

راهکاری برای کاهش مصرف گاز خانگی در شهر تهران با استفاده از مدلسازی عامل بنیان

پریا ذکری

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی سیستم انرژی، دانشگاه شریف. p.zekri.astaneh@gmail.com

مهرداد بروشکی^۱

دانشیار، دانشکده مهندسی سیستم انرژی، دانشگاه شریف. boroushaki@sharif.edu

چکیده:

متغیرهای اجتماعی - رفتاری خانوار و محرک‌های بیرونی مانند قیمت‌گذاری، تبلیغات و تعاملات همسایگی بر مصرف گاز خانگی اثر می‌گذارند. برای تعیین نقطه‌ی بهینه‌ی این عوامل، ابتدا مولفه‌های کلیدی تصمیم‌گیری خانوار شناسایی و وزن هر عامل با مدل‌سازی معادلات ساختاری و الگوریتم ژنتیک تعیین شد. سپس با رویکرد عامل‌بنیان و تحلیل حساسیت، واکنش خانوارها به فناوری‌های نوین و تغییر الگوی مصرف برآورد گردید. نتایج نشان داد تقویت تبلیغات رسانه‌ای و محرک‌های درونی، پذیرش تکنولوژی و تحولات فرهنگی را تسریع می‌کند، اما اثر این پارامترها با گذشت زمان به سطح اشباع می‌رسد. همچنین قیمت گاز با نرخ پذیرش، رابطه‌ای نوسانی و غیرخطی دارد. در حالت بهینه، با اثر رسانه‌ای ۰.۴۳، نرخ نفوذ ۰.۵۳ و افزایش قیمت گاز تا ۲۷۰ درصد (۲۷۷۷ تومان)، مصرف گاز پس از ۲.۵ سال به‌طور چشمگیری نسبت به حالت پیش‌فرض کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی:

پذیرش خانوار، توسعه‌ی پایدار، دینامیک رفتاری مصرف‌کنندگان، مدلسازی عامل‌بنیان، مصرف گاز

^۱ نویسنده مسئول

A Strategy for Reducing Household Gas Consumption in Tehran Using Agent-Based Modeling

Paria Zekri Astaneh

Master Student, Energy Engineering Department, Sharif University of Technology, p.zekri.astaneh@gmail.com

Mehrdad Boroshaki[‡]

Associate Professor, Energy Engineering Department, Sharif University of Technology, boroshaki@sharif.edu

Abstract:

Many studies highlight the important role neighbors play in shaping pro-environmental behavior. Interactions influence access to information about technologies, social expectations, and perceptions of costs and benefits. These social dynamics affect individuals' willingness to adopt new energy behaviors, which often leads to clustering in technology adoption. Such clustering poses challenges for infrastructure planning and equitable resource access. Policies that overlook these complex social interactions may fail to achieve intended outcomes. The household sector consumes about 40% of the country's total energy production. Recognizing the significance of consumer behavioral patterns, this research first distinguishes the primary variables affecting their decision-making and quantifies their initial significance through Structural Equation Modeling (SEM). Subsequently, the study employs Agent-Based Modeling (ABM) combined with sensitivity analysis to project how households adapt to the emergence of novel technological trends and shifting consumption cultures. The findings indicate that while enhanced media exposure and peer-to-peer influence drive higher rates of technological uptake and cultural transition, these effects eventually diminish as they approach a saturation point. This highlights the vital necessity of strategic media frameworks and social engagement in fostering the collective acceptance of technological and cultural advancements. Furthermore, the link between natural gas pricing and the integration of innovative technologies or habits is non-linear and characterized by fluctuations. This complexity arises because consumer responses to price adjustments are not uniform but are instead contingent upon specific economic climates and particular financial thresholds. where a reverse effect occurs. In the optimal scenario—with a media influence value of 0.43, an adoption rate of 0.53, and a gradual increase in gas prices up to 270% (equivalent to 2,777 Tomans per cubic meter)—gas consumption, based on 2022 data, would significantly decrease after 2.5 years compared to the current baseline, highlighting the substantial impact of behavioral and economic parameters—specifically media outreach, social contagion rates, and natural gas pricing—in optimizing the energy-saving practices of households.

Keywords: Agent-Based Modeling, Behavioral Dynamics, Cultural Adoption, Gas Consumption, Sustainable Development

[‡] Corresponding Author

۱. مقدمه

نظام سیاست‌گذاری در حوزه انرژی بر بازافت انرژی‌های تلف‌شده و تبدیل آن‌ها به منابعی پایدار، اقتصادی و دوست‌دار طبیعت تمرکز دارد. در این میان، مدل‌های سیستم انرژی نقشی کلیدی در برنامه‌ریزی‌های این حوزه ایفا می‌کنند که نشان‌دهنده ضرورت طراحی مدل‌های دقیق برای پیش‌بینی و تحلیل تقاضا است. کنترل تقاضای انرژی از طریق اصلاح رفتارهای مصرفی و ترویج فناوری‌های بهینه، راهکاری اساسی برای کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی در ابعاد خرد و کلان محسوب می‌شود. از این رو، مسئولان امر بیش از پیش از پتانسیل رفتاری مصرف‌کنندگان به‌عنوان ابزاری راهبردی برای تحقق اهداف اقلیمی استفاده می‌کنند [1,2].

امروزه حرکت به سمت انرژی‌های پاک نظیر خورشیدی و عبور از سوخت‌های فسیلی، در صدر برنامه‌های توسعه‌ای بسیاری از کشورها قرار دارد؛ برای نمونه، اتحادیه اروپا اهداف مرحله‌بندی شده‌ای را برای کاهش چشمگیر گازهای گلخانه‌ای تا سال ۲۰۵۰ تدوین کرده است. بر طبق گزارش مجمع جهانی اقتصاد در سال ۲۰۲۳، رتبه ایران در بین ۱۲۰ کشور، به لحاظ شاخص گذار انرژی^۲، ۹۲ است. این شاخص بر اساس دو زیرشاخص عملکرد سیستم و آمادگی گذار مورد بررسی قرار می‌گیرد. باید توجه داشت که گذار انرژی تنها یک تغییر فنی در نوع سوخت نیست، بلکه نیازمند تحولی بنیادین در ساختارهای اجتماعی، اقتصادی و تکنولوژیک جامعه است [3,4].

مدل‌های عامل بنیان^۴ نوعی شبیه‌سازی محاسباتی است که به منظور تحلیل و بازنمایی تعاملات پیچیده میان نیروی انسانی، ساختارهای سازمانی و مولفه‌های فناورانه در چارچوب قوانین مشخص، به کار می‌رود. این رویکرد ابزاری کارآمد برای طراحی استراتژی‌های اشاعه‌ی نوآوری در سیستم‌های پیچیده محسوب می‌شود. در همین راستا، «رای و هنری» (۲۰۱۶) با مقایسه مدل‌های سنتی و عامل‌بنیان نشان دادند که در مدل‌های کلاسیک، تقاضای انرژی صرفاً بر پایه داده‌های گذشته و متغیرهای کلان اقتصادی برون‌یابی می‌شود؛ در حالی که واقعیت‌های رفتاری حاکی از آن است که مصرف‌کنندگان همیشه بر اساس عقلانیت محض اقتصادی (آن‌گونه که در مدل‌های کلاسیک فرض می‌شود) عمل نمی‌کنند. در مقابل، مدل‌های عامل‌بنیان با در نظر گرفتن تعاملات اجتماعی و جریان اطلاعات، رفتارها را به صورت درون‌زا و از پایین به بالا^۵ مدل می‌کنند. در این سیستم‌ها، هیچ کنترل مرکزی وجود ندارد و «عامل‌ها» بر اساس قواعد ساده‌ای همچون واکنش به قیمت یا تاثیرپذیری از همسایگان تصمیم می‌گیرند. عمده کاربرد این مدل‌ها در درک نحوه تبدیل انگیزه‌های فردی به رفتارهای جمعی (مانند نرخ پذیرش یک تکنولوژی) در بستر زمان و مکان است [2,3].

گابر و همکاران، در سال ۲۰۱۸، در پژوهش خود، تاثیر استفاده از سیستم‌های پیام‌رسان هوشمند را بر مدیریت مصرف برق خانگی با بهره‌گیری از مدل‌سازی عامل‌بنیان

^۵ Bottom-up

^۲ Energy Transition Index

^۴ Agent-Based Modeling (ABM)

تحلیل کردند. در این ساختار، هشدارهای ارسالی با هدف اصلاح نگرش‌ها، باورها و ارتقای دانش مصرف‌کنندگان طراحی شده‌اند، تا منجر به بهینه‌سازی الگوهای رفتاری شوند. در این مدل، ویژگی‌های هر خانوار (نظیر درآمد، سن، تعداد تجهیزات و الگوی اشتغال) بر اساس توزیع‌های آماری منطبق بر واقعیت تعریف شد. روند مطالعه به این صورت بود که پس از تعیین مصرف پایه در سال اول، دو رویکرد «پیشنهادی» و «ساده‌لوحانه» با هم مقایسه شدند. استراتژی ساده‌لوحانه با ارسال مداوم پیام، به نرخ صرفه‌جویی ۱۳ تا ۱۵ درصد دست یافت، اما منجر به خستگی و کاهش پذیرش سیستم توسط کاربران شد. در مقابل، استراتژی پیشنهادی محققان، با اولویت‌بندی آسایش ساکنین و کاهش تعداد پیام‌های آزاردهنده، به صرفه‌جویی ۷ تا ۱۳ درصدی دست یافت. یافته‌ها نشان داد که رویکرد دوم، علیرغم صرفه‌جویی عددی کمتر، به دلیل حفظ رضایت کاربران و تداوم همراهی آن‌ها، در بلندمدت کارآمدتر و منطقی‌تر است [5].

