

Paper Type: Original Article



A Framework for Smart and Participatory Energy Management in Designing Anticipatory Energy Systems Based on Robert Rosen's Theory

Zahra Heidari Darani¹, Ali Zackery^{2,*} 

¹Department of Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran; zahra.heidari@modares.ac.ir.

²Department of Industrial Engineering and Future Studies, University of Isfahan, Isfahan, Iran; a.zackery@ast.ui.ac.ir.

Citation:



Heidari Darani, Z., & Zackery, A. (2026). A Framework for smart and participatory energy management in designing anticipatory energy systems based on Robert Rosen's Theory. *Management: Modeling, Analysis and Applications*, 3(3), 171-185.

Received: 23/04/2026

Reviewed: 03/08/2026

Revised: 07/09/2026

Accepted: 15/09/2026

Abstract

Purpose: The transition from centralized and conventional energy systems to smart, distributed, and socio-technical energy ecosystems has created new challenges for energy management. In such environments, purely technical and planning-oriented approaches are no longer sufficient to address the complexities arising from interactions among technology, society, policy, and environmental factors. At the same time, growing uncertainty and accelerating technological change have increased the need for future-oriented and action-driven management approaches. Accordingly, this study aims to develop a conceptual framework for designing anticipatory energy systems based on Robert Rosen's anticipatory systems theory and to explain the mechanisms of smart and participatory energy management.

Methodology: This applied-developmental study employs a combination of systematic literature review, content analysis, environmental scanning, and expert panel techniques. More than 400 publications on future energy systems, over 220 reports and sources addressing trends, megatrends, weak signals, and emerging issues, and studies on the social and technological dimensions of energy systems were examined. Based on Rosen's theory, three interconnected subsystems, decision-making (M), decision-taking (S), and effectors (E), were designed, and their interactions were conceptually modeled.

Findings: The study introduces the concept of the Smart Anticipatory Energy System, in which subsystem M is responsible for forecasting and modeling energy-related behaviors through crowdsourcing, big data analytics, agent-based modeling, artificial intelligence, and digital twins. Subsystem S represents the real-world energy ecosystem, including smart grids, microgrids, energy communities, generation and storage infrastructures, and end users. Subsystem E comprises socio-technical effectors, including social imaginaries, future narratives, collective visioning, energy democracy, community-based energy initiatives, and citizen participation. The findings suggest that continuous interaction among these subsystems can enhance the anticipatory capacity, resilience, and action orientation of future energy systems.

Originality/Value: This study extends Rosen's anticipatory systems theory into the field of energy management and offers a novel framework for understanding and designing future energy systems. Rather than focusing solely on technological infrastructure, it highlights the importance of social modeling, collective participation, and future imagination as essential components of energy governance. The proposed perspective reconceptualizes energy systems as learning and anticipatory ecosystems that address uncertainty and shape desirable futures by integrating human participation and digital intelligence.

Keywords: Rosen's anticipatory system, Design, Smart energy management, Future energy systems, Transdisciplinary, Foresight.



Corresponding Author: a.zackery@ast.ui.ac.ir



<https://doi.org/10.22105/mmaa.vi.132>



Licensee. **Management: Modeling, Analysis and Application**. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).

۶

نوع مقاله: پژوهشی

چارچوبی برای مدیریت هوشمند و مشارکتی انرژی در طراحی سیستم های پیش نگر انرژی بر پایه نظریه رابرت روزن

زهرا حیدری دارانی^۱، علی ذاکری^۲

^۱ گروه مدیریت، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

^۲ گروه مهندسی صنایع و آینده پژوهی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

چکیده

هدف: گذار از سیستم های متمرکز و سنتی انرژی به سیستم های هوشمند، توزیع شده و اجتماعی فنی، چالش های جدیدی را در مدیریت انرژی پدید آورده است. در چنین محیطی، رویکردهای صرفاً فنی و برنامه ریزی محور قادر به پاسخگویی به پیچیدگی های ناشی از تعامل فناوری، جامعه، سیاست و محیط زیست نیستند. همزمان، افزایش عدم قطعیت و شتاب تغییرات فناورانه، نیاز به رویکردهای آینده نگر و اقدام محور را بیش از پیش برجسته ساخته است. در پاسخ به این تحول، پژوهش حاضر با هدف توسعه یک چارچوب مفهومی برای طراحی سیستم های پیش نگر انرژی بر پایه نظریه سیستم های پیش نگر رابرت روزن و تبیین سازوکارهای مدیریت هوشمند و مشارکتی انرژی انجام شده است.

روش شناسی پژوهش: این پژوهش از نوع کاربردی-توسعه ای بوده و با بهره گیری از مرور نظام مند ادبیات، تحلیل محتوا، پویش محیطی و پل خبرگان انجام شده است. برای طراحی چارچوب پیشنهادی، بیش از ۴۰۰ مقاله مرتبط با آینده سیستم های انرژی، بیش از ۲۲۰ گزارش و منبع برای شناسایی روندها، کلان روندها، نشانه های ضعیف تغییر و مسایل نوظهور و همچنین مجموعه ای از مطالعات مرتبط با ابعاد اجتماعی و فناورانه انرژی مورد بررسی قرار گرفت. سپس، بر مبنای نظریه روزن، سه زیرسیستم تصمیم ساز، تصمیم گیر و افکتورها طراحی و روابط میان آنها تبیین شد.

یافته ها: یافته های پژوهش منجر به معرفی مفهوم «سیستم پیش نگر انرژی هوشمند» شد که در آن زیرسیستم تصمیم ساز وظیفه مدل سازی و پیش بینی رفتار انرژی را از طریق جمع سپاری، داده های بزرگ، مدل سازی مبتنی بر عامل، هوش مصنوعی و دوقلوهای دیجیتال بر عهده دارد. زیرسیستم تصمیم گیر نمایانگر اکوسیستم واقعی انرژی شامل شبکه های هوشمند، ریزشبکه ها، اجتماعات انرژی، زیرساخت های تولید و ذخیره سازی انرژی و کاربران است. همچنین، زیرسیستم افکتورها از مجموعه ای از افکتورهای اجتماعی فنی شامل تخیلات اجتماعی، روایت پردازی آینده، چشم اندازسازی جمعی، دموکراسی انرژی، اجتماعات انرژی و مشارکت شهروندان تشکیل می شود. نتایج نشان می دهد که تعامل مستمر این سه زیرسیستم می تواند ظرفیت پیش نگری، تاب آوری و اقدام محوری سیستم های انرژی آینده را تقویت کند.

اصالت/ارزش افزوده علم ی: این پژوهش با انتقال نظریه سیستم های پیش نگر روزن به حوزه مدیریت انرژی، چارچوبی نو برای فهم و طراحی سیستم های انرژی آینده ارائه می کند. برخلاف رویکردهای متعارف که عمدتاً بر زیرساخت ها و فناوری تمرکز دارند، مطالعه حاضر نقش مدل سازی اجتماعی، مشارکت جمعی و تخیل آینده را به عنوان اجزای ضروری مدیریت انرژی برجسته می سازد. حاصل این بازنگری، تصویری از سیستم انرژی به مثابه یک اکوسیستم یادگیرنده و پیش نگر است که از طریق مشارکت ارادی کاربران و ادغام هوش انسانی و دیجیتال، ظرفیت بیشتری برای مواجهه با عدم قطعیت ها و شکل دهی آینده مطلوب خواهد داشت.

کل ی دواژه ها: سیستم پیش نگر روزن، طراحی، مدیریت هوشمند انرژی، سیستم های انرژی آینده، فرارشتگی، آینده نگاری.

۱- مقدمه

سیستم های انرژی در معرض تغییر پارادایم تمرکزگرایی به تمرکززدایی^۱ و ادغام فیزیکی سایبری^۲، در حال گذار از سیستم های سنتی به سمت شکل گیری سیستم های هوشمند هستند. ادغام فرایندهای مصرف، تولید، توزیع، عرضه و تقاضای جهانی انرژی و تاثیر متقابل و چندجانبه آنها بر هم، تعدد منابع انرژی مانند سوخت های فسیلی و سوخت های جایگزین آنها یعنی انرژی تجدیدپذیر، جنبه های اقتصادی و زیست محیطی آنها [۱] و تاثیر هر یک بر جنبه های مختلف زندگی انسان از جمله جنبه های اجتماعی و وابستگی دولت ها به انرژی و حکمرانی انرژی، حوزه مطالعاتی

^۱ Decentralization

^۲ Cyber-physical integration

سیستم‌های انرژی را به حوزه‌ای پیچیده تبدیل کرده است [2]. بنابراین سیستم‌های انرژی به‌عنوان سیستم‌های اجتماعی فنی^۱ [3]، سیستم‌هایی پیچیده به حساب می‌آیند و پیچیدگی سیستم در این جا به معنای «بیش از مجموع عناصر» است [4] طوری که پیرامون‌های تغییر چندگانه (از بعدهای مختلف) بر آن‌ها تاثیرگذار باشند [5]. اجتماعی فنی بودن سیستم‌های انرژی نیز به معنی تاثیرگذاری و اهمیت مسایل اجتماعی به اندازه مسایل فنی در ایجاد و توسعه این سیستم‌ها است؛ زیرا تا کنون نگاه فنی و مهندسی صرف، به حل مشکلات و مسایل سیستم‌های انرژی هوشمند حاکم بوده و در جنبه‌های اجتماعی استفاده از این سیستم‌ها غفلت صورت گرفته است. این درحالی است که عوامل اجتماعی برای درک و موفقیت بالقوه سیستم مدیریت انرژی بسیار اهمیت دارند و فناوری و تجهیزات یک شرط لازم اما ناکافی است. با این تفاسیر می‌توان گفت، مشارکت انسانی حداقل به اندازه راه‌حل‌های فناورانه مهم است و به‌صورت موازی باید در مرکز توجه قرار گیرد [6]. به این ترتیب مدیریت انرژی با غلبه رویکرد رشتگی^۲ قادر به حل مشکلات سیستم‌های انرژی هوشمند نخواهد بود و مواجهه آن با مشکلات این سیستم‌ها، به رویکردهای جدیدی مانند رویکردهای میان‌رشته‌ای^۳ و فرارشته‌ای^۴، تحت پارادایم‌های مختلف تحقیق نیاز دارد.

