



The University of Tehran Press

Classification of Energy Foresight Methods: A Framework for Renewable Energy Transitions

Sara Mahmoodian Younesi¹ | Majid Zandi^{2*}

1. Phd. Student, Department of Renewable Energies Engineering, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran. Email: s_mahmoodian@sbu.ac.ir

2. Corresponding Author, Associate Professor, Department of Renewable Energies Engineering, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran. Email: m_zandi@sbu.ac.ir

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Article type: Research Paper	In the twenty first century, energy systems are undergoing a profound transformation as renewable energy sources increasingly replace fossil fuels. Effective energy foresight methods are essential for managing this transition, addressing challenges such as supply-demand dynamics, investment planning, and policy formulation. This study reviews and categorizes various energy foresight models based on multiple criteria, including geographical scope, time horizon, sectoral coverage, analytical approach, accessibility, and data requirements. By analyzing previous studies, we identify key methodologies such as predictive modeling, scenario analysis, back casting, and hybrid approaches, highlighting their applications in energy transition planning. Special attention is given to the role of foresight models in accelerating renewable energy adoption and optimizing its integration into future energy systems. This study emphasizes that a comprehensive understanding of different foresight models is crucial for shaping sustainable and resilient energy policies in the face of growing environmental and economic challenges.
Article History: Received 01 February 2025 Revised 19 March 2025 Accepted 28 April 2025 Published Online 23 August 2025	
Keywords: Renewable energy, Energy foresight methods, Energy transition.	
Cite this article: Mahmoodian Younesi, S. & Zandi, M. (2025). Classification of Energy Foresight Methods: A Framework for Renewable Energy Transitions. <i>Journal of Sustainable Energy Systems</i> , 4 (4), 445-461. DOI: http://doi.org/10.22059/ses.2025.392339.1130	
 © Sara Mahmoodian Younesi, Majid Zandi Publisher: University of Tehran Press. DOI: http://doi.org/10.22059/ses.2025.392339.1130	

Introduction

In the twenty first century, energy systems are undergoing a fundamental transformation as renewable energy sources increasingly replace fossil fuels. This shift is driven by the need to address environmental challenges and meet growing global energy demands. Effective energy foresight and assessment methods are essential to manage this transition, ensuring optimal resource allocation, energy security, and policy formulation. This study explores various energy foresight models, categorizing them based on criteria such as geographical coverage, time horizon, sectoral coverage, analytical approach, and data requirements. By analyzing these models, the research aims to provide a comprehensive framework for understanding and implementing energy foresight systems that support the transition to sustainable energy systems.

Methodology

The study categorizes energy foresight models based on several key criteria: geographical coverage (global, regional, national, local, and project-specific), time horizon (short-term, medium-term, long-term), sectoral coverage (single-sector vs. multi-sector), and analytical approach (top-down, bottom-

up, hybrid). Additionally, models are classified based on their accessibility (commercial, proprietary, open-code, open-access), spatial resolution (single-node vs. multi-node), and data requirements (qualitative, quantitative, hybrid). The research also examines advanced methods such as predictive modeling, scenario analysis, backcasting, and dynamic approaches, as well as innovative techniques like system dynamics, agent-based modeling, and Bayesian networks. These methods are evaluated for their applicability in addressing the complexities of modern energy systems.

Key Results

The findings reveal that energy foresight models vary significantly in their scope, complexity, and application. Top-down models are effective for macroeconomic policy analysis but lack detailed technical insights, while bottom-up models provide a granular view of energy systems but may overlook broader economic impacts. Hybrid models, combining both approaches, offer a balanced perspective. Advanced methods like machine learning and system dynamics are particularly useful for handling non-linear relationships and uncertainties in energy systems. The study also highlights the importance of integrating qualitative and quantitative data to improve the accuracy and applicability of energy foresight models. Overall, the research underscores the need for tailored approaches based on specific energy system characteristics and policy goals.

Conclusion

Energy foresight models are indispensable tools for guiding the transition to renewable energy systems. This study demonstrates that a comprehensive understanding of various foresight methods, categorized by geographical, temporal, and analytical criteria, is essential for effective energy planning and policy-making. The integration of advanced techniques, such as machine learning and system dynamics, can enhance the accuracy and robustness of energy models, enabling better decision-making in the face of growing environmental and economic challenges. Future research should focus on developing hybrid modeling approaches and leveraging data analytics to further improve the precision and applicability of energy foresight systems, ultimately supporting the global transition to a sustainable and resilient energy future.



انتشارات دانشگاه تهران

فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: <https://ses.ut.ac.ir>

شاپا الکترونیک: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

دسته‌بندی انواع روش‌های رصد و پایش انرژی چارچوبی برای گذار به انرژی‌های تجدیدپذیر

سارا محمودیان یونسی^۱ | مجید زندی^{۲*}

۱. دانشجوی دکترای مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، لابراتوار مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: s_mahmoodian@sbu.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، دانشیار، لابراتوار مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: m_zandi@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۰۱

کلیدواژه:

انرژی‌های تجدیدپذیر،

روش‌های رصد انرژی،

گذار انرژی.

در قرن بیست و یکم، سامانه‌های انرژی دستخوش تغییر اساسی شده‌اند و منابع تجدیدپذیر به طور فزاینده‌ای جایگزین سوخت‌های فسیلی می‌شوند. برای مدیریت این گذار انرژی، به‌کارگیری روش‌های کارآمد رصد و پایش انرژی ضروری است تا چالش‌هایی مانند پویایی عرضه و تقاضا، برنامه‌ریزی سرمایه‌گذاری و تدوین سیاست‌ها به‌درستی مدیریت شوند. در این پژوهش، بررسی و دسته‌بندی مدل‌های مختلف رصد و پایش انرژی براساس معیارهایی همچون پوشش جغرافیایی، افق زمانی، پوشش بخشی، رویکرد تحلیلی، میزان دسترسی و نیازهای داده‌ای انجام شده است. با تحلیل مطالعه‌های پیشین، روش‌های کلیدی مانند مدل‌سازی پیش‌بینی، تحلیل سناریو، برگشت به عقب و رویکردهای دینامیکی شناسایی شده و کاربردهای آن‌ها در برنامه‌ریزی گذار انرژی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این مطالعه تأکید دارد که درک جامع از مدل‌های مختلف رصد انرژی، عاملی کلیدی در تدوین سیاست‌های پایدار و مقاوم در برابر چالش‌های زیست‌محیطی و اقتصادی روزافزون خواهد بود.

استناد: محمودیان یونسی، سارا و زندی، مجید (۱۴۰۴). دسته‌بندی انواع روش‌های رصد و پایش انرژی؛ چارچوبی برای گذار به انرژی‌های تجدیدپذیر. فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار، ۴ (۴) ۴۴۵-۴۶۱.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.392339.1130>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© سارا محمودیان یونسی، مجید زندی

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.392339.1130>



۱. مقدمه

امروزه، به دلیل افزایش جمعیت جهانی و تغییر نگرش در افزایش سهم منابع انرژی جدید در سبد انرژی بشر برای آینده، استفاده از منابع حیاتی برای بشر به‌خصوص منابع اولیه انرژی جدید بسیار افزایش یافته است. پیش‌بینی شده است که جمعیت جهان تا سال ۲۰۵۰ میلادی به نه و نیم میلیارد نفر خواهد رسید. این رشد جمعیت، باعث افزایش حجم سبد انرژی جهانی خواهد شد. از یک‌سو، این افزایش حجم سبد انرژی جهانی، علاوه بر آثار منفی زیست‌محیطی، چالش‌هایی در زمینه تأمین این منابع انرژی را باعث می‌شود. از سوی دیگر، حجم‌تر شدن سبد انرژی مصرفی جهان، باعث افزایش آلاینده‌ها، زیاده‌تر شدن انتشار گازهای گلخانه‌ای، افزایش گرمای جهانی و دیگر چالش‌های زیست‌محیطی در کره زمین خواهد شد.

بسیاری از کشورهای جهان در گذار انرژی و حرکت به سمت افزایش سهم منابع انرژی پاک یا کمترآلاینده در سبد انرژی خود هستند. تدوین اسناد توسعه و یا اعمال سیاست‌های مختلف از جمله گام‌های لازم برای تعیین تنوع این سبد انرژی است. به عنوان مثال، کشور چین که یکی از منابع مهم اولیه انرژی آن زغال‌سنگ است، در حال حرکت به سمت افزایش سهم گاز طبیعی در سبد انرژی خود طبق برنامه‌های توسعه ۵ ساله برای کاهش ردپای کربن در انرژی مصرفی خود است.

در میانه قرن بیست و یکم، انرژی به عنوان نیروی محرکه اقتصادها و جوامع جهانی در حال دگرگونی اساسی است. در حالی که نیاز کشورهای مختلف به انرژی همواره در حال افزایش است، منابع انرژی تجدیدپذیر با سرعتی بی‌سابقه جایگزین سوخت‌های فسیلی می‌شوند. علاوه بر این، سازمان بین‌المللی انرژی گزارش جامعی در مورد به‌کارگیری مدل‌های انرژی، سناریوها و فرض‌های آن‌ها منتشر کرده است [۱].

