



Research in Production and Operations Management

University of Isfahan E-ISSN: 2981-0329

Vol. 17, Issue 1, No. 44, 2026



DOI: [10.22108/pom.2025.140474.1599](https://doi.org/10.22108/pom.2025.140474.1599)

(Research paper)

## The Impact of Energy Feedback on Occupant Energy Conservation Behavior: an Agent-Based Approach

**Mohammad Zareie**

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Canada,  
mzareie@uwaterloo.ca

**Amirhossein Hosseini Sarcheshmeh**

School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran,  
amir.hosseini.sa@ut.ac.ir

**Mojtaba Maghrebi\***

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, mojtabamaghrebi@um.ac.ir

**Purpose:** The purpose of this study is to enhance the effectiveness of energy-saving awareness events by identifying optimal participant selection methods. Given the global and national importance of reducing energy consumption, the research investigates how residents' behavioral characteristics—such as energy consumption level, behavioral adaptability, and social influence—affect the overall impact of awareness events. The study develops an agent-based simulation model to analyze the long-term effects of different participant selection strategies on community-wide energy consumption patterns.

**Design/methodology/approach:** This research employs an agent-based modeling (ABM) approach to simulate dynamic interactions among residents in a social network. The model integrates mathematical frameworks for opinion diffusion and behavioral change to represent how individuals' energy consumption patterns evolve following an awareness event and through peer interactions. A synthetic community of agents is created, each defined by three attributes: the Energy Consumption Index (ECI), Susceptibility Index (SI), and Social Connections (SC). Several event participation selection methods are evaluated, including (S1) random selection, (S2) selection based on behavioral adaptability, (S3) selection based on social influence, (S4) selection based on energy consumption level, and (S5) a combined method integrating all three criteria. The model is implemented in Python and simulated across communities of varying sizes (100, 1,000, and 10,000 agents) to evaluate scalability and generalizability.

\* Corresponding author, [0000-0001-7284-9095](https://orcid.org/0000-0001-7284-9095)



**Findings:** Simulation results reveal that the method of participant selection significantly influences the medium-term effectiveness of energy-saving events. Specifically, selecting participants based on a combination of energy consumption level, social influence, and behavioral adaptability (S5) yields the highest energy-saving outcomes. The study also finds that the positive impact of optimized participant selection increases with community size, emphasizing the role of network effects in promoting behavioral diffusion. In addition, sensitivity analysis further shows that event success rate and participant percentage have strong effects on overall performance, while the average number of social connections has a marginal influence. The model outputs align with empirical findings from previous studies, where behavioral interventions typically achieve 5–12% energy savings, confirming the model's validity as a predictive and decision-support tool.

**Research limitations/implications:** Although grounded in well-established theoretical models, this study's primary limitation is the absence of empirical validation using real-world behavioral data. Capturing accurate social interaction patterns and quantifying behavioral attributes in practice remains challenging. Future research should conduct field experiments to empirically verify the model's outcomes, refine parameter estimation for behavioral traits, and explore cross-cultural differences in behavioral diffusion. Integrating real consumption datasets could also enhance model accuracy and policy relevance.

**Practical implications:** The findings offer actionable insights for policymakers, utility companies, and event organizers aiming to design cost-effective energy awareness programs. By strategically selecting participants with high social influence and behavioral adaptability, the overall impact of awareness campaigns can be maximized even under budget constraints. This approach enables more efficient resource allocation, reduces campaign costs, and increases community-wide behavioral adoption rates. Additionally, the framework can guide the development of targeted reward and penalty systems that promote collective energy efficiency.

**Social implications:** This research contributes to sustainable energy management and environmental responsibility by encouraging community-based behavioral change. The results highlight the importance of leveraging social influence to spread energy-saving habits, potentially leading to long-term cultural shifts toward energy efficiency. Implementing such optimized event strategies could improve public awareness, foster social cooperation, and enhance quality of life through reduced energy costs and environmental impact.

**Originality/value:** This study presents a novel, integrated agent-based framework that simultaneously considers individual energy behavior, adaptability, and social influence to optimize participant selection for awareness events. Unlike previous studies that focus solely on event design or social network structure, this work uniquely bridges behavioral theory and computational modeling to propose a systematic, data-driven method for improving energy-saving program efficiency. The model can serve as a decision-support tool for designing effective social interventions in both residential and urban contexts.

**Keywords:** Agent-based modeling, Energy consumption behavior, Energy saving, Consumption feedback method, Energy simulation



پژوهش در مدیریت تولید و عملیات، دوره ۱۷، شماره ۱، پیاپی ۴۴، ۱۴۰۵

دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۱ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۴ ص ۱-۲۴



DOI: [10.22108/pom.2025.140474.1599](https://doi.org/10.22108/pom.2025.140474.1599)

(مقاله پژوهشی)

## شبیه‌سازی رفتار مصرف انرژی ساکنین تحت تأثیر برگزاری رویدادهای اطلاع‌رسانی مصرف انرژی: رویکرد عامل‌محور

محمد زارعی<sup>۱</sup>؛ امیرحسین حسینی سرچشمه<sup>۲</sup>؛ مجتبی مغربی<sup>۳\*</sup>

۱- دکتری گروه مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه واترلو، واترلو، کانادا، [mzareei@uwaterloo.ca](mailto:mzareei@uwaterloo.ca)

۲- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران، [amir.hosseini.sa@ut.ac.ir](mailto:amir.hosseini.sa@ut.ac.ir)

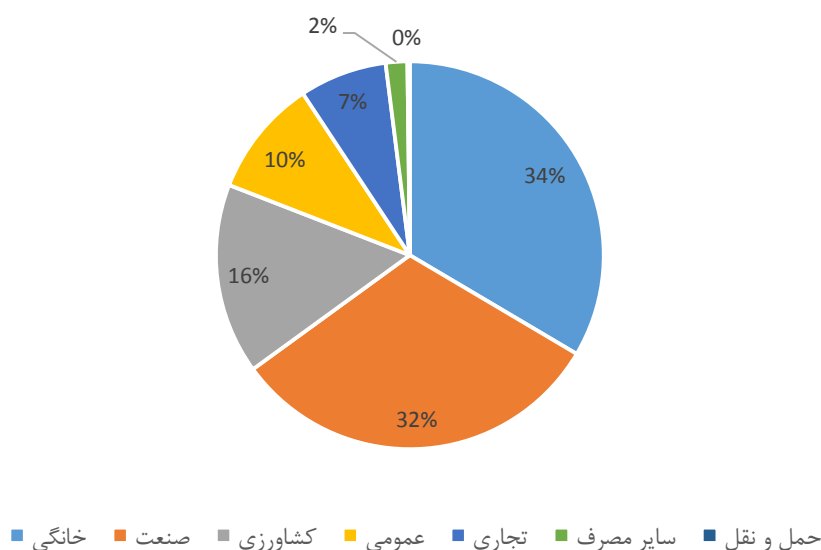
۳- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، [mojtabamaghrebi@um.ac.ir](mailto:mojtabamaghrebi@um.ac.ir)

**چکیده:** با توجه به کاهش منابع انرژی، یکی از روش‌های درخور توجه برای کاهش مصرف حامل‌های انرژی در سطح خرد یا کلان، فرهنگ‌سازی و اصلاح الگوی مصرف است. در این راستا، به برگزاری رویدادهایی با هدف اطلاع‌رسانی به افراد و ارائه راهکارهایی برای اصلاح الگوی مصرف، به‌عنوان راهکارهای کوتاه‌مدت و میان‌مدت توجه می‌شود. از انواع این رویدادها به برگزاری کارگاه‌های آموزشی، اطلاع‌رسانی میزان مصرف و پتانسیل صرفه‌جویی، هدف‌گذاری و تعهد، پاداش و جریمه و همچنین بازاریابی سبز (معرفی و فروش محصولات مؤثر در صرفه‌جویی انرژی) اشاره می‌شود. با وجود تلاش‌های فراوان برای بررسی تأثیر این رویدادها، مطالعات کمی برای بهبود نتایج آنها انجام شده است. در این پژوهش، ابتدا با استفاده از مدل‌سازی عامل‌محور، رفتار مصرفی جامعه‌ای از ساکنان به‌همراه ویژگی‌های مؤثر بر رفتار مصرفی آنها شبیه‌سازی می‌شود؛ سپس روش‌های انتخاب شرکت‌کنندگان برای شرکت در رویداد، اطلاع‌رسانی و تأثیر آن بر الگوی مصرف انرژی جامعه در بلندمدت بررسی می‌شود. روش‌های بررسی‌شده شامل انتخاب براساس میزان مصرف، تغییرپذیری رفتاری، نفوذ اجتماعی و انتخاب تصادفی است. نتایج نشان می‌دهد که در نظر گرفتن ویژگی‌های ساکنان، ازجمله میزان مصرف انرژی و نفوذ اجتماعی، در انتخاب شرکت‌کنندگان رویداد، بازدهی رویدادهای صرفه‌جویی انرژی را بهبود می‌بخشد.

**واژه‌های کلیدی:** مدل‌سازی عامل - محور، رفتار مصرف انرژی، صرفه‌جویی انرژی، روش بازخورد مصرف، شبیه‌سازی انرژی

## ۱- مقدمه

امروزه ساختمان‌ها بیشترین سهم را در مصرف انرژی و تولید گازهای گلخانه‌ای در جهان دارند (Bryant et al., 2010b; UNEP SBCI & SBCI, 2015). براساس آمار منتشرشده از سوی وزارت نیرو در آخرین ترازنامه انرژی مربوط به سال ۱۳۹۴، سهم مصرف انرژی در کشور ما به‌طور تقریبی ۴۱ درصد است که از این میزان، ۳۴ درصد به بخش خانگی و ۷ درصد به بخش تجاری اختصاص دارد (شکل ۱). با در نظر گرفتن روند افزایشی در مصرف انرژی، سرمایه‌گذاری هوشمندانه در جهت کاهش مصرف انرژی، از اهمیت بالایی برخوردار است؛ برای مثال با توجه به یارانه پرداختی از طرف دولت و میزان مصرف برق در کشور، کاهش یک درصدی مصرف برق، سالانه در حدود ۲۰۰۰ میلیارد ریال ذخیره مالی در پی خواهد داشت.<sup>۱</sup>



شکل ۱- سهم مصرف انرژی بخش‌های مختلف از کل انرژی مصرفی کشور در سال ۱۳۹۴

Fig. 1- Energy consumption of different parts of the country's total energy consumption in 2014

با توجه به نقش مهم ساختمان‌ها در مصرف انرژی، لازم است تا ساختار مصرف انرژی در این حوزه بیشتر بررسی شود. به‌طور کلی عوامل مؤثر بر انرژی مصرفی یک ساختمان به چهار بخش تقسیم می‌شود (Peng et al., 2012): سازه ساختمان؛ تجهیزات ساختمان؛ شرایط آب‌وهوایی منطقه؛ رفتار مصرفی ساکنان.

از مهم‌ترین این عوامل، باید به رفتار مصرفی ساکنان اشاره کرد که اهمیت آن در مطالعات متعدد بررسی و تأیید شده است (Al-Mumin et al., 2003; Hong et al., 2015, 2016; Hong & Lin, 2013; Karatasou et al., 2014; Masoso & Grobler, 2010; Yu et al., 2011). این رفتار شامل تمام فعالیت‌های کاربر در تعامل با ساختمان بوده است که به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم، بر شدت مصرف انرژی تأثیرگذار است؛ به‌طور مثال تنظیم دمای محیط، روشن یا خاموش کردن وسایل، باز و بسته کردن پنجره یا پرده در میزان مصرف انرژی اثر چشمگیری دارند (Delzendeh et al., 2017).

طبق نتایج مطالعه ژائو و همکاران<sup>۲</sup> (2017)، تاکنون تنها حدود نیمی از پتانسیل صرفه‌جویی به کمک پیشرفت‌های تکنولوژی امکان‌پذیر شده است و نیم دیگر آن به اصلاح رفتار کاربران مربوط است. بررسی دیگری در ساختمان‌های تجاری نشان می‌دهد میزان مصرف انرژی در ساعات‌های غیر کاری، بیشتر از ساعات‌های کاری

است که مهم‌ترین دلیل این مشاهده، روشن ماندن وسایل برقی در ساعات غیر کاری بیان شده است (Masoso & Grobler, 2010). اهمیت این موضوع در سال‌های اخیر، باعث شده است که محققان در مدل‌سازی‌های انرژی، رفتار مصرفی کاربران را نیز در نظر بگیرند؛ زیرا نادیده گرفتن این عامل، اختلاف درخور توجهی را میان نتایج پیش‌بینی شده به وسیله مدل، در مقایسه با مشاهدات واقعی ایجاد می‌کند (Al-Mumin et al., 2003; Azar & Menassa, 2013; 2010, 2011, 2013).

