



REVIEW PAPER

Algorithmic Agency in Smart Urban Green Infrastructure Design: An Analysis Based on Actor-Network Theory

Masoumeh Abdi ^{(1)*} 

1. PhD Candidate in Urban Planning, Faculty of Architecture and Urban Planning, Iran University of Art, Tehran, Iran.
(<https://orcid.org/0009-0003-9449-9710>)

Publisher: Iran University of Art

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 29/09/2025 Revised: 03/11/2025 Accepted: 19/11/2025 PP. 29-51	Introduction: Over the past two decades, urban green infrastructure (UGI) has evolved from isolated landscape elements into a complex socio-ecological system. Within this paradigm, parks, street trees, green roofs, corridors, and blue spaces form an interconnected network, positioning multifunctionality at its core — where a single spatial unit supports multiple ecological, social, and economic functions (Hansen & Pauleit, 2014). Consequently, UG performance cannot be deduced solely from physical attributes. As Andersson et al. (2019) demonstrate, ecosystem service benefits emerge through "co-production," contingent upon three systemic filters: the interplay among green, blue, and built infrastructures; institutional and governance capacities; and individual and shared perceptions and values. UGI is thus fundamentally a network of relations rather than a mere spatial structure. Against this relational backdrop, the "smart" transformation gains significance. Remote sensing, sensor networks, spatial analytics, and artificial intelligence enable integrating environmental data, identifying latent patterns, and generating design alternatives (Lyu et al., 2022; Lee et al., 2024; Wang & Zhang, 2025). Crucially, this transcends mere efficiency. Algorithms do not merely process data; by selecting inputs, defining evaluation criteria, classifying phenomena, and prioritizing options, they actively shape the definition of the design problem itself. Despite this shift, the literature largely overlooks this critical juncture. Studies of AI applications in urban design often examine algorithms instrumentally, prioritizing predictive accuracy and computational speed. Conversely, algorithmic governance studies emphasize that these systems are non-neutral: Busuioc (2021) argues that accountability concerns the values embedded within model design, while Frost (2024) contends that integrating machine learning into public decision-making alters relationships among expert knowledge, public participation, and accountability mechanisms. These streams remain disconnected, leaving three distinct gaps: an ontological gap regarding when algorithms become decision mediators, a theoretical–applied gap in applying Actor–Network Theory (ANT) to UGI, and a normative gap linking transparency discourses to concrete design mechanisms such as green space siting and species selection. The Purpose of the Research: To address these gaps, this study conceptualizes algorithmic agency in smart UGI design using ANT (Latour, Callon, Law). The focal analytical lens is translation — comprising problematization, interessement, enrolment, and mobilization — used to trace actor-network formation (Callon, 1986). ANT is chosen comparatively: while structuration theory (Giddens, 1984) and the social construction of technology (Pinch & Bijker, 1984) ultimately reduce action to human agency or social consensus, and agential realism (Barad, 2007) or assemblage theory (DeLanda, 2006) acknowledge non-human agency without offering operational stepwise categories, ANT integrates both strengths. Additionally, Latour's (2005) continuum between "intermediaries" (transporting meaning without transformation) and "mediators" (transforming and translating what they convey) frames the algorithm's position. Methodology: Methodologically, this qualitative study adopts a theoretical–conceptual strategy, drawing on primary ANT texts and peer-reviewed articles (2010–2026) from Scopus, Web of Science, and PubMed Central across UGI, AI and smart cities, and algorithmic
Keywords: <i>Algorithmic agency;</i> <i>Actor–Network Theory;</i> <i>Smart urban green infrastructure;</i> <i>Translation; Graded agency.</i>	
 Use your device to scan and read the article online	



Use your device to scan and
read the article online

ARTICLE INFO	ABSTRACT
	governance. Purposive sampling continued until conceptual saturation. Analysis followed four steps: (1) formulating guiding questions; (2) deriving analytical categories deductively from ANT; (3) re-reading five AI applications in UGI through the four translation moments a generative deep neural network framework for green space design optimization (Wang & Zhang, 2025), morphological spatial pattern analysis (MSPA) combined with random forest (Peng et al., 2026), the cumulative urban heat island (UHI)-hours metric (Oh et al., 2020), urban digital twins (Dawkins & Kitchin, 2025), and the SylvCiT tree-species recommender (Nicol et al., 2026); and (4) synthesizing findings into a conceptual framework. Cases were purposively selected for concrete UGI application, sufficient technical documentation to trace the translation chain, and deliberate variation in prescriptive degree. Findings and Discussion: Findings indicate that algorithmic agency manifests during problematization, prior to solution generation. UGI multifunctionality translates into a calculable multi-criteria structure; ecological morphology decomposes into machine-readable categories (core, edge, branch, islet); and metrics such as UHI-hours shift evaluation from instantaneous heat intensity to temporal exposure, redefining the problem itself. This supports Stinson's (2022) assertion that algorithmic bias stems from variable selection and model structure, not data alone. In the intersement phase, translation stabilizes relations: expert-environment interaction becomes data-mediated; decision credibility emerges from the combination of professional expertise, data quality, and model construction; and integrated monitoring systems, databases, and evaluation standards establish durable infrastructural dependencies. During enrolment, these dependencies solidify into stable roles across four actors: designers shift from sole option-generators to evaluators and moderators; algorithms move from analytical tools to co-generators of alternatives; ecological elements become translatable functional traits, marginalizing dimensions such as cultural meaning and lived experience that resist quantification; and regulatory institutions shift from ex-post arbiters to embedded design constraints. In mobilization, metrics such as NDVI, land surface temperature, and morphological indices transcend analysis to become a common language for coordination in environmental governance, though this stabilization remains contingent upon institutional acceptance. The study's central finding is that differences among systems depend on the position the algorithm secures within the decision network. This is governed by three moderators: model prescriptiveness (explanatory versus generative), integration with formal decision-making infrastructures, and the scope for reversibility and human intervention. Consequently, generative optimization frameworks exhibit strong algorithmic mediation by generating and ranking options within embedded regulatory constraints; MSPA-based morphological analysis provides an observational language without generating options; and recommender systems such as SylvCiT possess bounded, negotiable agency owing to their advisory role and capacity for human review. Conclusion: Synthesizing these findings yields a conceptual framework of algorithmic agency comprising three dimensions: procedural (the recursive translation cycle), network (interaction among technological, socio-institutional, and ecological domains), and intensity (the three moderators functioning as a diagnostic scale). Theoretically, the framework converts the intermediary/mediator dichotomy into a graded, assessable variable, distinguishing the mere presence of an algorithm from actual algorithmic agency and thereby resisting technological determinism. Practically, agency is constituted prior to model execution: initial choices determine which environmental attributes become calculable data at all. Algorithmic accountability must therefore extend beyond model outputs to the translational logic that defines the boundary of the calculable a logic with direct spatial consequences for green space siting, species selection, and intervention prioritization. Funding: There is no funding support. Conflict of Interest: Author declared no conflict of interest. AI Usage Declaration: The author declared that no AI tools were used in the preparation of this manuscript. All scientific content, analyses, results, and ultimate responsibility for the manuscript rest with the author. Acknowledgments: I am grateful to all the persons for scientific consulting in this paper.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Highlight

- Conceptualizing algorithmic agency in smart urban green infrastructure design through Actor–Network Theory and the concept of translation.
- Converting Latour's intermediary/mediator dichotomy into a continuous variable based on three moderators: model prescriptiveness, institutional integration, and human intervention.
- Constitution of algorithmic agency from the problem-definition stage onward, not merely in model outputs.



This paper is an open access and licensed under the [Creative Commons CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) license

©2024, AGM. All rights reserved.

Cite This Article: Abdi, M. (2025). Algorithmic Agency in Smart Urban Green Infrastructure Design: An Analysis Based on Actor-Network Theory. *Art of Green Management*, 3(3), 29-51. [10.30480/agm.2026.6540.1076](https://doi.org/10.30480/agm.2026.6540.1076)



<http://doi.org/10.30480/agm.2026.6540.1076>



http://agm.journal.art.ac.ir/article_1549.html

*. Corresponding Author (Email: m.abdi@student.art.ac.ir) / (Phone: +982166722740)



عاملیت الگوریتمیک در طراحی زیرساخت سبز هوشمند شهری؛ تحلیلی مبتنی بر نظریه کنشگر-شبکه

معصومه عبدی^(۱)۱- پژوهشگر دکتری شهرسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر ایران، تهران، ایران. (<https://orcid.org/0009-0003-9449-9710>)

ناشر: دانشگاه هنر ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
مقدمه: گسترش الگوریتم‌های هوش مصنوعی در طراحی زیرساخت سبز هوشمند شهری، از پایش پوشش گیاهی تا جانمایی خودکار فضاهای سبز، روابط میان طراح، فناوری و محیط را دگرگون کرده است. با این حال، بخش قابل توجهی از پژوهش‌های موجود، الگوریتم را صرفاً ابزاری محاسباتی دانسته و کمتر به بازآرایی روابط میان طراح، داده، نهاد و محیط پرداخته است. هدف پژوهش: این پژوهش با هدف مفهوم‌پردازی عاملیت الگوریتمیک و تبیین چگونگی شکل‌گیری آن در بازآرایی روابط میان کنشگران انسانی، فناوریانه و اکولوژیک انجام می‌شود. روش‌شناسی: پژوهش از نظر ماهیت داده، کیفی و از حیث راهبرد، نظری-مفهومی است که نظریه کنشگر-شبکه، به‌ویژه مفهوم ترجمه را به‌عنوان لنز تحلیلی خود قرار می‌دهد. یافته‌ها و بحث: یافته‌ها نشان می‌دهد الگوریتم‌ها در فرایند ترجمه، ابتدا مسئله طراحی زیرساخت سبز را به چارچوبی چند معیاره و محاسبه‌پذیر تبدیل می‌کنند؛ سپس با باز تنظیم مسیرهای دسترسی به داده، پیوندهای شبکه را تثبیت می‌کنند؛ آنگاه جایگاه طراح، الگوریتم، عناصر اکولوژیک و نهاد تنظیم‌گر را بازتعریف کرده و در نهایت، سنجه‌های محاسباتی را به زبان مشترک ارزیابی تبدیل می‌کنند. با این حال، شدت این عاملیت به سه تعدیل‌گر بستگی دارد: تجویزگری مدل، پیوند با زیرساخت رسمی تصمیم‌گیری و امکان مداخله انسانی. بر این پایه، چارچوبی مفهومی با سه بعد فرآیندی، شبکه‌ای و شدت پیشنهاد می‌شود که تمایز واسطه/میانجی را از دوگانه‌ای مفهومی به متغیری پیوسته و قابل‌سنجش تبدیل می‌کند. نتیجه‌گیری: بر پایه یافته‌ها، پاسخ‌گویی الگوریتمی در طراحی زیرساخت سبز باید متوجه مرحله تعریف مسئله و انتخاب معیار باشد، نه صرفاً خروجی مدل. در این خوانش، عاملیت الگوریتمیک نه ویژگی درون ذات‌کد، بلکه اثری رابطه‌ای، موقعیت‌مند و مدرج است.	دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۷ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۸ صص. ۲۹-۵۱ واژگان کلیدی: عاملیت الگوریتمیک، نظریه کنشگر-شبکه، زیرساخت سبز هوشمند شهری، ترجمه، عاملیت مدرج 
نکات برجسته: - مفهوم‌پردازی عاملیت الگوریتمیک در طراحی زیرساخت سبز هوشمند بر پایه نظریه کنشگر-شبکه و مفهوم ترجمه. - تبدیل دوگانه واسطه/میانجی لاتور به متغیری پیوسته بر اساس سه تعدیل‌گر: تجویزگری مدل، پیوند نهادی، مداخله انسانی. - تأکید بر شکل‌گیری عاملیت الگوریتمی از مرحله تعریف مسئله، نه صرفاً در خروجی مدل.	

ارجاع به این مقاله: عبدی، معصومه. (۱۴۰۴). عاملیت الگوریتمیک در طراحی زیرساخت سبز هوشمند شهری؛ تحلیلی مبتنی بر نظریه

کنشگر-شبکه. هنر مدیریت سبز، ۳(۳)، ۵۱-۲۹. [10.30480/agm.2026.6540.1076](https://doi.org/10.30480/agm.2026.6540.1076)



[http://doi.org/ 10.30480/agm.2026.6540.1076](http://doi.org/10.30480/agm.2026.6540.1076)



http://agm.journal.art.ac.ir/article_1549.html



این مقاله به صورت دسترسی باز و با مجوز
استفاده است. [Creative Commons CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) قابل

©2024, UST. All rights reserved.

*. نویسنده مسئول (رایانامه: m.abdi@student.art.ac.ir) / (تلفن: +۹۸۲۱۶۶۷۲۲۷۴۰)

طی دو دهه گذشته، مفهوم زیرساخت سبز شهری از تلقی آن به عنوان مجموعه‌ای از عناصر منظرین، به درکی نظام‌مند از یک سامانه پیچیده اجتماعی-اکولوژیک تحول یافته است. در این رویکرد، پارک‌ها، درختان خیابانی، بام‌های سبز، پهنه‌های آبی و... اجزای یک شبکه پیوسته‌اند که از تعامل فرایندهای اکولوژیک، ساختار فضایی و نیازهای اجتماعی، خدماتی مانند تعدیل جزایر گرمایی، مدیریت رواناب، ذخیره کربن و ارتقای سلامت و رفاه شهروندان را فراهم می‌کند (Li & Hansen & Pauleit, 2014; Carter, 2025). این دیدگاه، ارائه خدمات اکوسیستمی را نیز حاصل عملکرد مستقیم عناصر سبز نمی‌داند، بلکه آن را فرایندی وابسته به تعامل میان اجزای طبیعی، ساختارهای فضایی و ترتیبات اجتماعی و نهادی تلقی می‌کند. اندر سون و همکاران این فرایند را در قالب «هم‌تولیدی» توضیح می‌دهند که طی آن، منافع اکوسیستمی از برهم‌کنش زیرساخت‌های سبز، آبی و ساخته‌شده با ظرفیت‌های نهادی، سازوکارهای حکمرانی و ادراک‌ها و ارزش‌های فردی و جمعی شکل می‌گیرند (Andersson et al., 2019). خدمات اکوسیستمی در نتیجه این تعاملات و در میان مجموعه‌ای از شرایط محیطی، اجتماعی و نهادی تحقق می‌یابند و زیرساخت سبز را به شبکه‌ای از روابط میان کنشگران و عناصر مختلف تبدیل می‌کنند؛ بستری که با ورود فناوری‌های داده‌محور، ابعاد جدیدی از میانجی‌گری و تنظیم روابط را به خود می‌گیرد.