مطالعه حاضر به دنبال پاسخ‌گویی به این سؤال است که چگونه می‌توان مدل‌های رصد انرژی را به صورت سیستماتیک دسته‌بندی کرد تا بهینه‌ترین روش برای سیاست‌گذاری در گذار به انرژی‌های تجدیدپذیر شناسایی شود. هدف این مقاله، مروری جامع بر انواع روش‌های رصد انرژی و ارائه یک چارچوب برای دسته‌بندی مدل‌های رصد انرژی بر اساس معیارهای کاربردی و بررسی قوت‌ها و ضعف‌های این روش‌ها است.

۲. روش‌شناسی

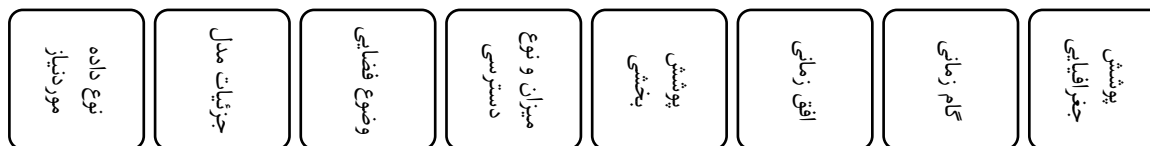
این پژوهش با استفاده از نوعی روش‌شناسی نظام‌مند به بررسی و دسته‌بندی مدل‌های رصد انرژی می‌پردازد. در گام اول، با مرور سیستماتیک ادبیات موضوع، مدل‌های مختلف انرژی از منابع معتبر علمی استخراج شدند. معیارهای انتخاب مقالات شامل انتشار در بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۴، تمرکز بر انرژی‌های تجدیدپذیر و داشتن ارزیابی تجربی یا کیفی بود. در این فرایند، پایگاه‌های داده Scopus و Web of Science به عنوان منابع اصلی مورد استفاده قرار گرفتند.

برای دسته‌بندی مدل‌ها، چارچوبی جامع مبتنی بر شش معیار اصلی توسعه داده شد. این معیارها شامل پوشش جغرافیایی (جهانی، منطقه‌ای، ملی)، افق زمانی (کوتاه‌مدت، میان‌مدت، بلندمدت)، پوشش بخشی (تک‌بخشی، چندبخشی)، رویکرد تحلیلی (بالا به پایین، پایین به بالا، ترکیبی)، نوع داده (کیفی، کمی، ترکیبی) و سطح دسترسی (تجاری، متن باز) می‌شدند. هر مدل بر اساس این معیارها ارزیابی شد و در گروه مربوطه قرار گرفت. در مرحله بعد، مدل‌های انتخاب‌شده با استفاده از روش تحلیل محتوا مورد بررسی دقیق قرار گرفتند. این تحلیل شامل ارزیابی مزایا، معایب، دقت پیش‌بینی و انعطاف‌پذیری هر مدل بود.

۲-۱. انواع دسته‌بندی مدل‌های رصدی

طبق پژوهش‌های انجام‌گرفته تا کنون، مدل‌های ریاضی آینده‌نگری توسعه‌یافته در حوزه انرژی می‌تواند با توجه به دیدگاه‌های مختلف دسته‌بندی شود. این دسته‌بندی می‌تواند براساس پوشش جغرافیایی، گام زمانی، افق زمانی، پوشش بخشی، روش تحلیلی، میزان و نوع دسترسی، وضوح فضایی، هدف عمومی، هدف ویژه و براساس جزئیات مدل (سفید، سیاه، خاکستری) و نوع داده مورد نیاز انجام شود. این دسته‌بندی در شکل ۱ قابل مشاهده است.

دسته‌بندی مدل‌های رصدی براساس:



شکل ۱. دسته‌بندی مدل‌های رصدی

• مدل‌های رصدی براساس پوشش جغرافیایی

مدل‌های آینده‌نگری توسعه‌یافته در حوزه انرژی، براساس پوشش جغرافیایی به انواع مدل‌های انرژی جهانی، مدل‌های انرژی منطقه‌ای، مدل‌های انرژی ملی، مدل‌های انرژی محلی و مدل‌های انرژی پروژه‌ای، بسته به منطقه‌ای که حوزه جغرافیایی مورد نظر را پوشش می‌دهد، قابل تقسیم‌بندی است [۲].

• دسته‌بندی مدل‌های رصدی براساس گام زمانی

یک دسته‌بندی برای مدل‌های ریاضی آینده‌نگری توسعه‌یافته در حوزه انرژی، دسته‌بندی براساس گام زمانی است. گام زمانی واضح در یک مدل می‌تواند از میلی‌ثانیه، ثانیه، دقیقه، ساعت، هفته، سال و حتی دهه در نظر گرفته شود. گام زمانی گاهی در مدل‌ها و در خود نرم‌افزار کدگذاری شده است، اما در برخی مواقع می‌تواند به عنوان یکی از ورودی‌های متغیر توسط کاربر تعریف شود. گام زمانی یک مدل به طور ویژه اهمیت دارد، زیرا می‌تواند محدودیت‌هایی در انتخاب روش مدل‌سازی ایجاد کند. این امر به‌ویژه در سامانه‌هایی که نسبت بالایی از منابع انرژی تجدیدپذیر دارند، بسیار مهم است. دلیل این اهمیت، عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر مانند خورشید و باد است.

• دسته‌بندی مدل‌های رصدی براساس افق زمانی

به طور کلی، در انواع روش‌های مدل‌سازی، هیچ تعریف دقیقی از طبقه‌بندی انواع افق زمانی وجود ندارد. در اغلب موارد، به طور دلخواه یک چارچوب برای افق زمانی تعریف می‌شود. در تعاریف رایج‌تر، انواع افق زمانی به صورت زیر تعریف شده است [۳].

✓ افق زمانی کوتاه‌مدت: ۵ سال یا کمتر

✓ افق زمانی میان‌مدت: بین ۵ تا ۱۵ سال

✓ افق زمانی بلندمدت: بیش از ۱۵ سال

در برخی مدل‌های آینده‌نگری توسعه‌یافته در حوزه انرژی، افق زمانی ممکن است توسط کاربر تعریف شود؛ اما برخی مدل‌ها ممکن است فقط توانایی مدل‌سازی یک افق زمانی مشخص را داشته باشند.

• دسته‌بندی مدل‌های رصدی براساس پوشش بخشی

در دسته‌بندی مدل‌های آینده‌نگری توسعه‌یافته در حوزه انرژی براساس پوشش بخشی^۱، مدل‌ها به انواع تک‌بخشی و چندبخشی تقسیم می‌شوند. مدل‌های تک‌بخشی، فقط امکان مدل‌سازی یک بخش در حوزه انرژی را دارند، اما مدل‌های چندبخشی، می‌توانند به طور هم‌زمان چند بخش را مدل کنند [۴].

• دسته‌بندی مدل‌های رصدی براساس میزان و نوع دسترسی

مدل‌های آینده‌نگری توسعه‌یافته در حوزه انرژی را می‌توان براساس میزان و نوع دسترسی به هر مدل، دسته‌بندی کرد. بر اساس سطح دسترسی، این مدل‌ها به چهار دسته تجاری، اختصاصی^۲، کد باز^۳ و دسترسی باز^۴ قابل تقسیم‌بندی است.

1. Sectoral coverage

2. Proprietary

3. Open code

4. Open access

• دسته‌بندی مدل‌های رصدی بر اساس وضوح فضایی

در دسته‌بندی مدل‌های آینده‌نگری توسعه‌یافته در حوزه انرژی، مدل‌ها براساس وضوح فضایی به دو دسته تک‌گره‌ای^۱ و چندگره‌ای^۲ قابل تقسیم است. یک مدل سامانه انرژی تک‌گره‌ای، دارای محدودیت‌های داخلی در انتقال هیچ نوع انرژی نیست. یک نمونه از انواع انرژی که گلوگاه و محدودیت ایجاد می‌کند، انرژی الکتریکی است که در آن محدودیت‌هایی در انتقال و توزیع ایجاد می‌شود. یک مثال دیگر می‌تواند توزیع گاز طبیعی یا با در نظر گرفتن سهم سایر هیدروکربن‌ها باشد. یک مدل سامانه انرژی تک‌گره‌ای، یک سامانه انتقال ایده‌آل بدون گلوگاه یا تلفات را در نظر می‌گیرد. استفاده از این نوع مدل‌ها باعث ایجاد برخی ساده‌سازی‌ها و در نتیجه، برخی از خطاها می‌شود. این خطاها زمانی که مدل سامانه انرژی مناطق محلی را توصیف می‌کند، اغلب کم است، اما زمانی که مدل در سطح ملی یا گسترده‌تر اعمال شود، افزایش می‌یابد [۴].

