Shahid Beheshti University

Sustainable Development of Geographical Environment

Journal homepage: https://egsdejournal.sbu.ac.ir

Urban Metabolism Sustainability Based on the Regenerative City Approach

Ghourchi[1*], M., Razavian[1], M.T., Soleimani[1], R.,

1. Department of Human Geography and Spatial Planning, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:
- Urban ecology
- Sustainability
- Regenerative city
- Urban metabolism

Original Article
Article history:
Received: 19/07/2022
Accepted: 15/02/2023

ABSTRACT

Cities and their dependence on fossil fuels have alarming implications for the health of communities, and the continued growth of these linear systems has led to unlimited resource consumption. Urban metabolism is an approach centered on the efficiency of resources and energy in the form of sustainable principles and aims to change the attitude of current approaches from a linear to a circular one that emphasizes the efficiency of resources and energy. Based on this, there is a causal relationship between the reduction of urban metabolism and the principles of the sustainability of cities. By introducing the principles of sustainability in the form of an ecological perspective, the approach of a regenerated city can facilitate the movement of urban metabolism towards a sustainable circularity and the integrated development of the city in connection with its ecosystem. help. The interpretative research method is based on a mixed approach. Content analysis is a research strategy, and the data collection method is based on library studies. Structural Interpretive Modeling (ISM) was used to stratify the indicators. The aim of this research is to achieve a conceptual-theoretical framework (by presenting the relevant indicators and their leveling) to measure the sustainability of urban metabolism by using the reborn city approach. The results of the research show that a change of attitude is necessary in the current development patterns Ecological methods such as sustainable urban metabolism and regenerative city can provide a suitable solution to change such an attitude. In this way, sustainability criteria in the form of sustainable urban metabolism from the perspective of regenerative city can guide the achievement of sustainable standards.

Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY). license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Citation:
Ghourchi, M., Razavian, M.T. and Soleimani, R., (2024). Urban Metabolism Sustainability Based on the Regenerative City Approach, *Sustainable Development of Geographical Environment*: Vol. 5, No. 9, (180-200).
DOI: 10.48308/SDGE.2023.103895

* Corresponding author E-mail address: (m_ghourchi@sbu.ac.ir)

Extended abstract

Background and purpose

Current cities are petropolises, where all key functions, including production, consumption, and transportation, are reliant on massive injections of oil and fossil fuels. These cities, characterized by a linear metabolism pattern increase disorder, resource waste, and pollution in other regions. Urban metabolism acts as a lens for measuring a city's human-natural function and it is a suitable method for evaluating the level of urban sustainability. The regenerative approach, by integrating the inputs and outputs of urban metabolism within a regenerative mindset, serves as a scientific foundation for identifying current environmental issues and revitalizing urban ecosystem health. This study aims to examine the use of generative city criteria in urban metabolism sustainability and their categorization, utilizing urban metabolism as a basis for assessing sustainability criteria. Essentially, this research aims to bridge the gap between regenerative principles and sustainability of urban metabolism.

Methodology

This research adopts a mixed documentary and interpretive approach, utilizing relevant theoretical literature, studies conducted in the field, and a comparison of new approaches to explicate the concepts and indicators for measuring urban metabolism sustainability based on the regenerative city approach. Content analysis is employed as the research strategy, and data collection relies on library resources. Ultimately, a selective coding process is used to identify relationships between key concepts, conduct thematic synthesis, and address research questions, resulting in the presentation of final research indicators. Furthermore, a structural interpretive modeling is employed to categorize the indicators based on their importance and impact on the sustainability system.

Findings and discussion

Through content analysis of relevant texts and documents, sustainability components are derived based on four elements: water, energy, food, and materials. Regarding the water element, sustainability criteria for urban metabolism involve reducing production with high efficiency, minimizing waste, and promoting water recycling. For the food element, sustainability criteria emphasize reducing resource inputs, minimizing domestic consumption, and promoting food recycling. In the energy sector, sustainability criteria are influenced by regenerative factors, such as energy production based on ecosystem potential, renewable resources, and ecosystem resource restoration. In the materials sector, sustainability criteria, such as reducing production and promoting material recycling in alignment with regenerative principles, contribute to reducing the ecological footprint, preserving biodiversity, and ensuring resource sustainability. Additionally, indicators for assessing urban metabolism sustainability based on the regenerative city criteria are categorized into three levels, representing the importance and effectiveness of each indicator level in urban ecosystem sustainability.

Conclusion

This research aims to enhance understanding and insights into the role and significance of the regenerative approach in urban metabolism sustainability. What sets this study apart from other urban metabolism studies is the integration of urban metabolism gaps within the framework of regenerative thinking for comprehending sustainability in systems. The findings demonstrate that the influence of regenerative criteria on metabolism studies enhances the comprehension of sustainability journals through the intrinsic relations between the urban system and the extra-regional system. This circular pattern can significantly contribute to integrated land development, reducing resource consumption, minimizing reliance on unstable resources, and increasing dependence on ecological capital.

Keywords: Urban ecology, Sustainability, Regenerative city, Urban metabolism.

Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY). license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

توسعه پایدار محیط جغرافیایی

Journal homepage: https://egsdejournal.sbu.ac.ir

Shahid Beheshti University

پایداری متابولیسم شهری بر مبنای رهیافت شهر باز مولد

مرتضی قورچی [۱]، محمد تقی رضویان [۱*]، رقیه سلیمانی [۱]

۱. گروه جغرافیای انسانی و آمایش، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

واژه‌های کلیدی:
- اکولوژی شهری
- پایداری
- شهر بازمولد
- متابولیسم شهری

مقاله: پژوهشی

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۶

چکیده

شهرها و وابستگی آنها به سوخت‌های فسیلی پیامدهای نگران کننده‌ای برای سلامت جوامع دارد و رشد مداوم این سیستم‌های خطی مصرف نامحدود منابع را به دنبال داشته است. متابولیسم شهری رهیافتی با محوریت کارآمدی منابع و انرژی در قالب اصول پایداری است و با هدف تغییر نگرش رویکردهای کنونی از حرکت خطی به چرخشی است که برکارآمدی منابع و انرژی تاکید دارد. بر این اساس یک رابطه علی بین کاهش متابولیسم شهری و اصول پایداری شهرها وجود دارد. رهیافت شهر بازمولد با معرفی اصول پایداری در قالب دیدگاه اکولوژیکی می‌تواند مسیر حرکت متابولیسم شهری را جهت چرخه‌ای شدن پایدار تسهیل نموده و به توسعه یکپارچه شهر در پیوند با اکوسیستم خویش کمک نماید. روش پژوهش تفسیری با اتکا بر رویکرد آمیخته است. تحلیل محتوا به مثابه استراتژی پژوهش است و روش جمع‌آوری اطلاعات نیز بر مبنای مطالعات کتابخانه‌ای انجام شده است. برای سطح‌بندی شاخص‌ها از مدل‌سازی تفسیری ساختاری (ISM) استفاده شده است. هدف این پژوهش دست‌یابی به چارچوبی مفهومی- نظری (با ارائه شاخص‌های مربوطه و سطح‌بندی آن‌ها) برای سنجش پایداری متابولیسم شهری با بهره‌گیری از رهیافت شهر باز مولد است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که تغییر نگرش در الگوهای توسعه کنونی ضرورت دارد و دیدگاه‌های اکولوژیکی مانند متابولیسم شهری پایدار و شهر بازمولد می‌تواند راهکاری مناسب برای تغییر چنین نگرشی را فراهم نماید. در این مسیر معیارهای پایداری در قالب متابولیسم شهری پایدار از منظر شهر باز مولد می‌تواند دست‌یابی به موازین پایدار را هدایت نماید.

Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY). license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

استناد:

قورچی، م.، رضویان، م.ت. و سلیمانی، ر.، (۱۴۰۲). پایداری متابولیسم شهری بر مبنای رهیافت شهر باز مولد، توسعه پایدار محیط جغرافیایی: سال ۵، شماره ۹، (۲۰۰-۱۸۰).

DOI: 10.48308/SDGE.2023.103895

* نویسنده مسئول:

E-mail: (m_ghourchi@sbu.ac.ir)

