

Urban Microgrid Energy Demand Management through a System Dynamics Approach: Co-evolutionary Analysis of Supply, Demand, and Digital Governance in Ekbatan Township

Mohammadmehdi Kafshvandi¹, Saeed Givehchi², Gholamreza Nabi Bidhendi²

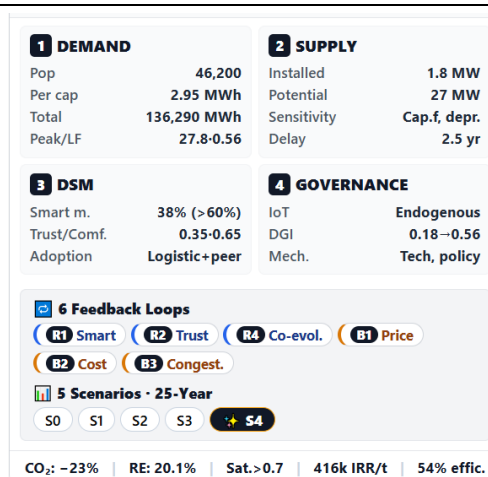
¹ Department of Environment, Kish International Campus, University of Tehran, Kish, Iran

² Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

HIGHLIGHTS

- A system dynamics model simulates the interaction of energy demand, renewable supply, and digital governance in Tehran's Ekbatan microgrid.
- The combined scenario achieves a 23% CO₂ reduction and a 20.1% effective renewable energy share.
- Sustainable transition requires smart meter coverage above 60% and maintaining comfort levels above the critical threshold of 0.65.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 6 July 2026

Revised: 23 September 2026

Accepted: 2 October 2026

Available online: 2 October 2026

*Correspondence: givehchi@ut.ac.ir

How to cite this article:

Kafshvandi, M., Givehchi, S., & Nabi Bidhendi, G. (2027). Urban microgrid energy demand management through a system dynamics approach: Co-evolutionary analysis of supply, demand, and digital governance in Ekbatan township. *System Engineering and Productivity*, 7 (2), 169-196.

Keywords:

System Dynamics
Demand-Side Energy Management
Urban Microgrid, Renewable Energy
Trust-Participation Feedback Loop
Ekbatan Township
Scenario Analysis

ABSTRACT

The peak electricity demand–sustainable supply gap in smart cities is a nonlinear challenge that static models cannot address due to their inability to capture generative feedback structures. This study develops a system dynamics model to analyze the interaction of urban energy demand, renewable supply, demand-side management, and digital governance in Tehran's Ekbatan microgrid. The model is built upon six feedback loops: the reinforcing smart grid sustainability loop; the reinforcing demand-response adoption and social trust loop incorporating neighborhood conformity; the reinforcing digital governance co-evolution loop that endogenizes institutional maturity; and the balancing loops of dynamic pricing with rebound effects, low-carbon transition costs, and grid congestion. Implemented in Vensim DSS with 87 variables and calibrated using ten-year empirical data (RMSE <10%, R² >0.80), behavioral parameters were estimated via a field survey (n=66) and expert modeling workshop. Sensitivity analysis revealed capacity factor and depreciation rate as the most influential parameters on renewable share. Five 25-year scenarios were simulated. The optimal combined scenario, synergizing supply and demand measures, achieves a 23% CO₂ reduction, 20.1% effective renewable share, and consumer satisfaction above 0.70. The demand-centric scenario, despite an 18% peak-to-average reduction, lowers satisfaction to 0.58 and triggers a 40% rebound effect. The critical comfort threshold of 0.65 was identified, beyond which the trust-participation loop reverses. The Digital Governance Index rises from 0.18 to 0.56 in the combined scenario. Cost-effectiveness analysis shows the combined scenario is 54% more efficient than the supply-centric alternative. A sustainable transition requires smart meter coverage exceeding 60% and maintaining comfort levels above 0.65.

1. Introduction

The accelerating pace of urbanization in the 21st century has placed unprecedented pressure on urban energy systems. Cities, now home to over 55% of the world's population, account for approximately 70% of global energy consumption and greenhouse gas emissions (Keirstead et al., 2012). The transition toward smart cities, characterized by the integration of distributed renewable energy resources, has emerged as a central strategy for decarbonizing urban energy systems (Calvillo et al., 2016). In Iran, the transition to sustainable electricity systems has been targeted through ambitious renewable scenarios up to the 2040 horizon (Pazuki et al., 2025), and recent analyses indicate that without integrated resource management, the long-term sustainability of the energy supply system remains uncertain (Golfam & Ashofteh, 2025a, b). However, a fundamental challenge persists: the widening gap between peak electricity demand and sustainable supply capacity. The intermittent nature of renewable sources such as solar photovoltaic, coupled with continuously growing demand, subjects' urban distribution networks to unprecedented volatility and instability. This gap is not a static problem but a dynamic phenomenon emerging from the complex interaction of technical, economic, social, and institutional subsystems—characterized by feedback loops, structural delays, accumulation and depreciation processes, and nonlinear relationships (Stermann, 2000).

Conventional static models—including multivariate regression, linear optimization, and computable general equilibrium models—are fundamentally incapable of causally analyzing or formally representing the feedback structures that generate this dynamic behavior (Forrester, 1961). While System Dynamics (SD) models have been applied to urban energy systems (Feng et al., 2013), a critical gap remains: the soft, endogenous dynamics of consumer behavior—including technology trust, comfort sensitivity, and peer influence—are rarely integrated with empirical field data and modeled endogenously (John, 2007). Furthermore, the concept of "digital governance" as a suprasystem layer in smart cities is predominantly treated as an exogenous assumption rather than a variable co-evolving with technology and institutions.

Beyond the technical and economic subsystems, urban system resilience and vulnerability in the face of hazards constitute another dimension of the smart city that is deeply intertwined with social and behavioral capital. Recent studies in Iran demonstrate that community preparedness against crises is itself a function of collective behavior and local trust networks. Karimi et al. (2025), in a critical review of hydrogen sulfide gas leaks, identified behavioral gaps in emergency preparedness and community response, emphasizing the necessity of modeling behavioral dynamics in early warning

systems. Givhechi et al. (2024) analyzed the consequences affecting the assets of an urban system facing scenario-based hazards and demonstrated that water and wastewater infrastructure are among the most vulnerable assets. In this vein, Vejdani Nozar et al. (2025), studying the city of Hamedan, evaluated the effects of environmental pollution on urban water and wastewater assets and argued that neglecting the feedback loops between citizen behavior, infrastructure quality, and ecosystem health renders resilience planning ineffective. These insights align with the concept of digital governance and the suprasystem layer in the present study, as governance maturity only leads to resilience when informed citizen participation and institutional trust are simultaneously strengthened.

In parallel with SD modeling, a broad spectrum of quantitative studies in Iran has examined the techno-economic and environmental dimensions of energy systems using optimization and life cycle assessment approaches. For instance, Jafar et al. (2024) presented a nexus-based optimization model for sustainable electricity supply planning, in which the simultaneous meeting of competing demands is considered with cost and emission minimization. Afsari Mamaghani et al. (2023) designed an integrated power and water supply planning model incorporating the Water-Energy-Emission nexus, revealing the importance of infrastructure synergy in reducing carbon footprints. At the power plant scale, Javidi et al. (2025) quantified the environmental costs of a thermal power plant in Tehran using a life cycle assessment approach and demonstrated that the impacts imposed on human health and ecosystems far exceed conventional economic calculations. In the domain of distributed renewable energy, Milani and Nabi Bidhendi (2024) evaluated the potential for energy recovery from biogas and photovoltaics in wastewater treatment plants, focusing on greenhouse gas emission mitigation. Additionally, Bazarchi et al. (2020) conducted a techno-economic feasibility study for reducing building energy consumption using solar energy in Bandar Abbas, and Aghabozorg et al. (2024) presented a comprehensive economic and environmental analysis of supplying electricity to a desalination unit with renewable energies. Two studies related to solar heating system optimization by Nasouri et al. (2021a, 2021b, 2021c) also demonstrate the high capacity of multi-criteria decision-making (MCDM) for selecting optimal configurations in renewable technologies. These studies, although not directly employing the SD methodology, highlight the necessity of moving beyond sectoral analyses toward integrated models—a challenge to which the present research seeks to respond.

This study addresses these gaps by developing a comprehensive SD model that simultaneously analyzes the interactions among four subsystems—urban energy demand, renewable supply, demand-

side management (DSM), and policy—embedded within a smart city suprasystem layer. The model is empirically grounded through calibration with ten years of historical data from Ekbatan Township (Tehran, Iran) and an exploratory field survey among its residents. The application of the SD approach in Iran's energy system has been demonstrated by Pazuki et al. (2025), who analyzed the transition of Iran's electricity sector through 2040. Their findings show that under current policy, fossil fuel dependency remains at 94% and CO₂ emissions reach 220.11 Mt. This is consistent with the logic of the present model, indicating that without active policies, long-term sustainability of the energy system cannot be achieved. While the SD approach has also been applied in other urban subsystems in Iran, the focus of this research remains on the urban energy system and microgrid.

The primary objective of this research is to model the dynamic interaction of urban energy supply and demand subsystems in a manner that endogenously explains both consumer behavioral dynamics and digital governance maturation. Three specific aims guide the inquiry:

1. To design an integrated SD model comprising four subsystems and one smart city suprasystem layer.
2. To validate the model using real-world microgrid data and an exploratory field survey.
3. To simulate five policy scenarios over a 25-year horizon and derive actionable policy implications.

The central research question is: How can the dynamic interaction of demand, renewable supply, DSM, and policy subsystems within a smart city be modeled to endogenously capture consumer behavioral dynamics and digital governance co-evolution?

2. Methodology

2.1. The Dynamic Hypothesis

The dynamic hypothesis is formalized through a Causal Loop Diagram (CLD) developed and validated in a Group Model Building (GMB) workshop with ten domain experts. Six primary feedback loops constitute the hypothesis:

- **R1 (Smart Grid and Network Stability-Reinforcing):** Increased smart meter coverage enhances price signal effectiveness, increases DSM participation, reduces peak load, improves network stability, and attracts further smart infrastructure investment.
- **R2 (DSM Acceptance and Social Trust-Reinforcing):** Increased participation yields bill savings, improves satisfaction, builds technology trust, strengthens peer effects, and boosts adoption rates. A critical boundary condition is identified: if the

Consumer Comfort Index falls below a threshold, the dropout rate activates and the loop reverses.

- **R3 (Energy Awareness and Social Pressure-Reinforcing, sub-loop of R2):** Heightened awareness improves energy efficiency, reduces demand and emissions, increases public concern, and further raises awareness.
- **R4 (Digital Governance Co-evolution and Technical Maturity-Reinforcing):** Increased data integration enhances the Digital Governance Index, strengthens policy credibility, attracts smart investment, expands IoT penetration, and further improves data integration. This loop, introduced for the first time in this study, endogenizes institutional maturity as the product of technical maturity, policy pressure, and social participation.
- **B1 (Peak Load Control via Dynamic Pricing-Balancing):** Rising peak load activates dynamic tariffs, increases peak prices, reduces consumption, and lowers peak load. A rebound effect sub-loop is also formalized: lower off-peak prices stimulate new consumption, creating new peaks.
- **B2 (Low-Carbon Policies and Transition Costs-Balancing):** Increased emissions intensify policy pressure, expand renewable incentives and investment, raise renewable share, and reduce emissions.

2.2. Model Architecture and Implementation

The model is implemented in Vensim DSS software with 87 variables organized into four distinct views: (1) Urban Energy Demand, (2) Renewable Supply, (3) DSM and Smart Infrastructure, and (4) Policy and Environment. Suprasystem layer variables-IoT Penetration, Data Integration Level, and the Digital Governance Index—are present as shadow variables across all views, ensuring cross-subsystem feedback integration. Seven structural delays are implemented using DELAY and SMOOTH functions: 2.5-year renewable construction delay, 3-year smart technology adoption delay, 2-year learning and awareness delay, 1-year tariff effect delay, and 4-year policy delay. Key structural equations include logistic adoption functions for DSM participation, stock-and-flow formulations for renewable capacity and digital governance accumulation, and CO₂ emission calculations based on demand and renewable penetration.

2.3. Empirical Grounding: Field Survey and Parameter Estimation

Behavioral parameters—notably the Technology Trust Level and the critical Comfort Threshold—were estimated through an exploratory field survey administered to residents of Ekbatan Township. The

15-item questionnaire was specifically designed to directly measure model variables: trust in smart technologies, willingness to participate in DSM programs, sensitivity to thermal comfort adjustments, and susceptibility to peer influence. A total of 66 completed questionnaires were analyzed (Cronbach's $\alpha = 0.76$). Method triangulation was achieved through literature review, 15 semi-structured interviews (continued to theoretical saturation), and the GMB workshop with ten experts. Responses were mapped to model parameters through a structured protocol; for instance, Technology Trust Level was initialized at 0.35 (expert-adjusted from the raw survey mean of 0.61 to account for volunteer response bias), and the Comfort Threshold was set at 0.65 based on weighted responses to thermal comfort and peak-load scenario questions, refined by expert consensus.

2.4. Calibration and Validation

The model was calibrated using the Powell algorithm within Vensim DSS's optimization module against ten years of historical data (2014–2024) for Ekbatan Township. Calibration targets included Peak Load (RMSE = 8.3%, $R^2 = 0.89$), Renewable Generation (RMSE = 7.1%, $R^2 = 0.94$), and Total Electricity Demand (RMSE = 6.2%, $R^2 = 0.91$). Monte Carlo sensitivity analysis with 200 iterations on 10 critical parameters within a $\pm 50\%$ range revealed that the Renewable Share is most sensitive to Capacity Factor and Depreciation Fraction. Extreme condition tests (zero price, 100% participation) were successfully passed.

2.5. Scenario Design

Five policy scenarios were constructed along two axes-supply-side and demand-side intervention intensity-and simulated over a 25-year horizon (2025–2050):

- **S0 (Baseline):** Continuation of current trends; no dynamic tariff.
- **S1 (Supply-Oriented):** Maximum renewable capacity expansion without active DSM.
- **S2 (Demand-Oriented):** Aggressive dynamic pricing and DSM programs with baseline renewable growth.
- **S3 (Infrastructure-Oriented):** Smart infrastructure development without active DSM or dynamic tariffs.
- **S4 (Optimal Combined):** Synergistic development of renewable supply and smart demand management with moderate dynamic tariffs.

Performance was evaluated against six KPIs: Peak-to-Average Ratio, Effective Renewable Share, Cumulative CO₂ Emissions, Levelized Cost of Energy (LCOE), Consumer Comfort Index, and Grid Resilience Index.

3. Results and Discussion

3.1. Scenario Performance

The Optimal Combined scenario (S4) achieves the most balanced and sustainable performance across all KPIs. Specifically, S4 delivers a 23% reduction in cumulative CO₂ emissions relative to baseline (2.65 vs. 3.42 million tons), increases the effective renewable share to 20.1%, and maintains the Consumer Comfort Index above the critical threshold at 0.71. Although S2 (Demand-Oriented) achieves the best Peak-to-Average Ratio reduction (18%), it proves unsustainable due to a decline in consumer satisfaction to 0.58-below the 0.65 critical threshold-which activates the dropout mechanism and reverses the trust-participation reinforcing loop. Meanwhile, S1 (Supply-Oriented) achieves the highest nominal renewable share (24.5%), but suffers from higher curtailment (12% vs. 4% in S4), rendering its effective renewable share (19.8%) lower than that of S4. S4 also achieves a 15% reduction in the peak-to-average ratio.

3.2. Feedback Loop Dynamics

Detailed dissection of feedback behavior reveals three critical insights. First, the trust-participation loop (R2) confirms the existence of a critical Comfort Threshold at 0.65. In S2, where the Consumer Comfort Index drops to 0.58, the dropout rate activates and the reinforcing loop reverses, causing participation to collapse. In S4, comfort remains at 0.71, ensuring sustained and stable participation growth. Second, the rebound effect in the dynamic pricing loop (B1) is empirically validated: in S2, 40% of the initial peak load reduction is offset by increased off-peak consumption after year 2029. Third, the digital governance co-evolution loop (R4) demonstrates that the Digital Governance Index in S4 grows from 0.18 to 0.56-the largest increase among all scenarios-driven by the synergistic interaction of Data Integration Level (0.15–0.52), Policy Pressure (0.12–0.58), and DSM Participation (0.04–0.32).

