The University of Tehran Press

Journal of Sustainable Energy Systems

Online ISSN: 2980-8693

Home Page: https://ses.ut.ac.ir

Convergence Pathways between Spatial Assessment of Renewable Energy and Integrated Energy System Planning: A Comparative Scientometric Analysis

Marziyeh Razeghi[1] | Hossein Yousefi[2*] | Younes Noorollahi[3]

1. Ph.D. Candidate in Energy Systems Engineering, School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: Razeghi.marziyeh@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Professor, School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: hosseinyousefi@ut.ac.ir
3. Professor, School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: Noorollahi@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received: 22 June 2026
Revised: 23 July 2026
Accepted: 23 August 2026
Published Online: 01 January 2027

Keywords:
Spatial Energy Assessment,
Integrated Energy Planning,
Bibliometric Analysis,
Methodological Convergence,
Energy Scenario Development.

ABSTRACT

The energy transition becomes feasible when decisions regarding renewable energy development are consistent with spatial realities and territorial constraints, while their implications are also evaluated at the level of the energy system as a whole. Despite the rapid expansion of studies on GIS-based renewable energy potential assessment and energy system modeling, the mechanisms through which these two streams of research converge have not yet been systematically articulated. This study adopts a comparative approach to examine the patterns of evolution, degree of maturity, collaboration structure, and conceptual pathways of these two domains and to identify points at which spatial analysis can be connected to system-level energy planning. Bibliographic data from articles indexed in the Scopus database between 2011 and 2026 were extracted into two independent datasets and analyzed using VOSviewer and Bibliometrix. The first dataset comprised 8,277 documents and 250,254 citations in the field of spatial assessment and renewable energy potential evaluation, while the second comprised 1,536 documents and 62,552 citations in the field of energy system modeling and planning. The findings showed that the spatial stream is broader and more diverse in terms of knowledge production, whereas the system-oriented stream has a higher average citation impact and relatively faster growth. In the first domain, concepts such as GIS, site selection, multi-criteria decision-making, solar and wind energy, sustainability, and land-use constraints constitute the core of the research network. In the second domain, energy transition, decarbonization, scenario analysis, energy storage, sector coupling, smart grids, and energy communities are prominent. The comparative analysis revealed that a fundamental gap in the literature is the absence of a clear data flow from "spatially developable capacity" to "implementable energy system scenarios." Accordingly, the main contribution of this study is the development of an interpretive framework for translating GIS outputs and suitability assessment results into inputs for energy system models and establishing reciprocal feedback from system-level results to spatial priorities. Such integration can improve the quality of decision-making, enhance the realism of decarbonization scenarios, and improve the coordination of investments in grids, energy storage, and infrastructure. Because the 2026 records were incomplete at the time of data retrieval, the results for this year should be interpreted with caution.

Cite this article: Razeghi, M.; Yousefi, H. & Noorollahi, Y. (2027). Convergence Pathways between Spatial Assessment of Renewable Energy and Integrated Energy System Planning: A Comparative Scientometric Analysis. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 6 (1), 87-109. DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2026.420949.1286

© Authors retain the copyright and full publishing rights.

Publisher: University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2026.420949.1286

1. Introduction

The energy transition requires renewable energy deployment to be consistent with spatial conditions, land-use constraints, infrastructure availability, and the requirements of the energy system as a whole. Although spatial assessment of renewable energy potential using Geographic Information Systems (GIS) and energy system modeling have both expanded rapidly, the mechanisms through which these two research streams can be effectively integrated remain insufficiently understood. Spatial studies generally focus on identifying suitable locations and estimating deployable potential, whereas energy system models primarily examine scenarios, costs, emissions, flexibility, and long-term transition pathways. These two domains were selected for comparison because they represent complementary scales of the same underlying problem: planning renewable energy development and energy transition. Spatial assessment determines where renewable resources can be developed and under which technical, environmental, infrastructural, and land-use constraints, whereas energy system modeling evaluates how much of this potential can be utilized at the system level, when it should be deployed, and how it interacts with other energy technologies. Comparing these domains therefore provides an appropriate basis for identifying the gap between spatial developability and system-level usability and for examining potential pathways through which spatial information can be incorporated into integrated energy system planning. The present study therefore aims to comparatively investigate the evolution, scientific maturity, collaboration structures, conceptual clusters, and potential convergence pathways of these two fields and to identify how spatial outputs can be connected to integrated energy system planning.

2. Materials and Methods

This study employed a comparative scientometric and science-mapping approach. Bibliographic data were extracted from the Scopus database for the period 2011–2026 and organized into two independent datasets. The first dataset covered GIS-based spatial assessment and renewable energy potential studies, while the second included energy system modeling and integrated energy planning studies. After data extraction and preparation, descriptive, structural, temporal, collaboration, keyword co-occurrence, and thematic analyses were conducted using Bibliometrix in the R environment and VOSviewer. The two datasets were analyzed independently to preserve their specific characteristics and were subsequently compared in terms of publication growth, citation patterns, scientific collaboration, conceptual structures, and emerging research topics

3. Results

The spatial assessment dataset comprised 8,277 documents and 250,254 citations, whereas the energy system modeling dataset included 1,536 documents and 62,552 citations. Thus, the spatial research stream was considerably larger and more diverse in terms of publication volume, while the system-oriented stream recorded a higher average number of citations per document (40.72 compared with 30.23). Both fields experienced substantial growth during the study period. Spatial publications increased from 47 documents in 2011 to 1,491 in 2025, while energy system modeling publications increased from 6 to 332 over the same period. The results therefore indicate greater absolute growth in the spatial field but faster relative expansion in the system modeling field.

Keyword analysis showed that the conceptual core of the spatial domain was formed by GIS, renewable energy, site selection, wind energy, solar energy, AHP, MCDM, sustainability, and climate change. In contrast, the system modeling domain was primarily structured around energy transition, energy planning, energy efficiency, decarbonization, carbon neutrality, energy storage, sector coupling, smart grids, and scenario analysis. Thematic evolution further demonstrated that spatial studies have gradually moved from simple resource mapping toward broader spatial planning and multi-resource assessment, while system modeling has shifted toward integrated, flexible, low-carbon, and multi-sector energy systems.

The collaboration analysis revealed a broader and more multi-clustered author structure in the spatial field, whereas the energy system modeling network was more concentrated around specialized research groups. China was the leading contributor in both fields, while countries such as the United States, the United Kingdom, Türkiye, India, Germany, Italy, and Denmark also played important roles. The comparative analysis of conceptual clusters identified the principal gap between the two domains:

the absence of a clear and operational data pathway for transforming spatially deployable capacity into implementable energy system scenarios.

4. Discussion and Conclusion

The findings demonstrate that the two research streams represent complementary scales of the same energy transition problem. Spatial assessment determines where renewable resources can realistically be developed and under what technical, environmental, infrastructural, and land-use constraints, whereas energy system modeling determines how much capacity should be developed, when it should be deployed, and how it affects system cost, emissions, flexibility, storage, and network requirements. Consequently, placing the two approaches alongside each other without data integration cannot fully support realistic energy planning.

The study proposes a four-layer convergence framework consisting of spatial data generation, transformation of theoretical potential into deployable capacity, system optimization and scenario development, and feedback of system-level results into spatial investment priorities. For effective integration, spatial outputs should include deployable capacity, connection costs, environmental constraints, development phasing, and uncertainty rather than merely suitability maps. Conversely, energy system models should return information such as the system value of each resource, storage and grid reinforcement requirements, optimal development timing, and emission impacts to the spatial planning process.

Such bidirectional integration can prevent overestimation of renewable energy potential, improve the spatial and infrastructural realism of transition scenarios, and support coordinated investment in renewable generation, storage, and networks. The results also emphasize the importance of harmonizing spatial and temporal resolutions, managing uncertainty, standardizing data, and strengthening interdisciplinary collaboration. Overall, the transition toward a low-carbon energy system requires moving beyond isolated spatial potential assessment or system-level scenario modeling toward an evidence-based, iterative framework in which where renewable energy can be developed and how much, when, and with what infrastructure it is valuable to the system are addressed simultaneously.

انتشارات دانشگاه تهران

فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: https://ses.ut.ac.ir

شاپا الکترونیکی: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

مسیرهای همگرایی میان ارزیابی مکانی انرژی‌های تجدیدپذیر و برنامه‌ریزی یکپارچهٔ سیستم انرژی: یک تحلیل علم‌سنجی تطبیقی

مرضیه رازقی[۱] | حسین یوسفی[۲*] | یونس نوراللهی[۳]

۱. دانشجوی دکتری مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکدهٔ مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: Razeghi.marziyeh@ut.ac.ir

۲. نویسندهٔ مسئول، استاد، دانشکدهٔ مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: hosseinyousefi@ut.ac.ir

۳. استاد، دانشکدهٔ مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: Noorollahi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۱
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۱۰/۱۱

کلیدواژه:
ارزیابی مکانی انرژی،
برنامه‌ریزی یکپارچهٔ انرژی،
تحلیل علم‌سنجی،
همگرایی روش‌شناختی،
سناریوسازی انرژی.

چکیده

گذار انرژی زمانی قابلیت اجرا پیدا می‌کند که تصمیم‌های مربوط به توسعهٔ منابع تجدیدپذیر، هم با واقعیت‌های مکانی و محدودیت‌های سرزمینی سازگار باشند و هم پیامدهای آن‌ها در سطح کل سیستم انرژی ارزیابی شود. با وجود گسترش سریع مطالعات ارزیابی پتانسیل تجدیدپذیر مبتنی بر سامانهٔ اطلاعات جغرافیایی و پژوهش‌های مدل‌سازی سیستم انرژی، سازوکار همگرایی این دو جریان علمی هنوز به صورت منسجم تبیین نشده است. پژوهش حاضر با رویکردی تطبیقی، الگوی تحول، میزان بلوغ، ساختار همکاری و مسیرهای مفهومی این دو حوزه را بررسی کرده و نقاطی را شناسایی می‌کند که در آن‌ها تحلیل مکانی می‌تواند به برنامه‌ریزی سیستمی متصل شود. داده‌های کتاب‌شناختی مقالات نمایه‌شده در پایگاه Scopus طی سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۶ در دو مجموعه مستقل استخراج و با نرم‌افزارهای VOSviewer و Bibliometrix تحلیل شد. مجموعهٔ نخست شامل ۸۲۷۷ مدرک و ۲۵۰۲۵۴ استناد در حوزهٔ ارزیابی مکانی و پتانسیل‌سنجی انرژی‌های تجدیدپذیر و مجموعهٔ دوم شامل ۱۵۳۶ مدرک و ۶۲۵۵۲ استناد در حوزهٔ مدل‌سازی و برنامه‌ریزی سیستم انرژی بود. یافته‌ها نشان دادند جریان مکانی از نظر حجم تولید دانش گسترده‌تر و متنوع‌تر است، در حالی که جریان سیستمی میانگین استناد بیشتر و رشد نسبی سریع‌تری دارد. در حوزهٔ نخست، مفاهیمی مانند GIS، مکان‌یابی، تصمیم‌گیری چندمعیاره، انرژی خورشیدی و بادی، پایداری و محدودیت‌های کاربری زمین هستهٔ اصلی شبکه را تشکیل می‌دهند؛ در حوزهٔ دوم، گذار انرژی، کربن‌زدایی، تحلیل سناریو، ذخیره‌سازی، اتصال بخش‌ها، شبکه‌های هوشمند و جوامع انرژی برجسته‌اند. تحلیل تطبیقی نشان داد شکاف بنیادین ادبیات، فقدان جریان داده‌ای روشن از «ظرفیت قابل توسعهٔ مکانی» به «سناریوی قابل اجرای سیستم انرژی» است. بر این‌اساس، نوآوری این مطالعه در ارائهٔ چارچوبی تفسیری برای تبدیل خروجی‌های GIS و ارزیابی تناسب به ورودی مدل‌های انرژی و ایجاد بازخورد متقابل از نتایج سیستمی به اولویت‌های مکانی است. چنین پیوندی می‌تواند کیفیت تصمیم‌گیری، واقع‌بینی سناریوهای کربن‌زدایی و هماهنگی سرمایه‌گذاری‌های شبکه، ذخیره‌سازی و زیرساخت را بهبود دهد. با توجه به ناقص بودن داده‌های مربوط به سال ۲۰۲۶ در زمان استخراج اطلاعات، نتایج مربوط به این سال باید با احتیاط تفسیر شوند.

استناد: رازقی، مرضیه؛ یوسفی، حسین و نوراللهی، یونس (۱۴۰۵). مسیرهای همگرایی میان ارزیابی مکانی انرژی‌های تجدیدپذیر و برنامه‌ریزی یکپارچهٔ سیستم انرژی: یک تحلیل علم‌سنجی تطبیقی. *فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار*، ۶ (۱) ۸۷-۱۰۹.

DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2026.420949.1286

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2026.420949.1286

۱. مقدمه

گذار انرژی به یکی از محورهای اصلی توسعهٔ پایدار در سطح جهانی تبدیل شده است، زیرا افزایش تقاضای انرژی، وابستگی گسترده به سوخت‌های فسیلی، تشدید پیامدهای تغییر اقلیم، نوسانات بازار انرژی و ضرورت تأمین امنیت انرژی، نظام‌های انرژی متعارف را با چالش‌های جدی روبه‌رو کرده است [۱ و ۲]. سیستم‌های انرژی مبتنی بر منابع فسیلی، اگرچه در دهه‌های گذشته نقش مهمی در رشد اقتصادی و توسعهٔ صنعتی داشته‌اند، امروزه به دلیل انتشار گازهای گلخانه‌ای، آلودگی‌های زیست‌محیطی، کاهش پایداری منابع و محدودیت‌های زیرساختی، نیازمند بازنگری اساسی هستند [۳]. در چنین شرایطی، توسعهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر، بهبود بهره‌وری انرژی، مدیریت تقاضا و برنامه‌ریزی یکپارچه انرژی به عنوان راهبردهایی کلیدی برای تحقق گذار انرژی سبز و حرکت به سوی سیستم‌های کم‌کربن و پایدار مطرح شده‌اند [۴].

انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله انرژی خورشیدی، بادی، برق‌آبی، زمین‌گرمایی و زیست‌توده، از مهم‌ترین گزینه‌ها برای کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کاهش پیامدهای زیست‌محیطی تولید و مصرف انرژی به شمار می‌آیند [۵]. با این‌حال، توسعهٔ مؤثر این منابع فقط به وجود فناوری یا دسترسی نظری به منابع طبیعی وابسته نیست، بلکه مستلزم شناسایی مکان‌های مناسب، ارزیابی محدودیت‌های فنی و زیست‌محیطی، بررسی شرایط اقتصادی و زیرساختی و هم‌راستاسازی توسعهٔ انرژی‌های پاک با اهداف کلان برنامه‌ریزی انرژی است. از این‌رو، پتانسیل‌سنجی انرژی‌های تجدیدپذیر به‌ویژه با استفاده از GIS، تحلیل مکانی، نقشه‌سازی تناسب، سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری مکانی و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، به یکی از حوزه‌های مهم پژوهشی در مطالعات انرژی تبدیل شده است [۶ ـ ۸].

پتانسیل‌سنجی انرژی‌های تجدیدپذیر مبتنی بر GIS، امکان تلفیق لایه‌های مختلف اطلاعاتی و ارزیابی هم‌زمان معیارهای متنوع مکانی، فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی را فراهم می‌کند؛ در این راستا مطالعات متنوعی انجام شده است چه در سطح مناطق محدود شهری چه در حد اقلیم و کشوری [۹ و ۱۰]. به طور مثال، رازقی و همکاران برای نخستین‌بار روش غیرمستقیمی برای شناسایی مناطق دارای آب شور در سراسر ایران و ارزیابی هم‌زمان پتانسیل انرژی خورشیدی برای نمک‌زدایی اسمز معکوس ارائه کردند. آن‌ها با تلفیق ۱۶ لایهٔ اطلاعاتی در GIS و استفاده از MCDA، معیارهای اقتصادی، فنی، زیست‌محیطی و زمین‌شناسی را تحلیل کردند. نتایج نشان داد حدود ۱۶۰ شهر (۱۴۴ میلیارد مترمربع) دارای آب شور و پتانسیل خورشیدی بالا شناسایی شد که بیشترین پتانسیل در شهر خانسار (اصفهان) است [۱۰].

رازقی و همکاران در راستای مطالعهٔ پیش، روش غیرمستقیمی را برای شناسایی مناطق دارای آب شور در سراسر ایران که هم‌زمان پتانسیل انرژی باد برای تأمین برق دستگاه‌های نمک‌زدایی اسمز معکوس دارند، ارائه کردند. آن‌ها با استفاده از GIS و تحلیل MCDA و در نظر گرفتن پارامترهای اقتصادی، زیست‌محیطی، فنی و زمین‌شناسی، مناطق مناسب را رتبه‌بندی کردند. نتایج نشان داد ۷۸ شهر (عمدتاً شرق کشور) شناسایی شدند که ۱۶ شهر شرایط بهینه دارند. این مناطق می‌توانند با توربین‌های بادی ۵۵۰ کیلوواتی حدود ۱۱/۶ میلیون مترمکعب آب شیرین تولید کنند که ۶۳/۸۴۷۵ درصد نیاز آبی کشور را تأمین می‌کند. بیشترین پتانسیل در تربت جام (خراسان رضوی) با ۲/۲۴ میلیون مترمکعب است [۱۱].

در یک مطالعهٔ جامع، شا و همکاران یک مرور جامع دربارهٔ کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) در مکان‌یابی انرژی‌های تجدیدپذیر انجام دادند. آن‌ها با بررسی بیش از ۸۰ مطالعه، ترکیب (GIS) و (MCDM) را به عنوان رایج‌ترین چارچوب مکان‌یابی معرفی کردند. نتیجه نشان داد روش‌های AHP، TOPSIS و FUZZY بیشترین کاربرد را در تعیین سایت‌های مناسب انرژی‌های خورشیدی و بادی دارند [۱۲]. در همین راستا، کومار و همکاران یک مقالهٔ مروری دربارهٔ نقش روش‌های MCDM در توسعهٔ پایدار انرژی‌های تجدیدپذیر ارائه کردند. آن‌ها با تحلیل مطالعات مختلف نشان دادند تصمیم‌گیری چندمعیاره ابزار کلیدی برای انتخاب بهینهٔ منابع انرژی پاک است. نتیجهٔ پژوهش بیان کرد که ترکیب معیارهای اقتصادی، زیست‌محیطی و فنی باعث افزایش دقت در انتخاب سایت‌های انرژی می‌شود [۱۳].

قاسم‌پور و همکاران یک مرور سیستماتیک دربارهٔ کاربرد MCDM در انتخاب سایت نیروگاه‌های خورشیدی انجام دادند. آن‌ها معیارهای اصلی مکان‌یابی شامل تابش خورشیدی، دسترسی به شبکهٔ برق و شرایط اقتصادی را تحلیل کردند. نتیجه نشان داد عدم یکپارچگی معیارها یکی از چالش‌های اصلی در انتخاب سایت‌های بهینهٔ نیروگاه خورشیدی است [۱۴].

شورابه و همکاران یک مدل تصمیم‌گیری مکانی مبتنی بر GIS برای انتخاب سایت نیروگاه خورشیدی در اقلیم‌های مختلف ایران ارائه کردند. آن‌ها از ترکیب معیارهای فنی، اقتصادی و محیط زیستی در چارچوب تحلیل ریسک استفاده کردند. نتیجه نشان داد برخی مناطق ایران (به‌ویژه نواحی مرکزی و جنوبی) بالاترین پتانسیل توسعهٔ نیروگاه خورشیدی را دارند [۱۵].

دمیر و همکاران یک مطالعه برای مکان‌یابی بهینهٔ نیروگاه‌های بادی با استفاده از ترکیب GIS و تحلیل چندمعیاره (MCDM) به همراه ارزیابی چرخهٔ عمر (LCA) انجام دادند. در پژوهش یادشده از روش AHP و مدل‌سازی مکانی در GIS برای وزن‌دهی معیارهای فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی استفاده شد. نتیجه نشان داد ادغام LCA با GIS-MCDM باعث افزایش دقت در انتخاب سایت‌های بهینه و کاهش اثرات زیست‌محیطی نیروگاه‌های بادی می‌شود [۱۶]. در نهایت، زندی و همکاران یک چارچوب ترکیبی GIS و MCDM فازی برای مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی در استان کرمانشاه ایران ارائه کردند. در این مطالعه از روش‌های FAHP، SAW و TOPSIS برای وزن‌دهی و رتبه‌بندی مناطق مناسب استفاده شد. نتیجهٔ پژوهش نشان داد مناطق مرکزی و جنوبی استان دارای بیشترین پتانسیل برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی هستند و نتایج مدل‌های مختلف تفاوت‌هایی جزئی، اما معنادار دارند [۱۷].

در این مطالعات، عواملی مانند تابش خورشیدی، سرعت باد، شیب، ارتفاع، کاربری اراضی، فاصله از جاده‌ها، نزدیکی به شبکهٔ برق، فاصله از پست‌های انتقال، مناطق حفاظت‌شده، حساسیت‌های اکولوژیکی و محدودیت‌های زمین‌شناسی می‌توانند در شناسایی مناطق مناسب برای توسعهٔ پروژه‌های انرژی تجدیدپذیر مورد استفاده قرار گیرند. با وجود این، بخش قابل توجهی از مطالعات پتانسیل‌سنجی عمدتاً بر شناسایی مناطق مناسب و برآورد ظرفیت منابع تمرکز دارند و کمتر به پیامدهای ورود این ظرفیت‌ها به کل سیستم انرژی، از جمله تغییر در سبد انرژی، هزینهٔ کل سیستم، میزان انتشار آلاینده‌ها، امنیت انرژی و مسیرهای بلندمدت گذار انرژی سبز توجه می‌کنند.

در مقابل، مدل‌سازی سیستم انرژی به عنوان یک جریان پژوهشی مکمل، امکان تحلیل عملکرد سیستم انرژی را تحت سناریوهای مختلف فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و سیاستی فراهم می‌سازد. رویکردها و ابزارهایی مانند EnergyPLAN، سیستم‌های انرژی یکپارچه، سیستم‌های انرژی هوشمند، تحلیل سناریو، مدیریت انرژی، مدیریت سمت تقاضا، بهینه‌سازی مصرف انرژی و برنامه‌ریزی پایدار انرژی، به طور فزاینده‌ای برای بررسی نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر، بهبود بهره‌وری انرژی، مسیرهای کربن‌زدایی، بی‌طرفی کربنی و توسعهٔ سبز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این‌حال، در بسیاری از مطالعات مدل‌سازی سیستم انرژی، ظرفیت یا سهم انرژی‌های تجدیدپذیر به صورت مفروض یا کلی وارد مدل می‌شود و محدودیت‌های مکانی، قابلیت واقعی بهره‌برداری، شرایط زیرساختی و شواهد حاصل از پتانسیل‌سنجی مکانی به اندازهٔ کافی در ساخت سناریوها لحاظ نمی‌شود.

با وجود مکمل بودن این دو جریان، پیوند میان آن‌ها در بسیاری از پژوهش‌ها در حد اشارهٔ مفهومی باقی مانده است. پتانسیل سنجی مکانی مشخص می‌کند که یک فناوری در چه نقاطی، تحت چه محدودیت‌هایی و با چه ظرفیت نظری یا فنی قابلیت استقرار دارد؛ اما مدل‌سازی سیستم انرژی بررسی می‌کند که چه مقدار از این ظرفیت، در چه زمان، با چه ترکیب فناوری، هزینه، ذخیره‌سازی و زیرساخت شبکه باید وارد سیستم شود. نبود اتصال داده‌ای میان این دو سطح موجب می‌شود برخی نقشه‌های پتانسیل، بدون توجه به نیاز واقعی سیستم و محدودیت جذب شبکه تهیه شوند و برخی سناریوهای کلان نیز بر ظرفیت‌هایی استوار باشند که از نظر زمین، محیط زیست، فاصله از زیرساخت یا پذیرش اجتماعی قابل تحقق نیستند. بنابراین، مسئلهٔ اصلی فقط کنار هم قرار دادن دو دسته مطالعه نیست، بلکه تبیین سازوکاری است که داده، فرض‌ها و نتایج آن‌ها را به یک چرخهٔ تصمیم گیری مشترک تبدیل کند.

از این‌رو، انتخاب این دو حوزه برای مقایسه بر مبنای مکمل بودن مقیاس‌های تحلیلی آن‌ها صورت گرفته است؛ به گونه‌ای که ارزیابی مکانی، قابلیت توسعهٔ منابع را از منظر «کجا و تحت چه محدودیت‌هایی» مشخص می‌کند و مدل‌سازی سیستم انرژی، نحوهٔ استفاده از این ظرفیت‌ها را از منظر «چه مقدار، چه زمانی و با چه ترکیبی» ارزیابی می‌کند.

هدف اصلی این پژوهش، سنجش و تبیین مسیرهای همگرایی میان ارزیابی مکانی انرژی‌های تجدیدپذیر و برنامه‌ریزی یکپارچهٔ سیستم انرژی است. به خلاف مرورهایی که فقط تولیدات علمی یا بازیگران اصلی را رتبه‌بندی می‌کنند، این مطالعه بر سه سطح تحلیلی تمرکز دارد: نخست، مقایسهٔ سرعت رشد و بلوغ علمی دو جریان؛ دوم، شناسایی خوشه‌های مفهومی و نقاط اتصال آن‌ها؛ و سوم، استخراج الزامات یک زنجیرهٔ تحلیلی که خروجی‌های مکانی را به سناریوهای سیستمی و نتایج مدل‌های انرژی را به اولویت‌های توسعهٔ سرزمینی بازگرداند. از این منظر، مقالهٔ حاضر یک سنتز تطبیقی از ساختار دانش ارائه می‌دهد و نقش علم‌سنجی را از توصیف ادبیات به پشتیبانی از طراحی چارچوب پژوهشی و سیاستی ارتقا می‌دهد.

بر مبنای شکاف یادشده، پژوهش به سه پرسش پاسخ می‌دهد: ۱) دو حوزه ارزیابی مکانی و مدل‌سازی سیستم انرژی از نظر رشد، تمرکز و ساختار همکاری چه تفاوتی دارند؟ ۲) کدام خوشه‌ها و موضوعات نوظهور می‌توانند حلقهٔ اتصال میان واقعیت‌های سرزمینی و سناریوهای گذار باشند؟ ۳) برای تبدیل ظرفیت مکانی به ظرفیت قابل استفاده در مدل و سپس تبدیل نتایج مدل به اولویت توسعه، چه منطق یکپارچه‌ای قابل پیشنهاد است؟ پاسخ به این پرسش‌ها، دامنهٔ مقالهٔ فارسی را بر «همگرایی روش‌شناختی و کاربرد برنامه‌ریزی» متمرکز می‌کند.

۲. روش‌شناسی

روش‌شناسی پژوهش در چهار گام سازمان‌دهی شد: طراحی مقایسه‌ای دو قلمرو علمی، استخراج و پالایش داده‌ها، تحلیل شاخص های کتاب‌سنجی و شبکه‌ای و در نهایت سنتز تفسیری برای شناسایی مسیرهای همگرایی. در این ساختار، دو مجموعه داده به طور مستقل تحلیل شدند تا تفاوت‌های درونی آن‌ها پنهان نشود؛ سپس نتایج در سطح روند زمانی، همکاری علمی، خوشه‌های کلیدواژه و موضوعات نوظهور با یکدیگر مقایسه شدند.

۲-۱. طراحی پژوهش

این تحقیق از نوع علم‌سنجی تطبیقی و نقشه‌نگاری علمی است. واحد تحلیل، مدارک علمی نمایه‌شده و روابط کتاب‌شناختی میان آن‌هاست. رویکرد پژوهش ضمن برخورداری از بخش توصیفی، ماهیتی تحلیلی دارد؛ زیرا هدف فقط گزارش تعداد مقالات یا استنادها نیست، بلکه تشخیص تفاوت منطق دانشی دو حوزه و تعیین محل‌های بالقوهٔ اتصال آن‌هاست. در نتیجه، شاخص‌های کمی در کنار تفسیر شبکه‌های مفهومی و تکامل زمانی به کار گرفته شدند.

