



Research in Production and Operations Management

University of Isfahan E-ISSN: 2981-0329

Vol. 17, Issue 2, No. 45, 2026



DOI: [10.22108/pom.2026.146312.1634](https://doi.org/10.22108/pom.2026.146312.1634)

(Research paper)

Dynamic Modelling of Sustainability and Resilience in Industrial Ecosystems: Integrating four Subsystems of Sustainable Development

Azadeh Rezaei

Department of Industrial Engineering, Yazd University, Yazd, Iran, rezaei.a@stu.yazd.ac.ir

Yahia Zare Mehrjerdi *

Department of Industrial Engineering, Yazd University, Yazd, Iran, yzare@yazd.ac.ir

Mohammad Saleh Owlia

Department of Industrial Engineering, Yazd University, Yazd, Iran, owliams@yazd.ac.ir

Hasan Khademi Zare

Department of Industrial Engineering, Yazd University, Yazd, Iran, hkhademiz@yazd.ac.ir

Purpose : This paper aims to develop and validate an integrated system dynamics model for analysing the dynamic interactions between sustainability and resilience in industrial ecosystems through the simultaneous consideration of four interdependent sustainability subsystems: economic, environmental, social and institutional. Motivated by the increasing complexity of industrial ecosystems and the inability of conventional linear models to capture nonlinear feedback relationships, the study seeks to explain how these interconnected dimensions influence long-term system behaviour and sustainable production performance. Using Kerman Province, Iran, as a case study, the research investigates how causal interactions among economic growth, environmental resource constraints, social development and institutional governance shape production resilience and identifies high-leverage intervention points for improving long-term sustainability while balancing economic prosperity, environmental protection, social well-being and institutional effectiveness.

Design/methodology/approach : The study adopts a system dynamics methodology to model the complex feedback structures governing sustainability and resilience in industrial ecosystems. An integrated stock-and-flow simulation model was developed by combining four interrelated subsystems representing the economic, environmental, social and institutional dimensions of sustainable development. The model incorporates causal loop diagrams and feedback mechanisms derived from the sustainability and resilience literature and is calibrated using data from Kerman Province. Model structure and behaviour were verified through the Extreme Conditions Test, Model Structure Verification Test and scenario-based validation using

* Corresponding author, [0000-0002-4731-4985](https://orcid.org/0000-0002-4731-4985)

2981-0329 / © University of Isfahan



This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

How to cite: Rezaei, A. , Zare Mehrjerdi, Y. , Owlia, M. S. and Khademi Zare, H. (2026). Dynamic Modelling of Sustainability and Resilience in Industrial Ecosystems: Integrating 4 subsystems of Sustainable Development. *Research in Production and Operations Management*, 17(2), 73-108. doi: 10.22108/pom.2026.146312.1634

Vensim. Multiple policy scenarios were simulated to examine the effects of research and development (R&D) investment, agricultural water-demand management, quality-of-life improvements and institutional reforms. Comparative scenario analysis evaluated their effects on gross domestic product, production performance, resource availability, pollution, demographic trends, governance quality and system resilience.

Findings : Sustainability and resilience emerge from the interaction of all four subsystems rather than from isolated interventions. Sustained investment in R&D generates long-term improvements in gross domestic product, production output, technical efficiency and innovation adoption, whereas limited investment produces only marginal gains. Aggressive investment in agricultural water-demand management, pollution control and ecosystem restoration is essential for achieving environmental sustainability and resilient production systems, while moderate interventions provide only temporary improvements. Social policies that improve healthcare, education and quality of life stabilise demographic trends, reduce mortality and strengthen the long-term labour force. Institutional reforms that enhance government effectiveness, accountability, rule of law and anti-corruption measures improve governance quality and adaptive capacity. Comparative scenario analysis indicates that water-demand management has the greatest influence on long-term production sustainability, followed by quality-of-life improvements, institutional effectiveness and R&D investment. Overall, coordinated policy implementation across the four sustainability dimensions produces greater resilience and sustainability than isolated sectoral policies.

