فناورانه برود، رویکردی میان‌رشته‌ای در پیش گیرد و میان کاهش گازهای گلخانه‌ای، قابلیت‌اطمینان تأمین و قیمت‌گذاری اجتماعاً پذیرفتنی توازن برقرار کند. در همین راستا، پژوهش‌ها به‌طور فزاینده از رویکردهای فناوری‌محور به رویکردهای مردم‌محور گرایش یافته‌اند، چرا که در نهایت این انسان‌ها هستند که انرژی مصرف می‌کنند، نه ساختمان‌ها؛ و گذار پایدار باید انگیزه‌های رفتاری شهروندان را از طریق مشارکت شخصی‌سازی‌شده هدف بگیرد.

در ادبیات موضوع، روند روشنی به‌سوی چارچوب‌های چندبعدی دیده می‌شود که هر بعد آن‌ها با حرف انگلیسی D آغاز می‌شود؛ روندی که از مدل‌های تک‌بعدی آغاز شده و به‌تدریج به مدل‌های دو تا پنج‌بعدی رسیده است. برخی پژوهشگران چارچوب صریح پنج‌بعدی را برای سیاست انرژی آلمان ارائه کرده‌اند که کربن‌زدایی، دیجیتالی‌سازی، غیرمتمرکزسازی، مردم‌محوری و تنوع‌بخشی به خدمات را در بر می‌گیرد و بر کارایی، توسعه تجدیدپذیرها، سکوه‌ای دیجیتال، کنتورهای هوشمند و بلاک‌چین متمرکز است. در پژوهشی دیگر،

جریان‌های انرژی و مردم‌محوری سیستم‌های انرژی می‌پردازد. این هفت بعد در کنار هم، مبنایی جامع برای بازاندیشی در شیوه دستیابی شهرها به آینده انرژی پایدار از طریق راهکارهای شبکه هوشمند فراهم می‌کنند. رویکرد این پژوهش بر پایه سیستم پیچیده تطبیقی از سیستم‌ها (CASoS) و سیستم‌های انرژی چندحاملی (MCES) استوار است و هدف نهایی آن افزایش کارایی شبکه هوشمند از مسیر رویکردی غیرمتمرکز، از پایین به بالا و مردم‌محور است.



شکل ۱ چارچوب مردم‌محور هفت‌بعدی (7D) گذار انرژی

❖ کربن‌زدایی (Decarbonization)

کربن‌زدایی به معنای کاهش شدت کربن در ترکیب انرژی جهانی از طریق گذار به منابع پاک و تجدیدپذیر است؛ روندی که توافقات بین‌المللی اقلیمی آن را شتاب داده‌اند. در چارچوب پیشنهادی، کربن‌زدایی از مسیر سیاست‌گذاری برای عبور از سیستم‌های متکی بر سوخت فسیلی، ترویج منابع تجدیدپذیر که انتشار و اتلاف انرژی را کاهش می‌دهند و به‌کارگیری فناوری‌های متنوع

مدل «5D کلان‌روندها» با محورهای غیرمتمرکزسازی، دیجیتال‌سازی، کربن‌زدایی، مقررات‌زدایی و مردم‌محوری معرفی شده است. در کنار این‌ها، سه مطالعه چارچوب چهاربعدی را دنبال کرده‌اند از جمله تدوین کتاب‌محور «چهار D گذار انرژی» با محورهای کربن‌زدایی، غیرمتمرکزسازی، دیجیتال‌سازی و کاهش مصرف و چهار مطالعه نیز رویکرد سه‌بعدی را برگزیده‌اند، برای نمونه با تمرکز بر گذار مبتنی بر بلاک‌چین در ژاپن یا مسیرهای جهانی گذار الکتریسیته. دو پژوهش نیز صرفاً به دو بعد عمدتاً دیجیتال‌سازی و غیرمتمرکزسازی، یا کربن‌زدایی و دیجیتال‌سازی بسنده کرده‌اند.