طراحی مقایسه‌ای بر این فرض استوار است که ارزیابی مکانی و مدل‌سازی سیستم انرژی دو مقیاس متفاوت از یک مسئلهٔ واحد را مطالعه می‌کنند. مجموعهٔ نخست عمدتاً با منبع، مکان، تناسب و محدودیت‌های سرزمینی سروکار دارد و مجموعهٔ دوم بر سیستم سناریو، هزینه، انتشار و انعطاف‌پذیری تمرکز می‌کند. مستقل نگه داشتن جست‌وجوها امکان داد ویژگی‌های اختصاصی هر حوزه حفظ شود و مرحلهٔ تطبیق، بر مبنای شواهد حاصل از شبکه‌ها انجام گیرد، نه بر اساس ادغام زودهنگام و ناهمگون داده‌ها.

تحلیل توصیفی شامل روند انتشار، حجم مدارک، استناد و توزیع جغرافیایی بود. تحلیل ساختاری، شبکهٔ هم‌تألیفی نویسندگان، کشورها و سازمان‌ها، هم‌رخدادی کلیدواژه‌ها و تکامل موضوعی را در بر گرفت. در مرحلهٔ سنتز، خوشه‌ها بر اساس کارکرد آن‌ها در زنجیرهٔ تصمیم‌گیری انرژی تفسیر شدند؛ به این معنا که مشخص شد هر خوشه به تولید دادهٔ مکانی، ارزیابی گزینه، ساخت سناریو، بهینه‌سازی سیستم یا سیاست‌گذاری مربوط است.

برای جلوگیری از تقلیل تحلیل به رتبه‌بندی ساده، نتایج هر شاخص در ارتباط با پرسش همگرایی تفسیر شد. برای مثال، ظهور هم‌زمان مفاهیم هیدروژن، ذخیره‌سازی، اتصال بخش‌ها، یادگیری ماشین و تحلیل فنی ـ اقتصادی به عنوان نشانه‌ای از نزدیک شدن مقیاس مکانی و سیستمی در نظر گرفته شد. این منطق تفسیری، مبنای بحث و چارچوب پیشنهادی مقاله را تشکیل می‌دهد.

۲-۲. پایگاه داده و منبع اطلاعات

در این مطالعه، پایگاه داده اصلی مورد استفاده Scopus بوده است. Scopus به عنوان یکی از پایگاه‌های معتبر و جامع داده علمی در سطح بین‌المللی، منابع معتبر در حوزه‌های مهندسی انرژی، علوم محیطی، سیستم‌های پایدار و مطالعات گذار انرژی ارائه می‌دهد. انتخاب این پایگاه به دلیل استاندارد بالای نمایه‌سازی، کیفیت داده‌ها، پوشش بین‌رشته‌ای و قابلیت استخراج داده‌های کتاب‌شناختی دقیق انجام شده است [۱۸ و ۱۹].

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل اطلاعات کتاب‌شناختی مقالات از جمله عنوان، چکیده، کلیدواژه‌ها، نام نویسندگان، وابستگی سازمانی، کشورها، منابع انتشار و اطلاعات استنادی بوده است. این داده‌ها امکان تحلیل ساختار علمی، شبکه‌های همکاری، روندهای زمانی و الگوهای موضوعی را در حوزهٔ مورد مطالعه فراهم می‌کنند.

فرایند استخراج داده‌ها با استفاده از جست‌وجوی سیستماتیک در همهٔ بخش‌های مدارک انجام شده است تا بیشترین میزان پوشش مفهومی در حوزهٔ پتانسیل‌سنجی انرژی‌های تجدیدپذیر و مدل‌سازی سیستم انرژی حاصل شود. همچنین، بازه زمانی مطالعه از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۶ در نظر گرفته شده است تا روند تکامل علمی این حوزه در یک دورهٔ بلندمدت قابل تحلیل باشد.

پس از استخراج اولیه داده‌ها، مجموعه مقالات به‌دست‌آمده برای حذف موارد تکراری و بررسی سازگاری اطلاعات کتاب‌شناختی آماده‌سازی شدند. در نهایت، داده‌های نهایی به نرم‌افزارهای VOSviewer و Bibliometrix (R Studio) منتقل شدند تا تحلیل‌های علم‌سنجی و نقشه‌نگاری علمی روی آن‌ها انجام شود.

۲-۳. استراتژی جست‌وجو و ابزارهای تحلیل

استراتژی جست‌وجو به صورت دوشاخه طراحی شد. شاخهٔ نخست، ادبیات مرتبط با GIS، تحلیل فضایی، مکان‌یابی، ارزیابی تناسب، تصمیم‌گیری چندمعیاره و منابع مختلف انرژی تجدیدپذیر را پوشش داد. شاخهٔ دوم، مطالعات مرتبط با مدل‌سازی سیستم انرژی، تحلیل سناریو، برنامه‌ریزی منطقه‌ای و شهری، مدیریت تقاضا، بهینه‌سازی، سیاست اقلیمی و گذار کم‌کربن را هدف قرار داد. جست‌وجو در Scopus با استفاده از عملگرهای AND و OR و در همهٔ بخش‌های قابل جست‌وجوی مدرک انجام شد. جداسازی دو عبارت جست‌وجو برای حفظ حساسیت مفهومی و امکان مقایسهٔ معتبر ضروری بود.

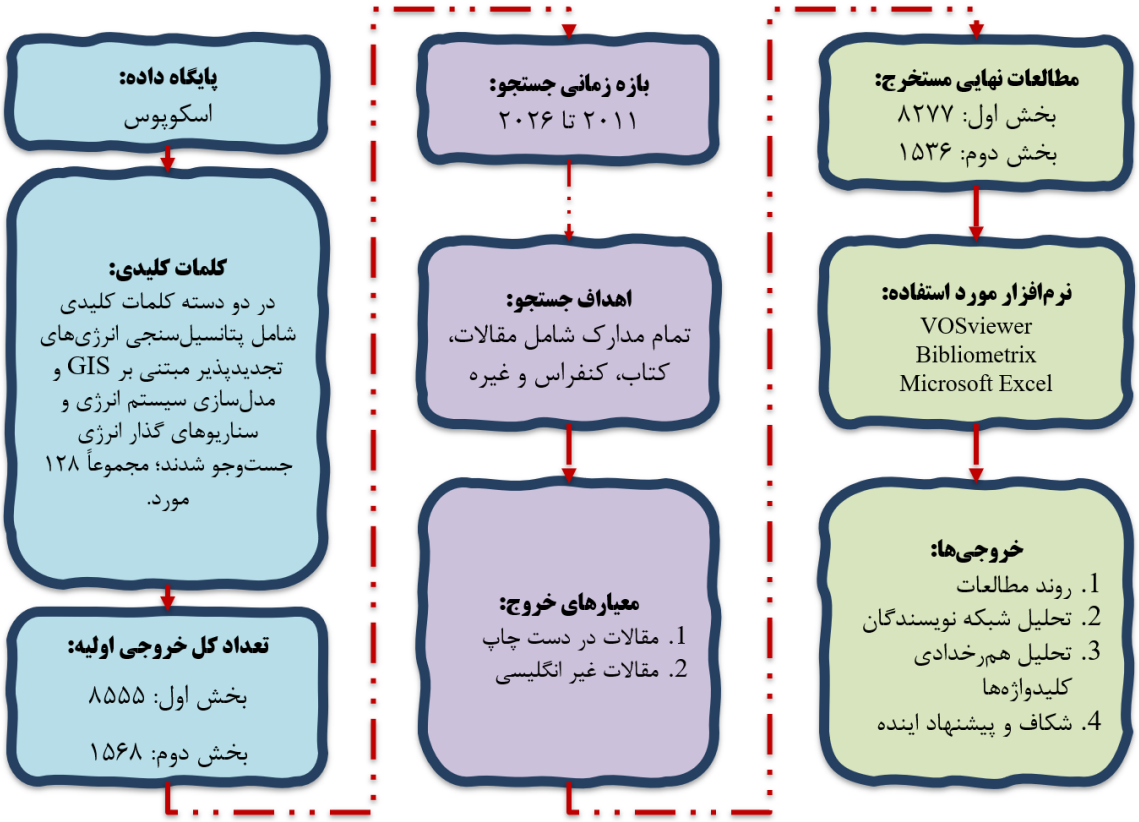
کلیدواژه‌ها طوری انتخاب شدند که زنجیرهٔ کامل تصمیم‌گیری را از شناسایی منبع تا طراحی مسیر گذار پوشش دهند. در بخش مکانی، معیارهای فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی، زمین‌شناختی و زیرساختی لحاظ شدند؛ در بخش سیستمی، مفاهیم کارایی، مدیریت مصرف، بهینه‌سازی چندهدفه، کربن‌زدایی، بی‌طرفی کربنی و مسیرهای گذار در نظر گرفته شدند. ساختار کامل عبارت‌ها در جدول ۱ ارائه شده است تا قابلیت بازتولید جست‌وجو حفظ شود.

پس از استخراج داده‌ها، برای تحلیل و پردازش اطلاعات از دو نرم‌افزار اصلی Bibliometrix (در محیط R Studio) و VOSviewer استفاده شد. انتخاب این دو ابزار به دلیل تفاوت ماهیت تحلیلی آن‌ها و قابلیت‌های مکمل آن‌ها در تحلیل بیبلیومتریک صورت گرفته است.

نرم‌افزار Bibliometrix به عنوان یک بستهٔ جامع در محیط R، برای تحلیل‌های آماری پیشرفته علم‌سنجی مورد استفاده قرار گرفت. این نرم‌افزار امکان انجام تحلیل‌های توصیفی مانند روند انتشار سالانه، تحلیل منابع، کشورها و نویسندگان و همچنین، تحلیل‌های ساختاری نظیر شبکه‌های استنادی و تحلیل تماتیک (Thematic Analysis) را فراهم می‌سازد. انعطاف‌پذیری بالا و قابلیت برنامه‌نویسی در R باعث می‌شود Bibliometrix برای تحلیل‌های عمیق‌تر و بازتولیدپذیر (Reproducible Analysis) مناسب باشد [۲۰ و ۲۱].

در مقابل، نرم‌افزار VOSviewer برای ترسیم و بصری‌سازی شبکه‌های علمی مورد استفاده قرار گرفت. این نرم‌افزار به طور خاص در نمایش گرافیکی روابط بین کلیدواژه‌ها، نویسندگان، کشورها و منابع علمی بسیار کارآمد است و امکان شناسایی خوشه‌های موضوعی (Clustering) و ساختارهای پنهان در داده‌های علمی را به صورت بصری فراهم می‌کند. به‌ویژه در این پژوهش، VOSviewer برای تحلیل هم‌رخدادی کلیدواژه‌ها (Keyword Co-occurrence) و ترسیم نقشه‌های علمی به کار گرفته شد.

استفادهٔ هم‌زمان از Bibliometrix و VOSviewer به این دلیل انجام شد که Bibliometrix توانایی انجام تحلیل‌های آماری و ساختاری دقیق را دارد، در حالی که VOSviewer قدرت بالایی در نمایش بصری شبکه‌ها و خوشه‌بندی مفهومی ارائه می‌دهد [۲۲ و ۲۳]. ترکیب این دو ابزار موجب شد که هم تحلیل‌های عددی و هم تحلیل‌های تصویری در سطحی مکمل و یکپارچه انجام شوند و درک عمیق‌تری از ساختار دانش در حوزهٔ مورد مطالعه حاصل شود. شکل ۱ جریان کلی پژوهش را از مرحلهٔ استخراج داده‌های علمی در دو حوزهٔ اصلی تا پردازش و تحلیل آن‌ها نشان می‌دهد.



شکل ۱. چارچوب مفهومی و جریان اجرای پژوهش

جدول ۱ ساختار کامل کلمات کلیدی مورد استفاده در استراتژی جست‌وجوی این پژوهش را در دو بخش اصلی نشان می‌دهد. بخش اول مربوط به مطالعات پتانسیل‌سنجی انرژی‌های تجدیدپذیر مبتنی بر GIS و تحلیل مکانی است که شامل مجموعه‌ای از کلیدواژه‌های مرتبط با سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی، تحلیل‌های مکانی، تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM/MCDA)، نقشه‌سازی تناسب و انواع منابع انرژی تجدیدپذیر است. همچنین در این بخش، معیارهای مختلف فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و زمین‌شناسی به عنوان عوامل مؤثر در مکان‌یابی پروژه‌های انرژی در نظر گرفته شده‌اند تا پوشش جامعی از ادبیات این حوزه فراهم شود. بخش دوم جدول نیز به مطالعات مدل‌سازی سیستم انرژی و تحلیل سناریوهای گذار انرژی اختصاص دارد که شامل کلیدواژه‌های مرتبط با مدل‌های انرژی مانند EnergyPLAN، تحلیل سیستم‌های انرژی یکپارچه، مدیریت انرژی، بهینه‌سازی مصرف، مدیریت تقاضا و مفاهیم گذار انرژی سبز است. هدف از طراحی این ساختار دوگانه، ایجاد ارتباط میان دو جریان اصلی ادبیات یعنی «پتانسیل‌سنجی مکانی منابع انرژی» و «مدل‌سازی سیستم انرژی و سیاست‌گذاری گذار انرژی» و فراهم‌سازی یک چارچوب جامع برای تحلیل بیبلیومتریک در این پژوهش بوده است.