• دسته‌بندی مدل‌های رصدی براساس جزئیات مدل

در یک دیدگاه، مدل‌های آینده‌نگری توسعه‌یافته در حوزه انرژی، ابزارهای مدل‌سازی براساس جزئیات مدل دسته‌بندی شده است [۵]. این دسته‌بندی شامل سه دسته مدل‌های جعبه سفید^۳، جعبه سیاه^۴ و جعبه خاکستری^۵ است. تعریف این سه دسته به شرح زیر است:

✓ **مدل‌های جعبه سفید:** مدل‌های قرارگرفته در این دسته به طور کامل براساس فیزیک و ویژگی‌های به طور کامل شفاف موضوع، بررسی می‌شود. تحلیل آینده در این نوع مدل‌ها، براساس معادله‌های ریاضی حاکم بر رفتار سامانه است.

✓ **مدل‌های جعبه سیاه:** مدل‌های قرارگرفته در این دسته، به طور کامل براساس داده‌های تاریخی و تحلیل‌های آماری و بدون هرگونه شفافیتی از فیزیک موضوع است. تحلیل آینده در این نوع مدل‌ها، براساس تحلیل ورودی‌ها و خروجی‌های مدل است.

✓ **مدل‌های جعبه خاکستری:** مدل‌های قرارگرفته در این دسته، براساس ترکیبی از فیزیک و ویژگی‌های موضوع مورد بررسی و همچنین داده‌های تاریخی است (تلفیقی از مدل‌های جعبه سیاه و جعبه سفید).

یک نمونه از انواع مدل‌های جعبه خاکستری، جعبه سیاه و مرز عملیاتی برای یک پنل فتوولتاییک در [۵] ارائه شده است. در پژوهشی در سال ۲۰۱۸ میلادی، روش‌های جعبه سیاه به دو دسته کلی روش‌های مستقل و روش‌های ترکیبی تقسیم شده است [۶].

• دسته‌بندی مدل‌های رصدی براساس نوع داده مورد نیاز

در یک نوع دسته‌بندی، مدل‌های آینده‌نگری توسعه‌یافته در حوزه انرژی، بر اساس نوع داده‌هایی که هر روش به کار می‌گیرد، در سه دسته اصلی کیفی، کمی و هیبریدی (ترکیبی) تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های کمی، با داده‌های عددی مرتبط هستند و از یک چارچوب مشخص مدل‌سازی ریاضی استفاده می‌کنند. در مقابل، روش‌های کیفی به توصیف‌های تشریحی منجر می‌شوند و امکان برآورد کیفی مشاهدات تجربی را فراهم می‌کنند. روش‌های ترکیبی نیز از ترکیب روش‌های کمی و کیفی استفاده می‌کنند [۷ و ۸].

۲-۲. معرفی روش‌های رصدی

روش‌های مختلف رصد انرژی در این پژوهش، شامل انواع روش‌های کیفی، مدل‌های پایین به بالا، بالای به پایین، پیش‌بینی، روش‌های تصمیم‌گیری، روش‌های سناریومحور، روش‌های دینامیکی، روش‌های برپایه یادگیری ماشین، روش نظریه بازی و روش شبکه‌های بی‌زی است. مقایسه‌ای از این روش‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

1. Single node
2. Multi node
3. White box
4. Black box
5. Grey box

جدول ۱. جدول مقایسه‌ای مدل‌های رصد انرژی [۲۰ - ۲۸]

دسته‌بندی مدل	مزایا	معایب	کاربردهای مناسب	محدودیت‌ها	پیشنهادهای بهبود
روش‌های کیفی	مناسب برای داده کم یا عدم قطعیت بالا انعطاف‌پذیری در بررسی ابعاد اجتماعی - سیاسی هزینه اجرای به نسبت پایین جذب نظر ذی‌نفعان متنوع	ذهنی بودن نتایج عدم امکان تعمیم‌پذیری آماری زمان‌بر بودن فرایندها (مثل روش دلفی) وابستگی به تخصص شرکت‌کنندگان	شناسایی روندهای نوظهور در فناوری‌های انرژی تدوین سناریوهای کیفی بلندمدت ارزیابی اثر غیر کمی سیاست‌ها (مثل پذیرش اجتماعی) مرحله مقدماتی در طراحی مدل‌های کمی	عدم تولید خروجی‌های کمی دقیق چالش در اعتبارسنجی علمی احتمال سوگیری در نظرسنجی‌ها	ادغام با روش‌های کمی افزایش تعداد خبرگان و تنوع تخصصی آن‌ها طراحی پروتکل‌های ساختاریافته برای کاهش سوگیری
مدل‌های بالا به پایین	مناسب برای تحلیل‌های کلان اقتصادی نیاز به داده‌های کمتر سرعت اجرای بالا	عدم توجه به جزئیات فناوری‌های انرژی دقت پایین در پیش‌بینی‌های فنی	ارزیابی سیاست‌های مالیاتی و یارانه‌ای مدل‌سازی تأثیر تغییر اقتصاد کلان بر انرژی	نادرده گرفتن محدودیت‌های فنی سامانه‌های انرژی عدم انعطاف در مدل‌سازی نوآوری‌های فناوری	ادغام با مدل‌های پایین به بالا برای بهبود دقت استفاده از داده‌های بخشی برای اصلاح پیش‌بینی‌ها
مدل‌های پایین به بالا	جزئیات فنی بالا مناسب برای ارزیابی فناوری‌های خاص دقت بالا در پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت	نیاز به داده‌های دقیق و حجیم زمان‌بر و پرهزینه عدم توجه به تعامل‌های اقتصادی کلان	برنامه‌ریزی توسعه نیروگاه‌های تجدیدپذیر بهینه‌سازی مصرف انرژی در صنایع	عدم توانایی در پیش‌بینی تغییر بازارهای کلان پیچیدگی محاسباتی بالا	کاهش ابعاد مدل با روش‌های یادگیری ماشین ترکیب با مدل‌های اقتصادی کلان
مدل‌های پیش‌بینی	مناسب برای پیش‌بینی کوتاه‌مدت تقاضا سادگی در اجرا نیاز به داده‌های تاریخی کم	وابستگی زیاد به روندهای گذشته عدم توانایی در پیش‌بینی شوک‌های غیرمنتظره (به عنوان مثال همه‌گیری‌ها)	پیش‌بینی مصرف انرژی روزانه مدیریت شبکه‌های توزیع	خطای بالا در افاق‌های بلندمدت حساسیت به نویز داده‌ها	ترکیب با روش‌های یادگیری ماشین برای بهبود دقت استفاده از داده‌های بلندمدت برای کالیبراسیون
مدل‌های سناریو محور	انعطاف‌پذیری در بررسی آینده‌های متعدد مناسب برای تحلیل عدم قطعیت‌ها مشارکت‌پذیری ذی‌نفعان	ذهنی بودن سناریوها زمان‌بر بودن توسعه سناریوهای واقع‌گرایانه	برنامه‌ریزی راهبردهای انرژی ۲۰۵۰ ارزیابی ریسک تغییر آب‌وهوا	عدم قطعیت در انتخاب سناریوی بهینه نیاز به داده‌های کیفی گسترده	استفاده از روش‌های کمی برای وزن دهی به سناریوها ادغام با مدل‌های دینامیکی
مدل‌های دینامیکی	توانایی مدل‌سازی بازخوردها و تأخیرها مناسب برای سامانه‌های پیچیده غیرخطی تحلیل تأثیر سیاست‌ها طی زمان	نیاز به کالیبراسیون دقیق پارامترها پیچیدگی در تفسیر نتایج	مدل‌سازی تأثیر سیاست‌های انرژی بر رشد اقتصادی تحلیل گذار انرژی در بازه‌های ۳۰-۵۰ ساله	عدم دقت در پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت نیاز به داده‌های تاریخی با کیفیت	ترکیب با مدل‌های مبتنی بر عامل برای بهبود جزئیات استفاده از روش‌های کالیبراسیون خودکار
مدل‌های یادگیری ماشین	دقت بالا در داده‌های پیچیده توانایی پردازش داده‌های حجیم انعطاف‌پذیری با تغییر سریع بازار	نیاز به داده‌های آموزشی با کیفیت عدم شفافیت در تفسیر مدل‌های پیچیده	پیش‌بینی قیمت انرژی‌های تجدیدپذیر بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها	خطر بیش‌برازش در داده‌های کم‌حجم وابستگی به زیرساخت‌های محاسباتی	استفاده از مدل‌های تفسیرپذیر ادغام با مدل‌های فیزیکی برای افزایش قابلیت اطمینان
نظریه بازی‌ها	تحلیل تعامل‌های راهبردی بین بازیگران (مثل دولت‌ها، شرکت‌ها) مناسب برای مدل‌سازی رقابت یا همکاری در بازار انرژی ارائه راهبردهای بهینه تحت شرایط عدم قطعیت	پیچیدگی محاسباتی در بازی‌های چندنفره عدم توجه به محدودیت‌های فیزیکی سامانه‌های انرژی	طراحی مکانیزم‌های قیمت‌گذاری انرژی تحلیل تأثیر یارانه‌ها بر رقابت‌پذیری انرژی‌های تجدیدپذیر مدل‌سازی رفتار مصرف‌کنندگان در پاسخ به سیاست‌ها	ذهنی بودن تعریف سود و هزینه‌های بازیگران عدم انعطاف در مدل‌سازی پویایی‌های بلندمدت	ترکیب با مدل‌های دینامیکی برای لحاظ کردن بازخوردها استفاده از داده‌های واقعی برای کالیبراسیون ماتریس پیامد
شبکه‌های بیزی	مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها با استفاده از احتمال‌های شرطی توانایی ترکیب داده‌های کیفی و کمی مناسب برای تحلیل ریسک و تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت	نیاز به دانش اولیه برای تعریف توابع احتمال پیچیدگی در مدل‌سازی سامانه‌های با متغیرهای زیاد نیاز به داده‌های تاریخی برای آموزش مدل	ارزیابی ریسک قطعی برق در شبکه‌های تجدیدپذیر تأثیر تغییر آب‌وهوا بر تولید انرژی تشخیص ناهنجاری‌ها در مصرف انرژی	وابستگی به دقت داده‌های ورودی عدم توانایی در مدل‌سازی پویایی‌های زمانی	استفاده از شبکه‌های بیزی پویا برای مدل‌سازی تأثیر زمانی ادغام با یادگیری ماشین برای بهبود تخمین احتمال‌ها