اهمیت تأثیر رفتارهای انسانی بر مصرف انرژی، محققان را به سمت بررسی بیشتر این موضوع سوق داده است. از مهم‌ترین نتایج این پژوهش‌ها به تأثیرپذیری اجتماعی افراد در میزان مصرف انرژی آنها اشاره می‌شود؛ به این معنی که تعامل افراد در یک ساختار اجتماعی، در الگوی مصرف آنها - در جهت مثبت یا منفی - تأثیرگذار است (Carrico & Riemer, 2011; Jain et al., 2013; Peschiera et al., 2010; Peschiera & Taylor, 2012; Shimokawa & Tezuka, 2014). به این ترتیب بخش درخور توجهی از رفتارهای مربوط به مصرف انرژی فرد، تابع محیط اجتماعی اوست. این موارد باعث شده‌اند که در سال‌های اخیر، به شیوه‌های مبتنی بر فرهنگ‌سازی و اصلاح الگو مصرف بیشتر توجه شود. از انواع مختلف این روش‌ها به برگزاری کارگاه آموزشی<sup>۳</sup>، اطلاع‌رسانی میزان مصرف و پتانسیل صرفه‌جویی<sup>۴</sup>، هدف‌گذاری و تعهد<sup>۵</sup>، پاداش و جریمه<sup>۶</sup> و همچنین بازاریابی سبز<sup>۷</sup> (معرفی و فروش محصولات مؤثر در صرفه‌جویی انرژی) اشاره می‌شود که به جهت بازدهی مناسب و هزینه کمتر در مقایسه با روش‌های مبتنی بر ارتقای تکنولوژی، بیشتر از آنها استقبال شده است. پژوهش‌های متعددی تأثیر این روش‌ها را بر الگوی مصرف انرژی افراد بررسی کرده‌اند که مقادیری بین ۰ تا ۳۰ درصد کاهش مصرف انرژی (بیشتر بین ۵ تا ۱۲ درصد) گزارش شده است (Allcott & Mullainathan, 2010; Bartels & Nelissen, 2002; Carrico & Riemer, 2011; Jackson, 2005; McKenzie-Mohr, 2000; Peschiera et al., 2010; Peschiera & Taylor, 2012; Pickens, 2002; Staats et al., 2000, 2004; Verplanken & Wood, 2006; Weenig & Midden, 1991). پرواضح است که به کارگیری روش‌های فوق در جهت کاهش مصرف انرژی، چه در سطوح پایین مانند یک مجتمع مسکونی و چه در سطوح بالا مانند یک شهرک مسکونی، نیازمند سرمایه‌گذاری متناسب است؛ در نتیجه بازدهی این روش‌ها و میزان تأثیرگذاری بر الگوی مصرف جامعه هدف، عاملی است که میزان موفقیت سرمایه‌گذاری را تعیین می‌کند؛ بنابراین لازم است عوامل مؤثر بر بازدهی این روش‌ها و چگونگی بهبود این عوامل در تصمیم‌گیری‌ها و سیاست‌گذاری‌ها، لحاظ شوند. در این پژوهش با استفاده از تکنیک قدرتمند مدل‌سازی عامل‌محور، تأثیرپذیری رفتار مصرف انرژی افراد به واسطه یک رویداد صرفه‌جویی یا تعامل با دیگر افراد، شبیه‌سازی و در نهایت اثرگذاری روش‌های انتخاب شرکت‌کنندگان بر بازدهی رویداد اطلاع‌رسانی بررسی می‌شود.

## ۲- پژوهش‌های مشابه

در کنار مطالعات میدانی درباره بررسی رفتار مصرف انرژی ساکنان و چگونگی تأثیرپذیری آن، تحقیقات متعددی نیز در حوزه شبیه‌سازی این رفتارها در یک محیط مجازی انجام شده است که روند تغییرات این فاکتور مهم را تحت تأثیر عوامل داخلی، مانند روابط اجتماعی (Azar & Menassa, 2011; Bastani et al., 2016) و یا عوامل خارجی، مانند رویداد اطلاع‌رسانی بازخورد مصرف انرژی (Anderson et al., 2013; Azar & Al Ansari, 2017)، بررسی می‌کند. تحقیقات بررسی شده در این حوزه به‌طور کلی شامل ساخت یک مدل منطقی بر پایه مفاهیم

معتبرند که بدون نیاز به اعتبارسنجی میدانی، راهکارهای پذیرفتنی را در جهت افزایش صرفه‌جویی انرژی ارائه می‌کنند (Anderson et al., 2012; Azar & Al Ansari, 2017; Azar & Menassa, 2011, 2013; Bastani et al., 2014, 2015; Du et al., 2016; Ekpenyong et al., 2016).

اکپنیانگ و همکاران<sup>۸</sup> (2014) آثار پروژه‌های بهبود مصرف انرژی<sup>۹</sup> را با عنوان میزان صرفه‌جویی قابل انتظار<sup>۱۰</sup>، دو بخش مستقیم و غیرمستقیم تقسیم کرده‌اند که آثار مستقیم اندازه‌گیری و اعتبارسنجی می‌شود؛ در حالی که آثار غیرمستقیم، که به واسطه تعاملات اجتماعی حاصل می‌شود، به راحتی محاسبه‌شدنی نیستند؛ سپس با ایجاد یک مدل ریاضی و بررسی اهمیت روابط اجتماعی در میزان انتشار اطلاعات در میان جامعه مدنظر، مشخص شده است که لزوماً استفاده از افرادی که بیشترین تعداد روابط اجتماعی را دارند، به بیشترین صرفه‌جویی قابل انتظار منجر نمی‌شود.

در مدل پیشنهادشده آذر و مناسا<sup>۱۱</sup> (2011)، گروه‌های متفاوت ساکنان در مصرف انرژی (کم‌مصرف، متعادل، پرمصرف) و همچنین تغییر مصرف انرژی آنها در طول زمان، در مدل‌سازی مصرف انرژی یک ساختمان در نظر گرفته شده است. در این مدل به کمک شبیه‌سازی عامل‌محور، رفتار مصرف انرژی ساکنان در طول زمان، به دلیل تعامل و تأثیرگذاری بر یکدیگر، تغییر می‌کند و در هر دوره زمانی با توجه به تعداد ساکنان در هر گروه مصرفی، میزان مصرف انرژی محاسبه می‌شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد به دلیل تغییر رفتار مصرفی ساکنان در طول زمان، مقدار انرژی مصرفی پیش‌بینی‌شده، تفاوت درخور توجهی با مقدار انرژی مصرفی واقعی دارد. در ادامه این پژوهش، مدل‌های دیگری با در نظر گرفتن ساختارهای اجتماعی<sup>۱۲</sup> متفاوت در بین ساکنان و شبیه‌سازی دوره‌ای رویدادهای اطلاع‌رسانی<sup>۱۳</sup>، طراحی شده است تا میزان تغییر در مصرف انرژی به واسطه رویدادهای اطلاع‌رسانی مصرف، در پایان دوره پیش‌بینی شود (Anderson et al., 2013; Azar & Al Ansari, 2017; Azar & Menassa, 2011, 2013).

باستانی و همکاران<sup>۱۴</sup> (2016) با استفاده از تئوری انتشار بیس، پذیرش سیاست‌های صرفه‌جویی انرژی را در یک محیط عامل‌محور شبیه‌سازی کردند. آنها دو مدل (یکی با پارامترهای فرضی و دیگری مبتنی بر تئوری بیس) را مقایسه و تأثیر بازخورد اطلاع‌رسانی و اثر دهان‌به‌دهان را بررسی کردند. این مطالعه نشان داد که مدل مبتنی بر بیس، پیش‌بینی دقیق‌تری از تغییرات رفتار مصرف ارائه می‌دهد، هرچند محدودیت‌هایی در جهت‌گیری یک‌طرفه آن وجود دارد.

آلریزق و همکاران<sup>۱۵</sup> (2019) با استفاده از پلتفرم Repast Simphony، رفتار مصرف‌کنندگان را براساس سن، جنسیت و شرایط محیطی مدل‌سازی کردند. آنها دسته‌بندی‌های رفتاری (سطوح تنبلی ۱ تا ۴) را شناسایی و بازخوردهای بلادرنگ و جابه‌جایی بار را برای کاهش مصرف انرژی شبیه‌سازی کردند. این مدل برای پیش‌بینی بار کوتاه‌مدت و بلندمدت طراحی شده بود. در این مدل، رفتار انسانی براساس عواملی مانند سن، جنسیت و شرایط محیطی (دما و رطوبت) شبیه‌سازی و بازخوردها برای کاهش مصرف انرژی و جابه‌جایی بار<sup>۱۶</sup> به کار گرفته شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که بازخوردهای بلادرنگ تا ۱۲ درصد صرفه‌جویی انرژی ایجاد می‌کنند و جابه‌جایی بار به کاهش تقاضای اوج کمک می‌کند. این مدل، دسته‌بندی‌های رفتاری مصرف‌کنندگان و اثربخشی بازخوردها را شناسایی می‌کند و راهکارهایی را برای بهبود مدیریت تقاضا در شبکه هوشمند ارائه می‌دهد.

میکولیر و همکاران<sup>۱۷</sup> (2019) با رویکرد Li-BIM، تعاملات ساکن-ساختمان را در یک مدل عامل‌محور شبیه‌سازی کردند. آنها با مقایسهٔ پروفایل‌های دانش کم و زیاد، کاهش ۲٪ در مصرف انرژی و افزایش ۲٪ را در راحتی حرارتی گزارش کردند.

یو و همکاران<sup>۱۸</sup> (2020) با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی عامل‌محور<sup>۱۹</sup> (ABMS) و مبتنی بر تئوری پیچیدهٔ تطبیقی، رفتار صرفه‌جویی انرژی ساکنان شهری را در چین مدل‌سازی کردند. این مدل تأثیر عوامل روان‌شناختی مانند نیت صرفه‌جویی، رفتارهای کوتاه‌مدت و بلندمدت و سیاست‌های خارجی (مانند اطلاع‌رسانی و تنظیمات موقعیتی) را بر مصرف انرژی بررسی می‌کند. نتایج مطالعات نشان داد که در غیاب سیاست‌های خارجی، نیت و رفتار صرفه‌جویی انرژی ضعیف تطبیق می‌یابند؛ اما در شرایط سیاست بهینه، کاهش درخور توجهی در مصرف (تا چند درصد) مشاهده می‌شود. این مطالعه بر اهمیت تعاملات فردی و اجتماعی در شبیه‌سازی تأکید دارد و پیشنهادهایی را برای سیاست‌گذاری ارائه می‌دهد.

شن و همکاران<sup>۲۰</sup> (2020)، یک مدل رگرسیون بردار پشتیبان<sup>۲۱</sup> (SVR) بهینه‌شده را برای پیش‌بینی مصرف برق خانوارها و اثربخشی استراتژی‌های مداخله هم‌زمان براساس رفتار ساکنان و ویژگی‌های شخصیتی توسعه دادند. این پژوهش براساس آزمایشی در هانگژو، چین، عوامل مانند رفتارهای انرژی، ویژگی‌های شخصیتی (مانند برون‌گرایی و وظیفه‌شناسی)، دموگرافیک و مداخلات (مانند بازخورد از طریق اپلیکیشن، مشاوره و بروشور) را بررسی کرد. مدل SVR با انتخاب متغیرها و در نظر گرفتن آثار تعاملی، حداکثر صرفه‌جویی (متوسط ۱۲٫۱٪) را پیش‌بینی می‌کند و نشان می‌دهد که شخصیت‌های مختلف به مداخلات متفاوت پاسخ می‌دهند و این امر به مدیریت تقاضای انرژی فردی کمک می‌کند.

