فصلنامه علمی اقتصاد و مدیریت شهری
فصلنامه علمی اقتصاد و مدیریت شهری، ۱۴(۳(پیاپی ۵۵))، ۱۵۸-۱۴۱
www.iueam.ir
نمایه در ISC، EconLit، Econbiz، EBZ، GateWay-Bayern، SID، Google Scholar، Noormags، Magiran، Ensani، RICeST، Civilica
شاپا: ۲۸۷۰-۲۳۴۵

# تحلیل اقتصاد انرژی های تجدیدپذیر در مقیاس محله جهت دستیابی به خودکفایی شهری

جعفر قادری* دانشکده اقتصاد مدیریت و علوم اجتماعی دانشگاه شیراز، ایران

## چکیده

شهرها به عنوان کانون های اصلی مصرف انرژی و تولیدکنندگان گازهای گلخانه ای، در مواجهه با چالش های اقلیمی و فشار بر منابع طبیعی، نیازمند گذار از شبکه های متمرکز سنتی به سیستم های غیرمتمرکز و تاب آور هستند. این پژوهش با هدف تحلیل اقتصاد انرژی های تجدیدپذیر در مقیاس محله جهت دستیابی به خودکفایی شهری و ارائه یک چارچوب نظری یکپارچه انجام شده است. روش تحقیق، مروری نظام مند و تحلیلی بر ادبیات داخلی و بین المللی است. یافته ها نشان می دهد که دستیابی به خودکفایی پایدار در مقیاس محله، منوط به همگرایی سه رکن اساسی است: اول، یکپارچگی فنی و سکتورال شامل استفاده از فناوری های ذخیره سازی (باتری و حرارتی) و انعطاف پذیری بار برای افزایش نرخ خودتامینی و خودمصرفی؛ دوم، استقرار مکانیسم های بازار محلی مبتنی بر تجارت همتا-به همتا (P2P) و نقش تجمیع کننده های هوشمند برای بهینه سازی اقتصادی و کاهش هزینه های خالص؛ و سوم، حکمرانی مشارکتی و توزیع عادلانه منافع برای تضمین پذیرش اجتماعی و عدالت انرژی. بر این اساس، چارچوب «هاب انرژی محله ای تاب آور و عادلانه» (RA-NLEH) پیشنهاد میگردد که با تلفیق زیرساخت چندحامله، پلتفرم دیجیتال بازار، ساختار حقوقی تعاونی و شاخص های ارزیابی چندبعدی، راهکاری جامع برای تبدیل محلات به واحدهای فعال انرژی ارائه می دهد. نتایج حاکی از آن است که مدل های ترکیبی «تجارت P2P + ذخیره سازی» میتوانند تا ۵۹٪ صرفه جویی در هزینه ایجاد کنند و نرخ خودمصرفی را به بیش از ۵۰٪ برسانند. این پژوهش تاکید می کند که خودکفایی محله ای فراتر از یک دستاورد فنی، یک پروژه اجتماعی- اقتصادی است که نیازمند سیاستگذاری هدفمند، شفافیت قانونی و مشارکت ذینفعان برای تحقق شهرهای کم کربن و مقاوم است.

**کلیدواژه ها:** انرژی های تجدیدپذیر، خودکفایی شهری، ذخیره سازی انرژی، حکمرانی مشارکتی، اقتصاد انرژی محلی.

* مسئول مکاتبات: jghaderi@rose.shirazu.ac.ir

**مقدمه**

شهرها به عنوان کانون های اصلی مصرف انرژی و تولیدکنندگان عمده گازهای گلخانه ای، در معرض چالش های جدی اقلیمی ناشی از رشد سریع شهرنشینی، پدیده جزایر گرمایی و آلودگی هوا قرار دارند. الگوهای سنتی تامین و مدیریت انرژی که برپایه شبکه های متمرکز و متکی بر سوخت های فسیلی استوارند، علیرغم کارایی تاریخی خود، در مواجهه با نفوذ بالای منابع تجدیدپذیر پراکنده، شوک های اقلیمی و نیاز مبرم به دسترسی عادلانه به انرژی، با محدودیت های ساختاری و اقتصادی روبرو شده اند (IEA, 2021). این وضعیت ضرورت بازنگری بنیادین در معماری سیستم های انرژی شهری را ایجاب می کند تا گذار به سمت شهرهای کم کربن، تاب آور و پایدار نه تنها یک انتخاب، بلکه یک ضرورت اجتناب ناپذیر باشد. در این راستا، تمرکز پژوهش های نوین از مقیاس کلان ملی به مقیاس خردتر یعنی محله معطوف شده است، زیرا محله به عنوان واحد اجتماعی-کالبدی نزدیک به شهروندان، بستری ایده آل برای پیاده سازی راهکارهای هوشمند و پذیرش اجتماعی فناوری های انرژی پاک محسوب می شود.