روش‌های کیفی و کمی، اگرچه دارای یک رویکرد کلی‌نگر، اما ضعف‌هایی نیز دارند. از جمله این ضعف‌ها، در نظر نگرفتن بازخوردها، تأخیرها و ویژگی‌های غیرخطی در یک سامانه است. اغلب مدل‌های بیان‌شده بر تعادل انرژی متکی هستند. به منظور برطرف کردن ضعف روش‌های پیشین، روش‌های نوینی توسعه پیدا کردند. برخی از این روش‌ها از جمله روش‌های تصمیم‌گیری [۹ و ۱۰] و همچنین تحلیل سلسله‌مراتبی به منظور اولویت‌بندی و تصمیم‌گیری درخصوص گزینه‌های موجود [۱۱] و برخی مانند تحلیل اثر متقابل، برای بررسی سناریوهای سازگار و محتمل آینده توسعه یافتند [۱۲]. روش پویایی سامانه‌ها نیز از جمله روش‌های نوینی است که به جای در نظر گرفتن روابط استاتیک، با در نظر گرفتن روابط علت و معلولی پویا در یک سامانه، توانایی مدل کردن سامانه‌های پیچیده و غیرخطی با لحاظ کردن بازخوردها و تأخیرها را دارد [۱۳ - ۱۶]. علاوه بر این روش‌ها، نظریه بازی جهت تعیین بهترین راهبرد در شرایط رقابتی از جمله روش‌های نوین به کاررفته در پژوهش‌های جدید است. در پژوهش‌های جدید، روش شبکه‌های بیزی به منظور بررسی احتمال وقوع یک رخداد در آینده و تحلیل آن به کمک قانون بیز در آمار و احتمالات نیز کاربرد است. این روش به‌ویژه به منظور تحلیل ریسک بسیار استفاده می‌شود [۱۷]. در برخی از پژوهش‌ها، از ترکیب دو روش به منظور ارائه یک مدل جامع استفاده شده است [۱۸ و ۱۹].

• روش‌های کیفی

انواع روش‌های کیفی آینده‌نگری در حوزه انرژی شامل روش پایش و پویش محیطی، روش تجزیه و تحلیل علم‌سنجی، تجزیه و تحلیل پنتت، تحلیل چرخه عمر، بررسی سرمایه‌گذاری‌ها و روش دلفی است.

○ پایش و پویش محیطی

پایش و پویش محیطی به صورت «شناسایی، رصد و تحلیل سیستماتیک موضوع‌های مرتبط با موضوع اصلی رصد» تعریف می‌شود. پایش و پویش محیطی هم محیط داخلی و هم محیط بیرونی را در بر می‌گیرد. یکی از روش‌های بررسی محیط بیرونی، به‌اختصار استیپ‌وی^۱ است. این کلمه مخفف حوزه‌های اجتماعی، فناوریانه، اقتصادی، زیست‌محیطی، سیاسی و ارزشی است [۲۹].

○ روش تجزیه و تحلیل علم‌سنجی

روش تجزیه و تحلیل علم‌سنجی^۲، اندازه‌گیری‌های کمی را برای ارزیابی و نظارت بر بدنه پژوهش‌های علمی منتشرشده توصیف می‌کند. علم‌سنجی به درک گذشته و شناسایی کشورها، مؤسسه‌ها، مجله‌ها، نویسندگان و کلمه‌های کلیدی در زمینه‌های علمی کمک می‌کند. علم‌سنجی، به عنوان یک ابزار تحلیل ساختاری، می‌تواند تغییر در یک زمینه را طی زمان بررسی کند و به شناسایی روندها و الگوهای پنهان فعلی کمک کند. در روش تجزیه و تحلیل علم‌سنجی، اغلب از نمایش تصویری نتایج استفاده می‌شود. نرم‌افزارها و ابزارهای کاربرد برای تجزیه و تحلیل علم‌سنجی عبارت‌اند از:

- ✓ VOSviewer^۳: یک نرم‌افزار متداول برای ایجاد، تجسم و کاوش نقشه‌های علمی از داده‌های علم‌سنجی است.
- ✓ BibExcel: این نرم‌افزار رایگان، برای استخراج اطلاعات کتاب‌شناختی مانند تعداد دفعه‌های استنادشده، حوزه منابع استنادشده، تحلیل هم‌استنادی توسعه‌یافته و سایر موارد مشابه استفاده می‌شود.
- رایج‌ترین پایگاه‌های اطلاعاتی مورد استفاده برای داده‌های استنادی دانشگاهی شامل دو پایگاه اطلاعاتی زیر است:
- ✓ Web of Science: این ابزار پژوهشی توسط Clarivate اداره می‌شود و داده‌های استنادی جامعی را برای رشته‌های مختلف دانشگاهی ارائه می‌دهد.
- ✓ Scopus: این سرویس توسط Elsevier اداره می‌شود. این سرویس نیز داده‌های استنادی جامعی را برای رشته‌های مختلف دانشگاهی ارائه می‌دهد.

1. STEEPV

۲. ترتیب و عنوان این حوزه‌ها می‌تواند متغیر باشد، به همین دلیل در برخی مراجع از عنوان PESTEL که به جای حوزه ارزش، حوزه قانونی را در بر می‌گیرد و یا TEEPSE که به جای حوزه ارزش، حوزه اخلاق را در بر دارد، استفاده می‌شود.

3. bibliometrics

4. Visualization of Similarities Viewer (VOS viewer)

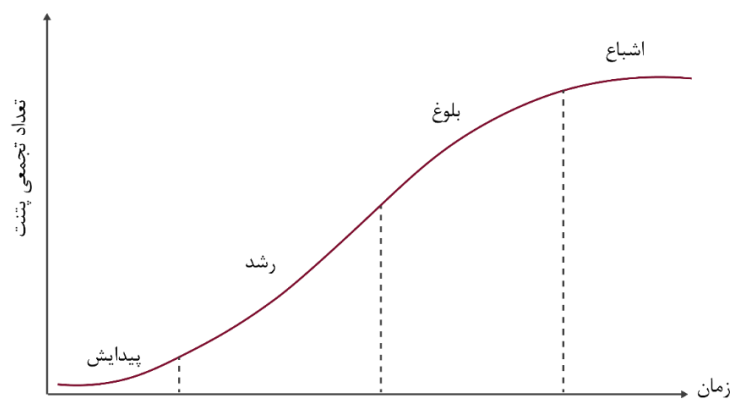
○ تجزیه و تحلیل پتنت

تجزیه و تحلیل پتنت از داده‌های ثبت اختراع که در اکثر کشورها به طور رایگان در دسترس است، استفاده می‌کند. تجزیه و تحلیل پتنت، برای ارزیابی موقعیت رقابتی شرکت‌ها، جلوگیری از نقض حق چاپ و شناسایی روندهای فناوری استفاده می‌شود. ثبت اختراع می‌تواند یک فرایند پرهزینه و زمان‌بر باشد.

سازمان جهانی مالکیت فکری^۱ یک راهنمای به‌نسبت جامع برای تجزیه و تحلیل داده‌های ثبت اختراع با دسترسی آزاد ارائه می‌دهد. به منظور تجزیه و تحلیل پتنت می‌توان از دو سایت وایپو^۲ و لنز^۳ می‌توان بهره گرفت.

○ تحلیل چرخه عمر

در مسیر تحلیل فناوری^۴ سازوکارهای مختلفی برای تشریح وضعیت کنونی فناوری و دورنمای آن در آینده مورد استفاده پژوهشگران قرار گرفته است. از پذیرفته‌شده‌ترین فرایندهای این حوزه، استخراج چرخه عمر فناوری است که می‌تواند به عنوان شاخصی از وضعیت گذشته و حال و چشم‌انداز آینده آن فناوری محسوب شود. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، به طور کلی یک فناوری مستقل از حوزه تخصصی آن، طی روند توسعه و به‌کارگیری خود برحسب معیار تعداد تجمعی اختراعات، روی یک منحنی S شکل حرکت می‌کند.



شکل ۲. نمودار S شکل چرخه عمر فناوری

برای یک فناوری طی دوره تحقیق و توسعه تا افول طبق منحنی بالا می‌توان چهار فاز زیر را در نظر گرفت.