می و همکاران<sup>۲۲</sup> (2021) با استفاده از تحلیل خوشه‌ای، مصرف برق سالانه ۴۴۲۲ خانوار را به سطوح بالا، متوسط و پایین تقسیم و سپس با نظریهٔ رفتار برنامه‌ریزی‌شده<sup>۲۳</sup> (TPB)، تفاوت‌های روان‌شناختی تأثیرگذار بر مصرف واقعی را تحلیل کردند. نتایج نشان می‌دهد که مصرف واقعی سطوح سه‌گانه، پایین‌تر از آستانه‌های قیمت‌گذاری پلکانی محلی است و تفاوت‌های درخور توجهی در نیت رفتاری و هنجارهای ذهنی وجود دارد، سطوح بالاتر نیت و هنجارها نیز با مصرف کمتر همراه است. این یافته‌ها، دیدگاه‌های جدیدی را برای استراتژی‌های تشویقی متفاوت و ارتقای عدالت در کاهش انتشار ارائه می‌دهند.

چن و همکاران<sup>۲۴</sup> (2023) با مدل گستردهٔ TPB، عوامل اجتماعی-روان‌شناختی و مشوق‌های مالی را در پاسخ تقاضا و رفتار انرژی مسکونی بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که خانوارهای کم‌درآمد، بیشتر به افزایش تنظیم ترموستات A/C در غیاب افراد پاسخ می‌دهند. نیاز به راحتی حرارتی و سن، مشوق‌های درخواستی را افزایش می‌دهد؛ در حالی که عادات صرفه‌جویی آن را کاهش می‌دهد. نگرش به صرفه‌جویی پس از کنترل رفتاری ادراک‌شده، هنجارهای ذهنی، نگرانی‌های هزینه و محیطی و عادات، قوی‌ترین پیش‌بینی‌کنندهٔ نیت کاهش مصرف است. این مطالعه، پتانسیل متغیرهای روان‌شناختی را در شکل‌دهی رفتارهای انرژی برجسته می‌کند.

دراگومیر و دراگومیر<sup>۲۵</sup> (2025) یک چارچوب ترکیبی شامل سیستم‌های عامل‌محور<sup>۲۶</sup> (MAS)، مدل‌سازی دینامیک سیستم<sup>۲۷</sup> (SDM) و مدل‌سازی مبتنی بر عامل<sup>۲۸</sup> (ABM) را برای تخمین و کنترل مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی، پیشنهاد کردند. این رویکرد بر کنترل غیرمتمرکز، تعاملات رفتاری و پاسخ‌های تطبیقی در

زمان واقعی تمرکز دارد و فرایندهای فیزیکی مانند تبادل گرما و عملکرد عایق را شبیه‌سازی می‌کند. سیستم تحت شرایط متفاوت، مانند کیفیت عایق و پروفایل‌های دمای خارجی آزمایش می‌شود و صرفه‌جویی انرژی درخور توجهی را نشان می‌دهد. این ابزار یک پلتفرم شبیه‌سازی بدون ریسک برای تست استراتژی‌های صرفه‌جویی، ارزیابی پیکربندی‌های عایق و تنظیم ترموستات عمل می‌کند.

بومسما و همکاران<sup>۲۹</sup> (2025) با آزمایش کنترل‌شده تصادفی<sup>۳۰</sup> (RCT)، تأثیر بازخورد مصرف انرژی واقعی زمانی را بر مصرف گاز طبیعی و برق مسکونی تخمین زدند. نیمی از خانوارها به صورت تصادفی، نمایشگر مصرف انرژی را دریافت کردند که اطلاعات واقعی زمانی را از متر هوشمند ارائه می‌دهد. نتایج نشان‌دهنده صرفه‌جویی ۶٫۹٪ در گاز و ۲٫۲٪ در برق است که کل انرژی مصرفی ۵٫۸٪ کاهش یافت. نظرسنجی، مکانیسم‌های زیربنایی را بررسی کرد و شواهدی مبنی بر افزایش برجستگی هزینه‌های استفاده از انرژی را ارائه داد. این مطالعه بر اثربخشی بازخورد واقعی زمانی در کاهش مصرف تأکید دارد.

جدول ۱، خلاصه مطالعات انجام‌شده و مقایسه مطالعه حاضر را با پژوهش‌های قبلی نشان می‌دهد.

جدول ۱- مرور پژوهش‌های پیشین  
Table 1- Review of Previous Studies

| مطالعه                                 | نوع مدل   | تمرکز بر تعاملات اجتماعی                        | روش‌های انتخاب شرکت‌کنندگان                                | شبیه‌سازی رویداد اطلاع‌رسانی                            | ویژگی‌های متمایز                                                                                                                                                                                                               |
|----------------------------------------|-----------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| آذر و مناسا (۲۰۱۱)                     | عامل محور | خیر، تمرکز بر رفتار فردی                        | خیر                                                        | خیر                                                     | مدل‌سازی گروه‌های مختلف مصرف‌کنندگان (کم‌مصرف، متعادل، پرمصرف) بدون توجه به تعاملات اجتماعی، استفاده از شبیه‌سازی برای پیش‌بینی مصرف انرژی در ساختمان‌های تجاری                                                                |
| کاریکو و ریمر <sup>۳۱</sup> (۲۰۱۱)     | میدانی    | بله، با تأکید بر آموزش همسالان                  | خیر؛ اما استفاده از داوطلبان آموزش‌دیده برای آموزش همسالان | بله، با ارائه بازخورد گروه‌محور و آموزش همسالان         | ارزیابی مقایسه‌ای بازخورد گروه‌محور (کاهش ۷٪ مصرف انرژی) و آموزش همسالان (کاهش ۴٪) در محیط کار، اثربخشی مداخلات بدون انگیزه‌های مالی و بدون استفاده از مدل‌سازی عامل محور یا تحلیل انتخاب شرکت‌کنندگان                         |
| اندرسون و همکاران <sup>۳۲</sup> (۲۰۱۳) | عامل محور | بله، با بررسی انواع شبکه‌های اجتماعی            | خیر                                                        | بله، با تمرکز بر بازخورد مصرف                           | بررسی تأثیر نوع شبکه اجتماعی بر رفتار مصرف انرژی، آزمایش تأثیر قهرمانان محیط‌زیست (ECs) بر تغییر رفتار، بدون تحلیل روش‌های انتخاب شرکت‌کنندگان                                                                                 |
| باستانی و همکاران (۲۰۱۶)               | عامل محور | بله، با استفاده از تئوری انتشار بیس             | خیر                                                        | بله، با مدل‌سازی بازخورد اطلاع‌رسانی و اثر دهان‌به‌دهان | استفاده از تئوری انتشار بیس برای مدل‌سازی پذیرش سیاست‌های صرفه‌جویی انرژی، مقایسه دو مدل عامل محور (یکی با پارامترهای فرضی و دیگری مبتنی بر بیس) با تمرکز بر بازخورد و اثر دهان‌به‌دهان و محدودیت در جهت‌گیری یک‌طرفه مدل بیس  |
| آلریز و همکاران (۲۰۱۹)                 | عامل محور | خیر، تمرکز بر رفتار فردی و تعاملات عاملیت‌ها    | خیر                                                        | بله، با مدل‌سازی بازخوردهای بلادرنگ و جابه‌جایی بار     | استفاده از Repast Symphony برای مدل‌سازی رفتار مصرف‌کنندگان براساس سن، جنسیت و شرایط محیطی، شناسایی دسته‌بندی‌های رفتاری (سطوح تبلی ۱ تا ۴) و بازخوردهای مؤثر برای کاهش مصرف انرژی و تمرکز بر پیش‌بینی بار کوتاه‌مدت و بلندمدت |
| کالی و همکاران <sup>۳۳</sup> (۲۰۱۹)    | -         | خیر، تمرکز بر رفتارهای ساکنان و مدل‌سازی فیزیکی | خیر                                                        | خیر                                                     | شبیه‌سازی پروفایل‌های رفتاری ساکنان برای پیش‌بینی عملکرد انرژی ساختمان، استفاده از مدل‌های هواشناسی و تهویه برای شبیه‌سازی دقیق‌تر مصرف انرژی                                                                                  |

| مطالعه                     | نوع مدل                                            | تمرکز بر تعاملات اجتماعی                                   | روش‌های انتخاب شرکت‌کنندگان                                   | شبیه‌سازی رویداد اطلاع‌رسانی                                    | ویژگی‌های متمایز                                                                                                                                                                                              |
|----------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| میکولیر و همکاران (۲۰۱۹)   | عامل محور                                          | بله، با تمرکز بر تعاملات اجتماعی در ساختمان‌ها             | خیر                                                           | بله، با مدل‌سازی تعاملات ساکن-ساختمان                           | رویکرد Li-BIM برای شبیه‌سازی تعاملات ساکن-ساختمان، استفاده از مدل‌های مبتنی بر عامل برای پیش‌بینی مصرف انرژی و راحتی حرارتی، مقایسهٔ پروفایل‌های دانش کم و زیاد (کاهش ۲٪ مصرف انرژی و افزایش ۲٪ راحتی حرارتی) |
| یو و همکاران (۲۰۲۰)        | عامل محور                                          | بله، با تمرکز بر تعاملات فردی و اجتماعی در محیط شهری       | خیر                                                           | بله، با شبیه‌سازی تأثیر سیاست‌های اطلاع‌رسانی و تنظیمات موقعیتی | مدل ABMS مبتنی بر تئوری پیچیدهٔ تطبیقی برای رفتار صرفه‌جویی انرژی ساکنان شهری چین، بررسی تأثیر نیت، رفتار کوتاه‌بلندمدت و سیاست‌ها، پیش‌بینی کاهش مصرف در شرایط سیاست بهینه                                   |
| شن و همکاران (۲۰۲۰)        | رگرسیون بردار پشتیبان (SVR)                        | بله، با تمرکز بر تعامل رفتار و ویژگی‌های شخصیتی            | خیر                                                           | بله، با مدل‌سازی مداخلات هم‌زمان مانند بازخورد و مشاوره         | مدل SVR بهینه‌شده برای پیش‌بینی مصرف برق و حداکثر صرفه‌جویی (۱۲٫۱٪)، در نظر گرفتن آثار تعاملی شخصیت (مانند برون‌گرایی و وظیفه‌شناسی) و مداخلات، کاربرد در مدیریت تقاضای انرژی فردی                            |
| می و همکاران (۲۰۲۱)        | تحلیل خوشه‌ای و نظریهٔ رفتار برنامه‌ریزی‌شده (TPB) | بله، با تمرکز بر تفاوت‌های روان‌شناختی در سطوح مصرف        | خیر                                                           | خیر                                                             | خوشه‌بندی مصرف به سطوح بالا، متوسط، پایین و تفاوت‌های درخور توجه در نیت و رفتارها، مصرف پایین‌تر از آستانه و پیشنهاد برای استراتژی‌های متفاوت و عدالت کاهش انتشار                                             |
| چن و همکاران (۲۰۲۳)        | مدل گستردهٔ نظریهٔ رفتار برنامه‌ریزی‌شده (TPB)     | بله، با تمرکز بر تعاملات اجتماعی-روان‌شناختی در پاسخ تقاضا | خیر                                                           | بله، با مدل‌سازی مشوق‌ها و رفتارهای پاسخ تقاضا                  | بررسی عوامل روان‌شناختی و مشوق‌ها در پاسخ تقاضا، راحتی حرارتی و عادات پیش‌بینی‌کنندهٔ مشوق‌ها، نگرش قوی‌ترین پیش‌بینی‌کنندهٔ نیت کاهش و کاربرد برای برنامه‌های پاسخ تقاضای مؤثر                               |
| دراگومیر و دراگومیر (۲۰۲۵) | عامل محور (MAS با SDMs و ABM)                      | بله، با تمرکز بر تعاملات رفتاری و پاسخ‌های تطبیقی          | خیر                                                           | بله، با شبیه‌سازی رویدادهای اطلاع‌رسانی و کنترل تطبیقی          | چارچوب ترکیبی برای تخمین و کنترل انرژی، شبیه‌سازی فرآیندهای فیزیکی مانند تبادل گرما و عملکرد عایق، تست تحت شرایط متفاوت مانند کیفیت عایق و دما، پلتفرم بدون ریسک برای استراتژی‌های صرفه‌جویی                  |
| بومسما و همکاران (۲۰۲۵)    | آزمایش کنترل‌شده تصادفی (RCT)                      | خیر                                                        | خیر                                                           | بله، با ارائهٔ بازخورد واقعی زمانی از طریق نصب نمایشگر در منازل | صرفه‌جویی ۶٫۹٪ گاز و ۲٫۲٪ برق، افزایش برجستگی هزینه‌ها، کاهش کل انرژی ۵٫۸٪ و مؤثرتر برای کاربران پر مصرف برق                                                                                                  |
| مدل پیشنهادی (این مطالعه)  | عامل محور                                          | بله، با مدل‌سازی نفوذ اجتماعی و انتشار عقاید               | بله، شامل انتخاب تصادفی، مبتنی بر مصرف، نفوذ اجتماعی و ترکیبی | بله                                                             | بررسی سیستماتیک روش‌های انتخاب شرکت‌کنندگان برای بهینه‌سازی بازدهی رویداد، ادغام مصرف انرژی، تغییرپذیری و نفوذ اجتماعی                                                                                        |