رویکردهای میان‌رشته‌ای ترکیبی از ایده‌ها، داده‌ها و اطلاعات، روش‌ها، ابزارها، مفاهیم یا نظریه‌هایی از دو یا چند رشته با هدف پاسخ به حل مشکلات پیچیده سیستم‌های انرژی نوظهور است. برای مثال ادغام جنبه‌های اجتماعی و فنی سیستم‌های انرژی هوشمند با کمک علوم ارتباطات و اطلاعات، حوزه‌های جدیدی برای مطالعه این سیستم‌ها ایجاد کرده است مانند انفورماتیک انرژی^۵ [7-9]، انفورماتیک اجتماعی^۶ [7]، [10-13]، علوم اجتماعی انرژی^۷ [7]، [14]، [15] و انفورماتیک انرژی اجتماعی^۸ [7]. اما به‌گواهی بسیاری از پژوهش‌های میدانی، میان‌رشتگی فاقد نگاهی جامع برای پرداختن به مشکلات سیستم‌های انرژی است و مشارکت عوامل انسانی شکافی پرنشدنی در این نگاه است. در واقع فرارشتگی همان رویکرد جامعی است که در کنار نگاه میان‌رشته‌ای، مشارکت بازیگران انسانی را به‌همراه دارد [16] و مشارکت عامل انسانی نقش مهمی در مدیریت سیستم‌های انرژی آینده خواهد داشت طوری که به ادعای استروم [17]، می‌تواند از بحران مصرف منابع مشترک با عنوان تراژدی منابع مشترک^۹ [18] جلوگیری کند و به مدیریت مناسبی برای منابع مشترک^{۱۰} مدرن منجر شود.

از طرف دیگر، مشارکت بازیگران انسانی در قلب تمام تفکرات نظام‌مند درباره آینده مانند پیش‌نگری^{۱۱} قرار دارد. پیش‌نگری به‌عنوان رویکردی فرارشته‌ای، درک فعالانه آینده و راهی برای جست‌وجوی ابعاد زمان حال به‌شمار می‌آید که در مرکز آن توجه به اقدام جمعی و مشارکت قرار دارد [19]. دانشمندان عرصه سیستم نیز از سویی بر توانایی‌های منحصر به فرد انسان برای پیش‌نگری تاکید می‌کنند و انسان را فراتر از موجودی منفعل و واکنش‌محور به حساب می‌آورند و از سویی دیگر، عملیاتی کردن ظرفیت پیش‌نگری را بدون رویکردهای مبتنی بر مدل^{۱۲} [20] ممکن نمی‌دانند. نظریه سیستم پیش‌نگر روزن^{۱۳} نظریه‌ای بنیادین در این راستا است که «برای تصمیم‌سازی‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی بسیارحیاتی است» [21].

در این مقاله بینشی نو در مدیریت هوشمند انرژی از منظر سیستم پیش‌نگر روزن ارائه می‌شود که به‌واسطه آن، رویکردهای بالا به پایین و رشته‌ای ارتقا می‌یابد و نگاه‌های پایین به بالا و فرارشته‌ای به‌عنوان رویکردهای آینده مدیریت انرژی هوشمند برجسته می‌شود.

به این ترتیب، مطابق با نظریه سیستم‌های پیش‌نگر روزن [18]، چارچوبی مفهومی و نو برای بررسی مسایل مربوط به سیستم‌های نوظهور انرژی ارائه می‌شود و مفهومی نوین با عنوان «سیستم پیش‌نگر انرژی هوشمند» و اجزای آن طراحی و معرفی خواهد شد.

۲- چارچوب نظری

انرژی از موضوعات مناقشه‌برانگیز قرن حاضر است و نقش مهمی در بالابردن استانداردهای زندگی مدرن در سراسر جهان بازی می‌کند. امروزه در جهان حدود ۴/۷ میلیارد نفر مصرف‌کننده انرژی وجود دارد و انتظار می‌رود این عدد تا سال ۲۰۴۰ به ۹/۲ میلیارد نفر برسد. رشد جمعیت جهان و رشد اقتصادی کشورهای در حال ظهور، پیرامون عمده افزایش میزان تقاضای انرژی هستند طوری که پیش‌بینی می‌شود از سال ۲۰۱۶ تا سال

¹ Socio-technical systems

² Disciplinarity

³ Interdisciplinary

⁴ Transdisciplinary

⁵ Energy Informatics

⁶ Social informatics

⁷ Energy Social Sciences

⁸ Social energy informatics

⁹ Tragedy of commons

¹⁰ Common pool resources

¹¹ Anticipation

¹² Model-based approach

¹³ Rosen's anticipatory system

۲۰۴۰، تقاضای انرژی جهانی تقریباً ۲۵٪ افزایش یابد [22]. رشد تقاضای انرژی، ذخایر محدود فسیلی موجود در جهان و اثرات زیست‌محیطی آن، ضرورت دستیابی به سیستم‌های انرژی پایدارتر را آشکار می‌سازد. با پیشرفت روزافزون فناوری و بروز تحولات نظم‌آشوب^۱، هوشمندسازی سیستم‌های انرژی سرعت می‌گیرد و مدیریت بهره‌ور برای انرژی در دسترس بسیار اهمیت می‌یابد [23].

به بیان یکنگینر و همکاران [24]، شبکه هوشمند امکان بهره‌وری مدیریت انرژی را افزایش می‌دهد و اجازه می‌دهد تا بلادرنگ^۲، بین عرضه و تقاضای انرژی برق تعادل برقرار کند و این بدین معنا است که ورود فناوری به همه شئون حوزه انرژی، باعث افزایش بهره‌وری و تولید انرژی پاک و کم‌کربن می‌شود [25] و احتمالاً این به معنی حرکت جهان به سمت مدیریت هوشمند انرژی است که پیشران‌های مختلفی می‌تواند داشته باشد. به همین دلیل به نظر می‌رسد؛ مدیریت انرژی در آینده از جنسی متفاوت خواهد بود. حال سوال این جاست که چطور می‌توان تشخیص داد کدام سیستم مدیریت انرژی مناسب آینده است؟ سیستم‌های پیش‌نگر یکی از پاسخ‌های احتمالی به این سوال هستند.

۱-۲- پیش‌نگری و ظرفیت پیش‌نگری سیستم

پیش‌نگری در لغت به معنای داشتن توانایی در استقبال از تصمیمات و اقدامات آینده‌محور یا تجسم یک رویداد یا وضعیت در آینده است [7]، [8]. شکل‌دهی آینده هر سیستم با ظرفیت پیش‌نگری^۳ آن ارتباط دارد [9]. ظرفیت پیش‌نگری سیستم ظرفیت توسعه مداوم و به‌کارگیری دانش است. دانشی که در سیستم یا سازمان به‌دست می‌آید تا بهترین راه رفع نیازهای ذی‌نفعان و تغییر زمینه سیستم در طول زمان انتخاب شود و عواقب این انتخاب‌ها برای پاسخ‌گویی سیستم نیز در نظر گرفته شود [7].

پیش‌نگری، «حس زمینه‌ای^۴» انسانی است که سیستمی (زیست‌شناختی، اجتماعی یا سیاسی) را قادر می‌سازد تا با تغییر منطبق شود [10]؛ یعنی با شناسایی دقیق وضعیت اکنون، می‌توان «مدل‌های مختلفی از آینده ایجاد کرد» و تغییر را تدبیر کرد. در غیر این صورت، تغییر به شوک واکنش‌های غیراصولی و سپس خرابی و فروپاشی سیستم منجر خواهد شد [11]. برای مثال، نسل جدید سیستم‌های انرژی به‌عنوان «انباره مشترک تولید صرف^۵» با شوک‌هایی از این نوع مانند خاموشی مکرر شبکه به دلیل عدم قطعیت در دسترسی به منابع انرژی تجدیدپذیر و همچنین تولید توزیع شده و غیرمتمرکز، مواجه خواهند شد. سرعت و نوسان تغییر در سیستم‌ها پیچیدگی را به دنبال می‌آورد [11] و دوقلوی تغییر و پیچیدگی می‌تواند حالت‌های ناپایداری ایجاد کند که با کمک پیش‌نگری ممکن است به پویایی سیستم تبدیل شوند [12].

پیش‌نگری رویکردی اقدام‌محور، برای ایجاد ارتباط بین شکل‌دهی آینده انسان با ظرفیت پیش‌نگری او است و نیازی فوری برای هر حوزه اجتماعی‌فنی^۶ از جمله انرژی و توسعه پایدار است [9]. پیش‌نگری به‌مثابه فرایند واسطه‌ای بین دانش و اقدام تعبیر می‌شود [13]. با توجه به چگونگی سیستم‌های انگیزشی، اقدامات در زمان حال، معمولاً در تقابل بین اقدامات آینده و گذشته شکل می‌گیرند [14] و انتخاب «کدام اقدام در زمان حال»، همان چیزی است که آینده‌اندیشان را نگران می‌کند.