در چنین شبکه‌ای از روابط، گسترش فناوری‌های سنجش‌ازدور، شبکه‌های حسگر شهری، تحلیل داده‌های مکانی و هوش مصنوعی، شیوه‌های شناخت، ارزیابی و طراحی زیرساخت سبز را نیز دگرگون کرده است. این فناوری‌ها با فراهم کردن امکان تلفیق داده‌های متنوع محیطی و فضایی، شناسایی الگوهای پیچیده و تولید گزینه‌های طراحی، لایه‌ای محاسباتی به روابط پیشین میان محیط، دانش تخصصی و تصمیم‌گیری افزوده‌اند (Lyu et al., 2022; Lee et al., 2024) که افزوده شدن این لایه محاسباتی، صرفاً ظرفیت پردازش اطلاعات را افزایش نمی‌دهد، بلکه نحوه صورت‌بندی مسئله طراحی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. انتخاب داده‌های ورودی، تعریف معیارهای ارزیابی، طبقه‌بندی پدیده‌ها، اولویت‌بندی گزینه‌ها و تولید سناریوهای مداخله، در تعیین آنچه به عنوان مسئله، معیار یا راه‌حل قابل قبول شناخته می‌شود نقش دارند. از این رو، الگوریتم در این فرایند تنها تولیدکننده پاسخ نیست، بلکه در سازمان‌دهی مسیر شناخت و تصمیم نیز مشارکت می‌کند (Wang & Zhang, 2025). از این منظر، ارزیابی سامانه‌های الگوریتمی را نمی‌توان به عملکرد فنی آن‌ها محدود کرد؛ چراکه ارزش‌ها و انتخاب‌های نهفته در تعیین معیارهای ارزیابی، اولویت‌های عملکردی و نحوه طبقه‌بندی داده‌ها، بخشی از فرایند تصمیم‌گیری را شکل می‌دهند (Busuioc, 2021). ورود مدل‌های یادگیری ماشین به تصمیم‌گیری عمومی نیز می‌تواند روابط میان دانش تخصصی، مشارکت عمومی و سازوکارهای پاسخ‌گویی را بازتنظیم کند (Frost, 2024)؛ بنابراین، تحلیل الگوریتم مستلزم توجه هم‌زمان به عملکرد محاسباتی آن و جایگاهی است که در سازمان‌دهی روابط میان کنشگران و توزیع نقش‌ها در شبکه تصمیم‌گیری پیدا می‌کند.

با وجود اهمیت این مباحث، همچنان تبیین نظری روشی از چگونگی شکل‌گیری نقش الگوریتم‌ها در شبکه طراحی زیرساخت سبز هوشمند، آن گونه که باید وجود ندارد و تا زمانی که سازوکار تبدیل الگوریتم از ابزاری برای تحلیل به عنصری مؤثر در تعریف مسئله و تعیین معیارهای طراحی صورت‌بندی نشود، ارزیابی نقش آن در تصمیم‌های طراحی و نیز تمایز میان سامانه‌هایی که صرفاً اطلاعات تولید می‌کنند و سامانه‌هایی که فضای گزینه‌های طراحی را شکل می‌دهند، امکان‌پذیر نخواهد بود. از همین خلاء، دو پرسش پژوهش شکل می‌گیرد: الگوریتم‌های هوش مصنوعی در طراحی زیرساخت سبز هوشمند شهری، از خلال چه فرایندی با طراحان، داده‌های محیطی، نهادهای تصمیم‌گیر و عناصر اکولوژیک درگیر می‌شوند و روابط میان این کنشگران را بازآرایی می‌کنند؟ و در ادامه شدت این نقش تحت چه شرایطی تغییر می‌کند؟

بر این اساس مقاله حاضر با هدف مفهوم‌پردازی عاملیت الگوریتمیک در طراحی زیرساخت سبز هوشمند شهری، این مسئله را با تکیه بر نظریه کنشگر-شبکه و مفهوم ترجمه دنبال کرده و چارچوبی مفهومی برای تحلیل جایگاه الگوریتم‌های هوش مصنوعی در بازآرایی روابط میان کنشگران انسانی، فناورانه و اکولوژیک ارائه می‌دهد. در این چارچوب، الگوریتم نه ابزاری منفعل برای پردازش داده و نه عاملی مستقل از شبکه، بلکه میانجی ترجمه‌ای است که از طریق انتخاب، تفسیر و سازمان‌دهی داده‌ها، در صورت‌بندی مسئله، جهت‌دهی به تصمیم‌های طراحی و تثبیت شبکه کنشگران مداخله می‌کند.

۱-۱- پیشینه پژوهش

ادبیات طراحی زیرساخت سبز هوشمند شهری در سال‌های اخیر در امتداد سه مسیر مرتبط توسعه یافته است: مسیر نخست بر توسعه قابلیت‌های فنی هوش مصنوعی تمرکز دارد؛ مسیر دوم جایگاه فناوری را در تصمیم‌گیری و تولید فضا‌بازاندیشی می‌کند؛



و مسیر سوم پیامدهای حکمرانی ناشی از گسترش تصمیم‌گیری الگوریتمی، به‌ویژه در شفافیت، پاسخ‌گویی و عدالت را بررسی می‌کند.

در جریان نخست، پژوهش‌ها عمدتاً بر ارتقای قابلیت‌های محاسباتی الگوریتم‌ها برای شناخت، تحلیل و بهینه‌سازی سامانه‌های سبز شهری متمرکز بوده‌اند. در این مطالعات، الگوریتم‌ها عمدتاً به‌عنوان ابزارهایی برای استخراج الگوهای فضایی، پیش‌بینی عملکرد محیطی و بهینه‌سازی گزینه‌های طراحی به کار گرفته شده‌اند. لی و همکاران^(۲۰۲۴) نشان داده‌اند که توسعه روش‌های یادگیری عمیق و بخش‌بندی معنایی امکان سنجش دقیق‌تر پوشش سبز، ساختار منظر و ویژگی‌های فضایی را فراهم کرده است، اگرچه محدودیت‌هایی مانند کاهش تبیین‌پذیری مدل‌ها همچنان به‌عنوان یک چالش مطرح است. در حوزه اقلیم شهری نیز مدل‌های یادگیری ماشین برای تحلیل روابط پیچیده میان پوشش گیاهی، ساختار کالبدی و شرایط حرارتی توسعه یافته‌اند. برای نمونه، او و همکاران^(۲۰۲۰) با معرفی شاخص ساعات حرارتی نشان دادند که ارزیابی تجمعی ساعات مواجهه با جزیره گرمایی می‌تواند نسبت به سنج‌های متعارف، تصویر دقیق‌تری از عملکرد اقلیمی ارائه دهد. همچنین پنگ و همکاران^(۲۰۲۶) نشان دادند که ویژگی‌های ریخت‌شناختی منظر مانند هسته، شاخه، جزیره و لبه می‌توانند در تبیین الگوهای حرارتی شهری نقش مهمی ایفا کنند.

با این حال، توسعه این رویکردها به تدریج نقش الگوریتم را از تحلیل وضعیت موجود به مشارکت در تولید آینده‌های فضایی تغییر داده است. ظهور مدل‌های مولد و سامانه‌های توصیه‌گر نشان می‌دهد که الگوریتم‌ها دیگر صرفاً به پرسش «وضعیت موجود چگونه است؟» پاسخ نمی‌دهند، بلکه در تعیین «چه گزینه‌هایی امکان تصور و انتخاب دارند؟» نیز مشارکت می‌کنند. در این زمینه تانگ و چانگ^(۲۰۲۴) مدلی را برای تولید و ارزیابی خودکار طرح‌های منظر شهری ارائه کردند؛ وانگ و ژانگ^(۲۰۲۵) نیز چارچوبی مبتنی بر شبکه عصبی عمیق برای تولید چیدمان‌های فضایی سبز منطبق با محدودیت‌های طراحی توسعه دادند. با وجود اهمیت این مطالعات، تمرکز غالب آن‌ها همچنان بر معیارهای عملکردی مانند دقت، کارایی و بهینگی بوده و اینکه الگوریتم چگونه در تعریف مسئله طراحی، تعیین معیارهای ارزیابی و شکل‌دهی به روابط میان کنشگران مداخله می‌کند کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

پاسخ به این پرسش نیازمند عبور از نگاه صرفاً ابزارمحور و ورود به جریان دوم پژوهش، یعنی مطالعات علم و فناوری است. نظریه کنشگر-شبکه با نقد دوگانه انسان/فناوری، فناوری را نه ابزاری منفعل، بلکه بخشی از شبکه‌ای از روابط انسانی و غیرانسانی می‌داند که در شکل‌گیری کنش اجتماعی و فضایی مشارکت دارد. در این زمینه کرسول و همکاران^(۲۰۱۰) نشان می‌دهند که نظریه کنشگر شبکه امکان تحلیل چگونگی نقش‌آفرینی فناوری در فرآیندهای اجتماعی و شناسایی روابط میان کنشگران مختلف را فراهم می‌کند. گاندرسون و همکاران^(۲۰۲۴) نیز با طرح مفهوم «موقعیت بینایی ماشین» نشان می‌دهند که فناوری‌های بینایی ماشین صرفاً ابزار مشاهده نیستند، بلکه در موقعیت‌های خاص به‌عنوان بخشی از شبکه کنش مشارکت می‌کنند و عاملیت در آن‌ها میان کنشگران انسانی و غیرانسانی توزیع می‌شود. بر این اساس، الگوریتم را می‌توان نه فقط واسطه انتقال داده، بلکه میانجی‌ای دانست که داده‌های محیطی را به بازنمایی، معیار و تصمیم طراحی ترجمه می‌کند.

با وجود ظرفیت نظری این تئوری برای تحلیل این فرآیند، استفاده تجربی از آن در پژوهش‌های فناوری هنوز با چالش‌هایی همراه است. مرور رایان و همکاران^(۲۰۲۴) بر مطالعات مبتنی بر نظریه کنشگر-شبکه نشان می‌دهد که کاربرد این چارچوب اغلب پراکنده بوده و مفاهیم بنیادینی مانند ترجمه و شکل‌گیری شبکه کمتر به‌صورت منسجم عملیاتی شده‌اند. از این رو، مفهوم ترجمه در نظریه کالن می‌تواند امکان تحلیل دقیق‌تری فراهم کند؛ زیرا به‌جای پرسش از اینکه فناوری چه اثری بر جامعه دارد، بررسی می‌کند که چگونه روابط، نقش‌ها و منافع در جریان ورود یک فناوری بازآرایی می‌شوند.

در امتداد این جریان، ادبیات مرتبط با دوقلوی دیجیتال شهری نیز برای فهم جایگاه الگوریتم در طراحی هوشمند اهمیت ویژه‌ای یافته است. داوکنیز و کیچین^(۲۰۲۵) استدلال می‌کنند که دوقلوی دیجیتال را نباید صرفاً مجموعه‌ای از فناوری‌ها، بلکه باید سازوکاری برای تولید، پردازش و بازخورد اطلاعات دانست. از این منظر، بازنمایی دیجیتال شهر خنثی نیست، چراکه برخی ویژگی‌ها را برجسته و برخی دیگر را به حاشیه می‌راند. با این حال، این دیدگاه الزاماً به جبرگرایی فناورانه منجر نمی‌شود؛ بلکه نشان می‌دهد که جهت‌گیری پیامدهای فناوری به معماری نهادی و شیوه سازمان‌دهی داده و مشارکت وابسته است.

پذیرش چنین برداشتی از نقش الگوریتم، به جریان سوم یعنی ادبیات حکمرانی الگوریتمی، پاسخ‌گویی و شفافیت پیوند می‌خورد. بوسویوک^(۲۰۲۱) معتقد است که ورود هوش مصنوعی به تصمیم‌گیری عمومی، الگوهای سنتی مسئولیت‌پذیری را با چالش

مواجه می‌کند، زیرا عملکرد فنی الگوریتم الزاماً امکان توضیح و ارزیابی عمومی آن را تضمین نمی‌کند. در همین راستا، دلات^{۱۱} (۲۰۱۸) مفهوم شفافیت طراحی محور را مطرح می‌کنند که بر آشکارسازی اهداف، داده‌ها، معیارها و مفروضات نهفته در طراحی الگوریتم تأکید دارد؛ استینسون^{۱۲} (۲۰۲۲) نیز نشان می‌دهد که سوگیری الگوریتمی صرفاً از داده‌های ورودی ناشی نمی‌شود و انتخاب متغیرها و ساختار مدل نیز در شکل‌گیری پیامدهای نابرابر نقش دارند.

علاوه بر موارد بیان شده، در پژوهش‌های داخلی نیز توجه به رویکردهای رابطه‌ای زمینه مناسبی برای این بحث فراهم کرده است. حاتمی‌نژاد و همکاران (۱۴۰۲) و کانونی و همکاران (۱۴۰۲) با طرح مفهوم «فضا به‌مثابه شبکه» بر نقش کنشگران انسانی و مادی در تولید فضا تأکید کرده‌اند؛ فارابی‌اصل و همکاران (۱۴۰۲) نیز نشان داده‌اند که شبکه‌های قدرت نهادی چگونه مسیرهای تصمیم‌گیری فضایی را شکل می‌دهند. این مطالعات، امکان تحلیل فناوری‌های هوشمند را در قالب شبکه‌هایی از قدرت، دانش و ماده فراهم می‌کنند؛ باین‌حال توجه به این امر در بستر زیرساخت‌های سبز چندان مورد توجه نبوده است. در مجموع، مرور ادبیات سه شکاف اصلی را آشکار می‌سازد: شکاف هستی‌شناختی درباره شرایط تبدیل الگوریتم به میانجی تصمیم؛ شکاف نظری-کاربردی در به‌کارگیری کامل نظریه کنشگر-شبکه در حوزه زیرساخت سبز هوشمند؛ و شکاف هنجاری در پیوند شفافیت و پاسخ‌گویی به سازوکارهای مشخص طراحی مانند جانمایی فضای سبز و انتخاب گونه؛ که توجه به آن‌ها وجه تمایز پژوهش حاضر است (جدول ۱).