- (۱) **پیدایش^۵**: در این فاز ایده فناوری مطرح می‌شود و در مراکز پژوهشی مورد تحقیق و توسعه قرار می‌گیرد. تولید پتنت در این دوره ابتدا ناچیز است، اما با شناخته شدن فناوری توسط بازیگران دیگر، به مرور نرخ تولید پتنت مرتبط با آن شدت می‌گیرد تا به نرخ ثابتی می‌رسد. شکل منحنی در این فاز تا حدی نامنظم و حجم کلی پتنت‌ها به‌نسبت پایین است.
- (۲) **رشد^۶**: در این فاز، نرخ تولید پتنت به طور تقریبی ثابت است و رشد فناوری همچنان با نرخ فزاینده‌ای در حال وقوع است. در این بخش از منحنی، روند رو به رشد مشخصی مشاهده می‌شود و تقعر منحنی به سمت بالا است.
- (۳) **بلوغ^۷**: در این فاز، تحقیق و توسعه در فناوری کاهش می‌یابد که در نتیجه نرخ رشد نمودار شاخص تجمعی پتنت روند کاهشی به خود می‌گیرد. این فرایند در پی صنعتی شدن و انتقال فناوری از مراکز پژوهشی به مراکز صنعتی رخ می‌دهد. در این فاز، اگرچه هنوز روند رو به رشد تعداد پتنت‌ها در منحنی به طور منظم پیش می‌رود، اما نرخ تغییر شیب منحنی منفی بوده و تقعر آن به سمت پایین است.

1. World Intellectual Property Organization (WIPO)
 2. <https://patentscope.wipo.int/search/en/search.jsf>
 3. <https://www.lens.org>
 4. Technology Assessment
 5. Emerging
 6. Growth
 7. Maturity

۴) **اشباع یا افول**^۱: در این فاز، روند تولید پتنت در فناوری مورد بحث رویکرد کاهشی به خود می‌گیرد، در نتیجه نمودار تجمعی به بخش هموار خود نزدیک می‌شود. این فاز متناظر با افول فناوری و حذف تحقیق و توسعه در فناوری مورد نظر است. در این فاز، نمودار به سمت هموار شدن به پیش می‌رود و جانب افقی آن به صورت تخمینی قابل تعیین و ترسیم است.

○ بررسی سرمایه‌گذاری‌ها

روش کیفی دیگر آینده‌نگری، ردیابی سرمایه‌گذاری‌ها در تحقیق و توسعه اساسی و کاربردی است. این داده‌ها به آسانی علم‌سنجی و ثبت اختراع در دسترس نیستند، با این وجود، یک شاخص اولیه برای حوزه‌های پیشرفت فناوری است. سرمایه‌گذاری خطرپذیر نیز یک شاخص اولیه است. نمونه‌ای از ارائه‌دهنده سرمایه در مراحل اولیه، می‌تواند این کیوتل^۲، شرکت سرمایه‌گذاری خطرپذیر سرویس‌های اطلاعاتی ایالات متحده باشد. در اروپا نیز مؤسسه‌های پژوهشی در این زمینه با بودجه قابل توجه شامل دو مؤسسه فناوری فدرال در سوئیس یا مؤسسه‌های ماکس پلانک^۳ و فرانیهوفر^۴ در آلمان هستند.

○ روش دلفی

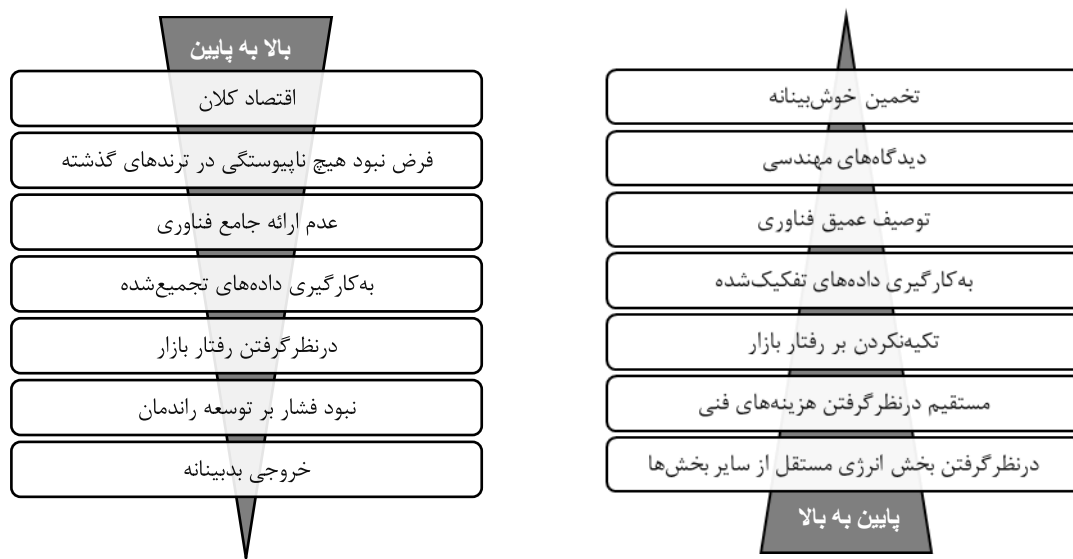
روش دلفی در دهه ۱۹۵۰ و اوایل ۱۹۶۰ میلادی در مؤسسه رند توسعه یافت. نام این روش از اوراکل دلفی یونان باستان گرفته شده است. دلفی یک روش نظرسنجی براساس آینده‌نگری کیفی است که نیازمند مشورت با دیگران، به خصوص خبرگان و متخصص‌هایی است که در موضوع مورد نظر آگاه هستند. این نظرسنجی شامل طرح یک سری سؤال‌هایی برای استخراج پاسخ است. در نهایت و در این روش، متخصصان با آگاهی از همه پاسخ‌ها، نظر خود را تنظیم می‌کنند و به یک پاسخ واحد می‌رسند. روش دلفی می‌تواند اثر منفی تعامل چهره‌به‌چهره را از بین ببرد.

• روش‌های بالا به پایین و پایین به بالا

مدل‌های آینده‌نگری توسعه‌یافته در حوزه انرژی را براساس رویکرد تحلیلی می‌توان به سه دسته مدل‌های بالا به پایین^۵، مدل‌های پایین به بالا^۶ و مدل‌های ترکیبی طبقه‌بندی کرد. مدل‌های بالا به پایین، اغلب توسط اقتصاددانان و اداره‌های دولتی به کار گرفته می‌شوند. این مدل‌ها، بر اتصال سامانه انرژی به سایر بخش‌های کلان اقتصادی تمرکز دارند. همچنین این مدل‌ها، اغلب با یک نمایش ساده از اجزا و پیچیدگی سامانه انرژی مشخص می‌شوند و بنابراین، برای شناسایی سیاست‌های خاص مناسب نیستند. زمینه کاربرد این مدل‌ها، ارزیابی تأثیر سیاست‌های انرژی و اقلیم بر بخش‌های اجتماعی - اقتصادی مانند رشد اجتماعی، رفاه عمومی، اشتغال و سایر موارد است. در مدل‌های پایین به بالا، اجزا و اتصال بین بخش‌های مختلف انرژی به تفصیل تجزیه و تحلیل می‌شود. این مدل‌ها، از دیدگاه فنی - اقتصادی امکان مقایسه تأثیر فناوری‌های مختلف بر سامانه انرژی را برای کاربر فراهم می‌کند و می‌تواند بهترین آینده را ارزیابی کند [۴].

رویکردهای ترکیبی، جزئیات فناوری را در اقتصادی کلان معرفی می‌کنند. این نوع مدل‌ها می‌توانند به دو حالت باشند. در حالت اول، مدل ترکیبی، تلفیقی از مدل‌های موجود پایین به بالا و بالا به پایین است. در حالت دوم، یک مدل منفرد یکپارچه بوده که ویژگی‌های هر دو مدل بالا به پایین و پایین به بالا را دارد [۳]. مدل‌های انرژی بالا به پایین و پایین به بالا در شکل ۳ قابل مشاهده است.

1. Saturation
2. In-Q-Tel
3. Max Planck
4. Fraunhofer
5. Top down
6. Bottom up



• روش‌های پیش‌بینی

روش‌های سنتی پیش‌بینی، مانند سری زمانی، بر اساس مدل‌های ریاضی و آماری است. این مدل‌ها می‌توانند به دو دسته مدل‌های خطی و غیرخطی تقسیم شوند. مدل خطی شامل مدل خودرگرسیون^۱، مدل میانگین متحرک^۲، مدل خودرگرسیونی میانگین متحرک (آرما)^۳ و مدل خودرگرسیونی میانگین متحرک تجمعی (آریمای)^۴ است. همچنین، این دسته مدل‌ها شامل انواع روش‌های هموارسازی نمایی مانند هموارسازی نمایی یگانه^۵، هموارسازی نمایی دوگانه^۶ و هموارسازی نمایی سه‌گانه^۷ می‌شود. مدل‌های غیرخطی نیز شامل مدل‌های خودرگرسیونی هتروسکدستاستی^۸ و مدل‌های خودرگرسیونی هتروسکدستاستی شرطی^۹ است.