مقدمه

شهرها با روند رشد کنونی، حیات طولانی مدتی نخواهند داشت، شهرها سیستم‌های پیوسته وسیعی هستند که برای تبدیل انرژی به کار و حرکت طراحی شده‌اند که با استفاده بی رویه انرژی‌های فسیلی و مواد خام، کیفیت آنها به‌طور اجتناب ناپذیری کاهش یافته است (Niza et al, 2009). شهرهای کنونی به مانند پتروپلیس[1] یا شهرهای فسیلی توصیف می‌شوند که همه عملکردهای کلیدی آنها، تولید، مصرف و حمل و نقل، با تزریق انبوه نفت و سوخت‌های فسیلی تامین می‌شود. این شهرهای فسیلی برای تامین منابع حیاتی خویش به منابع محیطی سراسر سیاره زمین تکیه دارد و به عواقب محیط زیستی آن چندان توجهی ندارد (Girardet, 2017). چنین شهرهای خطی[2] برای تمرکز بخشیدن به نظم خویش سبب افزایش بی‌نظمی، اتلاف منابع و افزایش آلاینده‌ها در جای دیگری می‌گردند (Kenndyet al, 2011). با توجه به چنین شرایطی و شکل‌گیری آسیب‌های محیطی از جمله مصرف نامحدود سوخت‌های فسیلی، تغییرات آب هوایی و افزایش آلاینده‌ها و غیره، مطالعات توسعه پایدار در قرن ۲۱ را در بعد اکولوژیک ضروری ساخته است. شهر فسیلی که طرح اصلی شهرهای فعلی را تشکیل می‌دهد و نقص‌های سیستماتیک آن به‌طور فزاینده‌ای آشکار است باید به‌طور اساسی به چالش کشیده شوند. از این رو، دستور کار جدید شهری که در اواخر سال ۲۰۱۶ در هابیتات ۳ مطرح شد، خواستار تغییر پارادایم شهری شده است (Revi, 2016). در واقع شهر پایدار، منطقه‌ای است که جریان مواد و انرژی و دفع زباله از ظرفیت واقعی سرزمینی آن تجاوز نمی‌کند (Huang, 2003). تا مادامی که مناطق شهری به پایداری دست نیابند اهداف جهانی توسعه هم برآورده نخواهد شد. شهرها از یک سو به عنوان گره‌های مصرف قلمداد می‌شوند که به شدت وابسته به جریان مداوم مواد و انرژی در سراسر جهان هستند و از طرف دیگر هم می‌توانند به عنوان فرصت‌های بزرگی برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی و مواد تلقی شوند که امکان کاهش بار کلی انسان روی اکوسیستم‌های جهان را فراهم نمایند (Moore et al, 2013). برای درک شرایط کنونی، استفاده گسترده از رهیافت متابولیسم[3] شهری به دلیل نیاز به کاهش اساسی منابع مورد نیاز برای فعالیت‌های اقتصادی و ارتقاء کیفیت زندگی حیاتی است (Ferraro and Fernandez, 2013) در حقیقت، نمی‌توان آنچه اندازه‌گیری نمی‌شود، مدیریت و یا ارزش منافع طبیعت یا هزینه‌های ضرر آن را سنجش کرد ولی با تحلیل‌های متابولیسمی، ردیابی و تغییر مسیر منابع و انرژی، می‌توان به توسعه شاخص‌های پایداری کمک کرد (Cui et al, 2019). متابولیسم شهری مانند یک لنز برای اندازه‌گیری عملکرد یک شهر عمل می‌کند و نیاز و رفاه شهروندانش را ارزیابی می‌کند (Fernandez et al, 2020) و به عنوان روشی مناسب برای ارزیابی پایداری شهر مطرح است که می‌تواند به عنوان یک چهار چوبی یکپارچه برای تجزیه و تحلیل سیستم‌های شهری به کار رود (Cui, 2018). در این میان رهیافت شهر باز مولد[4] توان عملیاتی متابولیکی شهر را به مانند یک موجود زنده افزایش می‌دهد از این رو که روش باز مولد با ادغام ورودی و خروجی‌های منابع در غالب تفکر باز مولد، که ساختار و عملکرد سیستم متابولیسم شهری را تحلیل می‌نماید می‌تواند به عنوان پایه‌ای علمی برای شناسایی مشکلات محیط زیستی و ارتقاء دوباره سلامت اکوسیستم شهر در نظر گرفته شود (Chen and Chen, 2012). کشور ایران نیز از نظر روند شهرنشینی دارای رشد شتابان شهری طی دهه‌های اخیر بوده است. تداوم چنین روندی با توجه به مصرف زدگی بیشتر شهرها و مسائل چرخه تولید در آنها، ورود مواد و انرژی در این شهرها برآیند و خروجی زیان باری را به دنبال داشته است. مصرف سوخت‌های فسیلی و اتلاف منابع و انرژی، پیامدهای گوناگون اقتصادی، اجتماعی و محیطی را برای شهرها به جای گذاشته است. بنابراین یکی از چالش‌های پیش روی شهرها این است که باید راه‌هایی برای بازسازی سیستم‌های طبیعی و گذار از شرایط ناپایدارکنونی به سمت پایداری یافت. بدین منظور در این پژوهش ابتدا مفاهیم و ادبیات رهیافت متابولیسم شهری به عنوان ابزاری قابل اعتماد و بنیادی برای رسیدن به شهر پایدار مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. در مرحله بعدی رهیافت شهر بازمولد و سپس تاثیرات متقابل این دو رهیافت در مبحث پایداری بررسی شده است. پرسش‌های پژوهش بدین شرح هستند:

- رهیافت شهر بازمولد چگونه می‌تواند پایداری متابولیسم شهری را موجب شود؟

- چگونه این دو رویکرد برای دست‌یابی به اصول پایداری تاثیرات متقابلی بر هم می‌گذارند و منجر به تحقق اصول و آرمان‌های پایداری می‌گردند؟

مبانی نظری و پیشینه

توسعه پایدار به عنوان یک فرایند جهانی تعریف شده است که مصرف منابع را به حداقل می‌رساند و تاثیرات آلودگی محیط زیست را با استفاده از فرایندهایی که هم اقتصاد و هم کیفیت زندگی را بهبود می‌بخشند، کاهش می‌دهد (Newman, 1999). چشم‌انداز توسعه پایدار یک فرآیند ایستا نیست بلکه متشکل از سیستم‌های مختلف محیطی, اجتماعی و اقتصادی است که با یکدیگر تعاملی پیوسته دارند و وابسته به یکدیگر عمل می کنند (Cepeliauskaite and Stasiskiene, 2020). در این راه یکی از بزرگترین چالش‌ها برای پایداری، مدیریت مسئولانه منابع طبیعی است که نیازمند رویکردهای سیستمی و اکولوژیک است. بررسی اهمیت اکولوژیک شهری به شکل رویکردهای مختلفی در ادبیات شهری مطرح شده است. در واقع شهر اکولوژیک، یک مدل سکونتگاه انسانی است که از لحاظ اکولوژیکی سالم، خودکفا و انعطاف‌پذیر است؛ بر اصول پایداری مانند تعادل بوم‌شناختی، خودسازماندهی اکوسیستم، اقتصاد اکولوژیک و سرمایه اجتماعی استوار و عملکرد آن براساس اکوسیستم‌های طبیعی سازگار است (Zhang and Li, 2018). بر این مبنا، برخی از مهم‌ترین انگاره‌های پایداری بر مبنای پیاده‌سازی اصول اکولوژیک شکل گرفتند (جدول ۱).

جدول ۱: انگاره‌های شهر پایدار بر آمده از پایداری بوم‌شناختی

انگاره‌های پایداری	ویژگی
شهر اکولوژیک	اقتصاد خودکفا - انرژی تجدیدپذیر- حفاظت از منابع - ارتقاء سبک زندگی، ریچارد ریجستر (۱۹۷۱) (Register, 2006; newman et al, 2010)
شهر فشرده	استفاده مجدد زمین -کاهش مصرف سوخت استفاده پایدارزمین، لکوربوزیه (۱۹۷۳) (Holden and norland, 2005)
شهر زیستی	تاکید بر اکوسیستم‌های بومی تاکید بر سبزینگی
شهر کربن خنثی	کاهش مصرف انرژی-تاکید بر انرژی تجدیدپذیر (Moughtin, 2010)
شهر خودکفا	مهار رشد شهر- خوکفایی در محلات - کاهش مصرف انرژی، ۱۹۶۰
شهر بیوفیلینگ	زیر ساخت سبز، تاکید بر رویکرد محلی خودکفایی و کاهش مصرف انرژی (Beatley, 2011; Newman, 2014)
شهر هوشمند	حفاظت محلی - سیاست انرژی شهر هوشمند، پایداری بوم شناختی
متابولیسم شهری	ارزیابی کمی منابع و انرژی و جریان‌های منابع ، تاثیر شهرها با ستفاده از منابع و تولید پسماند و آلودگی بر محیط زیست در مقیاس‌های وسیع محلی و منطقه ای، تعریف چرخه بسته و چرخشی منابع و انرژی صاحب نظر، ابل ولمن (۱۹۶۵) (Newman, 2010; Pincetl et al, 2012)

سیستم بازمولد	طراحی آگاهانه و مجدد اکوسیستم‌ها برای تجدید حیات با الهام از توانایی‌های سازمان دهی منابع طبیعی صاحب نظر، رابرت رودال و جان تیلمن لیل (۱۹۸۰) (Mang and Reed, 2020)
شهر بازمولد	معرفی شهرهای بازمولد و تعین چارچوب براب تکامل پایداری، موسس شورای جهان آینده[۷] (۲۰۱۰) (Mang and Reed, 2020)
توسعه بازمولد	توسعه و طراحی بازمولد چارچوبی برای توسعه پایدار (۲۰۱۶) (Mang and Reed, 2020)

(ماخذ: مطالعات نظری پژوهش، ۱۴۰۲)

اما از کامل‌ترین این رویکردها، متابولیسم شهری است چرا که رابطه مستقیمی بین کاهش متابولیسم شهری و اصول پایداری شهرها وجود دارد. بدین لحاظ، مدیریت پایدار با استفاده از مفهوم متابولیسم شهری تلاش می‌کند تا نیازهای سیستم را در راستای پایدارسازی منابع و انرژی پاسخگو باشد. پایداری متابولیسم در بازنمایی مفاهیم توسعه پایدار و خصوصیات عینی آن، بدان سبب قابل توجه است که متابولیسم شهری تصویر بزرگی از ورودی و خروجی مواد و ذخیره آب، مواد مغذی و زایدات برای یک منطقه شهری را به تصویر می‌کشد و به عنوان الگو و پایه‌ای برای طراحی شهر پایدار مورد استفاده قرار می‌گیرد. در اواخر دهه ۱۹۷۰ تجدید حیات تحقیقات متابولیسم شهری بود و پس از یک دوره فراموشی دوباره در اواخر دهه ۸۰ مورد توجه قرار گرفت به‌طوری که از سال ۲۰۰۰، این گزاره به کانون تمرکز اندیشمندان سراسر جهان تبدیل شد (جدول ۲).