جدول ۱- جمع‌بندی سه جریان ادبیات طراحی زیرساخت سبز هوشمند شهری

جریان پژوهش	مطالعات شاخص	نکات قابل توجه	خلا پژوهشی
توسعه قابلیت‌های فنی هوش مصنوعی در شناخت، پایش و تولید گزینه‌های طراحی	Lee et al., 2024; Oh et al., 2020; Peng et al., 2026; Tang & Chung, 2024; Wang & Zhang, 2025 و ...	نقش الگوریتم از تحلیل وضع موجود به تولید و رتبه‌بندی گزینه‌های طراحی گسترش یافته است.	معیار ارزیابی همچنان عملکردی (دقت، کارایی، بهینگی) است و مشارکت الگوریتم در تعریف مسئله و معیارها چندان بررسی نمی‌شود ← شکاف هستی‌شناختی
مطالعات مرتبط با فناوری و نظریه کنشگر-شبکه	Cresswell et al., 2010; Gunderson et al., 2024; Ryan et al., 2024; Dawkins & Kitchin, 2025; حاتمی‌نژاد و همکاران، ۱۴۰۲؛ کانونی و همکاران، ۱۴۰۲؛ فارابی‌اصل و همکاران، ۱۴۰۲ و ...	چارچوبی برای فهم عاملیت به مثابه اثری رابطه‌ای و توزیع‌شده میان کنشگران فراهم می‌کند.	کاربست این ظرفیت پراکنده بوده و مفهوم ترجمه به‌ویژه در حوزه زیرساخت سبز هوشمند، آنگونه که باید به‌طور منسجم عملیاتی نشده است ← شکاف نظری-کاربردی
حکمرانی پاسخ‌گویی و شفافیت الگوریتمی،	Busuioc, 2021; De Laat, 2018; Loi et al., 2021; Stinson, 2022; Bellanova & De Goede, 2022 و ...	الگوریتم سازوکاری خنثی نیست و انتخاب‌های نهفته در طراحی مدل، ابعاد هنجاری دارند.	مباحث شفافیت و پاسخ‌گویی در سطح کلی باقی‌مانده و به سازوکارهای انضمامی طراحی شهری (جانمایی فضای سبز، انتخاب گونه، اولویت‌بندی مداخلات) چندان پیوند نخورده است ← شکاف هنجاری

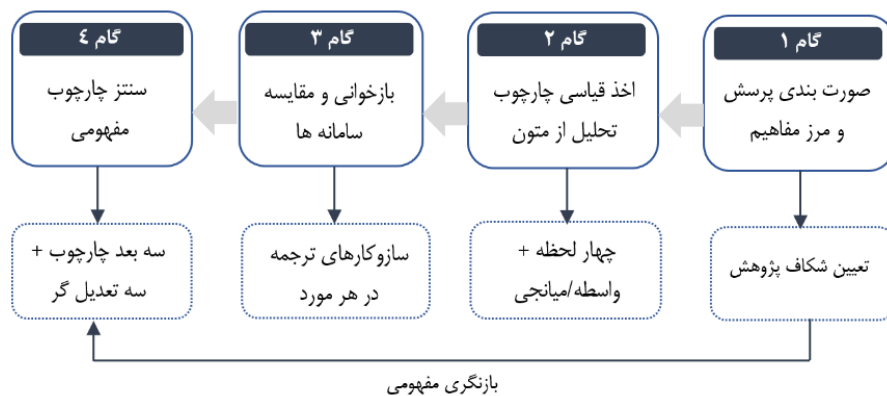
۲- روش پژوهش

پژوهش حاضر، از نظر ماهیت داده‌ها کیفی و از حیث راهبرد، نظری-مفهومی است و هدف آن، صورت‌بندی چارچوبی مفهومی برای تبیین جایگاه الگوریتم‌های هوش مصنوعی در شبکه طراحی زیرساخت سبز هوشمند شهری است. برای این منظور، نظریه کنشگر-شبکه به‌عنوان لنز نظری برگزیده شد و چهار لحظه ترجمه (پروبلماتیزه کردن، جلب علاقه، عضوگیری و هم‌آوایی کنشگران) ابزار تحلیلی اصلی قرار گرفت.

گردآوری داده‌ها مبتنی بر متون دست‌اول نظریه کنشگر-شبکه (بدون قید زمانی) و مقالات داوری همتای بازه ۲۰۱۰-۲۰۲۶ از پایگاه‌های اسکوپوس^{۱۳}، وب‌آو ساینس^{۱۴} و پایاب مد^{۱۵} بود؛ بر این اساس سه خوشه کلیدواژه جست‌وجو شد: زیرساخت سبز شهری و خدمات اکوسیستمی؛ هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و شهر هوشمند؛ و نظریه کنشگر-شبکه، عاملیت و حکمرانی الگوریتمی. معیارهای ورود عبارت بودند از ارتباط مستقیم با یکی از سه مسیر پژوهشی و گزارش جزئیات کافی برای ردیابی نحوه مشارکت الگوریتم در تعریف مسئله یا معیارها؛ مطالعاتی که تنها عملکرد فنی مدل را بدون اشاره به زمینه تصمیم‌گیری گزارش می‌کردند کنار گذاشته شدند. نمونه‌گیری به صورت هدفمند و تا اشباع مفهومی ادامه یافت.



تحلیل در چهار گام پیوسته صورت گرفت (تصویر ۱): نخست، پرسش راهبر صورت‌بندی و مرزهای مفهومی سه ستون نظری پژوهش تعیین شد. دوم، چارچوب تحلیل به صورت قیاسی از متون دست‌اول اخذ شد (چهار لحظه ترجمه و تمایز واسطه/میانجی به عنوان معیار تشخیص جایگاه الگوریتم). سوم، پنج سامانه به صورت جداگانه از خلال چهار لحظه بازخوانی و با معیارهای مشترک مقایسه شدند. چهارم، برآیند این مقایسه در قالب چارچوبی مفهومی سنتز شد. به طور کلی به منظور تضمین اعتبار یافته‌ها، در فرایند تحلیل، چند ملاحظه روش شناختی مورد توجه قرار گرفت. مفاهیم بنیادی بر اساس متون دست‌اول استخراج شدند تا از اتکا به خوانش‌های واسطه‌ای کاسته شود. مرور ادبیات در سه مسیر مرتبط انجام گرفت و گزاره‌های تحلیلی درباره هر سامانه بر مبنای شواهد گزارش شده در منابع اصلی آن تنظیم شد؛ به گونه‌ای که میان داده‌های منبع و تفسیر تحلیلی پژوهش تمایز گذاشته شود. همچنین، موارد بررسی شده با معیارهای مشترک مقایسه شدند تا از سجام تحلیل حفظ شود. بالاین‌حال، تحلیل حاضر بر گزارش‌های منتشر شده استوار است و نه مشاهده مستقیم فرایند طراحی؛ محدودیتی که در بخش نتیجه‌گیری به آن پرداخته شده است.



تصویر ۱- فرایند کلی پژوهش

۳- مبانی نظری

مبانی نظری این پژوهش بر سه محور استوار است: نخست، تبیین مفهوم زیرساخت سبز هوشمند شهری و تمایز آن از مفاهیم مجاور؛ دوم، معرفی نظریه کنشگر-شبکه به عنوان چارچوب تحلیلی؛ و سوم، صورت‌بندی مفهوم عاملیت الگوریتمیک بر پایه این چارچوب. ترتیب این سه محور بر این اساس بوده است که فهم عاملیت الگوریتمیک، هم به شناخت ابژه پژوهش و هم به در اختیار داشتن چارچوب تحلیل روابط وابسته است.

۳-۱- زیرساخت سبز هوشمند شهری

مفهوم زیرساخت سبز شهری طی دهه‌های اخیر دستخوش تحول مفهومی مهمی شده است. در برداشت‌های متعارف، فضاهای سبز عمدتاً به عنوان عناصر کالبدی منفرد با کارکردهای زیبایی‌شناختی، تفریحی یا خدماتی تلقی می‌شدند؛ برداشتی که از نظر منطقی برنامه‌ریزی به زیرساخت «خاکستری» نزدیک است، زیرا هر عنصر برای تأمین یک کارکرد مشخص طراحی می‌شود. در مقابل، رویکرد زیرساخت سبز، عناصر طبیعی و نیمه‌طبیعی را اجزای یک شبکه فضایی-اکولوژیک پیوسته می‌داند که در مقیاس‌های مختلف عمل کرده و مجموعه‌ای از خدمات اکوسیستمی، از تعدیل جزیره گرمایی و مدیریت رواناب تا بهبود کیفیت هوا و ارتقای سلامت شهروندان، فراهم می‌آورد (Jia & Turcu, 2025). محور این تمایز، مفهوم چندعملکردی است؛ یعنی توانایی یک پهنه واحد برای تأمین هم‌زمان کارکردهای اکولوژیک، اجتماعی و اقتصادی، در مقابل منطق تک‌عملکردی زیرساخت خاکستری (Hansen & Pauleit, 2014).

در این چارچوب، ویژگی‌های ساختاری شبکه، از جمله پیوستگی و اندازه لکه‌های سبز، با ظرفیت چندعملکردی آن ارتباط دارند (Li & Carter, 2025)؛ بنابراین، ارزش زیرساخت سبز صرفاً به حضور عناصر گیاهی وابسته نیست، بلکه به ظرفیت آن‌ها برای ایجاد هم‌افزایی میان اهدافی مانند تنظیم خرداقلیم، مدیریت رواناب و حفاظت از تنوع زیستی مربوط می‌شود. از این رو، ارزش زیرساخت سبز را باید در کیفیت روابط میان اجزای شبکه اجتماعی-اکولوژیک جست‌وجو کرد (Andersson et al., 2019)، نه

صرفاً در ویژگی‌های کالبدی عناصر منفرد آن. در امتداد این تحول، ورود فناوری‌های داده‌محور و سامانه‌های هوشمند مرحله جدیدی در فهم و مدیریت زیرساخت سبز شهری ایجاد کرده است؛ اما پیش از آن، لازم است سه مفهوم مرتبط از یکدیگر تفکیک شوند: زیرساخت سبز، زیرساخت هوشمند شهری و زیرساخت سبز هوشمند شهری. این سه نه سطوح یک مفهوم واحد، بلکه سه صورت‌بندی متفاوت با واحد تحلیل و منطق تصمیم‌گیری متمایزند (جدول ۲).

جدول ۲- تمایز مفهومی زیرساخت سبز، زیرساخت هوشمند شهری و زیرساخت سبز هوشمند شهری

مفهوم	تعریف	نکات و ویژگی‌های مهم	منبع
زیرساخت سبز	شبکه‌ای راهبردی و برنامه‌ریزی شده از پهنه‌های طبیعی و نیمه‌طبیعی به همراه سایر عناصر محیطی که برای ارائه طیف گسترده‌ای از خدمات اکوسیستمی طراحی و مدیریت می‌شود.	- در تقابل با زیرساخت «خاکستری» که به صورت تک عملکردی برنامه‌ریزی می‌شود. - چند عملکردی به معنای ترکیب کارکردهای اکولوژیک، اجتماعی و اقتصادی در یک پهنه واحد. - پیوستگی و اندازه لکه‌های سبز با ظرفیت چند عملکردی شبکه مرتبط است. - منافع خدمات اکوسیستمی «هم‌تولید» می‌شوند و از سه صافی زیرساختی، نهادی و ادراکی-ارزشی عبور می‌کنند.	Hansen & Pauleit, 2014; Li & Carter, 2025; Andersson et al., 2019; نوروزی و سوزنچی، ۱۴۰۰؛ شیرگیر و همکاران، ۱۳۹۸
زیرساخت هوشمند شهری	زیرساختی که در آن مؤلفه‌های شهری از طریق اینترنت اشیاء در یک معماری یکپارچه به هم متصل می‌شوند و داده‌های کلان شهری در برنامه‌ریزی، مدیریت و ارتقای کیفیت خدمات شهری به کار گرفته می‌شود.	- اینترنت اشیاء و رشد دستگاه‌های متصل، خاستگاه مفهوم شهر هوشمند است. - مؤلفه‌هایی نظیر حمل‌ونقل هوشمند، اجتماع هوشمند، سلامت هوشمند، شبکه انرژی هوشمند و ... با هدف ارتقای کیفیت زندگی یکپارچه می‌شوند. - معماری سه‌لایه: تجمیع داده، مدیریت بلادرنگ داده و ارائه خدمات. - موضوع آن کل سامانه شهری است و لزوماً بر عناصر اکولوژیک متمرکز نیست.	Silva et al., 2018
زیرساخت سبز هوشمند شهری	زیرساخت سبزی که سنجش مستمر، مدل‌سازی محاسباتی و پشتیبانی از تصمیم‌مندی بر داده در آن ادغام شده و از این‌رو به‌مثابه پیکربندی اجتماعی-اکولوژیک-فناورانه فهم می‌شود.	- در سطح پایش: سنجش‌ازدور و بینایی ماشین امکان رصد خودکار وضعیت پوشش گیاهی را در تفکیک تک‌درخت به‌عنوان ابزاری برای برنامه‌ریزی شهری فراهم می‌کند. - در سطح طراحی: مدل‌هایی مانند یادگیری عمیق بر پایه تصاویر ماهواره‌ای و داده حسگر، چیدمان فضای سبز منطبق با ضوابط تولید می‌کنند. - در سطح انتخاب: سامانه‌های توصیه‌گر گونه‌های درختی را بر پایه صفات کارکردی پیشنهاد می‌دهند.	Fuentes et al., 2021; Wang & Zhang, 2025; Nicol et al., 2026; Helmrich et al., 2023; کاظمی و رضایی، ۱۴۰۳