3.3. Cost-Effectiveness Analysis

The cost-effectiveness analysis, employing a 5% discount rate, reveals that S4 achieves a cost of 416,000 IRR per ton of CO₂ reduced, making it 54% more efficient than the Supply-Oriented scenario (S1: 900,000 IRR/ton). This confirms that synergistic supply-demand strategies not only yield superior environmental outcomes but also represent a more economically rational investment of public resources.

4. Conclusions

This research confirms the necessity of supply-demand co-evolution for sustainable urban energy transition. The findings yield five specific, actionable policy implications:

1. **Smart Meter Prerequisite:** Dynamic tariff activation should be deferred until smart meter coverage exceeds the 60% threshold; below this level, price signal effectiveness is critically undermined and the rebound effect neutralizes peak reductions.
2. **Renewable Incentive Ceiling:** Increasing renewable incentive rates up to 0.45 yields increasing marginal returns; beyond this point, the budgetary burden escalates sharply with diminishing effectiveness, defining an optimal intervention ceiling.
3. **Comfort Threshold Safeguard:** The Consumer Comfort Index must be maintained above 0.65 in DSM program design. Violating this threshold triggers exponential increases in dropout rates and reverses the trust-participation reinforcing loop.
4. **Grid Capacity Acceleration:** Distribution grid upgrade investment must proceed at a minimum of twice the baseline rate. Without this, increased distributed renewable penetration leads to network congestion, production curtailment, and investor disincentivization.
5. **Data Integration Platform Development:** Integrated urban data platforms should be strategically developed to achieve a minimum Data Integration Level of 0.50, which is the functional prerequisite for the digital governance co-evolution loop (R4) and necessary for transparency, institutional trust, and full policy effectiveness.

4.1. Theoretical Contributions

This study contributes to the literature in three domains: (a) extending SD theory through the conceptualization of the smart city suprasystem layer and the endogenous modeling of digital governance (R4 loop); (b) enriching quantitative SD models by providing an exploratory protocol for integrating field survey data into behavioral parameter estimation; and (c) offering empirical evidence from a real urban microgrid in Iran, a context underrepresented in the global SD energy literature.

4.2. Limitations and Future Research

Findings should be interpreted in light of six limitations: the limited survey sample size ($n = 66$), sensitivity of results to the C-category Comfort Threshold parameter, absence of historical data for DSM Participation Rate in calibration, lack of dedicated sensitivity analysis for cost-effectiveness indicators, the assumption of technological stability excluding disruptive innovations, and the exclusion of the Ekbatan CHP Megamall project from the base model. Future research directions include conducting a large-scale survey ($n \geq 300$), extending the model to the full metropolitan scale, and performing

comprehensive cost-effectiveness sensitivity analysis.

Acknowledgments

The authors would like to express their sincere gratitude to the experts and managers of this field who, by dedicating their time, sharing their specialized insights, and participating in the data collection process, made this study possible.

Funding

This research received no external funding.

Conflicts of Interest

There are no conflicts of interest associated with this research.

Author Contribution Statement

Mohammadmehdi Kafshvandi: Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Resources, Software, Validation, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing; **Saeed Givhechi:** Conceptualization, Project administration, Supervision, Writing – review & editing; **Gholamreza Nabi Bidhendi:** Conceptualization, Project administration, Supervision, Writing – review & editing.

Data Availability Statement

Data available on request: The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

References

- Afsari Mamaghani, F., Omidvar, B., Avami, A., & Nabi Bidhendi, G. R. (2023). An optimal integrated power and water supply planning model considering Water-Energy-Emission nexus. *Energy Conversion and Management* 277 (2023): 116595. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116595>
- Aghabozorg, M. H., Nabi Bidhendi, G., Yousefi, H., & Mehrdadi, N. (2024). A comprehensive economic and environmental analysis to supply the electricity sector of the MED desalination unit using renewable energies. *Journal of Energy Management and Technology*, 8(3), 239-249. <https://doi.org/10.22109/jemt.2024.421441.1478>
- Bazarchi, S., Bidhendi, G. R. N., Ghazi, I., & Kasaeian, A. (2020). A techno-economic feasibility study for reducing the energy consumption in a building: A solar energy case study for bandar abbas. *Journal of Thermal Engineering*, 6(4), 633-650. <https://doi.org/10.18186/thermal.766463>
- Calvillo, C. F., Sánchez-Miralles, A., & Villar, J. (2016). Energy management and planning in smart

- cities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 273-287. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.133>
- Feng, Y. Y., Chen, S. Q., & Zhang, L. X. (2013). System dynamics modeling for urban energy consumption and CO2 emissions: A case study of Beijing, China. *Ecological Modelling*, 252, 44-52. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.09.008>
- Forrester, J. W. (1961). *Industrial dynamics*. MIT Press.
- Givvehchi, S., Nozar, A. V., & Malekmohammadi, B. (2024). Investigating the effective consequences on the assets of an urban system in facing scenario-based hazards. *Entorno Geográfico*, (28), e24514399-e24514399. <https://doi.org/10.25100/eg.v0i28.14399>
- Golfam, P., & Ashofteh, P. S. (2025a). Evaluation of the effect of the water-energy nexus on the performance of the water-energy supply system. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(7), 4040-4060. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-35928-0>
- Golfam, P., & Ashofteh, P. S. (2025b). Prioritization of water-energy nexus scenarios using the development of D-number theory in multi-criteria analysis method. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(11), 6550-6573. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36105-z>
- Jafar, H. T., Tavakoli, O., Bidhendi, G. N., & Alizadeh, M. (2024). Sustainable electricity supply planning: A nexus-based optimization approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 195, 114316. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114316>
- Javidi, N., Nabi Bidhendi, G., Tavakoli, O., & Mehrdadi, N. (2026). Assessing the environmental costs of a thermal power plant in tehran using life cycle analysis. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 23(3), 179. <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06854-y>
- Milani, S. J., & Bidhendi, G. N. (2024). Biogas and photovoltaic solar energy as renewable energy in wastewater treatment plants: A focus on energy recovery and greenhouse gas emission mitigation. *Water Science and Engineering*, 17(3), 283-291. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.003>
- Karimi, S., Talebi, E., & Givvehchi, S. (2025). H2S gas leak emergency preparedness and community response: A critical review of behavioral factors and gaps. *Scientific Papers-Series E-Land Reclamation Earth Observation & Surveying Environmental Engineering*, 14(1), 1100-1111. <https://landreclamationjournal.usamv.ro/pdf/2025/Art119.pdf>
- Keirstead, J., Jennings, M., & Sivakumar, A. (2012). A review of urban energy system models: Approaches, challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3847-3866. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.047>
- John, D. M. (2007). *Strategic modelling and business dynamics: A feedback systems approach*. J. Wiley & Sons.
- Nasouri, M., Bidhendi, G. N., Hoveidi, H., & Amiri, M. J. (2021a). Parametric study and performance-based multi-criteria optimization of the indirect-expansion solar-assisted heat pump through the integration of Analytic Network process (ANP) decision-making with MOPSO algorithm. *Solar Energy*, 225, 814-830. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.08.003>
- Nasouri, M., Nabi Bidhendi, G. R., Amiri, M. J., Delgarm, N., Delgarm, S., & Azarpad, K. (2021b). Performance-based Pareto optimization and multi-attribute decision making of an actual indirect-expansion solar-assisted heat pump system. *Journal of Building Engineering*, 42(2), 102345. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102345>
- Nasouri, M., Bidhendi, G. N., Amiri, M. J., Delgarm, N., Delgarm, S., & Azarbad, K. (2021c). Performance-based Pareto optimization and multi-attribute decision making of an actual indirect-expansion solar-assisted heat pump system. *Journal of Building Engineering*, 42. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103053>
- Pazuki, M. M., Salimi, M., Safaie, N., & Amidpour, M. (2025). Transitioning Iran's electricity sector: A system dynamics analysis of renewable energy acceleration and carbon capture strategies to 2040. *Utilities Policy*, 97, 102062. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2025.102062>
- Sterman, J. D. (2000). *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. Irwin/McGraw-Hill.
- Vejdani Nozar, A., Givvehchi, S., & Malekmohammadi, B. (2025). Evaluation of the effective consequences on urban water and wastewater assets in the face of environmental pollution: A case study of Hamedan City, Iran. *Pollution*, 11(3), 652-671. <https://doi.org/10.22059/poll.2025.380915.2502>

مدیریت تقاضای انرژی در ریزشکه شهری با رویکرد پویایی سیستم‌ها: تحلیل هم‌تکاملی عرضه، تقاضا، و حکمرانی دیجیتال در شهرک اکباتان

محمد مهدی کفشوندی^۱، سعید گیوه‌چی^۲، غلامرضا نبی بیدهندی^۲

^۱ گروه محیط‌زیست، پردیس بین‌المللی کیش، دانشگاه تهران، کیش، ایران

^۲ دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

برجسته‌ها

- مدل پویایی‌شناسی سیستم، تعامل تقاضای انرژی، عرضه تجدیدپذیر و حکمرانی دیجیتال را در ریزشکه اکباتان تهران شبیه‌سازی می‌کند.
- سناریوی ترکیبی با کاهش ۲۳٪ انتشار CO₂ و سهم مؤثر ۲۰/۱٪ انرژی تجدیدپذیر، عملکرد پایدارتری نشان می‌دهد.
- گذار پایدار مستلزم پوشش بیش از ۶۰ درصدی کنتورهای هوشمند و حفظ سطح آسایش بالاتر از آستانه بحرانی ۰/۶۵ است.

چکیده گرافیکی



مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۱۵

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۱۰

ارائه برخط: ۱۴۰۵/۰۷/۱۰

*نویسنده مسئول:

givehchi@ut.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

پویایی سیستم‌ها
مدیریت تقاضای انرژی
ریزشکه شهری
انرژی تجدیدپذیر
حلقه بازخوردی اعتماد-مشارکت
شهرک اکباتان
تحلیل سناریو

چکیده

شکاف میان اوج تقاضای برق و عرضه پایدار در شهرهای هوشمند، چالشی غیرخطی است که مدل‌های ایستا به دلیل ناتوانی در ثبت ساختارهای بازخوردی زاینده، قادر به پرداختن به آن نیستند. این مطالعه یک مدل پویایی‌شناسی سیستم را برای تحلیل تعامل میان تقاضای انرژی شهری، عرضه انرژی تجدیدپذیر، مدیریت سمت تقاضا و حکمرانی دیجیتال در ریزشکه اکباتان تهران توسعه می‌دهد. مدل بر پایه شش حلقه بازخوردی بنا شده است: حلقه تقویتی پایداری شبکه هوشمند؛ حلقه تقویتی پذیرش پاسخگویی تقاضا و اعتماد اجتماعی که هم‌رنگی با هنجارهای محله‌ای را دربرمی‌گیرد؛ حلقه تقویتی هم‌تکاملی حکمرانی دیجیتال که بلوغ نهادی را درون‌زا می‌کند؛ و حلقه‌های متعادل‌کننده قیمت‌گذاری پویا با آثار بازگشتی، هزینه‌های گذار کم‌کربن و ازدحام شبکه. این مدل در محیط Vensim DSS با ۸۷ متغیر پیاده‌سازی و با استفاده از داده‌های تجربی ۱۰ ساله کالیبره شد ($RMSE < 10\%$, $R^2 > 0.80$). پارامترهای رفتاری نیز از طریق یک پیمایش میدانی ($n = 66$) و کارگاه مدل‌سازی خبرگان برآورد شدند. تحلیل حساسیت نشان داد که ضریب ظرفیت و نرخ استهلاک، تأثیرگذارترین پارامترها بر سهم انرژی تجدیدپذیر هستند. پنج سناریوی ۲۵ ساله شبیه‌سازی شد. سناریوی ترکیبی بهینه که اقدامات سمت عرضه و سمت تقاضا را با یکدیگر هم‌افزا می‌کند، به کاهش ۲۳ درصدی انتشار CO₂، سهم مؤثر ۲۰/۱ درصدی انرژی تجدیدپذیر و رضایت مصرف‌کنندگان بالاتر از ۰/۷۰ دست می‌یابد. سناریوی متمرکز بر تقاضا، علی‌رغم دستیابی به کاهش ۱۸ درصدی نسبت اوج به میانگین، سطح رضایت را به ۰/۵۸ کاهش داده و موجب ایجاد اثر بازگشتی ۴۰ درصدی می‌شود. آستانه بحرانی آسایش برابر با ۰/۶۵ شناسایی شد که فراتر از آن، حلقه اعتماد-مشارکت معکوس می‌شود. شاخص حکمرانی دیجیتال در سناریوی ترکیبی از ۰/۱۸ به ۰/۵۶ افزایش می‌یابد. تحلیل اثربخشی هزینه‌ای نشان می‌دهد که سناریوی ترکیبی در مقایسه با گزینه متمرکز بر عرضه، ۵۴ درصد کارایی بیشتری دارد. گذار پایدار مستلزم پوشش کنتورهای هوشمند بیش از ۶۰ درصد و حفظ سطح آسایش بالاتر از ۰/۶۵ است.

۱- مقدمه

شه‌رنشینی شتابان در سده بیست و یکم، تقاضای انرژی شهری را به‌طور بی‌سابقه‌ای افزایش داده است. شهرها که اکنون میزبان بیش از ۵۵ درصد جمعیت جهان هستند، مسئول حدود ۷۰ درصد از مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای به شمار می‌روند (Keirstead et al., 2012). در این میان، گذار به سوی شهرهای هوشمند با ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر توزیع‌شده، به‌عنوان راهبردی محوری برای کربن‌زدایی سیستم‌های انرژی شهری مطرح شده است (Calvillo et al., 2016). در ایران نیز گذار به سیستم‌های پایدار برق با سناریوهای بلندپروازانه تجدیدپذیر تا افق ۲۰۴۰ هدف‌گذاری شده (Pazuki et al., 2025) و تحلیل‌های اخیر نشان می‌دهد که بدون مدیریت یکپارچه منابع، پایداری سیستم تأمین انرژی در بلندمدت با تردید مواجه است (Golfam & Ashofteh, 2025a, b). با این حال، یک چالش بنیادین در این گذار پدیدار می‌شود: شکاف فزاینده میان اوج تقاضای برق و ظرفیت عرضه پایدار. ماهیت متناوب منابع تجدیدپذیری چون خورشید، هم‌زمان با رشد مستمر تقاضا، شبکه‌های توزیع شهری را با نوسانات و ناپایداری‌های بی‌سابقه‌ای مواجه می‌کند. این شکاف، نه یک مسئله ایستا، بلکه پدیده‌ای پویا و برآمده از تعامل پیچیده زیرسیستم‌های فنی، اقتصادی، اجتماعی و نهادی است (Dehghan et al., 2021; Bazilian et al., 2013; Hosseini & Shakouri, 2016; Mekonnen et al., 2015; Leduc et al., 2016; Reiss & White, 2005; Vennix, 1996; Slocum & Gessel, 2022).

تحلیل این مسئله با روش‌های ایستای مرسوم، اعم از مدل‌های رگرسیون چندمتغیره، بهینه‌سازی خطی، یا مدل‌های تعادل عمومی قابل محاسبه ممکن نیست. دلیل این ناتوانی، در ذات سیستم مورد مطالعه ریشه دارد که چهار ویژگی بنیادین را هم‌زمان داراست: نخست، حلقه‌های بازخوردی: در سیستم انرژی شهر هوشمند، متغیرها در زنجیره‌های دایره‌ای علّیت، خود را تقویت یا تعدیل می‌کنند (Sterman, 2000). توسعه ظرفیت تجدیدپذیر، قیمت برق را تغییر می‌دهد؛ قیمت جدید، رفتار مصرف‌کننده را دگرگون می‌کند؛ تغییر رفتار، اوج بار را جابه‌جا می‌نماید و اوج بار جدید، سیاست توسعه

تجدیدپذیر را بازتنظیم می‌کند. دوم، تأخیرهای ساختاری: میان تصمیم و اثر، فاصله‌های زمانی معنادار وجود دارد، از تصویب یک سیاست تشویقی تا بهره‌برداری از آن، چند سال فاصله است. سوم، انباشت و فرسایش: متغیرهای کلیدی مانند ظرفیت تجدیدپذیر نصب‌شده یا سطح اعتماد مصرف‌کننده، انباشته‌هایی هستند که به‌تدریج ساخته یا فرسایش می‌یابند (Forrester, 1961). چهارم، غیرخطی بودن روابط: مشارکت در برنامه‌های مدیریت تقاضا تابعی آستانه‌ای از سطح آسایش است و نفوذ فناوری‌های هوشمند از الگوی اس-شکل پیروی می‌کند (Rogers, 2003). در چنین بستری، رویکرد پویایی سیستم‌ها نه یک انتخاب از میان گزینه‌های متعدد روش‌شناختی، بلکه رویکردی است که می‌تواند ساختار علی مولد رفتار را با حفظ تمام این ویژگی‌ها صوری‌سازی نماید.