زیست‌شناسان، اقتصاددانان، دانشمندان علوم سیاسی، برنامه‌ریزان شهری، آینده‌پژوهان و بسیاری دیگر که در حوزه سیاست‌گذاری فعالیت می‌کنند، همواره نگرانی مشترکی درباره سیاست‌گذاری و مفاهیم مربوط به پیش‌بینی آینده و برنامه‌ریزی برای آن دارند. لویی [15]، این دغدغه را «سوال از باید» می‌خواند و بیان می‌کند که این همان پرسشی است که همه می‌خواهند درباره آن بدانند که در آینده چه باید کرد و به‌طور خلاصه این همان آینده‌نگاری^۷ است. آنچه در هر یک از این حوزه‌های متنوع باید به آن توجه شود، در واقع فناوری تصمیم‌سازی^۸ است. اما اساس هر فناوری باید زیربنایی از اصول بنیادین باشد یعنی علم و نظریه. لویی [15] این پرسش را مطرح می‌کند که نظریه بنیادین فناوری تولید خط‌مشی^۹ چیست؟ و پاسخ به این سوال را، نظریه‌ای می‌داند که روزن [18] با عنوان «سیستم پیش‌نگر روزن» پیشنهاد داده است. او تأکید می‌کند که مفهوم «پیش‌نگری» مفهومی جدید نبوده است؛ اما مطالعه نظام‌مند پیش‌نگری، در زمانی که روزن [18] کتاب آن را نوشت، بدیع بوده است [15]. روزن [18] بیان می‌کند که نمونه‌های فراوانی از سیستم‌های پیش‌نگر در جهان زیستی^{۱۰} وجود دارد و پیش‌نگری حتی در رفتار انسان نیز مشاهده می‌شود و با این وجود نبود هیچ

¹ Disruptive

² Real time

³ Anticipatory capacity

⁴ Sense of context

⁵ common pool of prosumption

⁶ Socio-technical

⁷ Foresight

⁸ Decision-making technology

⁹ Policy

¹⁰ Biologic world

نظریه‌ای مربوط به سیستم‌های پیش‌نگر را تا زمان خود طنزگونه می‌خواند و برای تأکید بر بدیع‌بودن کار خود در حوزه سیستم، یادآور می‌شود که از کلمه ممنوعه «پیش‌نگری» در قلمروی نظریه سیستم استفاده کرده است. چراکه اگر یک سیستم بتواند «از آینده آگاه باشد»، به این معنا که تغییر فعلی حالت آن به حالت‌های آینده و به بزرگی نیروهای تحمیلی در آینده بستگی داشته باشد، قانون علیت^۱ دیگر نمی‌تواند برقرار باشد [26]. به این ترتیب، سیستم پیش‌نگر به‌عنوان یک موضوع مهم، از نظریه رفتارهای سیستم به‌طور عادی حذف می‌شود؛ زیرا به‌نظر می‌رسد که با علیت متناقض است؛ به بیان بهتر، ریشه نظریه‌های سیستم، در ادبیات نیوتن و جانشینان او برای توصیف سیستم‌های مکانیکی توسعه یافته است که در این سیستم‌ها حالت فعلی سیستم ناشی از حالت گذشته آن است یا به عبارت دیگر حالت گذشته سیستم علت حالت فعلی و این ترتیب زمانی اهمیت دارد.

۲-۲- پیش‌نگری و طراحی

مفهوم پیش‌نگری ارتباط نزدیکی با مفهوم طراحی دارد؛ چرا که طراحی مربوط به ساخت واقعیت‌های آینده است. طراحی به‌طور تاریخی فعالیت یا فرایندی هدفمند تعریف شده که شامل انجام اقداماتی در زمان حال برای ساخت یک واقعیت از آینده مطلوب است. همچنین به‌عنوان یک اقدام بازتابنده^۲ شناخته می‌شود که قصد ساخت آینده‌ای را در پاسخ به یک «وضعیت مشکل‌ساز»^۳ دارد که دارای عدم قطعیت، بی‌نظم و نامعین است. در سال‌های گذشته، طراحی به‌عنوان یک اقدام نظری (فکری) نیز در نظر گرفته شده است که هدف از آن ایجاد تحریکات و تأمل انتقادی در مورد آینده‌های بالقوه و مرجع است و صراحتاً طراحی را به آینده‌شناسی^۴ پیوند می‌دهد. در نهایت، طراحی نیز به‌عنوان یک حالت و ظرفیت قصدمند، به ویژگی‌های معنایی^۵ و احساسی^۶ ذهن برای ساخت نهادهای غیر موجود اشاره دارد که می‌تواند واقعیت‌های آینده را ترجیح دهد [16]. طراحی انتقادی^۷ رویکردی در طراحی است که به جای تمرکز بر تولید محصولات بهتر یا کارآمدتر، بر طرح پرسش و برانگیختن تفکر تأکید دارد و هدف آن شکل‌دهی به گفت‌وگو درباره مسایل اجتماعی و فناورانه است. در مقابل، طراحی استفاده‌ای^۸ با الهام از نظریه انتقادی به بررسی و به چالش کشیدن شرایط بحث‌برانگیز زندگی روزمره می‌پردازد و بیشتر نقش میانجی فعال در بستر جامعه را ایفا می‌کند. در حالی که طراحی انتقادی اغلب در قالب نمایشگاه‌ها و فضاهای فرهنگی ارائه می‌شود، طراحی استفاده‌ای در بطن جامعه شکل می‌گیرد. این رویکردها با تمرکز بر پرسش‌گری درباره شرایط اجتماعی، اقتصادی و فناورانه و نیز تصور آینده‌های ممکن، نشان‌دهنده همگرایی فزاینده میان حوزه‌های طراحی و آینده‌نگاری هستند.

بنابراین عنصر مشترک در میان رویکردهای مختلف در تعریف طراحی این است که به‌عنوان یک پدیده آینده‌محور تعریف می‌شود. همچنین زامونوپولوس و الکسیو [16]، طراحی را بخشی از مطالعات پیش‌نگری می‌دانند.

۲-۳- سیستم پیش‌نگر رابرت روزن

طبق تعریف روزن [18] سیستم پیش‌نگر سیستمی است که شامل مدلی پیش‌بینی‌کننده^۹ از خود و یا محیط خود است که به آن اجازه می‌دهد حالت خود را در هر لحظه با پیش‌بینی‌های مدل مربوط به لحظه بعد تغییر دهد. بر اساس نمادسازی روزن، سیستم پیش‌نگر شامل سیستم‌های M و S و افکتورهای E است که M به اندازه زمان T از S جلوتر است طوری که M یک مدل از S است. شرط لازم این است که پویایی M سریع‌تر از پویایی S باشد. در این صورت، M می‌تواند رفتار S را پیش‌بینی^{۱۰} کند. بنابراین با نگاه به M ، اطلاعاتی در مورد وضعیت بعدی S به‌دست می‌آید. در سیستم پیش‌نگر، M اطلاعات مربوط به S را دریافت می‌کند، وضعیت آینده S را «پیش‌بینی» می‌کند و می‌تواند بر S از طریق مجموعه‌ای از افکتورهای E تأثیر بگذارد. طبق نظر روزن [19] «از این تصویر ساده، بینش‌های متنوعی از ماهیت «برنامه‌ریزی»، «مدیریت»، «خط مشی» و ... می‌تواند استخراج شود». شکل ۱، نمایی ساده از یک سیستم پیش‌نگر است.

¹ Causality

² Reflectiv practice

³ Problematic situation

⁴ Futurology

⁵ Semantic

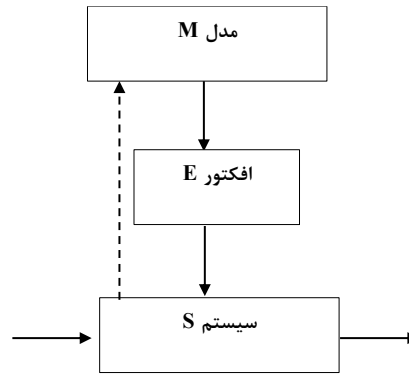
⁶ Affective

⁷ Critical Design

⁸ Interrogative design

⁹ Predictive

¹⁰ Predict



شکل ۱- نمایی از یک سیستم پیش‌نگر [8].

Figure 1- A view of a forward-looking system.

آنچه یک سیستم انرژی را به سیستمی پیش‌نگر نزدیک می‌کند، اقدام بلادرنگ^۱ است. استرلینگ [27]، برای اولین بار مفهوم زمان^۲ را معرفی کرده است و ما آن را گامی در مسیر بازتعریف «اقدام بلادرنگ» می‌دانیم. به بیان ذاکری [20]، استرلینگ زمان را این‌گونه تعریف می‌کند:

به این ترتیب، سیستم پیش‌نگر مدیریت انرژی، سیستمی است که توسط M ، روندها و علایم ضعیف حوزه انرژی را لحظه‌به‌لحظه رصد می‌کند و توسط افکتورها به مدیریت انرژی بازخورد می‌دهد و مدیریت انرژی که در این جا همان S است، آن را به سیاست تبدیل می‌کند.

اگر این سه سیستم را به‌عنوان بخش‌هایی از «یک» سیستم در نظر بگیریم، سیستم حاصل به‌طور منطقی یک سیستم پیش‌نگر خواهد بود که در آن رفتار آینده مدلسازی می‌شود و حالت‌های فعلی سیستم را تعیین می‌کند [14] همان‌طور که روزن [19] گفته است: « M آینده S را می‌بیند؛ زیرا مسیرهای M سریع‌تر از مسیرهای S هستند». ویژگی‌های اصلی این ساختار به شرح زیر است:

۱. M و S به‌هم پیوسته هستند^۳.
۲. M منحصر به فرد نیست.
۳. سیگنال‌های حاصل از M باعث اقدام سیستم S می‌شوند.

این ویژگی‌ها «کلیه روابط بین قسمت‌های مادی یعنی قسمت‌های مختلف S ، روابط بین اثرات متقابل بخش‌های مادی و روابط با زمان و محیط» را شامل می‌شود [13]. «رابطه^۴» در نظریه روزن عبارت است از: «پیوند بین رفتارهای S و استنتاج‌های انجام‌شده در M که همان پیش‌بینی‌هایی در مورد رفتار S »، «رابطه بین یک سیستم و مدلی از آن سیستم است» که روزن آن را «بینشی دل‌پذیر» می‌نامد [25]. از نظر او «سازمان روابط^۵» یک سیستم پیش‌نگر را ایجاد می‌کند و «مدلسازی رابطه‌ای^۶» نقطه قوت آن است. اگر M یک مدل کامل از S و در محیطی ثابت باشد، معماری فوق نشانگر یک سیستم پیش‌نگر است. از آنجایی که M یک مدل کامل نیست، این سیستم یک سیستم شبه پیش‌نگر^۷ خواهد بود [20].