• روش‌های یادگیری ماشین

مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی یا یادگیری ماشین^{۱۰} که اغلب مدل‌های داده‌محور^{۱۱} نامیده می‌شوند، به عنوان مدل جعبه سیاه در نظر گرفته می‌شوند. مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در برخورد با داده‌های غیرخطی، چندمتغیره و دارای نویز بسیار قابل اعتماد هستند. با این حال، در این مدل‌ها تفسیر تأثیر ورودی‌ها بر خروجی‌ها اغلب پیچیده است.

روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین را می‌توان به سه دسته روش‌های با نظارت^{۱۲}، روش‌های بدون نظارت^{۱۳} و یادگیری تقویتی تقسیم کرد. روش‌های با نظارت از یک مجموعه داده برچسب‌گذاری شده برای آموزش^{۱۴} یک مدل و برای یادگیری رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته استفاده می‌کنند. مدل آموزش‌دیده سپس برای انجام پیش‌بینی روی یک مجموعه داده

1. Autoregressive Model (AR)
2. Moving Average Model (MA)
3. Autoregressive Moving Average Model (ARMA)
4. Autoregressive Integrated Moving Average Model (ARIMA)
5. Simple Exponential Smoothing (SES)
6. Double Exponential Smoothing (DES)
7. Triple Exponential Smoothing (TES)
8. Autoregressive Conditional Heteroscedasticity Models (ARCH)
9. Generalized Autoregressive Conditional Heteroscedasticity Models (GARCH)
10. Machine Learning (ML)
11. Data Driven
12. Supervised
13. Unsupervised
14. Training

دیده‌نشده، استفاده می‌شود. روش‌های با نظارت، بر اساس ماهیت چالش به روش‌های مبتنی بر رگرسیون^۱ و طبقه‌بندی^۲ تقسیم می‌شوند. روش‌های بدون نظارت نیازی به آموزش ندارند و اغلب به منظور خوشه‌بندی^۳ اعمال می‌شوند. روش‌های هوش مصنوعی شامل درخت تصمیم^۴، ماشین‌های بردار پشتیبان^۵، روش‌های انسامل^۶، شبکه‌های عصبی مصنوعی^۷، الگوریتم‌های ژنتیک^۸ و اغلب رویکردهای یادگیری عمیق^۹ هستند [۳۰].

• نظریه بازی

نظریه بازی، ابزارهایی را برای تجزیه و تحلیل موقعیت‌هایی فراهم می‌کند که در آن بازیکن‌ها، تصمیم‌هایی می‌گیرند که به یکدیگر وابسته هستند. این وابستگی متقابل باعث می‌شود که هر بازیکن تصمیم‌ها یا راهبردهای احتمالی بازیکن دیگر را در تدوین راهبردها در نظر بگیرد. راه حل یک بازی، تصمیم‌های بهینه بازیکنان را که ممکن است علایق مشابه، مخالف یا مختلط داشته باشند و نتایجی که ممکن است از این تصمیم‌ها حاصل شود، توصیف می‌کند. تفاوت بازی با تصمیم‌گیری در این است که در موقعیت تصمیم‌گیری، بدون در نظر گرفتن شرایط و موقعیت طرف مقابل اقدام به اخذ تصمیم می‌کند. در حالی که در یک بازی، تصمیم هر فرد روی تصمیم فرد دیگر اثرگذار است.

نظریه بازی‌ها در اصل توسط ریاضی‌دان آمریکایی مجارستانی‌الاصل جان فون نویمان^{۱۰} و همکارش در دانشگاه پرینستون، اسکار مورگنسترن^{۱۱}، اقتصاددان آمریکایی آلمانی‌الاصل، برای حل مسائل اقتصاد ایجاد شد. فون نویمان^{۱۲} و مورگنسترن^{۱۳} در کتاب خود به نام *تئوری بازی‌ها و رفتار اقتصادی* (۱۹۴۴ میلادی) اظهار داشتند که ریاضیات توسعه یافته برای علوم فیزیکی، مدل ضعیفی برای اقتصاد است. آن‌ها مشاهده کردند که اقتصاد بسیار شبیه یک بازی است که در آن بازیکنان حرکات‌های یکدیگر را پیش‌بینی می‌کنند و بنابراین نیاز به نوع جدیدی از ریاضیات دارد که آن را نظریه بازی نامیدند. نظریه بازی‌ها در دهه ۱۹۵۰ میلادی توسط ریاضی‌دان برجسته آمریکایی، جان نش^{۱۴} که اصول ریاضی نظریه بازی‌ها را پایه‌گذاری کرد، توسعه یافت. ارکان اصلی تشکیل دهنده یک بازی در نظریه بازی‌ها شامل سه دسته کلی است.

✓ **بازیکنان:** افراد تصمیم‌گیرنده در یک بازی بازیکنان هستند.

✓ **راهبرد بازیکنان:** مجموعه رفتارها و انتخاب عمل‌هایی که هر بازیکن طی بازی مجاز به انتخاب آن است، راهبرد بازی می‌گویند.

✓ **پایامدها:** به مقدار برد و باخت و آنچه در انتهای یک بازی عاید بازیکنان می‌شود، پیامد بازیکنان گفته می‌شود.

• روش‌های تصمیم‌گیری

روش‌های تصمیم‌گیری برای انتخاب چند گزینه به کمک چندین شاخص به کار گرفته می‌شود. این دسته روش‌ها، شامل انواع گوناگونی است. یکی از روش‌های مهم تصمیم‌گیری، روش تحلیل سلسله‌مراتبی است. روش تحلیل سلسله‌مراتبی^{۱۵} یک چارچوب ریاضی برای ساختاردهی فرایند تصمیم‌گیری است. این روش اولویت‌ها را با مقایسه اهمیت آن‌ها به صورت جفتی، مانند مقایسه یک راهبرد با راهبرد دیگر، مشخص می‌کند. به عنوان مثال، ممکن است نیاز باشد تا مزایای اجرای دو راهبرد مختلف

1. Regression
2. Classification
3. Clustering
4. Decision Tree
5. Support Vector Machines (SVM)
6. Ensemble Learning
7. Artificial Neural Network (ANN)
8. Genetic Algorithm (GA)
9. Deep Learning (DL)
10. John von Neumann
11. Oskar Morgenstern
12. Von Neumann
13. Morgenstern
14. John Nash
15. analytic hierarchy process (AHP)

برای افزایش تولید مقایسه شود. در این شرایط، چارچوب تحلیل سلسله‌مراتبی به هر معیار، یک مقدار عددی اختصاص می‌دهد. این روش توسط توماس ال. ساتی^۱ در دهه ۱۹۷۰ میلادی ابداع شده و از آن زمان بهبود یافته است [۳۱]. در روش تحلیل سلسله‌مراتبی، ابتدا یک هدف تعیین می‌شود. سپس برای انتخاب گزینه‌ها، چند معیار در نظر گرفته می‌شود. این معیارها به کمک داده‌های ورودی به مقادیر عددی تبدیل می‌شود. مدل تحلیل سلسله‌مراتبی، در نهایت با توجه به مقادیر عددی مشخص شده برای معیارها، گزینه‌ها را اولویت‌بندی می‌کند. این موضوع در تصمیم‌گیری‌های پیچیده، بسیار مهم است [۳۲]. مدل تحلیل سلسله‌مراتبی از سه بخش تشکیل شده است:

- ✓ هدف یا چالش کلی؛
- ✓ گزینه‌ها و راه‌حل‌های ممکن؛
- ✓ معیارهایی که برای اندازه‌گیری راه‌حل‌ها به کار گرفته می‌شوند.

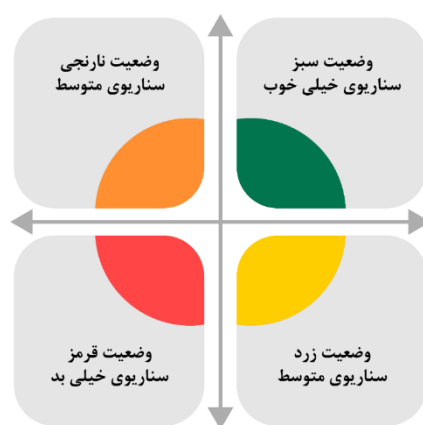
• روش‌های سناریو محور

ایجاد سناریو بر شناسایی آنچه ممکن است اتفاق بیفتد، متمرکز است. سناریوها امکان تجزیه و تحلیل مشکل و تعیین پیامدهای آن را با کمک داده‌های موجود و واکنش به رویدادهای احتمالی فراهم می‌کند. تمرکز سناریو بر دو مورد است. مورد اول، مسیر رسیدن به آینده و مورد دوم ویژگی‌های مشخص آینده (تصویر آینده) است. اغلب در سناریوها، ترکیبی از هر دو مد نظر است، اما تمرکز می‌تواند روی یکی از این جنبه‌ها باشد [۲۹].

در پدیده‌های پیچیده، باید بازه گسترده‌ای از احتمال‌های آینده و تأثیر عدم قطعیت‌ها در نظر گرفته شود. دو روش ماتریس ۲ در ۲ و ماتریس اثر متقابل به عنوان روش‌های مبتنی بر سناریو در نظر گرفته می‌شود.