مرور ادبیات موجود نشان می‌دهد که اگرچه مدل‌های پویایی سیستم در تحلیل سیستم‌های انرژی شهری به کار رفته‌اند (Feng et al., 2013)، اما اغلب آن‌ها از یک خلأ مشترک رنج می‌برند: پویایی نرم و درونزای رفتار مصرف‌کننده شامل اعتماد به فناوری، حساسیت به آسایش، و تأثیرپذیری از همسایگان به‌ندرت با داده‌های میدانی تلفیق و درونزای مدل شده است. برای نمونه، مورکرافت (John, 2007) بر ضرورت تلفیق داده‌های نرم در مدل‌های پویایی سیستم تأکید می‌کند، اما پروتکل عملی برای این تلفیق در حوزه انرژی شهری ارائه نمی‌دهد. از سوی دیگر، مفهوم «حکمرانی دیجیتال» به‌عنوان یک لایه فراسیستمی در شهر هوشمند، عموماً به‌صورت برون‌زا و مفروض انگاشته می‌شود، نه به‌عنوان متغیری که خود محصول هم‌تکاملی فناوری و نهادهاست. این شکاف‌ها، مبنای پرسش محوری این پژوهش را شکل می‌دهند: چگونه می‌توان تعامل پویای چهار زیرسیستم تقاضا، عرضه تجدیدپذیر، مدیریت سمت تقاضا، و سیاست را در بستر یک شهر هوشمند به‌گونه‌ای مدل‌سازی کرد که پویایی‌های رفتاری مصرف‌کننده و بلوغ حکمرانی دیجیتال را به‌صورت درون‌زا تبیین نماید؟

پژوهش حاضر سه هدف اصلی را دنبال می‌کند:

- ۱) طراحی یک مدل پویایی سیستم یکپارچه با چهار زیرسیستم و یک لایه فراسیستمی شهر هوشمند

۲) اعتباریابی مدل با داده‌های واقعی یک ریزشبکه شهری (شهرک اکباتان) و یک پیمایش میدانی اکتشافی و

۳) شبیه‌سازی پنج سناریوی سیاستی در افق ۲۵ ساله.

مشارکت‌های روش‌شناختی و نظری این پژوهش عبارتند از: نخست، درون‌زاسازی حکمرانی دیجیتال از طریق یک حلقه بازخوردی هم‌تکاملی (R4) که بلوغ نهادی را محصول تعامل بلوغ فنی، فشار سیاستی، و مشارکت اجتماعی می‌داند. دوم، ارائه یک پروتکل اکتشافی برای تلفیق داده‌های پیمایشی با مدل‌سازی پویایی سیستم جهت تخمین پارامترهای رفتاری. سوم، کالیبراسیون در بستر یک ریزشبکه شهری واقعی در ایران. در ادامه، مبانی نظری، روش‌شناسی، یافته‌ها و دلالت‌های سیاستی پژوهش ارائه می‌شود.

مرور انتقادی ادبیات نشان می‌دهد که سه شکاف عمده در مطالعات پیشین وجود دارد: نخست، پویایی نرم و درون‌زای رفتار مصرف‌کننده (شامل اعتماد به فناوری، حساسیت به آسایش و تأثیرپذیری از همسایگان) به‌ندرت با داده‌های میدانی تلفیق و به‌صورت درون‌زا مدل شده است؛ دوم، مفهوم حکمرانی دیجیتال در شهر هوشمند عموماً به‌عنوان یک مفروض برون‌زا در نظر گرفته می‌شود، نه متغیری که خود محصول هم‌تکاملی فناوری و نهادهاست؛ و سوم، مطالعات تجربی اندکی در بستر ریزشبکه‌های شهری واقعی ایران انجام شده است. پژوهش حاضر دقیقاً برای پر کردن این سه شکاف طراحی شده است.

۲- مبانی نظری و فرضیه دینامیکی

۲-۱- شهر هوشمند و مدیریت تقاضای انرژی

شهر هوشمند، بستری است که در آن جریان‌های داده، اطلاعات، و کنترل هوشمند میان تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان، و نهادهای تنظیم‌گر رد و بدل می‌شود تا کارایی، پایداری، و تاب‌آوری سیستم انرژی ارتقا یابد (Calvillo et al., 2016). مدیریت سمت تقاضا و برنامه‌های پاسخ‌گویی بار به‌عنوان ابزارهای کلیدی برای انعطاف‌پذیرسازی مصرف شناخته می‌شوند. مطالعات تجربی نشان می‌دهد که اثربخشی این برنامه‌ها به‌طور

قابل‌توجهی به سطح پوشش کنتورهای هوشمند، شفافیت سیگنال‌های قیمت، و مهم‌تر از همه، اعتماد و مشارکت فعال مصرف‌کنندگان وابسته است (Faruqui & Sergici, 2017). استراجر و همکاران (Stragier et al., 2012) نیز نشان دادند که پذیرش فناوری‌های هوشمند خانگی، فرایندی اجتماعی با تأخیرهای رفتاری قابل‌توجه است.

یک شکاف مفهومی در ادبیات شهر هوشمند، نگاه جزیره‌ای به زیرسیستم‌هاست. در این پژوهش، مفهوم لایه فراسیستمی شهر هوشمند را پیشنهاد می‌کنیم: لایه‌ای که بستر دیجیتال و حکمرانی داده را برای تمام زیرسیستم‌ها فراهم می‌کند و خود از سه متغیر کلیدی تشکیل می‌شود: نفوذ اینترنت اشیا^۱، سطح یکپارچگی داده‌ها^۲، و شاخص بلوغ حکمرانی دیجیتال^۳. این متغیرها، متغیرهای مشترکی هستند که در تمام نماهای مدل حضور دارند و بر پارامترهای کلیدی مانند اثربخشی سیگنال قیمت و اطمینان سیاستی اثر می‌گذارند.

فراتر از زیرسیستم‌های فنی و اقتصادی، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری سیستم‌های شهری در مواجهه با مخاطرات، بُعد دیگری از شهر هوشمند را شکل می‌دهد که پیوند عمیقی با سرمایه‌های اجتماعی و رفتاری دارد. مطالعات اخیر در ایران نشان می‌دهد که آمادگی جامعه در برابر بحران‌ها، خود تابعی از رفتار جمعی و شبکه‌های اعتماد محلی است. کریمی و همکاران (Karimi et al., 2025) در یک مرور انتقادی بر نشت گاز سولفید هیدروژن، شکاف‌های رفتاری در آمادگی اضطراری و واکنش جامعه را شناسایی کردند و بر ضرورت مدل‌سازی پویایی‌های رفتاری در سیستم‌های هشدار سریع تأکید نمودند. گیوه چی و همکاران (Givvehchi et al., 2024) نیز پیامدهای مؤثر بر دارایی‌های یک سیستم شهری را در مواجهه با مخاطرات سناریومحور تحلیل کرده و نشان دادند که آب و فاضلاب، جزو آسیب‌پذیرترین دارایی‌ها هستند. در همین راستا، وجدانی نودر و همکاران (Vejdani Nozar et al., 2025) با مطالعه شهر همدان، اثرات آلودگی محیط‌زیستی بر زیرساخت‌های آب و فاضلاب شهری را ارزیابی کردند و استدلال نمودند که

^۱ IoT Penetration

^۲ Data Integration Level

^۳ Digital Governance Index

غفلت از حلقه‌های بازخوردی میان رفتار شهروندان، کیفیت زیرساخت، و سلامت اکوسیستم، برنامه‌ریزی تاب‌آوری را ناکارآمد می‌سازد. این بینش‌ها با مفهوم حکمرانی دیجیتال و لایه فراسیستمی در پژوهش حاضر هم‌راستا هستند، زیرا بلوغ حکمرانی، تنها زمانی به تاب‌آوری می‌انجامد که مشارکت آگاهانه شهروندان و اعتماد نهادی به‌طور هم‌زمان تقویت شوند.

۲-۲- پویایی سیستم‌ها: مبانی و کاربرد در انرژی

پویایی سیستم‌ها، روشی برای مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده است که بر ساختارهای بازخوردی، انباشت‌ها و جریان‌ها، تأخیرهای زمانی، و روابط غیرخطی تأکید دارد (Sterman, 2000). برخلاف مدل‌های اقتصادسنجی که بر برازش داده‌های تاریخی متکی‌اند، پویایی سیستم ساختار علی مولد رفتار را صوری‌سازی می‌کند و می‌تواند پیامدهای بلندمدت سیاست‌ها را شبیه‌سازی نماید. فورد (Ford, 1999) کاربرد پویایی سیستم در سیستم‌های انرژی و محیط‌زیست را به تفصیل شرح داده است. در زمینه ایران، مطالعات پویایی سیستم به تحلیل گذار بخش برق (Pazuki et al., 2025)، سناریوهای بلندمدت هزینه-فایده گازهای گلخانه‌ای (Kachooee et al., 2018)، و ارزیابی شاخص‌های فنی-اقتصادی و اجتماعی پایداری (Karbasiooun et al., 2023) پرداخته‌اند. در سطح بین‌المللی نیز مدل‌های پویایی سیستم برای پیش‌بینی انتشار در حمل‌ونقل (Liu et al., 2019) و تحلیل بازار نفت (Rafieisakhaei et al., 2017) توسعه یافته‌اند. با این حال، گلفام و همکاران (Golfam et al., 2024) نشان دادند که حتی مدل‌های پیش‌بینی بلندمدت تقاضای انرژی نیز اغلب پویایی‌های بازخوردی مصرف‌کننده را برون‌زا فرض می‌کنند.

به موازات مدل‌سازی‌های پویایی سیستم، طیف گسترده‌ای از مطالعات کمی در ایران، ابعاد فنی-اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم‌های انرژی را با رویکردهای بهینه‌سازی و تحلیل چرخه حیات بررسی کرده‌اند. برای نمونه، جعفر و همکاران (Jafar et al., 2024) یک مدل بهینه‌سازی مبتنی بر پیوند آب، انرژی و محیط‌زیست برای برنامه‌ریزی عرضه پایدار برق ارائه دادند که در آن

تأمین هم‌زمان تقاضاهای رقیب با حداقل‌سازی هزینه و انتشار مد نظر است. افسری ممقانی و همکاران (Afsari Mamaghani et al., 2023) نیز یک مدل یکپارچه تأمین آب و برق با لحاظ پیوند^۱ طراحی نمودند که اهمیت هم‌افزایی زیرساخت‌ها را در کاهش ردپای کربن آشکار می‌سازد. در مقیاس نیروگاهی، جاویدی و همکاران (Javidi et al., 2025) هزینه‌های محیط‌زیستی یک نیروگاه حرارتی در تهران را با رویکرد ارزیابی چرخه حیات کمی‌سازی کرده و نشان دادند که اثرات تحمیل‌شده بر سلامت انسان و اکوسیستم، بسیار فراتر از محاسبات مرسوم اقتصادی است. در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر توزیع‌شده، میلانی و همکاران (Milani et al., 2024) پتانسیل بازیافت انرژی از بیوگاز و فتوولتائیک در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب را با تمرکز بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ارزیابی کردند. همچنین بازارچی و همکاران (Bazarchi et al., 2020) امکان‌سنجی فنی-اقتصادی کاهش مصرف انرژی ساختمان با بهره‌گیری از انرژی خورشیدی در بندرعباس را انجام دادند و آقابزرگ و همکاران (Aghabozorg et al., 2024) تحلیل جامع اقتصادی و محیط‌زیستی تأمین برق یک واحد نمک‌زدایی با انرژی‌های تجدیدپذیر را ارائه نمودند. دو مطالعه مرتبط با بهینه‌سازی سیستم‌های گرمایش خورشیدی توسط نصوری و همکاران (Nasouri et al., 2021a, b) نیز نشان‌دهنده ظرفیت بالای تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) برای انتخاب پیکربندی بهینه در فناوری‌های تجدیدپذیر است. این مطالعات، گرچه مستقیماً با روش پویایی سیستم انجام نشده‌اند، اما ضرورت عبور از تحلیل‌های بخشی و حرکت به سوی مدل‌های یکپارچه‌ای را برجسته می‌سازند که پژوهش حاضر در صدد پاسخ‌گویی به آن است.

در حوزه انرژی شهری، مدل‌های پویایی سیستم متعددی توسعه یافته‌اند. فنگ و همکاران (Feng et al., 2013) یک مدل پویایی سیستم برای شبیه‌سازی مصرف انرژی و انتشار دی‌اکسید کربن در پکن ارائه دادند، اما پویایی‌های رفتاری مصرف‌کننده را نادیده گرفتند. مطالعات جدیدتر نیز اگرچه به نقش پاسخ‌گویی بار در شبکه‌های توزیع با نفوذ تجدیدپذیر پرداخته‌اند (Dehghan Pir et al., 2025)

^۱ Water-Energy-Emission

بار - بهبود پایداری شبکه - افزایش سرمایه‌گذاری در زیرساخت هوشمند - افزایش بیشتر پوشش کنتور. این حلقه، موتور گذار به شبکه هوشمند است.

- **حلقه R2:** پذیرش مدیریت سمت تقاضا و اعتماد اجتماعی (تقویتی). افزایش مشارکت - صرفه‌جویی در قبض - افزایش رضایت - افزایش اعتماد به فناوری - تقویت اثر همنوایی^۱ - افزایش نرخ پذیرش - افزایش بیشتر مشارکت. این حلقه، هسته پویایی رفتاری مدل است.
- **زیرحلقه R3 (آگاهی انرژی و فشار اجتماعی):** ذیل R2 عمل می‌کند: افزایش آگاهی - بهبود کارایی - کاهش تقاضا - کاهش انتشار - افزایش نگرانی عمومی - افزایش آگاهی.
- **حلقه R4:** هم‌تکاملی حکمرانی دیجیتال و بلوغ فنی (تقویتی). افزایش یکپارچگی داده‌ها - افزایش بلوغ حکمرانی دیجیتال - افزایش اطمینان سیاستی - افزایش سرمایه‌گذاری هوشمند - افزایش نفوذ اینترنت اشیا - افزایش یکپارچگی داده‌ها. این حلقه، حکمرانی دیجیتال را درونزای سیستم می‌کند.
- **حلقه B1:** کنترل اوج بار با قیمت‌گذاری پویا (تعدیلی). افزایش اوج بار - فعال‌سازی تعرفه پویا - افزایش قیمت اوج - کاهش مصرف - کاهش اوج بار. یک زیرحلقه «اثر بازگشتی» نیز وجود دارد: کاهش قیمت در ساعات غیر اوج - افزایش مصرف - شکل‌گیری اوج جدید.
- **حلقه B2:** سیاست‌های کم‌کربن و هزینه‌های گذار (تعدیلی). افزایش انتشار - افزایش فشار سیاستی - افزایش مشوق تجدیدپذیر - افزایش سرمایه‌گذاری - افزایش سهم تجدیدپذیر - کاهش انتشار.
- **حلقه B3:** محدودیت شبکه و کاهش انگیزه سرمایه‌گذاری (تعدیلی). افزایش ظرفیت تجدیدپذیر - افزایش ازدحام شبکه - افزایش محدودسازی تولید - کاهش سودآوری - کاهش سرمایه‌گذاری - کاهش رشد ظرفیت

یا بازارهای انرژی مصرف‌کننده‌محور را با رویکرد نظریه چشم‌انداز تحلیل کرده‌اند (Andriopoulos et al., 2024)، اما همچنان حلقه مفقوده، تلفیق این پویایی‌ها با بلوغ حکمرانی دیجیتال است. پازوکی و همکاران (Pazuki et al., 2025). گذار بخش برق ایران را با رویکرد پویایی سیستم تحلیل کردند و نشان دادند که شتاب‌دهی به تجدیدپذیرها بدون مدیریت تقاضا به ناپایداری می‌انجامد. با این حال، مرور انتقادی این مطالعات نشان می‌دهد که هیچ‌یک هم‌تکاملی عرضه-تقاضا، ریزپویایی‌های رفتاری، و بلوغ حکمرانی دیجیتال را به‌طور هم‌زمان مدل نکرده‌اند. این پژوهش می‌کوشد این شکاف را با ارائه مدلی یکپارچه پر کند.