در این مقاله به‌دنبال طراحی سیستم پیش‌نگر انرژی هستیم بنابراین لازم است منظور خود را از طراحی تبیین کنیم. زامنوپولوس و الکسیو [16]، طراحی را بخشی از مطالعات پیش‌نگری می‌دانند. در این پژوهش به‌دنبال طراحی سیستمی تصمیم‌ساز هستیم که بتواند ظرفیت تطبیق‌پذیری و تاب‌آوری در برابر عدم قطعیت‌های آینده در حوزه مدیریت انرژی هوشمند ایجاد کند.

¹ Real time action

² Spime: Space + time

زمان ترکیب دو واژه زمان و مکان است.

³ S and M are couple

⁴ Relation

⁵ Relational organization

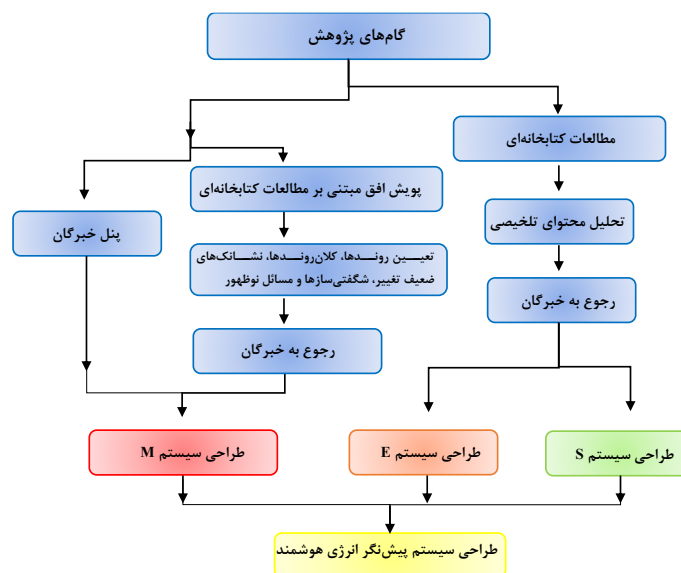
⁶ Relational modeling

⁷ Semi anticipatory system

اگر از آنچه ذاکری [20] می گوید وام بگیریم، این رویکرد با عبور از پیش بینی و آینده نگاری، به دنبال پیش نگری، بر اساس سیستم های پیش نگر در زمینه مدیریت انرژی است و با رویکردهای سنتی مدیریتی یعنی رویکردهای از بالا به پایین^۱ متفاوت خواهد بود. طراحی مورد نظر ما در این پژوهش به نوعی طراحی انتقادی است که بخشی از آینده های سیستم های انرژی را به تصویر خواهد کشید.

۳- روش شناسی

این تحقیق از نظر هدف کاربردی توسعه ای است و ابتدا با مطالعه های کتابخانه ای و مطالعه های مروری سیستماتیک آغاز شد. به منظور طراحی سیستم پیش نگر مدیریت انرژی تحت پارادایم زمکان، سبکی از روش های مختلف از جمله روش تحلیل محتوا، پوشش محیطی، پنل خبرگان را به کار گرفتیم. شکل ۲ گام های انجام این پژوهش را نشان می دهد.



شکل ۲- گام های پژوهش.

Figure 2- Research steps.

ابتدا سیستم های M و S و افکتورهای E تعیین شدند که به این منظور و برای تعیین سیستم های S و E از روش تحلیل محتوا و رجوع به خبرگان بهره بردیم و برای تعیین M استفاده از روش های پوشش محیطی^۲ و رجوع به خبرگان استفاده کردیم. پوشش محیطی شامل شناسایی کلان روندها و روندهای آینده، شناسایی نشانک های ضعیف تغییر آینده انرژی و شگفتی سازهای این حوزه است. یکی از روش های رجوع به متخصصان، پنل خبرگان است که برای استفاده از نظر متخصصان حوزه های مرتبط با موضوع برای تعیین زیرسیستم M استفاده کردیم. در پاسخ به سوال از راستی آزمایی یافته های این پژوهش باید بگوییم که پس از تعیین سیستم S ، M و E از طریق مطالعات کتابخانه ای، با رجوع به خبرگان حوزه انرژی و آینده پژوهی منطق طراحی آنها تایید شد.

۴- یافته های پژوهش

با تعریف سیستم پیش نگر رابرت روزن و بیان ۳ ویژگی برای آن، برشماری اجزای کلیدی سیستم های انرژی هوشمند مبتنی بر انرژی های تجدیدپذیر، حال نوبت طراحی سیستم پیش نگر انرژی هوشمند است. طبیعی است که سیستم پیش نگر انرژی هم مانند هر سیستم پیش نگر دیگری باید از ۳ زیرسیستم S ، M و E تشکیل شود و اجزای هر یک از زیرسیستم ها نیز تعیین شود؛ اما قبل از بحث درباره ماهیت و اجزای هر یک، برای درک بهتر سیستم پیش نگر انرژی هوشمند، لازم است به این نکته اشاره کنیم که سیستم M و S شامل هر آن چیزی است که به ترتیب به فضای مجازی و فضای واقعی مربوط است. سیستم های M و S درهم تنیده و به هم متصل هستند و تعیین مرز بین آنها کاری دشوار و نشدنی است؛ اما در مورد آنها می توان

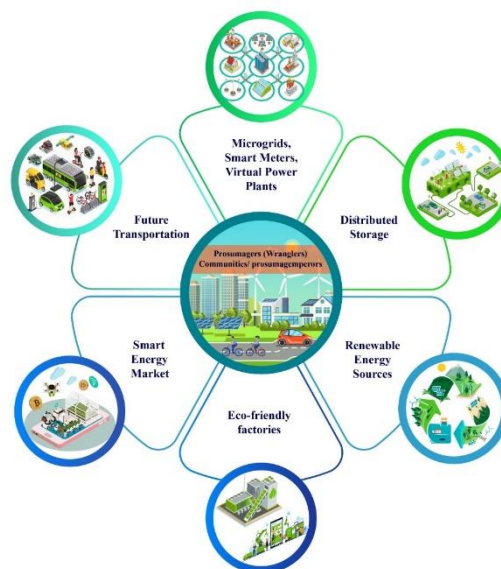
¹ Up to down

² Environmental scanning

به نکاتی اشاره کرد. سیستم S، سیستمی تصمیم‌گیر است و می‌تواند یک زیست‌بوم یا سیستم اجتماعی یا اقتصادی باشد و در بحث ما یک سیستم انرژی هوشمند است.

۴-۱- سیستم S

طراحی سیستم S حاصل پایش ۴۰۳ مقاله در پایگاه گوگل اسکولار بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵ با روش تحلیل محتوا است. این مقاله‌ها به آینده سیستم‌های انرژی پرداخته و هر کدام اجزایی از آن را بررسی کرده‌اند. درواقع طراحی سیستم S، طراحی کلان‌تصویری^۱ از آینده سیستم‌های انرژی است که در ادبیات انرژی و علوم وابسته به آن بیان شده است. افق زمانی این آینده‌ها از سال ۲۰۲۰ تا سال ۲۰۵۰ است. نمایی از هر آنچه را که طراحی اجزای سیستم S در آینده است و درواقع کلان‌تصویری از یک آینده سیستم S نامیدیم، سیستم S، سیستمی تصمیم‌گیر است و در پژوهش ما همان سیستم در حال ظهور انرژی است که تولید، توزیع، ذخیره، کنترل و مدیریت انرژی در آن توزیع شده و غیرمتمرکز خواهد بود. این سیستم در پژوهش ما شامل منابع مختلف انرژی‌های تجدیدپذیر و به‌صورت محدود منابع فسیلی، ریزشک‌ها [21]، شبکه‌های هوشمند انرژی، کنترل هوشمند [28]، نیروگاه برق مجازی [29] و مفاهیمی از این دست است. در این سیستم ناوگان حمل‌ونقل و جاده‌ها الکتریکی [30] است. بخشی از مدل‌های کسب‌وکار، مبتنی بر سیستم‌های انرژی خواهد بود و بازارهای انرژی هوشمند رونق خواهد گرفت و ترکیب بلاک‌چین و اینترنت انرژی [26] و هوش مصنوعی [31] به توزیع‌شدگی سیستم کمک خواهد کرد و نیز به رونق کسب‌وکارهای مبتنی بر سیستم‌های انرژی جان خواهد بخشید. شهرهای اشتراکی [32]، ساختمان‌های نت زیرو^۲ [33] و متصل به اینترنت و اجتماع‌های تولیدصرف‌ذخیره‌کننده^۳ همگی کلان‌تصویر سیستم S را تشکیل می‌دهند.



شکل ۳- نمایی از سیستم S.
Figure 3- A view of system S.

۴-۲- سیستم M

برای طراحی سیستم M، از روش پویش افق از طریق مطالعات کتابخانه‌ای بخشی از روندها، کلان‌روندها، مسایل نوظهور و نشانک‌های ضعیف تغییر و شگفتی‌سازهایی که حاصل بررسی ۲۲۰ گزارش، مقاله و وب‌سایت است، استفاده کردیم. تعیین نوع اطلاعات موجود به‌دست آمده شامل روندها، کلان‌روندها، نشانک‌های ضعیف، مسایل نوظهور و شگفتی‌سازها به تایید خبرگان رسیده است. سیستم M مدلی از سیستم S و شبیه‌ساز جاندار است و شامل مدل‌سازی‌های مبتنی بر عامل [34] و ساخت جوامع مصنوعی برای پیش‌بینی رفتار انرژی اجتماعات کاربران انرژی و مدل‌سازی مبتنی بر جمع‌سپاری [20] و شبیه‌سازی با دوقلوی دیجیتال [25] است که به تجربه آینده منجر می‌شود. تجربه‌ای که از مسیر «مشارکت ارادی»

¹ Big picture

² Net zero building

³ Prosumagempore

اجتماعات کاربران انرژی می‌گذرد و تحلیل اجتماعی را به تحقق نزدیک می‌کند. همچنین سیستم انرژی را به اقدام محوری و در نتیجه سیستم پیش‌نگر نزدیک می‌کند. لازمه پیش‌نگر بودن سیستم انرژی، یکتانبودن سیستم M است.