چنان‌که جدول ۲ نشان می‌دهد، تفاوت میان این سه مفهوم نه در دامنه یا حضور فناوری، بلکه در واحد تحلیل و منطق تصمیم‌گیری آن‌هاست: زیرساخت سبز بر منطق اکولوژیک و چندعملکردی استوار است، زیرساخت هوشمند شهری بر منطق داده و بلادرنگ بودن و زیرساخت سبز هوشمند شهری در تقاطع این دو منطق شکل می‌گیرد. توسعه فناوری‌هایی مانند سنجش‌ازدور، شبکه‌های حسگر و اینترنت اشیاء، امکان رصد و مدل‌سازی پویاتر فرایندهای محیطی را فراهم کرده و زیرساخت سبز را از سامانه‌ای عمدتاً ایستا به سامانه‌ای قابل پایش تبدیل کرده است. در سامانه‌های داده‌محور، جریان مستمر داده‌ها چرخه مشاهده، تحلیل و تصمیم را به فرایندی پیوسته‌تر بدل می‌کند؛ همان‌گونه که بتی (۲۰۱۳) بر نقش افزایش ظرفیت داده در نزدیک‌تر شدن این فرایندها تأکید می‌کند. در این چارچوب، معماری‌های چندلایه شهر هوشمند، ارتباط میان داده و تصمیم را سازمان‌دهی می‌کنند (Silva et al., 2018). با ادغام این دو منطق، نقش فناوری نیز از پایش و تحلیل به تولید دانش و پشتیبانی از تصمیم گسترش می‌یابد. الگوریتم‌های یادگیری ماشین امکان تحلیل دقیق‌تر الگوهای سبزینگی و عملکرد اکولوژیک و نیز مشارکت در تولید و رتبه‌بندی گزینه‌های طراحی را فراهم کرده‌اند (Peng et al., 2026; Wang et al., 2025); بنابراین، اهمیت این تحول صرفاً به دقت پیش‌بینی محدود نیست، بلکه به تغییر رابطه میان داده، مدل و تصمیم طراحی مربوط می‌شود؛ به‌گونه‌ای که الگوریتم از ابزار تحلیلی فراتر رفته و در فرایند تولید گزینه‌های طراحی نیز مشارکت می‌کند. از این‌رو، هوشمندسازی زیرساخت سبز را می‌توان بازاریابی شیوه تولید دانش، تعریف مسئله و سازمان‌دهی فرایند تصمیم‌گیری طراحی دانست (Cook & Karvonen, 2024).



باین‌حال، این تحول به معنای جایگزینی قضاوت انسانی با تصمیم الگوریتمی نیست، زیرا سامانه‌های محاسباتی در بستری عمل می‌کنند که داده‌ها، مدل‌ها، متخصصان، نهادها و عناصر محیطی بر یکدیگر اثر می‌گذارند. بر این اساس، زیرساخت سبز هوشمند را می‌توان پیکربندی‌ای اجتماعی-اکولوژیک-فناورانه دانست که در آن فرایندهای محیطی، روابط اجتماعی و زیرساخت‌های داده‌ای در تعامل با یکدیگر سازمان می‌یابند (McPhearson et al., 2022). چنین برداشتی، این سامانه را نه صرفاً موضوعی طبیعی و نه صرفاً فناورانه، بلکه ایژه‌ای پیوندی میان کنشگران انسانی و غیرانسانی نشان می‌دهد. در نتیجه، تحلیل چگونگی شکل‌گیری روابط میان این کنشگران، از جمله جایگاه الگوریتم در شبکه تصمیم، نیازمند چارچوبی است که این روابط و فرایندهای ترجمه میان آن‌ها را در برگیرد؛ از این منظر، نظریه کنشگر-شبکه و مفهوم ترجمه چارچوبی مناسب برای تبیین شکل‌گیری عاملیت الگوریتمی در طراحی زیرساخت سبز هوشمند فراهم می‌کنند که در ادامه بدان می‌پردازد.

۳-۲- نظریه کنشگر-شبکه: چارچوبی برای تحلیل عاملیت رابطه‌ای

نظریه کنشگر-شبکه در دهه ۱۹۸۰ و با آثار برونو لاتور^۶، میشل کالن^۷ و جان لاوشکل^۸ گرفت. این نظریه در واکنش به دوگانه‌های رایج میان جامعه و فناوری، انسان و طبیعت و عامل انسانی و ساختارهای مادی، بر این دیدگاه استوار است که پدیده‌های اجتماعی نه صرفاً محصول کنش انسان‌ها و نه نتیجه جبر فناوری، بلکه حاصل شبکه‌هایی از روابط میان کنشگران انسانی و غیرانسانی هستند. در این چارچوب، فناوری‌ها، داده‌ها، اسناد، زیرساخت‌ها و عناصر طبیعی صرفاً ابزارهای منفعل نیستند، بلکه از طریق امکان‌پذیر کردن، محدود کردن یا جهت‌دهی به کنش‌ها، در شکل‌گیری پیامدهای اجتماعی مشارکت می‌کنند (Callon, 1986; Latour, 2005). باین‌حال، این نظریه، یکی از چند رویکرد نظری برای تحلیل رابطه انسان، فناوری و محیط است و تفاوت آن با رویکردهای نزدیک را می‌توان بر اساس واحد تحلیل، جایگاه فناوری و نحوه تبیین روابط میان کنشگران بررسی کرد (جدول ۳).

جدول ۳- مقایسه نظریه کنشگر-شبکه با رویکردهای نزدیک به تحلیل عاملیت

نظریه/رویکرد	نکات کلیدی نظری	مآخذ
ساخت یابی	عاملیت را دوسویه میان کنش انسانی و ساختار می‌داند؛ فناوری در این چارچوب عمدتاً قاعده یا ساختاری است که کنش انسانی را قالب‌بندی می‌کند، نه کنشگری مستقل.	Giddens, 1984
ساخت اجتماعی فناوری	معنای یک مصنوع فناورانه را حاصل تفسیرها و مذاکرات گروه‌های اجتماعی ذی‌نفع می‌داند؛ تمرکز اصلی این رویکرد بر فرایند «سته‌شدن تفسیری» فناوری از طریق شکل‌گیری توافق اجتماعی است.	Pinch & Bijker, 1984
کنشگر-شبکه	عاملیت را اثری رابطه‌ای و متقارن میان کنشگران انسانی و غیرانسانی می‌داند؛ برخلاف رویکردهای دیگر، ابزار تحلیلی مرحله‌ای (چهار لحظه ترجمه) برای پیگیری این فرایند ارائه می‌دهد.	Callon, 1986; Latour, 2005
نظریه تجمع ^{۱۹}	اجزای ناهمگن انسانی، مادی و نهادی را در ترکیبی موقت و قابل فروپاشی می‌بیند که عاملیت از ظرفیت رابطه‌ای میان آن‌ها برمی‌خیزد.	DeLanda, 2006
واقع‌گرایی عاملیتی	عاملیت را نه ویژگی از پیش موجود کنشگران، بلکه امری تولیدشده در دل «درون‌کنش» می‌داند؛ سوژه و ایژه پیشاپیش وجود ندارند و در همان لحظه کنش شکل می‌گیرند.	Barad, 2007

چنان‌که جدول ۳ نشان می‌دهد، تفاوت این رویکردها را می‌توان در میزان و نوع عاملیتی که برای عناصر غیرانسانی قائل‌اند دنبال کرد. ساخت‌یابی و ساخت اجتماعی فناوری در یک قطب قرار می‌گیرند؛ هر دو، هرچند از مسیرهای متفاوت، منشأ نهایی کنش را به عامل انسانی یا توافق اجتماعی بازمی‌گردانند و برای عناصر مادی و اکولوژیک نقشی عمدتاً زمینه‌ای در نظر می‌گیرند. در مقابل، واقع‌گرایی عاملیتی و نظریه تجمع عاملیت غیرانسانی را می‌پذیرند، اما فاقد مقوله‌های تحلیلی مشخصی برای ردیابی گام‌به‌گام فرایندی هستند که طی آن یک کنشگر، برای نمونه الگوریتم، به میانجی تصمیم تبدیل می‌شود. نظریه کنشگر-شبکه این دو محدودیت را هم‌زمان پوشش می‌دهد: از یک‌سو، همانند واقع‌گرایی عاملیتی و نظریه تجمع، عاملیت را از انحصار انسانی خارج می‌کند و از سوی دیگر، با مفهوم ترجمه و چهار لحظه آن، سازوکاری برای ردیابی چگونگی شکل‌گیری و تثبیت این عاملیت فراهم می‌آورد. مبنای این ویژگی، یعنی امکان تحلیل عاملیت انسانی و غیرانسانی در یک چارچوب واحد، در اصل «تقارن تحلیلی» توضیح داده می‌شود.

به‌طور کلی اصل «تقارن تحلیلی» یکی از مبانی هستی‌شناختی این رویکرد است؛ بر اساس آن، تحلیلگر نباید عاملیت را صرفاً به کنشگران انسانی نسبت دهد، بلکه باید نقش عناصر غیرانسانی را نیز در شکل‌گیری شبکه‌های کنش بررسی کند (Latour, 2005). بر این اساس، الگوریتم، داده و مدل‌های محاسباتی نه به دلیل ویژگی‌های فنی خود، بلکه از طریق اثری که در سازمان‌دهی روابط میان کنشگران و جهت‌دهی به فرایند تصمیم‌ایجاد می‌کنند، اهمیت تحلیلی می‌یابند. الگوریتم در شبکه‌ای

قرار می‌گیرد که داده‌ها، استانداردها، نهادهای متخصصان و عناصر محیطی را به یکدیگر پیوند می‌دهد؛ از این رو، تحلیل تصمیم‌های طراحی مستلزم توجه به روابطی است که طی آن مسئله تعریف، معیارها انتخاب و گزینه‌های مداخله تولید می‌شوند. در این چارچوب، عاملیت الگوریتمیک نه ویژگی ذاتی مدل، بلکه اثری برآمده از جایگاه آن در شبکه روابط است. پذیرش این اصل، نظریه کنشگر-شبکه را با نقدی مهم نیز مواجه کرده است: احتمال کم‌رنگ شدن نقش قصدها، ارزش‌ها، منافع و زمینه‌های اخلاقی کنشگران انسانی برای رفع این ابهام، باید میان «تقارن تحلیلی» و «هم‌ارزی هنجاری» تمایز قائل شد؛ تقارن، اصلی روش‌شناختی برای بررسی نقش عناصر مختلف شبکه است و به معنای برابر دانستن مسئولیت اخلاقی انسان و فناوری نیست. بر این اساس، توزیع نقش و مسئولیت میان کنشگران، نتیجه تحلیل شبکه است و نه پیش‌فرض آن (Cresswell et al., 2010).

در امتداد این مبنا، «ترجمه» نیز سازوکار اصلی نظریه کنشگر-شبکه برای توضیح چگونگی شکل‌گیری، تثبیت و تحول شبکه‌ها است. ترجمه، انتقال ساده اطلاعات نیست، بلکه فرایندی است که طی آن هویت کنشگران، نقش‌های آن‌ها، روابط قدرت و تعریف مسئله به‌طور هم‌زمان بازسازی می‌شود. کالن (۱۹۸۶) این فرایند را در قالب چهار لحظه تحلیلی صورت‌بندی می‌کند:

- مسئله‌مندسازی: تعریف مسئله مشترک و ایجاد نقطه‌گذار اجباری که سایر کنشگران برای دستیابی به اهداف خود ناگزیر از عبور از آن هستند؛
 - جلب‌علاقه: مجموعه اقداماتی که از طریق آن پیوندهای پیشنهادی میان کنشگران تثبیت و روابط رقیب تضعیف می‌شوند. در این مرحله، ابزارهای مادی، فناوری‌ها و استانداردها نیز نقش دارند؛
 - عضوگیری/پذیرش، مذاکره و تثبیت نقش‌های تعریف شده برای کنشگران و شکل‌گیری مجموعه‌ای از انتظارات و روابط نسبتاً پایدار؛
 - هم‌آوایی کنشگران: مرحله‌ای که در آن برخی کنشگران، مدل‌ها، شاخص‌ها یا بازنمایی‌ها می‌توانند به نام شبکه سخن بگویند و در مشروعیت بخشی به تصمیم‌ها نقش ایفا کنند (Callon, 1986).
- باین‌حال، ترجمه همواره موفقیت‌آمیز نیست و شبکه‌ها ممکن است در هر مرحله با مقاومت، شکست یا بازآرایی مواجه شوند؛ زیرا کنشگران ممکن است نقش‌های پیشنهادی را نپذیرند یا مسیرهای پیش‌بینی‌شده را دنبال نکنند (Callon, 1986)، از این رو، تحلیل شبکه نه تنها باید شرایط تثبیت روابط، بلکه امکان مقاومت و شکست ترجمه را نیز بررسی کند.

۳-۳- عاملیت الگوریتمیک: از ابزار تا میانجی

همان‌طور که در بخش‌های قبلی بیان شد، گسترش سامانه‌های هوش مصنوعی در حوزه‌هایی مانند طراحی و مدیریت زیرساخت‌های سبز شهری، جایگاه الگوریتم را در فرایندهای طراحی و تصمیم‌گیری از یک ابزار محاسباتی صرف فراتر برده است. در برداشت متعارف، الگوریتم سازوکاری است که داده‌های ورودی را بر اساس قواعد از پیش تعریف‌شده پردازش و خروجی مشخصی تولید می‌کند؛ در این نگاه، الگوریتم نقش مستقلی در تولید معنا ندارد و مسئولیت تصمیم‌نهایی به کنشگر انسانی نسبت داده می‌شود. باین‌حال، این برداشت برای توضیح سامانه‌های پیچیده معاصر کافی نیست؛ چراکه الگوریتم‌ها از طریق انتخاب و سازمان‌دهی داده‌ها، تعریف معیارها، طبقه‌بندی پدیده‌ها و اولویت‌بندی گزینه‌ها، انتخاب‌هایی ارزشی را در کنار فرایندهای فنی خود در برمی‌گیرند (Busuioc, 2021).