از منظر علم روان‌شناسی محیطی^۶، مقابله با چالش‌های تغییرات اقلیمی نیازمند تحلیل دقیق فرآیندهای ذهنی و روانی است که بر سبک زندگی سبز و به‌ویژه الگوهای مصرف انرژی تأثیر می‌گذارند. در همین راستا، کاروس و همکاران، در سال ۲۰۲۱، با انجام یک مرور نظام‌مند و روش متاآنالیز^۷ روی پژوهش‌های منتشرشده بین سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۷، به بررسی پیوند میان مؤلفه‌های روان‌شناختی و رفتارهای مرتبط با انرژی پرداختند. معیار انتخاب این پژوهش‌ها، تمرکز آن‌ها بر "تمایل به صرفه‌جویی" یا "انجام رفتارهای بهینه" به عنوان متغیر اصلی بود که در کنار عواملی چون نگرش، ارزش‌های زیست‌محیطی، آگاهی و عواطف سنجیده شده بودند. یافته‌های این فراتحلیل نشان داد که بین نیت و تمایل به صرفه‌جویی با عملکرد واقعی افراد، رابطه مستقیم و تنگاتنگی

وجود دارد؛ این در حالی است که متغیرهایی نظیر سن و جنسیت نقش تعیین‌کننده‌ای در بروز رفتارهای صرفه‌جویانه ایفا نمی‌کنند. همچنین مشخص گردید که ارزش‌های طرفدار محیط‌زیست، آگاهی از پیامدهای ناگوار تغییرات اقلیمی و باورهای مرتبط با آن، رابطه‌ای مثبت و در سطح متوسط با احساسات فردی و رفتارهای مسئولانه در مصرف انرژی دارند. به بیان دیگر، تقویت شناخت و باورهای اقلیمی در کنار درگیر کردن عواطف انسانی، محرک‌های موثری برای ارتقای رفتارهای صرفه‌جویانه محسوب می‌شوند [6].

دالیا استریمیکینه و همکاران، در سال ۲۰۲۰، طی یک مرور نظام‌مند، به واکاوی چالش‌های رفتاری و شکست‌های سیاستی در مسیر مقابله با تغییرات اقلیمی پرداختند و ضمن شناسایی موانع، راهکارهایی را بر پایه روان‌شناسی تصمیم‌گیری (شامل سیاست‌های تنبیهی و تشویقی) برای برون‌رفت از این وضعیت پیشنهاد دادند. محققان با بررسی مقالات پایگاه Web of Science (از اولین آثار در سال ۲۰۰۳ تا سال ۲۰۲۰)، ۸۰ مقاله منتخب را تحلیل کردند. موانع بازدارنده مشارکت داوطلبانه خانوارها در این مطالعه به سه طبقه اصلی تقسیم شد: (۱) اقتصادی: نظیر اولویت‌بخشی به منافع شخصی در مصرف سوخت‌های فسیلی یا هراس از دست رفتن سرمایه؛ (۲) اجتماعی: مانند سبک زندگی، ارزش‌های فردی و تضادهای گروهی؛ (۳) سیاسی: از جمله مقاومت در برابر تغییر به دلیل حفظ منافع گروه‌های خاص. یافته‌ها حاکی از آن است که رفتار خانوارها پیوند عمیقی با درک آن‌ها از خطر، باورهای اقلیمی و تجربیات زیست‌محیطی قبلی دارد. همچنین سه عامل «اجاره‌نشینی»، «فقدان برنامه‌ریزی جامع اقلیمی» و «سیاست‌گذاری‌های بی‌توجه به ریسک‌های زیست‌محیطی»، از جمله مهم‌ترین عوامل کاهش مشارکت‌های مردمی در این حوزه شناسایی شدند [7].

^۷ Meta-Analysis

^۶ Environmental Psychology

در سال ۱۴۰۲، نشاط و همکاران، با هدف بررسی تأثیر مشوق‌های مالی دولت، به‌ویژه تعرفه‌ی خرید تضمینی و یارانه‌ی سرمایه‌ای، بر افزایش نفوذ فناوری برق خورشیدی در بخش خانگی ایران، از روش پویایی‌شناسی سیستم‌ها استفاده کردند. آنان با طراحی نمودارهای علی-معلولی و مدل جریان-انباشت، پس از اعتبارسنجی مدل با استفاده از داده‌های تاریخی و انجام تحلیل حساسیت، چهار سناریو را طی یک دوره‌ی بیست‌ساله شبیه‌سازی کردند. این سناریوها شامل سناریوی پایه با تعرفه‌ی ثابت هشت هزار ریال به‌ازای هر کیلووات‌ساعت و بدون یارانه، سناریوی اول با تعرفه‌ی ده هزار ریال و بدون یارانه، سناریوی دوم با تعرفه‌ی شش هزار ریال و یارانه‌ی ده‌درصدی، و سناریوی سوم با تعرفه‌ی چهار هزار ریال و یارانه‌ی بیست‌درصدی بود. نتایج نشان داد که سناریوی پایه، اگرچه کمترین هزینه‌ی دولتی و ظرفیت نصب‌شده را به همراه دارد، از نظر توسعه‌ی فناوری خورشیدی عملکرد محدودی نشان می‌دهد. در مقابل، ترکیب یارانه‌ی بالاتر و تعرفه‌ی پایین‌تر، موجب افزایش چشمگیر ظرفیت تجمعی نصب‌شده، کاهش وابستگی خانوارها به برق شبکه و بهبود شاخص‌های اقتصادی سیاست می‌شود؛ از این‌رو، به‌عنوان گزینه‌ی مناسب‌تر برای حمایت از توسعه‌ی برق خورشیدی خانگی پیشنهاد شده است^[۸].

در کنار این یافته‌ها، آمارهای شرکت گاز استان تهران نشان می‌دهد که در سال ۱۴۰۱، بخش خانگی ۴۶ درصد از کل مصرف گاز استان را به خود اختصاص داده است؛ این رقم در فصول سرد سال ۱۴۰۰ تا مرز ۷۰ درصد نیز پیش رفته که نشان‌دهنده فشار بالای این بخش بر شبکه انرژی است.

مرور پیشینه نشان می‌دهد که پژوهش‌های انجام‌شده، هر یک بر بخشی از مسئله مصرف انرژی تمرکز داشته‌اند. برخی پژوهش‌ها با رویکردهای کلان‌نگر به تحلیل مصرف انرژی

پرداخته‌اند، در حالی که مطالعات عامل‌بنیان نیز عمدتاً بر جنبه‌هایی محدود از رفتار مصرف‌کنندگان، مانند اثر پیام‌رسانی یا پذیرش یک فناوری خاص، متمرکز بوده‌اند. همچنین، بخش قابل توجهی از مطالعات مرور شده به مصرف برق یا پذیرش فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر^[۸,۵] اختصاص داشته و رفتار مصرف گاز طبیعی در بخش خانگی کمتر مورد توجه قرار گرفته است؛ به طور خاص، پیوند هم‌زمان میان مدل‌سازی مصرف پایه خانوار، ویژگی‌های اجتماعی-رفتاری و پویایی پذیرش فناوری و تغییر فرهنگی کمتر بررسی شده است. پژوهش حاضر با تمرکز بر این خلأ، مصرف پایه خانوار و پویایی‌های رفتاری ناشی از پذیرش فناوری و تغییر فرهنگ مصرف را در یک چارچوب عامل‌بنیان یکپارچه مدل‌سازی می‌کند و با تکیه بر داده‌های میدانی واقعی از خانوارهای یک منطقه شهری در ایران، امکان بررسی هم‌زمان ناهمگنی خانوارها و اثرات اجتماعی، رسانه‌ای و اقتصادی بر رفتار مصرف گاز طبیعی را فراهم می‌سازد.