ماهیت M داده و الگوهای داده‌های بزرگ و اینترنت انرژی و هر آن چیزی است که مربوط به پیش‌بینی آینده است؛ مانند سناریوها، مدلسازی‌ها و پیش‌بینی‌های آینده در مورد سیستم‌های انرژی.

به بیان ذاکری [20]، M شبیه‌ساز جاندار^۱ است که در واقع یک «ابرجهان از شبیه‌سازی‌های تودرتو است. یک شبیه‌سازی جاندار و در مقیاس وسیع از ارگانیسم‌های در حال رشد و یادگیری است که در تعامل با زندگی بیرونی و شبیه‌سازی‌های دیگر هستند».

نوعی از شبیه‌سازی جاندار می‌تواند مدلسازی جوامع باشد که با این رویکرد، سیستم اجتماعی مصنوعی انرژی در دنیای واقعی بیش از چندبار مدلسازی و تجزیه و تحلیل می‌شود و در آزمایشگاه محاسباتی، رفتار انرژی یا سایر رفتارهای جامعه که بر اساس داده‌های بزرگ مفید در دسترس است، ارزیابی و تایید می‌شود. به این ترتیب سناریوهای «چه می‌شود اگر» بر اساس قوانین از پیش تعریف شده «اگر، آنگاه» شبیه‌سازی می‌شوند. مانند سناریوهای اجتماعی فنی در سیستم انرژی برای حمل و نقل کم‌کربن [35]، سناریوهای اجتماعی فنی برای استفاده از سوخت هیدروژنی [36]، سناریوهای اجتماعی فنی برای بخش ذخیره توزیع شده الکتریسته [37]، سناریوهای اجتماعی فنی برای سیاست‌گذاری سیستم‌های الکتریسته در دوران گذار [38]، سناریوهای اجتماعی فنی برای پذیرش اجتماعی دوران گذار [39]، سناریوهای اجتماعی فنی برای جابه‌جایی^۲ در دوران گذار [40] و انواع دیگری از سناریوها و آنالیز سناریو [41] یا ترسیم چشم‌انداز اجتماعی فنی برای چالش‌های سرمایه‌گذاری کم‌کربن که افق زمانی این سناریوها از ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰ است. سپس راه حل بهینه در تعداد زیادی از آزمایشات محاسباتی پدید می‌آید تا یک مدل جامع از جامعه شامل اجتماعات انرژی با پاسخ‌های بلادرنگ به وجود آید و با اجرای موازی این سناریوها در سیستم مصنوعی و واقعی از سیستم‌های واقعی اجتماعی بازخورد گرفته می‌شود.

هنوز رویکرد موثر و پذیرفته‌شده‌ای برای مدلسازی سیستم‌های پیچیده اجتماعی و رفتاری انسان ارایه نشده است [42]، [43]. یک رویکرد امیدوارکننده می‌تواند مدلسازی‌های مبتنی بر عامل^۳ باشد. این نوع مدلسازی روشی برای شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده انرژی به‌ویژه در زمینه علوم رایانه و علوم اجتماعی و ناشی از «رفتار انطباقی و تعامل پویا بین عاملان» است و نتیجه یک برنامه‌ریزی قطعی مانند شبیه‌سازی‌های سنتی نیست. بنابراین، مدلسازی‌های مبتنی بر عامل می‌تواند برای جست‌وجوی سناریوها در آینده ممکن براساس رفتارهای سازگارانه یا انطباقی عوامل باشد و به این ترتیب پیشنهادهایی را برای آماده‌سازی برای آینده ممکن ارایه می‌دهد. در مدلسازی‌های مبتنی بر عامل برای سیستم‌های انرژی، عوامل بر معیارهای عینی و معیارهای مبتنی بر ارزش ذهنی استوار هستند و با وجود بازیگران مختلف، سناریوهای مختلف پیش‌بینی برای یک سیستم انرژی با توجه به معیارهای مختلف به کار گرفته و اصول این سناریوها نیز تدوین می‌شود. مدلسازی‌های مبتنی بر عامل برای شبیه‌سازی فناوری‌های تبدیل انرژی‌های تجدیدپذیر به الکتریسته می‌توانند استفاده شوند [21]. این نوع شبیه‌سازی برای غلبه بر پیچیدگی و پاسخ به چالش «کل بیشتر از مجموع اجزا» است و هدف عالی آن، مدلسازی پدیده‌های جمعی ناشی از تغییرات فرهنگی، ایجاد فضاهای همکاری، نوآوری، شکل‌گیری هنجار، انتشار فناوری در سیستم‌های اجتماعی اقتصادی است که هنوز کاملاً دست‌یافتنی نشده است. بری مثال آذر و الانصاری [44]، چارچوبی چندلایه برای مدلسازی مبتنی بر عامل^۴ پیشنهاد می‌دهند که ارتباطات اجتماعی را در شبکه‌های اجتماعی آنلاین و در دو سطح ساختمان و ساکنان با استفاده از مدل‌های معتبر پویایی رفتار انسانی و اجتماعی مدل و از این رهگذر، روش‌های مختلف بازخورد مصرف انرژی را آزمایش می‌کنند که این خود به کاهش ده درصدی مصرف انرژی منجر می‌شود.

نوع دیگری از مدلسازی، می‌تواند مبتنی بر جمع‌سپاری^۵ [9] باشد که در آن می‌توان از ظرفیت ارادی جامعه و نه لزوماً خبرگان برای شناسایی روندها، مفاهیم نوین، ایده‌ها و انتظارات انسان‌ها از آینده و مدل‌کردن آن در جهت توسعه ظرفیت بداهه سیستم استفاده کرد. ظرفیت ارادی جامعه به پنهان‌بودن مفهوم «انتخاب» [45] در فرایند جمع‌سپاری بازمی‌گردد و انتخاب وجهی است که مشارکت عموم را ذیل این مفهوم، به مشارکتی ارادی تبدیل می‌کند. ضمن این‌که داده‌های حاصل از جمع‌سپاری با هزینه کمتر، کیفیت بالاتر و در زمان کمتر گردآوری می‌شوند و گاهی نتایج رجوع به این

¹ petri-dish simulator

² Mobility

³ Agent-based Modeling: ABM

⁴ Multilayer Agent-Based Modeling

⁵ Crowdsourcing

داده‌ها از رجوع به پنل خبرگان دقیق‌تر بوده است. در زمینه انرژی این نوع داده‌ها می‌تواند از کنتورهای خانگی انرژی و ایستگاه‌های هواشناسی جمع‌آوری شود [42]. مدل‌سازی بر اساس این داده‌ها، پیش‌بینی‌های دقیق‌تری را از رفتار کاربر انرژی ارائه می‌دهد. به نظر می‌رسد؛ شبیه‌سازی مبتنی بر جمع‌سپاری زمینه پیش‌نگرشدن سیستم انرژی را فراهم می‌کند.

بخشی از سیستم M به تجزیه و تحلیل مفید داده‌های بزرگ انرژی مربوط است، رویکردها و الگوریتم‌هایی برگرفته از داده که با آگاهی موقعیتی^۱ کار می‌کنند و درکی از عناصر محیطی و پدیده‌ها با توجه به زمان یا فضا، درک معنی آن‌ها و تجسم وضعیت آینده آن‌ها دارند. با توجه به این‌که شبکه‌های برق آینده از نظر اندازه، بسیار عظیم و از نظر ساختار بسیار پیچیده خواهند بود و مجموعه حجمی از داده‌های بزرگ را تولید خواهند کرد، الگوریتم‌های مبتنی بر آگاهی موقعیتی، برای این شبکه‌های پیچیده با مجموعه داده‌های بزرگ مناسب هستند. این رویکردها مجموعه داده‌های بزرگ را به عنوان ماتریس‌های تصادفی بزرگ مدل‌سازی می‌کنند و نیازی به دانش در مورد پارامترهای مدل فیزیکی ندارند [46]. عدم قطعیت داده‌های بزرگ انرژی^۲ از پیچیدگی آن‌ها ناشی می‌شود. داده‌کاوی غیرقطعی و پرس‌وجوی داده‌های نادقیق (مبهم) برای برطرف کردن عدم قطعیت نیز قسمتی از وظایف سیستم M است.

بخش دیگری از سیستم M می‌تواند به شبیه‌سازی سیستم‌های انرژی آینده با کمک دق‌لوی دیجیتال^۳ اختصاص یابد. استفاده از دق‌لوی دیجیتال به شبیه‌سازی قسمت‌های مختلفی از سیستم‌های انرژی آینده که در سیستم S به تصویر کشیدیم کمک می‌کند. به این ترتیب یک محیط شبیه‌سازی برای ترکیب واحدهای مختلف تولید انرژی، ذخیره‌سازی و تقاضا در یک بستر یا پلتفرم واحد ایجاد می‌شود که می‌تواند با یک چارچوب کنترل خارجی به همان شیوه سیستم واقعی بین اجزا ارتباط برقرار کند. برای مثال سیستم‌های انرژی شبیه‌سازی شده برای یک ساختمان در شهر هوشمند می‌تواند شامل یک شبکه گرمایش بلوک آپارتمانی باشد که آن را تامین می‌کند و از مجموعه ایستگاه‌های شارژ وسایل نقلیه الکتریکی، مجموعه‌ای از پنل‌های خورشیدی، تعدادی از دوچرخه‌های الکتریکی و تیرهای چراغ برق، به همراه شبکه الکتریسته و شبکه گاز تشکیل شده است. هدف این است که دق‌لوی دیجیتال با سیستم واقعی جایگزین شوند [25].