با توجه به مدل‌های بررسی‌شده و همچنین ضرورت اصلاح الگوی مصرف و محدودیت بودجه در برگزاری انواع رویدادها، باید بهینه‌ترین روش‌ها را در جهت گسترش فرهنگ صرفه‌جویی به کار گرفت. ازجمله موارد تأثیرگذار در بازدهی رویدادها، شیوهٔ انتخاب افراد شرکت‌کننده در رویداد است. این مطالعه به‌طور منحصربه‌فرد، روش‌های مختلف انتخاب شرکت‌کنندگان (تصادفی، مبتنی بر مصرف، مبتنی بر نفوذ اجتماعی و ترکیبی) را برای رویدادهای صرفه‌جویی انرژی بررسی می‌کند و یک مدل جامع عامل محور را ارائه می‌دهد که مصرف انرژی، تغییرپذیری رفتاری و نفوذ اجتماعی را ادغام می‌کند. برخلاف مطالعات قبلی که عمدتاً بر طراحی رویداد یا تأثیر

شبکه‌های اجتماعی تمرکز داشتند، این پژوهش بر بهینه‌سازی انتخاب شرکت‌کنندگان برای افزایش بازدهی رویداد، تأکید دارد. در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی عامل‌محور، تأثیر روش‌های انتخاب شرکت‌کنندگان در رویدادهای صرفه‌جویی انرژی بر میزان صرفه‌جویی جامعه هدف بررسی می‌شود.

### ۳- اهداف پژوهش

هدف کلی این پژوهش، بهبود بازدهی رویدادهای فرهنگ‌سازی صرفه‌جویی انرژی بر جامعه هدف و بهبود شیوه برگزاری این رویدادهاست. میزان تأثیرگذاری یک رویداد بر الگوی مصرف جامعه در طول زمان، به عوامل زیادی وابسته است؛ از جمله:

- نوع رویداد؛
- زمان برگزاری؛
- کیفیت رویداد؛
- ویژگی‌های افراد شرکت‌کننده.

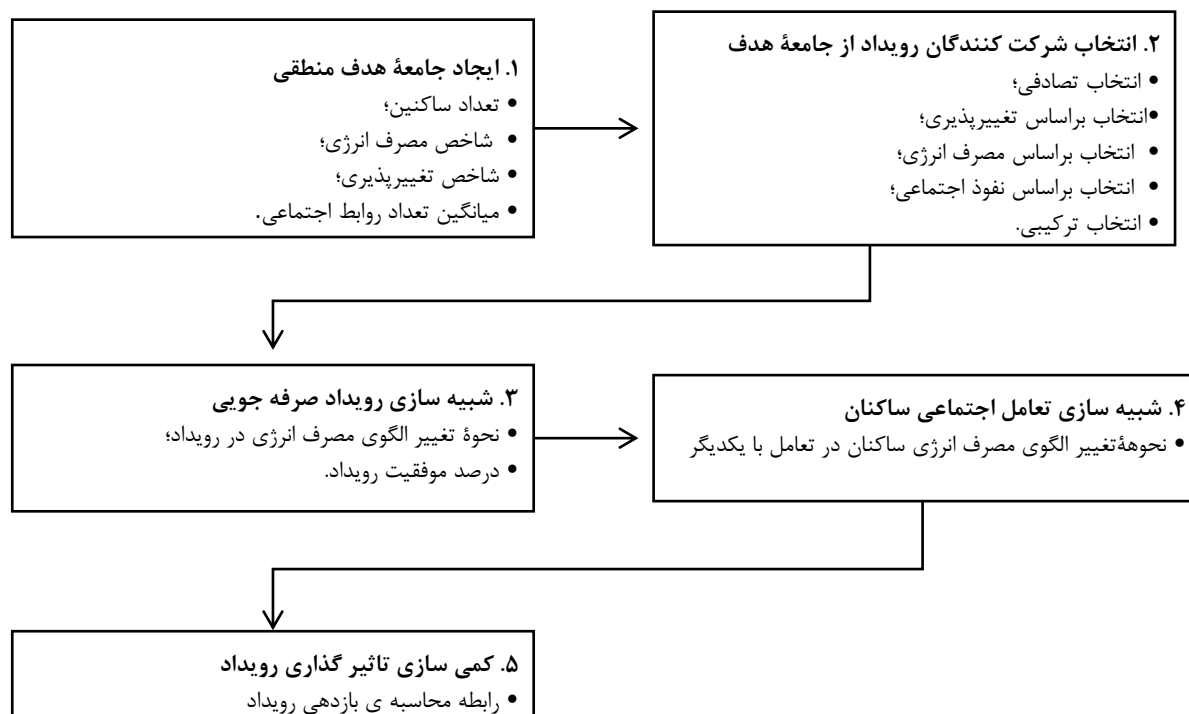
در برگزاری رویدادهای صرفه‌جویی، به دلیل محدودیت بودجه، یک رویداد در راستای تغییر الگوی مصرف برای تمام افراد یک مجموعه (برای مثال یک مجتمع اداری یا مسکونی) اجرا نمی‌شود؛ در نتیجه نحوه انتخاب افراد شرکت‌کننده و میزان تأثیر آن در بازدهی رویداد، سؤالی است که در این تحقیق بررسی می‌شود.

در این پژوهش، شیوه‌های انتخاب شرکت‌کنندگان در رویدادهای فرهنگ‌سازی و تأثیر آن بر تغییر الگوی مصرف انرژی مطالعه می‌شود. با توجه به اینکه مطالعات مشابه در راستای بررسی رویدادهای صرفه‌جویی انرژی عموماً روش‌های شبیه‌سازی را ابزار اصلی تحقیق به کار برده‌اند (Anderson et al., 2012, 2013; Azar & Al, 2010, 2011, 2013; Bastani et al., 2016; Du et al., 2016; Ekpenyong et al., 2014, 2015)، روش شبیه‌سازی عامل‌محور به عنوان ابزار اصلی این مطالعه استفاده شده است.

در بخش بعدی، جزییات مدل، به همراه مفاهیمی توضیح داده می‌شود که در گسترش این مدل به کار گرفته شده‌اند؛ سپس در بخش تحلیل نتایج، خروجی‌های مدل براساس روش‌های مختلف انتخاب شرکت‌کنندگان در رویداد، بررسی و تفسیر خواهد شد.

### ۴- روش تحقیق

برای رسیدن به اهداف مدنظر، از تکنیک شبیه‌سازی عامل‌محور<sup>۳۴</sup> با تکیه بر مدل‌های ریاضی انتشار عقاید و تغییر رفتار در تعاملات اجتماعی<sup>۳۵</sup> استفاده شده است. به کمک شبیه‌سازی عامل‌محور، جامعه‌ای از ساکنان با رفتارهای متفاوت در مصرف انرژی ایجاد و سپس بر پایه روابط ریاضی در مدل‌های انتشار عقاید، تأثیرپذیری الگوی مصرف به واسطه رویداد صرفه‌جویی یا تعامل افراد با یکدیگر، شبیه‌سازی شده است. شکل ۲، روند شبیه‌سازی و ساختار مدل را به صورت خلاصه، نمایش می‌دهد.



شکل ۲- مراحل شبیه‌سازی رویداد صرفه‌جویی

Fig. 2- Simulation steps of saving event

در ادامه پس از بررسی مفاهیم شبیه‌سازی عامل محور و مدل دینامیک عقیده‌ها، اجزای مدل ارائه شده در شکل ۲ به صورت دقیق تشریح و در نهایت نتایج اجرای مدل بر سه جامعه هدف با جمعیت‌های متفاوت، بررسی شده است.

#### ۴-۱ شبیه‌سازی عامل محور

یک سیستم عامل محور<sup>۳۶</sup>، شامل تعدادی از عوامل مستقل<sup>۳۷</sup> با حالت‌ها و قوانین رفتاری مشخص<sup>۳۸</sup> است که در اصطلاح یارانه‌ای، شیء<sup>۳۹</sup> نامیده می‌شوند. شبیه‌سازی عامل محور، به معنای بررسی رفتار نهایی سیستم تحت تأثیر برهمکنش<sup>۴۰</sup> این عامل‌های مستقل با یکدیگر یا محیط<sup>۴۱</sup> است. به بیان دیگر مدل‌سازی عامل محور، به معنای ایجاد تعداد مشخصی از عامل‌ها، برهمکنش آنها و در نهایت بررسی حالت کلی سیستم است (Axtell, 2000). رویکرد پایین به بالا در مدل‌سازی عامل محور، باعث می‌شود این روش گزینه مناسبی برای شبیه‌سازی رفتارهای انسانی، ساختار و روابط اجتماعی، دینامیک انتشار رفتارها و تعامل بین انسان‌ها در نظر گرفته شود (Borshchev & Gilbert, 2008; Edmonds, 2007; Filippov, 2004). در این تکنیک، هر عامل (یا شیء) دارای تعدادی ویژگی<sup>۴۲</sup> ثابت<sup>۴۳</sup> یا متغیر<sup>۴۴</sup> است که ویژگی‌های متغیر در تعامل با محیط یا عامل‌های دیگر، تغییر می‌کنند (Macal & North, 2010).

در سال‌های اخیر، تحقیقات بسیاری بر پایه ابزارهای مدل‌سازی عامل محور انجام شده است تا رفتارهای انسانی را در حوزه مصرف انرژی بررسی کنند؛ زیرا علاوه بر هزینه مالی و زمانی بسیار کمتر نسبت به تحقیقات میدانی، به محققان اجازه می‌دهد تا سناریوهای متفاوت را در شرایط و محیط‌های مختلف بررسی کنند (Anderson et al., 2013; Azar & Al Ansari, 2017; Azar & Menassa, 2011, 2013; Bastani et al., 2016; Erickson et al., 2011; Zhang et al., 2014; Vrba et al., 2009). این در حالی است که مطالعات میدانی علاوه بر اینکه نیازمند

هزینه‌های اجرایی بسیار بالایی هستند، تمامی شرایط و موقعیت‌های احتمالی را در فضای تحقیق فراهم نمی‌کنند. این شرایط به صورت سناریوهای مختلف در فضای شبیه‌سازی تعریف می‌شود تا محققان خروجی‌های محتمل را در موقعیت‌های مختلف ارزیابی و تحلیل کنند. شایان ذکر است در تمامی مطالعات اشاره شده که از ابزارهای شبیه‌سازی عامل محور بر پایه مفاهیم و مدل‌های معتبر رفتاری، در جهت بررسی رفتارهای مصرفی افراد استفاده کرده‌اند، نیازی به اعتبارسنجی میدانی نیست و خروجی‌های شبیه‌سازی دارای اعتبار کافی برای نتیجه‌گیری محققان و ارائه پیشنهادی مؤثر در جهت بهبود صرفه‌جویی انرژی‌اند (Anderson et al., 2012, 2013; Azar & Al, 2010, 2011, 2013; Bastani et al., 2016; Ekpenyong et al., 2014, 2015; Ansari, 2017; Azar & Menassa, 2010, 2011, 2013; Bastani et al., 2016; Ekpenyong et al., 2014, 2015).