در پاسخ به این چالش ها، مفهوم هاب های انرژی محلی چندحامله (NLEHs[1]) به عنوان یک پارادایم جدید در طراحی سیستم های انرژی شهری ظهور کرده است. برخلاف مدل های تک ساختمانی یا مایکروگریدهای صرفا الکتریکی، NLEHs امکان تولید، تبدیل، ذخیره سازی و توزیع هماهنگ انرژی در قالب برق، حرارت، گاز و هیدروژن را در سطح خوشه های ساختمان های متصل فراهم می کنند (Geidl & Andersson, 2007). این رویکرد با تاکید بر ادغام سکتورال (بخشی)[2] و ادغام فضایی[3]، نه تنها بازدهی اولیه انرژی را بهبود می بخشد، بلکه با ایجاد ساختارهای انرژی چندجهته، سیستم را قادر می سازد تا به صورت پویا به نوسانات تولید تجدیدپذیر و تغییرات تقاضا پاسخ دهد (Heinischet al., 2021; Perera et al., 2021). بنابراین، خودکفایی شهری در مقیاس محله دیگر صرفا به معنای قطع اتصال از شبکه سراسری نیست، بلکه به معنای افزایش تاب آوری و استقلال نسبی در شرایط عادی و بحرانی از طریق تعامل هوشمند با زیرساخت های موجود است.

همزمان با تحول فنی، ظهور جوامع انرژی[4] به عنوان یک پدیده نهادی و اجتماعی، پاسخی مستقیم به نیاز به دموکراسی انرژی و کاهش وابستگی به تولیدکنندگان متمرکز بوده است. تحت چارچوب های قانونی مانند بسته انرژی پاک اروپا، جوامع انرژی تجدیدپذیر (RECs[5]) و جوامع انرژی شهروندی (CECs[6]) تعریف شده اند که هدف آنها ترویج خودمصرفی جمعی، اشتراک گذاری انرژی و ارائه منافع مشترک به اعضا است (Lowitzsch et al., 2020). این ساختارها با تبدیل شهروندان از مصرف کنندگان منفعل به مشارکت کنندگان فعال (پروسیومرها[7])، بنیان های اجتماعی لازم برای پذیرش گسترده فناوری های جدید را فراهم می آورند (Soeiro & Dias, 2020). با اینحال، ادبیات موجود نشان می دهد که موفقیت این جوامع تنها به وجود زیرساخت فنی وابسته نیست، بلکه نیازمند مکانیسم های بازار محلی، مدل های کسب وکار پایدار و حکمرانی مشارکتی است که بتواند انگیزه های اقتصادی را با اهداف اجتماعی تلفیق کند.

---

[1] Neighborhood- Level Energy Hubs

[2] Sectoral Coupling
[3] Spatial Coupling
[4] Energy Communities
[5] Renewable Energy Communities
[6] Citizen Energy Communities
[7] prosumers

تحلیل اقتصاد انرژی های تجدیدپذیر در مقیاس محله جهت دستیابی به خودکفایی شهری / جعفر قادری ـــــــ

برق، بلکه حمل ونقل الکتریکی، سیستم های گرمایشی-سرمایشی و حتی مدیریت پسماند را در یک اکوسیستم یکپارچه ترکیب می کنند (Heinischet al., 2021). برای مثال، گرمای اتلافی از واحدهای تولید همزمان برق و حرارت (CHP[1]) می تواند به شبکه های گرمایش منطقه ای منتقل شود، درحالیکه برق مازاد پنل های خورشیدی برای شارژ خودروهای الکتریکی استفاده می شود (Chow et al., 2026). از سوی دیگر، ادغام فضایی تضمین می کند که این سیستم ها در مورفولوژی شهری و برنامه ریزی کاربری اراضی جاسازی شوند و موقعیت قرارگیری دارایی های انرژی بر اساس توپوگرافی محلی و خوشه های تقاضای انرژی بهینه سازی گردد (Liu et al., 2022). این یکپارچگی، NLEHs را از مفاهیم مشابهی مانند مایکروگریدهای صرفا الکتریکی یا جوامع انرژی بدون زیرساخت فیزیکی یکپارچه متمایز می سازد (Alhaj & Nihat).

**اکوسیستم های مشارکتی شهروندی**

ظهور جوامع انرژی به عنوان یک پدیده نهادی و اجتماعی، پاسخی مستقیم به نیاز به دموکراسی انرژی و کاهش وابستگی به تولیدکنندگان متمرکز است. این مفهوم تحت چارچوب های قانونی مانند بسته انرژی پاک اروپا[2] تعریف شده و شامل دو شکل اصلی جوامع انرژی تجدیدپذیر (RECs) و جوامع انرژی شهروندی (CECs) میشود که هدف اصلی آنها ترویج خودمصرفی جمعی، اشتراک گذاری انرژی و ارائه منافع اقتصادی و زیست محیطی به اعضا است (Lowitzsch et al., 2020). جوامع انرژی نه تنها یک زیرساخت فنی، بلکه یک نهاد حقوقی هستند که اجازه می دهند اعضای فعال (پروسیومرها) و مصرف کنندگان غیرفعال به صورت جمعی در زنجیره ارزش انرژی مشارکت کنند (Gui & MacGill, 2018). این ساختارها با تقویت آگاهی محیط زیستی و مشارکت فعال شهروندان، بنیان های اجتماعی لازم برای پذیرش فناوری های جدید و دستیابی به اهداف کربن خنثی را فراهم می آورند (Soeiro & Dias).