سیستم M شامل مدل‌های بهینه‌سازی می‌تواند باشد که برای ارزیابی عملکردهای فناوری از جمله هزینه و کارایی [25] استفاده می‌شود. همچنین شبیه‌سازهایی برای آرایه مدل بار در سیستم‌های قدرت همراه با ذخیره انرژی در طولانی مدت [25]، مدل‌هایی برای شبیه‌سازی سلول‌های خورشیدی [42]، [44]، [50-47]، مدل‌هایی برای مطالعه سیستم‌های انرژی و تأثیرات زیست‌محیطی مرتبط با آن [51]، مدل‌های پویا برای مطالعه رفتار تولید برق [52] می‌توانند سیستم M را تشکیل دهند.

مدل‌سازی مبتنی بر هوش مصنوعی^۴ نیز بخش دیگری از سیستم M است [48]، [53]. بخشی دیگری از آن‌چه را که اجزای سیستم M است، می‌توان سامانه رصد آینده نامید که از طریق پویش محیطی، کلان‌روندها، روندها، مسایل نوظهور، نشانک‌های ضعیف تغییر و شگفتی‌سازها را برای سیستم‌های هوشمند انرژی شناسایی می‌کند و اثرات آن‌ها را بر روی سیستم S با حضور خبرگان بررسی می‌کند. ویژگی بارز این سامانه باید رصد دایمی و نظام‌مند محیط باشد. در این پژوهش ما با استفاده از روش پویش افق از طریق مطالعات کتابخانه‌ای بخشی از روندها، کلان‌روندها، مسایل

¹ SA: Situation Awareness

در علوم رایانه، داده‌های غیرقطعی داده‌هایی حاوی نویز هستند و باعث انحراف از مقادیر صحیح، مورد نظر و یا اصلی می‌شود. در عصر داده‌های بزرگ، عدم قطعیت و یا صحت داده‌ها یکی از ویژگی‌های تعیین‌کننده داده‌ها است. داده‌ها به طور مداوم از نظر حجم، تنوع، سرعت و عدم قطعیت (صحت) در حال رشد هستند. داده‌های غیرقطعی امروزه به وفور در وب،

شبکه‌های حسگر، درون شرکت‌ها و هم در منابع ساختاریافته و غیرساختاریافته یافت می‌شوند. برای مثال، ممکن است در مورد آدرس یک مشتری در مجموعه داده شرکت ابهام وجود داشته باشد، یا خواندن دما که توسط یک سنسور به علت قدمت سنسور به‌دست‌آمده باشد. (ویکی پدیا)

³ Digital twins

⁴ AI

نظهور و نشانک های ضعیف تغییر و شگفتی سازهایی که حاصل بررسی ۲۲۰ گزارش، مقاله و وبسایت است. تعیین نوع اطلاعات شامل روندها، کلان روندها، نشانک های ضعیف، مسایل ظهور و شگفتی سازها به تایید خبرگان رسیده است.



شکل ۴- طراحی سیستم M.
Figure 4- Design of the M system.

ویژگی مهم دیگر یک سیستم پیش نگر، اقدام محوری بودن آن به صورت بلادرنگ است و افکتورها در این جا نقشی اساسی دارد. بنابراین باید به این سوال پاسخ دهیم که چگونه افکتورهای E پویایی S را به روز می کنند؟ پاسخ این است که چون M مسیرهای پویایی سریع تری نسبت به S دارد؛ S می تواند از طریق اطلاعات M به روز شود. اما در مورد چستی اجزای سیستم E باید بگوییم، رفتارهای انرژی کاربران، بخشی از افکتورهای سیستم های انرژی هوشمند هستند

۳-۴- سیستم E

در این بخش به پاسخ این سوال می پردازیم که افکتورهای سیستم پیش نگر انرژی هوشمند یا سیستم E کدامند و چگونه به اقدام منجر می شوند. فناوری های دیجیتال، به ویژه اینترنت، آینده را به زمان حال پیوند می دهند، در این صورت، آینده در یک حال بسیط^۱ ادغام شده است [11]، رخدادها^۲ و تغییرات سرعت گرفته اند؛ بنابراین فرصت تصمیم سازی برای اقدام بلادرنگ به طرز چشم گیر کاهش یافته و اقدام بلادرنگ برای سیستم ها بیش از پیش دارای اهمیت شده است. کایلول [11] که درباره حوزه پیش نگر سیاسی^۳ می پژوهد، مشکلات هر نوع سیستم دست ساز انسان را جزء این دو دسته می داند: ۱- تقویت و افزایش ارتباط با واقعیت، ۲- بهبود ظرفیت سیستم در تبدیل اطلاعات به اقدام. به این معنی که سیستم های غیرزنده و ساخته دست انسان، در تائر از واقعیت و تاثیر بر واقعیت یا همان اقدام، دچار ضعف و تاخیر هستند. ما معتقدیم در نظر گرفتن انتظارات جامعه از آینده سیستم ها می تواند مشکلات سیستم های دست ساز انسان را تا حدودی برطرف کند و سیستم پیش نگر، می تواند راه حل کلیدی در این مسیر باشد تا اقدامات سیستم بلادرنگ صورت گیرد و مانع نابودی آن شود.

اقدامات بلادرنگ سیستم در سیستم های انرژی با تمرکز بر جنبه فنی و غفلت از جنبه های اجتماعی امکان پذیر نیست. فناوری و تجهیزات برای بهره وری سیستم انرژی لازم است؛ اما کافی نیست و مشارکت انسان حداقل به اندازه راه حل های فناورانه اهمیت دارد [54]. در این صورت، کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و گذار موفقیت آمیز به سمت آینده بدون سوخت فسیلی از طریق سیستم انرژی هوشمند، دارای فرایند اجتماعی فنی خواهد بود؛ اما اغلب نبود توجه به جنبه های اجتماعی و نادیده گرفتن رفتار انسان در این سیستم ها باعث بروز مشکلات و موانعی در تحقیقات و توسعه سیستم های در حال ظهور انرژی می شود [49]، [50]. به گمان ما پاسخ های اجتماعی فنی به مشکلات سیستم های انرژی که خود نیز اجتماعی فنی

¹ Enlarged present

² Events

³ Political anticipation

هستند، می‌تواند در قالب افکتورهای E برای سیستم پیش‌نگر انرژی هوشمند ایفای نقش کند و به اقدام بلادرنگ و مناسب منجر شود. چرا که به باور ما بخشی از مشکلات سیستم‌های انرژی به نادیده گرفتن انتظارات جامعه و انسان‌ها از آینده این سیستم‌ها باز می‌گردد. انتظارات انسان‌ها در جامعه، نماینده‌هایی از حالات آینده سیستم در زمان حال هستند و یک مکانیزم بازخورد در زمان به حساب می‌آیند. پیش‌نگری سرشار از در نظر گرفتن این انتظارات است، درواقع یک مکانیزم انتخاب بهترین آینده است که از منظر ادراک انسان عمل می‌کند و درک بیشتر انتظارات انسان منجر به افزایش ظرفیت پیش‌نگری سیستم خواهد شد. بنابراین برای کشف انتظارات جوامع از سیستم‌های انرژی آینده، بررسی مشکلات این سیستم‌های در حال ظهور و راه‌حل‌های اجتماعی فنی آن‌ها را ضروری یافتیم. راه‌حلی که اضافه بر رویکردهای از بالا به پایین، حس انسانی و جنبه اجتماعی این سیستم‌ها را در نظر می‌گیرند، همچنین رویکردهای فرارشته‌ای و مشارکت عمومی از پایین به بالا را تقویت می‌کنند. به عبارت بهتر برای پاسخ به انتظارات، نیاز به سیستم‌هایی از افکتورهای اجتماعی فنی داریم که از نظر ما همان راه‌حل‌های اجتماعی فنی مشکلات سیستم‌های انرژی در حال ظهور هستند. در ادامه همانند لومان از استعاره شبیه‌سازی جوامع مصنوعی استفاده می‌کنیم و انتظارات جامعه را به عنوان چشم‌اندازی برای یک آینده در نظر می‌گیریم. به این ترتیب محاسبات هیبریدی در سیستم‌های مرونوی، امکان ادغام بین انسان و رایانه را فراهم می‌آورد و این خود به تصمیم‌سازان و حتی عموم مردم کمک می‌کند تا در فرایند شکل‌گیری و مدلسازی M مشارکت کنند و پویایی سریع‌تر مدل M را نسبت به S رقم بزنند. مشارکت فعال تصمیم‌سازان و عموم مردم به معنی اتصال بیشتر بین M و S است، بنابراین تصمیم‌سازان بر این دو سیستم به واسطه افکتورها تاثیر می‌گذارند.