کاربرد رویکرد پویایی سیستم‌ها در تحلیل سیستم انرژی ایران به‌طور مشخص در مطالعه پازوکی و همکاران (Pazuki et al., 2025) نشان داده شده است. آن‌ها با توسعه یک مدل پویایی سیستم، مسیر گذار بخش برق ایران را تا افق ۲۰۴۰ تحلیل کرده‌اند و نشان داده‌اند که در شرایط سیاست فعلی، وابستگی به سوخت فسیلی ۹۴ درصد باقی می‌ماند و انتشار دی‌اکسید کربن به ۲۲۰/۱۱ میلیون تن می‌رسد. این یافته با منطق مدل حاضر هم‌راستاست و نشان می‌دهد که بدون سیاست‌های فعال، پایداری بلندمدت سیستم انرژی محقق نمی‌شود. کاربرد این رویکرد در سایر زیرسیستم‌های شهری ایران نیز گزارش شده است، اما تمرکز این پژوهش بر سیستم انرژی شهری و ریزشبکه است.

۲-۳- فرضیه دینامیکی و نمودار علی-حلقوی

فرضیه دینامیکی این پژوهش در قالب یک نمودار علی-حلقوی یکپارچه صوری‌سازی شده است که حاصل تلفیق چهار زیرسیستم اصلی و لایه فراسیستمی شهر هوشمند می‌باشد (شکل ۱). این نمودار علی-حلقوی با مشارکت ۱۰ خبره در یک کارگاه گروه‌مدل‌سازی تدوین و تأیید شده است. شش حلقه بازخوردی اصلی شناسایی شده عبارتند از:

- **حلقه R1:** هوشمندسازی و پایداری شبکه (تقویتی). افزایش پوشش کنتور هوشمند - افزایش اثربخشی سیگنال قیمت - افزایش مشارکت در - مدیریت سمت تقاضا کاهش اوج

^۱ Peer Effect

فرضیه دینامیکی و نمودار علی-حلقوی **شکل ۱**، صرفاً بر مبنای مرور ادبیات تدوین نشده، بلکه در یک کارگاه گروه مدلسازی شش‌ساعته با حضور ۱۰ خبره از حوزه‌های توزیع برق، انرژی‌های تجدیدپذیر، برنامه‌ریزی شهری، اقتصاد انرژی، فناوری اطلاعات و پژوهش اجتماعی اعتباریابی شده است. در این کارگاه، با استفاده از تکنیک گروه اسمی، از ۱۱۲ متغیر اولیه، ۸۷ متغیر نهایی و از ۹ حلقه بازخوردی شناسایی شده، ۶ حلقه اصلی با اجماع خبرگان انتخاب شدند. حلقه R4 (هم‌تکاملی حکمرانی دیجیتال) نیز محصول همین اجماع است.

۳- روش‌شناسی پژوهش

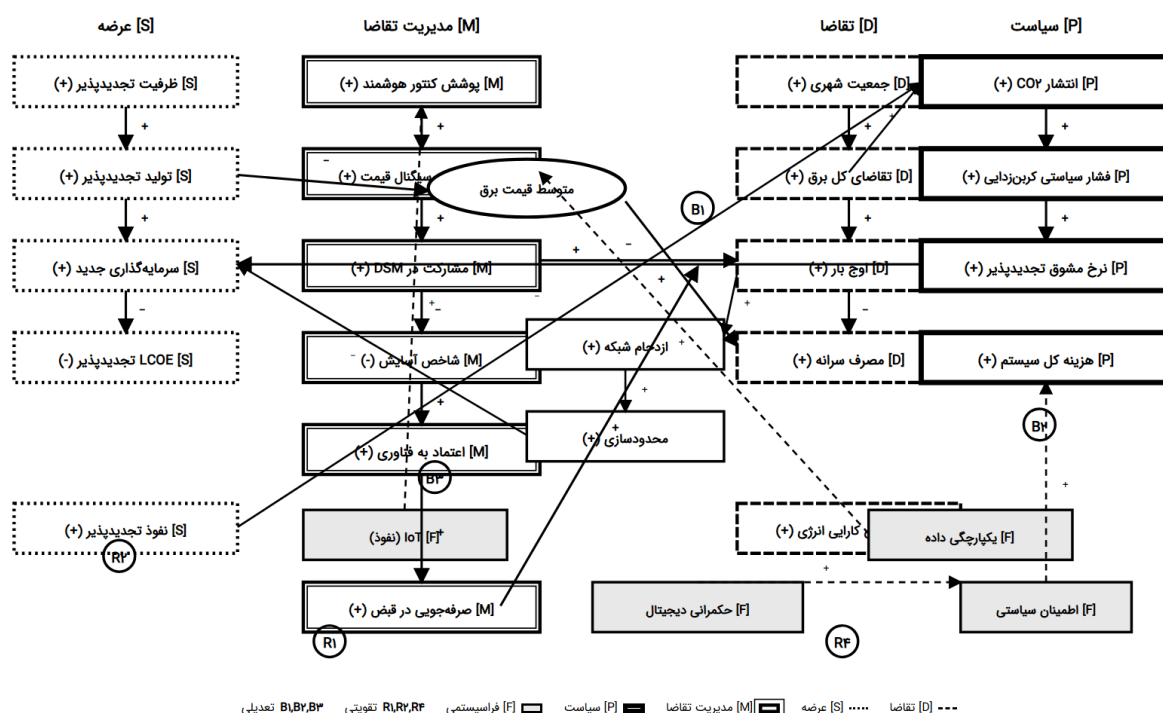
۳-۱- مطالعه موردی: شهرک اکباتان

شهرک اکباتان، واقع در غرب تهران، با مساحت ۵/۹۴ کیلومتر مربع و حدود ۴۵۰۰۰ نفر جمعیت، به‌عنوان یک ریزشبکه شهری انتخاب شده است. این شهرک از ۳۳ بلوک مسکونی در سه فاز تشکیل شده و مجموعاً ۱۵۶۷۵ واحد مسکونی را در خود جای داده است. چهار دلیل برای این انتخاب وجود دارد:

- حلقه‌های بازخوردی با علامت R (تقویتی) و B (تعدیلی) شماره‌گذاری شده‌اند و متغیرهای لایه فراسیستمی نمایش داده شده‌اند. نسخه تفکیک‌شده نمودار برای هر زیرسیستم در **پیوست الف** ارائه شده است.

بر اساس این حلقه‌ها، چهار فرضیه پژوهش صورتی‌سازی می‌شوند:

- (۱) هم‌تکاملی عرضه و تقاضا: توسعه هم‌زمان عرضه و مدیریت تقاضا، نفوذ تجدیدپذیر مؤثر را بیشتر از توسعه مجزای هر یک افزایش می‌دهد.
- (۲) پویایی اعتماد-مشارکت: مشارکت در مدیریت سمت تقاضا توسط یک حلقه تقویتی شکل می‌گیرد، اما با یک شرط مرزی: عبور شاخص آسایش از آستانه بحرانی، حلقه را معکوس می‌کند.
- (۳) معمای تعرفه‌های پویا: تعرفه‌های پویا در کوتاه‌مدت اوج بار را کاهش می‌دهند، اما اثر بازگشتی در بلندمدت ظاهر می‌شود.
- (۴) نقطه اهرمی زیرساخت هوشمند: زیرساخت هوشمند شرط لازم برای فعال‌سازی سیاست‌های قیمتی است.



شکل ۱. نمودار علی-حلقوی (CLD) یکپارچه مدل.

Figure 1. Integrated Causal Loop Diagram (CLD) of the model.

منظور از متغیر سایه، متغیری است که در یک نمای مدل تعریف شده و در نماهای دیگر به صورت کپی نمایش داده می شود تا اتصال میان زیرسیستم ها برقرار شود.

در مدل حاضر، سه متغیر لایه فراسیستمی شامل نفوذ اینترنت اشیا، سطح یکپارچگی داده ها و شاخص بلوغ حکمرانی دیجیتال، هر کدام فقط یک بار در نمای چهارم (سیاست و محیط زیست) تعریف شده اند و در سه نمای دیگر به صورت متغیر سایه ظاهر می شوند. جدول خلاصه مرز سیستم و دیکشنری ۱۵ متغیر کلیدی در **پیوست الف و پیوست ب** ارائه شده است.

برای نمایش ساختار انباشت-جریان و روابط کمکی میان متغیرها، نمودار جریان-انباشت شماتیک مدل در **شکل ۳** ارائه شده است. این نمودار، چهار نمای اصلی مدل (تقاضا، عرضه، مدیریت سمت تقاضا، سیاست) و متغیرهای سایه لایه فراسیستمی را نشان می دهد.

• معادلات ساختاری محوری

جدول ۲، شش معادله ساختاری کلیدی مدل را ارائه می دهد. این معادلات، روابط علی ترسیم شده در نمودار علی-حلقوی را به زبان ریاضی ترجمه می کنند.

• تأخیرهای ساختاری

هفت تأخیر کلیدی با توابع DELAY و SMOOTH پیاده سازی شده اند: تأخیر ۲/۵ ساله ساخت تجدیدپذیر، ۳ ساله پذیرش فناوری هوشمند، ۲ ساله یادگیری و آگاهی، ۱ ساله اثر تعرفه، و ۴ ساله سیاست گذاری.

(۱) مقیاس قابل مدیریت برای مدل سازی دقیق و

گردآوری داده های میدانی

(۲) پوشش ۳۸ درصدی کنتور هوشمند که در بازه

مطلوب پروتکل مدل سازی قرار دارد

(۳) پتانسیل ۲۷ مگاواتی نصب پنل خورشیدی روی

بام های تخت

(۴) قابلیت تعمیم پذیری به سایر شهرک های

برنامه ریزی شده.

شایان ذکر است که پروژه تولید هم زمان برق و حرارت مگامال با ظرفیت بالقوه ۱۰ مگاوات، به دلیل عدم بهره برداری در زمان مطالعه، در مدل پایه لحاظ نشده است. **جدول ۱** مشخصات کلیدی را خلاصه می کند.

۳-۲- پروتکل مدل سازی پویایی سیستم ها

مدل سازی از چرخه استاندارد پنج مرحله ای پویایی سیستم پیروی می کند: تبیین پویای مسئله، فرموله سازی فرضیه دینامیکی، فرموله سازی مدل شبیه سازی، آزمون و صحت گذاری، و طراحی و تحلیل سناریو (Stermann, 2000). **شکل ۲**، فلوچارت مراحل پژوهش را نشان می دهد.

• مرز سیستم و معماری مدل

مدل شامل ۸۷ متغیر است که در چهار نمای مجزا سازماندهی شده اند: تقاضای انرژی شهری، عرضه تجدیدپذیر، مدیریت سمت تقاضا و زیرساخت هوشمند، و سیاست و محیط زیست. متغیرهای لایه فراسیستمی به صورت متغیرهای سایه در تمام نماها حضور دارند.

جدول ۱. مشخصات کلیدی شهرک اکباتان در سال پایه

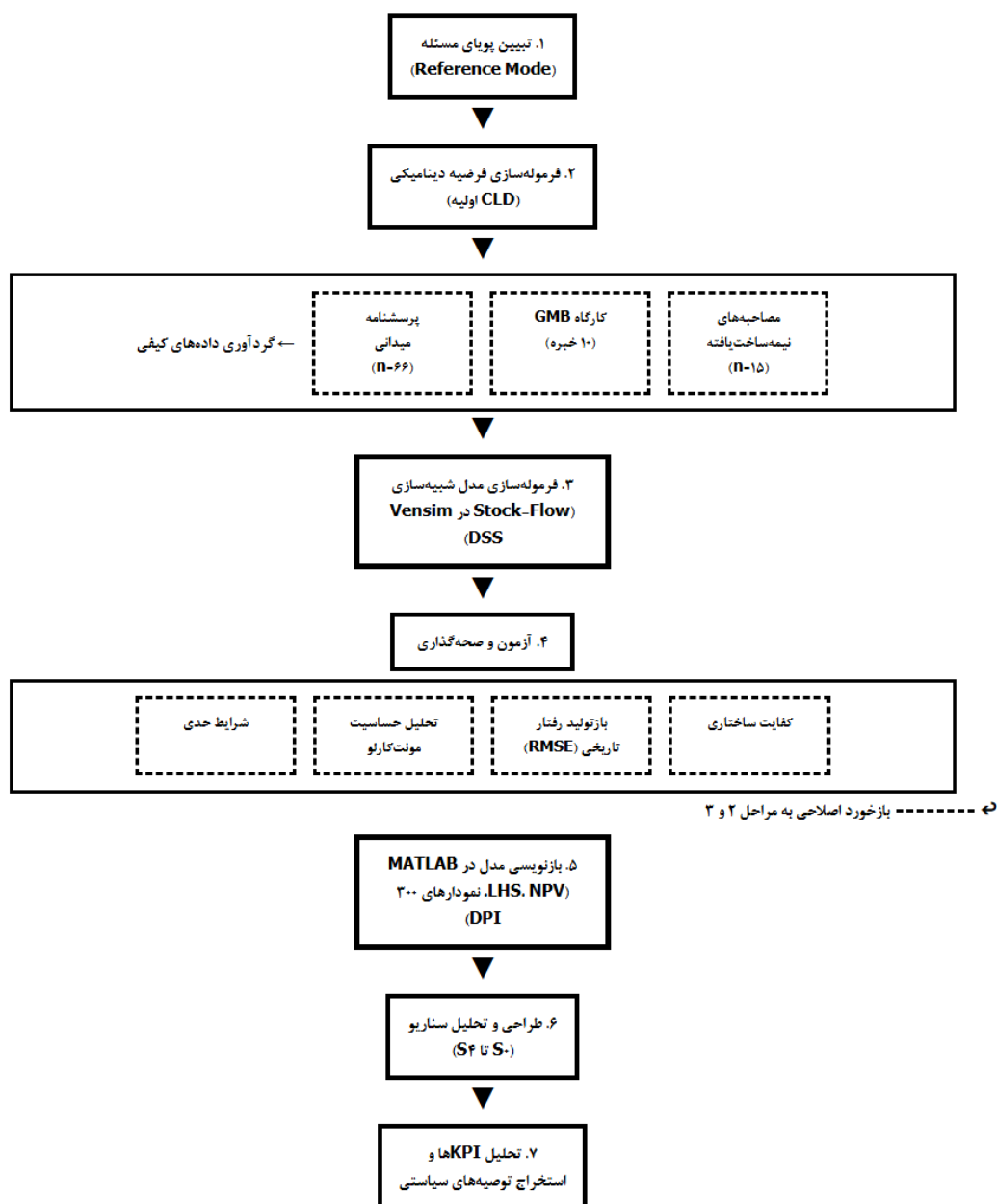
Table 1. Key characteristics of Ekbatan town in the base year

مشخصه	مقدار	واحد
جمعیت	۴۶۲۰۰	نفر
مصرف سرانه برق	۲/۹۵	مگاوات ساعت/نفر/سال
تقاضای کل برق	۱۳۶۲۹۰	مگاوات ساعت/سال
اوج بار سالانه	۲۷/۸	مگاوات
ضریب بار	۰/۵۶	بدون بعد
ظرفیت تجدیدپذیر نصب شده	۱/۸	مگاوات
پوشش کنتور هوشمند	۳۸	درصد
ظرفیت نامی شبکه توزیع	۳۵	مگاوات