برای عملیاتی سازی این مشارکت ها، مکانیسم های بازار محلی به ویژه تجارت همتا به همتا (P2P[3]) و نقش تجمیع کننده ها[4] حیاتی هستند. در مدل های P2P، پروسیومرها می توانند انرژی مازاد خود را مستقیما با همسایگان یا اعضای جامعه معامله کنند که این امر منجر به افزایش نرخ خودمصرفی و کاهش هزینه های خالص می شود (Liu et al., 2017). با اینحال، پیچیدگی های فنی و نوسانات قیمت اغلب نیازمند حضور یک میانجی یا تجمیع کننده است که پیشنهادات مختلف را جمع آوری کرده و سیگنال های قیمتی بهینه را ارائه دهد (Belmar et al., 2023). مطالعات نشان می دهند که استفاده از استراتژی های پیشنهاد قیمت هوشمند توسط تجمیع کننده ها در بازارهای روز-پیشرو، می تواند انعطاف پذیری سیستم را افزایش داده و تا ۲۴٪ صرفه جویی در هزینه های خالص نسبت به تامین انرژی متمرکز ایجاد کند (Iria et al., 2017). علاوه براین، طرح های قیمت گذاری مبتنی بر مزایده و بهینه سازی رفاه اجتماعی، تضمین می کنند که منافع اقتصادی به طور عادلانه بین شرکت کنندگان توزیع شود و انگیزه ای برای مشارکت گسترده تر در این اکوسیستم های محلی ایجاد گردد (Belmar et al., 2023).

**مکانیسم های قیمت گذاری و بهینه سازی اقتصادی در بازارهای انرژی محلی**

تعیین قیمت و تخصیص منابع در بازارهای انرژی محلی، موتور محرک اقتصادی جوامع انرژی است که

---

[1] Combined Heat and Power
[2] Clean Energy Package
[3] Peer-to-Peer
[4] Aggregators

تحلیل اقتصاد انرژی های تجدیدپذیر در مقیاس محله جهت دستیابی به خودکفایی شهری / جعفر قادری ـــــــ

میکنند و به عنوان شریان حیاتی برای دستیابی به تعادل محلی عمل می نمایند. BESSها با ارائه قابلیت شارژ و دشارژ سریع و بازدهی چرخه بالا، نه تنها نوسانات لحظه ای پنل های خورشیدی را جبران می کنند بلکه امکان جابجایی بار از ساعات اوج مصرف به ساعات کم باری را فراهم آورده و از اتلاف انرژی مازاد جلوگیری میکنند (Zhao et al., 2023). مطالعات نشان میدهند که ادغام سیستم های فتوولتائیک (PV[1]) و باتری در بازارهای تجارت همتا به همتا (P2P)، می تواند هزینه های کاربران را تا ۱۹٪ کاهش دهد و سودآوری پروسیومرها را به طور چشمگیری افزایش دهد (Nguyen et al., 2018). علاوه بر برق، ذخیره سازی حرارتی از طریق مخازن آب گرم یا مواد تغییر فاز دهنده (PCMs[2]) نیز راهکاری مقرون به صرفه برای حفظ گرمای تولید شده از منابع خورشیدی یا CHP جهت استفاده بعدی است که بازدهی کلی سیستم های چندحامل را ارتقا می بخشد (Rathore & Sikarwar, 2024).

علاوه بر ذخیره سازی فیزیکی، انعطاف پذیری بار[3] به عنوان یک منبع انرژی مجازی، توانایی تغییر الگوی مصرف انرژی در پاسخ به سیگنال های قیمتی یا نیازهای شبکه را شامل می شود. حضور تجهیزات دارای انعطاف پذیری در جوامع انرژی، انعطاف پذیری کل سیستم را افزایش داده و اجازه می دهد تا تقاضا با عرضه متغیر منابع تجدیدپذیر هماهنگ شود (Belmar et al., 2023). تحلیل های اقتصادی نشان می دهند که سناریوی ترکیبی «تجارت P2P + ذخیره سازی» بیشترین میزان صرفه جویی را ایجاد می کند (تا ۵۹٪ در برخی مدل ها)، درحالیکه فقط تجارت P2P حدود ۳۴٪ صرفه جویی دارد و تنها وجود ذخیره سازی حدود ۲۰٪ صرفه جویی ایجاد می کند (Zepter et al., 2019). این نتایج تایید می کند که تلفیق ذخیره سازی و انعطاف پذیری بار، هم افزایی های اقتصادی ایجاد کرده و توجیه پذیری سرمایه گذاری در زیرساخت های محلی را تضمین می نماید.

این فناوری ها مستقیما بر شاخص های کلیدی عملکرد (KPIs) مانند نرخ خودمصرفی[4] و نرخ خودکفایی[5] تاثیرگذار هستند. تحقیقات نشان می دهد که وجود سیستم های ذخیره سازی در جوامع انرژی می تواند نرخ خودمصرفی را از ۳۸٪ به ۵۲٪ افزایش دهد، که این امر مستقیما به معنای کاهش وابستگی به شبکه سراسری و افزایش استقلال انرژی محله است (Mengelkamp et al., 2017). همچنین، کنترل بهینه ظرفیت ذخیره سازی باتری از طریق الگوریتم های بهینه سازی عملیاتی، می تواند هزینه های انرژی خانوارها را به حداقل رسانده و ضمن کاهش اثرات زیست محیطی، پایداری اقتصادی جامعه انرژی را در بلندمدت تضمین کند (Belmar et al., 2023). بنابراین، خودکفایی شهری در مقیاس محله بدون بهره گیری از این دو پیشران فنی، دست نیافتنی خواهد بود.