#### ۴-۲ مدل‌های انتشار عقاید

عقیده<sup>۴۵</sup> هر شخص یک ویژگی متغیر است؛ به این معنی که افراد به واسطه تجربه‌های شخصی، تعامل در جامعه و دریافت بازخوردهای مثبت یا منفی، در رفتارهای خود تغییراتی ایجاد می‌کنند و این تغییر در عقاید، باعث ایجاد قطب‌های سیاسی، فرهنگ‌های مختلف و گروه‌های متنوع دیگر در جوامع انسانی می‌شود (Duggins, 2014)؛ در نتیجه برای درک بهتر این آثار و طراحی روش‌های دخالتی مناسب<sup>۴۶</sup> در رفتار جامعه، تاکنون مدل‌های ریاضی متعددی معرفی شده است که چگونگی تغییر عقیده افراد را به صورت رابطه‌های ریاضی توصیف کرده‌اند (Deffuant et al., 2000; Duggins, 2014; Friedkin, 2001; Hegselmann & Krause, 2002).

میزان اهمیت به صرفه‌جویی انرژی و در نتیجه شدت مصرف انرژی، یک ویژگی متغیر در کاربران در نظر گرفته می‌شود که این ویژگی تحت تأثیر محیط یا ارتباطات (بحث و تعامل با اطرافیان)، در جهت مثبت یا منفی تغییر می‌کند؛ در نتیجه از مدل‌های ارائه شده در مطالعات اجتماعی، مانند مدل‌های انتشار عقاید یا تغییر رفتار، برای بررسی نحوه تغییرات این ویژگی بهره برده می‌شود.

در این پژوهش بر پایه مطالعات انجام شده در حوزه شبیه‌سازی الگوی مصرف انرژی (Anderson et al., 2012, 2016; Azar & Al Ansari, 2017; Azar & Menassa, 2011, 2013; Bastani et al., 2010, 2011, 2013; Bastani et al., 2016; Ekpenyong et al., 2014, 2015; Ansari, 2017; Azar & Menassa, 2010, 2011, 2013; Bastani et al., 2016; Ekpenyong et al., 2014, 2015)، مدلی عامل محور برای شبیه‌سازی تغییرات الگوی مصرف ساکنان در رویدادهای صرفه‌جویی یا تعاملات اجتماعی ایجاد شده است تا تأثیر روش‌های گزینش شرکت‌کنندگان بر صرفه‌جویی مستقیم یا غیرمستقیم جامعه هدف، بررسی شود. در این تحقیق، تمامی اجزای مدل از سوی محققان از پایه و با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون<sup>۴۷</sup>، به عنوان یک زبان برنامه‌نویسی شیء‌گرا<sup>۴۸</sup> توسعه داده‌اند که جزئیات آنها در ادامه توضیح داده شده است.

#### ۵- اجزای مدل

##### ۵-۱ ایجاد جامعه هدف منطقی

این بخش شامل ایجاد تعداد مشخصی از ساکنان<sup>۴۹</sup> دارای ویژگی‌های مدنظر (ثابت یا متغیر) است. واضح است که جامعه هدف برای برگزاری یک رویداد در سطوح پایین، برای مثال یک مجتمع مسکونی ۳۰ واحدی یا در

سطوح بالا مانند یک شهرک مسکونی، در نظر گرفته می‌شود. به همین دلیل تعداد ساکنان در این پژوهش، در سه سطح مختلف در نظر گرفته شده است:

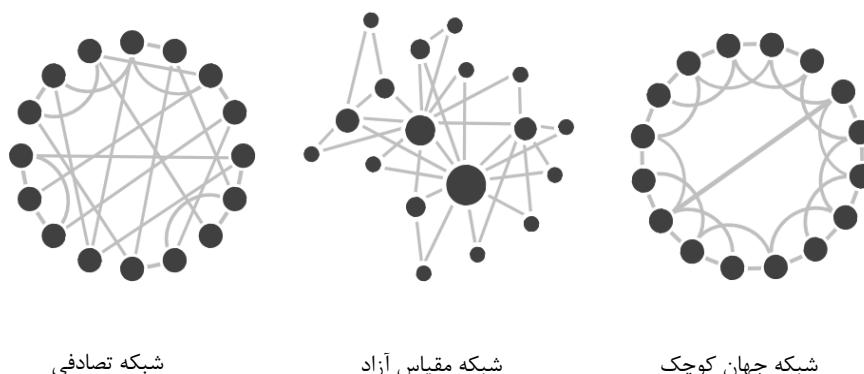
- جامعه‌ای کوچک مانند یک مجتمع مسکونی ۳۰ واحد با جمعیت ۱۰۰ نفر؛
- جامعه‌ای متوسط با جمعیت ۱۰۰۰ نفر؛
- جامعه‌ای بزرگ مانند یک شهرک مسکونی با جمعیت ۱۰۰۰۰ نفر.

ویژگی‌های هر کاربر در این مدل عبارت‌اند از:

- شاخص مصرف انرژی ( $ECI$ )<sup>۵۱</sup>: این شاخص معرف میزان مصرف انرژی فرد نسبت به جامعه هدف است. با توجه به هدف پژوهش، یعنی بررسی تأثیر روش‌های انتخاب کاربران بر بازدهی رویداد و همچنین بررسی تحقیقات مشابه (Anderson et al., 2013; Azar & Al Ansari, 2017; Bastani et al., 2016)، برای جلوگیری از پیچیدگی مدل، متغیر شاخص مصرف انرژی هر کاربر به صورت عددی تصادفی با توزیع نرمال (میانگین برابر ۵۰ و انحراف معیار برابر ۱۵)، بین صفر تا ۱۰۰ در نظر گرفته شده است (Anderson et al., 2013; Azar & Al Ansari, 2017; Bastani et al., 2016).

- شاخص تغییرپذیری ( $SI$ )<sup>۵۱</sup>: این ویژگی، تعیین‌کننده حداکثر میزان تغییرپذیری مصرف انرژی هر کاربر نسبت به وضعیت فعلی او، به دلیل برهمکنش‌های اجتماعی و یا رویدادهای صرفه‌جویی است. مقدار آن عددی بین صفر تا ۱ فرض می‌شود که صفر نشان‌دهنده تغییرناپذیری فرد در تعامل با اطرافیان و ۱ نشان‌دهنده تأثیرپذیری کامل فرد از سوی اطرافیان و یا رویداد صرفه‌جویی است. با توجه به تأثیر نسبی این پارامتر در خروجی‌های مدل و همچنین بررسی مدل‌های مشابه، این ویژگی نیز مشابه  $ECI$  دارای توزیع نرمال فرض شده است (Anderson et al., 2012, 2013; Azar & Menassa, 2013).

- تعداد روابط اجتماعی ( $SC$ )<sup>۵۲</sup>: این شاخص معرف میزان نفوذ اجتماعی فرد در جامعه هدف است. این ویژگی برابر تعداد روابط اجتماعی مؤثر هر شخص با دیگر افراد در جامعه هدف در نظر گرفته شده است که در رفتار مصرف انرژی یکدیگر تأثیرگذارند. ساختارهای اجتماعی<sup>۵۳</sup> مختلفی برای نمایش این روابط ارائه شده است که از انواع این ساختارها به شبکه‌های تصادفی<sup>۵۴</sup>، جهان کوچک<sup>۵۵</sup> و مقیاس آزاد<sup>۵۶</sup> اشاره می‌شود (شکل ۳).



شکل ۳- شبکه‌های اجتماعی

Fig. 3- Social networks

بررسی مدل‌های مشابه درباره شبیه‌سازی رویدادهای صرفه‌جویی، نشان می‌دهد نوع ساختار اجتماعی تأثیر ناچیزی بر بازدهی رویداد دارد (Azar & Al Ansari, 2017; Anderson et al., 2013). با توجه به این موضوع و ویژگی‌های هریک از ساختارهای اجتماعی، در این مدل‌سازی از شبکه تصادفی با میانگین تعداد روابط مشخص استفاده شده است تا از تأثیر احتمالی نوع شبکه بر نتایج مدل نیز جلوگیری شود.

## ۵-۲ انتخاب شرکت‌کنندگان رویداد از جامعه هدف

در برگزاری رویدادهای صرفه‌جویی عموماً به دلیل محدودیت بودجه لازم است تا تعداد محدودی از افراد جامعه برای شرکت در رویداد انتخاب شوند. در همین راستا، چهار روش برای انتخاب شرکت‌کننده‌ها بررسی شده است.

- (SI) انتخاب تصادفی<sup>۵۷</sup>: بدون در نظر گرفتن ویژگی خاصی، افراد شرکت‌کننده از بین جامعه هدف انتخاب می‌شوند.

- (S2) براساس تغییرپذیری: افرادی انتخاب می‌شوند که دارای بیشتری مقدار شاخص تغییرپذیری‌اند.
- (S3) براساس نفوذ اجتماعی: افرادی انتخاب می‌شوند که دارای بیشترین تعداد روابط اجتماعی هستند.
- (S4) براساس مصرف انرژی: افرادی انتخاب می‌شوند که بالاترین شاخص مصرف انرژی را دارند.
- (S5) انتخاب ترکیبی: افراد با توجه به مصرف انرژی (ECI) در کنار شاخص نفوذ اجتماعی و همچنین شاخص تغییرپذیری، انتخاب می‌شوند. به همین جهت در این مدل، پارامتری به نام ضریب تأثیرگذاری برای هر شخص تعریف شده است. ضریب تأثیرگذاری شخص  $i$  از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$F_i = ECI_i \times SI_i \times SC_i \quad (1)$$

چگونگی شناسایی افراد براساس معیارهای فوق، با استفاده از تحقیقات میدانی یا طراحی پرسش‌نامه انجام می‌شود که جزییات این روش‌ها از بحث این پژوهش خارج است و موضوع تحقیقات آینده در این حوزه در نظر گرفته می‌شود.

## ۵-۳ شبیه‌سازی برگزاری رویداد صرفه‌جویی

با بررسی مدل‌های تغییر رفتار و انتشار عقیده، میزان تغییر در شدت مصرف انرژی شرکت‌کنندگان در رویداد صرفه‌جویی، با توجه میزان تغییرپذیری (SI) آنها، مطابق رابطه (۲) محاسبه می‌شود (Deffuant et al., 2000; Friedkin, 2001; Hegselmann & Krause, 2002):

$$ECI_{t+1} = (1 - SI_i \times ESR) \times ECI_t \quad (2)$$

در این رابطه  $ECI_{(t+1)}$  میزان مصرف انرژی کاربر بعد از رویداد و  $ECI_t$  میزان مصرف انرژی کاربر قبل از برگزاری رویداد و  $ESR$ ، نرخ موفقیت رویداد است. این نرخ بیانگر کیفیت برگزاری رویداد به جهت تأثیرگذاری بر شرکت‌کنندگان است.

#### ۴-۵ شبیه‌سازی تعامل اجتماعی ساکنان

تعامل اجتماعی افراد در جامعه، بر الگوی مصرف انرژی آنها تأثیرگذار است که شدت این تأثیرگذاری، ارتباط مستقیمی با میزان تشابه رفتاری افراد دارد. رابطه ارائه‌شده در مطالعه فردیک<sup>۵۸</sup> (2001)، مطابق رابطه (۳) است.

$$x_{t+1}^i = (1 - a_i) \times x_t^i + a_i \times \sum_{j=1}^n \omega_{ij} \cdot x_t^j \quad (3)$$

در این رابطه،  $x_t^i$  عقیده فرد  $i$  در زمان  $t$ ،  $x_{t+1}^i$  عقیده فرد  $i$  در زمان  $t + 1$ ،  $x_t^j$  عقیده فرد  $j$  در زمان  $t$ ،  $a_i$  تغییرپذیری فرد  $i$  نسبت به عقاید بقیه و  $\omega_{ij}$  ضریب تأثیرگذاری فرد  $i$  بر  $j$  است.

با توجه به این موضوع ( $ECl_i$ )، تغییر شدت مصرف انرژی کاربر  $i$  در تعامل با اعضای ساختار اجتماعی‌اش، طبق رابطه (۴) بیان می‌شود (Duggins, 2014):

$$ECl_{t+1}^i = (1 - SI_i) \times ECl_t^i + SI_i \times \frac{\sum_{j=1}^n \omega_{ij} \times ECl_t^j}{\sum_{j=1}^n \omega_{ij}} \quad (4)$$

در رابطه (۴)،  $SI_i$ ، تغییرپذیری کاربر،  $n$ ، تعداد روابط اجتماعی کاربر و  $\omega_{ij}$ ، ضریب وزنی تأثیرگذاری کاربر  $j$  بر کاربر  $i$  است. محاسبه  $\omega_{ij}$  بر مبنای رابطه ارائه‌شده در (Duggins, 2014) و براساس رابطه استفاده‌شده در این مطالعه محاسبه می‌شود (روابط (۵) و (۶)).

$$\omega_{ij} = 1 - \frac{|EI_i - EI_j|}{50} \quad (5)$$

$$w_{ij} = 1 - \frac{|ECl_t^i - ECl_t^j|}{100} \quad (6)$$

که در این روابط،  $\omega_{ij}$  ضریب تأثیرگذاری فرد  $i$  بر  $j$ ،  $EI_i$  شاخص انرژی فرد  $i$  و  $EI_j$  شاخص انرژی فرد  $j$  است.