بر همین مبنا، «عاملیت الگوریتمیک» به عملیات محاسباتی یا توانایی فنی مدل در پردازش داده اشاره ندارد، بلکه به جایگاهی مربوط است که الگوریتم در شبکه روابط تصمیم‌گیری به دست می‌آورد و از طریق سازمان‌دهی اطلاعات، تعریف معیارها و محدود یا گسترش دادن دامنه گزینه‌ها، در صورت‌بندی مسئله اثر می‌گذارد؛ اثری رابطه‌ای و شبکه‌ای که نه ویژگی انحصاری کنشگر انسانی است و نه محصول ساختارها (Cresswell et al., 2010). از این رو، عاملیت الگوریتمیک نه بر قصد، آگاهی یا خودآیینی فناوری دلالت دارد و نه ویژگی ذاتی که یا مدل است، بلکه در تعامل با داده‌ها، کاربران، زیرساخت‌های فناورانه، نهادهای تصمیم‌گیر و اهداف طراحی شکل می‌گیرد. توزیع این عاملیت میان انسان و فناوری نیز رابطه‌ای جمع صفر نیست؛ افزایش نقش یک کنشگر الزاماً به کاهش نقش سایرین منجر نمی‌شود (زهرانی و همکاران، ۱۴۰۰)؛ بنابراین، فناوری نه باید به ابزار خنثی فروکاسته شود و نه به عاملی مستقل و تعیین‌کننده تقلیل یابد؛ پذیرش الگوریتم به‌عنوان کنشگر غیرانسانی نیز به معنای جایگزینی نقش طراح یا نهاد تنظیم‌گر نیست، بلکه به بازتنظیم روابط میان این کنشگران اشاره دارد (رستمی و همکاران، ۱۴۰۰).



این برداشت، تصور الگوریتم به عنوان ابزاری خنثی را به چالش می کشد؛ زیرا اثرگذاری آن صرفاً به داده های ورودی یا دقت محاسباتی محدود نیست، بلکه به انتخاب های نهفته در طراحی، از جمله گزینش متغیرها، ساختار مدل، معیارهای ارزیابی و منطق تصمیم گیری، وابسته است (Stinson, 2022). از این رو، پاسخ گویی الگوریتمی تنها با اصلاح داده ها یا افزایش دقت مدل تحقق نمی یابد، بلکه مستلزم توجه به کل زنجیره تبدیل ویژگی های محیطی به بازنمایی های محاسباتی و گزینه های تصمیم است. در حکمرانی الگوریتمی، بخشی از تصمیم سازی به مدل هایی واگذار می شود که منطق عملکردشان ممکن است برای همه کنشگران آشکار نباشد؛ وضعیتی که میان ظرفیت فنی سامانه ها و سازوکارهای سنتی پاسخ گویی شکاف ایجاد می کند (Busuioc, 2021). این مسئله در پدیده «جعبه سیاه» نیز نمود می یابد، زیرا مسیر تبدیل داده ورودی به خروجی نهایی ممکن است حتی برای توسعه دهندگان کاملاً آشکار نباشد. با این حال، شفافیت الگوریتمی به آشکار سازی کد محدود نمی شود؛ لوی و همکاران تأکید می کنند که تقلیل شفافیت به تفسیرپذیری پسینی خروجی، تصویری ناقص ارائه می دهد و اهداف طراحی، دامنه کاربرد و معیارهای ارزیابی را نیز در برمی گیرد (Loi et al., 2021). بدین ترتیب، شفافیت از پرسش «مدل چگونه تصمیم گرفت؟» فراتر رفته و به اهداف و معیارهای طراحی آن معطوف می شود. در عین حال، شفافیت کامل عمومی همواره امکان پذیر یا مطلوب نیست؛ زیرا پیچیدگی مدل ها، مالکیت فکری، حریم خصوصی و امکان دست کاری سامانه محدودیت هایی ایجاد می کنند. از این رو، مسئله اصلی نه دستیابی به شفافیت مطلق، بلکه تعیین این است که چه اطلاعاتی، برای چه کنشگری و در چه مرحله ای باید در دسترس باشد (De Laat, 2018).

بر این مبنا، عاملیت الگوریتمیک را می توان در سه بُعد به هم پیوسته صورت بندی کرد: موقعیت مندی در زمینه اجتماعی، نهادی و فناورانه؛ رابطه ای بودن در تعامل با سایر کنشگران شبکه (Cresswell et al., 2010)؛ و زیر ساختی بودن از طریق پیوند با جریان های داده، استانداردها و سازوکارهای تصمیم گیری (Bellanova & de Goede, 2022). در همین چارچوب، تمایز واسطه و میانجی نزد لاتور اهمیت می یابد؛ واسطه صرفاً حامل است و رابطه ورودی-خروجی آن قابل پیش بینی باقی می ماند، در حالی که میانجی معنا، روابط و هویت کنشگران را دگرگون می کند (Latour, 2005). الگوریتم در مقام واسطه به پردازش داده محدود می شود، اما در مقام میانجی در ترجمه داده های محیطی و بازتعریف مسئله طراحی مشارکت می کند (جدول ۴). این دو وضعیت، دو قطب یک پیوستارند، نه دو حالت منفصل؛ یک سامانه الگوریتمی ممکن است در موقعیتی صرفاً انتقال دهنده باشد و در موقعیتی دیگر، با تعیین معیارها و پیشنهاد مسیرهای مداخله، در بازآرایی شبکه طراحی اثرگذار شود. از این رو، عاملیت الگوریتمیک پیوستاری از شدت های متفاوت است که به تجویزگری مدل، پیوند آن با زیر ساخت تصمیم گیری و امکان مداخله انسانی وابسته است.

جدول ۴- تمایز واسطه و میانجی در نظریه کنشگر-شبکه (بر اساس Latour, 2005)

ویژگی	واسطه	میانجی
رابطه ورودی-خروجی	خطی و قابل پیش بینی	غیرخطی و رخدادی
اثر بر معنا	حامل خنثی، بدون دگرگونی	بازپیکربندی معنا و روابط
نقش در شبکه	انتقال دهنده	ترجمه گر
قابلیت جعبه سیاه سازی	بالا؛ می توان از تحلیل حذف کرد	پایین؛ باید ردیابی شود
نمود در طراحی الگوریتمیک	ابزار محاسباتی ساده (مثلاً میدل داده)	مدل یادگیرنده که مسئله را بازتعریف می کند
جایگاه در طیف عاملیت	تجویزگری پایین، برگشت پذیری بالا	تجویزگری بالا، برگشت پذیری پایین

۴- تحلیل داده ها و یافته ها

یافته های پژوهش بر اساس چارچوب نظریه کنشگر-شبکه و از خلال چهار لحظه ترجمه سازمان دهی شده اند. در این خوانش، تمرکز بر چگونگی شکل گیری و جایگاه یابی عاملیت الگوریتمیک در شبکه ای از روابط میان کنشگران انسانی و غیرانسانی است؛ شبکه ای که در آن داده ها، مدل های محاسباتی، نهادهای تصمیم گیر، متخصصان و عناصر اکولوژیک در فرایند تعریف مسئله، ارزیابی گزینه ها و سازمان دهی تصمیم های طراحی با یکدیگر پیوند می یابند. در ادامه، هر یک از لحظات ترجمه و نحوه تبیین نقش الگوریتم در بازآرایی این روابط بررسی می شود.

۴-۱- مسئله مندسازی: ترجمه زیر ساخت سبز به چارچوب محاسباتی

مرور مطالعات نشان می‌دهد که در مرحله مسئله‌مند سازی، سه سازوکار اصلی در شکل‌گیری رابطه الگوریتم، داده و مسئله طراحی قابل مشاهده است. نخست، چندهمکردی بودن زیر ساخت سبز از مفهومی تف‌سیری به ساختاری چندمعیاره تبدیل می‌شود؛ به این معنا که ابعاد اکولوژیک، اجتماعی و اقتصادی حذف نمی‌شوند، بلکه در قالب معیارهای قابل ارزیابی بازنمایی می‌شوند. برای نمونه، در چارچوب مولد بهینه سازی طراحی فضای سبز مبتنی بر شبکه عصبی عمیق، گزینه‌های طراحی بر اساس شاخص‌های کمی در حوزه‌های مختلف ارزیابی می‌شوند (Wang et al., 2025). در این فرایند، چندهمکردی از یک اصل برنامه‌ریزی به منطق ارزیابی محاسباتی منتقل می‌شود؛ الگوریتم این مفهوم را ایجاد نمی‌کند، بلکه شیوه بیان و سنجش آن را تغییر می‌دهد. در سامانه موردبررسی نیز قیود پهنه‌بندی، حداقل نسبت فضای سبز و الزامات اقلیمی در ساختار مدل وارد شده و از عوامل بیرونی به بخشی از منطق تولید گزینه تبدیل شده‌اند؛ بنابراین، نقش الگوریتم در این مرحله نه و ضع ضابطه جدید، بلکه تثبیت و عملیاتی کردن ضوابط موجود است.

در همین چارچوب، ریخت‌شناسی اکولوژیک نیز در زبان الگوریتمی به ویژگی‌های قابل شناسایی و قابل سنجش تبدیل می‌شود. در تحلیل ساختار فضایی پوشش گیاهی، مفاهیمی مانند هسته، لبه، شاخه، جزیره، حلقه و منفذ به ویژگی‌های محاسبه‌پذیر تبدیل می‌شوند. یافته‌های پنگ و همکاران نشان می‌دهد که پیوستگی و ارتباط فضایی لکه‌های سبز در تبیین عملکرد اکولوژیک اهمیت دارند (Peng et al., 2026). از این رو، تغییر حاصل صرفاً افزایش دقت اندازه‌گیری نیست، بلکه به تغییر شیوه توصیف محیط نیز مربوط می‌شود؛ به گونه‌ای که مفاهیمی مانند انسجام منظر از زبان توصیفی به مجموعه‌ای از شاخص‌های محاسبه‌پذیر درمی‌آیند.

این فرایند در انتخاب سنج‌ها نیز ادامه پیدا می‌کند. در مدل سازی جزیره گرمایی سئول، شاخص ساعات جزیره گرمایی برای سنجش مدت مواجهه پیشنهاد شده و نسبت سطح سبز و معابر در آن اهمیت دارد (Oh et al., 2020). تغییر معیار از شدت لحظه‌ای به تداوم زمانی، صرفاً یک انتخاب فنی نیست، بلکه بر نحوه صورت‌بندی مسئله طراحی نیز اثر می‌گذارد و توجه را از اصلاح نقاط بحرانی به توزیع فضایی ظرفیت‌های تعدیل‌کننده معطوف می‌کند.

برآیند این سازوکارها آن است که الگوریتم در مرحله مسئله‌مندسازی صرفاً به مسئله‌ای از پیش تعریف‌شده پاسخ نمی‌دهد، بلکه در تبیین آنچه قابل مشاهده، اندازه‌گیری و مداخله تلقی می‌شود نیز مشارکت دارد. استینسون نشان می‌دهد که سوگیری الگوریتمی تنها به داده‌های ورودی محدود نیست و می‌تواند از انتخاب متغیرها و ساختار مدل نیز ناشی شود (Stinson, 2022). در اینجا، این منطق به مرحله پیش از ورود داده به مدل امتداد می‌یابد. از این رو، نخستین سطح عاملیت الگوریتمیک در جایی شکل می‌گیرد که زیرساخت سبز به متغیرها و اهداف محاسباتی تبدیل می‌شود. در این سطح، الگوریتم جایگزین قضاوت انسانی نیست، بلکه نحوه شناخت و ارزیابی مسئله را سازمان‌دهی می‌کند. دامنه این اثرگذاری نیز یکسان نیست؛ در مدل‌های تبیینی، ممکن است به توصیف و سنجش محیط محدود بماند، درحالی‌که در مدل‌های مولد، به شکل‌دهی فضای گزینه‌های طراحی نیز گسترش می‌یابد.

۴-۲- جلب علاقه: بازآرایی دسترسی، اعتبار و وابستگی در شبکه تصمیم‌گیری

پس از تعریف مسئله، جلب علاقه به تثبیت روابط میان کنشگران مربوط می‌شود؛ بنابراین، تمرکز از «چه چیزی مسئله تلقی می‌شود» به «چگونه مسیرهای شناخت و تصمیم‌تثبیت می‌شوند» منتقل می‌گردد. تحلیل موارد بررسی شده، سه سازوکار را نشان می‌دهد. نخست، رابطه متخصص و محیط از طریق داده میانجی‌گری می‌شود. در برنامه‌ریزی متعارف، شناخت محیط بر مشاهده میدانی متکی است؛ در سامانه‌های داده محور، این شناخت از طریق حسگرها و مدل‌های تحلیلی سازمان می‌یابد. این تغییر به معنای جایگزینی محیط با داده نیست، بلکه مسیر دسترسی به آن را تغییر می‌دهد؛ زیرا داده از طریق انتخاب و اولویت‌بندی، برخی ویژگی‌های محیطی را برجسته و برخی را کمرنگ می‌کند.

دوم، اعتبار تصمیم از ترکیب اشکال مختلف دانش شکل می‌گیرد. در سامانه‌هایی مانند دوقلوهای دیجیتال شهری، مدل‌ها صرفاً ابزار نمایش نیستند، بلکه در تولید بازخورد و سازمان‌دهی تصمیم نقش دارند؛ باین‌حال، بازنمایی دیجیتال بازتابی خنثی نیست، زیرا هر مدل بر پایه انتخاب داده و هدفی مشخص ساخته می‌شود (Dawkins & Kitchin, 2025)؛ بنابراین، اعتبار تصمیم از تعامل میان کیفیت داده، دانش تخصصی و ساختار مدل حاصل می‌شود، نه از خروجی مدل به تنهایی؛ نقش متخصص حذف نمی‌شود، بلکه در ترکیب و مذاکره اشکال دانش بازتعریف می‌شود و الگوریتم بخشی از شبکه اعتباردهی است، نه جایگزین تصمیم‌گیر انسانی.