**پیشینه مطالعاتی**

گذار به سمت شهرهای پایدار و کم کربن، نیازمند بازتعریف الگوهای مصرف و تولید انرژی در مقیاس های خرد شهری است. اصغری آچاچلونی (۱۴۰۵) در پژوهشی تحلیلی نشان می دهد که استقرار فناوری های انرژی تجدیدپذیر در بافت های شهری موجود، فراتر از یک مبحث فنی، یک چالش چندبعدی کالبدی، اجتماعی و فرهنگی است. وی تاکید میکند که پایداری واقعی فضاهای شهری نه تنها به میزان تولید انرژی پاک، بلکه به عمق یکپارچگی این فناوری ها با هویت محله، منظر

[1] Photovoltaic
[2] Phase change materials
[3] Demand Flexibility
[4] Self-consumption rate
[5] Self-sufficiency rate

تحلیل اقتصاد انرژی های تجدیدپذیر در مقیاس محله جهت دستیابی به خودکفایی شهری / جعفر قادری ـــــــ

کم درآمد را افزایش دهند. همچنین Teng و همکاران (۲۰۲۵) چارچوبی یکپارچه براساس دستورالعمل های اتحادیه اروپا ارائه داده اند که نشان میدهد بهینه سازی ظرفیت های خورشیدی و بادی همراه با اشتراک قدرت، می تواند درآمدزایی و خودکفایی را همزمان حداکثر کند. Rego و همکاران (۲۰۲۵) نیز در مطالعه ای در پرتغال، یک مدل تجاری غیرمالی برای تبادل انرژی پیشنهاد داده اند که ضمن کاهش هزینه ها، شاخص انصاف بین اعضا را بهبود می بخشد و بازده داخلی سرمایه گذاری را تا ۲۴ درصد افزایش می دهد. این مطالعات نشان می دهند که مدل های کسب وکار سنتی پاسخگوی نیازهای پیچیده محلی نیستند و نیاز به نوآوری در مکانیزم های تقسیم سود وجود دارد.

بررسی ابزارهای شبیه سازی و مدلسازی نیز جایگاه ویژه ای در پیشینه پژوهش دارد. Volpato و همکاران (۲۰۲۴) رویکردی تصادفی برای طراحی عادلانه تجمیع کاربران در RECs ارائه داده اند که با استفاده از مکانیزم شاپلی، هزینه های چرخه عمر را به صورت منصفانه بین اعضا توزیع می کند. Elomari و همکاران (۲۰۲۴) نیز یک چارچوب داده محور مبتنی بر یاد ماشین و ارزیابی چرخه عمر (LCA/LCC) توسعه داده اند که نشان می دهد بهینه سازی سایز سیستم ها می تواند هزینه انرژی را تا ۸۵ درصد کاهش دهد. این ابزارها ابزاری قدرتمند برای تصمیم گیری در سطح محله هستند. همچنین Vecchi و همکاران (۲۰۲۴) با مرور ۱۲ ابزار مدلسازی، نشان دادند که اکثر نرم افزارهای موجود بیشتر بر خروجی های انرژی و مالی تمرکز دارند و نقش معیارهای محیطی و مکانی در آن ها حاشیه ای است؛ لذا نیاز به ابزارهای جامع تری احساس می شود. در این میان، Petrovich و همکاران (۲۰۲۵) با توسعه کد شبیه سازی SIMUL-REC، بر اهمیت پارامتربندی دقیق نرخ های خودتامینی و خودمصرفی تاکید کردند. آنها نشان دادند که تحلیل وابستگی این شاخص ها به نسبت تولید-مصرف و اثرات فصلی، به شناسایی بهترین پیکربندی های سیستم کمک شایانی می کند.

مطالعات موردی در بافت های مختلف شهری درس های ارزشمندی ارائه می دهند. Karami Fardian و همکاران (۲۰۲۵) در مونترال کانادا، مکانیسم های اشتراک انرژی را با صرافی خالص مقایسه کرده اند و نشان داده اند که اشتراک انرژی نرخ خودتامینی و خودمصرفی را به ترتیب به ۷۷ و ۴۰ درصد می رساند، هرچند سودآوری آن منوط به یارانه های سرمایه ای یا تعرفه های Feed-in (خوراک) مناسب است. Battaglia & Vanoli (۲۰۲۴) نیز با معرفی استراتژی های اتصال بخش ها (Power-to-X) در مناطق جدید ساخته شده، نشان دادند که تبدیل برق مازاد به گرما یا هیدروژن می تواند مصرف انرژی اولیه را ۲۰ درصد کاهش دهد. این رویکرد برای محله هایی با پتانسیل تولید بالای خورشیدی بسیار کارآمد است. Yang و همکاران (۲۰۲۵) نیز در مروری جامع بر ناحیه های انرژی مثبت (PEDs)، نتیجه گرفتند که سیستم های مدیریت انرژی و خودروهای الکتریکی نقش کلیدی در انعطاف پذیری این ناحیه ها دارند و عوامل اقتصادی و فناورانه باعث توسعه ناهماهنگ جهانی آنها شده است.