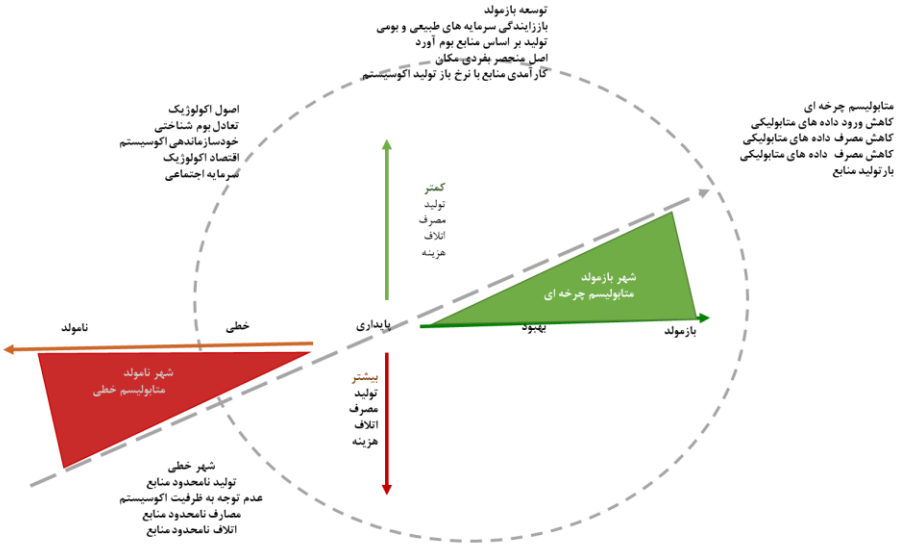
جدول ۲: تعاریف متابولیسم شهری

	مفهوم	منابع
	نیازهای متابولیکی شهر "نیازهای متابولیکی یک شهر می‌توان با عنوان تمام مواد و کالاهای مورد نیاز ساکنان شهردر خانه، محل کارو تفریح تعریف کرد".	(Wolman, 1965)
تئوری	جریان منابع و محصولات از طریق شهری سیستمی به نفع جمعیت شهری جریان منابع و محصولات شهری از طریق سیستم شهری برای استفاده جمعیت شهری	(Girardet, 2020)
	مجموع فرایندهای فنی و اجتماعی - اقتصادی که در شهرها رخ می‌دهد، منجر به رشد، تولید انرژی و حذف ضایعات می‌شود.	(Kennedy et al, 2007)
	جریان‌های انرژی و مواد یک شهر اغلب به عنوان سوخت و ساز شهری توصیف می‌شوند که به عنوان راهی بار پیوند بوم‌شناسی و اقتصاد شهری مطرح می‌گردد.	(Golubiewski, 2012)
	اصطلاح متابولیسم شهری مفهومی است که در آن شهر با استفاده از مفهوم بیولوژیکی با فرایندهای داخلی که موجودات زنده یک تبادل مداوم مواد و انرژی را با محیط خود حفظ می‌کند تا امکان بهره‌برداری، رشد و تکثیر را فراهم کنند، تحلیل می‌شود.	(Restrepo and Morales-Pinzon, 2018)
در عمل	مطالعه متابولیسم شهری تصویر بزرگی از ورودی‌ها، خروجی‌ها و ذخیره انرژی،آب، مواد غذایی، مواد و ضایعات برای یک منطقه شهری است.	(Kennedy et al, 2011)
	روش حسابداری برای کل انرژی و مواد ورودی و خروجی به شهرها تحلیل بر روی کمی سازی جریان‌های انرژی، آب، مواد و ضایعات در داخل و خارج از محدوده شهری متمرکز شده است.	(Pincetl et al, 2012)
تمرکز بر روی کاربرد	متابولیسم یک روش سیستم بیولوژیکی برای توجه به ورودی‌های منابع و خروجی‌های زباله‌های شهری است که شامل پویایی سکونتگاه‌ها و زیست‌پذیری در سکونتگاه‌هاست.	(Newman,1999)
	مطالعات متابولیسم شهری می‌توان به عنوان ابزاری برای شناسایی مشکلات محیط زیستی (هزینه‌های اقتصادی) مرتبط با رشد ورود به (منابع) و مدیریت خروجی‌ها (پسماندهای شهری) و طراحی سیاست‌های برنامه‌ریزی شهری کارآمد تر مورد استفاده قرار دهد.	(Niza et al, 2014)

(ماخذ: مطالعات نظری پژوهش، ۱۴۰۲)

مکتب‌های فکری در مطالعات متابولیسم شهری به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته نخست براساس تعادل انرژی است و دسته دوم براساس تحلیل جریان منابع مادی، آب، مواد غذایی و نیرو (MFA)[۶] است (Kennedy et al, 2007). واژه متابولیسم به فارسی سوخت و ساز ترجمه شده ولی به علت کاربرد رایج این واژه، در این پژوهش نیز برای بیان مطلب استفاده شده است. تحلیل متابولیسم شهری به عنوان یک روش مناسب برای ارزیابی پایداری شهرها است و همینطور چارچوب متدولوژیکی به حساب می‌آید که در آن تجزیه و تحلیل تمام جریان انرژی و مواد مربوط به تولید و فعالیت‌های مصرف شهرها در آن گنجانده می‌شود (Barles, 2009). امروزه استفاده گسترده از متابولیسم شهری به دلیل نیاز به شناخت علل کاهش نامحدود منابع مورد نیاز برای فعالیت‌های اقتصادی و ارتقاء کیفیت زندگی، ضرورت یافته است (Ferrao and Freaedez, 2013). در واقع متابولیسم شهری، مبنایی دقیق و جامع برای مشخص کردن جریان منابع و پسماندهای مربوط به شهرها ارائه می‌دهد (Kennedy et al, 2007). این روش تحلیل، نقطه شروعی برای ارزیابی سیستم‌های تولید با هدف مدیریت هزینه و کاهش بار محیط زیستی به حساب می آید (Cui, 2018). بر این اساس هدف این شیوه فراهم کردن روشی کمی برای ارزیابی شاخص‌های پایداری شهر است (Mostafavi et al, 2014). شهرهای امروزی به مانند سیستم‌های خطی عمل می‌کنند و منابع خود را بدون توجه به مناطق منشأ و مقصد به صورت نامحدود و گسترده از طبیعت می‌گیرند (Coutard and Florentin, 2022). این مطالعات آشکار می‌سازد که تقاضای شهرها برای کالا و خدمات همچنان در حال افزایش است و این موضوع به این دلیل قابل توجه است که اثرات مخرب محیطی زیستی هم اکنون از عرضه جهانی فراتر رفته است و به موازات آن کسری محیط زیستی همزمان با شهرنشینی گسترده جهانی در حال افزایش است (Moore et al, 2013). اکوسیستم‌های شهری نیز به علت میزان مصرف زیاد منابع، ناپایدار شده‌اند (Girardet, 2010). چنین ناپایداری در فرایندهای متابولیکی می‌تواند باعث فرسودگی منابع شده و محیط‌زیست در مقیاس محلی و منطقه‌ای را تحت‌تاثیر قرار دهد، در نتیجه، برای پایداری دراز مدت، شهرها نیازمند متابولیسم چرخه ای (Girardet, 2010) و تحلیل زیر ساخت‌ها و نحوه ارائه خدمات آن، در چارچوبی جدید هستند. گیراردت (۱۹۹۶) مدل متابولیسم چرخه‌ای را پیشنهاد داد بدین صورت که در فرایند چرخه، ورودی‌های جدید به حداقل و بازیافت مواد به حداکثر می‌رسد که این امر مستلزم درک جریان‌های طبیعی و فنی متابولیکی در یک شهر، ساختار و چگونگی هدایت آن به‌طور موثری برای دستیابی به منابع است (Du Plessis, 2012). اما از اشکالات آن این است که جزئیات داخلی جریان‌های سیستم ناشناخته باقی می‌مانند که از آن به عنوان جعبه سیاه (در مفهوم متابولیسم شهری، جعبه سیاه شامل عوامل ناشناخته اقتصادی، اجتماعی، سیاسی، فرهنگی و فناوری است که تأثیر آن‌ها در شکل‌گیری و تغییرات شهری قابل توجیه و تفسیر نیست. این عوامل می‌توانند شامل تغییرات سریع و غیرمنتظره در بازار کار، تکنولوژی‌های نوظهور، تغییرات فرهنگی و اجتماعی و مسائل محیط زیستی و سایر عوامل مشابه باشند.) نام می‌برند. ژانگ و همکارانش (۲۰۰۹) نیز سعی داشتند محدودیت‌های مدل جعبه سیاه را با پیشنهاد یک فرایند شبکه‌ای مبتنی بر تئوری اکوسیستم‌های شهری پیچیده، فرایند متابولیسم شهر را بهبود ببخشند (Chester et al, 2012). در این راستا، مطالعات آینده متابولیسم شهری، به تغییرات ساختاری و بنیادی در ایجاد سیستمی جامع برای مدیریت مواد و انرژی نیازمند است. بر این اساس رهیافت متابولیسم شهری برای تنظیم ورودی، مصرف مواد و انرژی، نیازمند توجه به فرایند های مکانی است (Du Plessis, 2015). در واقع این مقوله‌ای است که رهیافت شهر بازمولد اساس کار خویش قرار می‌دهد و راه را برای انتخاب شاخص‌هایی مناسب جهت سنجش و ارزیابی اصول پایداری، هموار می‌سازد. در این راستا به کارگیری بینش روش شناختی جدید رهیافت بازمولد و تاثیر آن بر مدیریت پایدار منابع، از طریق متابولیسم شهری مطرح شده است (Kennedy, 2012). چنین فرایندی، جریان انتقال آب، انرژی و منابع برای پایدارسازی فعالیت‌های زیستی، اقتصادی و اجتماعی شهر را از طریق ظرفیت تامین منابع حیاتی اکوسیستم در نظر می‌گیرد (Huang and Hsu, 2003) و این روشی مناسب برای اندازه‌گیری جریان کلی منابع در سیستم‌های شهری است و می‌تواند به عنوان الگوی پایه برای طراحی شهر پایدار و سیاست‌گذاری شهری استفاده گردد (Kennedy et al, 2011). توسعه بازمولد تغییر پارادایم آشکاری در برنامه

ریزی شهری است و آن تغییر از آرمان‌های معمارگرانه در طراحی شهری به سمت توسعه پایدار شهری است. این مفاهیم می‌تواند درک موثری از چگونگی عملکرد شهرها، از نظر ذخایر منابع و جریان‌های بنیادی آن ارائه کند و یک دیدگاه جامعی از عملکرد پیچیده سیستم‌های شهری، جنبه‌های مهم بین زیرساخت‌ها و خدمات، الگوهای اسکان، رفتار و سیستم‌های پشتیبانی ارائه دهد که فراتر از تجزیه و تحلیل کارکردی سنتی سیستم‌های شهری، به شمار می‌رود (Oliveira and vaz, 2021). برای تحقق این اهداف در راستای مدل متابولیسم چرخه‌ای، شهر بازمولد همچون یک عامل کلیدی به تعادل در توسعه یکپارچه سرزمین تمرکز خاص و تاثیر قابل‌توجهی بر کارآمدی منابع مورد نیاز در مصارف متابولیکی شهرها دارد (Kennedy, 2012). این دستور کار جدید شهری، استراتژی جامعی را برای ایجاد یک رابطه ترمیمی بین انسان شهری و اکوسیستم‌هایی فراهم می‌آورد که از منابع آن برای توسعه خویش بهره می‌برند (Girardet, 2010). به نظر گیراردت (Girardet, 2012) هدف تنها ایجاد شهرهای پایدار نیست بلکه ایجاد شهرهایی بازمولد است که توسعه آن به روابط فعال بین بشریت و اکوسیستم‌های جهان منتهی گردد (Axinte et al, 2019). گرچه تلاش‌های پایداری در مناطق شهری بر کاهش جریان‌های متابولیک (ورودی و خروجی) منابع تمرکز داشته است اما ناپایداری های موجود در روند تولید و مصرف منابع منجر به شکل‌گیری مدل‌های متابولیسم خطی گسترده شده که با تولید نامحدود منابع بدون توجه به ظرفیت‌های اکوسیستم، به صورت سیستم‌هایی نامولد[۶] و مخرب عمل کرده‌اند (شکل ۱). تحلیل و مدیریت شهر پایدار محقق نخواهد شد مگر آنکه نیازهای یک شهر بر روی منطقه جغرافیایی وسیع‌تر و بر پایه منابع اکولوژیکی آن شناسایی شود (Moore et al, 2013). در واقع شهرها برای بازگشت به خویشتن و کسب نشاط و سرزندگی نیاز به توسعه یکپارچه در قالب روابط مکانی با مناطق پیرامونی خویش دارند (Chen and Chen, 2015). رهیافت شهر باز مولد به دنبال ایجاد شرایطی است که سیستم‌های حیات اجتماعی و اکولوژیکی را قادر سازد به رشد و پویایی دست یابند (Heinonen and Ottelin, 2021) و با اتکاء به اصول اکولوژیک از جمله تعادل بوم‌شناختی، خود سازماندهی اکوسیستم، اقتصاد اکولوژیک و سرمایه اجتماعی به احیاء و پایدارسازی اکوسیستم منجرگردند. رهیافت توسعه بازمولد و متابولیسم شهری هر دو بر روی تغییر الگو و نگرش از مدل‌های ناپایدار کنونی متمرکز شده‌اند که از اهداف اصلی آن انتقال از دیدگاه خطی به دیدگاه چرخشی و شبکه‌ای است. در این راه، اصولی که شهر بازمولد بدان دست می‌یابد چنانچه (شکل ۱) نشان می‌دهد شامل بازتولید سرمایه‌های بومی و طبیعی براساس منابع بوم آورد و اصل منحصر بفردی مکان است و دیگری کارآمدی منابع براساس توان بازمولدی اکوسیستم است (Moore et al, 2013). شهر بازمولد برای حفظ سرمایه‌های اجتماعی نیز بر تعادل و روابط دوستانه ساکنان مناطق با اکوسیستم‌های زنده می‌پردازد، زیرا معتقد است که عدالت اجتماعی بدون تعادل محیط زیستی حاصل نخواهد شد. تکیه بر این بسترهای پایدار اکولوژیکی ضمن حفظ سرمایه‌های اجتماعی، بر جریان منابع و انرژی اثرگذار بوده و با کاهش تولید و اتلاف منابع به صرفه‌جویی در مصرف منابع حیاتی منجر می‌گردد. از این منظر، یک رابطه علی بین کاهش متابولیسم شهری و بازمولدی شهرها وجود دارد (Girardet, 2017). این پژوهش استدلال می‌کند که دو رهیافت متابولیسم شهری پایدار و شهر بازمولد در تعامل با یکدیگر، بستر مناسبی جهت شکل‌گیری الگوی توسعه یکپارچه شهری در قالب شبکه اکولوژیک فراهم می‌سازد. این روش می‌تواند به عنوان الگویی جامع و پایه برای ارزیابی کمی و کیفی سیستم‌های شهری حال و آینده باشد. آنچه که این پژوهش را از دیگر مطالعات متابولیسم شهری متمایز می‌کند پرکردن خلاءهای مطالعات متابولیسم شهری در درک پایداری سیستم‌های شهری با استفاده از نگاه رهیافت بازمولد است.