جدول ۱. کلیدواژه‌های مورد استفاده در جست‌وجوی پایگاه داده

بخش اول: پتانسیل‌سنجی GIS انرژی‌های تجدیدپذیر	بخش دوم: مدل‌سازی سیستم انرژی
(("GIS" OR "Geographic Information System" OR "ArcGIS" OR "Spatial Analysis" OR "Geospatial Analysis" OR "Boolean Logic" OR "Boolean Overlay" OR "Boolean Analysis" OR "Boolean GIS" OR "Spatial Decision Support System" OR "GIS-Based Decision Making" OR "MCDA" OR "MCDM" OR "Spatial Optimization" OR "Suitability Mapping") AND ("Renewable Energy" OR "Renewable Energy Resources" OR "Clean Energy" OR "Sustainable Energy" OR "Green Energy") AND ("Site Selection" OR "Site Suitability" OR "Land Suitability" OR "Location Analysis" OR "Spatial Siting" OR "Spatial Planning" OR "Renewable Energy Potential" OR "Energy Infrastructure Planning") AND (("Wind Energy" OR "Wind Power" OR "Wind Farm") OR ("Solar Energy" OR "Solar Power" OR "Photovoltaic" OR "PV System") OR ("Hydropower" OR "Hydroelectric Energy") OR ("Geothermal Energy" OR "Geothermal Power") OR ("Biomass Energy" OR "Bioenergy")) AND ("Criteria" OR "Factors" OR "Indicators" OR "Spatial Criteria" OR "Suitability Criteria") AND (("Economic Factors" OR "Distance to Road" OR "Distance to Cities" OR "Distance to Urban Areas" OR "Distance to Airport" OR "Distance to Infrastructure" OR "Transmission Line Distance" OR "Grid Proximity" OR "Distance to Substation") OR ("Technical Factors" OR "Slope" OR "Elevation" OR "Aspect" OR "Solar Irradiation" OR "Global Horizontal Irradiance" OR "GHI" OR "Wind Speed" OR "Wind Density" OR "Energy Potential" OR "Capacity Factor") OR ("Environmental Factors" OR "Land Use" OR "Land Cover" OR "Vegetation Cover" OR "Distance to River" OR "Protected Areas" OR "Distance to Historical Sites" OR "Ecological Constraints" OR "Environmental Sensitivity") OR ("Geological Factors" OR "Distance to Fault" OR "Fault Zones" OR "Seismic Risk" OR "Lithology" OR "Terrain Stability"))	(("EnergyPLAN" OR "Energy Plan" OR "Integrated Energy System" OR "Energy System Modeling" OR "Energy System Analysis" OR "Energy Scenario" OR "Scenario Analysis" OR "Smart Energy System") AND ("Provincial Energy System" OR "Regional Energy System" OR "Local Energy System" OR "Urban Energy System" OR "Integrated Energy Planning" OR "Regional Energy Planning" OR "Sustainable Energy Planning") AND ("Energy Management" OR "Energy Consumption Management" OR "Demand Side Management" OR "DSM" OR "Load Management" OR "Energy Efficiency Management" OR "Energy Demand" OR "Energy Consumption") AND ("Energy Optimization" OR "Energy Consumption Optimization" OR "Energy Efficiency" OR "Energy Saving" OR "Optimal Energy Use" OR "Energy System Optimization" OR "Multi-Objective Optimization") AND ("Green Management" OR "Sustainable Management" OR "Environmental Management" OR "Green Governance" OR "Sustainability Governance" OR "Green Policy" OR "Environmental Policy" OR "Sustainable Development" OR "Green Development" OR "Climate Governance" OR "Environmental Sustainability") AND ("Energy Transition" OR "Sustainable Energy Transition" OR "Low Carbon Transition" OR "Clean Energy Transition" OR "Decarbonization" OR "Carbon Neutrality" OR "Net Zero" OR "Low Carbon Development" OR "Climate Change Mitigation" OR "Green Energy Transition" OR "Transition Pathways"))

۳. نتایج و تحلیل تطبیقی

۳–۱. مقیاس داده‌ها و روند رشد

همان‌گونه که جدول ۲ نشان می‌دهد، مجموعه ارزیابی مکانی با ۸۲۷۷ مدرک و ۲۵۰۲۵۴ استناد، بدنه‌ای بزرگ‌تر و متنوع‌تر دارد؛ در مقابل، مجموعه مدل‌سازی سیستم انرژی با ۱۵۳۶ مدرک و ۶۲۵۵۲ استناد، میانگین استناد بیشتری ثبت کرده است. این تفاوت بیانگر دو الگوی بلوغ است: حوزهٔ مکانی از انتشار گسترده در کاربردها و فناوری‌های متعدد برخوردار است، اما حوزهٔ سیستمی به دلیل تمرکز بر سناریوهای گذار و تصمیم‌های کلان، اثرگذاری استنادی فشرده‌تری دارد.

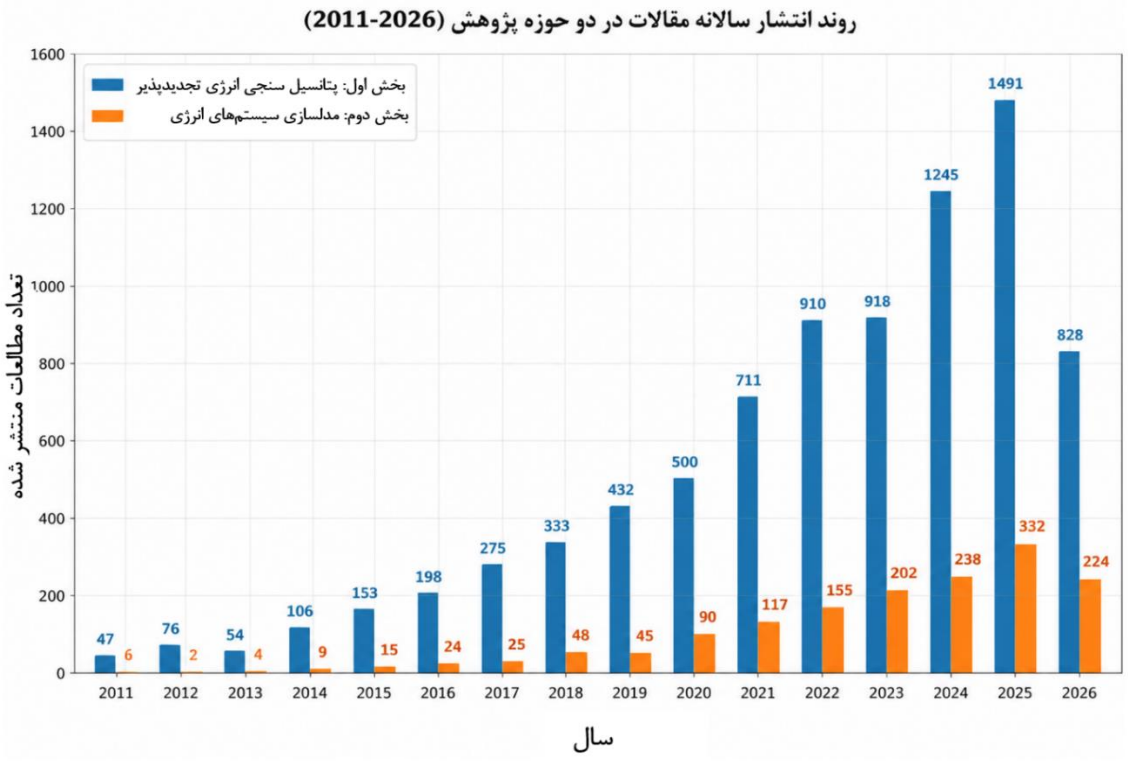
جدول ۲. شاخص‌های کلی داده‌های استخراج‌شده از دو حوزهٔ پژوهش

شاخص‌ها	بخش اول: پتانسیل‌سنجی GIS انرژی‌های تجدیدپذیر	بخش دوم: مدل‌سازی سیستم انرژی
دورهٔ زمانی جست‌وجو	۲۰۱۱–۲۰۲۶	۲۰۱۱–۲۰۲۶
تعداد مدارک نهایی	۸۲۷۷	۱۵۳۶
تعداد مقالات	۶۱۶۲	۹۵۹
مجموع استنادها	۲۵۰۲۵۴	۶۲۵۵۲
میانگین استناد	۳۰.۲۳	۴۰.۷۲

روند سالانه شکل ۲ رشد شتابان هر دو حوزه را نشان می‌دهد. تعداد مدارک حوزهٔ مکانی از ۴۷ مورد در سال ۲۰۱۱ به ۱۴۹۱ مورد در سال ۲۰۲۵ رسید؛ در حوزهٔ مدل‌سازی نیز تعداد مقالات از ۶ به ۳۳۲ افزایش یافت. رشد مطلق در بخش نخست بیشتر

است، اما رشد نسبی بخش دوم سریع‌تر بوده است. جهش انتشارات پس از ۲۰۱۸ را می‌توان با افزایش تعهدات اقلیمی، توسعهٔ فناوری‌های تجدیدپذیر، نیاز به برنامه‌ریزی شبکه و گسترش ابزارهای داده‌محور مرتبط دانست.

داده سال ۲۰۲۶ به دلیل کامل نبودن سال انتشار باید با احتیاط تفسیر شود. با این‌حال، مسیر کلی روشن است: تحلیل مکانی زودتر به بلوغ رسیده و مدل‌سازی سیستم انرژی در سال‌های اخیر با سرعت بیشتری به موضوعات کربن‌زدایی، انعطاف‌پذیری و برنامه‌ریزی چندبخشی وارد شده است. بنابراین، تفاوت دو منحنی بیش از آنکه نشانهٔ رقابت باشد، بیانگر مکمل بودن یک حوزهٔ بالغ مکانی و یک حوزهٔ در حال گسترش سیستمی است.



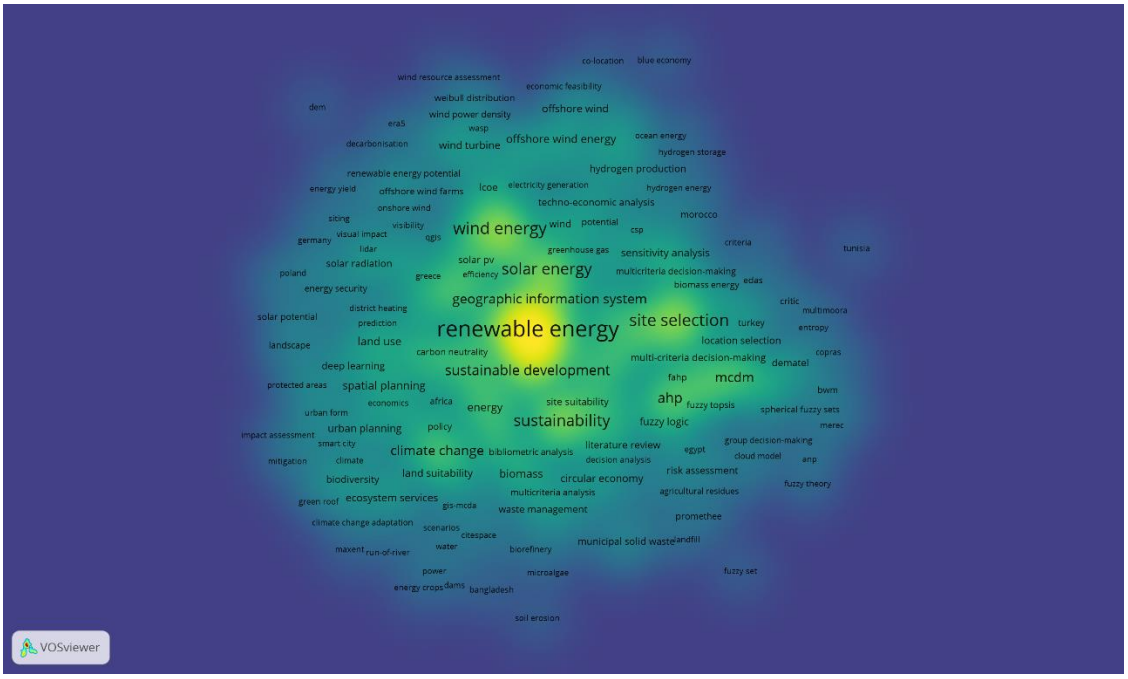
شکل ۲. روند انتشارات سالانه

۳-۲. تحول موضوعی و جهت‌گیری زمانی

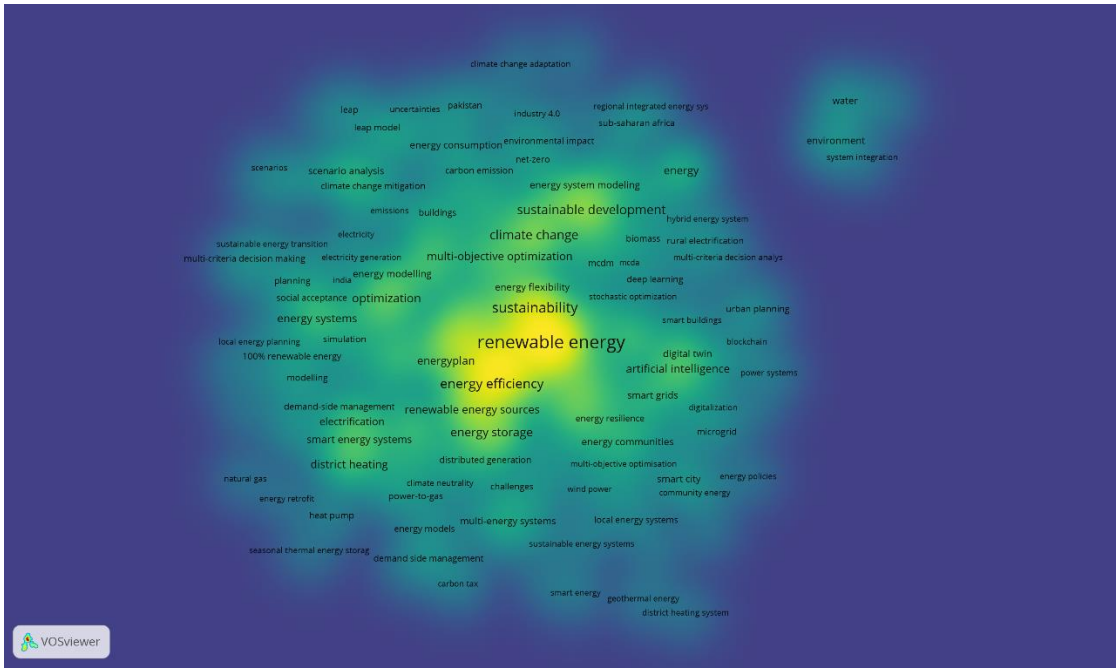
نقشهٔ چگالی شکل ۳ (الف) نشان می‌دهد هستهٔ حوزهٔ مکانی بر renewable energy، GIS، site selection، wind energy، solar energy و روش‌های AHP و MCDM استوار است. حضور sustainability، climate change و energy transition در لایه‌های جدیدتر شبکه نشان می‌دهد این ادبیات از تعیین سایت مناسب فراتر رفته و به ارزیابی راهبردی زمین، محدودیت‌های محیطی و نقش مکانی منابع در گذار انرژی نزدیک شده است. به بیان فشرده، جهت تحول از نقشه‌سازی پتانسیل به برنامه‌ریزی مکانی گذار بوده است.