جدول ۲. معادلات ساختاری محوری مدل

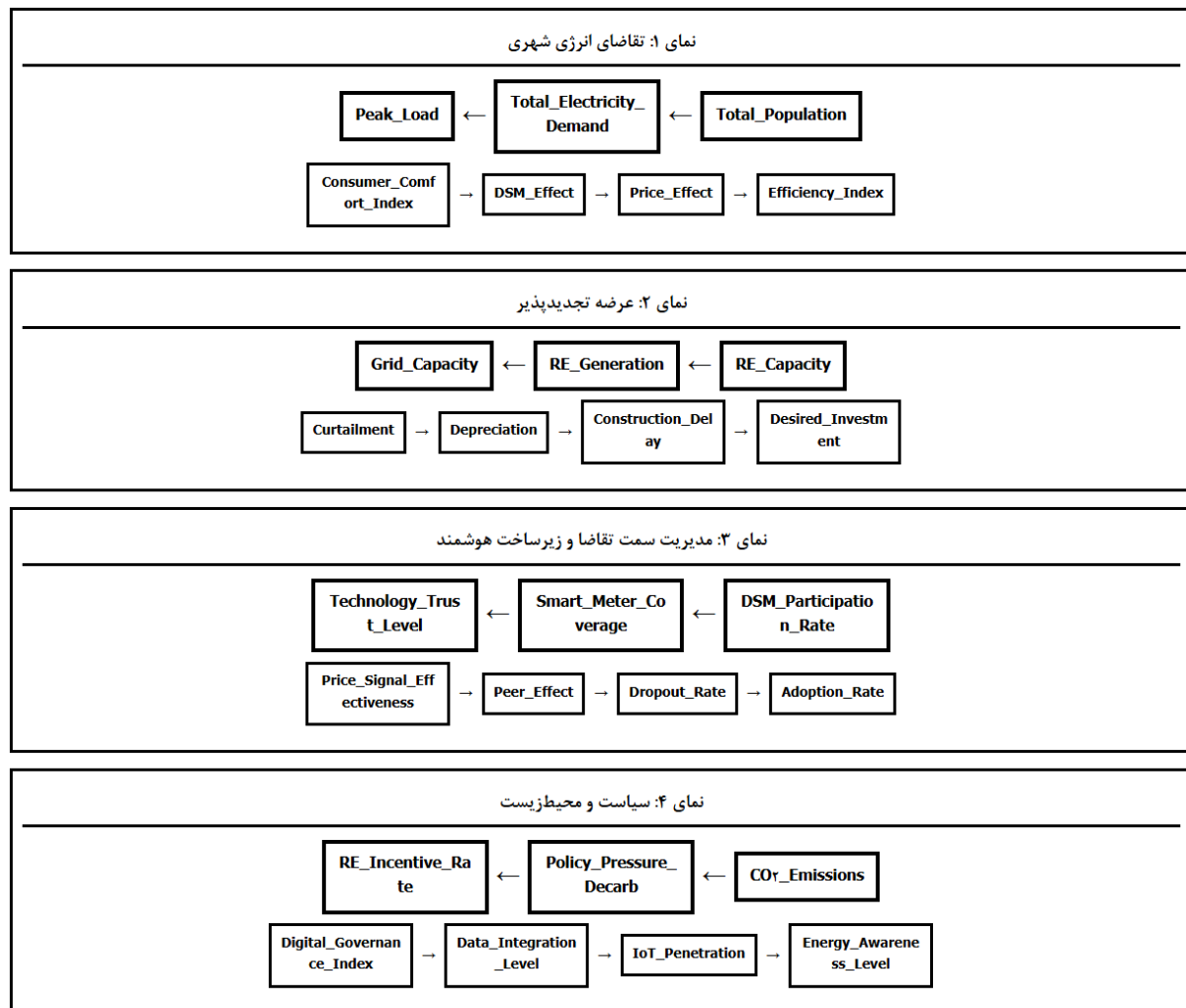
Table 2. Core structural equations of the model

شماره	معادله	شرح
(۱)	$Total_Electricity_Demand = Total_Population \times Per_Capita_Consumption$	تقاضای کل
(۲)	$RE_Capacity(t) = RE_Capacity(t-dt) + (RE_Investment_Rate - RE_Depreciation_Rate) \times dt$	انباشت ظرفیت تجدیدپذیر
(۳)	$DSM_Participation_Rate(t) = DSM_Participation_Rate(t-dt) + (Participation_Increase - Participation_Decrease) \times dt$	انباشت مشارکت
(۴)	$Adoption_Rate_Fraction = f(Technology_Trust_Level, Smart_Meter_Coverage, Consumer_Comfort_Index, Peer_Effect)$	تابع لوجستیک پذیرش
(۵)	$CO_2_Emissions = Total_Electricity_Demand \times (1 - RE_Penetration) \times Fossil_Emission_Factor$	انتشار CO2
(۶)	$Digital_Governance_Index(t) = \dots + (Governance_Maturation_Rate - Governance_Erosion_Rate) \times dt$	انباشت حکمرانی دیجیتال



شکل ۲. فلوچارت مراحل پژوهش.

Figure 2. Flowchart of the research stages.



شکل ۳. نمودار جریان-انباشت شماتیک مدل در چهار نمای اصلی.

Figure 3. Schematic flow-accumulation diagram of the model in four main views.

۳-۳- پیمایش میدانی و پارامترگذاری رفتاری

برای تخمین پارامترهای رفتاری مدل، یک پیمایش میدانی اکتشافی با ۱۵ سؤال طراحی و بین ساکنان شهرک اکباتان توزیع گردید. سؤالات به گونه‌ای طراحی شدند که مستقیماً متغیرهای کلیدی مدل را اندازه‌گیری کنند:

- سؤال «چقدر به فناوری‌های جدید مثل کنترل هوشمند اعتماد دارید؟» - متغیر $Technology_Trust_Level$
- سؤال «اگر بدانید با کاهش مصرف، قبضتان ارزان می‌شود، چقدر مشارکت می‌کنید؟» - بُعد $Bill_Satisfaction$ از $Consumer_Comfort_Index$
- سؤال «حاضرم دمای کولر را ۱-۲ درجه بالاتر تنظیم کنم» - متغیر $Thermal_Comfort$

وزن‌های به‌کاررفته در تابع پذیرش (معادله ۴) شامل ۰/۳۰ برای اعتماد به فناوری، ۰/۲۵ برای پوشش کنترل هوشمند، ۰/۲۵ برای آسایش مصرف‌کننده و ۰/۲۰ برای اثر همسایگی، ابتدا از تحلیل همبستگی میان متغیرهای رفتاری پرسشنامه میدانی و تمایل به مشارکت استخراج شدند و سپس در کارگاه خبرگانی بازبینی و نهایی گردیدند. جزئیات کامل این محاسبات در نسخه کامل پایان‌نامه مستند شده است. برای اطمینان از اینکه انتخاب این وزن‌ها نتیجه نهایی را جهت‌دهی نمی‌کند، مدل با چهار ترکیب وزنی متفاوت شامل حالت پایه، حالت اعتماد-محور، حالت پوشش-محور و حالت همسایگی-محور اجرا شد. در تمام این ترکیب‌ها، سناریوی ترکیبی بهینه همچنان بهترین عملکرد را حفظ کرد. بنابراین یافته‌های پژوهش به انتخاب دقیق این وزن‌ها وابسته نیست.

- سؤال «اگر همسایه‌ها شرکت کنند، شما چقدر

مشتاق می‌شوید؟» - متغیر Peer_Effect

۶۶ پرسشنامه تکمیل و تحلیل گردید. پایایی درونی پرسشنامه با محاسبه آلفای کرونباخ برای سؤالات لیکرتی ۰/۷۶ به دست آمد که در دامنه قابل قبول قرار دارد. برای افزایش روایی، از مثلث‌سازی بین سه منبع استفاده شد: ادبیات، مصاحبه‌های نیمه‌ساخت‌یافته (۱۵ مصاحبه تا اشباع نظری)، و کارگاه گروه‌مدل‌سازی با ۱۰ خبره.

اگرچه این پیمایش ماهیت اکتشافی دارد و هدف آن برآورد اولیه پارامترهای رفتاری مدل است، اما برای اطمینان از کفایت حجم نمونه، حداقل تعداد مورد نیاز با فرمول کوکران $n = (Z^2 \times p \times q) / e^2$ محاسبه شد که در آن $Z = 1.96$ (سطح اطمینان ۹۵٪)، $p = 0.5$ و $q = 1 - p = 0.5$ (نسبت محافظه‌کارانه)، $e = 0.12$ (خطای نمونه‌گیری ۱۲٪). با جایگذاری این مقادیر:

$$n = (1.96^2 \times 0.5 \times 0.5) / (0.12)^2 = 3.8416 \times 0.25 / 0.0144 \approx 66.7$$

بنابراین حداقل حجم نمونه لازم ۶۷ نفر است که حجم نمونه ۶۶ پرسشنامه تکمیل‌شده در سطح خطای پذیرفته‌شده برای پژوهش‌های اکتشافی با آن منطبق است.

از این رو، ۶۶ پرسشنامه تکمیل‌شده در این مطالعه در سطح خطای پذیرفته‌شده برای پژوهش‌های اکتشافی قرار دارد و برای هدف مدل‌سازی رفتاری کفایت می‌کند. همچنین برای تقویت اعتبار یافته‌ها، روش‌های تکمیلی شامل ۱۵ مصاحبه نیمه‌ساخت‌یافته تا اشباع نظری و کارگاه خبرگانی با ۱۰ متخصص برگزار شد که در ادامه شرح داده شده است.

روش تبدیل پاسخ‌ها به پارامترها: برای Technology_Trust_Level (مقدار اولیه)، پاسخ‌های سؤال اعتماد بر اساس طیف لیکرت ۴ گزینه‌ای به مقیاس ۰ تا ۱ نگاشت شد («کاملاً اعتماد دارم» = ۱، «اعتماد دارم» = ۰/۶۷، «نظری ندارم» = ۰/۳۳، «اعتماد ندارم» = ۰) و میانگین وزنی پاسخ‌ها ۰/۶۱ محاسبه گردید. این مقدار با تعدیل توسط خبرگان در کارگاه گروه‌مدل‌سازی (با توجه به احتمال سوگیری پاسخ‌دهندگان داوطلب) به ۰/۳۵ کاهش یافت. دلیل این تعدیل آن است که پرسشنامه به‌صورت داوطلبانه تکمیل

شده و ممکن است افرادی با نگرش مثبت‌تر به فناوری، تمایل بیشتری برای مشارکت در نظرسنجی داشته باشند. بنابراین مقدار ۰/۶۱ به‌عنوان برآورد خام و مقدار ۰/۳۵ به‌عنوان مقدار محافظه‌کارانه برای شروع شبیه‌سازی انتخاب شد. برای اطمینان از اینکه این تعدیل نتیجه نهایی را جهت‌دهی نمی‌کند، مدل با چهار مقدار اولیه اعتماد شامل ۰/۲۰، ۰/۳۵، ۰/۵۰ و ۰/۶۰ نیز اجرا شد. در تمام این حالت‌ها، سناریوی ترکیبی بهینه همچنان بهترین عملکرد را حفظ کرد؛ سهم تجدیدپذیر مؤثر در بدترین حالت ۰/۱۹۸ و در بهترین حالت ۰/۲۰۶ و انتشار جمعی دی‌اکسید کربن بین ۲/۶۱ تا ۲/۶۸ میلیون تن باقی ماند. بنابراین تعدیل مذکور، جهت‌گیری یافته‌ها و توصیه‌های سیاستی را تغییر نمی‌دهد. پارامترهای مدل در سه دسته طبقه‌بندی شدند: دسته A (داده‌های آماری رسمی)، دسته B (ضرایب استاندارد ادبیات)، و دسته C (برآوردهای خبرگانی با اتکا به شواهد پرسشنامه). در Comfort_Threshold و Technology_Trust_Level در دسته C قرار دارند.

۴-۳- کالیبراسیون و صحت‌گذاری

مدل با الگوریتم Powell در ماژول Optimization نرم‌افزار ونسیم برای دوره ۱۰ ساله کالیبره گردید. تابع هدف، کمینه‌سازی مجموع مربعات خطای نرمال‌شده برای Peak_Load و RE_Generation بود. شکل ۴، هم‌پوشانی خروجی مدل با داده‌های تاریخی اوج بار را نشان می‌دهد ($RMSE = 8.3\%$, $R^2 = 0.89$). جدول ۳ خلاصه شاخص‌های کالیبراسیون را ارائه می‌کند. تمامی متغیرها RMSE زیر ۱۰٪ و R^2 بالای ۸۰٪ دارند.

جدول ۳. خلاصه شاخص‌های کالیبراسیون

Table 3. Summary of calibration indices

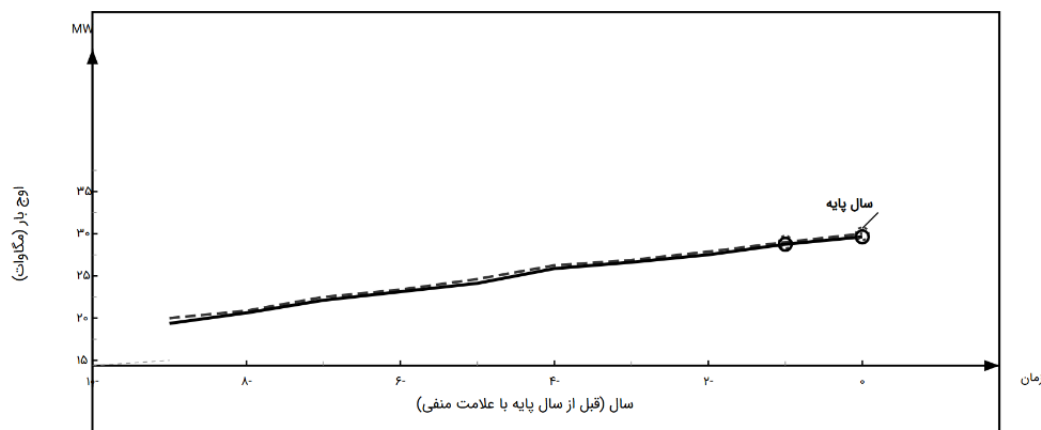
متغیر	RMSE	R ²
Peak_Load	۸/۳	۰/۸۹
RE_Generation	۷/۱	۰/۹۴
Total_Electricity_Demand	۶/۲	۰/۹۱

تحلیل حساسیت مونت‌کارلو با ۲۰۰ تکرار روی ۱۰ پارامتر بحرانی در بازه $\pm 5\%$ اجرا گردید که رویه‌ای استاندارد در تحلیل عدم قطعیت مدل‌های پویایی سیستم انرژی است (Daneshzand et al., 2018). شکل ۵، نمودار گشتاور

۳-۵- طراحی سناریوها

پنج سناریو بر اساس دو محور عرضه و تقاضا طراحی شدند (جدول ۴). سناریوی پایه (S0) تداوم روندهای فعلی را بازنمایی می‌کند. S1 (عرضه‌محور) بر توسعه حداکثری تجدیدپذیر، S2 (تقاضا‌محور) بر تعرفه پویا و مدیریت سمت تقاضا شدید، S3 (زیرساخت‌محور) بر توسعه زیرساخت بدون مدیریت سمت تقاضا فعال، و S4 (ترکیبی بهینه) بر هم‌افزایی عرضه و تقاضا متمرکز است. سناریوی S3 به‌صورت تحلیلی طراحی شده است تا اثر خالص زیرساخت هوشمند، جدا از سیاست‌های فعال قیمتی و مشارکتی سنجیده شود. عملکرد سناریوها با شش شاخص کلیدی عملکرد شامل نسبت اوج به میانگین، سهم تجدیدپذیر، انتشار دی‌اکسید کربن تجمعی، هزینه هم‌تراز شده انرژی، رضایت مصرف‌کننده، و تاب‌آوری شبکه ارزیابی می‌شود.

برای شاخص کلیدی عملکرد سهم تجدیدپذیر را نشان می‌دهد. RE_Share بیشترین حساسیت را به RE_Capacity_Factor و Depreciation_Fraction دارد. برای تکمیل تحلیل حساسیت، دو پارامتر رفتاری کلیدی یعنی آستانه آسایش و اثر همسایگی در بازه‌های ۰.۵۵ تا ۰/۷۵ و ۰/۱۰ تا ۰/۳۰ تغییر داده شدند و اثر آن‌ها بر نرخ مشارکت در مدیریت سمت تقاضا و شاخص رضایت مصرف‌کننده بررسی گردید. نتایج نشان داد که این پارامترها مسیر مشارکت و رضایت را تحت تأثیر قرار می‌دهند، اما سناریوی ترکیبی بهینه در تمام حالات بهترین عملکرد را حفظ می‌کند.



خروجی مدل (پس از کالیبراسیون) ————— داده‌های تاریخی (شرکت توزیع برق تهران بزرگ، ۱۳۹۰-۱۳۹۹) • نقاط داده سالانه

شکل ۴. هم‌پوشانی خروجی مدل با داده واقعی اوج بار سالانه.