شکل ۱: مدل مفهومی تحقیق

(ماخذ: مطالعات نظری پژوهش، ۱۴۰۲)

روش‌شناسی

پژوهش حاضر، یک پژوهش اسنادی و تفسیری با رویکردی آمیخته است که به منظور تبیین مفاهیم و شاخص‌های سنجش پایداری متابولیسم شهری بر مبنای رهیافت شهر باز مولد، از میان ادبیات نظری مرتبط، مطالعات انجام شده در این زمینه و در نهایت مقایسه رویکردهای نوین انجام شده است. استراتژی پژوهش، تحلیل محتوا است و برای فهم اهداف، پیام آشکار و پنهان و انگیزه‌های اسناد و متون یا تحلیل‌های تاویلی یک متن استفاده شده که در نتیجه آن پیام را به عنوان زبان مکتوب و گفتمان نوشتاری مورد استناد قرار می‌دهد. به همین دلیل بستر معرفت شناختی و تکنیکی در این پژوهش بیشتر پارادایم تفسیری و روش جمع‌آوری اطلاعات نیز بر مبنای مطالعات کتابخانه‌ای بوده است. تحلیل محتوا شامل یک فرآیند کدگذاری باز بوده که در آن ایده‌ها و مفاهیم تحت نام کد مربوطه گروه‌بندی شده‌اند. سپس از کدگذاری محوری برای شناسایی روابط بین این کدها، بررسی سازگاری تفسیر و شناسایی اینکه سطوح اضافی کدگذاری مورد نیاز باشد، استفاده شده است. در نهایت، از یک فرآیند کدگذاری انتخابی برای شناسایی روابط بین مفاهیم کلیدی، انجام سنتز موضوعی و پاسخ به سوالات استفاده شده که منجر به ارائه شاخص‌های نهایی پژوهش شده است. در ادامه برای سطح‌بندی شاخص‌ها از نظر اهمیت و اثرگذاری در سیستم پایداری، از مدل‌سازی ساختاری تفسیری (ISM)[۷] استفاده شده است.

یافته‌ها

سنجش پایداری متابولیسم شهری با رهیافت شهر بازمولد

مطالعات متابولیسم شهری برای سنجش معیارها و ساخت شاخص‌ها، روش‌ها و مدل‌هایی را مورد استفاده قرار می‌دهد. در واقع به کارگیری این ابزارها برای مقابله با مشکلات و مساله پایداری شهرها، در گستره وسیعی از قلمرو بوم شناختی اعمال می‌شود (Chen and Chen, 2015). از روش‌های اصلی به کار رفته در سنجش متابولیسم شهری می‌توان به موارد زیر اشاره کرد؛ ۱) مدل‌های شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده، که فرآیندهای اکولوژیکی، مکانیزم‌های کنترل محیطی و تاثیرات دیگر مکانیسم‌های داخلی سیستم را مشخص می‌کنند (Wang et al, 2022) و از این طریق می‌توانند تکامل فرآیندهای اکولوژیکی، مکانیسم‌های کنترل محیطزیست و مکانیسم‌های داخلی سیستم را تعیین کنند (Zhang, 2015).

از نمونه مدل‌های شبیه‌سازی می‌توان به مدل‌های پویایی اکولوژیکی، مدل‌های شبکه اکولوژیکی، مدل‌های آنالیز ورودی و خروجی و مدل‌های فرآیندی را نام برد؛ ۲) کاربرد و تحلیل ردپای بوم‌شناختی، که در مقیاس کلان منطقه‌ای استفاده می‌شود و اهداف ویژه آن تعیین کمیت انرژی و مواد مصرفی با استفاده از داده‌های محلی و ارتباط دادن این داده‌ها با ظرفیت برد بوم شناخت، جهانی است (Ress and Wackernagel, 1996)؛ ۳) مدل ارزیابی چرخه زندگی (LCA)[۸] که می‌تواند برای ارزیابی بار محیطی فرایندها و یا فعالیت‌ها در طول چرخه عمر خود استفاده شود (Roy, 2009) و یک چارچوب تکمیلی برای ارزیابی اثرات محیط زیستی فرایندها و فعالیت‌های موجود در شهرهاست (Chen and Chen, 2015). ارزیابی چرخه حیات می‌تواند اطلاعات مفیدی را برای بهبود تولید، الگوبرداری، صرفه‌جویی در مصرف انرژی و کاهش انتشار مواد ارائه دهد و در چهار مرحله: تعیین هدف و دامنه، تجزیه و تحلیل سیاهه، ارزیابی پیامد و تفسیر انجام می‌پذیرد (Klopffer, 1997). در جدول ۳، برخی روش‌ها و مدل‌های سنجش و ارزیابی متابولیسم شهری آورده شده است.

جدول ۳: روش‌ها و ابزار سنجش متابولیسم شهری

روش‌ها	ویژگی	مشکلات و محدودیت‌ها
تحلیل ورودی و خروجی[۹]	اثرات محیط زیستی شهرها با مصرف مواد از طریق جریان مستقیم و غیر مستقیم وردی و خروجی منابع (Chen and Chen, 2015)	رویکرد کمی و فقدان تاثیر تجارت جهانی بر مصرف منابع
تحلیل جریان مواد	یک چشم‌انداز سیستماتیک جدید را برای مطالعه کمی مصرف مواد و تخلیه زباله در محیط شهری فراهم می‌آورد	رویکرد کمی و فقدان معیار سنجش جهت مقدار مصرف مفید مواد و انرژی در شهر و مقدار خروجی پسماند شهری
تحلیل انرژی	نسبت منابع انرژی تجدیدپذیر، نسبت ورودی و خروجی، نرخ تبدیل انرژی، بار محیط زیستی، و پایداری سیستم (Chen and Chen, 2012; Pincetl et al, 2012)	رویکرد کمی و ارزیابی پایداری سیستم شهری با استفاده از منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر و ثبت خروجی (Chen and Chen, 2015)
مدل‌های شبیه سازی[۱۰]	ایجاد یک ساختار سیستم بهینه و عملکرد بهینه، بررسی پارامترهای سیستم و میزان تاثیر آن در بر روی سیستم‌های پیچیده	چگونگی روابط و تعاملات یک سیستم پویا و متغیر
ارزیابی چرخه حیات	تاثیر چرخه حیات بر مقوله مختلف محیطی و پایداری شهری، کمی کردن اثرات و سیاست‌ها و تصمیم گیری‌ها با عدم قطعیت (Chester et al, 2012)	چگونگی تاثیر فعالیت‌های بالادستی و پایین دستی در رد پای اکولوژیکی شهر
تحلیل ردپای بوم شناختی[۱۱]	کمی کردن و ارزیابی بار محیطی شهری به نسبت ظرفیت احیاء کره زمین (Ress and Wackernagel, 1996)	تقلیل‌گرا و عدم برقراری رابطه همزیست گرا بین محیط‌های مصنوعی و طبیعی
سیستم‌های ارزیابی یکپارچه و ارزیابی پیچیده[۱۲]	ارزیابی پایداری یک ساختار با در نظر گرفتن آن به عنوان یک نهاد فعال که به انعطاف‌پذیری ماتریس شهری کمک می‌کند. تعاملات متقابل متمایز که ساختمان‌ها، فضای شهری و دینامیک اجتماعی و اکولوژیکی را شکل می‌دهند (Conte and monno, 2011)	فقدان تحلیل مداوم جریان‌ها در سیستم

(ماخذ: مطالعات نظری پژوهش، ۱۴۰۲)

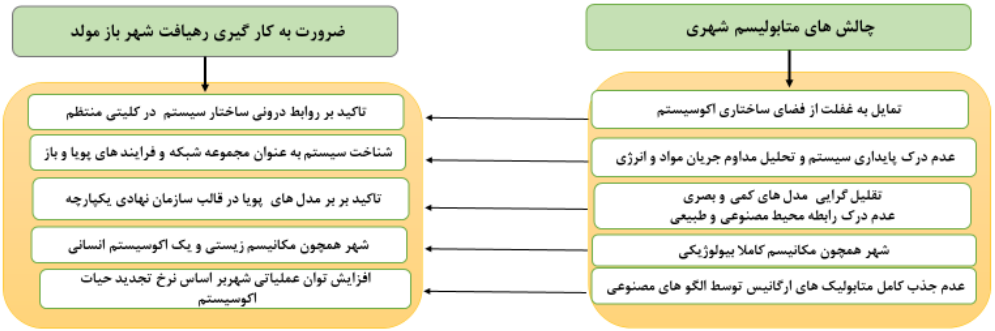
ابزارها و روش‌های به کار گرفته شده در متابولیسم شهری امکان محاسبه و ارزیابی جریان منابع و انرژی را فراهم می‌آورند، اما این روش‌ها، جریان و تعاملات سیستمی برای شناخت پویایی آن را پنهان می‌کنند (Du Plesse, 2012). با این حال، پس از چند دهه تحقیق درباره محدودیت‌های این رویکرد به پژوهشگران نشان داده که اولویت اصلی در این تحقیقات، رهایی از مدل جعبه سیاه و تحلیل کمی ابعاد متابولیکی تولید، مصرف و گردش در بین اجزای یک اکوسیستم شهری است (Zhang, 2013).