• ماتریس ۲ در ۲

در تعیین سناریو به روش ماتریس ۲ در ۲، باید ابتدا چند پارامتر تأثیرگذار بر آینده شناسایی و سپس، پارامتر یا پارامترهای غالب را تعیین کرد. این پارامترها، مقادیر ویژه سامانه مورد مطالعه خواهند بود. اگر سامانه دو پارامتر غالب داشت، چهار سناریو می‌توان در نظر گرفت (شکل ۴). به طور کلی اگر تعداد پارامترها n عدد باشد، تعداد سناریوها، 2^n خواهد بود.



شکل ۴. چهار سناریو با در نظر گرفتن دو پارامتر غالب

در صورتی که هر دو پارامتر مقادیر مطلوبی داشته باشند، سناریوی خیلی خوب (وضعیت سبز) تشکیل خواهد شد. در صورتی که هر دو پارامتر مقادیر نامطلوبی داشته باشند، سناریوی خیلی بد (وضعیت قرمز) به وقوع خواهد پیوست. دو سناریوی متوسط نیز در شرایطی اتفاق می‌افتد که یکی از دو پارامتر مقدار مطلوب و دیگری نامطلوب باشد (وضعیت‌های زرد و نارنجی). در تحلیل آینده سامانه در واقع باید طوری رفتار کرد که سناریوی خیلی خوب اتفاق بیفتد.

1. Thomas L. Saaty

• ماتریس اثر متقابل

در مباحث آینده‌پژوهی، شناسایی و تعریف متغیرها، روش‌های مرتبط با موضوع مورد مطالعه از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. همچنین، در پیش‌بینی وقوع یک متغیر علاوه بر احتمال‌های ابتدایی بررسی شده، روابط بین وقوع متغیرها وجود دارد که عدم توجه به آن، باعث نادیده گرفته شدن بخشی از داده‌های مهم و تأثیرگذار می‌شود؛ بنابراین لازم است علاوه بر تبیین احتمال وقوع اولیه متغیرها، شناسایی نیروهای پیشران و روش‌ها، میزان اثر متقابل میان متغیرها نیز توسط کارشناسان و خبرگان تعیین و مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. برای اولین بار تئودورگوردن و هلمر^۱ روش تحلیل اثر متقابل را در سال ۱۹۶۶ میلادی ابداع کردند. سناریو ویزارد^۲ یکی از نرم‌افزارهای آینده‌نگری است که به روش ماتریس اثر متقابل براساس تحلیل همبستگی عمل می‌کند [۳۳ و ۳۴].

• انواع روش‌های پویا

روش‌های پویا در این پژوهش شامل سه دسته روش پویایی سامانه‌ها^۳، روش‌های مبتنی بر عامل^۴ و شبکه‌های بیزی^۵ است. پویایی سامانه‌ها، یک روش برای مطالعه و مدیریت سامانه‌های پیچیده و دارای حلقه بازخورد است. این سامانه‌ها می‌توانند در حوزه‌های مختلفی مثل آینده‌نگری، کسب‌وکار، اقتصاد، محیط زیست، مدیریت، مسائل شهری و سایر حوزه‌های اجتماعی و انسانی وجود داشته باشند. هدف از به‌کارگیری روش پویایی سامانه‌ها، به دست آوردن دیدگاهی در مورد روابط سامانه است تا بتوان خط‌مشی‌های ممکن برای بهبود سامانه را بررسی کرد. برای انجام پژوهش با مدل پویایی سامانه‌ها، ابتدا با مطالعه پیشینه‌های پژوهش، شاخص‌های اصلی در زمینه مورد بررسی استخراج می‌شود. بعد از مصاحبه با خبرگان، شاخص‌های کاربردی آن حوزه انتخاب می‌شوند. سپس با استفاده از روش ریاضی پویایی سامانه‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای این حوزه، مدل نهایی پژوهش استخراج می‌شود. دو نرم‌افزار اینسایت میکرو^۶ و ون‌سیم^۷ به منظور ارائه یک مدل پویا به روش پویایی سامانه‌ها می‌تواند به کار گرفته شود.

هر سامانه پویا، یک ساختار سلسله‌مراتبی پنج‌گانه شامل تعریف و ساختاردهی به مسئله، فرضیه‌های پویا، ایجاد مدل، تست و اعتبارسنجی مدل و طراحی و ارزیابی سیاست است. با استفاده از این ساختار سلسله‌مراتبی پنج‌گانه می‌توان معادله رفتار هر پدیده‌ای را تعیین کرد.

روش مبتنی بر عامل، بر رفتار سطح بالای یک سامانه متمرکز است. نگاه کردن از بالا، به فهمیدن کل فرایند سامانه در مقیاس کلان کمک می‌کند. در این روش حذف جزئیات غیرضروری و تمرکز بر یک مدل مهم است.

• روش شبکه‌های بیزی

شبکه‌های بیزی نوعی مدل گرافیکی احتمالی هستند که می‌توانند برای ساخت مدل‌هایی از داده‌ها و یا نظرات تخصصی استفاده شوند. شبکه‌های بیزی را می‌توان برای طیف گسترده‌ای از کاربردها از جمله تشخیص، استدلال، مدل‌سازی علی، تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت، تشخیص ناهنجاری، بینش خودکار و پیش‌بینی استفاده کرد [۳۵].

روش شبکه‌های بیزی بر پایه قضیه بیز^۸ در آمار و احتمال است. قضیه بیز که به آن قانون بیز هم گفته می‌شود، یک معادله ریاضی برای تعیین احتمال شرطی رویدادها است. قضیه بیز، احتمال وقوع یک رویداد را بر اساس دانش قبلی از شرایط رویداد، توصیف می‌کند. این قضیه به نام آمارشناس انگلیسی، توماس بیز^۹ که این معادله را در سال ۱۷۶۳ میلادی ابداع کرد، نام‌گذاری شده است. نوعی از انواع شبکه‌های بیزی، شبکه‌های بیزی پویا نام دارد. شبکه‌های بیزی پویا^{۱۰} برای مدل‌سازی سری‌ها و

1. Helmer and Gordon

2. Scenario Wizard

3. System Dynamic (SD)

4. Agent Based Model (ABM)

5. Bayesian Network (BN)

6. insight maker

7. vensim

8. Bayes Theorem

9. Thomas Bayes

10. Dynamic Bayesian networks (DBN)

توالی‌های زمانی استفاده می‌شوند. شبکه‌های بیزی پویا، گسترش‌یافته شبکه‌های استاندارد بیزی با مفهوم زمان است. این شبکه‌ها مدل کردن سری‌های زمانی یا دنباله‌ها را امکان‌پذیر می‌کند. شبکه‌های بیزی پویا می‌تواند سری‌های زمانی چندمتغیره پیچیده را مدل‌سازی کند. این شبکه‌ها می‌تواند روابط بین سری‌های زمانی چندگانه را در یک مدل و رفتارهای مختلف را مدل‌سازی کنند.

۳. نتیجه‌گیری

مدل‌های رصد و پایش انرژی ابزارهای ضروری برای هدایت گذار به آینده‌ای مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر هستند. با پیچیده‌تر شدن سامانه‌های انرژی، انتخاب رویکرد مناسب پیش‌بینی نقش حیاتی در بهینه‌سازی تخصیص منابع، تقویت امنیت انرژی و کاهش اثر زیست‌محیطی ایفا می‌کند.

این مطالعه به بررسی تنوع مدل‌های رصد انرژی پرداخته و نشان می‌دهد طبقه‌بندی‌های مختلف بر اساس پوشش جغرافیایی، رویکرد تحلیلی یا نیاز به داده، چگونه می‌توانند بر تصمیم‌گیری در بخش انرژی تأثیر بگذارند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد ادغام روش‌های پیشرفته رصد انرژی با سیاست‌های انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند روند گذار به اقتصاد کم‌کربن را تسریع کند. در این پژوهش و ابتدا انواع دسته‌بندی روش‌های رصد انرژی معرفی شده و سپس، شش دسته کلی این روش‌ها معرفی و نقاط قوت، ضعف، محدودیت‌ها، کاربردها و پیشنهادی بهبود هر روش عنوان می‌شود. در واقع، به نوعی این پژوهش یک مطالعه مروری بر روش‌های رصد انرژی است و به سیاست‌گذاران و پژوهشگران کمک می‌کند تا با در نظر گرفتن شرایط موجود، مدل مناسب برای آینده‌نگری در حوزه انرژی را انتخاب کنند. خلاصه‌ای از مقایسه روش‌های رصد انرژی به شرح زیر است:

- مدل‌های بسیار دقیق مانند پایین به بالا، ممکن است برای سیاست‌گذاری کلان غیرعملی باشند، در حالی که مدل‌های ساده مانند بالا به پایین ممکن است فاقد جزئیات ضروری باشند.
- مدل‌های پیشرفته مانند مدل‌های هیبریدی یا یادگیری ماشین، اغلب به داده‌های باکیفیت و منابع محاسباتی نیاز دارند که ممکن است در کشورهای در حال توسعه محدود باشد.
- مدل‌های دینامیکی و سناریومحور برای بلندمدت مناسب‌تر هستند، در حالی که مدل‌های آماری و یادگیری ماشین برای کوتاه‌مدت کارایی بهتری دارند.
- نظریه بازی‌ها بر تعامل‌های راهبردی تمرکز دارد، در حالی که مدل‌های سناریومحور فقط آینده‌های ممکن را بدون در نظر گرفتن رفتار بازیگران بررسی می‌کنند.
- شبکه‌های بیزی عدم قطعیت را به صورت احتمالاتی مدل می‌کنند، اما مدل‌های سری زمانی یا یادگیری ماشین اغلب خروجی‌های قطعی ارائه می‌دهند.
- نظریه بازی‌ها برای سیاست‌گذاری در شرایط رقابتی (مثل بازار برق) ایده‌آل است.
- شبکه‌های بیزی در پروژه‌هایی که ریسک و عدم قطعیت نقش کلیدی دارند (مثل ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر در شبکه) مفید هستند.