در این پژوهش، با در نظر گرفتن متغیرهای اجتماعی-رفتاری شامل سطح تحصیلات، درآمد، نگرش محیط‌زیستی، نوع مالکیت، نوع محل سکونت و تعداد اعضای خانواده، به سؤال‌های زیر پاسخ داده می‌شود:

- متغیرهای اجتماعی-رفتاری چه سهمی در میزان مصرف گاز دارند؟
- محرک‌های بیرونی نظیر قیمت‌گذاری و جریان‌های رسانه‌ای چگونه الگوی مصرف را تغییر می‌دهند؟
- تعاملات محلی و تعاملات همسایگی^۸ تا چه حد بر مدیریت تقاضا موثرند؟

^۸ Diffusion Rate

- نقطه‌ی بهینه برای تنظیم قیمت، قدرت رسانه و اثرات جمعی کجاست؟

۲. مدل‌سازی

در این پژوهش، پویایی‌های رفتاری در سطح جامعه از طریق تلفیق رویکرد شبیه‌سازی عامل‌بنیان و تئوری‌های جامعه‌شناختی مورد بررسی قرار گرفت. در این مدل‌سازی هر خانوار به عنوان یک عامل^۹ در نظر گرفته می‌شود که ویژگی‌های متمایزی همچون سطح تحصیلات، میزان درآمد، گرایش‌های زیست‌محیطی، وضعیت مالکیت، نوع مسکن و بُعد خانوار را در بر می‌گیرد؛ این داده‌ها از طریق ابزار پرسشنامه گردآوری شد. روایی^{۱۰} ابزار با نظر خبرگان و پایایی^{۱۱} آن با محاسبه ضریب آلفای کرونباخ (۰.۷۴) برای متغیر نگرش محیط‌زیستی) مورد تأیید قرار گرفت. برای کاهش خطاهای احتمالی ناشی از سوگیری پاسخ‌دهندگان و پاسخ‌های غیرواقعی، پرسشنامه به صورت ناشناس اجرا شد و به پاسخ‌دهندگان اطمینان داده شد که اطلاعات کاملاً محرمانه باقی می‌ماند. همچنین پرسش‌های مربوط به متغیرهای جمعیت‌شناختی (درآمد، مالکیت و تعداد اعضای خانوار) به صورت بازه‌ای و چندگزینه‌ای طراحی شدند تا پاسخ‌دهی دقیق‌تر و آسان‌تر باشد. پرسشنامه‌های ناقص یا دارای پاسخ‌های متناقض نیز در مرحله پاک‌سازی داده‌ها حذف گردیدند. با وجود این اقدامات، محدودیت‌های ذاتی داده‌های خوداظهاری همچنان وجود دارد.

در ادامه، پس از تعریف عوامل و ویژگی‌های آن‌ها، فرایند مدل‌سازی در دو گام اصلی دنبال شد. در گام نخست، با استفاده از داده‌های گردآوری‌شده و بهره‌گیری از مدل‌سازی

معادلات ساختاری و الگوریتم ژنتیک، ساختار علی و مفهومی مصرف گاز طبیعی طراحی و بهینه‌سازی گردید. این بخش مبنای مدل‌سازی مصرف گاز خانوار را تشکیل می‌دهد. در گام دوم، با توسعه‌ی رویکرد عامل‌بنیان، پویایی‌های اجتماعی و فرهنگی مرتبط با رفتار مصرفی در قالب دو سناریوی کلیدی (نفوذ فناوری‌های نوین و گسترش فرهنگ صرفه‌جویی) شبیه‌سازی شد. به این ترتیب، مدل نهایی توانست علاوه بر تبیین الگوی مصرف گاز، تغییرات محتمل ناشی از تحولات اجتماعی و فناورانه را نیز بازتاب دهد.

۳. مدل‌سازی مصرف گاز

در این پژوهش، مصرف گاز خانوار به عنوان یک متغیر پنهان در نظر گرفته شد که تحت تأثیر مجموعه‌ای از ویژگی‌ها قرار دارد. مدل‌سازی متغیر پنهان^{۱۲} امروزه یکی از روش‌های اصلی در تحلیل داده‌های پیچیده و چند متغیره است. این روش اگرچه ریشه در روان‌شناسی و علوم اجتماعی دارد، اما اکنون در تمامی حوزه‌های علمی جایگاه ویژه‌ای یافته و به عنوان شاخه‌ای کلیدی در آمار و هوش مصنوعی، بر حل مسائل پیش‌بینی ساختاریافته^{۱۳} تمرکز دارد. توانمندی این مدل‌ها در شناسایی الگوهای نامشهود داده‌ها، امکان مدیریت عدم قطعیت‌های دنیای واقعی و ارائه پیش‌بینی‌های دقیق را فراهم می‌سازد. رویکرد متغیر پنهان^{۱۴} یک زیرگروه مهم در آمار و هوش مصنوعی است که بر ارتباط آن در مسائل پیش‌بینی ساختاریافته تأکید می‌کند. بهره‌گیری از این متغیرها در تخمین میزان مصرف گاز، ضمن ارتقای استحکام مدل، باعث می‌شود نتایج به دست آمده انطباق بیشتری با

^{۱۲} Structured Prediction Problem

^{۱۳} Latent Variable Approach

^۹ Agent

^{۱۰} Reliability

^{۱۱} Validity

^{۱۲} Latent Variable Modeling (LV)

رفتارهای واقعی مصرف‌کنندگان داشته باشد. با این حال، علی‌رغم توانمندی بالای مدل‌های متغیر پنهان، در بسیاری از پژوهش‌های کاربردی همچنان از فرم‌های ساده رگرسیونی برای پیاده‌سازی این مفاهیم استفاده می‌شود [9,10].

در این رویکرد، مصرف گاز فراتر از یک شاخص ساده و مشهود، به عنوان یک متغیر پنهان قلمداد می‌شود که برآیند تعاملات پیچیده عوامل اقتصادی و اجتماعی در سطح خانوار است. جهت تبیین این ارتباط، از یک ساختار شبه‌رگرسیونی بهره گرفته شده که ضرایب و وزن‌های آن توسط الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده‌اند. مطالعات پیشین (مثل [11]) نشان داده‌اند که در مسائل با متغیرهای اجتماعی-اقتصادی ناهمگون، روش‌های رگرسیونی متداول می‌توانند نسبت به روش‌های انعطاف‌پذیر و غیرخطی عملکرد ضعیف‌تری داشته باشند. از این رو، از الگوریتم ژنتیک به عنوان یک روش بهینه‌سازی فراابتکاری استفاده شده است که با جست‌وجوی همزمان مجموعه‌ای از مقادیر وزن‌ها، امکان شناسایی ترکیب بهینه متغیرهای مؤثر بر مصرف گاز را فراهم می‌کند. مزیت اصلی این متدولوژی در این است که بدون نیاز به پیش‌فرض‌های صلب و محدودکننده، امکان شناسایی پیوندهای پیچیده و مدل‌سازی روابط غیرخطی میان متغیرهای مؤثر بر مصرف را فراهم می‌آورد.

لازم به ذکر است که مقایسه سیستماتیک عملکرد الگوریتم ژنتیک با سایر روش‌های فراابتکاری نظیر بهینه‌سازی ازدحام ذرات^{۱۵} یا شبیه‌سازی تبرید^{۱۶}، خارج از محدوده این پژوهش بوده و به عنوان جهت پژوهش آتی پیشنهاد می‌شود. انتخاب الگوریتم ژنتیک در این پژوهش بر پایه کاربرد گسترده و اثبات‌شده آن در مسائل مشابه بهینه‌سازی وزن، سادگی

نسبی در تنظیم پارامترها، و تناسب آن با حجم محدود داده‌های میدانی در دسترس صورت گرفت. با توجه به آنکه تمرکز اصلی این پژوهش بر تلفیق روش‌های ساختاری و رفتاری در قالب یک چارچوب یکپارچه بوده است، مقایسه گسترده و آزمایشی میان چندین الگوریتم فراابتکاری در این مرحله در دستور کار قرار نگرفت. معادله زیر برای پیش‌بینی مصرف هر خانوار در نظر گرفته شد:

$$gas = w_1 * I + w_2 * H + w_3 * E + w_4 * B + w_5 * R + w_6 * F \quad (1)$$

که در آن I، H، E، B، R و F، به ترتیب درآمد، نوع مالکیت منزل، سطح تحصیلات، نگرش محیط‌زیستی، نوع محل سکونت و تعداد اعضای خانوار است. در این فرمول برای درآمد خانوار، درآمد ماهانه کل خانوار، و برای تحصیلات بالاترین سطح تحصیلات در بین افراد بالای ۱۸ سال خانواده به عنوان متغیر در نظر گرفته شده است.