مسائل و چالش‌های متابولیسم شهری و ضرورت به کارگیری رهیافت باز مولد

متابولیسم شهری برای سنجش و ارزیابی مطالعات خویش با محدودیت‌ها و چالش‌هایی روبرو بوده است که به شرح زیر مورد بررسی قرار گرفته‌اند، (شکل ۲) نخست؛ موضوع مهمی که اینجا مطرح است، نوع نحوه ارتباط سیستم شهر با پیرامون خود جهت توسعه و حفظ الگوی یکپارچه آن است. درحالی که شاخص‌های متابولیسم شهری تمایل به غفلت از فضای ساختاری دارند (Mang and Reed, 2012) و در تحلیل جریان مواد و انرژی، پایداری همه جانبه سیستم و تغییرات آن را نمی‌توانند تشخیص دهند و تنها این پایداری را براساس مقایسه افقی واحدهای فضایی مختلف و مقایسه عمودی در زمان‌های مختلف، محاسبه و ارزیابی می‌کنند و البته این یک نقص مهم در تحلیل مداوم جریان مواد و انرژی اکوسیستم محسوب می‌شود (Zhang, 2013) چنین می‌توان استدلال کرد که پایداری شهرها یک مشکل سیستماتیک است و آنچه که باید لحاظ شود این است که روابط و تعاملات سیستم‌های پویا و متغیر را نمی‌توان تنها با مجموعه‌ای از راه‌حل‌های فنی - اقتصادی و روش‌های تک بعدی درک و تحلیل نمود (Du Plesse, 2012). بلکه برای درک عمیق پیچیدگی سیستم‌های شهری بسیار مهم است که از رویکردهای خطی و تک بعدی فراتر برویم. چالش دوم در مباحث متابولیسم شهری، عدم توجه به یکپارچگی و مدیریت شهری است. تاکید بر استفاده از شاخص‌های کمی و بصری مانند تحلیل جریان مواد، تحلیل چرخه عمر، نمودارهای درختی و غیره برای تجزیه و تحلیل جریان‌های متابولیکی یک شهر، گرچه فرصت را برای مداخلات طراحی اکولوژیکی فراهم می‌آورند، ولی تقلیل‌گرا باقی می‌مانند و لزوما پتانسیل یک رابطه هم زیستی بین محیط‌های مصنوع و طبیعی را ندارند (Du Plesse, 2012). مدل‌ها و روش‌های کمی مورد استفاده در متابولیسم شهری مانند؛ رد پای بوم‌شناختی، حسابرسی محیط زیستی و سیستم‌های ارزیابی یکپارچه و ارزیابی پیچیده[۱۳] و غیره. اگرچه به عنوان ابزار برای اندازه‌گیری یا ارزیابی پایداری محیطی شهرها استفاده می‌گردند اما به دلایل مختلف مورد انتقاد قرار گرفته‌اند. این شاخص‌ها تک بعدی عمل می‌کنند و بدون چارچوب ساختاری و توجه همه جانبه به محیط، توسعه داده می‌شوند. درحالی که تحولات پایداری در اکوسیستم، از فقدان روابط و تعاملات اکولوژیکی به وسیله مساله قطعیت، پیش‌بینی و کنترل رنج می‌برد (Du Plesse, 2012). موضوع سومی هم که در اینجا چالش برانگیز است؛ رویکرد متابولیسم شهری یک دیدگاه کاملا بیولوژیکی است، اما شهرها فراتر از یک مکانیسم صرفا زیستی، بلکه یک فرصت انسانی محسوب می‌شوند. مطالعات متابولیسم شهری در مورد مصرف، ذخیره و بازیافت منابع و همینطور طراحی زیر ساخت ها و خدمات اجتماعی، تحت‌تاثیر نحوه سازماندهی و تصمیم‌گیری تک بعدی جوامع شهری است و جنبه‌های اجتماعی و مدیریت پایدار منابع به‌طور ضعیفی بررسی می‌شود (Ulgiati and Zucaro, 2019) و همینطور پیچیدگی تعاملات محیط طبیعی و سیستم های اجتماعی - اقتصادی نادیده گرفته می‌شود (Huang et al, 2006). در حالی که جامعه انسانی پایدار را نمی‌توان به حالت ایستا تلقی نمود و شرایط رشد، سازگاری و انعطاف‌پذیری را برای آن انتظار داشت. بدین لحاظ نگاه به رویکرد متابولیسم شهری باید همچون یک اکوسیستم انسانی تغییر یابد (Newman et al, 2009). چنین رویه‌های پایداری تنها در سیستم‌های اجتماعی- اکولوژیک یافت می‌شود که بر تداوم بقاء، تغییرپذیری و غیر قابل پیش‌بینی بودن تمرکز دارند (Waldrop, 1993; Du Plesse, 2012). در مورد چالش چهارم، همان طورکه اشاره شد رویکرد متابولیسم شهری به کمی کردن و ارزیابی بار کلی محیط شهری کمک می‌کنند (Kenndy et al, 2011) اما الگویی که ارائه می دهد، کارکرد واقعی اکوسیستم مصنوعی را به تصویر می‌کشد (Chen and Chen, 2012) در حالی که مطالعات متابولیسم شهری، بایست شهر را به مثابه یک ارگانیسم بیولوژیکی زنده مقایسه کند که همه جریان‌های انرژی و مواد، مشابه آن در نظر گرفته شوند، مثلا مواد مغذی که برای حفظ حیات متابولیسم شهر وارد می‌شوند و مصرف این مواد، متابولیک‌هایی را تولید می‌کند (مواد زائد و آلاینده‌ها) که اگر این متابولیک‌ها مانند ارگانیسم‌های زنده، قادر به جذب مجدد نباشند یا نتوانند مورد استفاده مجدد قرار گیرند اثرات زیان‌آوری بر جای می‌گذارند. اما اکوسیستم‌های مصنوعی نمی‌توانند از این متابولیک‌ها همچون ارگانیسم‌های طبیعی استفاده کنند و این عامل اختلال در متابولیسم شهر را نمایان می‌سازد. وجود چنین چالش‌هایی در ادبیات متابولیسم شهری، روش‌های سنجش و شاخص‌های موجود

برای ارزیابی داده‌ها را همواره با نقص و کمبودهایی روبرو ساخته است. در نهایت می‌توان به این نتیجه رسید که ضرورت وجود یک دیدگاه مناسب با روش‌شناختی جامع که خلا دیدگاه متابولیسم را پر نماید کاملا احساس می‌شود. بر این منظور، ضرورت نیاز به شناخت رهیافتی خلاق و التیام بخش همچون شهر باز مولد احساس می‌شود. در این رهیافت، مطالعه و شناخت روابط متقابل درونی در ساختار سیستم، فراتر از شیوه مطالعاتی متابولیسم، مورد توجه قرار می‌گیرد که جهت بررسی چالش‌های ذکر شده می‌توان به این موارد استدلال کرد؛ (شکل ۲) همان‌طور که در چالش اول متابولیسم اشاره شد، مطالعه و ارزیابی ورودی و خروجی سیستم‌های شهری صرفا به صورت جدا و منفعل از فضای ساختاری آن انجام می‌شود و توصیف کاملی از یکپارچگی محیطی ارائه نمی‌گردد. در صورتی که رهیافت باز مولد به جای دیدن طرح‌های توسعه در قالب مجموعه‌ای از مسائل منفرد و تک بعدی، این توانایی را دارد که طرح‌های ذکر شده را به عنوان سیستم‌های تعاملی انرژی و مواد در قالب شبکه‌ای از فرایندهای پویا و بهم پیوسته که همواره در حال ساختاربندی و بازسازی مداوم هستند را پرورش دهد (Mang and Reed, 2012) اما این ساختاربندی و بازسازی بدون بستره محیطی امکان‌پذیر نیست، بنابراین تحلیل و مدیریت شهر پایدار مستلزم درک نیازهای یک شهر بر روی منطقه جغرافیایی وسیع‌تر و متکی بر منابع محیط زیستی آن است (Moore et al, 2013). از آنجا که علاقه علمی متابولیسم شهری تنظیم ورودی و مصارف مواد و انرژی هست به همین جهت اهمیت فرایندهای مکانی در مطالعات متابولیسم شهری جایگاه خویش را می‌یابد تا بتواند پیوستگی و گردش مواد و انرژی را در بستره اکولوژیکی آن، درک و تحلیل نماید و از این طریق، تشخیص و درک روابط و تعاملات یک سیستم پویا و متغیر، قابل فهم و بررسی گردد (Chen and Chen, 2015). یک منطقه شهری بازمولد تلاش می‌کند به منابع و دارایی‌های محلی و موجود خویش تا حد ممکن تکیه کند و در عین حال دائما در حال توسعه یک رابطه سودمند با مناطق اطراف خود باشد. بنابراین می‌توان اظهار داشت وقتی متابولیسم یک شهر می‌تواند خودکفا و پایدار در نظر گرفته شود که از مطالعات منفرد و تک بعدی در امان بماند و اثرات محیط‌های محلی و دور برد در پیوند با سیستم‌های موجود را در نظر بگیرد (Chen and Chen, 2012). در این راستا، مدلی که شهر بازمولد ارائه می‌دهد به روشن‌سازی روابط بین بخش‌های مختلف درونی سیستم‌های شهری منجر می‌شود (Cui et al, 2019). بر این اساس برنامه‌ریزان جهت سنجش میزان پایداری و تغییرات اکوسیستم، باید حوزه مطالعات خود را طوری گسترش دهند که سیستم‌های شهری و شبکه‌های فیزیکی را در برگیرد (Girard, 2017). در رابطه با چالش دوم متابولیسم می‌توان گفت دسترسی به داده‌های مورد نیاز شهری به دور از مسائل و محدودیت‌های کمی و فرایند تک بعدی، همچنان مطالعات شهری را به چالش می‌کشد. به احتمال زیاد دشوارترین و حیاتی‌ترین جنبه پایداری شهرها بررسی و درک رشد کیفی در شناخت سیستم‌های شهری است، اینجاست که پیوند دادن مولفه‌های متابولیسم شهری به استراتژی‌های سیاسی ضروری است تا بتوان هم عملکرد پایداری شهر را اندازه‌گیری و تغییر داد و هم عملکرد میان رشته‌ای متابولیسم شهری را توسعه داد چرا که عدالت و ابعاد حکمرانی، در گرو چگونگی استفاده از منابع است (Dijst et al, 2018). داشتن جامعه‌ای پایدار با مدیریت مناسب و عادلانه، تحت‌تاثیر آموزش، احساس تعلق، تعامل متعادل با مناطق و جمعیت‌های مستقر در آن است. در حالی که شاخص‌های ارزیابی برای شهرهای کنونی به گونه دیگری عمل کرده است و به روش‌هایی ارزیابی و توسعه یافته‌اند که گاهی تنها در یک جعبه ابزار خاص ادغام شده‌اند و لزوماً نتوانسته‌اند توصیف کاملی از یکپارچگی محیط و استفاده کارآمد از منابع ارائه دهند و برای ارزیابی جامع سیستم و ویژگی‌های بازخوردی آن که البته مشخصه کلیدی یک اقتصاد شهری پایدار است، تعریف و طراحی نشده‌اند (Huang et al, 2006). رهیافت بازمولد برای مقابله با تحمیل راه‌حل‌های فنی و مکانیکی و غلبه بر چالش‌های محیطی و اجتماعی عمدتا بر سیستم‌های اکولوژیکی و زنده تکیه دارد (Camrass, 2021). برآیند چنین رویکردی، تاثیرات حداقل محیطی و همزیستی تعاملی با محیط‌های ساخته شده است که تحول مهمی در مفهوم و کاربرد پایداری است و به جای کمینه‌سازی آسیب‌ها در محیط، به دنبال راه‌هایی برای ایجاد منافع متقابل سیستم‌های اجتماعی، فنی و اکولوژیک است (Axtine et al, 2019). در پاسخ به چالش سوم متابولیسم؛ به نظر مانگ، مناطق شهری یک اتفاق طبیعی نیستند بلکه یک ساختار اجتماعی دارند و نگاه بازمولد به