با این حال، اغلب این پژوهش‌ها تنها به یک تا پنج بعد به‌طور هم‌زمان می‌پردازند و درک جامعی از پیوندهای پیچیده فنی، محیط‌زیستی و اجتماعی گذار انرژی شهری ارائه نمی‌دهند. مهم‌تر آنکه بعد اجتماعی و رویکرد مردم‌محور یعنی مشارکت شهروندان، عدالت اجتماعی و حضور فعال مردم در بیشتر این چارچوب‌ها کم‌رنگ مانده است، حال آنکه در شهرهای هوشمند، کارآمدی واقعی هر سیستم انرژی در گرو پذیرش و مشارکت جامعه است. برای پر کردن این خلأ، پژوهش مرجع یک چارچوب تحلیلی هفت‌بعدی (7D) معرفی می‌کند که هم‌زمان به هفت محور به‌هم‌پیوسته کربن‌زدایی منابع انرژی، دیجیتال‌سازی زیرساخت، غیرمتمرکزسازی تولید، تنوع‌بخشی منابع، مدیریت سمت تقاضا، پویایی

ممکن می‌سازد و زیربنای لازم برای سایر ابعاد به‌ویژه غیرمتمرکزسازی و مدیریت سمت تقاضا را فراهم می‌کند. کنتورهای هوشمند، حسگرهای اینترنت اشیا و پلتفرم‌های تحلیل داده به بهره‌برداران شبکه امکان می‌دهند الگوی مصرف را در سطح لحظه‌ای رصد کنند و پیش از بروز اختلال، اقدامات پیشگیرانه انجام دهند. بلاک‌چین نیز با فراهم کردن پایگاه داده توزیع‌شده و قابل‌اعتماد، زمینه مبادله همتابه‌همتای انرژی میان تولید-مصرف‌کنندگان را بدون نیاز به واسطه متمرکز فراهم می‌سازد.

❖ غیرمتمرکزسازی (Decentralization) و رویکرد CASoS

غیرمتمرکزسازی، جابه‌جایی بنیادین از تولید متمرکز به منابع توزیع‌شده انرژی است که ریزشبکه‌ها، بازارهای محلی انرژی و نقش تولید-مصرف‌کننده را برای تقویت تاب‌آوری و کنترل محلی شبکه فعال می‌کند. این پژوهش برای پیاده‌سازی عملیاتی این بعد، مفهوم سیستم‌های پیچیده تطبیقی از سیستم‌ها یا CASoS را به کار می‌گیرد. مجموعه‌ای از سیستم‌های مستقل که با حفظ خودمختاری خود، در تعامل با یکدیگر، رفتاری نوظهور و کارکردی یکپارچه پدید می‌آورند. در حوزه مهندسی برق، چنین سیستمی شامل واحدهای تولید، خطوط انتقال، شبکه‌های توزیع و سیستم‌های کنترل است که برای

ذخیره‌سازی انرژی محقق می‌شود. مفهوم هاب انرژی که ترکیب‌کننده چند حامل انرژی و دربردارنده سیستم‌های نوین ذخیره‌سازی و تبدیل انرژی است، می‌تواند عدم قطعیت ناشی از منابع تجدیدپذیر را مدیریت کرده و یکپارچگی آن‌ها را با شبکه توزیع تسهیل کند.

در عمل، این بعد را می‌توان در قالب سیاست‌های جایگزینی نیروگاه‌های سوخت‌فسیلی با مزارع خورشیدی و بادی، توسعه زیرساخت شارژ خودروهای برقی و بهره‌گیری از باتری‌ها و سیستم‌های ذخیره حرارتی برای جبران ناپایداری تولید تجدیدپذیر مشاهده کرد. هرچه سهم منابع پاک در سبد انرژی شهر بیشتر شود، وابستگی به واردات سوخت‌های فسیلی و ریسک‌های ژئوپلیتیک مرتبط با آن نیز کاهش می‌یابد.

❖ دیجیتالی‌سازی (Digitalization)

دیجیتالی‌سازی به بازآرایی عمیق سیستم‌های انرژی و زندگی اجتماعی حول محور زیرساخت‌های ارتباط دیجیتالی اشاره دارد؛ فرایندی که با تکیه بر اینترنت اشیا (IoT)، هوش مصنوعی و بلاک‌چین، محیطی متصل، داده‌محور و تعامل‌پذیر می‌سازد که برای تحقق آینده غیرمتمرکز انرژی ضروری است. در چارچوب پیشنهادی، پیشگامی در استقرار فناوری‌های هوشمند و دیجیتالی، پیاده‌سازی شبکه‌های هوشمند و راهکارهای اینترنت اشیا را برای بهینه‌سازی تولید، توزیع و مصرف انرژی

هفت نوع هاب خرد انرژی (مسکونی، صنعتی، تجاری، اداری، آموزشی، کشاورزی و درمانی) گرد شهروند شکل می‌گیرند.