در شکل ۳ (ب)، حوزهٔ مدل‌سازی سیستم انرژی پیرامون renewable energy، energy transition، energy planning، energy efficiency و policy شکل گرفته است. برجسته شدن decarbonization، carbon neutrality، energy storage، sector coupling، smart grids و scenario analysis بیانگر عبور از برنامه‌ریزی عمومی به طراحی سیستم‌های کم‌کربن، انعطاف‌پذیر و یکپارچه است. این حوزه در حال تبدیل شدن از ابزار پیش‌بینی و موازنه انرژی به محیطی برای ارزیابی فناوری، سیاست، بازار و رفتار تقاضاست.

(الف)



(ب)

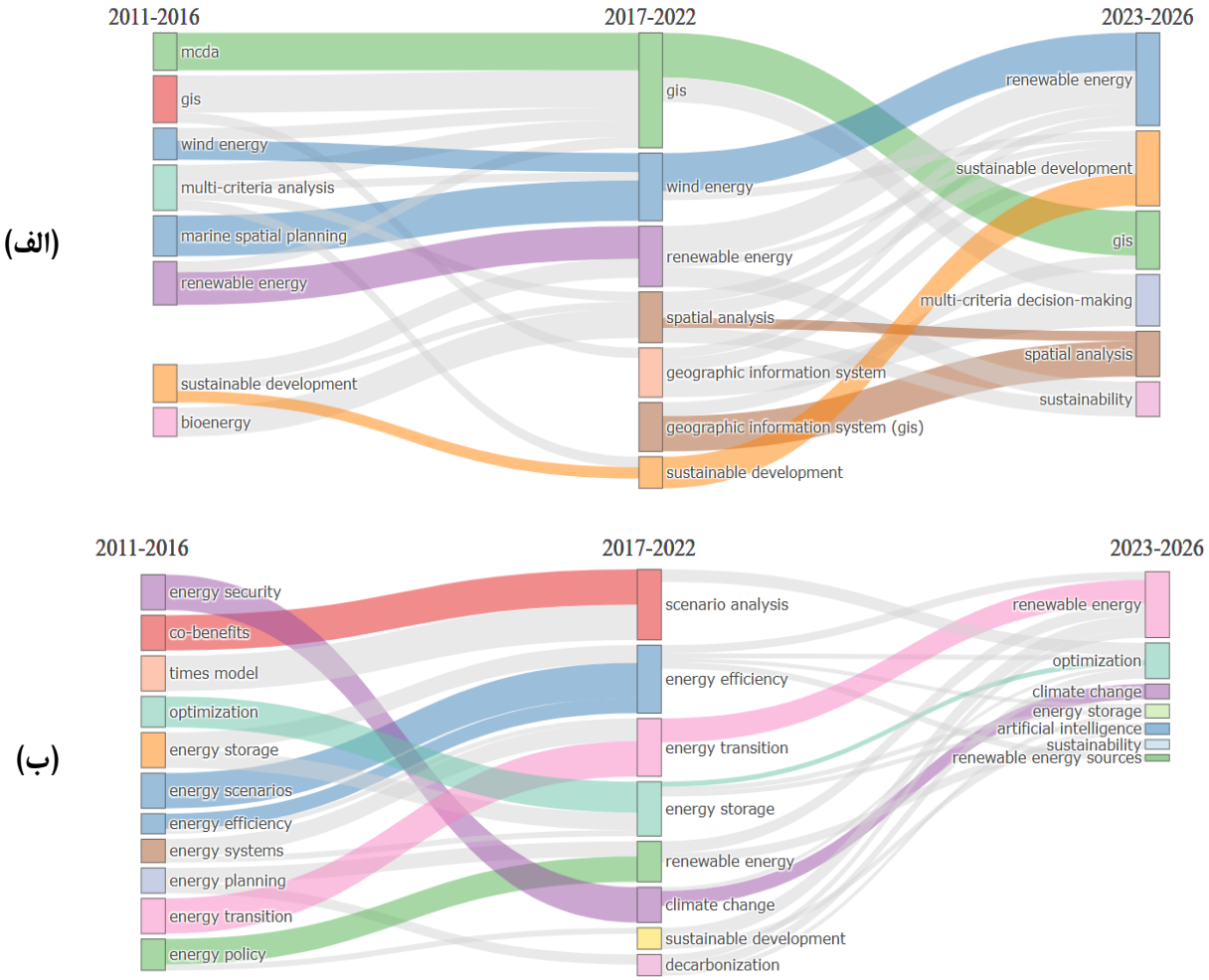


شکل ۳. نقشهٔ چگالی هم‌رخدادی کلیدواژه‌ها در دو حوزهٔ پژوهش: (الف) پتانسیل‌سنجی انرژی‌های تجدیدپذیر مبتنی بر GIS؛ (ب) مدل‌سازی سیستم انرژی و گذار انرژی سبز

تکامل موضوعی شکل ۴ (الف) سه مسیر مهم را آشکار می‌کند: تداوم GIS و پیوند آن با تصمیم‌گیری چندمعیاره؛ گسترش bioenergy به تحلیل مکانی چندمنبعی و کاربری زمین؛ و انتقال marine spatial planning به انرژی بادی فراساحلی و منابع دریایی. این الگو نشان می‌دهد روش‌های مکانی از مطالعهٔ یک فناوری خاص به ارزیابی سبد منابع، تعارض‌های زمین و گزینه‌های جدیدی مانند انرژی دریایی حرکت کرده‌اند.

در شکل ۴ (ب)، موضوعات پراکندهٔ دوره ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۶ شامل کارایی، امنیت، سیاست و سناریوی انرژی در دورهٔ بعد حول گذار انرژی، انرژی تجدیدپذیر، کربن‌زدایی و تغییر اقلیم منسجم شده‌اند. استمرار energy efficiency و تقویت energy

storageنشان می‌دهد کاهش تقاضا و تأمین انعطاف‌پذیری همچنان پایه فنی سناریوهای گذار هستند. نتیجهٔ مشترک دو نقشه آن است که مفاهیم پایداری و گذار، زبان مشترک در حال شکل‌گیری میان دو حوزه‌اند.

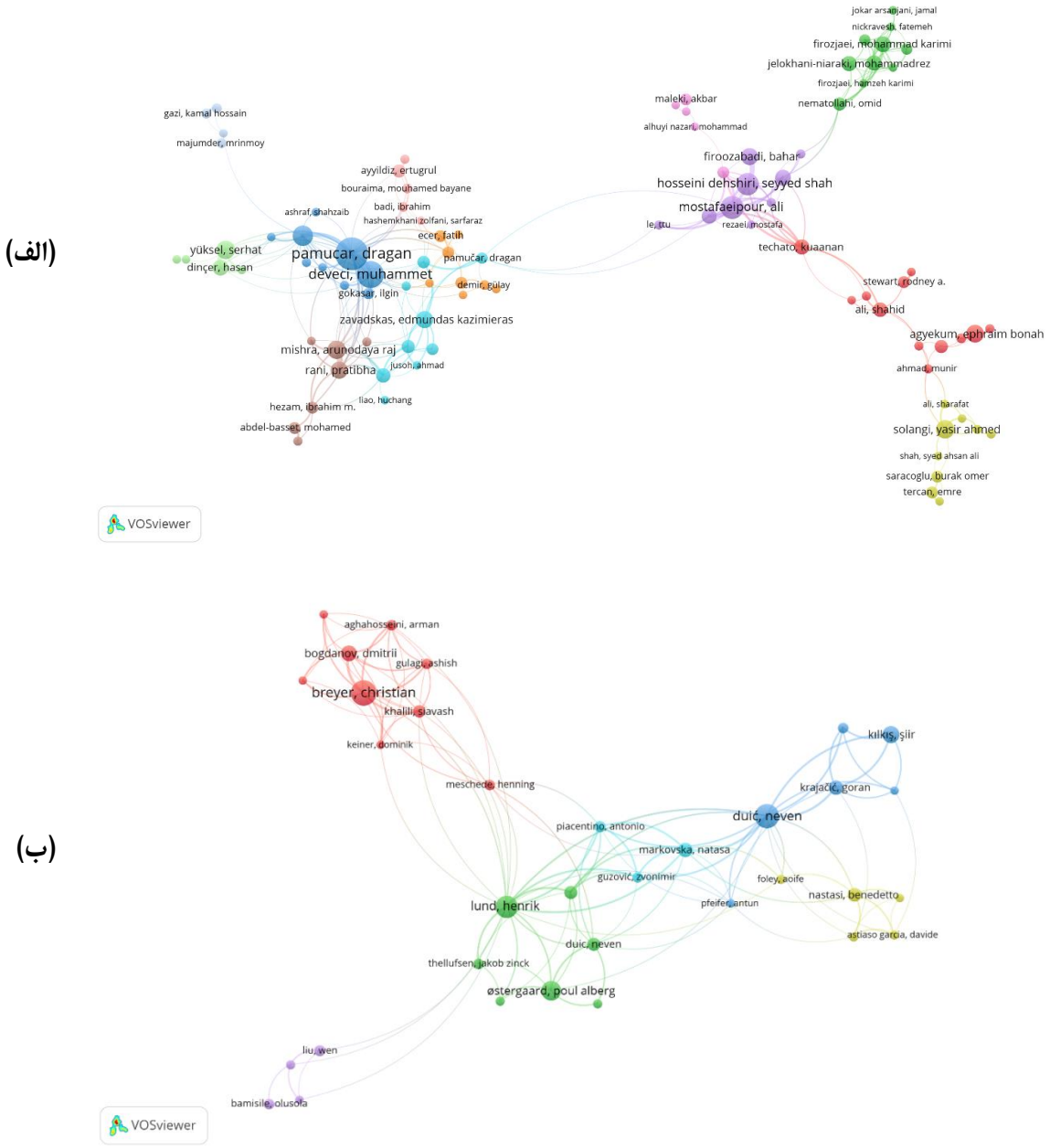


شکل ٤. تکامل موضوعی در گذر زمان: (الف) پتانسیل‌سنجی انرژی‌های تجدیدپذیر مبتنی بر GIS؛ (ب) مدل‌سازی

۳-۳. ساختار همکاری علمی

شبکهٔ نویسندگان شکل ۵ نشان می‌دهد حوزهٔ مکانی ساختاری گسترده و چندخوشه‌ای دارد. Wu, Yunna، Pamucar, Dragan و Deveci, Muhammet از گره‌های برجسته‌اند و پژوهشگرانی از ایران نیز در خوشه‌های مکان‌یابی، تصمیم‌گیری چندمعیاره و ارزیابی تناسب حضور دارند. تنوع نویسندگان با ماهیت کاربردی GIS و قابلیت استفاده آن در فناوری‌ها و مناطق مختلف سازگار است.

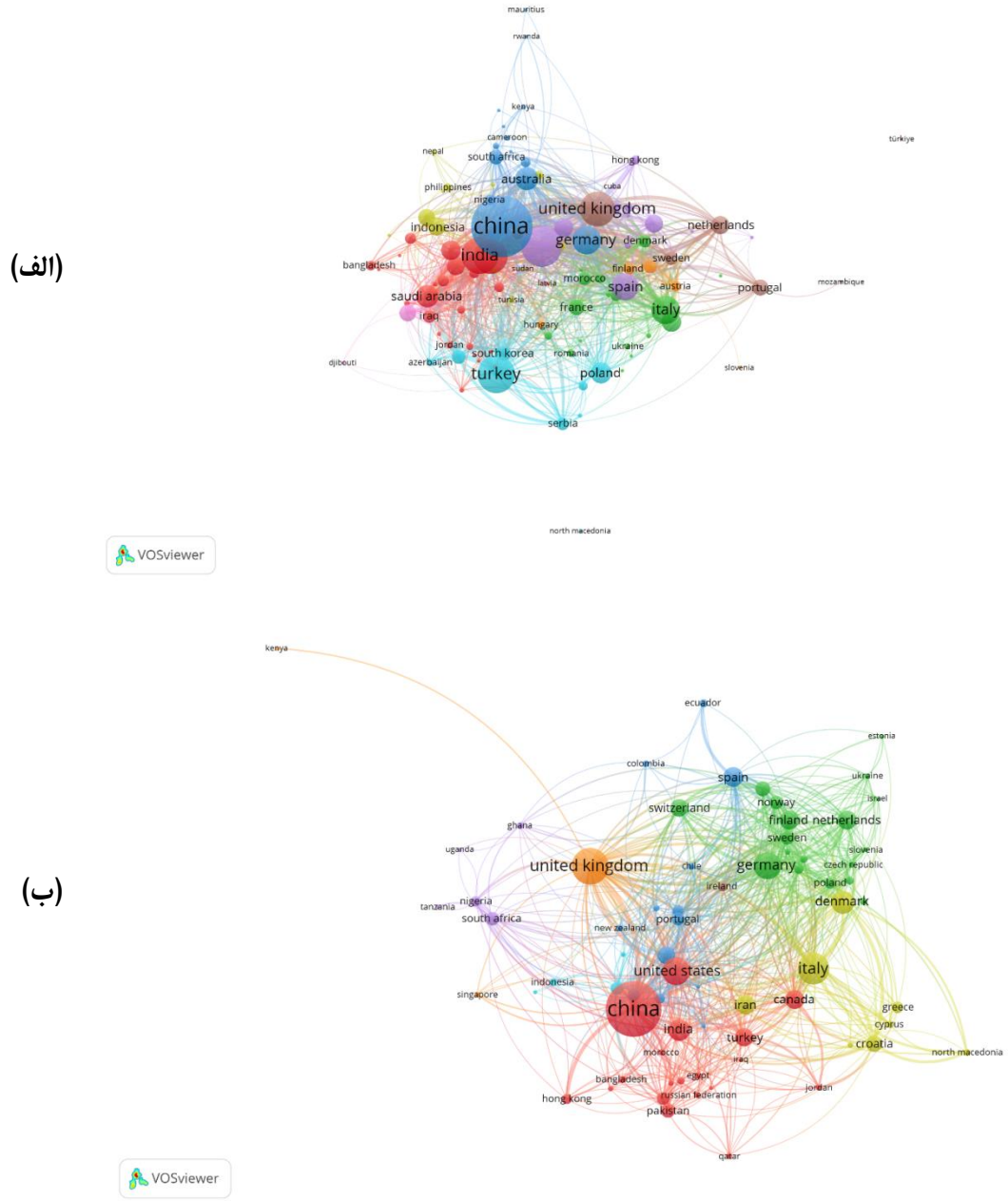
در حوزهٔ مدل‌سازی سیستم انرژی، شبکه متمرکزتر و حول پژوهشگرانی مانند Breyer, Christian، Lund, Henrik، Østergaard, Poul Alberg و Duić, Neven شکل گرفته است. این تمرکز با نقش گروه‌های تخصصی در توسعهٔ مدل‌های سناریویی، سیستم‌های هوشمند و مسیرهای کربن‌زدایی ارتباط دارد. تفاوت دو شبکه نشان می‌دهد همگرایی آینده به همکاری میان گروه‌های جغرافیا و تصمیم‌گیری فضایی از یک سو و گروه‌های مدل‌سازی و بهینه‌سازی انرژی از سوی دیگر نیاز دارد.