سپس، به منظور تخمین ضرایب مدل، از الگوریتم ژنتیک پیوسته^{۱۷} به عنوان یک روش بهینه‌سازی فراابتکاری استفاده شد. هر کروموزوم شامل ژن‌های پیوسته‌ی وزن‌های W1 تا W6 در رابطه (۱) هستند. پس از نرمال‌سازی داده‌ها به روش حداقل-حداکثر^{۱۸} و توسعه‌ی الگوریتم، تابع برازش بر اساس خطای جذر میانگین مربعات^{۱۹} تعریف شد. همچنین برای تقاطع از تقاطع تک نقطه‌ای استفاده شده است. هدف از الگوریتم ژنتیک کمینه‌کردن خطای مصرف گاز محاسبه‌شده از رابطه (۱) نسبت به مقادیر واقعی، است. میزان بهینه پارامترهای الگوریتم ژنتیک به روش دستی^{۲۰} و با ارزیابی

^{۱۸} Min-Max Scalar

^{۱۹} RMSE

^{۲۰} Manual

^{۱۵} Particle Swarm Optimization

^{۱۶} Simulated Annealing

^{۱۷} Continuous Genetic Algorithm

مقایسه روند همگرایی و مقادیر میانگین خطا مشخص شد. جدول ۱ مقدار این پارامترها را نشان می‌دهد.

جدول ۱؛ پارامترهای الگوریتم ژنتیک

Parameter	Value
Population	40
Number of generations	80
Mutation rate	0.5
Crossover rate	0.7
Tournament size in selection	4

۴. مدل‌سازی تغییرات در اثر پذیرش فرهنگ و تکنولوژی جدید

مرور نظریه‌های رفتاری مختلف نشان می‌دهد که انسان‌ها

در پذیرش فرهنگ و فناوری تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل روان‌شناختی، اجتماعی و ساختاری قرار دارد. نظریه رفتار برنامه‌ریزی‌شده^{۲۱} نشان می‌دهد که هنجارهای ذهنی، کنترل رفتاری ادراک‌شده و نگرش‌ها می‌توانند به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر نیت و رفتار خرید محصولات کارآمد انرژی اثرگذار باشند، هرچند که نتایج در جوامع مختلف به دلیل تفاوت‌های فرهنگی متفاوت است [12-14].

در این میان، مدل باس^{۲۲} به‌عنوان یکی از پرکاربردترین چارچوب‌های کمی برای پیش‌بینی پذیرش فناوری مطرح است. این مدل بیان می‌کند که میزان پذیرش به دو منبع عمده وابسته است: تأثیرات بیرونی (تبلیغات و نوآوری) که با ضریب p نمایش داده می‌شود و تأثیرات درونی (گفت‌وگوی دهان به دهان و اثرات اجتماعی) که با ضریب q نشان داده

می‌شود. رابطه اصلی بین پارامترهای این مدل به‌صورت زیر است:

$$\frac{dF(t)}{dt} = (p + qF(t))(1 - F(t)) \quad (2)$$

که در آن $F(t)$ نسبت افرادی است که تا زمان t نوآوری را پذیرفته‌اند. معمولاً مقدار پارامتر q بزرگ‌تر از p است، که نشان‌دهنده نقش قوی‌تر تعاملات اجتماعی نسبت به تبلیغات در فرآیند پذیرش است. در نسخه‌های مبتنی بر عامل این مدل، احتمال تغییر وضعیت $C(t)$ در هر گام زمانی^{۲۳} (معادل یک ماه)، به‌صورت زیر تعریف می‌شود [15-18]:

$$C_{(t)} = p + q * F(t) \quad (3)$$

در این پژوهش، چند فرض ساده‌ساز برای شبیه‌سازی به شرح زیر در نظر گرفته شد تا تمرکز بر رفتار خانوارها حفظ شود:

- کاهش مصرف گاز در صورت پذیرش فناوری جدید، حدود ۱۵٪ و در صورت ایجاد تغییر فرهنگی، ۱۰٪ فرض شد.
- ویژگی‌های خانوار شامل درآمد، تحصیلات، مالکیت، نگرش محیط‌زیستی و تعداد اعضای خانواده در طول دوره شبیه‌سازی ثابت هستند.
- ساختار تعاملات اجتماعی در این پژوهش با استفاده از شبکه جهان کوچک^{۲۴} مدل شد؛ این نوع شبکه که نخستین‌بار توسط Watts و

^{۲۳} Step

^{۲۴} Small World

^{۲۱} Theory of Planned Behavior

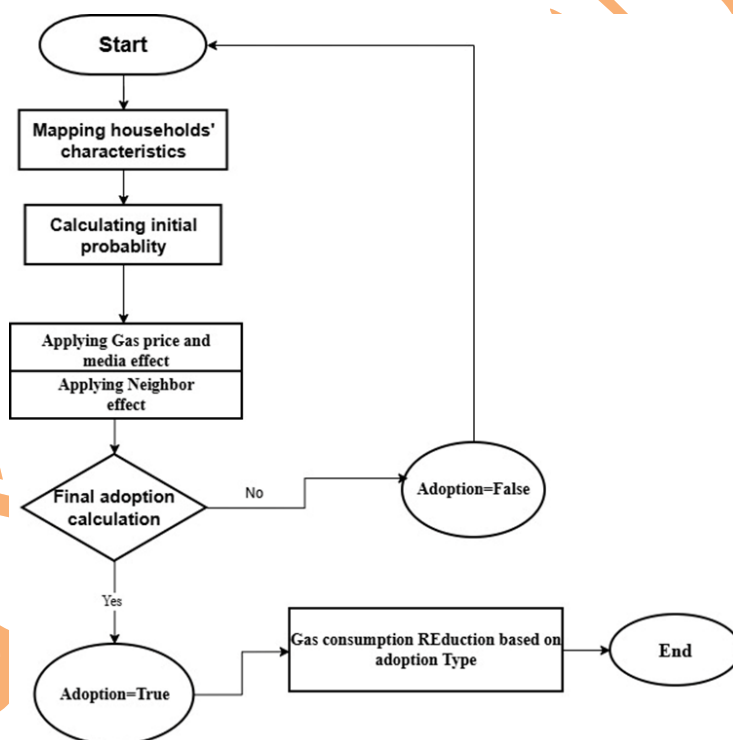
^{۲۲} Bass Model

Strogatz معرفی شد، نشان می‌دهد چگونه افراد در جامعه با وجود تعداد زیاد گره‌ها در فاصله‌های کوتاه به هم متصل‌اند. این ویژگی باعث می‌شود سرایت رفتارهای جمعی، مانند پذیرش فناوری یا تغییرات فرهنگی، سریع و کارآمد صورت گیرد^[19].

مسکن، احتمال بیشتری برای پذیرش تکنولوژی و فرهنگ جدید دارند و نگرش‌های محیط‌زیستی و تعداد اعضای خانواده نیز نقش تقویتی ایفا می‌کنند. به منظور پیاده‌سازی فرض‌های مدل و تاثیر ویژگی‌های هر عامل بر پذیرش تکنولوژی و فرهنگ از رویکرد حد آستانه استفاده شد و مقادیر آستانه بر اساس توزیع داده‌های پیمایش انتخاب گردید^[23,24].

برای طراحی تابع تصمیم‌گیری عامل‌ها، از ترکیبی از ویژگی‌های فردی و اثرات اجتماعی استفاده شده است. به‌طوری‌که خانوارهای با درآمد و تحصیلات بالاتر و مالکیت

در شکل ۱ فلوچارت فرآیند تشریح‌شده و پیاده‌سازی شده در این پژوهش برای پذیرش تکنولوژی و فرهنگ جدید در خانوار آمده است.



شکل ۱؛ فلوچارت پذیرش تکنولوژی و فرهنگ خانوار

در این مدل‌سازی، تأثیر رسانه p و قیمت گاز^{۲۵} به‌عنوان عوامل محیطی در نظر گرفته شده‌اند. قیمت گاز با روش min-max نرمال‌سازی شد و بر اساس داده‌های شرکت گاز تهران در سال ۱۴۰۱ انتخاب شد. مقادیر این متغیر در هر شش گام زمانی به‌روزرسانی می‌شود تا مدل بتواند به قیمت

بهینه دست یابد و مدت زمان شبیه‌سازی کاهش مصرف گاز پس از اعمال مقادیر بهینه شامل ۳۰ گام زمانی (دو سال و نیم پس از سال ۱۴۰۱) است.

۵. تحلیل حساسیت

^{۲۵} Gas_Price

تعداد بیشتری از افراد پذیرنده (حدود ۱۰ نفر) برای اقناع فرد است. مقدار معمول p برای ۰.۰۱ و برای q ، ۰.۳ است [26-28].

در ابتدا، بازه‌های اولیه برای پارامتر p در محدوده ۰.۰۱ تا ۰.۰۳ و برای پارامتر q در محدوده ۰.۲ تا ۰.۵ در نظر گرفته شد؛ اما به دلیل عدم تغییرات محسوس در خروجی‌ها و بی‌معنا بودن نمودارهای تحلیل حساسیت در این بازه‌ها، دامنه تغییرات تا حد ۱.۵ گسترش یافت تا مدل به مرحله اشباع برسد. سپس از طریق یک فرآیند تقلیلی و گام‌به‌گام، مقادیر پارامترها به منظور انطباق با واقعیت‌های رفتاری منطقه ۲ تهران اصلاح شدند. در نهایت، با تکرار آزمون‌ها و تحلیل واکنش‌های مدل، بازه‌های بهینه به شرح جدول ۲ تثبیت گردید.