در کشورهای در حال توسعه، شرایط متفاوت است. Ye و همکاران (۲۰۲۴) دو سناریو برای شهر جدید شی آن چین مدلسازی کرده اند و نشان داده اند که ترکیب خورشیدی، زمین گرمایی و ذخیره سازها می تواند هزینه های انرژی و انتشار کربن را به شدت کاهش دهد. Terrier و همکاران (۲۰۲۴) نیز در سوئیس نشان دادند که اگر جوامع انرژی محلی بدون هماهنگی با سیستم ملی عمل کنند، ممکن است منجر به هزینه های اضافی و اتلاف انرژی شوند؛ بنابراین، یکپارچگی bottom-up (از پایین به بالا) با سیستم های ملی ضروری است. Magni و همکاران (۲۰۲۴) نیز تاکید می کنند که سیاست های ملی کشورها تعیین کننده اصلی توسعه جوامع انرژی در اروپا است و شکاف های موجود در

حکمرانی و مدل های کسب وکار باید پر شود. Corasaniti و همکاران (۲۰۲۵) نیز با بررسی توزیع جهانی RECs، نشان می دهند که با وجود تنوع فناوری ها، چالش های یکسان نظیر عدم قطعیت مقرراتی و مسائل بازار، مانع مقیاس پذیری جهانی این پروژه ها شده اند.

در ایران نیز مطالعات فنی- اقتصادی متعددی انجام شده است. فرزان و همکاران (۱۳۹۹) با شبیه سازی سامانه ۵ کیلوواتی پشت بامی در تهران، نشان دادند که این سیستم ها با بازگشت سرمایه کمتر از ۵ سال و جلوگیری از انتشار ۱۲۰ تن دی اکسید کربن، از نظر اقتصادی و زیست محیطی توجیه پذیر هستند. این مطالعه اثبات می کند که مقیاس ساختمان و محله در ایران نیز پتانسیل بالایی دارد. Zhou (۲۰۲۴) در مروری جامع بر اقتصاد اشتراک انرژی، نشان می دهد که سیستم های توزیع شده با قابلیت پاسخ سریع به تقاضا و انعطاف پذیری بالا، بر سیستم های متمرکز غلبه دارند و قیمت گذاری پویا و بازار آزاد برق می تواند انگیزه مشارکت ذینفعان را افزایش دهد. Fichera و همکاران (۲۰۲۵) نیز ده پرسش بنیادین درباره جوامع انرژی را مطرح کرده اند و تاکید می کنند که اگرچه RECs پتانسیل بالایی برای اهداف اقلیمی و اجتماعی دارند، اما پراکندگی آنها شدیدا تحت تاثیر چارچوب های مقرراتی و مشوق های اقتصادی است.

بررسی های انجام شده نشان می دهد که اگرچه مطالعات زیادی به تک بعدی بودن (فنی، اقتصادی یا اجتماعی) پرداخته اند، اما خلأهای مهمی وجود دارد. نخست، اکثر مطالعات داخلی بر مقیاس کلان شهری یا ساختمان متمرکز بوده اند و مدل های یکپارچه ای که اقتصاد انرژی را در مقیاس دقیق محله با درنظر گرفتن متغیرهای کالبدی، اجتماعی و رفتاری شهروندان تحلیل کنند، محدود است. دوم، در مطالعات خارجی، اگرچه مفهوم RECs و PEDs به خوبی تعریف شده، اما ارتباط عمیق میان عدالت انرژی و خودکفایی فنی در بافت های شهری با تراکم بالا و مالکیت های چندلایه (مشابه بافت های ایرانی) کمتر مورد واکاوی قرار گرفته است. سوم، ابزارهای مدلسازی موجود اغلب معیارهای مکانی و اجتماعی را نادیده می گیرند.

بنابراین، پژوهش حاضر با هدف پر کردن این شکاف ها، تلاش دارد تا با تلفیق رویکردهای فنی- اقتصادی (مانند مدلسازی های Volpato و کرمی فردیان)، ابعاد اجتماعی و حکمرانی (مانند یافته های رستا و Basilico) و تحلیل های کالبدی-مکانی (مانند مطالعات اصغری و موذن)، چارچوبی یکپارچه ارائه دهد. این چارچوب نه تنها به دنبال بهینه سازی تولید و مصرف انرژی در محله است، بلکه عدالت در دسترسی، پایداری اجتماعی و سازگاری با بافت محلی را نیز به عنوان متغیرهای کلیدی در معادله اقتصاد انرژی محلی لحاظ می کند. این رویکرد جامع می تواند راهکاری عملیاتی برای شهرهای هوشمند و خودکفا در آینده باشد.

## روش شناسی پژوهش

روش پژوهش حاضر، مروری نظام مند و تحلیلی است که با هدف استخراج و تلفیق دانش موجود جهت تدوین چارچوب نظری یکپارچه برای تحلیل اقتصاد انرژی های تجدیدپذیر در مقیاس محله طراحی شده است. در این راستا، ابتدا با جستجوی ساختاریافته در پایگاه های داده علمی معتبر داخلی و بین المللی (مانند Scopus، Web of Science و Civilica) و با استفاده از کلیدواژه های تخصصی مرتبط، ادبیات موضوع در بازه زمانی مشخص گردآوری شد. سپس، با اعمال معیارهای ورود و خروج دقیق (از جمله اصالت علمی، اهمیت دادن به مقیاس محله و تازگی یافته ها)، تعداد ۲۵ مطالعه کلیدی (شامل مقالات علمی- پژوهشی داخلی و خارجی) انتخاب و مورد ارزیابی کیفی قرار گرفتند. فرآیند تحلیل در ابعاد فنی، اقتصادی، اجتماعی و نهادی بود تا الگوهای پنهان، شکاف های تحقیقاتی و روابط علّی میان متغیرها شناسایی گردد. در نهایت نیز با

سنتز انتقادی یافته های استخراج شده و تلفیق آنها با مبانی نظری، مدل مفهومی نهایی و یکپارچه به عنوان خروجی اصلی پژوهش ارائه شد.