شکل ۵. شبکهٔ همکاری نویسندگان: (الف) پتانسیل‌سنجی انرژی‌های تجدیدپذیر مبتنی بر GIS؛ (ب) مدل‌سازی

بر اساس شکل ۶، چین در هر دو حوزه بیشترین حجم تولید علمی را دارد. در بخش مکانی، ایالات متحده، ترکیه، هند، بریتانیا و ایران نیز جایگاه برجسته‌ای دارند و بریتانیا از نظر قدرت پیوند بین‌المللی نقش اتصال‌دهندهٔ مهمی ایفا می‌کند. گستردگی جغرافیایی این بخش نشان می‌دهد مسائل تناسب زمین و توسعهٔ منابع، در شرایط اقلیمی و نهادی متنوع مطالعه شده‌اند.

در بخش مدل‌سازی، بریتانیا، ایتالیا، ایالات متحده، آلمان و دانمارک، در کنار چین، از بازیگران اصلی‌اند. سهم قابل توجه دانمارک و کشورهای شمال اروپا با سابقهٔ آن‌ها در برنامه‌ریزی سیستم‌های هوشمند، گرمایش ناحیه‌ای و نفوذ بالای تجدیدپذیرها سازگار است. ایران در هر دو مجموعه حضور دارد، اما برای افزایش اثرگذاری، توسعهٔ همکاری‌های مشترک میان تیم‌های GIS، اقتصاد انرژی و مدل‌سازی سیستم ضروری است.

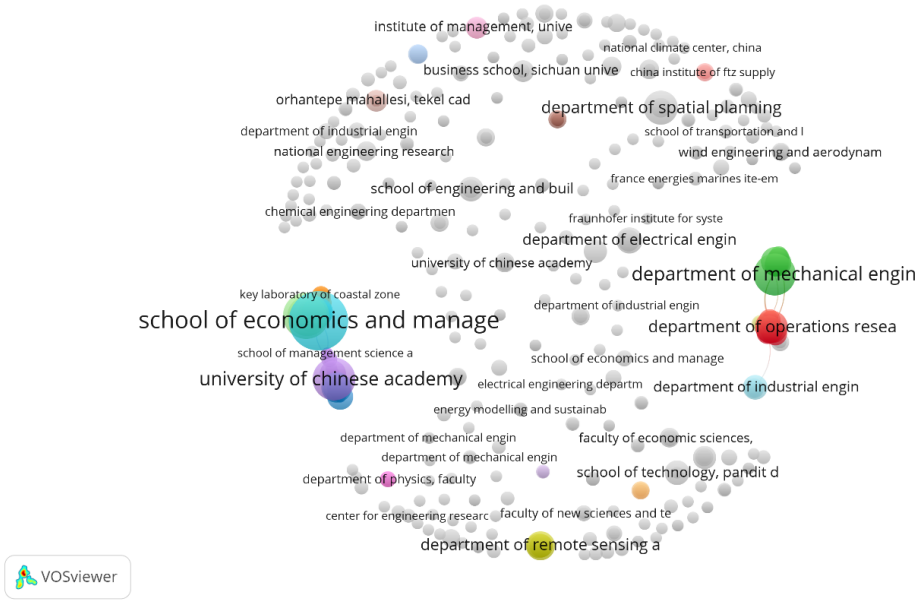


شکل ٦. شبکهٔ همکاری کشورها: (الف) پتانسیل‌سنجی انرژی‌های تجدیدپذیر مبتنی بر GIS؛ (ب) مدل‌سازی

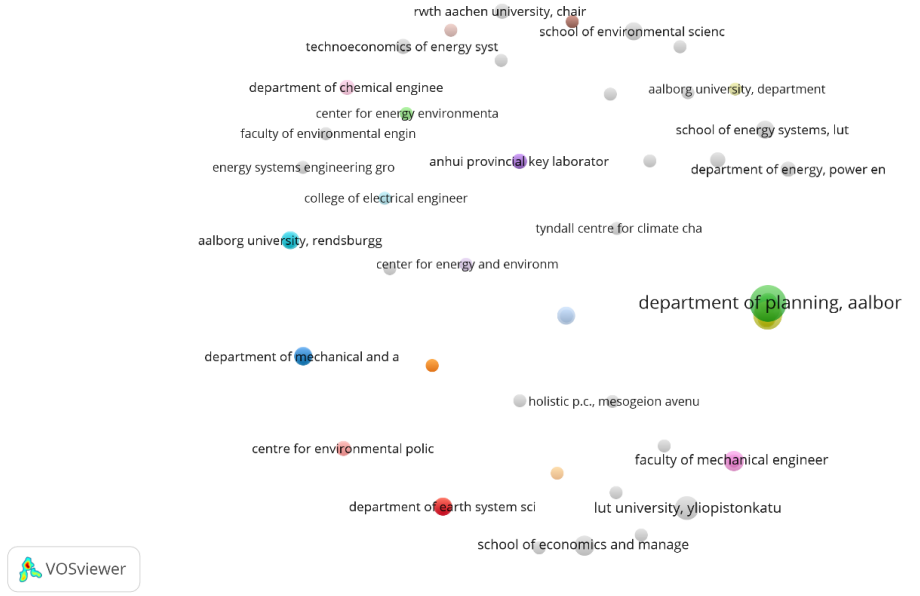
نقشهٔ سازمانی شکل ۷ (الف) بر نقش دانشگاه‌ها و مراکز چینی در پیوند انرژی، مدیریت و جغرافیا تأکید دارد. حضور دانشگاه صنعتی شریف، دانشگاه یزد و دانشگاه تهران نیز نشان می‌دهد ایران از مسیر مهندسی مکانیک، صنایع، سنجش‌ازدور و GIS در این شبکه مشارکت کرده است. مراکز اروپایی مرتبط با تحقیق در عملیات نقش واسط روش‌شناختی دارند.

در شکل ۷ (ب)، دانشگاه Aalborg، دانشگاه LUT و دانشگاه Zagreb از قطب‌های اصلی مدل‌سازی سیستم انرژی‌اند و نهادهای چینی نیز از طریق آزمایشگاه‌های مدیریت انرژی، شهرهای کم‌کربن و سیستم‌های هوشمند مشارکت دارند. این آرایش سازمانی نشان می‌دهد ایجاد آزمایشگاه‌ها یا پروژه‌های مشترک «فضا ـ سیستم» می‌تواند مسیر نهادی همگرایی را تقویت کند.

(الف)



(ب)



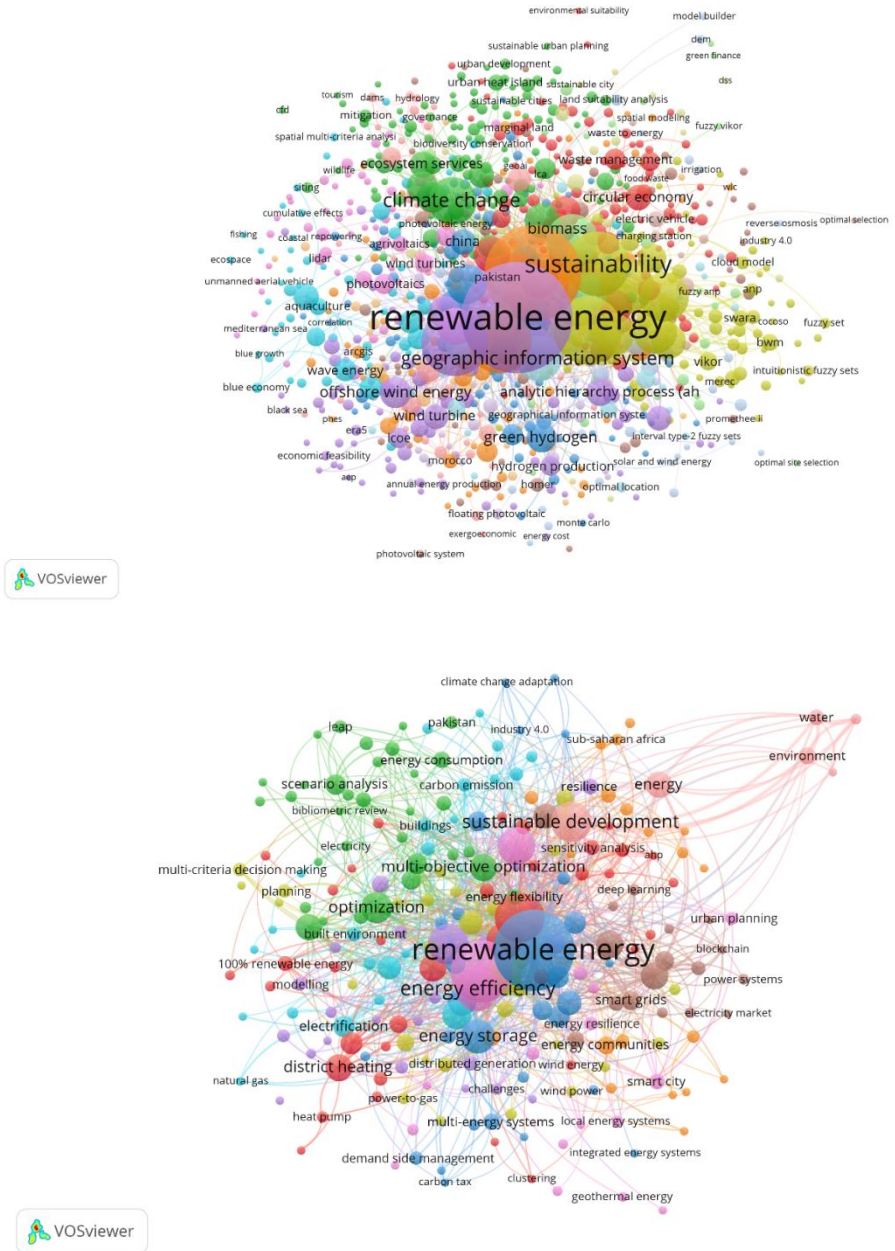
شکل ۷. شبکهٔ همکاری سازمان‌ها و وابستگی‌های نهادی (دانشگاه‌ها): (الف) پتانسیل‌سنجی انرژی‌های تجدیدپذیر مبتنی بر GIS؛ (ب) مدل‌سازی

۳-۴. خوشه‌های مفهومی و هم‌رخدادی کلیدواژه‌ها

تحلیل هم‌رخدادی، محتوای دانشی دو حوزه را آشکار می‌کند و برای هدف این پژوهش اهمیت بیشتری از رتبه‌بندی صرف بازیگران دارد. اندازهٔ گره‌ها فراوانی کاربرد مفاهیم و خطوط شبکه شدت همراهی آن‌ها را نشان می‌دهند؛ از این‌رو می‌توان تشخیص داد کدام موضوعات هستهٔ بالغ ادبیات‌اند و کدام موضوعات قابلیت اتصال دو مقیاس را دارند.

در شکل ۸ (الف)، سه محور تحلیل مکانی، تصمیم‌گیری چندمعیاره و فناوری‌های تجدیدپذیر، ساختار اصلی را تشکیل می‌دهند. renewable energy، GIS و site selection بزرگ‌ترین گره‌ها هستند و پیوند آن‌ها با sustainability و climate change نشان می‌دهد ارزیابی تناسب به‌تدریج معیارهای محیطی و اهداف گذار را جذب کرده است. با این‌حال، شاخص‌های عملکرد سیستم، نیاز شبکه و زمان‌بندی توسعه هنوز در حاشیهٔ این شبکه قرار دارند.

در شکل ۸ (ب)، هستهٔ شبکه بر گذار انرژی، برنامه‌ریزی، کارایی، کربن‌زدایی و پایداری متمرکز است. حضور ذخیره‌سازی، اتصال بخش‌ها، EnergyPLAN، بهینه‌سازی، هوش مصنوعی و یادگیری ماشین نشان می‌دهد مدل‌های سیستم انرژی به سمت ترکیب فناوری، داده و تصمیم‌گیری حرکت می‌کنند. ضعف این شبکه، کم‌رنگ بودن مستقیم مفاهیم تناسب زمین، فاصله از شبکه و محدودیت‌های اکولوژیک است.



شکل ۸. شبکهٔ هم‌رخدادی کلمات کلیدی: (الف) پتانسیل‌سنجی انرژی‌های تجدیدپذیر مبتنی بر GIS؛ (ب) مدل‌سازی

نتایج خوشه‌بندی در جدول ۳، شش خوشهٔ اصلی را در حوزهٔ ارزیابی مکانی و پنج خوشه را در حوزهٔ مدل‌سازی سیستم انرژی نشان می‌دهد. این خوشه‌ها بیانگر محورهای اصلی ساختار دانشی هر حوزه هستند و در عین حال، تفاوت و مکمل بودن دو جریان پژوهشی را آشکار می‌کنند.