#### ۵-۵ کمی‌سازی تأثیرگذاری رویداد

پس از برگزاری رویداد و تعامل افراد در جامعه هدف (با جمعیت  $N$ )، بازدهی میان‌مدت رویداد ( $EE$ ) بر مبنای رابطه ارائه‌شده از سوی آذر و الأنصاری<sup>۵۹</sup> (2017) (رابطه ۷) و بر اساس رابطه ارائه‌شده در این مطالعه (رابطه ۸) محاسبه و گزارش می‌شود:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n (EI'_i - EI_i)}{\sum_{i=1}^n EI_i} \quad (7)$$

$$EE = \frac{\sum_{i=1}^N (ECl_{final}^i - ECl_{first}^i)}{N} \quad (8)$$

که در این روابط،  $EI_i$  شاخص انرژی فرد  $i$  قبل از برگزاری رویداد،  $EI'_i$  شاخص انرژی فرد  $i$  بعد از برگزاری رویداد و  $n$  تعداد شرکت‌کنندگان رویداد است.

#### ۶- تحلیل نتایج

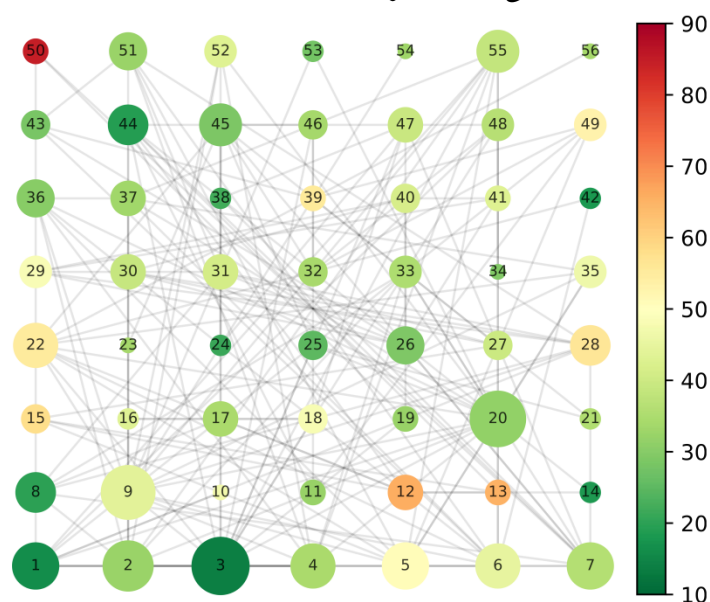
ورودی‌های مدل توسعه داده شده به اختصار در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- ورودی‌های مدل

Table 2- model inputs

| مقدار                    | نام اختصاری | پارامتر                                            |
|--------------------------|-------------|----------------------------------------------------|
| {100, 1000, 10000}       | $N$         | تعداد ساکنان                                       |
| Gauss(0-100,50,15)       | $ECI$       | شاخص مصرف انرژی <sup>۶۰</sup>                      |
| Gauss(0-1,0.5,0.15)      | $SI$        | شاخص تغییرپذیری <sup>۶۱</sup>                      |
| {3, 5, 7, 10, 12, 15}    | $ASC$       | میانگین تعداد روابط اجتماعی <sup>۶۲</sup>          |
| {5, 10, 15, 20, 25}      | $OFE$       | درصد ساکنین شرکت‌کننده در رویداد <sup>۶۳</sup> (%) |
| {5, 10, 20, 40, 70, 100} | $ESR$       | نرخ موفقیت رویداد (%)                              |

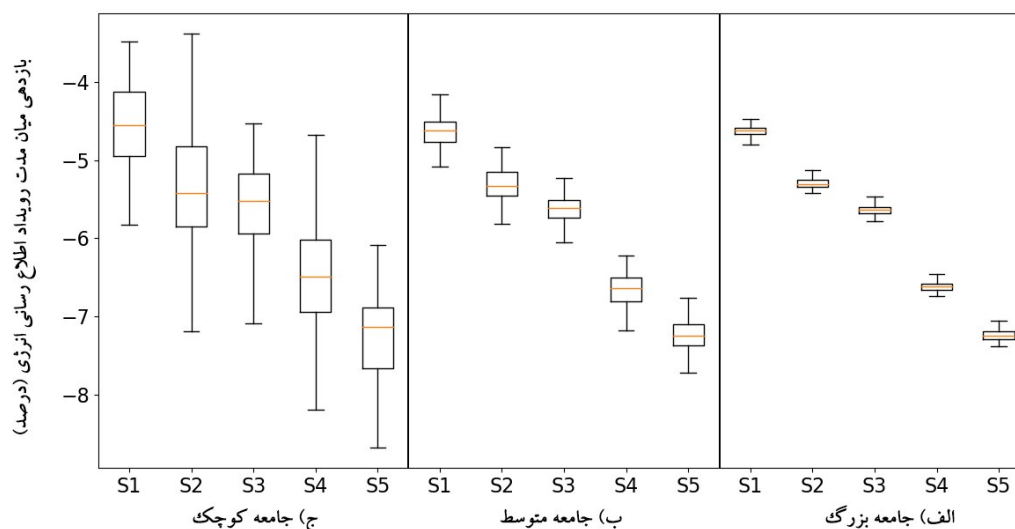
همان‌طور که قبلاً اشاره شد، نحوه توزیع دو پارامتر  $ECI$  و  $SI$  در جامعه شبیه‌سازی شده دارای تأثیر نسبی بر خروجی‌هاست. با توجه به این مسئله و همچنین بررسی مدل‌های مشابه (Anderson et al., 2013; Azar & Al, 2013; Ansari, 2017; Azar & Menassa, 2013)، توزیع نرمال، توزیع این دو شاخص در نظر گرفته شده است. به جهت بررسی تأثیر روش‌های انتخاب شرکت‌کنندگان در رویداد فرهنگ‌سازی صرفه‌جویی، در هر یک از سه جامعه مطرح شده - جامعه کوچک، متوسط و بزرگ - پارامترهای ورودی مدل شامل میانگین تعداد روابط اجتماعی، درصد ساکنان شرکت‌کننده در رویداد و نرخ موفقیت رویداد به ترتیب برابر ۱۰٪، ۲۰٪ و ۲۰٪ لحاظ شده است. علاوه بر اینکه این فرضیات در خروجی‌های نهایی تأثیر نسبی دارند، در ادامه، حساسیت نتایج حاصل از شبیه‌سازی، نسبت به این پارامترها بررسی شده است. قسمتی از شبکه اجتماعی بین ساکنان و روابط اجتماعی آنها با یکدیگر در شکل ۴ نشان داده شده است. اندازه و رنگ هر گره، نمایانگر تعداد روابط اجتماعی و  $ECI$  هریک از ساکنان است.



شکل ۴- قسمتی از شبکه روابط اجتماعی ساکنان

Fig. 4- A portion of the social network of residents

میانگین تعداد روابط اجتماعی در بازه بین ۳ تا ۱۵ نفر است که بعد از برگزاری رویداد به جهت بررسی نحوه تغییر الگوی مصرف انرژی ساکنان در تعامل با یکدیگر و کمی‌سازی تأثیر برگزاری رویداد، تعامل ساکنان بر مصرف انرژی انجام می‌شود.



شکل ۵- مقایسه تأثیر روش انتخاب شرکت‌کنندگان بر بازدهی رویداد صرفه‌جویی انرژی

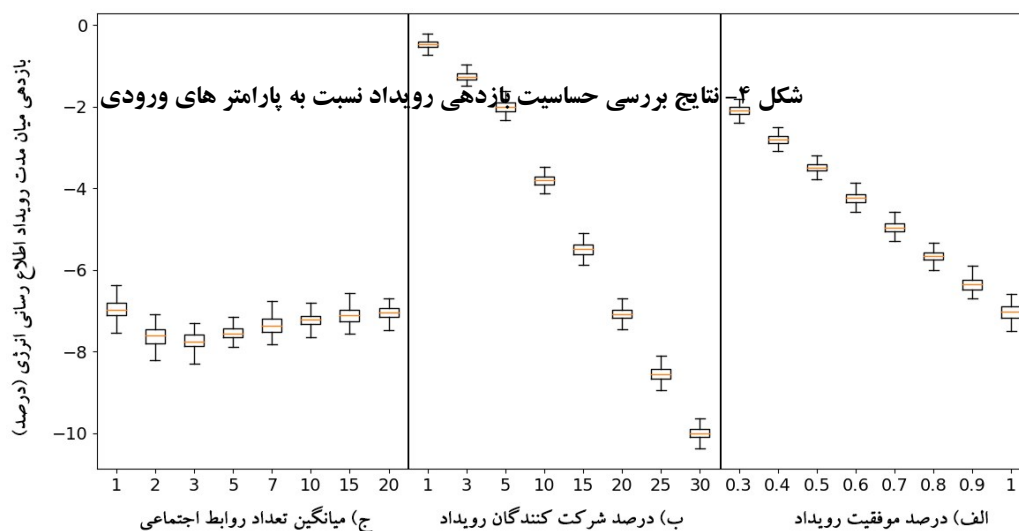
Fig. 5- Comparison of the effect of the participant selection method on the efficiency of the energy saving event

خلاصه نتایج اجرای مدل به تعداد ۲۰۰ تکرار به ازای هریک از روش‌های انتخاب شرکت‌کنندگان رویداد، در قالب یک نمودار جعبه‌ای<sup>۶۴</sup> در شکل ۵ نمایش داده شده است.

با توجه به شکل ۵، شیوه انتخاب شرکت‌کنندگان یک رویداد صرفه‌جویی در بازدهی میان‌مدت رویداد تأثیرگذار است و این تأثیرگذاری با افزایش جمعیت جامعه هدف، بیشتر نمایان می‌شود. همچنین الگوی اثرگذاری روش‌های انتخاب شرکت‌کنندگان در رویداد، بر بازدهی رویداد، در هر سه جامعه یکسان است. در ضمن، همان‌طور که در بخش مقدمه گفته شد، محدوده کاهش مصرف با استفاده از روش‌های فرهنگ‌سازی مصرف انرژی در مطالعات میدانی، در بازه ۰ تا ۳۰ درصد (بیشتر بین ۵ تا ۱۲ درصد) قرار دارد (Abrahamse et al., 2007; Carrico & Peschiera & Taylor, 2012; Khosrowpour et al., 2018; Hargreaves et al., 2010; Riemer, 2011) که با محدوده خروجی‌های مدل در هر سه جامعه همخوانی دارد.

با بررسی دقیق‌تر این نتایج، مشخص می‌شود که انتخاب دقیق شرکت‌کنندگان و در نظر گرفتن فاکتورهای اجتماعی در کنار میزان مصرف انرژی، تأثیر چشم‌گیری در بازدهی رویداد دارد و این تأثیر با افزایش جمعیت هدف بیشتر نمایان می‌شود. به بیان دیگر در نظر گرفتن سه ویژگی میزان مصرف، تغییرپذیری و نفوذپذیری افراد، که در مدل فوق تعریف شده‌اند، در روند انتخاب کردن شرکت‌کنندگان رویداد صرفه‌جویی، باعث بهبود نتایج رویداد و صرفه‌جویی بیشتر در مصرف انرژی می‌شود. این یافته به‌طور مستقیم در برنامه‌ریزی کمپین‌های آموزش مصرف انرژی به کار می‌رود. به‌طور مشخص، تصمیم‌گیرندگان از مدل برای شناسایی افراد کلیدی در جامعه استفاده می‌کنند؛ یعنی افرادی که تأثیرپذیری بالا، تغییرپذیری رفتاری درخور توجه و نقش اجتماعی پررنگ دارند. حضور این افراد در کارگاه‌ها یا کمپین‌ها، به دلیل آثار شبکه‌ای، به انتشار گسترده‌تر رفتارهای صرفه‌جویانه منجر می‌شود.