اجزای سیستم E حاصل تحلیل محتوای ۸۲ مقاله از میان ۲۰۰ مقاله منتشرشده در ده نشریه معتبر مربوط به حوزه انرژی است که بین سال‌های ۲۰۱۰ تا سال ۲۰۲۵ به چاپ رسیده‌اند و دارای رویکردهای میان و فرارشته‌ای با غلبه مباحث اجتماعی انرژی هستند. با جست‌وجو در ادبیات، دو نوع افکتور را برای سیستم پیش‌نگر انرژی هوشمند می‌توان ارایه کرد. اولین نوع افکتور از جنس استخراج تصاویر مشترک و انتظارات کاربران از آینده سیستم‌های انرژی [55]، تخیلات اجتماعی با پشتوانه فناوری، استفاده از داستان و روایت‌های پس‌نگرانه [56] است. دومین نوع افکتور، از نوع ابداعات اجتماعی در قالب جنبش‌های اجتماعی است مانند اجتماع‌های انرژی، انرژی اجتماع، دموکراسی انرژی [57]، [58] که پیکربندی‌های جدید اجتماعی را دنبال می‌کنند و سقلمه‌های سبز [59]، [60]. هر دو دسته افکتور بر مشارکت و تعامل کاربران تاکید دارند؛ اما نوع دوم ماهیتی کنش‌گرایانه‌تر^۱ دارند و فرصت جمعی برای «مشارکت ارادی» به حساب می‌آیند. نوع دوم در واقع شکل‌دادن پیکربندی جدیدی از روابط اجتماعی و تعامل بین کاربران است و به نوعی از «تجربه آینده» منجر می‌شوند. در نهایت هر دو نوع افکتور با سهمی بیش و کم، با افزایش ظرفیت بداهه سیستم بر مبنای مشارکت عموم، منجر به تشکیل یک سیستم انرژی پیش‌نگر می‌شوند.



شکل ۵- طراحی سیستم E .
Figure 5- Design of System E.

¹ More proactive

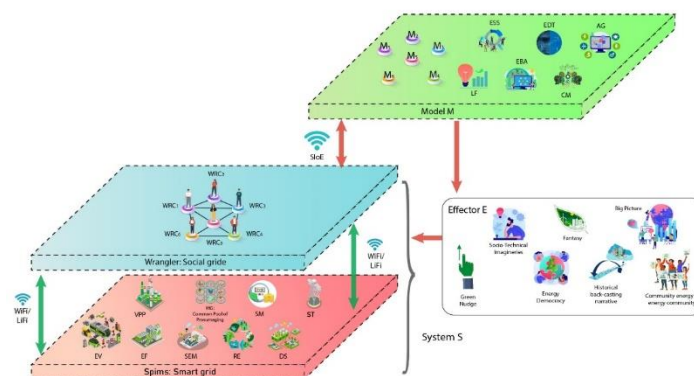
۵- بحث و نتایج گری

در مدیریت سیستم پیش‌نگر انرژی هوشمند که ویژگی‌های آن را بیان کردیم، سخن از مدیریت غیرمتمرکز و توزیع شده است. به این ترتیب تحقق سیستم پیش‌نگر انرژی نمی‌تواند از مسیر مدیریت یک هوش مرکزی بگذرد؛ زیرا مدیریت یک هوش مرکزی و انتخاب‌های مصنوعی اصل تنوع را نقض می‌کند و به این ترتیب تاب‌آوری کاهش می‌یابد و باعث افزایش احتمال فروپاشی سیستم انرژی تحت اثر تغییرات زیست‌بوم می‌شود. هوشمندی چنین سیستمی تابع هوشمندی عوامل سیستم و تعامل آن‌ها با هم و اراده برای مشارکت بیشینه است که از رهگذر توجه به انتظارات انسان‌ها در جامعه می‌گذرد. بیشینه‌بودن نقش اراده در مشارکت، عملکرد سیستم E را بهینه خواهد کرد و تکامل خواهد داد و درک بیشتر انتظارات انسان به افزایش ظرفیت پیش‌نگری سیستم و شکل‌گیری شبکه ارتباطات منجر خواهد شد. سیستم انرژی زمانی به یک سیستم پیش‌نگر تبدیل می‌شود که ارتباطات بین سه زیرسیستم باعث اقدام شود. مشارکت ارادی و تجربه آینده از طریق تخیل اجتماعی راهی برای نزدیک‌شدن سیستم به اقدام‌محوری و در نتیجه پیش‌نگر شدن است.

بنابراین، دال مرکزی شکل‌گیری سیستم پیش‌نگر انرژی، بیشینه‌بودن مشارکت ارادی در جوامع کاربری انرژی است. به این ترتیب اجزای این شبکه هر یک اجتماعات کاربرانی هستند که برای شکل‌گیری شبکه ارتباطات لازم است درکی همگانی از آینده سیستم‌های انرژی داشته باشند و سیستم E را سامان دهند؛ درکی در دو سطح اجتماعی. اولین سطح، درک در سطح یک اجتماع کاربران انرژی با در نظر گرفتن انتظارات آن‌ها و سطح دوم، درک در میان اجتماعات کاربران با توجه به انتظارات اجتماعی و جمعی که منجر به شکل‌گیری شبکه ارتباطات کاربران و جوامع انرژی آن‌ها می‌شود.

به گفته روزن نظریه سیستم پیش‌نگر می‌تواند مبنای پارادایم پیش‌نگری به‌عنوان پارادایم حاکم بر سیستم‌های آینده از جمله سیستم‌های انرژی در حال ظهور باشد. زمانی که دانستن همان اقدام است، آینده در زمان حال تجربه می‌شود و به عبارت دیگر آینده در حال بسیط ادغام می‌شود. جوامع، شبکه‌ای و با اینترنت اشیا به هم وصل می‌شوند و بر مبنای مشارکت ارادی جمعی و جمع‌سپاری رفتار می‌کنند و در واقع جوامع همان رایانه‌ها خواهند بود. به عبارت دیگر بیشینه درجه ادغام ماشین و انسان اتفاق می‌افتد. سیستم‌های انرژی به معنای واقعی اجتماعی فنی هستند. موجودیت‌های موجود در این سیستم‌ها، امپراتوران کوچکی هستند که بر مبنای جمع‌سپاری تولید صرف‌ذخیره‌کننده^۱ انرژی هستند.

جمع‌سپاری و مشارکت کاربران باعث ایجاد بیشینه ظرفیت پیش‌نگری توزیع‌شده خواهد بود، رفتار پیش‌نگر، رفتار ثابت کاربران سیستم خواهد شد و به این ترتیب سیستم‌های انرژی، سیستم‌هایی پیش‌نگر خواهند بود. به این ترتیب مواجهه با پیچیدگی‌های سیستم‌های انرژی آینده با رویکردهای فرارشته‌ای و از پایین به بالا اتفاق خواهد افتاد که در محیط‌های دارای عدم قطعیت بالا با روابطی از مدل‌ها و انتخاب بهترین راه با رفتار پیش‌نگری همراه خواهد بود.



شکل ۶- نمایشی فرضی از سیستم پیش‌نگر انرژی هوشمند.

Figure 6- A conceptual view of an intelligent, proactive energy system.

¹ Prosumagers= Producer+consumer + Storage

منابع

- [1] Bale, C. S. E., Varga, L., & Foxon, T. J. (2015). Energy and complexity: New ways forward. *Applied energy*, 138, 150–159. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.057>
- [2] Houwing, M., Heijnen, P., & Bouwmans, I. (2006). Socio-technical complexity in energy infrastructures conceptual framework to study the impact of domestic level energy generation, storage and exchange. *2006 IEEE international conference on systems, man and cybernetics*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2006.384515>
- [3] Houwing, M., Negenborn, R. R., Ilic, M. D., & De Schutter, B. (2009). Model predictive control of fuel cell micro cogeneration systems. *2009 international conference on networking, sensing and control*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICNSC.2009.4919364>
- [4] Rosen, J., & Kineman, J. J. (2005). Anticipatory systems and time: A new look at Rosennean complexity. *Systems research and behavioral science: The official journal of the international federation for systems research*, 22(5), 399–412. <https://doi.org/10.1002/sres.715>
- [5] van Duijne, F., & Bishop, P. (2018). *Introduction to strategic foresight*. https://www.futuremotions.nl/wp-content/uploads/2018/01/FutureMotions_introductiondoc_January2018.pdf
- [6] Kowalski, J., Biele, C., Mlodozieniec, M., & Geers, M. (2018). Significance of social factors for effective implementation of smart energy management systems in end-user households. *Intelligent human systems integration* (pp. 119–124). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73888-8_20
- [7] Rhodes, D. H., & Ross, A. M. (2009). Anticipatory capacity: Leveraging model-based approaches to design systems for dynamic futures. *2009 international conference on model-based systems engineering* (pp. 46–51). IEEE. <https://doi.org/10.1109/MBSE.2009.5031719>
- [8] Ahvenharju, S. (2022). *Futures consciousness as a human anticipatory capacity – definition and measurement* [Thesis]. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-29-8892-1>
- [9] Nadin, M. (2015). *Anticipation across disciplines*. Springer International Publishing. <https://books.google.com/books?id=HxKcCgAAQBAJ>
- [10] Nadin, M. (2012). The anticipatory profile. An attempt to describe anticipation as process. *International journal of general systems*, 41(1), 43–75. <https://doi.org/10.1080/03081079.2011.622093>
- [11] Caillol, M. H. (2016). Political anticipation and networks: Creating anticipatory systems for government and society. In *Anticipation across disciplines* (pp. 379–391). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22599-9_22
- [12] Dubois, D. M. (2000). Review of incursive, hyperincursive and anticipatory systems-foundation of anticipation in electromagnetism. *AIP conference proceedings* (Vol. 517, pp. 3–30). American Institute of Physics (AIP). <https://doi.org/10.1063/1.1291243>
- [13] Fuller, T. (2017). Anxious relationships: The unmarked futures for post-normal scenarios in anticipatory systems. *Technological forecasting and social change*, 124, 41–50. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.07.045>
- [14] Poli, R. (2010). The many aspects of anticipation. *Foresight*, 12(3), 7–17. <https://doi.org/10.1108/14636681011049839>
- [15] Louie, A. H. (2010). Robert Rosen's anticipatory systems. *Foresight*, 12(3), 18–29. <https://doi.org/10.1108/14636681011049848>
- [16] Zamenopoulos, T., & Alexiou, K. (2020). Collective design anticipation. *Futures*, 120, 102563. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2020.102563>
- [17] Ostrom, E. (1990). *Governing the commons: The evolution of institutions for collective action*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807763>
- [18] Rosen, R. (2012). Anticipatory Systems. In *Anticipatory systems: Philosophical, mathematical, and methodological foundations* (pp. 313–370). New York, NY: Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1269-4_6
- [19] Rosen, R. (1974). Planning, management, policies and strategies: four fuzzy concepts. *International journal of general systems*, 1(4), 245–252. <https://doi.org/10.1080/03081077408960784>
- [20] Zackery, A. (2017). *Anticipatory system design based on concepts and tools derived from complexity science* [Thesis]. (In Persian). <https://ut.ac.ir/fa/thesis/62410/>
- [21] Gao, H., Liu, J., Wang, L., & Wei, Z. (2018). Decentralized energy management for networked microgrids in future distribution systems. *IEEE transactions on power systems*, 33(4), 3599–3610. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2773070>
- [22] Raimi, D., Zhu, Y., Newell, R. G., & Prest, B. C. (2024). *Global energy outlook 2024: Peaks or plateaus*. https://media.rff.org/documents/Report_24-06.pdf
- [23] Le, M. H., & Ploix, S. (2017). Robust anticipative energy management system: Application of a smart building platform. *Building services engineering research and technology*, 38(2), 226–248. <https://doi.org/10.1177/0143624416669832>
- [24] Yenginer, H., Cetiz, C., & Dursun, E. (2015). A review of energy management systems for smart grids. *2015 3rd international istanbul smart grid congress and fair (ICSG)* (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SGCF.2015.7354918>
- [25] Reka, S. S., & Dragicevic, T. (2018). Future effectual role of energy delivery: A comprehensive review of Internet of Things and smart grid. *Renewable and sustainable energy reviews*, 91, 90–108. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.089>
- [26] Hadi, S., & Alfiansih, L. M. D. (2025). Integration of Blockchain and internet of things in decentralized energy systems to enhance efficiency and renewable energy sustainability. *International journal for science review*, 2(6), 429–440. <https://doi.org/10.71364/ijfsr.v2i6.58>