در حوزهٔ ارزیابی مکانی، خوشه‌های مرتبط با تحلیل مکانی و تصمیم‌گیری چندمعیاره نشان‌دهندهٔ نقش محوری GIS، مکان‌یابی و روش‌های MCDM در شناسایی مناطق مناسب برای توسعهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر هستند. اهمیت این خوشه‌ها برای پژوهش حاضر در آن است که خروجی آن‌ها می‌تواند اطلاعات مکانی لازم برای تعیین مناطق و ظرفیت‌های قابل توسعه را فراهم کند. خوشه‌های مرتبط با فناوری‌های انرژی نیز نشان می‌دهند مطالعات مکانی از بررسی یک منبع منفرد به سمت ارزیابی طیف متنوعی از فناوری‌های تجدیدپذیر حرکت کرده‌اند. در کنار این موارد، ظهور موضوعاتی مانند پایداری، اقلیم و ملاحظات زیست‌محیطی بیانگر آن است که تعیین قابلیت توسعهٔ منابع به‌تدریج از یک مسئلهٔ فنی به مسئله‌ای چندبعدی شامل محدودیت‌های محیطی، اقتصادی و اجتماعی تبدیل شده است.

در حوزهٔ مدل‌سازی سیستم انرژی، خوشه‌های مرتبط با گذار انرژی و کربن‌زدایی نشان‌دهندهٔ تمرکز این حوزه بر تغییر ساختار سیستم انرژی و کاهش انتشار هستند. خوشه‌های مدل‌سازی و سناریوسازی نیز امکان بررسی ترکیب فناوری‌ها، مسیرهای توسعهٔ و پیامدهای گزینه‌های مختلف انرژی را فراهم می‌کنند. در این‌میان، خوشه‌های انعطاف‌پذیری، ذخیره‌سازی و بهینه‌سازی بر چالش‌های ناشی از افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر و ضرورت هماهنگی عرضه، تقاضا و زیرساخت تأکید دارند. بنابراین، این خوشه‌ها نشان می‌دهند مدل‌های سیستم انرژی عمدتاً به این پرسش می‌پردازند که ظرفیت‌های انرژی چگونه، چه زمانی و با چه ترکیبی می‌توانند در عملکرد کل سیستم مورد استفاده قرار گیرند.

از منظر هدف اصلی این پژوهش، تفاوت میان این دو ساختار دانشی اهمیت ویژه‌ای دارد. خوشه‌های حوزهٔ مکانی عمدتاً به پرسش «کجا و تحت چه محدودیت‌هایی می‌توان منابع تجدیدپذیر را توسعه داد؟» پاسخ می‌دهند، در حالی که خوشه‌های حوزهٔ سیستمی به پرسش «چه میزان از این ظرفیت، چه زمانی و با چه ترکیبی باید در سیستم انرژی به کار گرفته شود؟» مربوط هستند. بنابراین، ارتباط میان این دو مجموعه خوشه، مبنای مفهومی همگرایی موردنظر در این پژوهش را شکل می‌دهد. به بیان دیگر، نتایج خوشه‌بندی نشان می‌دهد شکاف موجود میان اطلاعات مکانی دربارهٔ مکان و ظرفیت قابل توسعه و اطلاعات سیستمی دربارهٔ ارزش، زمان‌بندی و ترکیب بهینهٔ توسعه، یکی از نقاط مهمی است که به پیوند میان دو حوزه نیاز دارد.

۳–۵. شکاف‌های پژوهشی، مسیرهای آینده و پیوند دو حوزه

برآیند شبکه‌ها نشان می‌دهد موضوعات نوظهور دقیقاً در مرز میان دو جریان قرار گرفته‌اند. در بخش مکانی، هیدروژن سبز، کشت‌فناوری خورشیدی، فتوولتائیک شناور، باد فراساحلی، انرژی از پسماند، خودرو برقی و روش‌های پیشرفته تصمیم‌گیری در حال رشد هستند. این موضوعات، علاوه بر مکان مناسب، به زنجیرهٔ تأمین، زیرساخت، ذخیره‌سازی و تقاضای نهایی وابسته‌اند و به همین‌دلیل، بدون مدل‌سازی سیستم قابل ارزیابی کامل نیستند.

در بخش سیستمی، شبکه‌های هوشمند، جوامع انرژی، سیستم‌های محلی و چندانرژی، مدیریت سمت تقاضا، تاب‌آوری، بازار برق، بلاک‌چین و یادگیری عمیق موضوعات رو به رشد هستند. این مفاهیم برای اجرا به داده‌های مکانی دقیق دربارهٔ مصرف، زیرساخت، منابع، تراکم فعالیت و محدودیت زمین نیاز دارند. از این‌رو، مسیرهای آینده باید به جای افزودن مستقل روش‌های جدید، بر معماری داده مشترک و تبادل خروجی میان ابزارهای مکانی و مدل‌های انرژی تمرکز کنند.

در جمع‌بندی نتایج، همگرایی هنگامی رخ می‌دهد که خروجی ارزیابی مکانی به مجموعه‌ای از ورودی‌های کمی برای مدل سیستم انرژی تبدیل شود: ظرفیت قابل توسعه، هزینهٔ مکانی، فاصله تا شبکه، محدودیت‌های محیطی، قابلیت مرحله‌بندی و سطح عدم قطعیت. مدل انرژی نیز باید خروجی‌هایی مانند ارزش سیستمی هر منبع، نیاز به ذخیره‌سازی، تقویت شبکه، زمان بهینهٔ توسعه و اثر بر انتشار را به تحلیل مکانی بازگرداند. این چرخهٔ بازخوردی، هستهٔ چارچوب پیشنهادی مقاله است.

۶. بحث: سازوکار همگرایی و پیامدهای برنامه‌ریزی

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد تفاوت میان دو حوزه فقط تفاوت ابزار نیست، بلکه هر یک مسئلهٔ انرژی را در مقیاسی متفاوت صورت‌بندی می‌کند. ارزیابی مکانی از واحدهای زمین، سلول‌های شبکه و معیارهای تناسب آغاز می‌شود، در حالی که مدل‌سازی سیستم انرژی از تراز عرضه و تقاضا، فناوری‌ها، هزینه و سناریو حرکت می‌کند. همین تفاوت مقیاس سبب شده است

که ادبیات هر حوزه به بلوغ تخصصی برسد، اما ترجمهٔ نتایج میان آن‌ها دشوار باقی بماند. بنابراین، مسئلهٔ محوری، گذار از هم‌جواری مفهومی به یکپارچگی عملیاتی است.

چارچوب همگرایی پیشنهادی را می‌توان در چهار مرحلهٔ اصلی تشریح کرد. در مرحلهٔ نخست، ارزیابی مکانی با استفاده از GIS و معیارهای فنی، محیط زیستی، زیرساختی و کاربری زمین، مناطق مناسب برای توسعهٔ منابع تجدیدپذیر را شناسایی می‌کند. خروجی این مرحله، مجموعه‌ای از نواحی مناسب و درجهٔ تناسب مکانی آن‌هاست.

در این چارچوب، ظرفیت نظری به بیشینهٔ پتانسیل فیزیکی یک منبع انرژی در یک منطقه اشاره دارد، بدون آنکه محدودیت‌های فنی، محیط زیستی، زیرساختی یا اقتصادی در نظر گرفته شوند. ظرفیت فنی بخشی از ظرفیت نظری است که با توجه به ویژگی‌های فناوری و محدودیت‌های فنی قابل بهره‌برداری است؛ در حالی که ظرفیت قابل توسعه، بخشی از ظرفیت فنی است که پس از اعمال محدودیت‌های مکانی، محیط زیستی، زیرساختی و در صورت لزوم اقتصادی و اجرایی، از نظر عملی برای توسعهٔ پروژه قابل تحقق است.

در مرحلهٔ دوم، نتایج ارزیابی مکانی از یک نقشهٔ تناسب به برآورد ظرفیت قابل توسعه تبدیل می‌شوند. در این مرحله، محدودیت‌هایی مانند کاربری زمین، مناطق حفاظت‌شده، شیب، فاصله از شبکه، دسترسی به زیرساخت و سایر محدودیت‌های فنی و محیط زیستی اعمال می‌شوند تا بخشی از ظرفیت فنی که از نظر مکانی و اجرایی قابلیت توسعه دارد، مشخص شود.

در مرحلهٔ سوم، این اطلاعات به عنوان ورودی یا محدودیت فضایی وارد مدل سیستم انرژی می‌شوند. برای مثال، در مورد یک نیروگاه خورشیدی، GIS می‌تواند بر اساس تابش خورشیدی، شیب، کاربری زمین، فاصله از شبکهٔ انتقال و دسترسی به راه، مناطق مناسب را شناسایی کند. پس از اعمال محدودیت‌ها، مساحت قابل توسعهٔ هر منطقه می‌تواند با استفاده از مشخصات فناوری منتخب به ظرفیت نصب‌شدنی خورشیدی قابل توسعه تبدیل شود. برای نمونه، اگر یک ناحیهٔ فرضی پس از اعمال تمامی محدودیت‌ها دارای ۱۰۰۰ هکتار زمین قابل توسعه باشد، این مساحت می‌تواند با استفاده از مشخصات فناوری منتخب به ظرفیت نصب‌شدنی خورشیدی تبدیل شود. ظرفیت حاصل، همراه با اطلاعات مکانی و در صورت امکان هزینه یا فاصلهٔ اتصال به شبکه، می‌تواند به مدل سیستم انرژی منتقل شود. مدل سپس می‌تواند تعیین کند چه میزان از این ظرفیت در هر سناریو و در چه زمانی توسعه یابد و چه ترکیبی از فناوری‌ها و گزینه‌های ذخیره‌سازی برای سیستم مناسب‌تر است.

در مرحلهٔ چهارم، نتایج مدل سیستم انرژی به محیط مکانی بازگردانده می‌شوند. این نتایج می‌توانند شامل میزان بهینهٔ توسعه، زمان‌بندی سرمایه‌گذاری، ارزش سیستمی ظرفیت، نیاز به ذخیره‌سازی، محدودیت‌های شبکه و اثرات هزینه و انتشار باشند. این بازخورد می‌تواند موجب بازنگری در اولویت‌بندی مناطق شود. برای مثال، ممکن است یک منطقه از نظر تابش خورشیدی بسیار مناسب باشد، اما به دلیل محدودیت شبکه یا نیاز بالاتر به ذخیره‌سازی، در مدل سیستم انرژی اولویت کمتری پیدا کند؛ در مقابل، منطقه‌ای با پتانسیل خورشیدی متوسط ممکن است به دلیل نزدیکی به شبکه یا بار، ارزش سیستمی بیشتری داشته باشد. بنابراین، چرخهٔ پیشنهادی از «مکان و تناسب» به «ظرفیت قابل توسعه»، سپس به «برنامه‌ریزی سیستم» و در نهایت به «بازخورد مکانی» حرکت می‌کند.

از منظر روش‌شناختی، یکپارچگی نیازمند هماهنگی تفکیک مکانی و زمانی است. نقشه‌های GIS معمولاً تفکیک مکانی بالا و اطلاعات زمانی محدود دارند، در حالی که مدل‌های انرژی ممکن است تفکیک زمانی ساعتی و تقسیم‌بندی مکانی درشت داشته باشند. تجمیع نامناسب داده می‌تواند ظرفیت‌های محلی، تراکم شبکه و هم‌بستگی منابع را پنهان کند. بنابراین، انتخاب سطح منطقه‌بندی، روش تبدیل سلول‌های مکانی به ناحیهٔ مدل و حفظ پروفیل‌های زمانی منابع باید به عنوان بخشی از طراحی مدل گزارش شود، نه یک عملیات فنی فرعی.

عدم‌قطعیت نیز باید در هر دو سوی زنجیره لحاظ شود. تغییر اقلیم می‌تواند الگوی تابش، باد، آب و دما را تغییر دهد؛ قیمت فناوری، هزینهٔ سرمایه و سیاست کربن نیز نتایج مدل سیستم را دگرگون می‌کنند. در نتیجه، نقشهٔ تناسب قطعی و سناریوی بهینهٔ واحد، مبنای کافی برای سرمایه‌گذاری بلندمدت نیست. استفاده از تحلیل حساسیت، سناریوهای اقلیمی، روش‌های فازی و بهینه سازی مقاوم می‌تواند نواحی و ترکیب‌هایی را شناسایی کند که در دامنه‌ای از شرایط همچنان قابل اتکا هستند.

نتایج همکاری علمی نشان می‌دهد اجرای این چارچوب فقط به توسعهٔ نرم‌افزار وابسته نیست، بلکه به همکاری سازمانی نیاز دارد. گروه‌های GIS و سنجش‌ازدور، مهندسان شبکه، اقتصاددانان انرژی، متخصصان مدل‌سازی، برنامه‌ریزان شهری و نهادهای محیط زیستی باید در تعریف داده و سناریو مشارکت کنند. تشکیل پایگاه داده مشترک و استانداردسازی متغیرهایی مانند ظرفیت قابل توسعه، هزینهٔ اتصال، محدودیت زمین و پروفیل تولید می‌تواند مانع تکرار محاسبات و ناسازگاری فرض‌ها شود.

از منظر سیاستی، اهداف نصب ظرفیت باید با نقشهٔ راه مکانی و زیرساختی همراه شوند. تعیین یک هدف ملی برای خورشیدی یا بادی بدون مشخص کردن محل، ظرفیت شبکه، نیاز به ذخیره‌سازی و تعارض‌های زمین ممکن است به تأخیر پروژه یا افزایش هزینه منجر شود. در مقابل، برنامه‌ریزی یکپارچه می‌تواند پروژه‌ها را بر اساس آمادگی شبکه، ارزش کاهش انتشار، ایجاد اشتغال محلی و کمترین تعارض محیطی مرحله‌بندی کند. این رویکرد به‌ویژه برای هیدروژن سبز، نیروگاه‌های شناور، مزارع فراساحلی و جوامع انرژی اهمیت دارد؛ زیرا زنجیرل زیرساختی آن‌ها پیچیده‌تر از تولید برق منفرد است.

برای کشورهای درحال‌توسعه و اقتصادهای متکی به سوخت فسیلی، واقع‌بینی مکانی اهمیت بیشتری دارد. محدودیت سرمایه، فرسودگی شبکه، تمرکز جغرافیایی تقاضا و حساسیت اجتماعی نسبت به زمین باعث می‌شود سناریوهای صرفاً فناورانه قابلیت اجرای محدودی داشته باشند. چارچوب پیشنهادی می‌تواند به اولویت‌بندی پروژه‌هایی کمک کند که هم از نظر منبع مناسب‌اند و هم نیاز به سرمایه‌گذاری جانبی کمتری دارند. همچنین، شناسایی مناطق بازنده و برنده گذار امکان طراحی سیاست‌های عدالت منطقه‌ای و جبران اجتماعی را فراهم می‌کند.