پژوهش‌های آینده باید بر بهبود تکنیک‌های مدل‌سازی ترکیبی و بهره‌گیری از تحلیل داده‌های تمرکز کنند تا دقت و کاربردپذیری مدل‌های رصدی انرژی افزایش یابد. استفاده مؤثر از این ابزارها به سیاست‌گذاران و پژوهشگران کمک می‌کند تا چالش‌ها و فرصت‌های پیش رو را بهتر پیش‌بینی کنند و زمینه‌ساز چشم‌اندازی پایدار و مقاوم در حوزه انرژی شوند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مراتب سپاس خود را از مرکز پژوهشی انرژی و دانشکده انرژی دانشگاه شهید بهشتی به دلیل حمایت‌ها و راهنمایی‌های ارزشمند این مجموعه طی این پژوهش ابراز می‌دارند. بازخوردهای سازنده، دسترسی به امکانات پژوهشی و مشارکت‌های علمی این مرکز نقش مهمی در غنای این مطالعه داشته است.

منابع

- [1] T. Mai *et al.*, “A Decision Maker’ s Guide to Evaluating Energy Implementing Body: National Renewable Energy Laboratory,” no. June, 2013.
- [2] P. Laha and B. Chakraborty, “Energy model – A tool for preventing energy dysfunction,” vol. 73, no. April 2016, pp. 95–114, 2017.
- [3] L. M. H. Hall and A. R. Buckley, “A review of energy systems models in the UK : Prevalent usage and categorisation,” *Appl Energy*, vol. 169, pp. 607–628, 2016.
- [4] M. Giacomo, G. Manzolini, D. Moser, and B. Nastasi, “Classification and challenges of bottom-up energy system models - A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 129, p. 109917, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.109917.
- [5] L. P. Wagner, L. M. Reinpold, M. Kilthau, and A. Fay, “Review article A systematic review of modeling approaches for flexible energy resources,” vol. 184, no. July, 2023.
- [6] K. B. Debnath and M. Mourshed, “Forecasting methods in energy planning models,” vol. 88, no. February, pp. 297–325, 2018.
- [7] N. A. Spyridaki and A. Flamos, “A paper trail of evaluation approaches to energy and climate policy interactions,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 40, pp. 1090–1107, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.08.001.
- [8] T. Horschig and D. Thrän, “Are decisions well supported for the energy transition? A review on modeling approaches for renewable energy policy evaluation,” 2017, doi: 10.1186/s13705-017-0107-2.
- [9] M. Mrkić-Bosančić, S. Vasković, P. Gvero, and G. Krnić, “Optimal Energy Mix in Relation To Multicriteria Decision-Making (Mcdm), Review and Further Research Directions,” *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 43–73, 2023, doi: 10.31181/dmame622023766.
- [10] “Multi-Criteria Decision Making in Python,” Sustainability Methods. Accessed: Jul. 01, 2024. [Online]. Available: https://sustainabilitymethods.org/index.php/Multi-Criteria_Decision_Making_in_Python
- [11] Y. Yin and J. S. L. Lam, “Bottlenecks of LNG supply chain in energy transition: A case study of China using system dynamics simulation,” *Energy*, vol. 250, p. 123803, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.123803.
- [12] M. Bahrami and P. Abbaszadeh, “Development a scenario-based model for Iran ’ s energy future,” vol. 62, pp. 963–970, 2016.
- [13] S. Ahmad, R. Mat, F. Muhammad-sukki, and A. Bakar, “Application of system dynamics approach in electricity sector modelling: A review,” vol. 56, pp. 29–37, 2016.
- [14] C. Li, L. Zhang, Z. Ou, and J. Ma, “Using system dynamics to evaluate the impact of subsidy policies on green hydrogen industry in China,” *Energy Policy*, vol. 165, no. January, 2022, doi: 10.1016/j.enpol.2022.112981.
- [15] J. Huang, W. Li, and X. Wu, “Forecasting the Hydrogen Demand in China: A System Dynamics Approach,” *Mathematics*, vol. 10, no. 2, pp. 1–24, 2022, doi: 10.3390/math10020205.
- [16] K. Sani, M. Siallagan, U. S. Putro, and K. Mangkusubroto, “Indonesia energy mix modelling using system dynamics,” 2018. doi: 10.5278/ijsepm.2018.18.3.
- [17] P. Gerber, C. De Oliveira, and C. Augusto, “Risk analysis in energy projects using Bayesian networks : A systematic review,” vol. 47, no. April, 2023.
- [18] H. Dehghan, N. Nahavandi, S. K. Chaharsooghi, J. Zarei, and M. R. Amin-naseri, “A hybrid game theory and system dynamics model to determine optimal electricity generation mix,” vol. 166, no. September, 2022.
- [19] F. Dianat, V. Khodakarami, S. Hosseini, and H. S. G, “Combining game theory concepts and system dynamics for evaluating renewable electricity development in fossil-fuel-rich countries in the Middle East and North Africa,” vol. 190, 2022.
- [20] R. Akpahou, L. D. Mensah, D. A. Quansah, and F. Kemausuor, “Energy planning and modeling tools for sustainable development : A systematic literature review,” vol. 11, no. November 2023, pp. 830–845, 2024.

- [21] L. P. Wagner, L. M. Reinpold, M. Kilthau, and A. Fay, "Review article A systematic review of modeling approaches for flexible energy resources," vol. 184, no. July, 2023.
- [22] S. Ahmad, R. Mat, F. Muhammad-sukki, and A. Bakar, "Application of system dynamics approach in electricity sector modelling : A review," vol. 56, pp. 29–37, 2016.
- [23] F. Dianat, V. Khodakarami, S. Hosseini, and H. S. G, "Combining game theory concepts and system dynamics for evaluating renewable electricity development in fossil-fuel-rich countries in the Middle East and North Africa," vol. 190, 2022.
- [24] K. B. Debnath and M. Mourshed, "Forecasting methods in energy planning models," vol. 88, no. February, pp. 297–325, 2018.
- [25] D. Shah and M. Thaker, "A Review of Time Series Forecasting Methods," *INTERNATIONAL JOURNAL OF RESEARCH AND ANALYTICAL REVIEWS*, vol. 11, p. 749, 2024, doi: 10.1729/Journal.38816.
- [26] P. Manandhar, H. Rafiq, and E. Rodriguez-Ubinas, "Current status, challenges, and prospects of data-driven urban energy modeling: A review of machine learning methods," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 2757–2776, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.01.094>.
- [27] M. Giacomo, G. Manzolini, D. Moser, and B. Nastasi, "Classification and challenges of bottom-up energy system models - A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 129, p. 109917, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.109917.
- [28] M. P. Nguyen and T. Ponomarenko, "Energy Transition in Vietnam : A Strategic Analysis and Forecast," 2024.
- [29] I. Miles, O. Saritas, and A. Sokolov, *Foresight for Science, Technology and Innovation*. Springer International, 2016.
- [30] P. Manandhar, H. Rafiq, and E. Rodriguez-Ubinas, "Current status, challenges, and prospects of data-driven urban energy modeling: A review of machine learning methods," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 2757–2776, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.01.094>.
- [31] "Super Decisions | AHP & ANP Theory." Accessed: Dec. 23, 2023. [Online]. Available: <https://www.superdecisions.com/method/>
- [32] "What is the Analytic Hierarchy Process (AHP)? | Passage Technology." Accessed: Dec. 23, 2023. [Online]. Available: <https://www.passagetechnology.com/what-is-the-analytic-hierarchy-process>
- [33] W. Weimer-Jehle, "Constructing consistent scenarios using cross-impact balance analysis," *Stuttgart Research Center for Interdisciplinary Risk and Innovation Studies University of Stuttgart Seidenstr*, vol. 36, p. 70174, 2016.
- [34] W. Weimer-Jehle, "Cross-impact balances: A system-theoretical approach to cross-impact analysis," *Technol Forecast Soc Change*, vol. 73, no. 4, pp. 334–361, 2006, doi: 10.1016/j.techfore.2005.06.005.
- [35] M. Jordan, J. Kleinberg, and B. Schölkop, *Bayesian Networks and Decision Graphs*, Second edi. Springer, 2007.