جدول ۲؛ بازه‌های تحلیل حساسیت پارامترهای جامعه‌ی نمونه

variable	interval
p	(0.1-0.85)
q	(0.5-1)
Gas price (toman)	(1000-3500)

در ادامه ی این تحقیق، به کمک روش تحلیل حساسیت تک‌عاملی^{۲۸} در این بازه‌ها، مقادیر بهینه برای هر متغیر به دست خواهند آمد.

۶. نتایج

یافته‌های آماری، نشان‌دهنده شکاف عمیق الگوی مصرف میان مناطق مرفه و کمتر برخوردار جامعه است؛ به گونه‌ای که نزدیک به ۸۹ درصد از مشترکان پرمصرف در نواحی شمالی تهران، و تنها ۱۱ درصد در نیمه جنوبی پایتخت سکونت دارند. بر اساس گزارش‌های شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت،

فرآیند مدل‌سازی رفتار ساکنین (شکل ۱) با چالش جدی عدم قطعیت در سطوح مختلف روبه‌رو است. از سوگیری‌های احتمالی در گردآوری داده‌ها تا خطاهای ناشی از انتخاب متدولوژی و نحوه تلفیق مدل با ابزارهای شبیه‌ساز، همگی می‌توانند دقت نهایی خروجی را تحت‌الشعاع قرار دهند. لذا به منظور مهار و تقلیل این انحرافات، استفاده از تکنیک‌های آماری پیشرفته نظیر تحلیل عدم قطعیت^{۲۶} و تحلیل حساسیت^{۲۷} بسیار مؤثر است [25].

بر پایه ساختار مدل رفتاری (شکل ۱)، سه متغیر راهبردی برای انجام تحلیل حساسیت برگزیده شده‌اند که موتور محرک پذیرش فناوری‌های نوین و تغییرات فرهنگی در حوزه انرژی هستند. این متغیرها شامل قیمت گاز به‌عنوان یکی از عوامل اقتصادی مؤثر بر رفتار مصرفی خانوار و دو پارامتر رفتاری p و q هستند که به ترتیب نمایانگر اثر خارجی و اثر داخلی در فرآیند نفوذ فناوری و فرهنگ می‌باشند. پارامتر p نشان‌دهنده میزان تأثیرپذیری خانوار از عوامل بیرونی نظیر سیاست‌های دولتی، تبلیغات، یا فضای رسانه‌ای است، در حالی که پارامتر q بازتاب‌دهنده نقش تعاملات اجتماعی، توصیه‌های هم‌تایان، و تأثیرات درون‌گروهی در پذیرش فناوری است.

در ادبیات تحقیق، معمولاً ضریب نوآوری p ، بین ۰.۰۱ تا ۰.۰۵ (با میانگین ۰.۰۳۵) و ضریب تقلید q بین ۰.۰۱ تا ۱.۰ (با میانگین ۰.۴) تعریف می‌شود. ضریب q در واقع احتمال تغییر رفتار یک فرد پس از مواجهه با پذیرندگان نوآوری را نشان می‌دهد؛ به طوری که مقادیر بالاتر q نشان‌دهنده سرعت بالای سرایت اجتماعی است. به عنوان مثال، در حالی که q برابر با ۱ به معنای پذیرش قطعی پس از اولین مواجهه است، مقدار ۰.۱ حاکی از نیاز به تعامل با

^{۲۸} One-Factor-at-a-Time (OFAT)

^{۲۶} Uncertainty Analysis

^{۲۷} Sensitivity Analysis

Education level	0.0039
Environmental belief	-0.02746
Type of resident	0.66174
Number of family member	0.00678

در طی فرآیند بهینه‌سازی، مقادیر بهینه وزن‌های رابطه (۱) با استفاده از داده‌های سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۰ محاسبه شد. همان‌طور که در نمودار روند الگوریتم (شکل ۲) مشاهده می‌شود، مقدار RMSE در طول فرآیند آموزش از حدود ۴۸ درصد در نسل اول به کمتر از ۶ درصد در نسل ۸۰ کاهش یافت و پس از نسل ۷۰ تغییرات آن بسیار ناچیز بود. پس از تعیین وزن‌های بهینه، این وزن‌ها بدون تغییر برای تخمین مصرف گاز خانوارها در سال ۱۴۰۱ به کار گرفته شدند. بنابراین، مقادیر واقعی مصرف گاز سال ۱۴۰۱ به‌عنوان داده‌های اعتبارسنجی مستقل مورد استفاده قرار گرفتند و با مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل مقایسه شدند. مقدار RMSE مدل برای داده‌های آموزشی ۵٫۵۹ درصد و برای داده‌های اعتبارسنجی سال ۱۴۰۱ برابر با ۵٫۴۴ درصد به دست آمد. نزدیک بودن خطای آموزش و اعتبارسنجی نشان می‌دهد که مدل علاوه بر برازش مناسب داده‌های آموزشی، توانایی مناسبی در بازتولید الگوی مصرف گاز در داده‌های خارج از دوره آموزش دارد.

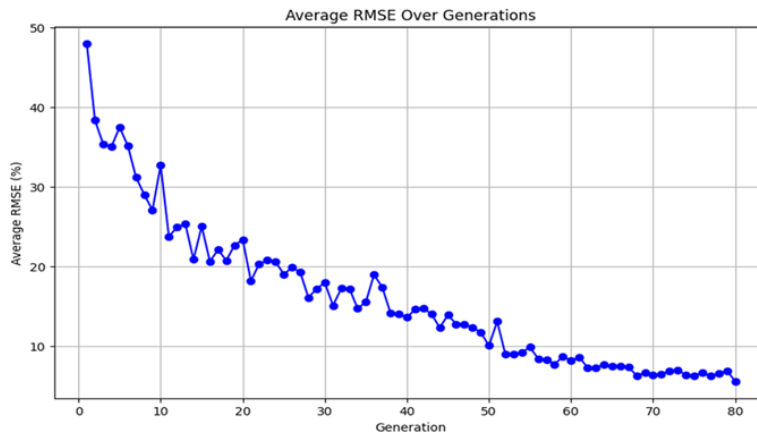
منطقه ۲ شهرداری از نظر سرانه مصرف گاز به ازای هر مترمربع، رتبه نخست را در کل شهر داراست. نکته حائز اهمیت این است که حتی با تعدیل متغیر مترآژ، همچنان سرانه مصرف در مناطق مرفه بالاتر از سایر نقاط است. به طور مشخص، سه منطقه ۱، ۲ و ۳ که گران‌ترین بافت مسکونی را دارند، به تنهایی میزبان ۶۶ تا ۸۰ درصد از جمعیت پرمصرف‌ترین مشترکان خانگی تهران هستند [29].

منطقه ۲ شهرداری تهران با مساحتی نزدیک به ۴۷ کیلومترمربع، از ۹ ناحیه و ۲۱ محله تشکیل شده است. مطابق با آخرین نتایج سرشماری نفوس و مسکن در سال ۱۳۹۵، این منطقه جمعیتی بالغ بر ۷۰۱,۳۰۳ نفر را در قالب ۲۳۹,۷۴۲ خانوار در خود جای داده است که از این میان، ۳۴۳,۰۳۳ نفر مرد و ۳۵۸,۲۷۰ نفر زن هستند [30,31].

در جدول ۳، نتایج بهینه‌سازی ضرایب رابطه (۱) با استفاده از الگوریتم ژنتیک (بخش ۳)، آورده شده است. در این بهینه‌سازی، هدف اصلی شبیه‌سازی مصرف گاز خانوار در جهت بررسی مصرف گاز حالت پایه خانوار بوده است.

جدول ۳؛ مقادیر بهینه وزن‌های معادله - ۱ به دست آمده از داده‌های سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۰

Variable	Optimal weight
income	-0.00233
Type of ownership	-0.37377



شکل ۲؛ نمودار خطای RMSE بین داده‌های محاسبه شده و واقعی بر حسب نسل ها در طی روند آموزش الگوریتم ژنتیک

فناوری‌های بهینه‌تر با مصرف آگاهانه‌تر در خانوارهای پردرآمد باشد.

با بررسی نتایج وزن‌های بهینه‌ی جدول ۳، نتایج زیر حاصل می‌شود:

- سایر متغیرها مانند تعداد اعضای خانواده و سطح تحصیلات تأثیر ضعیف و حاشیه‌ای بر مصرف گاز دارند. در مجموع، متغیرهای جمعیت‌شناختی به ویژه نوع محل سکونت و نوع مالکیت بیشترین اهمیت را در مصرف گاز دارند و نگرش محیط زیستی نیز نقش مهمی در کاهش مصرف ایفا می‌کند. درحالی‌که متغیرهای اقتصادی و تحصیلی اثر کمتری داشته که احتمالاً به دلیل ساختار قیمت‌گذاری ارزان گاز در ایران است.