❖ تنوع‌بخشی (Diversification)

تنوع‌بخشی به معنای گسترش دامنه سیستم‌های انرژی در ترکیب منابع، حامل‌ها و ساختارهای بازار است تا بهره‌برداری پایدار، افزایش تاب‌آوری و دستیابی به پیامدهای مستحکم فنی، محیط‌زیستی و اقتصادی تضمین شود. شهر هوشمند مبتنی بر هاب انرژی، با یکپارچه‌سازی و مدیریت ترکیبی متنوع از منابع، از جمله خورشید، باد، آب و دیگر فناوری‌های پاک این بعد را محقق می‌سازد و تاب‌آوری و قابلیت‌اطمینان شبکه را در برابر نوسانات هر یک از منابع منفرد ارتقا می‌دهد.

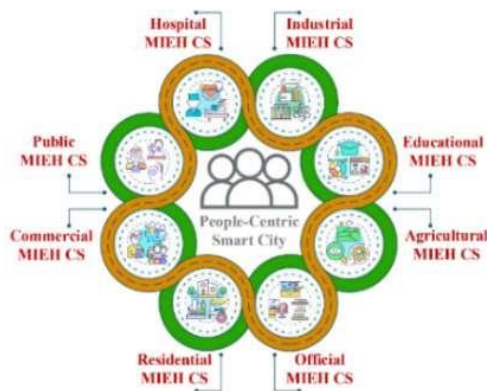
این تنوع تنها به منابع تولید محدود نمی‌شود، بلکه حامل‌های انرژی (برق، گرما، گاز، هیدروژن) و نیز ساختارهای بازار از بازارهای عمده‌فروشی گرفته تا بازارهای محلی همسایگی را نیز در بر می‌گیرد. چنین تنوعی، شهر را در برابر شوک‌های قیمتی یا اختلال در یک منبع یا حامل خاص مصون‌تر می‌سازد.

❖ مدیریت سمت تقاضا (Demand-Side Management)

مدیریت سمت تقاضا به مجموعه اقداماتی گفته می‌شود که مصرف‌کنندگان نهایی را برای تغییر الگوی مصرف در

بهینه‌سازی شبکه، یکپارچه‌سازی انرژی تجدیدپذیر و توسعه فناوری‌های شبکه هوشمند با یکدیگر همکاری می‌کنند.

بر همین اساس، یک شهر متشکل از نواحی مسکونی، صنعتی، تجاری، اداری، آموزشی، کشاورزی و درمانی را می‌توان به مثابه یک هاب کلان انرژی (MAEH) در نظر گرفت که از تعدادی هاب خرد انرژی (MIEH) برای هر ناحیه تشکیل شده است. این چارچوب پنج معیار شناخته‌شده مایر برای تحقق مفهوم CASoS، یعنی استقلال عملیاتی و مدیریتی زیرسامانه‌ها، توسعه تکاملی، پراکندگی جغرافیایی و رفتار نوظهور را برآورده می‌سازد. مدیریت زیرساخت انرژی بر پایه چنین هاب کلانی، شهر را به تعریف شهر هوشمند نزدیک‌تر می‌کند. شهری سالم و کارآمد از نظر انرژی که تا حد امکان از منابع تجدیدپذیر بهره می‌گیرد و در استقرار فناوری‌های هوشمند پیشگام است.



شکل ۲ شهر هوشمند مبتنی بر هاب انرژی در چارچوب CASoS

تاب‌آوری و پایداری است. یکی از معیارهای مایر برای تحقق CASoS، توسعه تکاملی است. از آنجا که هر هاب خرد انرژی می‌تواند به‌مرور زمان و متناسب با طول عمر تجهیزات، رشد تقاضا، شهرنشینی و گسترش زمین شهری ساخته یا توسعه یابد، ماهیت پویای چشم‌انداز انرژی و سازگاری آن با تغییرات فناوری، سیاست‌گذاری و بازار در همین چارچوب محقق می‌شود.