Figure 4. Overlap of model output with actual annual peak load data

جدول ۴. ماتریس سناریوها

Table 4. Scenario matrix

سناریو	محور عرضه	محور تقاضا	Dynamic Tariff
S0 (پایه)	روند فعلی	روند فعلی	خاموش
S1 (عرضه‌محور)	حداکثری	روند فعلی	خاموش
S2 (تقاضا‌محور)	روند فعلی	حداکثری	روشن
S3 (زیرساخت‌محور)	روند فعلی	فقط زیرساخت	خاموش
S4 (ترکیبی)	بالا	متوسط	روشن

۴- یافته‌ها

۴-۱- نتایج پیمایش میدانی

تحلیل ۶۶ پرسشنامه نشان داد که در زمینه اعتماد به فناوری‌های هوشمند، ۱۸ نفر (۲۷٪) «کاملاً اعتماد دارم»، ۳۲ نفر (۴۸٪) «اعتماد دارم»، ۱۲ نفر (۱۸٪) «تقریباً ندارم»، و ۴ نفر (۶٪) «اعتماد ندارم» را برگزیدند (فاصله اطمینان ۹۵٪ برای نسبت اعتماد: $0.75 \pm 0.10/4$). تمایل به مشارکت الگوی جالبی آشکار ساخت: ۳۷ نفر (۵۶٪) «حتماً شرکت می‌کنم»، ۲۲ نفر (۳۳٪) «شاید شرکت کنم»، ۴ نفر (۶٪) «فقط اگر همسایه‌ها شرکت کنند»، و ۳ نفر (۵٪) «شرکت نمی‌کنم». ۶ درصدی که مشارکت خود را مشروط به همسایگان کرده‌اند، شواهد تجربی برای وجود Peer_Effect فراهم می‌کند. دلایل کاهش مصرف به ترتیب اولویت عبارت بودند از: پایداری شبکه (۴۲٪)، ارزانی قبض (۳۶٪)، و محیط زیست (۲۲٪). در خصوص حساسیت به آسایش حرارتی، ۴۰ نفر (۶۱٪) با افزایش ۱-۲ درجه دمای کولر موافق بودند. آزمون کای-دو نشان داد که بین سطح تحصیلات و اعتماد به فناوری رابطه معناداری در سطح ۰.۰۵ وجود ندارد. تحلیل کیفی سؤالات باز، تم‌های تکرار شونده‌ای را آشکار ساخت. برای نمونه، نگرانی از «یک‌طرفه بودن سیاست‌های شرکت برق» در پاسخ‌های ۱۲ نفر (۱۸٪) ظهور یافت. یک پاسخ‌دهنده (زن، بالای ۴۰ سال) نوشت: «بی‌اعتمادی به شرکت برق که یک‌طرفه عمل می‌کند و فقط فکر پول بیشتر از مشتری گرفتن است». این شواهد، وجود یک شکاف اعتماد نهادی را تأیید می‌کند.

۴-۲- اعتبارسنجی مدل

نتایج کالبراسیون (جدول ۳ و شکل ۵) نشان می‌دهد که مدل با دقت قابل‌قبولی رفتار تاریخی را بازتولید کرده است. تحلیل حساسیت (شکل ۵) نشان داد که $Peak_to_Average_Ratio$ پایداری‌ترین شاخص کلیدی عملکرد است، در حالی که RE_Share بیشترین حساسیت را به عدم قطعیت پارامترها دارد. مدل همچنین آزمون‌های شرایط حدی (قیمت صفر، مشارکت ۱۰۰٪) را با موفقیت گذراند.

۴-۳- تحلیل تطبیقی سناریوها

عملکرد سناریوها در KPI های کلیدی به شرح زیر است (شکل ۵ تا شکل ۸):

- **سهم تجدیدپذیر:** S1 با ۲۴/۵٪ بالاترین سهم اسمی را دارد، اما به دلیل محدودسازی بالاتر (۱۲٪ در مقابل ۴٪ در S4)، سهم تجدیدپذیر مؤثر در S4 (۲۰/۱)، اندکی از S1 (۱۹/۸) فراتر می‌رود. شکاف S1-S4 در طول زمان کاهشی است.
- **انتشار CO₂ تجمعی:** S4 با ۲/۶۵ میلیون تن کاهش ۲۳٪ نسبت به پایه بهترین عملکرد را دارد. S4 با وجود سهم تجدیدپذیر اسمی کمتر از S1، به دلیل کاهش تقاضای کل از طریق مدیریت سمت تقاضا، انتشار کمتری تولید می‌کند.
- **نسبت اوج به میانگین:** S2 با کاهش ۱۸٪ (به ۱/۴۲) بهترین عملکرد را دارد، اما این موفقیت با کاهش ۲۴٪ رضایت مصرف‌کننده (به ۰/۵۸) همراه است. S4 با کاهش ۱۵٪ (به ۱/۴۸) و حفظ رضایت در ۰/۷۱، تعادل بهتری برقرار می‌کند.

جدول ۵ ماتریس عملکرد کمی و **جدول ۶** رتبه‌بندی کیفی سناریوها را ارائه می‌دهند. S4 با چهار شاخص کلیدی عملکرد عالی و بدون شاخص کلیدی عملکرد ضعیف، بهترین عملکرد همه‌جانبه را دارد.

۴-۴- کالبدشکافی پویایی حلقه‌های بازخوردی

کالبدشکافی پویایی حلقه‌های بازخوردی به شرح زیر است:

- **حلقه R2 (اعتماد-مشارکت) و شرط مرزی:** در S2، مشارکت با شتاب به ۰/۴۵ می‌رسد، اما با کاهش $Consumer_Comfort_Index$ به $Comfort_Threshold = 0.65$ ، نرخ خروج فعال و مشارکت معکوس می‌شود. در S4، مشارکت پایداری (۰/۳۲) رشد می‌کند و شاخص آسایش بالای آستانه می‌ماند. زیرحلقه R3 نیز در S2 و S4 فعال است و سطح آگاهی انرژی را از ۰/۳۰ به ۰/۶۲ (S2) و ۰/۵۸ (S4) افزایش می‌دهد.

مقایسه می‌کند. S4 با هزینه ۴۱۶۰۰۰ تومان به ازای هر تن کاهش CO₂، ۵۴٪ بهتر از S1 عمل می‌کند. برای بررسی پایداری نتایج اقتصادی، تحلیل حساسیت روی نرخ تنزیل (۳٪، ۵٪ و ۷٪)، قیمت سوخت (پایین، مبنا و بالا) و هزینه‌های سرمایه‌ای (خوش‌بینانه و بدبینانه) انجام شد. نتایج نشان داد که مقادیر عددی هزینه به ازای هر تن کاهش CO₂ تغییر می‌کند، اما رتبه‌بندی سناریوها و برتری سناریوی ترکیبی بهینه در تمام حالات حفظ می‌شود.

۴-۶- آزمون فرضیه‌ها

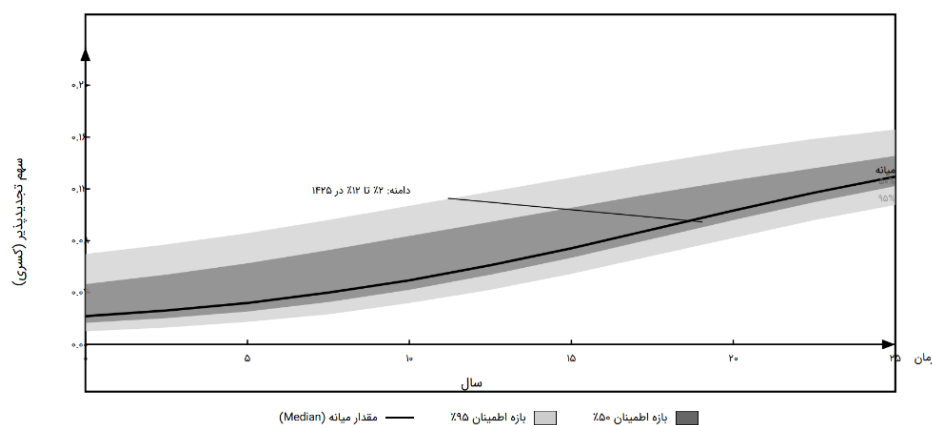
جدول ۸ احکام نهایی آزمون فرضیه‌ها را خلاصه می‌کند.

• **حلقه B1 و اثر بازگشتی:** در S2، تعرفه پویا اوج بار را ۱۸٪ کاهش می‌دهد، اما اثر بازگشتی از سال ۱۴۰۸ ظهور کرده و ۴۰٪ از کاهش اولیه را خنثی می‌کند.

• **حلقه R4 (حکمرانی دیجیتال):** Digital_Governance_Index در S4 از ۰/۱۸ به ۰/۵۶ می‌رسد. بیشترین رشد در میان سناریوها. این رشد محصول هم‌افزایی Data_Integration_Level (۰/۱۵-۰/۵۲)، Policy_Pressure_Decarbonization (۰/۱۲-۰/۵۸)، و DSM_Participation_Rate (۰/۰۴-۰/۳۲) است.

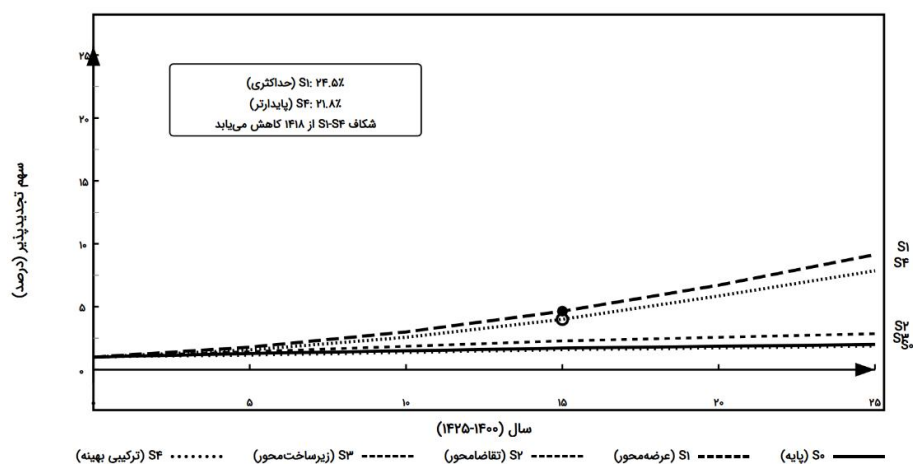
۴-۵- تحلیل هزینه-اثر بخشی

جدول ۷ نسبت هزینه-اثر بخشی را با فرض نرخ تنزیل ۵٪ و قیمت سوخت فسیلی یارانه‌ای ایران



شکل ۵. نمودار گشتاور سهم تجدیدپذیر در سناریوی پایه.

Figure 5. Confidence bounds of renewable share in the baseline scenario.



شکل ۶. مقایسه سناریوها: سهم تجدیدپذیر.

Figure 6. Scenario comparison: renewable share.

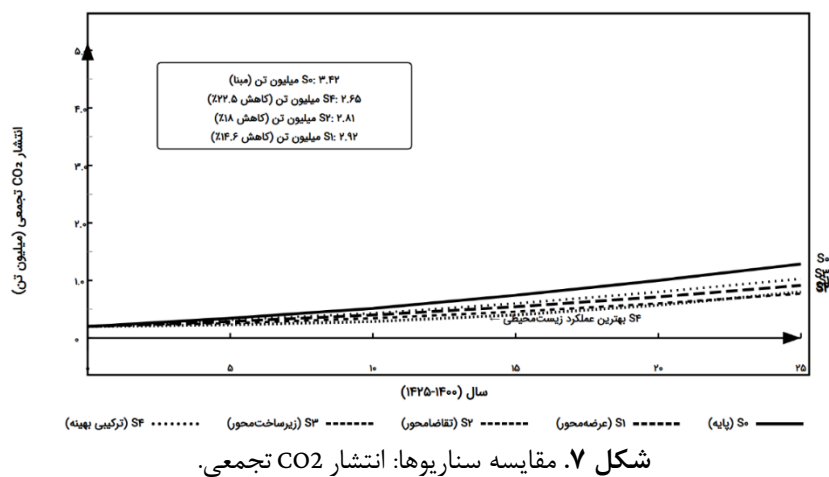
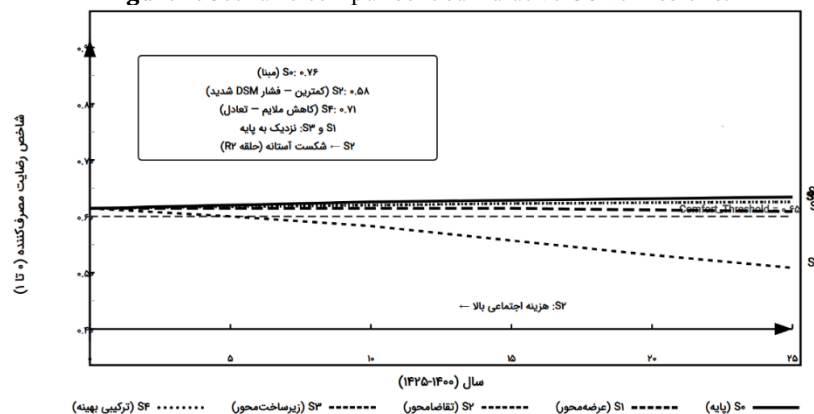
Figure 7. Scenario comparison: cumulative CO₂ emissions.

Figure 8. Scenario comparison: consumer satisfaction index.

جدول ۵. ماتریس عملکرد کمی سناریوها (سال ۱۴۲۵)

Table 5. Quantitative performance matrix of scenarios (Year 2046)

S4	S3	S2	S1	S0	KPI
۱/۴۸	۱/۶۹	۱/۴۲	۱/۶۸	۱/۷۴	نسبت اوج به میانگین
۲۱/۸	۴/۱	۶/۲	۲۴/۵	۲/۸	سهم تجدیدپذیر اسمی
۲۰/۱	۳/۹	۵/۸	۱۹/۸	۲/۵	سهم تجدیدپذیر مؤثر
۲/۶۵	۳/۱۸	۲/۸۱	۲/۹۲	۳/۴۲	انتشار CO ₂ تجمعی (Mt)
۱/۳۲۵	۱/۳۱۲	۱/۳۰۰	۱/۴۳۸	۱/۲۵۰	LCOE (تومان/مگاوات‌ساعت)
۰/۷۱	۰/۷۴	۰/۵۸	۰/۷۲	۰/۷۶	رضایت مصرف‌کننده
۰/۷۹	۰/۸۲	۰/۷۰	۰/۶۱	۰/۶۸	تاب‌آوری شبکه

جدول ۶. رتبه‌بندی کیفی سناریوها

Table 6. Qualitative ranking of scenarios

S4	S3	S2	S1	S0	KPI
عالی	خوب	عالی	خوب	مبدا	نسبت اوج به میانگین
عالی	ضعیف	ضعیف	خوب	مبدا	سهم تجدیدپذیر مؤثر
عالی	ضعیف	خوب	خوب	مبدا	انتشار CO ₂
خوب	خوب	خوب	ضعیف	مبدا	LCOE
خوب	خوب	ضعیف	خوب	مبدا	رضایت مصرف‌کننده
عالی	عالی	خوب	ضعیف	مبدا	تاب‌آوری شبکه

جدول ۷. تحلیل هزینه-اثربخشی سناریوها

Table 7. Cost-effectiveness analysis of scenarios

رتبه	سناریو	کاهش انتشار (تن)	افزایش هزینه (میلیارد تومان، NPV)	هزینه/تن CO ₂ (تومان)
۱	S4	۷۷۰۰۰	۳۲۰	۴۱۶۰۰۰
۲	S2	۶۱۰۰۰	۲۸۰	۴۵۹۰۰۰
۳	S3	۲۴۰۰۰	۱۹۰	۷۹۲۰۰۰
۴	S1	۵۰۰۰۰	۴۵۰	۹۰۰۰۰۰

جدول ۸. خلاصه آزمون فرضیه‌های پژوهش

Table 8. Summary of research hypothesis testing

فرضیه	حکم	شواهد
۱- هم‌تکاملی عرضه و تقاضا	تأیید مشروط	S4 > S1 مؤثر RE_Share
۲- پویایی اعتماد-مشارکت	تأیید	فعال‌بودن R2 در S4؛ معکوس‌شدن در S2
۳- معمای تعرفه پویا	تأیید	اثر بازگشتی ۴۰٪ در S2
۴- نقطه اهرمی زیرساخت هوشمند	تأیید	Price_Signal_Effectiveness $\approx 2 \times S2$

۵- بحث و نتیجه‌گیری

۵-۱- سنتز نهایی: چرا S4 برنده است؟

S4 از طریق سرمایه‌گذاری هم‌زمان روی عرضه و تقاضا، حلقه‌های تقویتی R1 و R4 را فعال می‌کند، در حالی که با حفظ Consumer_Comfort_Index بالای ۰/۶۵ از معکوس‌شدن R2 و با ارتقای شبکه از فعال‌شدن B3 جلوگیری می‌نماید. این هم‌افزایی، یک مسیر رشد پایدار ایجاد می‌کند.