سوم، جلب علاقه از طریق وابستگی‌های زیرساختی تثبیت می‌شود. هنگامی که سامانه‌های پایش، پایگاه‌های داده و استانداردهای ارزیابی در معماری مشترکی قرار می‌گیرند، تغییر تصمیم نیازمند باز تنظیم روابط فنی و نهادی است. این وابستگی می‌تواند هماهنگی را افزایش دهد، اما ممکن است نابرابری‌های موجود را نیز بازتولید کند، زیرا داده‌های نابرابر همان الگوها را تقویت می‌کنند؛ حتی داده‌های متوازن نیز بی‌طرفی را تضمین نمی‌کنند، زیرا انتخاب متغیرها و ساختار مدل در نتایج نقش دارند (Stinson, 2022). بر این اساس، جلب علاقه‌های الگوریتمی، فرایندی شبکه‌ای است که در آن جایگاه الگوریتم نه از خود فناوری، بلکه از استقرار آن در روابط انسانی، نهادی و مادی شکل می‌گیرد و درهم‌تنیدگی سامانه با زیرساخت رسمی تصمیم، عاملی تعیین‌کننده در این جایگاه است.

۴-۳- عضوگیری: بازتعریف جایگاه کنشگران در طراحی زیرساخت سبز هوشمند

در عضوگیری، روابطی که از طریق تعریف مسئله و ایجاد وابستگی شکل گرفته‌اند، به نقش‌ها و انتظارات نسبتاً پایدار تبدیل می‌شوند. تحلیل موارد نشان می‌دهد ورود سامانه‌های الگوریتمی، جایگاه چهار کنشگر اصلی را باز تنظیم می‌کند. نخست، نقش طراح از تولیدکننده انحصاری گزینه به ارزیاب و اصلاح‌کننده گزینه‌های تولیدشده تغییر می‌یابد. در چارچوب مولد، سامانه گزینه‌ها را بر اساس قیود اکولوژیک، اجتماعی و اقتصادی تولید و ارزیابی می‌کند (Wang et al., 2025)؛ بنابراین، قضاوت طراح حذف نمی‌شود، بلکه از تولید مستقیم به انتخاب و تعدیل گزینه‌ها منتقل می‌شود؛ باین‌حال، این انتخاب در فضایی کاملاً باز رخ نمی‌دهد، زیرا دامنه گزینه‌ها پیش‌تر تحت تأثیر داده‌ها و ساختار مدل قرار گرفته است.

هم‌زمان، الگوریتم از ابزار تحلیل وضع موجود به بخشی از فرایند تولید گزینه تبدیل می‌شود و در سازمان‌دهی مسیرهای مداخله مشارکت می‌کند (Wang et al., 2025). در چارچوب مولد، این نقش در تولید و رتبه‌بندی گزینه‌ها آشکار است؛ باین‌حال، خروجی آن همچنان از داده‌ها و مفروضات مراحل پیشین تأثیر می‌پذیرد. سوم، عناصر اکولوژیک از موضوعات صرفاً طبیعی به ویژگی‌های قابل ترجمه تبدیل می‌شوند. در سامانه سیلوسیت (توصیه‌گر گونه‌های درختی شهری)، ویژگی‌های عملکردی درختان، مانند سطح ویژه برگ، تراکم چوب و تحمل خشکی، برای انتخاب گونه به کار می‌روند (Nicol et al., 2026). این فرایند ارزیابی نظام‌مند را ممکن می‌کند، اما حضور طبیعت در شبکه محاسباتی را به ویژگی‌های کمی وابسته می‌سازد؛ از این‌رو، ابعدی مانند معنای فرهنگی یا تجربه زیسته، در نبود شاخص مناسب، ممکن است کم‌رنگ‌تر شوند.

چهارم، نهادهای تنظیم‌گر از ارزیابی نهایی به مراحل پیشین منتقل می‌شوند؛ زیرا با ورود ضوابط برنامه‌ریزی به ساختار مدل، این ضوابط دیگر صرفاً معیار پذیرش نیستند، بلکه فضای امکان‌های طراحی را نیز شکل می‌دهند (Wang et al., 2025). این امر هماهنگی را افزایش می‌دهد، اما می‌تواند برخی گزینه‌ها را پیش از ارزیابی عمومی محدود کند. باین‌حال، این بازتعریف در همه سامانه‌ها یکسان نیست. سیلوسیت نشان می‌دهد سامانه‌های توصیه‌گر می‌توانند به جای جایگزینی متخصص، نقش پشتیبان را حفظ کنند (Nicol et al., 2026)؛ بنابراین، جایگاه الگوریتم به معماری سامانه، تجویزگری مدل و نحوه تنظیم رابطه انسان-محاسبه وابسته است؛ عضوگیری، بازآرایی جایگاه چهار کنشگر است که شدت آن با همین عوامل تغییر می‌کند.

۴-۴- هم‌آوایی کنشگران: تثبیت بازنمایی‌های محاسباتی در حکمرانی محیطی

در مرحله هم‌آوایی کنشگران، شبکه‌ای که پیش‌تر از طریق تعریف مسئله، ایجاد پیوند و تثبیت نقش‌ها شکل گرفته، به وضعیتی می‌رسد که برخی عناصرش می‌توانند به نمایندگی از کل شبکه عمل کنند. در زیرساخت سبز هوشمند، این نمایندگی عمدتاً از طریق سنج‌ها و بازنمایی‌های محاسباتی شکل می‌گیرد؛ معیارهایی مانند شاخص نرمال‌شده پوشش گیاهی، دمای سطح زمین، شاخص ساعات جزیره گرمایی و سنج‌های ریخت‌شناختی، امکان مقایسه و هماهنگی میان گروه‌های تصمیم‌گیر را فراهم می‌کنند.

باین‌حال، تبدیل یک سنج علمی به مبنای تصمیم صرفاً فرایندی فنی نیست. برای نمونه، شاخص جزیره گرمایی ابتدا برای سنجش بهتر مواجهه حرارتی پیشنهاد شد (Oh et al., 2020)، اما با پذیرش در چارچوب‌های مدیریتی می‌تواند به معیار ارزیابی عملکرد مداخلات شهری بدل شود؛ در این حالت، سنج نه تنها وضع موجود را می‌سنجد، بلکه بر اینکه کدام ویژگی‌های محیطی در تصمیم برجسته شوند نیز اثر می‌گذارد.

زیرساخت داده نیز در تثبیت شبکه نقش مهمی دارد. وقتی سامانه‌های پایش، پایگاه‌های داده و ابزارهای مدیریتی در معماری مشترکی قرار می‌گیرند، تصمیم‌گیری به مجموعه‌ای از روابط فنی و نهادی وابسته می‌شود؛ این وابستگی مسئله پاسخ‌گویی را برجسته می‌کند، چون خروجی مدل‌ها در تخصیص منابع یا اولویت‌بندی مداخلات به کار می‌رود، درحالی‌که هر مدل حاصل

انتخاب‌هایی درباره داده، متغیر و وزن‌دهی است. بر این اساس، هم‌آوایی کنشگران مرحله‌ای است که در آن بازنمایی‌های محاسباتی از ابزار تحلیلی فراتر رفته و به عناصر هماهنگ‌کننده شبکه بدل می‌شوند؛ جایگاه الگوریتم نه از ویژگی ذاتی فناوری، بلکه از نقش آن در روابط داده، نهاد، متخصص و محیط ناشی می‌شود، تثبیتی که پیامدی خودکار نبوده و به پذیرش نهادی سنجه‌ها وابسته است.

۴-۵- شرایط مرزی و شدت عاملیت الگوریتمی

چهار بخش پیشین ابعاد مختلف ظهور ترجمه الگوریتمی را نشان دادند؛ اما پرسش باقی‌مانده این است که چرا جایگاه الگوریتم در همه سامانه‌ها به یک میزان تثبیت نمی‌شود. ترجمه الگوریتمی همواره به تثبیت موفق و بی‌مناقشه یک شبکه نمی‌انجامد، چون کنشگران ممکن است نقش‌های پیشنهادی را نپذیرند یا روابط ایجاد شده را تغییر دهند؛ از این رو، تحلیل ترجمه به‌عنوان فرایندی خطی و قطعی نمی‌تواند پیچیدگی شکل‌گیری عاملیت الگوریتمی را توضیح دهد.

مقایسه پنج مورد بررسی‌شده نشان می‌دهد که تفاوت میان آن‌ها نه در وجود یا نبود الگوریتم، بلکه در جایگاهی است که الگوریتم در فرآیند شناخت، طراحی و تصمیم‌گیری به دست می‌آورد. این تفاوت را می‌توان بر پایه سه عامل تعدیل‌کننده صورت‌بندی کرد (جدول ۵). نخست، میزان تجویزگری مدل؛ الگوریتم ممکن است صرفاً اطلاعات تحلیلی تولید کند، یا فراتر از آن در تولید، رتبه‌بندی و محدودسازی گزینه‌های تصمیم مشارکت داشته باشد. هرچه نقش الگوریتم از توصیف به پیشنهاد و محدودسازی نزدیک‌تر شود، میزان مشارکت آن در شکل‌دهی تصمیم افزایش می‌یابد. این تفاوت در بخش ۴-۱ نیز آشکار بود «تحلیل ریخت‌شناختی زبان توصیف محیط را می‌سازد، درحالی‌که مدل مولد افزون بر آن فضای گزینه را نیز شکل می‌دهد». دوم، میزان پیوند با زیر ساخت رسمی تصمیم‌گیری؛ خروجی یک مدل زمانی اثرگذاری بیشتری پیدا می‌کند که در فرآیندهای سازمانی، مقرراتی یا بودجه‌ای وارد شود. الگوریتمی که صرفاً در مرحله آزمایشی یا مشورتی باقی می‌ماند، جایگاه متفاوتی از الگوریتمی دارد که معیار رسمی تخصیص منابع یا ارزیابی طرح‌ها شده است. همین سازوکار در بخش ۴-۴ درباره سرنوشت نهادی سنجه‌ها توضیح داده شد.

سوم، امکان بازگشت و مداخله انسانی؛ میزان باز بودن فرایند برای بررسی و رد خروجی الگوریتمی، تعیین می‌کند تصمیم تا چه اندازه مذاکره‌پذیر می‌ماند. این همان تمایزی است که در بخش ۴-۳ میان سامانه مولد و سامانه توصیه‌گر مشاهده شد؛ بنابراین عاملیت الگوریتمیک را باید پدیده‌ای پیوسته و وابسته به شرایط دانست، نه ویژگی ثابت یا دوگانه سامانه‌های هوشمند. این صورت‌بندی، امکان تحلیل انتقادی فناوری را بدون جبرگرایی فناورانه فراهم می‌کند.

جدول ۵- مقایسه موارد پژوهش بر پایه سه تعدیل‌گر شدت عاملیت الگوریتمیک

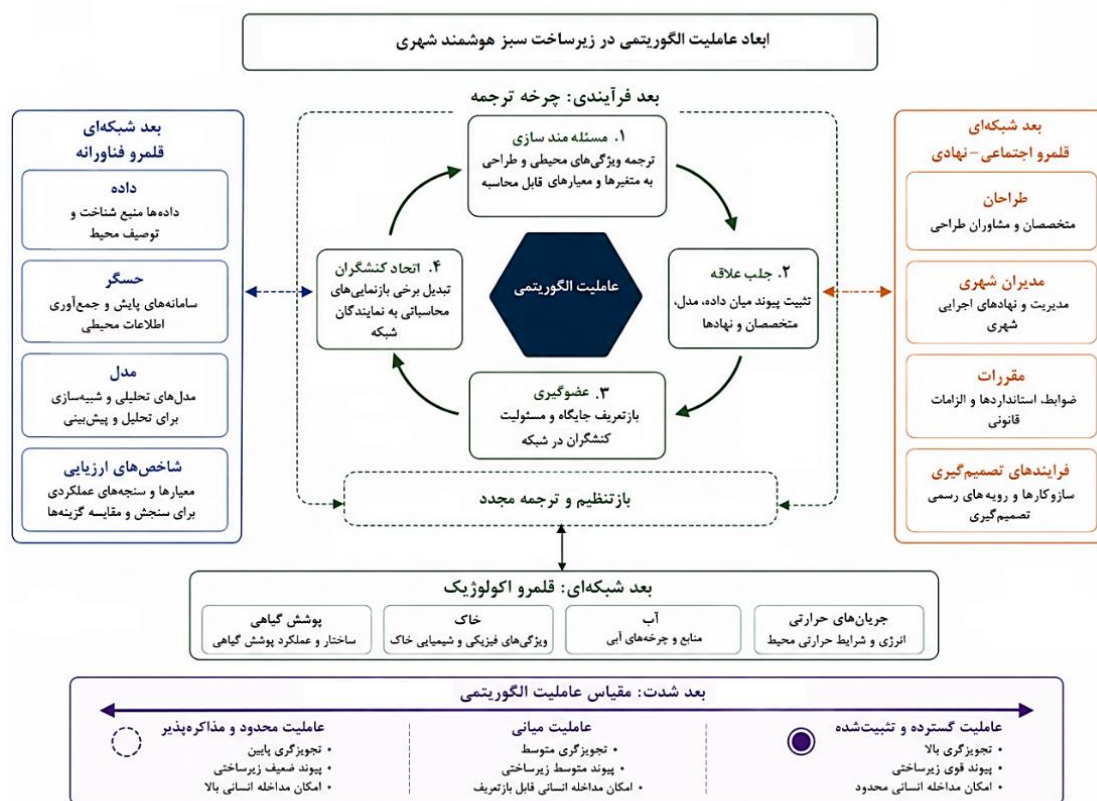
مورد	تجویزگری مدل	پیوند زیرساختی	امکان مداخله انسان	تفسیر تحلیلی	ماخذ
چارچوب بهینه‌سازی طراحی فضای سبز مبتنی بر شبکه عصبی عمیق	بالا؛ تولید و رتبه‌بندی گزینه	بالا؛ ادغام قیود مقرراتی در ساختار مدل	محدود؛ فضای گزینه پیش از انتخاب شکل می‌گیرد	میانجی‌گری الگوریتمی قوی	Wang & Zhang, 2025
تحلیل الگوی فضایی ریخت‌شناختی و جنگل تصادفی	پایین؛ تبیینی، بدون تولید گزینه	محدود	بالا	تولید زبان تحلیلی برای مشاهده محیط	Peng et al., 2026
شاخص ساعات جزیره گرمایی	متوسط؛ از رهگذر تعریف معیار	وابسته به پذیرش نهادی	قابل بازتعریف	عاملیت از مسیر معیارسازی	Oh et al., 2020
دوقلوی دیجیتال شهری	متغیر؛ وابسته به معماری	بالقوه بالا	وابسته به ساختار حکمرانی	ظرفیت دوگانه: تمرکز یا مشارکت	Dawkins & Kitchin, 2025
سامانه سیلوپسیت	متوسط؛ توصیه‌گر نه تصمیم‌گیر	محدودتر	بالا	عاملیت محدود و مذاکره‌پذیر	Nicol et al., 2026

۵- بحث

یافته‌های پژوهش را می‌توان در قالب یک چارچوب مفهومی سنتز نمود. در این چارچوب، زیرساخت سبز هوشمند به‌عنوان یک آرایش اجتماعی-فنی-اکولوژیک در نظر گرفته می‌شود که در آن الگوریتم‌ها، داده‌ها، متخصصان، نهادهای تصمیم‌گیر و عناصر محیطی از طریق فرآیندهای ترجمه‌ای به یکدیگر پیوند می‌یابند. بر این اساس، چارچوب پیشنهادی عاملیت الگوریتمی را نه ویژگی مستقل فناوری، بلکه پیامد تعامل میان سه بُعد فرآیندی، شبکه‌ای و شدت در نظر می‌گیرد (تصویر ۲).