- [27] Sterling, B. (2005). *Shaping things*. MIT Press. <https://mitpress.mit.edu/9780262693264/shaping-things>
- [28] Sæle, H., Morch, A. Z., Rikos, E., Canevese Silvia Maria, S. M., & Kosmecki IEN, M. (2018). Utilization of distributed energy resources' flexibility in power system operation – evaluation of today's status and description of a future concept. *2018 53rd international universities power engineering conference (UPEC)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/UPEC.2018.8541913>
- [29] van Summeren, L. F. M., Wieczorek, A. J., Bombaerts, G. J. T., & Verbong, G. P. J. (2020). Community energy meets smart grids: Reviewing goals, structure, and roles in Virtual Power Plants in Ireland, Belgium and the Netherlands. *Energy research & social science*, 63, 101415. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.101415>
- [30] Morfeldt, J., Shoman, W., Johansson, D. J. A., Yeh, S., & Karlsson, S. (2022). If electric cars are good for reducing emissions, they could be even better with electric roads. *Environmental science & technology*, 56(13), 9593–9603. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c00018>
- [31] Anthony Jr., B. (2025). Distributed energy prosumer communities and the application of emerging technologies: A systematic literature review. *Sustainable futures*, 9, 100794. <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2025.100794>
- [32] Agyeman, J., & McLaren, D. (2017). Sharing cities. *Environment: Science and policy for sustainable development*, 59(3), 22–27. <https://doi.org/10.1080/00139157.2017.1301168>
- [33] Luo, D., Liu, J., Wu, H., Zhang, G., Pan, Z., & Huang, J. (2025). Advancing smart net-zero energy buildings with renewable energy and electrical energy storage. *Journal of energy storage*, 114, 115850. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115850>
- [34] Wang, Z., Wennersten, R., & Sun, Q. (2017). Outline of principles for building scenarios – Transition toward more sustainable energy systems. *Applied energy*, 185, 1890–1898. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.062>
- [35] Magnusson, T., Anderberg, S., Dahlgren, S., & Svensson, N. (2020). Socio-technical scenarios and local practice – Assessing the future use of fossil-free alternatives in a regional energy and transport system. *Transportation research interdisciplinary perspectives*, 5, 100128. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2020.100128>
- [36] McDowall, W. (2014). Exploring possible transition pathways for hydrogen energy: A hybrid approach using socio-technical scenarios and energy system modelling. *Futures*, 63, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2014.07.004>
- [37] Grünewald, P. H., Cockerill, T. T., Contestabile, M., & Pearson, P. J. G. (2012). The socio-technical transition of distributed electricity storage into future networks—System value and stakeholder views. *Energy policy*, 50, 449–457. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.07.041>
- [38] Rogge, K. S., Pfluger, B., & Geels, F. W. (2020). Transformative policy mixes in socio-technical scenarios: The case of the low-carbon transition of the German electricity system (2010–2050). *Technological forecasting and social change*, 151, 119259. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.04.002>
- [39] Geels, F. W., McMeekin, A., & Pfluger, B. (2020). Socio-technical scenarios as a methodological tool to explore social and political feasibility in low-carbon transitions: Bridging computer models and the multi-level perspective in UK electricity generation (2010–2050). *Technological forecasting and social change*, 151, 119258. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.04.001>
- [40] Wangel, J., Gustafsson, S., & Svane, Ö. (2013). Goal-based socio-technical scenarios: Greening the mobility practices in the Stockholm City District of Bromma, Sweden. *Futures*, 47, 79–92. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2013.01.005>
- [41] Melander, L., Dubois, A., Hedvall, K., & Lind, F. (2019). Future goods transport in Sweden 2050: Using a Delphi-based scenario analysis. *Technological forecasting and social change*, 138, 178–189. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.08.019>
- [42] Baillargeon, P., Yoon, J., & Zhang, A. (2025). Who puts the “social” in “social computing”? Using a neurodiversity framing to review social computing research. *Proceedings of the acm on human-computer interaction* (Vol. 9, pp. 1–44). New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3711106>
- [43] Wang, F. Y., Carley, K. M., Zeng, D., & Mao, W. (2007). Social computing: From social informatics to social intelligence. *IEEE intelligent systems*, 22(2), 79–83. <https://doi.org/10.1109/MIS.2007.41>
- [44] 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), 4017007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000651](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000651)
- [45] Howe, J. (2006). The rise of crowdsourcing. *Wired*, 14(6), 176–183. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1573387449825400704>
- [46] Liang, Y., Zhao, J., & Srinivasan, D. (2025). Handling and application of big data in modern power systems for situational awareness and operation. *Smart cyber-physical power systems: Solutions from emerging technologies*, 2, 209–253. <https://doi.org/10.1002/9781394334599.ch10>
- [47] Bayrak, F. (2025). Prediction of photovoltaic panel cell temperatures: Application of empirical and machine learning models. *Energy*, 323, 135764. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135764>
- [48] Alvarez, D. I., González-Ladrón-de-Guevara, F., Rojas Espinoza, J., Borge-Diez, D., Galindo, S. P., & Flores-Vázquez, C. (2025). The evolution of AI applications in the energy system transition: A bibliometric analysis of research development, the current state and future challenges. *Energies*, 18(6), 1523. <https://doi.org/10.3390/en18061523>
- [49] Reusswig, F., Komendantova, N., & Battaglini, A. (2018). New governance challenges and conflicts of the energy transition: Renewable electricity generation and transmission as contested socio-technical options. In *The geopolitics of renewables* (pp. 231–256). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67855-9_9
- [50] Hoppe, T., & De Vries, G. (2019). Social innovation and the energy transition. *Sustainability*, 11(1), 1–13. <https://doi.org/10.3390/su11010141>

- [51] Lee, D. H., Park, S. Y., Hong, J. C., Choi, S. J., & Kim, J. W. (2013). Analysis of the energy and environmental effects of green car deployment by an integrating energy system model with a forecasting model. *Applied energy*, 103, 306–316. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.09.046>
- [52] Shahmohammadi, M. S., Mohd. Yusuff, R., Keyhanian, S., & Shakouri G., H. (2015). A decision support system for evaluating effects of Feed-in Tariff mechanism: Dynamic modeling of Malaysia's electricity generation mix. *Applied energy*, 146, 217–229. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.076>
- [53] Ukoba, K., Olatunji, K. O., Adeoye, E., Jen, T. C., & Madyira, D. M. (2024). Optimizing renewable energy systems through artificial intelligence: Review and future prospects. *Energy & environment*, 35(7), 3833–3879. <https://doi.org/10.1177/0958305X241256293>
- [54] Dunphy, N. P., & Lennon, B. (2022). Whose transition?: A review of citizen participation in the energy system. In *Routledge handbook of energy transitions*. Taylor & Francis. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/oa-edit/10.4324/9781003183020-30>
- [55] Batel, S. (2018). A critical discussion of research on the social acceptance of renewable energy generation and associated infrastructures and an agenda for the future. *Journal of environmental policy & planning*, 20(3), 356–369. <https://doi.org/10.1080/1523908X.2017.1417120>
- [56] Biresselioglu, M. E., Nilsen, M., Demir, M. H., Røyrvik, J., & Koksvik, G. (2018). Examining the barriers and motivators affecting European decision-makers in the development of smart and green energy technologies. *Journal of cleaner production*, 198, 417–429. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.308>
- [57] Wahlund, M., & Palm, J. (2022). The role of energy democracy and energy citizenship for participatory energy transitions: A comprehensive review. *Energy research & social science*, 87, 102482. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102482>
- [58] Delina, L. L. (2018). Energy democracy in a continuum: Remaking public engagement on energy transitions in Thailand. *Energy research & social science*, 42, 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.03.008>
- [59] Schubert, C. (2017). Green nudges: Do they work? Are they ethical? *Ecological economics*, 132, 329–342. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.11.009>
- [60] Gaddi, M. (2025). The role and potential of green nudges as a normative tool for sustainability policies: Bridging the gap between theory and practice. *Euro-balkan law and economics review*, (1), 52–94. <https://doi.org/10.15162/2612-6583/2109>