- نوع محل سکونت بیشترین وزن مثبت را بر مصرف گاز دارد. این وزن مثبت، احتمالاً به دلیل نیاز بیشتر ساختمان‌های بزرگ‌تر و ویلایی به گرمایش و سرمایش است. - پس از آن، «نوع مالکیت» با وزن منفی قابل توجه است؛ مستأجران به دلیل محدودیت در بهبود عایق‌بندی و تعمیرات مصرف گاز بیشتری نسبت به مالکان دارند.

برای قابل اطمینان بودن نتایج، داده‌ها علاوه بر الگوریتم ژنتیک، با مدل‌های رگرسیون خطی و شبکه عصبی هم اجرا شدند و نتیجه در جدول زیر آورده شده است:

- نگرش محیط‌زیستی وزن منفی بر مصرف گاز دارد و نشان می‌دهد خانوارهای با نگرش مثبت به محیط زیست، مصرف بهینه‌تری دارند. همچنین درآمد با وزن منفی، کاهش مصرف گاز را نشان می‌دهد که می‌تواند ناشی از استفاده از

جدول ۴؛ نتایج مقایسه مدل پیشنهادی با مدل‌های رگرسیون خطی و شبکه عصبی

Model	Modelling approach	Train RMSE	Test RMSE
Linear Regression	Conventional statistical model	3.43%	3.51%
Neural Network	Machine-learning model	6.28%	6.53%

Proposed model	GA-based behavioural model	5.59%	5.44%
----------------	----------------------------	-------	-------

می‌سازد؛ قابلیت‌هایی که مدل‌های مقایسه‌ای به‌تنهایی از ارائه آن ناتوانند.

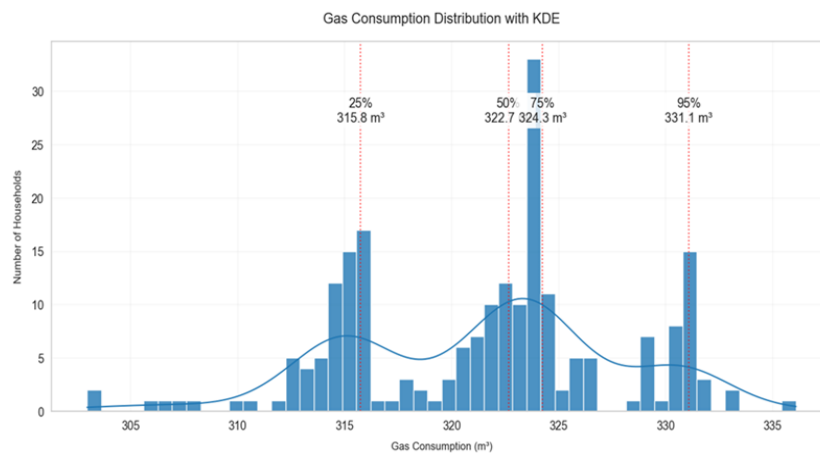
توزیع مصرف گاز خانوارها در منطقه ۲ شهرداری تهران، بر اساس خروجی مدل عامل‌محور با ضرایب بهینه‌شده توسط الگوریتم ژنتیک، در شکل ۳ نشان داده شده است. این توزیع، که بر پایه ترکیب وزن‌دار متغیرهای جمعیت‌شناختی و رفتاری هر خانوار (شامل درآمد، نوع مسکن، مالکیت، نگرش محیطی و غیره) محاسبه شده، بازه‌ای بین ۳۰۵ تا ۳۳۵ مترمکعب را پوشش می‌دهد. بیشترین تمرکز خانوارها در بازه ۳۱۵ تا ۳۲۵ مترمکعب (به‌ویژه در نزدیکی ۳۲۲-۳۲۵ مترمکعب) مشاهده می‌شود. وجود چندین قله در توزیع فراوانی^{۳۰} گواه بر آن است که مدل موفق به بازتولید گروه‌های متمایزی از خانوارها با الگوهای مصرفی متفاوت شده است. همچنین، حضور خانوارهایی با مصرف بسیار پایین (زیر ۳۱۰ مترمکعب) و بسیار بالا (بالای ۳۳۰ مترمکعب) نشان می‌دهد که تنوع در ویژگی‌های عامل‌ها (به‌ویژه نوع مسکن و نگرش محیط‌زیستی) به‌خوبی در خروجی مدل منعکس شده است. این ناهمگونی در مصرف، که مستقیماً از ساختار عامل‌محور و وزن‌های بهینه‌شده ناشی می‌شود، توانایی مدل در بازتاب پیچیدگی‌های رفتار مصرفی جامعه واقعی را نشان می‌دهد و زمینه را برای تحلیل تأثیر تغییرات فرهنگی یا نفوذ فناوری فراهم می‌کند.

لازم به ذکر است که داده‌های مورد استفاده در دو مدل دیگر نیز دقیقاً به همان صورتی هستند که در بخش ۳ و مدل‌سازی مصرف گاز توضیح داده شد. نتایج نشان می‌دهد که مدل رگرسیون خطی کمترین میزان خطا را در تخمین مصرف پایه داراست؛ این یافته بیانگر آن است که رابطه بین ویژگی‌های جمعیت‌شناختی مورد استفاده و سطح تجمیعی مصرف گاز، ماهیتی نسبتاً ساده و نزدیک به خطی دارد. در مقابل، مدل شبکه عصبی با وجود پیچیدگی و انعطاف‌پذیری بیشتر، عملکرد ضعیف‌تری نسبت به هر دو مدل دیگر نشان داد که احتمالاً ناشی از محدودیت حجم نمونه (۲۱۴ داده) و ناتوانی این مدل در بهره‌گیری کامل از ظرفیت خود بدون بیش‌برازش است. همچنین، در شبکه عصبی وزن‌ها بین لایه‌های مختلف پخش می‌شوند و برخلاف مدل رگرسیون خطی و الگوریتم ژنتیک، امکان استخراج یک ضریب مشخص و قابل تفسیر برای هر ویژگی ورودی وجود ندارد؛ این موضوع تفسیرپذیری نتایج را محدود می‌سازد.

با این حال، مزیت اصلی چارچوب پیشنهادی را نباید صرفاً در دقت نقطه‌ای تخمین مصرف پایه جست‌وجو کرد. برخلاف مدل‌های رگرسیونی و شبکه عصبی که صرفاً یک تخمین ایستا^{۲۹} از مصرف ارائه می‌دهند، مدل پیشنهادی این تخمین را به‌عنوان لایه پایه یک چارچوب پویا و عامل‌بنیان به‌کار می‌گیرد که قابلیت شبیه‌سازی اثر پذیرش فناوری، تغییر فرهنگ مصرف، قیمت‌گذاری و تعاملات اجتماعی را نیز فراهم

^{۳۰} Multimodality

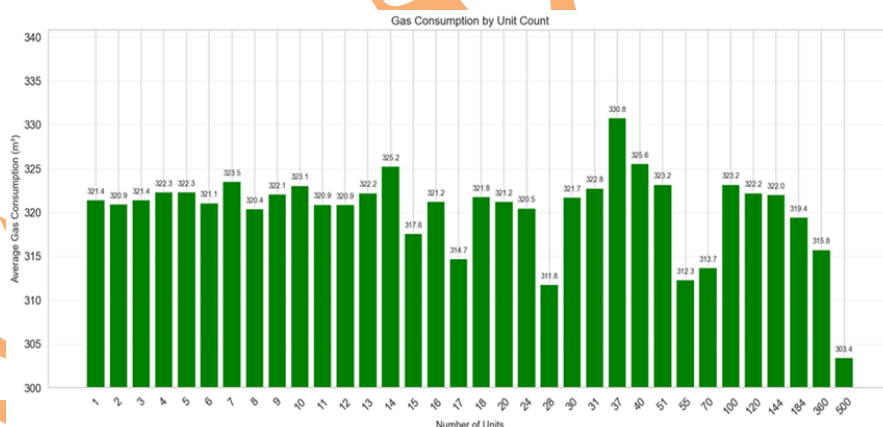
^{۲۹} Static



شکل ۳؛ نمودار هیستوگرام برای مصرف گاز واقعی

بسیاری از مجتمع‌های مسکونی بزرگ دارند. در مقابل، ساختمان‌های بسیار بزرگ (مانند مجتمع‌های ۵۰۰ واحدی) با میانگین مصرف ۳۰۳.۴ مترمکعب به ازای هر واحد، پایین‌ترین میزان مصرف را نشان می‌دهند. این الگو می‌تواند حاکی از کارایی انرژی بالاتر، سیستم‌های گرمایشی متمرکز در برج‌ها و مجتمع‌های مسکونی یا فرهنگ مصرف متفاوت باشد.