- **بعد فرآیندی:** چرخه ترجمه است؛ چهار لحظه ترجمه به‌عنوان فرآیندی خطی و پایان‌یافته در نظر گرفته نمی‌شوند، بلکه چرخه‌ای بازگشتی را شکل می‌دهند: در مسئله‌مند سازی، ویژگی‌های محیطی و طراحی به متغیرها و معیارهای قابل محاسبه ترجمه می‌شوند؛ در جلب علاقه، پیوند میان داده، مدل، متخصصان و نهادهای تثبیت می‌شود؛ در عضوگیری، جایگاه کنشگران بازتعریف می‌گردد؛ و در هم‌آوایی کنشگران، برخی بازنمایی‌های محاسباتی به نمایندگان شبکه بدل می‌شوند. باین‌حال، این مراحل به معنای پایان فرآیند ترجمه نیستند؛ تغییر در دانش تخصصی، الزامات نهادی، شرایط اکولوژیک یا اهداف طراحی می‌تواند به بازنگری در داده‌ها، معیارها و ساختار مدل منجر شود؛ بنابراین، شبکه طراحی همواره در معرض ترجمه مجدد و بازتنظیم قرار دارد.
- **بعد شبکه‌ای:** تعامل سه قلمرو است، قلمرو فناوریانه شامل داده‌ها، حسگرها، مدل‌ها و شاخص‌های ارزیابی است و تعیین می‌کند کدام ویژگی‌های محیطی قابلیت تبدیل به داده و معیار را پیدا می‌کنند. قلمرو اجتماعی-نهادی شامل طراحان، مدیران شهری، مقررات و سازوکارهای تصمیم‌گیری است و تعیین می‌کند خروجی محاسباتی چگونه تفسیر، اعتبارسنجی و در فرآیندهای رسمی وارد شود؛ در این سطح، مسئله اصلی نه جایگزینی تصمیم انسانی، بلکه بازتعریف رابطه میان دانش تخصصی، بازنمایی محاسباتی و مسئولیت تصمیم است. قلمرو اکولوژیک شامل پوشش گیاهی، خاک، آب و جریان‌های حرارتی و ... است؛ عناصر اکولوژیک صرفاً موضوع مداخله نیستند، بلکه از طریق ویژگی‌های عملکردی و محدودیت‌های مادی خود بر مسیرهای ممکن طراحی اثر می‌گذارند. این برداشت به معنای نسبت دادن عاملیت مستقل به عناصر طبیعی نیست، بلکه بر نقش شرایط مادی محیط در سازمان‌دهی روابط شبکه تأکید دارد.
- **بعد شدت:** سومین بعد چارچوب، سه تعدیل‌گر را به‌عنوان یک مقیاس تحلیلی وارد مدل می‌کند. ارزش این بعد آن است که چارچوب را از یک طبقه‌بندی توصیفی به ابزاری تشخیصی ارتقا می‌دهد؛ به‌جای آنکه هر سامانه هوشمند را به‌طور یکسان «میانجی» بنامد، امکان موقعیت‌یابی سامانه‌های مختلف را بر پیوستاری از عاملیت محدود و مذاکره‌پذیر تا عاملیت گسترده و تثبیت‌شده فراهم می‌کند.





تصویر ۲- چارچوب مفهومی عاملیت الگوریتمیک در طراحی زیرساخت سبز هوشمند شهری

بر مبنای آنچه ارائه شد، یکی از دلالت‌های اصلی تحلیل حاضر، تبدیل تمایز واسطه/میانجی از یک دوگانه مفهومی به متغیری پیوسته و قابل سنجش است. در صورت‌بندی اولیه لاتور (Latour, 2005)، این تمایز وضعیتی دوگانه دارد: یک فناوری یا واسطه است یا میانجی؛ اما مقایسه پنج مورد نشان می‌دهد که تحقق این دو وضعیت، بسته به سه شرط یادشده، شدت‌های متفاوتی دارد. تحلیل ریخت‌شناختی، زبان توصیف محیط را می‌سازد، اما فضای گزینه را محدود نمی‌کند (Peng et al., 2026)؛ سامانه توصیه‌گر گزینه پیشنهاد می‌دهد، اما امکان رد آن را حفظ می‌کند (Nicol et al., 2026)؛ و چارچوب مولد، هم‌زمان معیار و فضای گزینه را شکل می‌دهد (Wang et al., 2025)؛ بنابراین، حتی یک سامانه واحد نیز با تغییر جایگاه نهادی خود می‌تواند در موقعیت دیگری از این پیوستار قرار گیرد.

این صورت‌بندی، ارزیابی سامانه‌های الگوریتمی بر پایه دقت، کارایی و بهینگی را نیز از نظر جایگاه آن‌ها در شبکه تصمیم‌گیری محدود می‌کند؛ زیرا سامانه‌هایی با عملکرد محاسباتی مشابه ممکن است نقش‌های متفاوتی در تعریف مسئله و توزیع نقش‌ها داشته باشند. در نتیجه، سنج‌های عملکردی به‌تنهایی برای توصیف میزان مشارکت یک سامانه در فرایند تصمیم‌گیری کافی نیستند و سه تعدیل‌گر پیشنهادی، بُعد دیگری از ارزیابی را آشکار می‌کنند. این تفاوت همچنین با تبیین جبرگرایانه عاملیت الگوریتمیک سازگار نیست؛ زیرا اگر این عاملیت پیامد خودکار به‌کارگیری فناوری هوشمند بود، انتظار می‌رفت موارد بررسی‌شده الگوی مشابهی نشان دهند. درحالی‌که تفاوت میان آن‌ها به معماری سامانه و جایگاه نهادی آن مربوط بود. بر این اساس، شدت و جهت اثرگذاری الگوریتم را می‌توان متغیری وابسته به طراحی سامانه و ترتیبات نهادی در نظر گرفت، نه ویژگی‌ای برخاسته از فناوری به‌تنهایی.

محل شکل‌گیری عاملیت نیز از دیگر دلالت‌های این تحلیل است. ادبیات موجود، منشأ سوگیری الگوریتمی را از داده‌های ورودی به انتخاب متغیرها، ساختار مدل و معیارهای ارزیابی و مفهوم شفافیت را از تفسیرپذیری پسینی خروجی به اهداف و معیارهای طراحی گسترش داده است (Stinson, 2022; Loi et al., 2021; De Laat, 2018). بازخوانی موارد، این بحث را به مرحله‌ای پیش‌تر منتقل می‌کند: پیش از انتخاب متغیر یا ساخت مدل، درباره اینکه کدام ویژگی محیطی قابلیت تبدیل به داده و معیار را دارد تصمیم‌گیری می‌شود. در سنجه تجمعی مواجهه حرارتی، تغییر معیار از شدت لحظه‌ای به تداوم زمانی، نوع مسئله طراحی را نیز تغییر داد (Oh et al., 2020)؛ در چارچوب مولد نیز ورود قیود مقرراتی به ساختار ارزیابی، ضوابط نهادی را از



عاملی بیرونی به بخشی از منطق تولید گزینه تبدیل کرد (Wang et al., 2025). در هر دو مورد، مسئله صرفاً سوگیری در پردازش نیست، بلکه شکل‌گیری مرز میان امر قابل مشاهده و امر نامرئی در فرایند تصمیم است. از این منظر، شکاف پاسخ‌گویی مورد تأکید ادبیات حکمرانی الگوریتمی (Busuioc, 2021) در طراحی زیرساخت سبز به سطحی پیش از پردازش داده می‌رسد؛ یعنی به سازوکاری که دامنه امر قابل محاسبه را تعیین می‌کند و می‌تواند در جانمایی فضای سبز، انتخاب گونه و اولویت‌بندی مداخلات فضایی پیامد داشته باشد.

۶- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با تکیه بر نظریه کنشگر-شبکه، جایگاه الگوریتم در طراحی زیرساخت سبز هوشمند شهری را در قالب رابطه‌ای میان کنشگران انسانی و غیرانسانی بررسی کرد. یافته‌ها نشان داد نقش الگوریتم را نمی‌توان به ابزاری خنثی یا عاملی مستقل و تعیین‌کننده فروکاست؛ بلکه این نقش در شبکه‌ای از روابط، معیارها و فرایندهای تصمیم‌گیری شکل می‌گیرد. بر این اساس، پاسخ دو پرسش پژوهش را می‌توان در دو سطح مرتبط، یعنی چگونگی شکل‌گیری این نقش و شرایط تغییر شدت آن، جمع‌بندی کرد.

در سطح نخست، پاسخ به پرسش درباره چگونگی درگیر شدن الگوریتم با طراحان، داده‌های محیطی، نهادها و عناصر اکولوژیک، در قالب چهار لحظه پیوسته ترجمه صورت‌بندی شد: از تبدیل مفاهیم چندبعدی به متغیرهای محاسباتی در مسئله‌مندی تا تبدیل سنج‌ها به زبان مشترک ارزیابی در هم‌آوایی کنشگران. در این فرایند، الگوریتم نه جایگزین قضاوت انسانی می‌شود و نه صرفاً مجری آن باقی می‌ماند؛ بلکه از طریق تعیین آنچه قابل مشاهده، اندازه‌گیری و مداخله تلقی می‌شود، از همان مرحله تعریف مسئله در شبکه تصمیم مشارکت می‌کند. این نحوه ورود به فرایند تصمیم، مبنای تمایز میان صرف حضور یک سامانه الگوریتمی و شکل‌گیری عاملیت الگوریتمیک است. به کارگیری فناوری هوشمند به‌خودی‌خود به معنای تغییر ماهیت تصمیم‌گیری شهری نیست؛ الگوریتم زمانی در جایگاه میانجی قرار می‌گیرد که از تولید اطلاعات فراتر رود و در تعریف مسئله، تعیین معیار و محدودسازی فضای گزینه نقش پیدا کند. باین‌حال، این نقش ثابت نیست و شدت آن با شرایط استقرار سامانه تغییر می‌کند. از این رو، پاسخ پرسش دوم بر این مبنای صورت‌بندی شد که عاملیت الگوریتمیک پیوستاری از شدت‌هاست که به سه شرط وابسته است: تجویزگری مدل، پیوند با ساختار رسمی تصمیم و امکان مداخله انسانی؛ صورت‌بندی‌ای که تمایز سامانه‌های صرفاً اطلاعاتی از سامانه‌های شکل‌دهنده به فضای گزینه را ممکن می‌سازد.

ترکیب این دو سطح، ارتباط یافته‌های پژوهش با سه شکاف ادبیات را نیز روشن می‌کند. در ارتباط با شکاف هستی‌شناختی، شرایط میانجی‌شدن الگوریتم در قالب سه تعدیل‌گر ارائه شد؛ در ارتباط با شکاف نظری-کاربردی، چهار لحظه ترجمه به سازوکارهای انضمامی طراحی، از قیود پهنه‌بندی تا صفات کارکردی گونه‌های درختی، پیوند خورد؛ و در ارتباط با شکاف هنجاری، شفافیت و پاسخ‌گویی به مراحل مشخص طراحی، شامل تعریف مسئله، انتخاب معیار و شکل‌گیری فضای گزینه، مرتبط شدند. از این پیوند می‌توان دلالت‌هایی عملی برای طراحی و برنامه‌ریزی شهری استخراج کرد. به‌گونه‌ای که اگر اثرگذاری الگوریتم از مرحله تعریف مسئله آغاز شود، پاسخ‌گویی صرفاً با ارزیابی خروجی مدل حاصل نمی‌شود و فرایند شکل‌گیری داده‌ها، معیارها و قیود طراحی نیز باید قابل بررسی باشد. در این راستا، «شنا سنامه ترجمه الگوریتمیک» می‌تواند سازوکاری مفهومی برای ثبت مفروضات و روشن کردن مسئولیت میان تولیدکنندگان داده، توسعه‌دهندگان مدل، طراحان و نهادهای سیاست‌گذار باشد. همچنین، سه تعدیل‌گر می‌تواند برای ارزیابی سامانه‌های هوشمند پیش از استقرار به کار روند و طراح با بررسی میزان نقش مدل در تولید و محدودسازی گزینه‌ها، اثرگذاری خروجی بر تصمیم‌نهایی و امکان بازیابی، جایگاه سامانه را ارزیابی کند. این چارچوب همچنین می‌تواند در تدوین دستورالعمل‌های به‌کارگیری هوش مصنوعی در مدیریت فضای سبز و تقویت نگاه انتقادی در آموزش طراحی شهری مورد استفاده قرار گیرد.