در نهایت حساسیت نتایج شبیه‌سازی براساس روش ترکیبی، به‌عنوان روش پیشنهادی، نسبت به پارامترهای ورودی مدل شامل میانگین تعداد روابط اجتماعی ( $ASC$ )، درصد ساکنین شرکت‌کننده ( $OFE$ ) و نرخ موفقیت رویداد ( $ESR$ ) در یک جامعه ۱۰۰۰ نفری بررسی شد. خلاصه نتایج این آنالیز حساسیت در شکل ۶ نمایش داده شده است.



شکل ۶- آنالیز حساسیت بازدهی میان مدت رویداد اطلاع رسانی براساس پارامترهای ورودی مدل

Fig. 6- Sensitivity analysis of the mid-term performance of the notification event based on the input parameters of the model

همان‌طور که بیان شد، درصد موفقیت رویداد ( $ESR$ ) به معنای میزان کیفیت رویداد و تأثیرگذاری آن بر شرکت‌کنندگان است که در بهترین حالت، یعنی ۱، از تمام پتانسیل موجود برای کاهش مصرف انرژی در شرکت‌کنندگان استفاده می‌شود. با توجه به نتایج مدل در شکل ۶، این فاکتور تأثیر درخور توجهی در بازدهی میان مدت رویداد دارد. این نکته راهنمایی برای اصلاح سیاست‌های اجرایی است؛ به این معنا که به جای افزایش کمی برنامه‌ها، تمرکز بر بهبود کیفیت محتوا، ارائه پیام‌های متناسب با گروه هدف و طراحی مداخلات معنادار، به بازدهی بیشتری منجر می‌شود.

همچنین تعداد افراد شرکت‌کننده در رویداد، که در اینجا به صورت درصد شرکت‌کننده از کل جمعیت ( $OFE$ ) مطرح شده است، اهمیت بسزایی در میزان اثربخشی رویداد دارد؛ در نتیجه برای تعیین این پارامتر، علاوه بر محدودیت‌های مالی و زمانی، باید نرخ بازدهی مورد انتظار از سرمایه‌گذاری را نیز مدنظر قرار دهد. این موضوع به‌ویژه در طراحی برنامه‌های پاداش و جریمه، مدنظر قرار می‌گیرد؛ به گونه‌ای که مشوق‌ها به نحوی تعریف شوند که حداکثر مشارکت در گروه‌های کلیدی را تضمین کنند. در مقابل، پارامتر میانگین تعداد روابط ( $ASC$ )، تأثیر چندانی بر بازدهی رویداد نداشته و این موضوع در مدل‌های مشابه دیگر نیز، مشاهده و تأیید شده است (Anderson et al., 2013; Azar & Al Ansari, 2017).

## ۷- نتیجه‌گیری

رویدادهای کاهش مصرف انرژی در سطوح پایین، مانند یک مجتمع مسکونی یا در سطوح بالا مانند یک شهرک مسکونی برگزار می‌شوند و به دلیل هزینه‌بردار بودن این روش‌ها، اثربخشی هرچه بیشتر رویداد در جهت بهبود

الگوی مصرف انرژی، اهمیت ویژه‌ای برای ذی‌نفعان دارد. با استفاده از رویکرد ارائه‌شده، برگزارکنندگان رویدادهای صرفه‌جویی انرژی، احتمال موفقیت رویدادها را افزایش و سرمایه‌گذاری هدفمندی انجام می‌دهند.

این پژوهش با بررسی روش‌های انتخاب شرکت‌کنندگان در رویدادهای صرفه‌جویی انرژی، در قالب یک مدل عامل‌محور به‌عنوان بستر آزمایش، اهمیت این انتخاب را بر بازدهی رویداد بررسی کرده است. با ایجاد جامعه‌ای از کاربران در یک ساختار اجتماعی و با استفاده از شبیه‌سازی عامل‌محور، مشخص شد که در نظر گرفتن ویژگی‌های ساکنان برای انتخاب شرکت‌کنندگان رویداد، تأثیر مناسبی در جهت افزایش بازدهی رویداد دارد. در این پژوهش، سه فاکتور میزان مصرف انرژی، تغییرپذیری و نفوذ اجتماعی ساکنان در قالب شاخص مصرف انرژی، شاخص تغییرپذیری و تعداد روابط اجتماعی بررسی شد. نتایج این شبیه‌سازی نشان می‌دهد در نظر گرفتن دو ویژگی میزان نفوذ اجتماعی افراد در جامعه هدف و تغییرپذیری آنها در کنار میزان مصرف انرژی، باعث بهبود بازدهی رویدادهای فرهنگ‌سازی صرفه‌جویی می‌شود. همچنین طبق نتایج این شبیه‌سازی، تعداد شرکت‌کنندگان رویداد باید با توجه به بازدهی مورد انتظار و همچنین منابع در دسترس انجام شود.

اگرچه این مطالعه بر مبنای مدل‌های مفهومی معتبر و شبیه‌سازی عامل‌محور طراحی شده است، نبود اعتبارسنجی میدانی یکی از محدودیت‌های آن به شمار می‌رود. جمع‌آوری داده‌های واقعی درباره تعاملات اجتماعی و نتایج رویدادها در دنیای واقعی، چالش‌برانگیز است و احتمال دارد مفروضات مدل، تمامی پیچیدگی‌های رفتار انسانی را به‌طور کامل پوشش ندهد. پیشنهاد می‌شود تحقیقات آینده بر اعتبارسنجی تجربی تمرکز کنند؛ ازجمله انجام آزمایش‌های میدانی برای ارزیابی اثربخشی روش‌های انتخاب شرکت‌کنندگان، جمع‌آوری داده‌های طولی درباره رفتار ساکنان و مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های واقعی مصرف انرژی.

با توجه به اهمیت موضوع بررسی‌شده، تحقیقات آینده، بررسی‌های دقیق‌تری را در حوزه پارامترهای مؤثر بر رفتار مصرفی ساکنان انجام می‌دهند. کمی‌سازی این پارامترها و ایجاد روش‌هایی برای اندازه‌گیری آنها، باعث افزایش دقت مدل‌سازی رفتارهای انسانی در حوزه مصرف انرژی و در نتیجه بهینه‌سازی روش‌های موجود برای بهبود الگوی مصرف انرژی می‌شود.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله، از هم‌فکری تمام اعضای کمیته علمی انجمن مهندسی سازه ایران کمال سپاس‌گزاری را دارند.

## فهرست علائم

|       |                                      |
|-------|--------------------------------------|
| $N$   | تعداد ساکنان                         |
| $ECI$ | شاخص مصرف انرژی                      |
| $SI$  | شاخص تغییرپذیری                      |
| $ASC$ | میانگین تعداد روابط اجتماعی          |
| $OFE$ | درصد ساکنان شرکت‌کننده در رویداد (%) |

ESR نرخ موفقیت رویداد (%)

EE بازدهی میان مدت رویداد

 $w_{ij}$  ضریب وزنی تأثیرگذاری کاربر  $j$  بر کاربر  $i$ 

## References

- Abrahamse, W., Steg, L., Vlek, C., & Rothengatter, T. (2007). The effect of tailored information, goal setting, and tailored feedback on household energy use, energy-related behaviors, and behavioral antecedents. *Journal of Environmental Psychology*, 27(4), 265–276. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2007.08.002>
- Allcott, H., & Mullainathan, S. (2010). Behavior and energy policy. *Science*, 327(5970), 1204–1205. <https://doi.org/10.1126/science.1180775>
- Al-Mumin, A., Khattab, O., & Sridhar, G. (2003). Occupants' behavior and activity patterns influencing the energy consumption in the Kuwaiti residences. *Energy and Buildings*, 35(6), 549–559. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00167-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00167-6)
- Alrizq, M., de Doncker, E., & Fong, A. (2019). Changing Energy Consumption Patterns Based on Multi-Agent Human Behavior Modeling for Analyzing the Effects of Feedback Techniques. *2019 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/PECI.2019.8698779>
- Amblard, F., & Deffuant, G. (2004). The role of network topology on extremism propagation with the relative agreement opinion dynamics. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 343, 725–738. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2004.06.102>
- Anderson, K., Lee, S., & Menassa, C. (2012). Effect of social network type on building occupant energy use. *Proceedings of the Fourth ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Buildings*, 17–24. <https://doi.org/10.1145/2422531.2422535>
- Anderson, K., Lee, S., & Menassa, C. (2013). Impact of social network type and structure on modeling normative energy use behavior interventions. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 28(1), 30–39. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000314](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000314)
- Axtell, R. (2000). *Why agents?: On the varied motivations for agent computing in the social sciences*. <https://www.brookings.edu/wp-content/uploads/2016/06/agents.pdf>
- Azar, E., & Al Ansari, H. (2017). Multilayer Agent-Based Modeling and Social Network Framework to Evaluate Energy Feedback Methods for Groups of Buildings. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 31(4), 04017007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000651](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000651)
- Azar, E., & Menassa, C. (2010). A conceptual framework to energy estimation in buildings using agent based modeling. *Proceedings of the Winter Simulation Conference*. <https://doi.org/10.1109/WSC.2010.5679007>
- Azar, E., & Menassa, C. C. (2011). Agent-based modeling of occupants and their impact on energy use in commercial buildings. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 26(4), 506–518. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000158](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000158)
- Azar, E., & Menassa, C. C. (2013). Framework to evaluate energy-saving potential from occupancy interventions in typical commercial buildings in the United States. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 28(1), 63–78. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000318](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000318)
- Bartels, G. C., & Nelissen, W. (2002). *Marketing for sustainability: Towards transactional policy-making*. John Wiley & Sons. [https://books.google.com/books/about/Marketing\\_for\\_Sustainability.html?id=ETpMPwAACAAJ](https://books.google.com/books/about/Marketing_for_Sustainability.html?id=ETpMPwAACAAJ)
- Bastani, M. S., Asadi, S., & Anumba, C. J. (2016). Application of Bass Diffusion Theory to Simulate the Impact of Feedback and Word of Mouth on Occupants' Behavior in Commercial Buildings: An Agent-Based Approach. *Journal of Architectural Engineering*, 22(4), 04016013. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000223](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000223)

- Boomsma, M., Vringer, K., & Soest, D. van. (2025). The impact of real-time energy consumption feedback on residential gas and electricity usage. *Journal of Environmental Economics and Management*, 132, 103163. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2025.103163>
- Borshchev, A., & Filippov, A. (2004). From system dynamics and discrete event to practical agent based modeling: Reasons, techniques, tools. *Proceedings of the 22nd International Conference of the System Dynamics Society*. <https://faculty.sites.iastate.edu/tesfatsi/archive/tesfatsi/SystemDynDiscreteEventABMCompared.BorshchevFilippov04.pdf>
- Bryant, T., Thomas, S., Dean, B., Lyons, L., Morgado, D., Je, K., Subkhankulova, D., Dennehy, E., Liu, Y., & Houssin, D. (2015). *Medium Term Energy Efficiency Market Report 2015*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-market-report-2015>
- Calì, D., Müller, D., & Madsen, H. (2019). Benefits of the Inclusion of Occupant Behaviour Profiles in the Simulation of the Energy Performance of Buildings. In *Proceedings of 16th IBPSA International Conference & Exhibition Building Simulation, 2019*, 2388–2395. <https://doi.org/10.26868/25222708.2019.211411>
- Carrico, A. R., & Riemer, M. (2011). Motivating energy conservation in the workplace: An evaluation of the use of group-level feedback and peer education. *Journal of Environmental Psychology*, 31(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2010.11.004>
- Chen, C., Xu, X., Cao, Z., Mockus, A., & Shi, Q. (2023). Analysis of social–Psychological factors and financial incentives in demand response and residential energy behavior. *Frontiers in Energy Research*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.932134>
- Deffuant, G., Neau, D., Amblard, F., & Weisbuch, G. (2000). Mixing beliefs among interacting agents. *Advances in Complex Systems*, 3(01n04), 87–98. <https://doi.org/10.1142/S0219525900000078>
- Delzendeh, E., Wu, S., Lee, A., & Zhou, Y. (2017). The impact of occupants' behaviours on building energy analysis: A research review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1061–1071. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.264>
- Dragomir, O. E., & Dragomir, F. (2025). Multi-Agent-Based Estimation and Control of Energy Consumption in Residential Buildings. *Processes*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/pr13072261>
- Du, F., Zhang, J., Li, H., Yan, J., Galloway, S., & Lo, K. L. (2016). Modelling the impact of social network on energy savings. *Applied Energy*, 178, 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.014>
- Duggins, P. (2014). *A psychologically-motivated model of opinion change with applications to american politics*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1406.7770>
- Edmonds, B. (2007). Social Simulation: Technologies, Advances and New Discoveries: Technologies, Advances and New Discoveries. *IGI Global*. <https://doi.org/10.4018/978-1-59904-522-1>
- Ekpenyong, U. E., Zhang, J., & Xia, X. (2014). Mathematical modelling for the social impact to energy efficiency savings. *Energy and Buildings*, 84, 344–351. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.08.019>
- Ekpenyong, U. E., Zhang, J., & Xia, X. (2015). How information propagation in social networks can improve energy savings based on time of use tariff. *Sustainable Cities and Society*, 19, 26–33. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.07.005>
- Erickson, V. L., Lin, Y., Kamthe, A., Brahme, R., Surana, A., Cerpa, A. E., Sohn, M. D., & Narayanan, S. (2009). Energy efficient building environment control strategies using real-time occupancy measurements. *Proceedings of the First ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Buildings*, 19 - 24. <https://doi.org/10.1145/1810279.1810284>
- Friedkin, N. E. (2001). Norm formation in social influence networks. *Social Networks*, 23(3), 167–189. [https://doi.org/10.1016/S0378-8733\(01\)00036-3](https://doi.org/10.1016/S0378-8733(01)00036-3)
- Gilbert, N. (2008). *Agent-based models*. Sage. [https://books.google.com/books/about/Agent\\_Based\\_Models.html?id=Z3cp0ZBK9UsC](https://books.google.com/books/about/Agent_Based_Models.html?id=Z3cp0ZBK9UsC)