به‌بیان دیگر، شبکه انرژی شهر هوشمند هرگز حالتی ایستا ندارد. افزودن ساختمان‌های جدید، جایگزینی تجهیزات فرسوده، تغییر تعرفه‌ها یا مقررات، و نوسانات آب‌وهوایی همگی معماری انرژی شهر را به‌طور پیوسته بازتعریف می‌کنند. طراحی موفق باید از ابتدا این تحول مداوم را پیش‌بینی و امکان گسترش پیمان‌های هاب‌های انرژی را در طول زمان فراهم کند.

❖ مردم‌محوری (Democratization)

مردم‌محوری به دگرگونی اجتماعی-سیاسی و نهادی به‌سوی حکمرانی فراگیرتر و مشارکت عمومی بیشتر در تصمیم‌گیری و مالکیت انرژی اشاره دارد؛ بعدی حیاتی برای هم‌راستاسازی گذار انرژی با عدالت اجتماعی و کسب مجوز اجتماعی برای اجرای آن. شهر هوشمند مردم‌محور در حوزه انرژی با پذیرش مفهوم CASoS و روش‌های غیرمتمرکز که مشارکت عمومی در توسعه، مدیریت و بهره‌برداری از زیرساخت انرژی را تسهیل

واکنش به سیگنال‌های شبکه ترغیب می‌کند؛ سازوکاری کلیدی برای هموارسازی منحنی بار، بهینه‌سازی یکپارچگی تجدیدپذیرها و توازن عرضه و تقاضا. با توسعه سیستم‌های چندانرژی (MES) که در آن‌ها برق، گرما، گاز طبیعی و دیگر حامل‌های انرژی به هم متصل می‌شوند، مفهوم پاسخ تقاضای یکپارچه (IDR) شکل می‌گیرد. در این رویکرد، مشترکان می‌توانند نه تنها با کاهش یا جابه‌جایی زمانی مصرف به ساعات کم‌باری، بلکه با تغییر نوع حامل انرژی مصرفی نیز به مدیریت هوشمندانه مصرف در سمت خود کمک کنند؛ راهبردی که کارایی و پایداری انرژی را هم‌زمان تقویت می‌کند.

برای نمونه، در ساعات اوج بار، مشترکان صنعتی یا خانگی می‌توانند مصرف تهویه یا شارژ خودروی برقی خود را به تأخیر بیندازند یا بخشی از تقاضای گرمایشی را از گاز طبیعی به برق ذخیره‌شده در باتری منتقل کنند. چنین انعطافی هزینه سرمایه‌گذاری در ظرفیت پشتیبان شبکه را کاهش می‌دهد و امکان جذب سهم بیشتری از تولید تجدیدپذیر متغیر را فراهم می‌سازد.

❖ پویایی (Dynamicity)

پویایی، بعدی است که ماهیت پیچیده، غیرخطی و متغیر با زمان سیستم‌های انرژی مدرن را بازتاب می‌دهد و مستلزم به‌کارگیری سازوکارهای تطبیقی و مدل‌سازی دینامیک برای مدیریت نوسانات و تضمین انعطاف‌پذیری،

تعداد بالای انتشار به صورت شتابان رو به افزایش بوده، در حالی که مردم محوری رشدی شتابان اما با تعداد انتشارات کمتر را تجربه کرده است؛ یافته‌ای که بر توجه روزافزون اما هنوز نوپای پژوهش به بعد اجتماعی و عدالت محور گذار انرژی صحنه می‌گذارد.

در ادامه، تحلیل همبستگی پیرسون بر داده‌های سری زمانی انتشارات نشان داد که تقریباً همه ضرایب همبستگی میان هفت بعد در هر دو پایگاه بالاتر از ۰٫۹۸ است؛ یعنی رشد این ابعاد در طول زمان تقریباً به‌طور کامل هم‌زمان و هم‌راستا بوده است. در گام بعد، با تحلیل رتبه ماتریسی و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) نشان داده شد که رتبه ماتریس داده‌ها برای هر دو پایگاه برابر با هفت است؛ به عبارت دیگر، هیچ‌یک از هفت بعد را نمی‌توان ترکیبی خطی از دیگری دانست و هر بعد محوری مفهومی، مستقل و ضروری را نمایندگی می‌کند. این ترکیب هم‌زمان استقلال مفهومی (حداقل مبنای کامل) و هم‌بستگی پویا (تعامل‌پذیری بالا) تأیید می‌کند که چارچوب 7D همچون یک سیستم تطبیقی پیچیده عمل می‌کند که رفتاری نوظهور و یکپارچه از خود بروز می‌دهد.