برای بررسی اثر مشخصات فیزیکی مسکن در شکل ۴، میانگین مصرف گاز به ازای هر واحد در ساختمان‌هایی با تعداد واحد متفاوت نشان داده است. این شکل، عدم یکنواختی مصرف گاز به نوع واحد مسکونی خانوار را نشان می‌دهد. به طور مشخص، واحدهای مستقل (ویلاها) و ساختمان‌های کم‌واحد (۱، ۲ و ۵ واحدی) با میانگین مصرف حدود ۳۲۱-۳۲۲ مترمکعب، مصرف بالاتری را نسبت به



شکل ۴؛ نمودار مصرف گاز واقعی خانوار بر حسب تعداد واحد محل سکونت

در الگوی مصرف تحلیل شود. در این مرحله با اعمال پارامترهای اثر رسانه، تاثیر همسایگی و قیمت گاز در مدل باس، رفتار پذیرش فناوری و تغییر فرهنگی در سطح خانوارها مدل‌سازی شد. در این مدل‌سازی، با توجه به عدم دسترسی به مقادیر دقیق این پارامترها، از تحلیل حساسیت تک‌عاملی

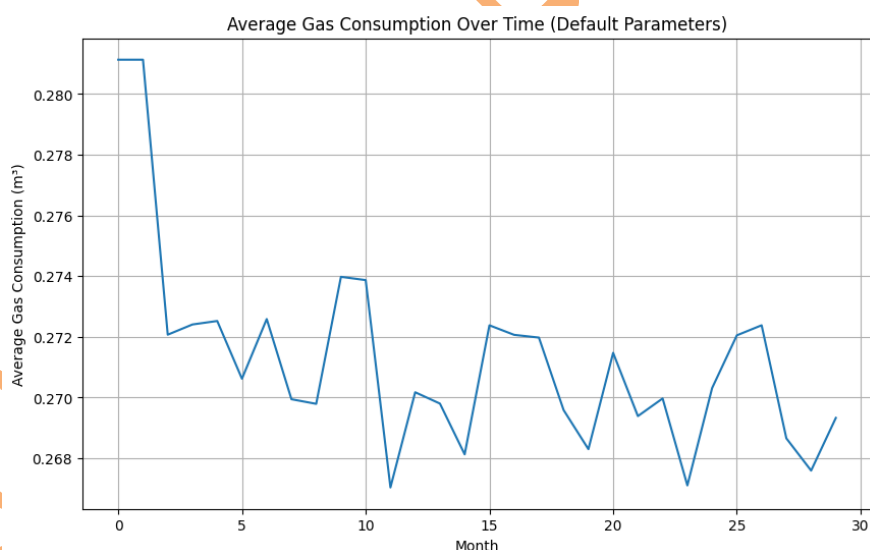
پس از مدل‌سازی مصرف گاز خانوارهای منطقه ۲ شهرداری تهران با استفاده از ویژگی‌های جمعیت‌شناختی و الگوریتم ژنتیک برای تعیین وزن متغیرها، در ادامه، بخش رفتاری مدل توسعه داده شد تا تأثیر عوامل اجتماعی و روان‌شناختی بر پذیرش فناوری‌های جدید و تغییرات فرهنگی

استفاده شد تا اثر تغییرات پارامترها بر نرخ پذیرش مشخص شود.

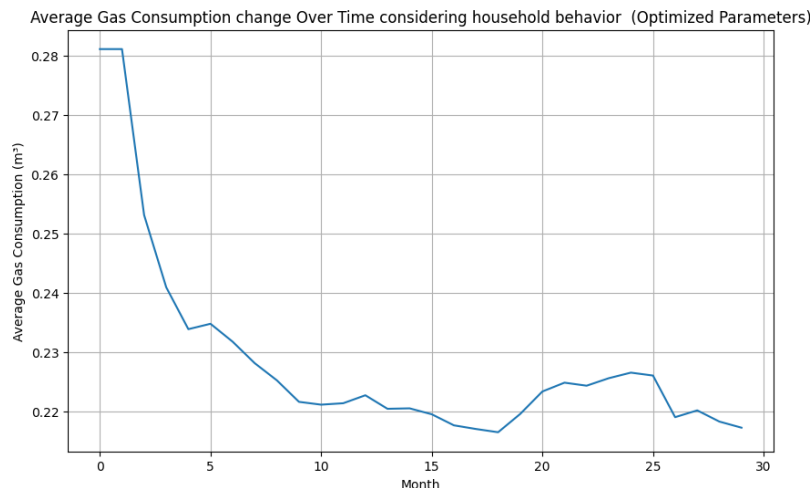
فناوری و فرهنگ به طور معنی‌داری افزایش یافته و حساسیت نسبت به تغییرات q نیز بالا می‌رود.

نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که افزایش اثر رسانه‌ای (پارامتر p) باعث افزایش نرخ پذیرش فناوری و تغییر فرهنگی می‌شود، به‌ویژه در سطوح پایین p حساسیت جامعه بیشتر است و اثر تبلیغات و سیاست‌های تشویقی نقش کلیدی در تسریع پذیرش دارد. نرخ پذیرش تکنولوژی و فرهنگ جدید نسبت به تغییرات قیمت گاز رفتاری غیرخطی و نوسانی دارد؛ در بازه‌های قیمتی مختلف، پذیرش افزایش یا کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده واکنش‌های متنوع خانوارها به قیمت گاز است. همچنین با افزایش نرخ نفوذ (پارامتر q) پذیرش

مقایسه مصرف گاز در دو حالت پارامترهای پیش‌فرض و بهینه نشان می‌دهد که بهینه‌سازی پارامترهای رفتاری و اقتصادی (افزایش p از ۰.۰۲ به ۰.۴۳، q از ۰.۳ به ۰.۵۳ و قیمت گاز از ۱۰۰۰ به ۲۷۷۷ تومان) باعث کاهش سریع‌تر و قابل توجه مصرف گاز در طی ۳۰ ماه (۲.۵ سال) پس از اعمال پارامترهای حالت بهینه می‌شود؛ در حالی که حالت پیش‌فرض کاهش مصرف ملایم و نامحسوس دارد (شکل‌های ۵ و ۶). این نتایج نقش موثر رسانه، تعاملات اجتماعی و قیمت گاز در تغییر رفتار مصرف خانوار، را در کنار پیشرفت فناوری، تایید می‌کند.



شکل ۵: ارزیابی مصرف گاز با لحاظ کردن مؤلفه‌های تبلیغات، قیمت و نفوذ در حالت مقادیر پیش‌فرض.



شکل ۶؛ ارزیابی مصرف گاز با لحاظ کردن مؤلفه‌های تبلیغات، قیمت و نفوذ در حالت مقادیر بهینه‌سازی شده.

۷. بحث و نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، بررسی عوامل مؤثر بر مصرف گاز خانوار در منطقه ۲ شهرداری تهران با استفاده از یک مدل‌سازی عامل‌بنیان بود. داده‌های مورد نیاز به صورت میدانی جمع‌آوری و پس از نرمال‌سازی، برای تخمین مصرف گاز هر خانوار به کار گرفته شد.

لازم به ذکر است که هر یک از روش‌های به کاررفته در این پژوهش، شامل مدل‌سازی معادلات ساختاری، الگوریتم ژنتیک، مدل‌سازی عامل‌بنیان و مدل باس، به تنهایی در مطالعات پیشین سابقه داشته‌اند؛ بنابراین، سهم نوآورانه این پژوهش در معرفی یک روش جدید به صورت مجزا نیست، بلکه در تلفیق این روش‌ها در قالب یک چارچوب یکپارچه و پیوسته است. در گام نخست، ساختار علی مصرف پایه خانوار با بهره‌گیری از ترکیب مدل‌سازی معادلات ساختاری و الگوریتم ژنتیک برآورد می‌شود و در گام دوم، نتایج این مرحله به عنوان مبنای شبیه‌سازی عامل‌بنیان پویایی‌های پذیرش فناوری و تغییر فرهنگ مصرف، بر پایه مدل باس، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این پیوند میان دو گام، که در مطالعات پیشین کمتر به صورت یکپارچه مورد توجه قرار گرفته است،

امکان تحلیل هم‌زمان ناهمگنی ساختاری مصرف خانوار و پویایی‌های اجتماعی مؤثر بر تغییر آن را فراهم می‌سازد. افزون بر این، به کارگیری این چارچوب برای بررسی مصرف گاز طبیعی در بخش خانگی و با تکیه بر داده‌های میدانی خانوارهای یک منطقه شهری در ایران، تمایز این پژوهش را نسبت به بخش قابل توجهی از مطالعات پیشین متمرکز بر برق یا انرژی‌های تجدیدپذیر برجسته می‌کند.