- UNEP SBCI. (2010b). *Draft briefing on the sustainable building index*. United Nations Environment Programme, Sustainable Buildings and Climate Initiative, Paris. Available at : [http://www.unep.org/sbci/pdfs/SYM2010-UNEP-SBCI\\_SB\\_Index\\_Briefing.pdf](http://www.unep.org/sbci/pdfs/SYM2010-UNEP-SBCI_SB_Index_Briefing.pdf)
- Hargreaves, T., Nye, M., & Burgess, J. (2010). Making energy visible: A qualitative field study of how householders interact with feedback from smart energy monitors. *Energy Policy*, 38(10), 6111–6119. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.05.068>
- Hegselmann, R., & Krause, U. (2002). Opinion dynamics and bounded confidence models, analysis, and simulation. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 5(3). <https://www.jasss.org/5/3/2/2.pdf>
- Hong, T., D'Oca, S., Turner, W. J., & Taylor-Lange, S. C. (2015). An ontology to represent energy-related occupant behavior in buildings. Part I: Introduction to the DNAs framework. *Building and Environment*, 92, 764–777. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.019>
- Hong, T., & Lin, H.-W. (2013). *Occupant behavior: Impact on energy use of private offices*. <https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/lbnl-6128e.pdf>
- Hong, T., Taylor-Lange, S. C., D'Oca, S., Yan, D., & Corngati, S. P. (2016). Advances in research and applications of energy-related occupant behavior in buildings. *Energy and Buildings*, 116, 694–702. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.052>
- Jackson, T. (2005). Motivating sustainable consumption. *Sustainable Development Research Network*, 29, 30. [https://www.researchgate.net/publication/242600751\\_Motivating\\_Sustainable\\_Consumption](https://www.researchgate.net/publication/242600751_Motivating_Sustainable_Consumption)
- Jain, R. K., Gulbinas, R., Taylor, J. E., & Culligan, P. J. (2013). Can social influence drive energy savings? Detecting the impact of social influence on the energy consumption behavior of networked users exposed to normative eco-feedback. *Energy and Buildings*, 66, 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.06.029>
- Karatasou, S., Laskari, M., & Santamouris, M. (2014). Models of behavior change and residential energy use: A review of research directions and findings for behavior-based energy efficiency. *Advances in Building Energy Research*, 8(2), 137–147. <https://doi.org/10.1080/17512549.2013.809275>
- Khosrowpour, A., Jain, R. K., Taylor, J. E., Peschiera, G., Chen, J., & Gulbinas, R. (2018). A review of occupant energy feedback research: Opportunities for methodological fusion at the intersection of experimentation, analytics, surveys and simulation. *Applied Energy*, 218, 304–316. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.148>
- Macal, C. M., & North, M. J. (2010). Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Journal of Simulation*, 4(3), 151–162. <https://doi.org/10.1109/WSC.2005.1574234>
- Masoso, O., & Grobler, L. J. (2010). The dark side of occupants' behaviour on building energy use. *Energy and Buildings*, 42(2), 173–177. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.08.009>
- Mckenzie-Mohr, D. (2000). New ways to promote proenvironmental behavior: Promoting sustainable behavior: An introduction to community-based social marketing. *Journal of Social Issues*, 56(3), 543–554. <https://doi.org/10.1111/0022-4537.00183>
- Mi, L., Xu, T., Sun, Y., Yang, H., Wang, B., Gan, X., & Qiao, L. (2021). Promoting differentiated energy savings: Analysis of the psychological motivation of households with different energy consumption levels. *Energy*, 218, 119563. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119563>
- Micolier, A., Taillandier, F., Taillandier, P., & Bos, F. (2019). Li-BIM, an agent-based approach to simulate occupant-building interaction from the Building-Information Modelling. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 82, 44–59. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.03.008>
- Peng, C., Yan, D., Wu, R., Wang, C., Zhou, X., & Jiang, Y. (2012). Quantitative description and simulation of human behavior in residential buildings. *Building simulation*, 5(2), 85–94. <https://doi.org/10.1007/s12273-011-0049-0>
- Peschiera, G., & Taylor, J. E. (2012). The impact of peer network position on electricity consumption in building occupant networks utilizing energy feedback systems. *Energy and Buildings*, 49, 584–590. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.011>

- Peschiera, G., Taylor, J. E., & Siegel, J. A. (2010). Response–relapse patterns of building occupant electricity consumption following exposure to personal, contextualized and occupant peer network utilization data. *Energy and Buildings*, 42(8), 1329–1336. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.03.001>
- Pickens, P. M. (2002). *Community-based social marketing as a planning tool* University of Oregon. [https://www3.uwsp.edu/cnr-ap/UWEXLakes/Documents/ecology/shoreland/marketing/cbsm\\_as\\_a\\_planning\\_tool\\_pmp.pdf](https://www3.uwsp.edu/cnr-ap/UWEXLakes/Documents/ecology/shoreland/marketing/cbsm_as_a_planning_tool_pmp.pdf)
- Shen, M., Lu, Y., Wei, K. H., & Cui, Q. (2020). Prediction of household electricity consumption and effectiveness of concerted intervention strategies based on occupant behaviour and personality traits. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 127, 109839. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109839>
- Shimokawa, M., & Tezuka, T. (2014). Development of the “Home Energy Conservation Support Program” and its effects on family behavior. *Applied Energy*, 114, 654–662. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.007>
- Staats, H., Harland, P., & Wilke, H. A. (2004). Effecting durable change: A team approach to improve environmental behavior in the household. *Environment and Behavior*, 36(3), 341–367. <https://doi.org/10.1177/0013916503260163>
- Staats, H., Leeuwen, E., & Wit, A. (2000). A longitudinal study of informational interventions to save energy in an office building. *Journal of Applied Behavior Analysis*, 33(1), 101–104. <https://doi.org/10.1901/jaba.2000.33-101>
- Verplanken, B., & Wood, W. (2006). Interventions to break and create consumer habits. *Journal of Public Policy & Marketing*, 25(1), 90–103. <https://doi.org/10.1509/jppm.25.1.90>
- Vrba, P., Mařík, V., Siano, P., Leitão, P., Zhabelova, G., Vyatkin, V., & Strasser, T. (2014). A review of agent and service-oriented concepts applied to intelligent energy systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(3), 1890–1903. <https://doi.org/10.1109/TII.2014.2326411>
- Weenig, M. W., & Midden, C. J. (1991). Communication network influences on information diffusion and persuasion. *Journal of Personality and Social Psychology*, 61(5), 734. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.61.5.734>
- Yu, Z., Fung, B. C., Haghighat, F., Yoshino, H., & Morofsky, E. (2011). A systematic procedure to study the influence of occupant behavior on building energy consumption. *Energy and Buildings*, 43(6), 1409–1417. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.02.002>
- Yue, T., Long, R., Chen, H., Liu, J., Liu, H., & Gu, Y. (2020). Energy-saving behavior of urban residents in China: A multi-agent simulation. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119623. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119623>
- Zhang, T., Siebers, P.-O., & Aickelin, U. (2011). Modelling electricity consumption in office buildings: An agent based approach. *Energy and Buildings*, 43(10), 2882–2892. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.07.007>
- Zhao, D., McCoy, A. P., Du, J., Agee, P., & Lu, Y. (2017). Interaction effects of building technology and resident behavior on energy consumption in residential buildings. *Energy and Buildings*, 134, 223–233. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.049>

<sup>۱</sup> ترازنامه انرژی سال ۱۳۹۴، معاونت امور برق و انرژی، دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی.

<sup>۲</sup> Zhao et al.

<sup>۳</sup> Energy workshop

<sup>۴</sup> Energy feedback Method

<sup>۵</sup> Goal setting and commitment

<sup>۶</sup> Incentives and penalties

<sup>۷</sup> Green marketing

<sup>۸</sup> Ekpenyong et al.

<sup>۹</sup> Energy efficiency projects

<sup>۱۰</sup> Expected energy savings

<sup>۱۱</sup> Azar & Menassa

<sup>۱۲</sup> Social networks

<sup>۱۳</sup> Energy feedback method

<sup>۱۴</sup> Bastani et al.

- <sup>15</sup> Alrizq et al.
- <sup>16</sup> Load shifting
- <sup>17</sup> Micolier et al.
- <sup>18</sup> Yue et al.
- <sup>19</sup> Agent-Based Modeling and Simulation (ABMS)
- <sup>20</sup> Shen et al.
- <sup>21</sup> Support Vector Regression (SVR)
- <sup>22</sup> Mi et al.
- <sup>23</sup> Theory of Planned Behavior (TPB)
- <sup>24</sup> Chen et al.
- <sup>25</sup> Dragomir & Dragomir
- <sup>26</sup> Multi-Agent Systems (MASs)
- <sup>27</sup> System Dynamics Modeling (SDM)
- <sup>28</sup> Agent-Based Modeling (ABM)
- <sup>29</sup> Boomsma et al.
- <sup>30</sup> Randomized Controlled Trial (RCT)
- <sup>31</sup> Carrico & Riemer
- <sup>32</sup> Anderson et al.
- <sup>33</sup> Cali et al.
- <sup>34</sup> Agent-based simulation
- <sup>35</sup> Opinion dynamics
- <sup>36</sup> Multi-agent system
- <sup>37</sup> Agents
- <sup>38</sup> Rules
- <sup>39</sup> Object
- <sup>40</sup> Interaction
- <sup>41</sup> Environment
- <sup>42</sup> Attribute
- <sup>43</sup> Static
- <sup>44</sup> Dynamic
- <sup>45</sup> Opinion
- <sup>46</sup> Intervention methods
- <sup>47</sup> Python 3.2
- <sup>48</sup> Object-Oriented
- <sup>49</sup> Occupants
- <sup>50</sup> Energy Consumption Index
- <sup>51</sup> Susceptibility Index
- <sup>52</sup> Social Connections
- <sup>53</sup> Social network
- <sup>54</sup> Random networks
- <sup>55</sup> Small-world
- <sup>56</sup> Scale-free
- <sup>57</sup> Random
- <sup>58</sup> Friedkin
- <sup>59</sup> Azar & Al Ansari

<sup>۶۰</sup> انتخاب عددی بین ۰ تا ۱۰۰ براساس توزیع نرمال با میانگین ۵۰ و انحراف معیار ۱۵

<sup>۶۱</sup> انتخاب عددی بین ۰ تا ۱ براساس توزیع نرمال با میانگین ۰/۵ و انحراف معیار ۰/۱۵

- <sup>62</sup> Average Social Connections
- <sup>63</sup> Occupant Fraction for Event
- <sup>64</sup> Boxplot