**یافته ها**

بررسی تطبیقی پیشینه مطالعاتی و چارچوب نظری پژوهش نشان می دهد که گذار از شبکه های متمرکز به سیستم های انرژی محلی چندحامل (NLEHs)، فراتر از یک تغییر تکنولوژیک ساده، نیازمند بازتعریف رابطه میان زیرساخت فیزیکی، اکوسیستم اجتماعی و مکانیسم های اقتصادی است. یافته ها حاکی از آن است که موفقیت مدل های خودکفایی محله ای در گروِ همگرایی سه رکن اصلی است: ۱) یکپارچگی چندحامله و فضایی[1]، ۲) مشارکت فعال شهروندی و حکمرانی توزیع شده[2]، و ۳) بهینه سازی اقتصادی مبتنی بر بازارهای محلی و ذخیره سازی[3]. مطالعات داخلی مانند موذن (۱۴۰۳) و اصغری آچاچلونی (۱۴۰۵) تاکید دارند که نادیده گرفتن بافت کالبدی و فرهنگی محله منجر به ناکارآمدی فنی و مقاومت اجتماعی می شود، درحالیکه مطالعات خارجی مانند Buonomano (۲۰۲۶) و Volpato (۲۰۲۴) اثبات می کنند که بدون مدلسازی دقیق جریان های انرژی چندحامل و مدیریت تصادفی تولید/مصرف، پایداری اقتصادی تضمین شدنی نیست.

یکی از یافته های کلیدی، نقش حیاتی ذخیره سازی انرژی و انعطاف پذیری بار به عنوان پیشران های اصلی نرخ خودتامینی و خودمصرفی است. شواهد تجربی از مطالعات مختلف (مانند Wang & Blondeau (۲۰۲۴)؛ Karami Fardian و همکاران، (۲۰۲۵)) نشان می دهد که سیستم های فتوولتائیک به تنهایی قادر به پوشش کامل تقاضای متغیر محله نیستند. ادغام باتری ها (BESS) و ذخیره سازی حرارتی نه تنها نوسانات تولید را هموار می سازد، بلکه با امکان جابجایی بار، نرخ خودمصرفی را تا بیش از ۵۰٪ افزایش می دهد. این یافته با نتایج زکی پور رحیم آبادی (۱۴۰۴) در شهرهای هوشمند همسو است که بر لزوم مدیریت هوشمند منابع برای کاهش وابستگی به شبکه سراسری تاکید دارند. بنابراین، خودکفایی محله ای بدون لایه های ذخیره سازی و مدیریت تقاضا، صرفا یک شعار سیاسی است و از نظر فنی- اقتصادی ناپایدار خواهد بود.

مکانیسم های بازار محلی و نقش تجمیع کننده ها به عنوان موتور محرک اقتصادی این اکوسیستم ها شناسایی شده اند. تحلیل پیشینه نشان می دهد که مدل های سنتی خرید تضمینی دیگر پاسخگوی پیچیدگی های تولید پراکنده نیستند. رویکردهای نوین مانند تجارت همتا به همتا (P2P) و قیمت گذاری پویا، ضمن افزایش انعطاف پذیری سیستم، انگیزه مالی مستقیمی برای پروسیومرها ایجاد می کنند. مطالعات Basilico (۲۰۲۵) و Rego (۲۰۲۵) نشان میدهند که اگرچه P2P پتانسیل بالایی برای کاهش هزینه دارد، اما بدون حضور یک تجمیع کننده هوشمند که بتواند سیگنال های قیمتی بهینه را مدیریت کند، ریسک نوسانات بازار و نابرابری در توزیع سود افزایش می یابد. این یافته تایید می کند که ساختارهای حقوقی و نهادی جوامع انرژی (RECs) باید طوری طراحی شوند که قدرت چانه زنی جمعی اعضا از طریق تجمیع کننده ها حداکثر شود.

بعد اجتماعی و عدالت انرژی، به عنوان عامل تعیین کننده در پذیرش و پایداری بلندمدت پروژه ها، از یافته های برجسته این پژوهش است. درحالیکه بسیاری از مدل های ریاضی بر بهینه سازی هزینه تمرکز دارند، مطالعات میدانی مانند ترکمن و همکاران (۱۴۰۴) و Gianaroli و همکاران (۲۰۲۴) هشدار می دهند که اگر منافع اقتصادی صرفا به دست دارندگان سرمایه و ظرفیت تولید بالاتر برسد، شکاف طبقاتی انرژی تشدید

[1] Technical & Spatial Integration
[2] Social & Governance Participation
[3] Economic Optimization via Storage & Markets

تحلیل اقتصاد انرژی های تجدیدپذیر در مقیاس محله جهت دستیابی به خودکفایی شهری / جعفر قادری ـــــــ

**شکل ۱. چارچوب یکپارچه پیشنهادی**

این مدل تلاش می کند تا تعادل بین کارایی فنی، توجیه پذیری اقتصادی، عدالت اجتماعی و تاب آوری محیطی را در مقیاس محله برقرار سازد. برخلاف مدل های قبلی که عمدتا بر بهینه سازی ریاضی هزینه تمرکز داشتند، RA-NLEH ماهیت چندوجهی خودکفایی محلی را در نظر می گیرد.