۵-۲- درس‌آموخته‌ها از تلفیق پرسشنامه و

پویایی سیستم

این پژوهش نشان داد که حتی یک پیمایش اکتشافی با حجم نمونه محدود (۶۶) می‌تواند پارامترهای رفتاری مدل را از حدس‌های خبرگانی به تخمین‌های مبتنی بر شواهد ارتقا دهد. با این حال، محدودیت حجم نمونه باید صریحاً پذیرفته شود. شکاف اعتماد نهادی که در پاسخ‌های ۱۸٪ از پاسخ‌دهندگان ظهور یافت، یادآور می‌شود که مدل‌های کمی انرژی بدون لحاظ ابعاد نرم اجتماعی، تصویری ناقص ارائه می‌دهند. این یافته با نتایج گلفام و آشفته (Golfam & Ashofteh, 2026) درباره اهمیت اولویت‌بندی سناریوها با معیارهای چندگانه در سیستم‌های آب و انرژی هم‌راستا است و نشان می‌دهد که پذیرش اجتماعی، وزنی هم‌سنگ با معیارهای فنی و اقتصادی دارد.

۵-۳- دلالت‌های سیاستی

یافته‌های برآمده از شبیه‌سازی سناریوها و تحلیل پویایی حلقه‌های بازخوردی، پنج دلالت سیاستی مشخص و قابل‌اجرا را برای گذار پایدار ریزشکبه‌های شهری آشکار می‌سازد:

- نخست، فعال‌سازی تعرفه‌گذاری پویا مستلزم یک پیش‌شرط ساختاری قطعی است: پوشش کنتورهای هوشمند باید پیش از هر اقدامی از آستانه ۶۰ درصد عبور کند. در غیر این صورت، اثربخشی سیگنال قیمت به‌شدت تضعیف شده و اثر بازگشتی، هرگونه کاهش اوج بار را در میان‌مدت خنثی می‌کند. این آستانه، مرز میان یک مداخله مؤثر و یک سیاست شتاب‌زده و پرهزینه را ترسیم می‌کند.
- دوم، مدل نشان می‌دهد که افزایش نرخ مشوق‌های توسعه تجدیدپذیر تا سطح ۰/۴۵، بازده صعودی دارد، اما عبور از این مقدار، فشار بودجه‌ای مضاعفی ایجاد می‌کند که بازده نهایی آن به‌شدت کاهشی است. این نقطه، سقف بهینه مداخله مالی دولت را مشخص می‌سازد و تأکید می‌کند که مشوق‌ها باید در پنجره‌ای طلایی و نه به‌طور نامحدود، به‌کار گرفته شوند.
- سوم، پایداری برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا به یک قید رفتاری حیاتی گره خورده است:

۵-۵- محدودیت‌ها و مسیرهای آتی

یافته‌ها باید در پرتو شش محدودیت تفسیر شوند:

- (۱) حجم نمونه محدود پرسشنامه ($n = 66$)
- (۲) حساسیت نتایج به پارامتر دسته C؛ یعنی، Comfort_Threshold
- (۳) نبود داده تاریخی برای DSM_Participation_Rate و عدم شرکت آن در کالیبراسیون
- (۴) عدم تحلیل حساسیت اختصاصی برای شاخص‌های هزینه-اثر بخشی
- (۵) فرض ثبات فناوری و مستثنا بودن نوآوری‌های جهشی
- (۶) عدم حضور پروژه تولید هم‌زمان برق و حرارت مگامال در مدل پایه. مسیرهای آتی شامل اجرای پیمایش وسیع‌تر ($n \geq 300$)، توسعه مدل به کلان‌شهر کامل، و تحلیل حساسیت جامع هزینه-اثر بخشی است.

قدردانی

نویسندگان مراتب قدردانی خود را از خبرگان و محققان این حوزه که با صرف وقت، ارائه دیدگاه‌های تخصصی و مشارکت در فرایند گردآوری داده‌ها، زمینه انجام این پژوهش را فراهم کردند، ابراز می‌دارند.

حمایت مالی

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی دریافت نکرده است.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تضاد منافع مرتبط با تحقیق حاضر ندارند و نتایج به‌صورت بی‌طرفانه و بدون دخالت منافع شخصی یا حرفه‌ای به‌دست‌آمده است.

مشارکت‌های نویسندگان

محمد مهدی کفشوندی: مفهوم‌پردازی، مدیریت داده‌ها، تحلیل آماری، تحقیق و بررسی، روش‌شناسی، تأمین منابع، نرم‌افزار، اعتبارسنجی، مصورسازی، نگارش پیش‌نویس اصلی، نگارش - بازبینی و ویرایش؛ **سعید**

شاخص آسایش مصرف‌کننده نباید از مرز بحرانی ۰.۶۵ پایین‌تر رود. هرگونه سیاستی که این مرز را نقض کند، نرخ خروج از برنامه را به‌طور تصاعدی افزایش می‌دهد و حلقه تقویتی اعتماد-مشارکت را معکوس می‌سازد. به بیان دیگر، موفقیت بلندمدت مدیریت سمت تقاضا نه در حداکثرسازی کاهش بار، بلکه در حفظ تعادل میان صرفه‌جویی و رضایت مصرف‌کننده نهفته است.

- چهارم، ارتقای ظرفیت شبکه توزیع باید دست‌کم دو برابر روند سرمایه‌گذاری پایه شتاب گیرد. بدون این اقدام، افزایش نفوذ تجدیدپذیرهای توزیع‌شده به ازدحام شبکه، محدودسازی تولید و در نهایت تضعیف انگیزه سرمایه‌گذاران می‌انجامد (حلقه تعدیلی B3).
- ارتقای شبکه، نه یک انتخاب، بلکه ضرورتی ساختاری برای جذب ایمن سهم بالای تجدیدپذیر است.
- پنجم، توسعه پلتفرم‌های یکپارچه داده‌های شهری باید به‌عنوان یک هدف راهبردی دنبال شود تا سطح یکپارچگی داده‌ها به حداقل ۵۰ برسد. این سطح از یکپارچگی، پیش‌نیاز عملکردی حلقه هم‌تکاملی حکمرانی دیجیتال (R4) است و به شفافیت سیگنال‌های قیمت، افزایش اعتماد نهادی و تسریع بلوغ حکمرانی دیجیتال منجر می‌شود. در غیاب این لایه فراسیستمی، سایر مداخلات فنی و قیمتی اثر بخشی کاملی نخواهند داشت.

۵-۴- مشارکت نظری

این پژوهش در سه حوزه مشارکت می‌کند:

- (۱) بسط نظری پویایی سیستم: مفهوم‌پردازی لایه فراسیستمی و درون‌سازی حکمرانی دیجیتال (R4).
- (۲) غنی‌سازی مدل‌های کمی: ارائه پروتکل اکتشافی برای تلفیق پرسشنامه با پویایی سیستم.
- (۳) کاربست تجربی: ارائه شواهد از یک ریزشبکه شهری واقعی در ایران.

- Daneshzand, F., Amin-Naseri, M. R., Elkamel, A., & Fowler, M. (2018). A system dynamics model for analyzing future natural gas supply and demand. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57(32), 11061-11075. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b00709>
- Dehghan Pir, A., Samiei Moghaddam, M., Alibeaki, E., Salehi, N., & Davarzani, R. (2025). A refined approach exploiting demand response in distribution grids integrating renewable energy and storage systems alongside metro facilities via LSTPA methodology. *Energy Storage*, 7(4), e70203. <https://doi.org/10.1002/est2.70203>
- Dehghan, H., Amin-Naseri, M. R., & Nahavandi, N. (2021). A system dynamics model to analyze future electricity supply and demand in Iran under alternative pricing policies. *Utilities Policy*, 69, 101165. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2020.101165>
- Faruqui, A., & Sergici, S. (2010). Household response to dynamic pricing of electricity: A survey of 15 experiments. *Journal of regulatory Economics*, 38(2), 193-225. <https://doi.org/10.1007/s11149-010-9127-y>
- Feng, Y. Y., Chen, S. Q., & Zhang, L. X. (2013). System dynamics modeling for urban energy consumption and CO2 emissions: A case study of Beijing, China. *Ecological Modelling*, 252, 44-52. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.09.008>
- Ford, A. (1999). *Modeling the environment: An introduction to system dynamics modeling of environmental systems*. Island Press.
- Forrester, J. W. (1961). *Industrial dynamics*. MIT Press.
- Givehchi, S., Nozar, A. V., & Malekmohammadi, B. (2024). Investigating the effective consequences on the assets of an urban system in facing scenario-based hazards. *Entorno Geográfico*, (28), e24514399-e24514399. <https://doi.org/10.25100/eg.v0i28.14399>
- Golfam, P., & Ashofteh, P. S. (2025a). Evaluation of the effect of the water-energy nexus on the performance of the water-energy supply system. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(7), 4040-4060. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-35928-0>
- Golfam, P., & Ashofteh, P. S. (2025b). Prioritization of water-energy nexus scenarios using the development of D-number theory in multi-criteria analysis method. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(11), 6550-6573. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36105-z>
- Golfam, P., & Ashofteh, P. S. (2026). Environmental-economic analysis of regional energy system under different supply and demand side scenarios with LEAP model. *Environment, Development and Sustainability*, 28(4), 8897-

گیوه‌چی: مفهوم‌پردازی، مدیریت پروژه، راهنمایی، نگارش - بازیابی و ویرایش؛ غلامرضا نبی بیدهندی: مفهوم‌پردازی، مدیریت پروژه، راهنمایی، نگارش - بازیابی و ویرایش.

دست‌رسی به داده‌ها

داده‌ها در صورت درخواست در دسترس هستند: داده‌های پشتیبانی‌کننده نتایج این مطالعه در اختیار نویسنده مسئول بوده و در صورت درخواست منطقی در دسترس قرار خواهند گرفت.

مراجع

- Afsari Mamaghani, F., Omidvar, B., Avami, A., & Nabi Bidhendi, G. R. (2023). An optimal integrated power and water supply planning model considering Water-Energy-Emission nexus. *Energy Conversion and Management* 277 (2023): 116595. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116595>
- Aghabozorg, M. H., Nabi Bidhendi, G., Yousefi, H., & Mehrdadi, N. (2024). A comprehensive economic and environmental analysis to supply the electricity sector of the MED desalination unit using renewable energies. *Journal of Energy Management and Technology*, 8(3), 239-249. <https://doi.org/10.22109/jemt.2024.421441.1478>
- Andriopoulos, N., Plakas, K., Birbas, A., & Papalexopoulos, A. (2024). Design of a prosumer-centric local energy market: An approach based on prospect theory. *IEEE Access*, 12, 32014-32032. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3370040>
- Bazarchi, S., Bidhendi, G. R. N., Ghazi, I., & Kasaeian, A. (2020). A techno-economic feasibility study for reducing the energy consumption in a building: A solar energy case study for bandar abbas. *Journal of Thermal Engineering*, 6(4), 633-650. <https://doi.org/10.18186/thermal.766463>
- Bazilian, M., Onyeji, I., Liebreich, M., MacGill, I., Chase, J., Shah, J., ... & Zhengrong, S. (2013). Re-considering the economics of photovoltaic power. *Renewable Energy*, 53, 329-338. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.11.029>
- Calvillo, C. F., Sánchez-Miralles, A., & Villar, J. (2016). Energy management and planning in smart cities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 273-287. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.133>

- Liu, P., Liu, C., Du, J., & Mu, D. (2019). A system dynamics model for emissions projection of hinterland transportation. *Journal of Cleaner Production*, 218, 591-600. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.191>
- Mekonnen, M. M., Gerbens-Leenes, P. W., & Hoekstra, A. Y. (2015). The consumptive water footprint of electricity and heat: a global assessment. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 1(3), 285-297. <https://doi.org/10.1039/c5ew00026b>
- Milani, S. J., & Bidhendi, G. N. (2024). Biogas and photovoltaic solar energy as renewable energy in wastewater treatment plants: A focus on energy recovery and greenhouse gas emission mitigation. *Water Science and Engineering*, 17(3), 283-291. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.003>
- Nasouri, M., Bidhendi, G. N., Amiri, M. J., Delgarm, N., Delgarm, S., & Azarbad, K. (2021c). Performance-based Pareto optimization and multi-attribute decision making of an actual indirect-expansion solar-assisted heat pump system. *Journal of Building Engineering*, 42. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103053>
- Nasouri, M., Bidhendi, G. N., Hoveidi, H., & Amiri, M. J. (2021a). Parametric study and performance-based multi-criteria optimization of the indirect-expansion solar-assisted heat pump through the integration of Analytic Network process (ANP) decision-making with MOPSO algorithm. *Solar Energy*, 225, 814-830. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.08.003>
- Nasouri, M., Nabi Bidhendi, G. R., Amiri, M. J., Delgarm, N., Delgarm, S., & Azarbad, K. (2021b). Performance-based Pareto optimization and multi-attribute decision making of an actual indirect-expansion solar-assisted heat pump system. *Journal of Building Engineering*, 42(2), 102345. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102345>
- Pazuki, M. M., Salimi, M., Safaie, N., & Amidpour, M. (2025). Transitioning Iran's electricity sector: A system dynamics analysis of renewable energy acceleration and carbon capture strategies to 2040. *Utilities Policy*, 97, 102062. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2025.102062>
- Rafieisakhaei, M., Barazandeh, B., & Afra, S. (2017, March). A system dynamics approach on oil market modeling with statistical data analysis. In *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference* (p. D041S039R003). SPE. <https://doi.org/10.2118/184040-MS>
- Reiss, P. C., & White, M. W. (2005). Household electricity demand, revisited. *The Review of Economic Studies*, 72(3), 853-883. <https://doi.org/10.1111/0034-6527.00354>
- Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of innovations* (5th ed.). Free Press.
8918. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05333-7>
- Golfam, P., Ashofteh, P. S., & Loáiciga, H. A. (2024). Forecasting long-term energy demand and reductions in GHG emissions. *Energy Efficiency*, 17(3), 19. <https://doi.org/10.1007/s12053-024-10203-2>
- Hosseini, S. H., & Shakouri, H. (2016). A study on the future of unconventional oil development under different oil price scenarios: A system dynamics approach. *Energy Policy*, 91, 64-74. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.12.027>
- Jafar, H. T., Tavakoli, O., Bidhendi, G. N., & Alizadeh, M. (2024). Sustainable electricity supply planning: A nexus-based optimization approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 195, 114316. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114316>
- Javidi, N., Nabi Bidhendi, G., Tavakoli, O., & Mehrdadi, N. (2026). Assessing the environmental costs of a thermal power plant in tehran using life cycle analysis. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 23(3), 179. <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06854-y>
- John, D. M. (2007). *Strategic modelling and business dynamics: A feedback systems approach*. J. Wiley & Sons.
- Kachoei, M. S., Salimi, M., & Amidpour, M. (2018). The long-term scenario and greenhouse gas effects cost-benefit analysis of Iran's electricity sector. *Energy*, 143, 585-596. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.049>
- Karbasioun, M., Gholamalipour, A., Safaie, N., Shirazizadeh, R., & Amidpour, M. (2023). Developing sustainable power systems by evaluating techno-economic, environmental, and social indicators from a system dynamics approach. *Utilities Policy*, 82, 101566. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2023.101566>
- Karimi, S., Talebi, E., & Givchchi, S. (2025). H₂S gas leak emergency preparedness and community response: A critical review of behavioral factors and gaps. *Scientific Papers-Series E-Land Reclamation Earth Observation & Surveying Environmental Engineering*. 14(1), 1100-1111. <https://landreclamationjournal.usamv.ro/pdf/2025/Art119.pdf>
- Keirstead, J., Jennings, M., & Sivakumar, A. (2012). A review of urban energy system models: Approaches, challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3847-3866. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.047>
- Leduc, M., Matthews, H. D., & de Elía, R. (2016). Regional estimates of the transient climate response to cumulative CO₂ emissions. *Nature Climate Change*, 6(5), 474-478. <https://doi.org/10.1038/nclimate2913>