معنای تغییر جوامع انسانی و فعالیت‌هایش همگام با تکامل سیستم‌های طبیعی است (Mangand Reed, 2020). این رهیافت در مورد محیط مصنوع به باور عمیق‌تری در قیاس با طراحی و ساخت صرف ساختمان‌ها و سکونتگاه‌های انسانی دست یافته است. با رهیافت بازمولد طراحان شهری، نظم اکولوژیکی در مقیاس‌های گوناگون را درک می‌کنند و این درک را به ارزش‌های انسانی پیوند می‌دهند (Mang and Reed, 2012) زیرا که رفتار اجتماعی و ترجیحات فردی عمیقاً تحت‌تاثیر رقابت منابع موجود در فضا و فرصت‌ها قرار دارد (Ulgiati and Zucaro, 2019). شهرها همچون اکوسیستم انسانی هستند و هدف از توسعه بازمولد نیز بازسازی و تجدید حیات این سیستم اجتماعی- اکولوژیکی از طریق مجموعه‌ای از طراحی اکولوژیکی منطقه‌ای و فعالیت‌های مهندسی است (Du Plesse, 2012). چالش چهارم متابولیسم مربوط به محدودیت‌های اکوسیستم های مصنوعی است در حالی که شهرها نیاز به نوع جامع‌تری از سازمانی دارند که قادر به تقلید هر چه بیشتر فرآیندهای اکوسیستم طبیعی زنده باشند. تمام سیستم‌های پویا با فرآیندهای دایره‌ای بدون پسماند مشخص می‌شوند که قادر به حفظ و تکثیر خود هستند فرآیندهایی همچون استفاده مجدد، بازیافت و بازسازی مداوم منابع و انرژی است. بر این اساس، رهیافت بازمولد با تکیه بر سازمان‌های نهادی یکپارچه، درصدد پویایی و بازمولدی سیستم هاست (Mang and Reed, 2012). این رهیافت با ایجاد روابط متقابل در منطقه شهری با هدف بهینه‌سازی استفاده از فضا، به رفع چالش‌های متابولیسمی کمک می‌نماید. الزام اصلی در این راه این است که نرخ استفاده از منابع نباید بیش از نرخ تجدید حیات آنها باشد و همینطور میزان انتشار مواد نباید بیشتر از میزان جذب آلاینده‌ها باشد. رهیافت بازمولد درصدد است توان عملیاتی متابولیک شهر را به عنوان یک موجود زنده افزایش دهد و با ادغام ورودی و خروجی‌ها، شناخت نوع ساختار و نحوه عملکرد سیستم‌ها، متابولیسم شهر مورد تحلیل و بازبینی مجدد قرارگیرد (Chen and Chen, 2012).



شکل ۲: چالش‌های متابولیسم شهری و ضرورت به کارگیری رهیافت شهر بازمولد

(ماخذ: مطالعات نظری پژوهش، ۱۴۰۲)

شاخص‌های سنجش پایداری

اصول متابولیسم شهری و شهر بازمولد تقابل مشترکی در نحوه تولید و مصرف کارآمد مولفه‌های آب، غذا، انرژی و مواد دارند بدین منظور برخلاف توسعه خطی این منابع نباید در فضای نامحدودی تامین شوند (Girardet, 2017). بر این اساس مولفه‌های متابولیک در قالب معیارهای بازمولد و متناسب با توان ظرفیت محیط زیستی به دست آمده است. در اینجا مولفه‌های پایداری همان‌طور که در شکل ۳ آمده، براساس چهار عنصر آب، انرژی، غذا و مواد استخراج می‌شوند. در رابطه با عنصر آب، معیارهای پایداری متابولیسم عبارتند از کاهش تولید با راندمان بالا، کاهش اتلاف و بازتولید آب است که به موازات آن، معیارهای بازمولد، میزان تولید براساس منابع شبکه پیوسته و میزان تولید به نسبت شبکه گسسته با محوریت تولید محلی و بومی را ملاک عمل قرار می‌دهد. که هدف آن بهره‌گیری از پتانسیل‌های محیط زیستی و حفظ سرمایه‌های محلی و اجتماعی است. در رابطه با معیار غذا، معیارهای پایداری متابولیسم بر کاهش ورود منابع، کاهش مصرف داخلی و بازیافت مواد غذایی تاکید دارد در حالی که معیارهای بازمولد تولیدات و مصارف منابع غذا را بر مبنای

منطقه محلی و مناطق دور برد را با هدف تقویت اقتصاد محلی، حفظ سرمایه‌های محیطی و باز تولید غذا، مدنظر قرار می‌دهد. درک جریان مواد غذایی از طریق سیستم شهری برای استراتژی‌های موفق مدیریت منابع غذایی برای پرداختن به مسائلی مانند تغذیه، رهاسازی فلزات سنگین به زمین‌های کشاورزی، باران اسیدی و آلودگی آب‌های زیرزمینی حیاتی است (Oliveira and Vaz, 2021).

شکل ۳: چارچوب پیشنهادی شاخص‌های سنجش متابولیسم شهر پایدار با رهیافت شهر باز مولد

(ماخذ: مطالعات نظری پژوهش، ۱۴۰۲)

در ادامه برای پیاده‌سازی مدل تفسیری - ساختاری پس از تحلیل محتوا و استخراج شاخص‌های مرکزی از چارچوب پیشنهادی ارائه شده در تصویر بالا، پرسشنامه (ISM) یا همان ماتریس مربع n×n از شاخص‌های موجود طراحی شد که از بازه ۰ و ۱ برای تعیین سطوح هر یک از شاخص‌ها استفاده کرده‌اند. درحقیقت ماتریس خودتعاملی ساختاری (SSIM)[۱۳] از ابعاد و شاخص‌های مطالعه و مقایسه آن‌ها با استفاده از چهار حالت روابط مفهومی تشکیل می‌شود. این ماتریس توسط خبرگان و متخصصین در یک فرآیند محوری تکمیل می‌شود. پس از تکمیل ۸ پرسشنامه یا همان ماتریس خودتعاملی ساختاری توسط متخصصان حوزه مطالعاتی مربوطه، ماتریس دریافتی[۱۴] از تبدیل ماتریس خود تعاملی ساختاری به یک ماتریس دو ارزشی صفر و یک به دست آمده است. ماتریس به دست آمده به شرح جدول زیر ماتریس دریافتی نهایی نام دارد و درایه‌های قطر اصلی برابر یک قرار می‌گیرد. علاوه بر این، میزان وابستگی و قدرت نفوذ هر شاخص در آن مشخص شده است.

- قدرت نفوذ؛ میزان تاثیر بر مولفه‌های دیگر است که برای هر مولفه از جمع اعداد هر سطر در ماتریس دریافتی نهایی به دست می‌آید. (خروجی)

- میزان وابستگی؛ تاثیرپذیری از مولفه‌های دیگر را نشان می‌دهد که برای هر مولفه از جمع اعداد هر ستون در ماتریس دریافتی نهایی به دست می‌آید. (ورودی)

بر مبنای ماتریس جدول ۴ شاخص‌های بازیافت مواد براساس ظرفیت قدرت احیاکنندگی اکوسیستم، ورود غذا براساس ظرفیت بوم آورد و همچنین بازیافت مواد غذایی براساس تجدیدپذیری اکوسیستم به عنوان شاخص‌هایی با قدرت نفوذ بالا شناخته شده‌اند. علاوه بر این شاخص‌های پایداری منابع آب، کاهش اتلاف آب، کاهش مصرف انرژی فسیلی و نیز شاخص‌های کاهش مصرف براساس راندمان بالا، کاهش مصرف داخلی با راندمان بالا و تولید انرژی براساس ظرفیت بوم آورد به عنوان شاخص‌های وابسته در این پژوهش شناخته شده‌اند.