لایه اول: زیرساخت فیزیکی چندحامله و انعطاف پذیر

این لایه شامل تولید پراکنده (خورشیدی، بادی، زمین گرمایی)، ذخیره سازی چندگانه (باتری ها، ذخیره سازی حرارتی، هیدروژن)، و سیستم های تبدیل انرژی[1] است. ویژگی کلیدی این لایه، ادغام سکتورال است، یعنی برق مازاد نباید صرفا به شبکه تزریق شود، بلکه باید به گرما، هیدروژن یا سوخت حمل ونقل تبدیل گردد. همچنین، تجهیزات مصرفی باید دارای انعطاف پذیری بار باشند تا بتوانند الگوی مصرف خود را با پروفایل تولید متغیر منابع تجدیدپذیر هماهنگ کنند. این لایه با توجه به محدودیت های کالبدی محله (طبق یافته های اصغری آچاچلونی، ۱۴۰۵) طراحی می شود تا از تضاد با منظر شهری جلوگیری کند.

لایه دوم: پلتفرم دیجیتال و بازار همتا به همتا (P2P)

قلب تپنده این چارچوب، یک پلتفرم دیجیتال مبتنی بر بلاکچین یا سیستم های متمرکز امن است که امکان رصد لحظه ای تولید و مصرف را فراهم می کند. این پلتفرم از مکانیسم های قیمت گذاری پویا و مزایده دوباره برای تسهیل معاملات P2P بین ساکنان استفاده

[1] Power-to-X

تحلیل اقتصاد انرژی های تجدیدپذیر در مقیاس محله جهت دستیابی به خودکفایی شهری / جعفر قادری ـــــــ

و عدالت در توزیع منافع است. اگر منافع اقتصادی صرفا به دست ثروتمندان بیفتد، مقاومت اجتماعی شکل گرفته و پایداری پروژه به خطر می افتد. بنابراین، چارچوب پیشنهادی RA-NLEH با تاکید بر حکمرانی مشارکتی و توزیع عادلانه منافع، پاسخی به این خلأ نظری و عملی است. این رویکرد نشان می دهد که خودکفایی انرژی، تنها یک مسئله مهندسی نیست، بلکه یک پروژه اجتماعی- اقتصادی است.

این پژوهش نشان می دهد که خودکفایی محله ای به معنای قطع کامل ارتباط با شبکه سراسری نیست، بلکه به معنای افزایش تاب آوری و استقلال نسبی در شرایط عادی و بحرانی است. هاب های انرژی محلی می توانند در شرایط عادی، با فروش مازاد انرژی به شبکه درآمدزایی کنند و در شرایط بحران (مانند قطعی شبکه سراسری یا بلایای طبیعی)، به عنوان جزایر انرژی عمل کرده و خدمات حیاتی را تامین نمایند. این دوگانگی (اتصال به شبکه برای بهره برداری اقتصادی و جدایی برای تاب آوری)، ویژگی متمایزکننده مدل های مدرن انرژی شهری است.

با توجه به یافته ها، میتوان نتیجه گرفت که ایران با برخورداری از پتانسیل بالای انرژی خورشیدی و نیاز مبرم به کاهش آلودگی هوای کلان شهرها، زمینه مناسبی برای پیاده سازی این مدل ها دارد. با اینحال، موانع اصلی شامل هزینه اولیه سرمایه گذاری، عدم شفافیت قوانین و کمبود آگاهی عمومی است. پر کردن این شکاف ها نیازمند همکاری نزدیک بین دولت، بخش خصوصی و جامعه مدنی است. مدل RA-NLEH می تواند به عنوان یک نقشه راه برای برنامه ریزان شهری و سیاستگذاران انرژی عمل کند تا پروژه های پایدار و مقیاس پذیر را طراحی کنند.

برای تحقق عملی چارچوب پیشنهادی و تسریع در گذار به انرژی های تجدیدپذیر در مقیاس محله، پیشنهادات زیر ارائه می گردد:

تدوین قوانین حمایتی و مشخص سازی حقوقی: دولت باید قوانین صریحی برای ثبت رسمی جوامع انرژی (RECs) و تعاونی های انرژی محلی تدوین کند. این قوانین باید حقوق مالکیت مشترک، حق دسترسی به شبکه توزیع و مکانیسم های تسویه حساب مالی بین اعضا را شفاف سازد. همچنین، اعمال مشوق های مالی مانند تخفیف در عوارض شهرداری برای ساختمان های مجهز به سیستم های چندحامله و ذخیره سازی، می تواند هزینه اولیه را کاهش دهد.

راه اندازی پایلوت های محله ای با رویکرد مشارکتی: به جای اجرای پروژه های بزرگ و گران قیمت در سطح شهر، بهتر است پروژه های پایلوت در مقیاس چند بلوک یا یک محله کوچک اجرا شود. این پایلوت ها باید با مشارکت فعال ساکنان طراحی شوند تا نیازهای واقعی آنها (مانند گرمایش زمستانه یا شارژ خودرو) پوشش داده شود. نتایج این پایلوت ها می تواند به عنوان نمونه موردی برای سایر محلات و ابزاری برای آموزش عمومی عمل کند.

استفاده از پلتفرم های دیجیتال هوشمند و تجمیع کننده ها: توسعه زیرساخت های دیجیتال برای پایش لحظه ای تولید و مصرف و تسهیل معاملات P2P ضروری است. همچنین، حمایت از ظهور تجمیع کننده های انرژی محلی می تواند به ساکنان کمک کند تا از قدرت چانه زنی جمعی بهره مند شوند و در بازارهای انرژی بزرگتر شرکت کنند. این امر باعث کاهش هزینه ها و افزایش شفافیت مالی می شود.