نتایج شبیه‌سازی وضعیت پایه^{۳۱} دو ویژگی کلیدی جامعه را آشکار می‌سازد: نخست، ناهمگنی ذاتی در الگوی مصرف که با یک توزیع چندوجهی^{۳۲} مشخص می‌شود؛ و دوم، وابستگی پیچیده‌ی مصرف به مشخصات کالبدی مسکن که رابطه‌ای خطی و ساده ندارد. این یافته‌ها به وضوح نشان می‌دهند که برای تحلیل دقیق‌تر پیامدهای تغییر فرهنگ یا نفوذ فناوری، باید پویایی‌های اجتماعی بین خوشه‌های مختلف مصرفی در قالب مدل‌های رفتاری مورد بررسی قرار گیرد. در بخش رفتاری پژوهش، از مدل باس به عنوان چارچوبی برای مدل‌سازی انتشار نوآوری استفاده شد. این مدل، علی‌رغم سادگی، یکی از پرکاربردترین ابزارها در مطالعات پذیرش نوآوری است و دو پارامتر کلیدی آن شامل اثر خارجی و اثر

^{۳۱} Multimodal

^{۳۲} Business As Usual

داخلی است. یافته‌های این پژوهش همسو با مطالعات پیشین (مانند [32]) نشان داد که مقدار اثر داخلی معمولاً بزرگ‌تر از اثر خارجی است، که بیانگر نقش غالب تعاملات اجتماعی نسبت به تأثیرات رسانه‌ای در فرآیند پذیرش است.

همان‌طور که قبلاً گفته شد در این پژوهش از داده‌های سال ۱۴۰۱ به عنوان مقادیر ورودی مدل استفاده شده است. بدیهی است که برای تعمیم به بقیه سال‌ها باید داده‌های ورودی (درآمد، سطح تحصیلات و ...) با آخرین اطلاعات به روزرسانی شود. همچنین لازم به ذکر است که داده‌های این مطالعه صرفاً از منطقه ۲ شهرداری تهران گردآوری شده‌اند؛ بنابراین تعمیم نتایج به سایر شهرها یا کشورها مستلزم

12,

7. Stankuniene, G., Streimikiene, D. and Kyriakopoulos, G. L., 2020. Systematic literature review on behavioral barriers of climate change mitigation in households. *Sustainability* 12, 7369
8. Neshat, N., Mahlooji, H. and Kabiri, M., 2023. Modeling of the effect of financial incentives on the penetration of residential solar power using system dynamics: Evidence from Iran. *Sharif Journal of Industrial Engineering & Management (SJIE)*, 39(2), pp.25-37. [In Persian]. <https://doi.org/10.24200/j65.2022.56219.2248>.
9. Dawid, A. and LeCun, Y., 2024. Introduction to latent variable energy-based models: a path toward autonomous machine intelligence. *J. Stat. Mech. Theory Exp.* 104011
10. Korhonen, P., Nordhausen, K. and Taskinen, S. A., 2024. Review of Generalized Linear Latent Variable models and related computational approaches. *WIREs Comput. Stat.* 16,
11. Rahimi, R. and Ghasemy Yaghin, R., 2026. Topic modeling and sentiment analysis of customers using natural

احتیاط است و نیازمند بازآموزی (کالیبراسیون) مدل با داده‌های محلی آن مناطق خواهد بود. کاهش مصرف گاز پس از اعمال شرایط بهینه محاسبه شده توسط مدل در طی دو و نیم سال اتفاق می‌افتد.

در پایان، با توجه به محدودیت‌های داده‌ای و ساختاری این پژوهش، پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده با استفاده از داده‌های طولی و سری‌های زمانی چندساله، پایداری روابط شناسایی شده میان ویژگی‌های اجتماعی-رفتاری و مصرف گاز را بررسی کنند. همچنین، استفاده از مدل‌های چندسطحی می‌تواند امکان تفکیک و بررسی همزمان اثرات مربوط به سطح خانوار، ساختمان و محله را فراهم کند.

۸. مراجع (References)

1. Verwiebe, P. A., Seim, S., Burges, S., Schulz, L. and Müller-Kirchenbauer, J., 2021. Modeling energy demand—a systematic literature review. *Energies* 14, 7859.
2. Rai, V. and Henry, A. D., 2016. Agent-based modelling of consumer energy choices. *Nature Climate Change* 6 pp. 556–562 <https://doi.org/10.1038/nclimate2967>
3. Nava Guerrero, G. del C., Korevaar, G., Hansen, H. H. and Lukszo, Z., 2019. Agent-based modeling of a thermal energy transition in the built environment. *Energies* 12, 856
4. Fostering effective energy transition 2023. <https://www.weforum.org/publications/fostering-effective-energy-transition-2023/>
5. Abdallah, F., Basurra, S. and Gaber, M. M., 2019. A non-intrusive heuristic for energy messaging intervention modeled using a novel agent-based approach. *IEEE Access* 7, pp.1627–1646
6. Carrus, G., 2021. Psychological predictors of energy saving behavior: a meta-analytic approach. *Front. Psychol.*

- language processing and machine learning techniques. *Sharif Journal of Industrial Engineering & Management (SJIE)*, 41(2), pp.45-61. [In Persian].
<https://doi.org/10.24200/j65.2025.65318.2418>.
12. Thøgersen, J. and Grønhøj, A., 2010. Electricity saving in households—a social cognitive approach. *Energy Policy* 38, pp. 7732–7743
 13. Simpson, G. and Clifton, J., 2017. Testing diffusion of innovations theory with data: financial incentives, early adopters, and distributed solar energy in Australia. *Energy Res. Soc. Sci.* 29, pp. 12–22
 14. Hossain, I., Fekete-Farkas, M. and Nekmahmud, M., 2022. Purchase behavior of energy-efficient appliances contribute to sustainable energy consumption in developing country: moral norms extension of the Theory of Planned Behavior. *Energies* 15, 4600
 15. Rand, W. and Rust, R. T., 2011. Agent-based modeling in marketing: guidelines for rigor. *Int. J. Res. Mark.* 28, pp. 181–193
 16. Rand, W., Herrmann, J., Schein, B. and Vodopivec, N., 2015. An agent-based model of urgent diffusion in social media. *J. Artif. Soc. Soc. Simul.* 18,
 17. Bastani, M. S., Asadi, S. and 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. *J. Archit. Eng.* 22,
 18. Langevin, J., 2018. Modeling the adoption of building efficiency technologies: a review of methods and datasets.
 19. Rogner, H.-H., 1988. Technology and the prospects for natural gas results of current gas studies. *Energy Policy* 16, pp. 9–26
 20. Neal, Z., 2018. Is the urban world small? the evidence for Small World structure in urban networks. *Networks Spat. Econ.* 18, pp. 615–631
 21. Fouladvand, J., Ateş, E., Sarı, Y. and Okur, Ö., 2024. Does the availability of alternative energy choices lead to more environmentally friendly outcomes? the case of thermal energy communities and natural gas consumption. *Appl. Energy* 374, 123932
 22. Ukpene, Patience, C. and Apaokueze, T. N., 2024. The impact of smart home technologies on energy efficiency, cost savings, and environmental benefits. *J. Energy Eng. Thermodyn.* pp. 21–32
[doi:10.55529/jeeet.44.21.32](https://doi.org/10.55529/jeeet.44.21.32).
 23. Klabunde, A. and Willekens, F., 2016. Decision-making in agent-based models of migration: state of the art and challenges. *Eur. J. Popul.* 32, pp. 73–97
 24. Amorim, G., Santos, M., Park, S., Franci, A. and Leonard, N. E., 2024. Threshold decision-making dynamics adaptive to physical constraints and changing environment. *European Control Conference (ECC)* pp. 1908–1913 IEEE.
[doi:10.23919/ECC64448.2024.10591177](https://doi.org/10.23919/ECC64448.2024.10591177)
 25. Ahmed, O., Sezer, N., Ouf, M., Wang, L. (Leon) and Hassan, I. G., 2023. State-of-the-art review of occupant behavior modeling and implementation in building performance simulation. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 185, 113558
 26. Bass forecasting tutorial - Run Analysis.
 27. Orbach, Y., 2016. Parametric analysis of the Bass model. *Innov. Mark.* 12, pp. 29–40
 28. Lai, W.-H., 2017. In modeling the technology diffusion by using Bass model. *Proceedings of AC*. pp. 169–195.
 29. Khabaronline, 2022. Which residents of Tehran consume more gas? *Khabar Online News Agency* [In Persian].

- <https://www.khabaronline.ir/news/1680216>
30. Wikipedia contributors, 2023. District 2 of Tehran municipality *Wikipedia The Free Encyclopedia* [In Persian]. https://fa.wikipedia.org/wiki/District_2_of_Tehran_Municipality Accessed.
31. Region 2 municipality of Tehran n.d. district profile: history and geographical location region two Tehran municipality [In Persian]. <https://region2.tehran.ir/district-profile/history-geography>
32. Massiani, J. and Gohs, A., 2015. The choice of Bass model coefficients to forecast diffusion for innovative products: an empirical investigation for new automotive technologies. *Res. Transp. Econ.* 50, pp. 17–28

رویداد استادی نشسته