جدول ۴: ماتریس دریافتی نهایی

شاخص‌ها	پایداری منابع آب	کاهش مصرف براساس راندمان بالا	کاهش اتلاف آب	بازتولید آب	ورود غذا براساس ظرفیت بوم آورد	کاهش مصرف داخلی با راندمان بالا	بازیافت مواد غذایی براساس تجدیدپذیری اکوسیستم	تولید انرژی براساس ظرفیت بوم آورد	کاهش مصرف انرژی فسیلی	استفاده از انرژی تجدیدپذیر براساس تولید اکوسیستم	کاهش حجم تولید مواد	بازیافت مواد براساس ظرفیت قدرت احیاکنندگی اکوسیستم	خروجی یا قدرت نفوذ
پایداری منابع آب	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۵
کاهش مصرف براساس راندمان بالا	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۸
کاهش اتلاف آب	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۸
بازتولید آب	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۸
ورود غذا براساس ظرفیت بوم آورد	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱۰
کاهش مصرف داخلی با راندمان بالا	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۹
بازیافت مواد غذایی براساس تجدیدپذیری اکوسیستم	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱۰
تولید انرژی براساس ظرفیت بوم آورد	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۸
کاهش مصرف انرژی فسیلی	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۷
استفاده از انرژی تجدیدپذیر براساس تولید اکوسیستم	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۸
کاهش حجم تولید مواد	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۸
بازیافت مواد براساس ظرفیت قدرت احیاکنندگی اکوسیستم	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱۱
ورودی یا وابستگی	۱۱	۱۰	۱۱	۵	۷	۱۰	۵	۱۰	۱۲	۷	۹	۴	-

در مرحله بعد از اختصاص نماد مشخص به هرکدام از شاخص‌ها (جدول ۵)، سطح‌بندی شده‌اند که برای این کار سه مجموعه تعریف شده است:

۱) مجموعه دریافتی: مجموعه دریافتی برای یک متغیر خاص عبارت است از نام خود آن متغیر، به انضمام سایر متغیرهایی که در به وجود آمدن آن نقش داشته‌اند؛ به شکل ساده‌تر همه مولفه‌هایی که در سطر مربوط به مولفه مورد نظر عدد ۱ دارند.

۲) مجموعه مقدماتی: مجموعه مقدماتی برای هر متغیر شامل نام خود آن متغیر، به انضمام سایر متغیرهایی که در ایجاد آنها نقش داشته است؛ به شکل ساده‌تر همه مولفه‌هایی که در ستون مربوط به مولفه مورد نظر عدد ۱ دارند.

۳) مجموعه اشتراک: همانطور که از اسم آن نیز مشخص است از متغیرهای مشترک در دو مجموعه بالا به دست می‌آید. متغیرهایی که اشتراک آن‌ها با مجموعه دریافتی آن‌ها یکسان است، در سلسله مراتب ISM به عنوان متغیر سطح بالا محسوب می‌شوند، به این معنی که این متغیرها بر متغیرهای دیگر تاثیر کمتری دارند. پس از شناسایی متغیر بالاترین سطح، آن متغیر از فهرست کنار گذاشته شده و این تکرارها تا زمانی که سطح همه متغیرها مشخص شود، ادامه پیدا کرده است. سطح‌بندی شاخص‌ها به شرح جداول زیر است:

جدول ۵: نماد اختصاری هریک از شاخص‌ها

ردیف	شاخص	نماد
۱	پایداری منابع آب	A1
۲	کاهش مصرف براساس راندمان بالا	A2
۳	کاهش اتلاف آب	A3
۴	بازتولید آب	A4
۵	ورود غذا براساس ظرفیت بوم آورد	A5
۶	کاهش مصرف داخلی با راندمان بالا	A6
۷	بازیافت مواد غذایی براساس تجدیدپذیری اکوسیستم	A7
۸	تولید انرژی براساس ظرفیت بوم آورد	A8
۹	کاهش مصرف انرژی فسیلی	A9
۱۰	استفاده از انرژی تجدیدپذیر براساس تولید اکوسیستم	A10
۱۱	کاهش حجم تولید مواد	A11
۱۲	بازیافت مواد براساس ظرفیت قدرت احیاکنندگی اکوسیستم	A12

متغیرهای سطح اول پژوهش شامل شاخص‌های پایداری منابع آب، کاهش اتلاف آب، کاهش مصرف داخلی با راندمان بالا، کاهش مصرف انرژی فسیلی، کاهش حجم تولید مواد و همچنین شاخص بازیافت مواد براساس ظرفیت قدرت احیاکنندگی اکوسیستم هستند. در گام بعد پس از حذف شاخص‌های سطح اول، ماتریس زیر جهت استخراج شاخص‌های سطح دوم ترسیم شده است:

جدول ۶: شاخص‌های باقی مانده جهت استخراج شاخص‌های سطح دوم

	شاخص‌ها	کاهش مصرف براساس راندمان بالا	بازتولید آب	ورود غذا براساس ظرفیت بوم آورد	بازیافت مواد غذایی براساس تجدیدپذیری اکوسیستم	تولید انرژی براساس ظرفیت بوم آورد	استفاده از انرژی تجدیدپذیر براساس تولید اکوسیستم
A2	کاهش مصرف براساس راندمان بالا	-	۱	۱	۰	۱	۰
A4	بازتولید آب	۱	-	۰	۰	۱	۰
A5	ورود غذا براساس ظرفیت بوم آورد	۱	۱	-	۱	۰	۱
A7	بازیافت مواد غذایی براساس تجدیدپذیری اکوسیستم	۱	۰	۱	-	۱	۱

(ماخذ: مطالعات میدانی پژوهش، ۱۴۰۲)

براساس جدول ۶، شاخص‌های سطح دوم مقاله شامل شاخص‌های کاهش مصرف براساس راندمان بالا و استفاده از انرژی تجدیدپذیر براساس تولید اکوسیستم هستند. در انتها نیز پس از حذف شاخص‌های سطح دوم از ماتریس، به استخراج شاخص‌های سطح سوم پژوهش پرداخته می‌شود.

جدول ۷: شاخص‌های باقی مانده جهت استخراج شاخص‌های سطح سوم

	شاخص‌ها	بازتولید آب	ورود غذا براساس ظرفیت بوم آورد	بازیافت مواد غذایی براساس تجدیدپذیری اکوسیستم	تولید انرژی براساس ظرفیت بوم آورد
A4	بازتولید آب	-	۰	۰	۱
A5	ورود غذا براساس ظرفیت بوم آورد	۱	-	۱	۰
A7	بازیافت مواد غذایی براساس تجدیدپذیری اکوسیستم	۱	۱	-	۱
A8	تولید انرژی براساس ظرفیت بوم آورد	۱	۱	۱	-

(ماخذ: مطالعات میدانی پژوهش، ۱۴۰۲)

طبق جدول ۷، شاخص‌های سطح سوم مقاله نیز شامل بازتولید آب، ورود غذا براساس ظرفیت بوم آورد، بازیافت مواد غذایی براساس تجدیدپذیری اکوسیستم و تولید انرژی براساس ظرفیت بوم آورد هستند.

بحث و نتیجه‌گیری

هدف پژوهش حاضر مطالعه علل ناکارآمدی الگوی خطی سیستم‌های شهری کنونی است که سبب افزایش بی‌نظمی، اتلاف منابع و افزایش آلاینده‌ها و دلیل اصلی تخریب و ناکارآمدی منابع حیاتی بوده است بوده. بدین منظور این پژوهش به دنبال درک و کسب بینش بیشتر در خصوص نقش و جایگاه رهیافت بازمولد در پایداری متابولیسم شهری است. از اینرو، در پی ارائه شاخص‌های پایدار شهر بازمولد برای نیل به متابولیسم چرخه‌ای بازمولد است. در مطالعات متابولیسم شهری، ابزارها و روش‌های کمی و مدل‌گرا به کار رفته است، در حالی که چنین روش‌هایی نمی‌تواند تصویر کامل و دقیقی از تمامی عناصر سیستم ارائه دهد و همچنین پویایی و روابط بین جریان‌های اکوسیستم قابل درک و شناسایی نخواهد بود و چنین مطالعاتی تنها در قالب اقدامات موضعی همچون استفاده بهینه از منابع و کاهش ضایعات و آلاینده‌های شهری باقی می‌مانند. رهیافت شهر بازمولد نگاه متفاوت‌تری به این موضوع دارد و سیستم‌های شهر را فراتر از یک مکانیسم منفرد بلکه یک فرصت انسانی در نظر می‌گیرد و تغییر نگرش آن، در ارتباط با رابطه ناکارآمد انسان و اکوسیستم و به دنبال بازسازی و تجدید حیات سیستم‌های اکولوژیکی - اجتماعی است. این الگو با معرفی چارچوبی نظری، راهکاری مناسب جهت سنجش پایداری شهرها ارائه می‌نماید و ضمن تمرکز بر مکان و ظرفیت تجدیدپذیری اکوسیستم، شاخص‌های متابولیسم شهری را از تجزیه و تحلیل صرف داده‌های متابولیکی خارج می‌کند و به طراحی سیستم‌های پویا و انعطاف‌پذیر جهت می‌بخشد. در اینجا جریان پایداری از روابط درونی سیستم شهری در پیوند با سیستم برون منطقه‌ای شکل می‌گیرد که ضمن کاهش مصرف منابع، تداوم حیات اکوسیستم را طوری مهیا می‌سازد که وابستگی به منابع ناپایدار برونی کاهش یابد و اتکا به سرمایه‌های بوم‌شناختی افزایش یابد. بر همین مبنا در این پژوهش، شاخص‌های سنجش پایداری متابولیسم شهری بر مبنای معیارهای رهیافت شهر باز مولد استخراج شده و در سه سطح دسته‌بندی شده‌اند که این سطوح بیانگر میزان اهمیت و اثرگذاری هر سطح از شاخص‌ها در پایداری اکوسیستم شهرها است. پیشنهاد این پژوهش برای مطالعات آینده، با نظر به این که هیچ شهری نمی‌تواند به تنهایی قائم به تولیدات خود باشد و پایداری آن منوط به پایداری محدوده بوم وسیع‌تری است تا بتواند منابع حیاتی خود را در قالب توسعه یکپارچه اکوسیستم تامین نماید و بی‌نیاز از توسعه منفرد و خطی باشد، تاکید بر استفاده از شبکه شهرهای بازمولد است. معیارهای متابولیسم

شهری بیشتر باید با رویکردی اکولوژیکی در مقیاس بوم‌شناختی وسیع‌تری شکل بگیرد تا شاخص‌های آن قادر به ارزیابی پایداری منابع در قالب شبکه‌های بازمولد باشند.

سپاسگزاری

از همه کسانی که در این تحقیق نگارندگان را یاری کرده‌اند تشکر و قدردانی می‌شود.

پی نوشت

1- Petropolice
2- Linner Cities
3- Metabolism
4- Regenerative City
5- Material Flow Analysis (MFA)
6- Degenerative City
7- Interpretive Structural Modeling (ISM)
8- Life Cycle Analysis (LCA)
9- Input-Output Analysis
10- Systems Simulation
11- Foot Prints Analysis
12- Integrated Evaluation Systems Complex
13- Structural Self-Interaction Matrix
14- Reachability Matrix

حامی مالی

بنا به اظهار نویسنده مسئول، این مقاله حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان در پژوهش

همه نویسندگان، در بخش‌های نگارش و تنظیم مقاله حاضر نقش و سهم برابر دارند.

تضاد منافع

نویسنده (نویسندگان) اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافعی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

منابع

Axinte, L.F., Mehmood, A., Marsden, T. and Roep, D., 2019. Regenerative city-regions: A new conceptual framework. Regional Studies. Regional Science, 6(1), 117-129.
https://doi.org/10.1080/21681376.2019.1584542.