باین‌حال، پژوهش با محدودیت‌هایی نیز همراه است. تحلیل بر مطالعات منتشرشده تکیه داشته و فرایند طراحی به‌صورت مستقیم مشاهده نشده است؛ بنابراین، ممکن است بخشی از مقاومت‌ها و مذاکراتی که در گزارش‌های فنی ثبت نشده‌اند، در تحلیل بازتاب نیافته باشند. از سوی دیگر، بی‌توجهی به روابط قدرت در تحلیل شبکه‌ای می‌تواند نقش کنشگران انسانی را کم‌رنگ کند؛ هرچند مسئله نابرابری فضایی در تحلیل مورد توجه قرار گرفت، بررسی دقیق‌تر عدالت فضایی در شبکه‌های الگوریتمی به مطالعات بیشتری نیاز دارد. همچنین، موارد بررسی‌شده عمدتاً در زمینه‌هایی با ظرفیت داده‌ای و نهادی توسعه‌یافته

پی‌نوشت

شکل گرفته‌اند و تعمیم نتایج به زمینه‌های متفاوت باید با احتیاط انجام شود. بر همین مبنا، پژوهش‌های آینده می‌توانند چارچوب پی‌شنه‌ای را در پروژه‌های واقعی آزمون کرده و سنجش‌پذیری سه مؤلفه شدت عاملیت را برر سی کنند؛ همچنین مطالعه نحوه ترجمه ارزش‌های اجتماعی، فرهنگی و اکولوژیک منظر به معیارهای محاسباتی می‌تواند رابطه میان فناوری، محیط و تصمیم‌گیری شهری را دقیق‌تر تبیین کند.

در مجموع، می‌توان گذار به طراحی هوشمند زیرساخت سبز را نه جایگزینی ابزار سنتی با فناوری دیجیتال، بلکه تغییری در شیوه تولید دانش، سازمان‌دهی تصمیم و توزیع عاملیت در فرایند طراحی شهری در نظر گرفت. در این چارچوب، بهره‌گیری از ظرفیت پیش‌بینی و بهینه‌سازی هوش مصنوعی می‌تواند مستلزم توجه به سه شرط شدت عاملیت باشد؛ به‌گونه‌ای که این شرایط قابل مشاهده و قابل ارزیابی باقی بمانند و در کنار آن، امکان بازنگری در تصمیم، توجه به عدالت فضایی و حفظ تنوع اکولوژیک نیز در فرایند طراحی حفظ شود.

- 1- Lee et al
- 2- Oh et al
- 3- Peng et al
- 4- Tang & Chung
- 5- Wang & Zhang
- 6- Cresswell et al
- 7- Gunderson et al
- 8- Ryan et al
- 9- Dawkins & Kitchin
- 10- Busuioc
- 11- De Laat
- 12- Stinson, 2022
- 13- Scopus
- 14- Web of Science
- 15- PubMed
- 16- Latour
- 17- Callon
- 18- Law
- 19- Assemblage
- 20- Problematization
- 21- Interesement
- 22- Enrollment
- 23- Mobilization
- 24- Deep Neural Network-based Green Space Design Optimization Framework (DNN-GSOF)
- 25- Urban Heat Island-Hours (UHI-hours)

SylvCiT^{۲۶}: سامانه‌ای متن‌باز مبتنی بر یادگیری ماشین و بهینه‌سازی که گونه‌های درختی مناسب و متنوع را بر پایه صفات کارکردی، موقعیت کاشت و درختان مجاور توصیه می‌کند و هدف آن پیشینه‌سازی تنوع کارکردی در مقیاس‌های فضایی مختلف است.

- 27- Morphological Spatial Pattern Analysis

حامیان مالی: مقاله حامی مالی نداشته است.

اعلام عدم تعارض منافع: نویسندگان اعلام می‌دارد که در انجام این پژوهش هیچ‌گونه تعارض منافع وجود نداشته است.

بیانیه شفافیت کاربست هوش مصنوعی: نویسندگان اعلام می‌کند که در نگارش مقاله از هیچ‌گونه ابزار هوش مصنوعی استفاده نشده است. تمامی محتوای علمی، تحلیل‌ها، نتایج و مسئولیت نهایی مقاله برعهده نویسنده است.

قدردانی: اینجانب از همه افراد برای مشاوره علمی در این مقاله سپاسگزارم.

- حاتمی نژاد، حسین؛ پوراحمد، احمد؛ زنگنه شهرکی، سعید و کانونی، رضا. (۱۴۰۲). کاربرست نظریه کنشگر- شبکه برونو لاتور در خوانش مفهوم فضا. *برنامه‌ریزی فضایی*، ۱۳ (۳)، ۹۷-۱۲۵. <https://doi.org/10.22108/sppl.2023.137926.173>
- رستمی، حمیدرضا؛ الهی، شعبان؛ معینی، علی و حسن زاده، علیرضا. (۱۴۰۵). همزیستی انسان و فناوری معنایی از منظر نظریه کنشگر- شبکه. *تعامل انسان و اطلاعات*، ۸ (۴)، ۱-۱۴. <http://hii.khu.ac.ir/article-1-3020-fa.html>
- زهرانی، داود؛ ربانی خورسگانی، علی؛ شریف‌زاده، رحمان و قنبری برزبان، علی. (۱۴۰۰). عاملیت‌های نامتجانس در جامعه‌شناسی بیش از انسان: واکاوی جایگاه عاملیت در رویکردهای بیش از انسان در جامعه‌شناسی، با تأکید بر نظریه کنشگر- شبکه. *جامعه‌پژوهی فرهنگی*، ۱۲ (۲)، ۸۱-۱۱۰. <https://doi.org/10.30465/scs.2021.35214.2372>
- شیرگیر، المیرا؛ خیرالدین، رضا و بهزادفر، مصطفی. (۱۳۹۸). تبیین الگوی مداخله در زیر ساخت‌های سبز شهری با هدف ایجاد تاب‌آوری اکولوژیک شهری با تأکید بر تغییرات اقلیمی (نمونه موردی: محله یوسف‌آباد شهر تهران). *محيث‌شناسی*، ۴۵ (۳)، ۵۴۵-۵۶۵. <https://doi.org/10.22059/jes.2020.290829.1007933>
- فارابی‌اصل، نیر؛ رفیعیان، مجتبی و علیزاده، بهرام. (۱۴۰۲). تحلیل تولید فضاهای شهری از منظر امر سیاسی با رویکرد نظریه شبکه کنشگر (نمونه مطالعاتی: اراضی عباس‌آباد تهران). *مطالعات جامعه‌شناختی شهری*، ۱۳ (۴۸)، ۱۱۱-۱۴۱. <https://doi.org/10.30495/uss.2023.709490>
- کاظمی، رضا و رضایی، مریم. (۱۴۰۳). نقش زیر ساخت‌های سبز و فناوری‌های هوشمند در تاب‌آوری شهری تهران. *فصلنامه فناوری و توسعه شهری*، ۹ (۲)، ۹۸-۱۲۰. <https://doi.org/10.22108/jtud.2024.139561.1286>
- کانونی، رضا؛ حاتمی نژاد، حسین؛ پوراحمد، احمد و زنگنه شهرکی، سعید. (۱۴۰۲). دلالت‌های نظریه کنشگر- شبکه برونو لاتور در برنامه‌ریزی شهری با تأکید بر دستگاه‌های غیررسمی. *دانش شهرداری*، ۷ (۱)، ۲۸-۵۱. <https://doi.org/10.22124/UPK.2023.22901.1802>
- نوروزی، مریم و سوزنجی، کیانوش. (۱۴۰۱). بررسی و مقایسه نقش زیر ساخت‌های شهری در تشکیل شبکه سبز شهری. *معماری و شهرسازی آرمان‌شهر*، ۱۵ (۴۰)، ۲۲۱-۲۴۲. <https://doi.org/10.22034/aaud.2022.269053.2429>
- Andersson, E., Langemeyer, J., Borgström, S., McPhearson, T., Haase, D., Kronenberg, J., Barton, D. N., Davis, M., Naumann, S., Röschel, L., & Baró, F. (2019). Enabling green and blue infrastructure to improve contributions to human well-being and equity in urban systems. *BioScience*, 69(7), 566–574. <https://doi.org/10.1093/biosci/biz058>
- Barad, K. (2007). *Meeting the universe halfway: Quantum physics and the entanglement of matter and meaning*. Duke University Press.
- Batty, M. (2013). Big data, smart cities and city planning. *Dialogues in Human Geography*, 3(3), 274–279. <https://doi.org/10.1177/2043820613513390>
- Bellanova, R., & de Goede, M. (2022). The algorithmic regulation of security: An infrastructural perspective. *Regulation & Governance*, 16(1), 102–118. <https://doi.org/10.1111/rego.12338>
- Busuioc, M. (2021). Accountable artificial intelligence: Holding algorithms to account. *Public Administration Review*, 81(5), 825–836. <https://doi.org/10.1111/puar.13293>
- Callon, M. (1986). Some elements of a sociology of translation: Domestication of the scallops and the fishermen of St Briec Bay. In J. Law (Ed.), *Power, action and belief: A new sociology of knowledge?* (pp. 196–233). Routledge.
- Caprotti, F., Chang, I.-C. C., & Joss, S. (2022). Beyond the smart city: A typology of platform urbanism. *Urban Transformations*, 4, 4. <https://doi.org/10.1186/s42854-022-00033-9>
- Cresswell, K. M., Worth, A., & Sheikh, A. (2010). Actor-Network Theory and its role in understanding the implementation of information technology developments in healthcare. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 10, 67. <https://doi.org/10.1186/1472-6947-10-67>
- Dawkins, O., & Kitchin, R. (2025). Urban digital twins: Digital twins for participatory steering. *New Media & Society*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1177/14614448251338280>
- de Laat, P. B. (2018). Algorithmic decision-making based on machine learning from big data: Can transparency restore accountability? *Philosophy & Technology*, 31(4), 525–541. <https://doi.org/10.1007/s13347-017-0293-z>



- Frost, N. (2024). The impoverished publicness of algorithmic decision making. *Oxford Journal of Legal Studies*, 44(4). <https://doi.org/10.1093/ojls/ggae027>
- Fuentes, S., Tongson, E., & Gonzalez Viejo, C. (2021). Urban green infrastructure monitoring using remote sensing from integrated visible and thermal infrared cameras mounted on a moving vehicle. *Sensors*, 21(1), 295. <https://doi.org/10.3390/s21010295>
- Giddens, A. (1984). *The constitution of society: Outline of the theory of structuration*. Polity Press.
- Gunderson, M., Solberg, R., Kronman, L., De Seta, G., & Rettberg, J. W. (2024). Machine vision situations: Tracing distributed agency. *Open Research Europe*, 4, 12. <https://doi.org/10.12688/openreseurope.16112.2>
- Hansen, R., & Pauleit, S. (2014). From multifunctionality to multiple ecosystem services? A conceptual framework for multifunctionality in green infrastructure planning for urban areas. *Ambio*, 43(4), 516–529. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0510-2>
- Helmrich, A., Kuhn, A., Roque, A., Santibanez, A., Kim, Y., Grimm, N. B., & Chester, M. (2023). Interdependence of social-ecological-technological systems in Phoenix, Arizona: Consequences of an extreme precipitation event. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 4, 21. <https://doi.org/10.1186/s43065-023-00085-6>
- Jia, Y., & Turcu, C. (2025). Climate, health, and urban green infrastructure: The evidence base and implications for urban policy and spatial planning. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 22(12), 1842. <https://doi.org/10.3390/ijerph22121842>
- Latour, B. (2005). *Reassembling the social: An introduction to actor-network-theory*. Oxford University Press.
- Lee, D. H., Park, H. Y., & Lee, J. (2024). A review on recent deep learning-based semantic segmentation for urban greenness measurement. *Sensors*, 24(7), 2245. <https://doi.org/10.3390/s24072245>
- Li, L., & Carter, J. (2025). Exploring the relationship between urban green infrastructure connectivity, size and multifunctionality: A systematic review. *Landscape Ecology*, 40, 60. <https://doi.org/10.1007/s10980-025-02069-1>
- Loi, M., Ferrario, A., & Viganò, E. (2021). Transparency as design publicity: Explaining and justifying inscrutable algorithms. *Ethics and Information Technology*, 23(3), 253–263. <https://doi.org/10.1007/s10676-020-09564-w>
- Lyu, F., Wang, S., Han, S. Y., Catlett, C., & Wang, S. (2022). An integrated cyberGIS and machine learning framework for fine-scale prediction of urban heat island using satellite remote sensing and urban sensor network data. *Urban Informatics*, 1, 6. <https://doi.org/10.1007/s44212-022-00002-4>
- Nicol, M., St-Denis, A., Belbahar, R. M., Maure, F., Gascon-Afriat, A., Messier, C., & Meurs, M.-J. (2026). SylvCIT: An AI-based support to urban forest resilience. *PLOS ONE*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0339173>
- Oh, J. W., Ngarambe, J., Duhirwe, P. N., Yun, G. Y., & Santamouris, M. (2020). Using deep-learning to forecast the magnitude and characteristics of urban heat island in Seoul Korea. *Scientific Reports*, 10, 3559. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60632-z>
- Peng, J., Zhang, S., Li, X., Chen, R., & Huang, X. (2026). Research on the coupling mechanism between green space morphology and the urban heat island effect based on machine learning: A case study of Dali City, China. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-30327-4>
- Pinch, T. J., & Bijker, W. E. (1984). The social construction of facts and artefacts: Or how the sociology of science and the sociology of technology might benefit each other. *Social Studies of Science*, 14(3), 399–441. <https://doi.org/10.1177/030631284014003004>
- Ryan, T., Ryan, N., & Hynes, B. (2024). The integration of human and non-human actors to advance healthcare delivery: Unpacking the role of actor-network theory, a systematic literature review. *BMC Health Services Research*, 24, 1337. <https://doi.org/10.1186/s12913-024-11866-4>
- Silva, B. N., Khan, M., Jung, C., Seo, J., Muhammad, D., Han, J., Yoon, Y., & Han, K. (2018). Urban planning and smart city decision management empowered by real-time data processing using big data analytics. *Sensors*, 18(9), 2994. <https://doi.org/10.3390/s18092994>
- Stinson, C. (2022). Algorithms are not neutral: Bias in collaborative filtering. *AI and Ethics*, 2(4), 763–770. <https://doi.org/10.1007/s43681-022-00136-w>

Tang, X., & Chung, W.-J. (2024). Automated urban landscape design: An AI-driven model for emotion-based layout generation and appraisal. *PeerJ Computer Science*, 10, e2426. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.2426>