در مجموع، ارزش این تحلیل علم‌سنجی در نشان دادن ساختار دانشی و فاصلهٔ میان دو حوزه است: مطالعات مکانی عمدتاً بر شناسایی منابع، مکان و قابلیت توسعه تمرکز دارند، در حالی که مطالعات سیستم انرژی بر سناریو، ترکیب فناوری‌ها، زمان‌بندی توسعه و عملکرد کل سیستم متمرکز هستند. شکاف اصلی در انتقال نظام‌مند اطلاعات میان این دو سطح قرار دارد. چارچوب پیشنهادی با ایجاد مسیری از ارزیابی مکانی و برآورد ظرفیت قابل توسعه تا ادغام اطلاعات در مدل سیستم انرژی و بازگشت نتایج سیستمی به فرایند مکان‌یابی، می‌تواند این شکاف را کاهش دهد. از نظر کاربردی، این رویکرد می‌تواند برای اولویت‌بندی پروژه‌های انرژی تجدیدپذیر، برنامه‌ریزی توسعهٔ شبکه، ارزیابی سناریوهای گذار انرژی و هماهنگی میان ظرفیت منابع و نیازهای سیستم مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین، پژوهش‌های آینده باید موفقیت خود را فقط با دقت نقشه یا بهبود تابع هدف نسنجند، بلکه میزان انتقال‌پذیری خروجی‌های مکانی به مدل سیستم انرژی و قابلیت بازگشت نتایج سیستمی به فرایند مکان‌یابی را نیز گزارش کنند.

محدودیت‌ها و مسیرهای پژوهشی آینده

این مطالعه بر داده‌های Scopus متکی است؛ بنابراین، مدارک نمایه‌نشده در این پایگاه، گزارش‌های فنی، پایان‌نامه‌ها و بخشی از ادبیات سیاستی در تحلیل وارد نشده‌اند. همچنین، گستردگی عبارت‌های جست‌وجو برای دستیابی به پوشش مناسب می‌تواند تعدادی مدرک مرزی را وارد مجموعه کند. از سوی دیگر، وابستگی نتایج به انتخاب کلیدواژه‌ها و عبارت جست‌وجو می‌تواند موجب شود برخی مطالعات مرتبط که از اصطلاحات یا مترادف‌های متفاوت استفاده کرده‌اند، در مجموعه داده شناسایی نشوند. هرچند پالایش داده و تحلیل خوشه‌ای اثر این مسئله را کاهش می‌دهد، نتایج باید به عنوان تصویر ساختار ادبیات نمایه‌شده تفسیر شوند، نه سرشماری کامل همهٔ دانش موجود.

شاخص‌های هم‌رخدادی و قدرت پیوند، بیانگر نزدیکی مفهومی میان رویکردهای مورد بررسی هستند؛ با این‌حال، این شاخص‌ها به‌تنهایی نمی‌توانند ادغام واقعی دو روش را در یک مدل عملی اثبات کنند. افزون بر این، نتایج تحلیل‌های هم‌رخدادی و خوشه‌بندی به انتخاب روش تحلیل و پارامترهای مورد استفاده وابسته‌اند و این شاخص‌ها روابط مفهومی موجود در داده‌های کتاب‌شناختی را نشان می‌دهند، نه لزوماً روابط علّی میان موضوعات. از این‌رو، برای تکمیل این یافته‌ها، بررسی مطالعاتی که در عمل GIS را با مدل‌هایی مانند EnergyPLAN، LEAP، TIMES یا سایر مدل‌های بهینه‌سازی یکپارچه کرده‌اند، ضروری است. در این مطالعات، مقایسهٔ نحوهٔ تبادل داده‌ها، سطوح تفکیک مکانی و زمانی و شیوهٔ اعمال محدودیت‌های کاربری زمین می‌تواند گام بعدی در توسعهٔ این مسیر پژوهشی باشد.

پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده یک چارچوب آزمایشی در مقیاس ملی یا استانی اجرا کنند که در آن ظرفیت‌های مکانی خورشیدی، بادی و زیست‌توده به مدل سیستم انرژی وارد شود و نتایج مدل دوباره در نقشهٔ اولویت توسعه بازتاب یابد. ارزیابی چندسناریویی اقلیم، قیمت، سیاست کربن و توسعهٔ شبکه، همراه با شاخص‌های عدالت انرژی و پذیرش اجتماعی، می‌تواند استحکام تصمیم را افزایش دهد. توسعهٔ قالب‌های داده باز و قابل تبادل میان نرم‌افزارهای مکانی و مدل‌های انرژی نیز یک نیاز زیرساختی مهم است.

۷. نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با تمرکز بر مسیرهای همگرایی، دو جریان بزرگ مطالعات انرژی را مقایسه کرد: ارزیابی مکانی و پتانسیل‌سنجی منابع تجدیدپذیر، و مدل‌سازی یکپارچهٔ سیستم انرژی. تحلیل ۸۲۷۷ مدرک در مجموعهٔ نخست و ۱۵۳۶ مدرک در مجموعهٔ دوم نشان داد حوزهٔ مکانی از نظر حجم و تنوع کاربرد گسترده‌تر است، در حالی که حوزهٔ سیستمی رشد نسبی و میانگین استناد بیشتری دارد. این عدم تقارن، بیانگر نقش‌های متفاوت، اما مکمل دو حوزه در گذار انرژی است.

ساختار مفهومی بخش مکانی بر GIS، مکان‌یابی، تصمیم‌گیری چندمعیاره، منابع خورشیدی و بادی، پایداری و محدودیت‌های سرزمین استوار است. در مقابل، بخش سیستمی حول گذار انرژی، کربن‌زدایی، سناریوسازی، ذخیره‌سازی، اتصال بخش‌ها، بهینه سازی و سیستم‌های هوشمند سازمان می‌یابد. موضوعات نوظهوری مانند هیدروژن سبز، انرژی‌های دریایی، جوامع انرژی، شبکهٔ هوشمند و مدیریت تقاضا نشان می‌دهند مرز میان این دو جریان در حال کمرنگ شدن است.

نتیجهٔ اصلی آن است که نقشهٔ پتانسیل زمانی برای برنامه‌ریزی ارزشمند است که ظرفیت قابل توسعه، هزینهٔ اتصال، محدودیت محیطی و عدم‌قطعیت را به شکل قابل استفاده در مدل انرژی ارائه کند. در سوی مقابل، مدل سیستم انرژی باید ارزش سیستمی ظرفیت‌ها، نیاز به شبکه و ذخیره‌سازی، زمان‌بندی توسعه و اثر بر انتشار را به تحلیل مکانی بازگرداند. این تبادل دوسویه، سناریوها را از حالت کلی و فرض‌محور خارج می‌کند و اولویت‌های مکانی را نیز از رتبه‌بندی صرف منابع فراتر می‌برد.

چارچوب پیشنهادی مقاله شامل چهار لایه پیوسته است: تولید داده مکانی، تبدیل پتانسیل نظری به ظرفیت قابل توسعه، بهینه سازی و سناریوسازی سیستم و بازخورد نتایج سیستمی به نقشهٔ اولویت سرمایه‌گذاری. اجرای این چارچوب به هماهنگی تفکیک مکانی و زمانی، مدیریت عدم‌قطعیت، استانداردسازی داده و همکاری میان‌رشته‌ای نیاز دارد. بر این‌اساس، سنجش کیفیت پژوهش های آینده باید علاوه بر دقت فنی، قابلیت انتقال نتایج میان لایه‌های تصمیم‌گیری را نیز در نظر گیرد.

از منظر سیاستی، برنامه‌های توسعهٔ تجدیدپذیر باید اهداف ظرفیت را با محل اجرا، آمادگی شبکه، نیاز ذخیره‌سازی، ملاحظات اکولوژیک و پیامدهای اجتماعی پیوند دهند. این رویکرد می‌تواند ریسک پروژه‌های غیرقابل اجرا، هزینهٔ توسعهٔ زیرساخت و تعارض‌های زمین را کاهش دهد و مسیر کربن‌زدایی را به برنامه‌ای مرحله‌بندی‌شده و قابل پایش تبدیل کند.

در نهایت، گذار انرژی سبز نه یک مسئلهٔ صرفاً مکانی و نه یک مسئلهٔ صرفاً سیستمی است. تصمیم معتبر باید هم بداند منابع در کجا و تحت چه محدودیت‌هایی وجود دارند و هم بداند چه مقدار، در چه زمان و با چه زیرساختی برای کل سیستم ارزشمند است. پیوند این دو نوع دانش، مبنای حرکت از برآورد پتانسیل و سناریوی نظری به برنامه‌ریزی شواهدمحور، سرمایه‌گذاری هماهنگ و گذار قابل اجرا خواهد بود.

منابع

[1]. Yang Y, Xia S, Huang P, Qian J. Energy transition: Connotations, mechanisms and effects. Energy Strategy Reviews. 2024 Mar 1;52:101320.

[2]. Shirazi MA, Saifoddin A, Zahedi A, Abdoos M, Yousefi H. Renewable energy policies in OPEC and non-OPEC countries: a comparative SWOT and PESTLE analysis. Energy Nexus. 2026 Jul 11:100761.

[3]. Shirazi MA, Zahedi R, Yousefi H, Aslani A. Environmental and damage assessment of electric vehicles compared to internal combustion engine vehicles under various ambient temperature scenarios using the LCA approach. Energy Nexus. 2025 Nov 19:100606.

[4]. Soni N, Singh PK, Mallick S, Pandey Y, Tiwari S, Mishra A, Tiwari A. Advancing sustainable energy: Exploring new frontiers and opportunities in the green transition. Advanced Sustainable Systems. 2024 Oct;8(10):2400160.

[5]. Allahrabbi Shirazi MA, Goldoust A, Khatami M, Abedi E, Janfeshan MH. Modeling and simulation of a solar tracker with bifacial panel: a case study of Tehran city. Journal of Sustainable Energy Systems. 2024 Sep 10;3(3):271-87.

[6]. Martínez-Gordón R, Morales-España G, Sijm J, Faaij AP. A review of the role of spatial resolution in energy systems modelling: Lessons learned and applicability to the North Sea region. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021 May 1;141:110857.

[7]. Yousefi H, Moradi S, Zahedi R, Ranjbar Z. Developed analytic hierarchy process and multi criteria decision support system for wind farm site selection using GIS: A regional-scale application with environmental responsibility. Energy Conversion and Management: X. 2024 Apr 1;22:100594.

[8]. Razeghi M, Araghi AR, Naseri A, Yousefi H. Strategic deployment of GIS-optimized solar charging stations for electric vehicles: A multi-criteria decision-making approach. Energy Conversion and Management: X. 2024 Oct 1;24:100712.

[9]. Shirazi MA, Moezzi SM, Arzaghi N, Yousefi H. Solar Energy Development Trends and Climate Impacts on its Performance in Iran: A Comparative Analysis. Results in Engineering. 2026 May 25:111229.

[10]. Razeghi M, Hajinezhad A, Naseri A, Noorollahi Y, Moosavian SF. Multi-criteria decision-making for selecting a solar farm location to supply energy to reverse osmosis devices and produce freshwater using GIS in Iran. Solar Energy. 2023 Mar 15;253:501-14.

[11]. Razeghi M, Hajinezhad A, Naseri A, Noorollahi Y, Moosavian SF. Multi-criteria decision for selecting a wind farm location to supply energy to reverse osmosis devices and produce freshwater using GIS in Iran. Energy Strategy Reviews. 2023 Jan 1;45:101018.

[12]. Shao M, Han Z, Sun J, Xiao C, Zhang S, Zhao Y. A review of multi-criteria decision making applications for renewable energy site selection. Renewable Energy. 2020 Sep 1;157:377-403.

[13]. Kumar A, Sah B, Singh AR, Deng Y, He X, Kumar P, Bansal RC. A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. Renewable and sustainable energy reviews. 2017 Mar 1;69:596-609.

[14]. Ghasempour R, Nazari MA, Ebrahimi M, Ahmadi MH, Hadiyanto H. Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Approach for Selecting Solar Plants Site and Technology: A Review. International Journal of Renewable Energy Development. 2019 Feb 1;8(1):15.

[15]. Shorabeh SN, Firozjaei MK, Nematollahi O, Firozjaei HK, Jelokhani-Niaraki M. A risk-based multi-criteria spatial decision analysis for solar power plant site selection in different climates: A case study in Iran. Renewable Energy. 2019 Dec 1;143:958-73.

[16]. Demir A, Dinçer AE, Çiftçi C, Gülçimen S, Uzal N, Yılmaz K. Wind farm site selection using GIS-based multicriteria analysis with Life cycle assessment integration. Earth Science Informatics. 2024 Apr;17(2):1591-608.

[17]. Zandi I, Lotfata A. Evaluating solar power plant sites using integrated GIS and MCDM methods: a case study in Kermanshah Province. Scientific Reports. 2025 Jan 26;15(1):3288.

[18]. Allahrabbi Shirazi M, Yousefi H, Fathi A, Baneshi M. Urban Water Sustainability through Energy-Free Fog Water Harvesting: A Review of Fog-Collecting Systems. Urban Development Policy Making. 2027 Jan 1;3(1):69-94.

[19]. Hosseiniara R. General comparison of scientific databases of Scopus, PubMed, and Web of Science. Journal of Preventive and Complementary Medicine. 2023 Aug 30;2(3):168-9.
[20]. Arruda H, Silva ER, Lessa M, Proença Jr D, Bartholo R. VOSviewer and bibliometrix. Journal of the Medical Library Association: JMLA. 2022 Jul 1;110(3):392.
[21]. Ghorbani BD. Bibliometrix: Science mapping analysis with R Biblioshiny based on Web of Science in applied linguistics. InA scientometrics research perspective in applied linguistics 2024 Feb 8 (pp. 197-234). Cham: Springer Nature Switzerland.
[22]. Bukar UA, Sayeed MS, Razak SF, Yogarayan S, Amodu OA, Mahmood RA. A method for analyzing text using VOSviewer. MethodsX. 2023 Dec 1;11:102339.
[23]. Hanh HT, Nhung PT. USING VOSVIEWER SOFTWARE IN COLLECTING MATERIALS OF OVERVIEW RESEARCH. Veredas do Direito. 2026 Jan 3;23(1):e233958-.