- **بخش دوم (سؤالات ۷ تا ۱۳):** سؤالات بسته در طیف لیکرت برای سنجش متغیرهای کلیدی مدل طراحی شدند. سؤال ۷ نوع کنترل برق منزل (دیجیتال/قدیمی) را می‌پرسید. سؤال ۸ تأثیر کاهش مصرف بر کاهش آلودگی هوا را در طیف «خیلی زیاد» تا «بی‌تأثیر» می‌سنجید. سؤال ۹ مستقیماً Technology_Trust_Level را با پرسش «چقدر به فناوری‌های جدید مثل کنترل هوشمند یا اپلیکیشن کنترل مصرف برق اعتماد دارید؟» در طیف «کاملاً اعتماد دارم» تا «اعتماد ندارم» اندازه‌گیری می‌کرد. سؤال ۱۰ تمایل به مشارکت در کاهش مصرف در ساعات شلوغ را با گزینه‌های «حتماً شرکت می‌کنم»، «شاید شرکت کنم»، «فقط اگر همسایه‌ها شرکت کنند»، و «شرکت نمی‌کنم» می‌سنجید (مرتبط با Peer_Effect). سؤال ۱۱ با جمله «حاضر در گرم‌ترین روز تابستان، دمای کولر را ۱ یا ۲ درجه بالاتر تنظیم کنم تا برق نرود و هزینه قبض کمتر شود»، Thermal_Comfort بعد از Consumer_Comfort_Index را در طیف «کاملاً موافقم» تا «کاملاً مخالفم» اندازه‌گیری می‌کرد. سؤال ۱۲ مهم‌ترین دلیل کاهش مصرف را با سه گزینه «ارزان شدن مبلغ قبض ماهانه»، «حس خوب کمک به پایداری برق شهر»، و «احساس انجام وظیفه در قبال محیط زیست» اولویت‌بندی می‌کرد (مرتبط با Bill_Satisfaction و Energy_Awareness_Level). سؤال ۱۳ اثر همنوایی اجتماعی را با پرسش «اگر همسایه‌ها و اهالی ساختمان‌تان در یک طرح کاهش مصرف برق شرکت کنند، چقدر احتمال دارد شما هم مشتاق شوید؟» در طیف «خیلی زیاد» تا «تأثیری در تصمیم من ندارد» می‌سنجید.
- **بخش سوم (سؤالات ۱۴ و ۱۵):** سؤالات باز برای گردآوری داده‌های کیفی طراحی شدند. سؤال ۱۴ از پاسخ‌دهندگان می‌خواست در یک سناریوی فرضی (دریافت پیامک از اداره برق با پیشنهاد ۲۰٪ تخفیف در قبال کاهش مصرف طی ۲ ساعت آینده در یک روز بسیار گرم

- Slocum, A. H., & Gessel, D. J. (2022). Evolving from a hydrocarbon-based to a sustainable economy: Starting with a case study for Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 154, 111750. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111750>
- Sterman, J. D. (2000). *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. Irwin/McGraw-Hill.
- Stragier, J., Hauttekeete, L., & De Marez, L. (2010, September). Introducing smart grids in residential contexts: Consumers' perception of smart household appliances. In *2010 IEEE conference on innovative technologies for an efficient and reliable electricity supply* (pp. 135-142). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CITRES.2010.5619864>
- Vejdani Nozar, A., Givhechi, S., & Malekmohammadi, B. (2025). Evaluation of the effective consequences on urban water and wastewater assets in the face of environmental pollution: A case study of Hamedan City, Iran. *Pollution*, 11(3), 652-671. <https://doi.org/10.22059/poll.2025.380915.2502>
- Vennix, J. A. M. (1996). *Group model building: Facilitating team learning using system dynamics*. John Wiley & Sons.

پیوست الف: مشخصات فنی مدل

به پیوست مشخصات فنی مدل در **جدول الف-۱** تا **الف-۴** ارائه می‌گردد. برای تکمیل نمودار علی-حلقوی یکپارچه (**شکل ۱**)، نسخه تفکیک‌شده آن برای هر یک از چهار زیرسیستم مدل در **شکل الف-۱** ارائه شده است. در این نمودارها، حلقه‌های تقویتی با علامت R و حلقه‌های تعدیلی با علامت B شماره‌گذاری شده‌اند و متغیرهای لایه فراسیستمی با کادر خط‌چین نمایش داده شده‌اند.

پیوست ب: مشخصات پیمایش میدانی

پرسشنامه پژوهش مشتمل بر ۱۵ سؤال در سه بخش اصلی به‌صورت زیر طراحی گردید (**جدول ب-۱**):

- **بخش نخست (سؤالات ۱ تا ۶):** مشخصات جمعیت‌شناختی شامل مدرک تحصیلی (محل/دیپلم و زیر دیپلم، لیسانس یا دانشجوی لیسانس، کارشناسی ارشد و بالاتر)، محدوده سنی (زیر ۲۰، ۲۰ تا ۳۰، ۳۰ تا ۴۰، بالای ۴۰)، جنسیت، شغل، و فاز محل سکونت (۱، ۲، ۳، یا ساکن اکباتان نیستم).

تابستان)، رفتار خود را شرح دهند و مشخص کنند کدام وسایل را خاموش می‌کنند و آیا این کار برایشان سخت است یا آسان. این سؤال برای اعتباریابی پارامتر Comfort_Threshold و درک شهود مصرف‌کنندگان از مبادله آسایش-صرفه‌جویی طراحی شده بود. سؤال ۱۵ (پایانی) از پاسخ‌دهندگان می‌خواست بزرگ‌ترین مشکل یا مانع مشارکت مردم محله در برنامه‌های کاهش مصرف برق را بر اساس تجربه شخصی یا صحبت‌های همسایه‌ها توضیح دهند. این سؤال برای شناسایی کدهای استقرایی (مانند «بی‌اعتمادی نهادی») و غنی‌سازی ساختار

CLD طراحی شده بود. پاسخ‌های این دو سؤال با روش تحلیل محتوای جهت‌دار و با دو کدگذار مستقل تحلیل گردید. میزان توافق بین کدگذاران با ضریب کاپای کوهن ۰/۸۱ محاسبه شد که در سطح «عالی» قرار دارد. تم‌های تکرارشونده استخراج‌شده شامل «بی‌اعتمادی به شرکت برق» (۱۸٪ پاسخ‌دهندگان)، «فقدان آموزش و اطلاع‌رسانی» (۱۵٪)، «احساس بی‌تأثیری صرفه‌جویی فردی» (۱۲٪)، و «دشواری تحمل گرما» (۹٪) بودند.

جدول الف-۱. جدول خلاصه مرز سیستم

Table A-1. System boundary summary table

دسته	نمونه متغیرها
درون‌زا	Total_Population, RE_Capacity, DSM_Participation_Rate, Smart_Meter_Coverage, Technology_Trust_Level, Digital_Governance_Index, CO2_Emissions, IoT_Penetration, Data_Integration_Level, Energy_Awareness_Level
برون‌زا	Net_Pop_Growth_Rate, RE_Capacity_Factor, Price_Elasticity_Demand, National_RE_Target, Tariff_Structure, Global_Tech_Price
مستثنا	Intercity_Power_Transit, Geopolitical_Energy_Shocks, Disruptive_Tech_Innovation

جدول الف-۲. دیکشنری ۱۵ متغیر کلیدی

Table A-2. Dictionary of 15 key variables

ردیف	نام متغیر	تعریف عملیاتی	واحد	نوع در SD
۱	Total_Population	تعداد کل ساکنان محدوده شهری	نفر	۱
۲	Total_Electricity_Demand	مجموع برق مصرفی در یک سال	مگاوات/ساعت/سال	Auxiliary
۳	Peak_Load	حداکثر توان مصرفی هم‌زمان	مگاوات	Auxiliary
۴	RE_Capacity	مجموع ظرفیت نامی واحدهای تجدیدپذیر	مگاوات	Stock
۵	RE_Generation	برق تولیدشده توسط منابع تجدیدپذیر	مگاوات/ساعت/سال	Auxiliary
۶	DSM_Participation_Rate	درصد مشترکان فعال در برنامه‌های DSM	درصد	Stock
۷	Smart_Meter_Coverage	درصد مشترکان مجهز به کنتور هوشمند	درصد	Stock
۸	Technology_Trust_Level	میانگین اعتماد به فناوری‌های هوشمند	۱-۰	Stock
۹	Consumer_Comfort_Index	میانگین وزنی رضایت از آسایش حرارتی و زمانی	۱-۰	Auxiliary
۱۰	CO2_Emissions	مجموع انتشار دی‌اکسید کربن	تن/سال	Auxiliary
۱۱	IoT_Penetration	درصد زیرساخت‌های مجهز به حسگر	درصد	Stock
۱۲	Data_Integration_Level	میزان اتصال پلتفرم‌های داده انرژی	۱-۰	Stock
۱۳	Digital_Governance_Index	بلوغ چارچوب‌های حقوقی و نهادی داده	۱-۰	Stock
۱۴	Energy_Awareness_Level	میانگین سطح آگاهی شهروندان	۱-۰	Stock
۱۵	Comfort_Threshold	آستانه بحرانی آسایش برای خروج از DSM	۱-۰	Parameter (C)

جدول الف-۳. معادلات ساختاری محوری (۶ معادله)

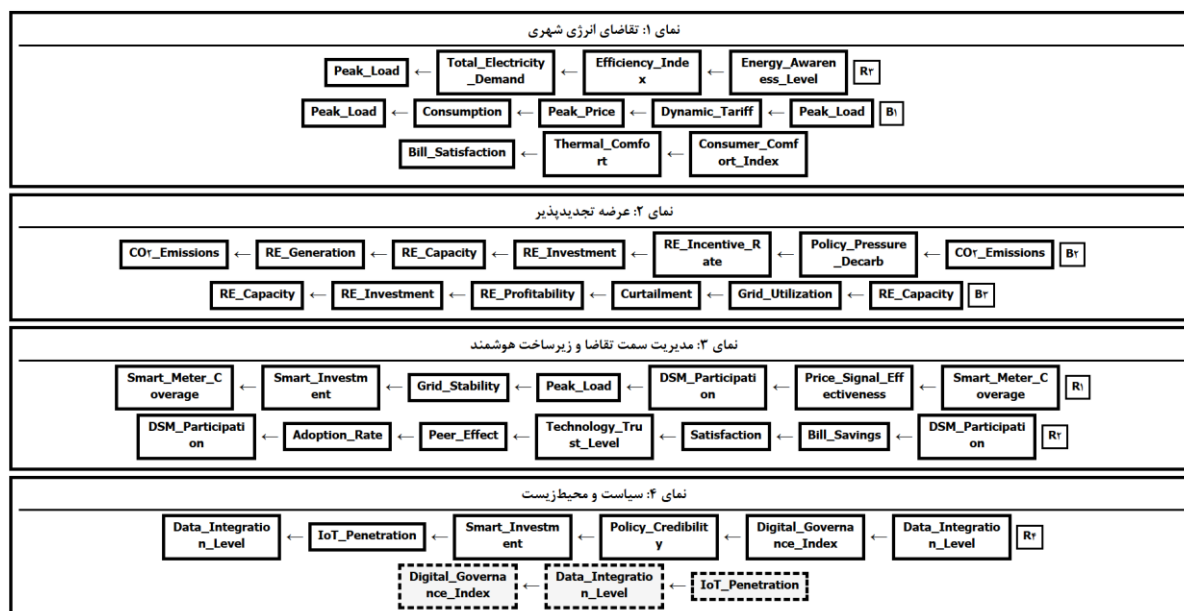
Table A-3. Core structural equations (6 equations)

شماره	معادله	شرح
۱	$Total_Electricity_Demand = Total_Population \times Reference_PC_Consumption \times (1/Efficiency_Index) \times Price_Effect \times (1 - DSM_Participation_Rate \times DSM_Effectiveness)$	تقاضای کل از حاصلضرب جمعیت در مصرف سرانه تعدیل‌شده با اثر کارایی، قیمت، و DSM محاسبه می‌شود
۲	$RE_Capacity(t) = RE_Capacity(t-dt) + (DELAY3(Desired_Investment \times Feasibility, 2.5) - RE_Capacity \times Depreciation_Fraction) \times dt$	ظرفیت تجدیدپذیر یک انباشته است که با سرمایه‌گذاری (با تأخیر ساخت DELAY3) افزایش و با استهلاک کاهش می‌یابد
۳	$DSM_Participation_Rate(t) = DSM_Participation_Rate(t-dt) + (Adoption_Rate - Dropout_Rate) \times dt$	نرخ مشارکت DSM انباشته‌ای با جریان ورودی پذیرش (تابع لوجستیک) و خروجی انصراف (تابع آستانه‌ای) است
۴	$Adoption_Rate = Max_Adoption_Rate / (1 + EXP(-Steepness \times (0.30 \times Trust + 0.25 \times Coverage + 0.25 \times Comfort + 0.20 \times Peer - Midpoint)))$	تابع پذیرش لوجستیک چندمتغیره با چهار محرک: اعتماد، پوشش کنتور، آسایش، و اثر همنوایی
۵	$CO2_Emissions = Total_Electricity_Demand \times (1 - RE_Generation/Total_Electricity_Demand) \times 0.78$	انتشار CO ₂ از ضرب تقاضای کل در ضریب انتشار شبکه (تابع نزولی از سهم تجدیدپذیر) محاسبه می‌شود
۶	$Digital_Governance_Index(t) = DGI(t-dt) + (DGI \times Growth_Fraction \times (1 - DGI/Saturation) \times Driver_Effect - DGI \times Erosion_Fraction) \times dt$	شاخص حکمرانی دیجیتال انباشته‌ای با نرخ بلوغ (تابع سه محرک) و نرخ فرسایش (ثابت) است

جدول الف-۴. نگاشت ساختاری حلقه‌های بازخوردی به معادلات و سناریوها

Table A-4. Structural mapping of feedback loops to equations and scenarios

حلقه	نوع	مسیر علیت	معادله متناظر	سناریوی غالب
R1	تقویتی	Smart_Investment - Grid_Stability - Peak_Load - DSM_Participation - Price_Signal_Effectiveness - Smart_Meter_Coverage	معادلات ۳ و ۴	S3, S4
R2	تقویتی	Adoption - Peer_Effect - Trust - Bill_Satisfaction - DSM_Participation	معادلات ۳ و ۴	S4
R3	تقویتی	Awareness - Policy_Pressure - Emissions - Demand - Efficiency - Awareness	معادله ۱ و ماژول View 4	S2, S4
R4	تقویتی	Data_Integration - IoT - Policy_Credibility - DGI - Data_Integration	معادله ۶	S4
B1	تعدیلی	Peak_Load - Demand - Price - Tariff - Peak_Load (با زیرحلقه بازگشتی)	View 1 و View 3	S2
B2	تعدیلی	Emissions - RE_Capacity - RE_Incentive - Policy_Pressure - Emissions	معادله ۲ و View 4	S1, S4
B3	تعدیلی	Investment - RE_Profitability - Curtailment - Grid_Utilization - RE_Capacity	View 2	S1



شکل الف-۱. نمودارهای علی-حلقوی تفکیک شده برای چهار زیرسیستم.

Figure A-1. Disaggregated Causal Loop Diagrams for the four subsystems.

جدول ب-۱. نگاشت سؤالات پرسشنامه به متغیرها و پارامترهای مدل

Table B-1. Mapping of survey questions to model variables and parameters

شماره سؤال	متن/موضوع سؤال	متغیر/پارامتر متناظر در مدل	نحوه استفاده
۷	نوع کنتور برق منزل	Smart_Meter_Coverage (پایه)	اعتباریابی مقدار پایه پوشش کنتور هوشمند
۸	تأثیر کاهش مصرف بر آلودگی هوا	Energy_Awareness_Level	تخمین سطح آگاهی اولیه
۹	اعتماد به فناوری‌های هوشمند	Technology_Trust_Level	مقدار اولیه پارامتر (با تعدیل خبرگانی از ۰/۶۱ به ۰/۳۵)
۱۰	تمایل به مشارکت در کاهش مصرف	DSM_Participation_Rate (پایه) و Peer_Effect	تخمین تمایل اولیه مشارکت و وزن هم‌نوایی
۱۱	تنظیم دمای کولر	Consumer_Comfort_Index (Thermal_Comfort)	تعیین Comfort_Threshold (مقدار ۰/۶۵)
۱۲	مهم‌ترین دلیل کاهش مصرف	Bill_Satisfaction و Energy_Awareness_Level	وزن‌های رضایت قبض و آگاهی در شاخص آسایش
۱۳	اثر هم‌نوایی اجتماعی	Peer_Effect	وزن اثر هم‌نوایی در تابع پذیرش
۱۴	سناریوی پیامک تخفیف	Comfort_Threshold	اعتباریابی آستانه بحرانی آسایش
۱۵	موانع مشارکت	ساختار CLD (کدهای استقرایی)	شناسایی حلقه‌های بازخوردی نرم (مانند بی‌اعتمادی نهادی)