Barles, S., 2009. Urban metabolism of Paris and its region. Journal of industrial ecology: 13(6), 898-913.
https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1530-9290.2009.00169.x

Camrass, K., 2022. Urban regenerative thinking and practice: a systematic literature review. Building Research & Information: 50(3), 339-350.
https://doi.org/10.1080/09613218.2021.1922266

Cepeliauskaite, G. and Stasiskiene, Z., 2020. The framework of the principles of sustainable urban ecosystems development and functioning. Sustainability: 12(2), 720.
https://doi.org/10.3390/su12020720

Chen, S. and Chen, B., 2012. Network environ perspective for urban metabolism and carbon emissions: a case study of Vienna, Austria. Environmental Science & Technology: 46(8), 4498-4506. https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es204662k

Chen, S. and Chen, B., 2015. Sustainable urban metabolism. Encyclopedia of Environmental Management: 48(11), 1-8.
https://www.routledgehandbooks.com/author/Shaoqing_Chen

Chester, M., Pincetl, S. and Allenby, B., 2012. Avoiding unintended tradeoffs by integrating life-cycle impact assessment with urban metabolism. Current Opinion in Environmental Sustainability: 4(4), 451-457. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1877343512001005

Conte, E. and Monno, V., 2011. Evaluating environmental performances of sustainable technologies: from the building to the city scale. In Hels World Sustain Build Conf: (2), 814-822. https://www.mdpi.com/2071-1050/15/8/7006

Coutard, O. and Florentin, D., 2022. Resource ecologies, urban metabolisms, and the provision of essential services. Journal of Urban Technology: 29(1), 49-58.

https://doi.org/10.1080/10630732.2021.2001718

Cui, X., 2018. How can cities support sustainability: A bibliometric analysis of urban metabolism. Ecological indicators: 93, 704-717.

https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.05.056

Cui, X., Wang, X. and Feng, Y., 2019. Examining urban metabolism: A material flow perspective on cities and their sustainability. Journal of Cleaner Production: 214, 767-781.

https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.021

Dijst, M., Worrell, E., Bocker, L., Brunner, P., Davoudi, S., Geertman, S. and Zeyringer, M., 2018. Exploring urban metabolism—Towards an interdisciplinary

perspective. Resources. Conservation and Recycling, 132, 190-203.

https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.014

Du Plessis, C., 2012. Towards a regenerative paradigm for the built environment. Building Research & Information: 40(1), 7-22. https://doi.org/10.1080/09613218.2012.628548

Du Plessis, C. and Brandon, P., 2015. An ecological worldview as basis for a regenerative sustainability paradigm for the built environment. Journal of Cleaner Production: 109, 53-61. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.098

Fernandez, G. and Maione, C., 2020. Urban Metabolism and Minority Pulse: An Education and Awareness Campaign Targeting Minority Groups. Sustainable Development Goals and Institutions of Higher Education, 61-69.

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-26157-3_5

Ferrao, P. and Fernandez, J.E., 2013. Sustainable urban metabolism. MIT press.

https://mitpress.mit.edu/9780262019361/sustainable-urban-metabolism

Girardet, H., 2010. Regenerative Cities, World Future Council. Recuperado de http://www. worldfuturecouncil. org/wpcontent/uploads/2016/01/WFC_2010_Regenerative_Cities. pdf.

https://www.worldfuturecouncil.org/regenerative-cities.

Girardet, H., 2012. A Future for Gulf Cities. In World Future Council. A report for an international expert meeting co-hosted by the Al Habtoor Group. Dubai, September.

https://www.worldfuturecouncil.org/wpcontent/uploads/2016/12/WFC_A_future_for_gulf_cities_en.pdf

Girardet, H., 2017. Regenerative cities. Springer International Publishing, 183-204.

https://link-springer-com.access.semantak.com/chapter/10.1007/978-3-319-38919-6_9

Girardet, H., 2017. Regenerative cities-making cities work for people and planet: background paper. doi:10.25916/5ce8b8d72

Girardet, H., 2020. People and nature in an urban world. One Earth: 2(2), 135-137.

https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.02.005

Golubiewski, N., 2012. Is there a metabolism of an urban ecosystem? An ecological critique. Ambio: 41(7), 751-764. doi: 10.1007/s13280-011-0232-7

Heinonen, J. and Ottelin, J., 2021. Carbon Accounting for Regenerative Cities. Rethinking Sustainability Towards a Regenerative Economy, 115.

https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-49730-3

Holden, E. and Norland, I.T., 2005. Three challenges for the compact city as a sustainable urban form: household consumption of energy and transport in eight residential areas in the greater Oslo region. Urban studies: 42(12), 2145-2166.

https://doi.org/10.1080/00420980500332064

Huang, S.L. and Hsu, W.L., 2003. Materials flow analysis and emergy evaluation of Taipei's urban construction. Landscape and urban planning: 63(2), 61-74. https://doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00152-4

Huang, S.L., Lee, C.L. and Chen, C.W., 2006. Socioeconomic metabolism in Taiwan: Emergy synthesis versus material flow analysis. Resources. Conservation and Recycling: 48(2), 166-196. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.01.005

Kennedy, C., Cuddihy, J. and Engel-Yan, J., 2007. The changing metabolism of cities. Journal of industrial ecology: 11(2), 43-59. https://doi.org/10.1162/jie.2007.1107

Kennedy, C., Pincetl, S. and Bunje, P., 2011. The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design. Environmental pollution: 159(8-9), 1965-1973. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.10.022

Kennedy, C., 2012. A mathematical description of urban metabolism. Sustainability science: The emerging paradigm and the urban environment, 275-291.
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4614-3188-6_13

Klöpffer, W., 1997. Life cycle assessment: From the beginning to the current state. Environmental Science and Pollution Research: 4, 223-228.
doi: 10.1007/BF02986351

Lyle, J., 1999. Design for human ecosystems: landscape, land use, and natural resources. Island Press. https://islandpress.org/books/design-human-ecosystems

Lyle, J.T., 1996. Regenerative design for sustainable development. John Wiley & Sons.
https://www.amazon.com/Regenerative-Design-Sustainable-Development-Tillman/dp/0471178438

Mang, P. and Reed, B., 2012. Designing from place: A regenerative framework and methodology. Building Research & Information: 40(1), 23-38. https://doi.org/10.1080/09613218.2012.621341

Mang, P. and Reed, B., 2020. Regenerative development and design. Sustainable built environments: 115-141. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-0716-0684-1_303

Moore, J., Kissinger, M. and Rees, W.E., 2013. An urban metabolism and ecological footprint assessment of Metro Vancouver. Journal of environmental management: 124, 51-61.https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.03.009

Mostafavi, N., Farzinmoghadam, M. and Hoque, S., 2014. A framework for integrated urban metabolism analysis tool (IUMAT). Building and Environment: 82, 702-712. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.10.020

Newman, P., 2010. Green urbanism and its application to Singapore. Environment and urbanization Asia: 1(2), 149-170. https://doi.org/10.1177/097542531000100204

Newman, P., 2014. Biophilic urbanism: a case study on Singapore. Australian planner: 51(1), 47-65. https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07293682.2013.790832

Newman, P.W., 1999. Sustainability and cities: extending the metabolism model. Landscape and urban planning: 44(4), 219-226. https://doi.org/10.1016/S0169-2046(99)00009-2

Newman, P., Beatley, T. and Boyer, H., 2009. Resilient cities: responding to peak oil and climate change. Island Press. https://doi.org/10.1080/07293682.2009.9995295

Niza, S., Rosado, L. and Ferrao, P., 2009. Urban metabolism: Methodological advances in urban material flow accounting based on the Lisbon case study. Journal of Industrial Ecology: 13(3), 384-405. https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2009.00130.x

Niza, S., Santos, E., Costa, I., Ribeiro, P. and Ferrao, P., 2014. Extended producer responsibility policy in Portugal: a strategy towards improving waste management performance. Journal of cleaner production: 64, 277-287. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.037

Oliveira, V. and Vaz, R., 2021. Is the concept of urban metabolism useful for planning practice?. European Planning Studies: 29(3), 411-424. https://doi.org/10.1080/09654313.2020.1740173

Pincetl, S., Bunje, P. and Holmes, T., 2012. An expanded urban metabolism method: Toward a systems approach for assessing urban energy processes and causes. Landscape and urban planning: 107(3), 193-202. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.06.006

Register, R., 2006. Ecocities: rebuilding cities in balance with nature (revised edition). New Society Publishers. https://www.amazon.com/EcoCities-Rebuilding-Cities-Balance-Nature/dp/0865715521

Ress, W.E. and Wackernagel, M., 1996. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: Measuring the natural capital requirements of the human economy. Focus: 6(1), 45-60.
https://www.amazon.com/EcoCities-Rebuilding-Cities-Balance-Nature/dp/0865715521

Restrepo, J.D.C. and Morales-Pinzon, T., 2018. Urban metabolism and sustainability: Precedents, genesis and research perspectives. Resources, Conservation and Recycling: 131, 216-224. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.023

Revi, A., 2016. Afterwards: Habitat III and the sustainable development goals. Urbanisation: 1(2), x-xiv. https://doi.org/10.1177/2455747116682899

Roy, A., 2009. Why India cannot plan its cities: Informality, insurgence and the idiom of urbanization. Planning theory: 8(1), 76-87. https://doi.org/10.1177/1473095208099299

Ulgiati, S. and Zucaro, A., 2019. Challenges in urban metabolism: sustainability and well-being in cities. Frontiers in Sustainable Cities: 1, 1. https://doi.org/10.3389/frsc.2019.00001

Waldrop, M.M., 1993. Complexity: The emerging science at the edge of order and chaos. Simon and Schuster.https://www.amazon.com/Complexity-Emerging-Science-Order-Chaos-ebook/dp/B07WVV5J2R

Wang, Q., Wang, X. and Li, R., 2022. Does population aging reduce environmental pressures from urbanization in 156 countries?. Science of the Total Environment: 848, 157330.
https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157330

Wolman, A., 1965. The metabolism of cities. Scientific American: 213(3), 178-193.
Doi:10.1038/scientificamerican0965-178.

Zhang, X. and Li, H., 2018. Urban resilience and urban sustainability: What we know and what do not know?. Cities: 72, 141-148. https://doi.org/10.1016/j.cities.2017.08.009

Zhang, Y., 2013. Urban metabolism: A review of research methodologies. Environmental pollution: 178, 463-473. doi.org/10.1016/j.envpol.2013.03.052

Zhang, Y., Yang, Z. and Yu, X., 2015. Urban metabolism: a review of current knowledge and directions for future study. Environmental science & technology: 49(19), 11247-11263. https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03060