در مجموع، چارچوب هفت‌بعدی پیشنهادی، ابزاری تشخیصی و برنامه‌ریزانه برای پژوهشگران و سیاست‌گذاران فراهم می‌کند تا ابعاد فنی و انسانی گذار انرژی شهری را هم‌زمان و در کنار هم شناسایی و پیگیری

می‌کنند، محقق می‌شود. در این رویکرد، شهروندان باید در کانون توجه طراحی و اجرای پروژه‌های شهر هوشمند و در بهره‌مندی از دستاوردهای آن قرار گیرند؛ رویکردی که جوامع و افراد را در فرایند گذار انرژی درگیر کرده و مدلی فراگیرتر و مشارکتی‌تر پدید می‌آورد.

ابزارهایی مانند تعاونی‌های انرژی محلی، سرمایه‌گذاری خرد شهروندان در پروژه‌های تجدیدپذیر، و پلتفرم‌های شفاف گزارش‌دهی مصرف و تولید، نمونه‌هایی از راه‌های عملیاتی‌سازی این بعد هستند. وقتی شهروندان علاوه بر مصرف‌کننده بودن، در تولید و تصمیم‌گیری نیز سهیم شوند، پذیرش اجتماعی پروژه‌های انرژی به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد.

❖ شواهد کمی: از تحلیل کتاب‌سنجی تا اثبات استقلال هفت بعد

مطابق مرجع، برای اعتبارسنجی این چارچوب، روند انتشارات علمی دو پایگاه IEEE Xplore و ScienceDirect در بازه سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۵ با واژگان کلیدی «گذار انرژی» و «شهر هوشمند» بررسی و برای هر یک از هفت بعد، عبارت جست‌وجوی اختصاصی آن با عملگر AND به پرس‌وجوی اصلی افزوده شد. نتیجه، نگاهی کمی از رشد فزاینده هر بعد در طول زمان بود که نشان می‌داد رشد پژوهش در محورهای فناوریانه به‌ویژه دیجیتال‌سازی و غیرمتمرکزسازی با

مراجع:

- [1] Nozarian, M., Shahi, E., MohsenNia, P., Kafshdouzzadeh, S., Fereidunian, A., & Mousavi, F. (2025, December). The 7Ds of Energy Transition in Smart Cities: A Framework for Empowering Energy Citizens. In 2025 15th Smart Grid Conference (SGC). IEEE.

کنند؛ رویکردی که خلأ ادبیات موجود را که این ابعاد را غالباً جدا از هم بررسی کرده پر می‌کند. موفقیت این گذار یکپارچه، پیش‌نیاز دستیابی به پایداری شهری جامع است؛ چارچوبی که تلاش‌های اصلاح انرژی شهری را بر پایه تاب‌آوری، عدالت و مسئولیت‌پذیری زیست‌محیطی لنگر می‌اندازد و شهر هوشمند را به بوم‌سازگانی عادلانه، تاب‌آور و واقعاً پایدار بدل می‌کند.

برای جامعه مهندسی و پژوهشی کشور نیز این چارچوب می‌تواند نقشه راهی عملی باشد. پروژه‌های هاب انرژی محله‌ای، طرح‌های ریزشبکه دانشگاهی و صنعتی، و سامانه‌های پاسخ تقاضای یکپارچه، هرکدام می‌توانند به‌عنوان گام‌های عملیاتی در مسیر تحقق هم‌زمان چند بعد از این هفت بعد در شهرهای ایران دنبال شوند. نکته کلیدی آن است که این ابعاد را نباید به‌صورت مجزا و پروژه‌محور دنبال کرد، بلکه باید از همان مرحله طراحی، پیوند فنی، اقتصادی و اجتماعی میان آن‌ها را در نظر گرفت.



گاهنامه انجمن علمی شبکه هوشمند انرژی ایران از تمامی دانشجویان، فارغ التحصیلان و صنعتگران مرتبط با حوزه شبکه های هوشمند دعوت به عمل می آورد تا با ارسال مقالات خود به این گاهنامه موجبات غنای علمی، بیشتر این گاهنامه را فراهم آورند.