**منابع**

اصغری آچاچلونی، مجید. (۱۴۰۵). استفاده از انرژی های تجدیدپذیر در بافت های شهری و تاثیر آن بر پایداری فضاهای شهری، دهمین کنفرانس بین المللی پژوهش در علوم و مهندسی و هفتمین کنگره بین المللی عمران، معماری و شهرسازی آسیا.

تحلیل اقتصاد انرژی های تجدیدپذیر در مقیاس محله جهت دستیابی به خودکفایی شهری / جعفر قادری ـــــــ

Fichera, A., Marrasso, E., Martone, C., Pallotta, G., Sasso, M., & Volpe, R. (2025). Ten questions concerning renewable energy communities. *Building and Environment*, *281*, 113193.

Geidl, M., & Andersson, G. (2007). Optimal power flow of multiple energy carriers. *IEEE Transactions on power systems*, *22*(1), 145-155.

Gui, E. M., & MacGill, I. (2018). Typology of future clean energy communities: An exploratory structure, opportunities, and challenges. *Energy research & social science*, *35*, 94-107.

Heinisch, V., Göransson, L., Erlandsson, R., Hodel, H., Johnsson, F., & Odenberger, M. (2021). Smart electric vehicle charging strategies for sectoral coupling in a city energy system. *Applied Energy*, *288*, 116640.

IEA. Recommendations of the Global Commission on People-Centred Clean Energy Transitions. 2021. Available online: https://www.iea.org/reports/recommendations-of-the-global-commission-on-people-centred-clean-energy-transitions (accessed on 6 January 2026).

Iria, J. P., Soares, F. J., & Matos, M. A. (2017, July). Trading small prosumers flexibility in the day-ahead energy market. In *2017 IEEE power & energy society general meeting* (pp. 1-5). IEEE.

Karami Fardian, A., Ranjbar, S., Cimmino, L., Vecchi, F., Hachem-Vermette, C., Eicker, U., & Calise, F. (2025). Techno-Economic Assessment of Net Metering and Energy Sharing in a Mixed-Use Renewable Energy Community in Montreal: A Simulation-Based Approach Using Tool4Cities. *Energies*, *18*(21), 5756.

Kiani-Moghaddam, M., Soltani, M. N., Kalogirou, S. A., & Arabkoohsar, A. (2025). A review of optimization efforts on neighborhood-level energy hubs. *Energy*, *317*, 134657.

Liu, Y., Liu, W., Yan, Y., & Liu, C. (2022). A perspective of ecological civilization: Research on the spatial coupling and coordination of the energy-economy-environment system in the Yangtze River Economic Belt. *Environmental Monitoring and Assessment*, *194*(6), 403.

Liu, N., Yu, X., Wang, C., Li, C., Ma, L., & Lei, J. (2017). Energy-sharing model with price-based demand response for microgrids of peer-to-peer prosumers. *IEEE Transactions on Power Systems*, *32*(5), 3569-3583.

Lowitzsch, J., Hoicka, C. E., & van Tulder, F. J. (2020). Renewable energy communities under the 2019 European Clean Energy Package–Governance model for the energy clusters of the future?. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *122*, 109489.

Magni, G. U., Battistelli, F., Trovalusci, F., Groppi, D., & Garcia, D. A. (2024). How national policies influence energy community development across Europe? A review on societal, technical, and economical factors. *Energy Conversion and Management: X*, *23*, 100624.

Mengelkamp, E., Garttner, J., & Weinhardt, C. (2017, June). The role of energy storage in local energy markets. In *2017 14th international*

تحلیل اقتصاد انرژی های تجدیدپذیر در مقیاس محله جهت دستیابی به خودکفایی شهری / جعفر قادری ـــــــ

renewable-energy-powered system for a newly constructed city in China. *Energy Reports*, *11*, 5069-5082.

Zhao, C., Andersen, P. B., Træholt, C., & Hashemi, S. (2023). Grid-connected battery energy storage system: a review on application and integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *182*, 113400.

Zepter, J. M., Lüth, A., Del Granado, P. C., & Egging, R. (2019). Prosumer integration in wholesale electricity markets: Synergies of peer-to-peer trade and residential storage. *Energy and Buildings*, *184*, 163-176.

Zhou, Y. (2024). Energy-sharing economy with renewable integration and management in communities—a state-of-the-art review. *Advanced Energy and Sustainability Research*, *5*(12), 2400214.

stochastic optimization procedure to design the fair aggregation of energy users in a Renewable Energy Community. *Renewable Energy*, *237*, 121580.

Wang, G., & Blondeau, J. (2024). Optimal combination of daily and seasonal energy storage using battery and hydrogen production to increase the self-sufficiency of local energy communities. *Journal of Energy Storage*, *92*, 112206.

Yang, K., Zou, R., Zhang, W., Zeng, X., Li, Z., & Guo, J. (2025). Comprehensive review of Positive Energy Districts: Multidimensional analysis of energy, economic, social, and environmental aspects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *217*, 115740.

Ye, B., Xie, M., Yu, Z., Lu, Z., Yan, D., Su, B., ... & Jiang, J. (2024). Technical and economic study of