Research limitations/implications : The system dynamics model necessarily simplifies complex real-world interactions, which may limit representation of all behavioural dynamics. The empirical analysis focuses on a single case study in Kerman Province, limiting direct generalisation to other regions or industrial contexts. In addition, calibration and validation relied partly on incomplete or historical datasets, requiring certain assumptions and parameter estimation. Future research should apply the framework to different manufacturing sectors and regions, incorporate more comprehensive real-time datasets, integrate additional sustainability dimensions and combine system dynamics with complementary modelling approaches to improve predictive capability and external validity.

Practical implications : The proposed framework provides policymakers, industrial managers and sustainability practitioners with a decision-support tool for evaluating long-term policy alternatives before implementation. The results suggest that sustained investment in R&D, cleaner production technologies, integrated water-resource management, environmental restoration, education, healthcare and institutional reform should be prioritised to improve manufacturing resilience and sustainability. The model enables decision-makers to identify leverage points, anticipate unintended consequences and coordinate interventions across economic, environmental, social and institutional domains, thereby improving resource efficiency, operational resilience and long-term production performance.

Social implications : Sustainability policies extending beyond economic performance can generate substantial societal benefits. Improvements in education, healthcare and quality of life contribute to healthier demographic structures, stronger labour-force stability and enhanced social well-being. Environmental policies that reduce pollution and conserve water resources improve ecosystem resilience and support long-term community welfare. Strengthening governance, transparency and institutional effectiveness also promotes public trust, reduces corruption and improves policy implementation. The framework therefore provides evidence for governments seeking to promote sustainable industrial development while enhancing environmental quality, social equity and institutional resilience.

Originality/value : The principal contribution of this study lies in integrating the four core dimensions of sustainable development (economic, environmental, social and institutional) within a single system dynamics framework that explicitly incorporates resilience into sustainability analysis. Unlike previous studies that examine these dimensions independently, the proposed model captures their nonlinear interactions, feedback mechanisms and long-term dynamics within industrial ecosystems. By validating the framework through a real-world case study and identifying policy leverage points that simultaneously improve sustainability and resilience, the study provides both a novel theoretical framework and a practical decision-support model for policymakers, industrial managers and researchers interested in resilient manufacturing systems.

Keywords: System dynamics, Sustainable development, Production ecosystems, Resiliency, Policy simulation



پژوهش در مدیریت تولید و عملیات، دوره ۱۷، شماره ۲، پیاپی ۴۵، ۱۴۰۵
دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۷، بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۰۳ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۱ ص ۷۳-۱۰۸



DOI: [10.22108/pom.2026.146312.1634](https://doi.org/10.22108/pom.2026.146312.1634)

(مقاله پژوهشی)

مدل سازی دینامیکی پایداری و تاب آوری در سیستم های تولیدی:

تلفیق چهار زیرسیستم توسعه پایدار

آزاده رضایی^۱؛ یحیی زارع مهرجردی^{۲*}؛ محمد صالح اولیا^۳؛ حسن خادمی زارع^۴

۱- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه یزد، یزد، ایران، rezaei.a@stu.yazd.ac.ir

۲- استاد دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه یزد، یزد، ایران، yzare@yazd.ac.ir

۳- استاد دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه یزد، یزد، ایران، owliams@yazd.ac.ir

۴-استاد دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه یزد، یزد، ایران، hkhademiz@yazd.ac.ir

چکیده: این مطالعه، یک مدل پویایی شناسی سیستم یکپارچه را برای طراحی و ارزیابی سیاست هایی با هدف افزایش پایداری، تاب آوری و عملکرد در زیرسیستم های به هم پیوسته اقتصادی، زیست محیطی، اجتماعی و نهادی ارائه می دهد. با استفاده از حلقه های بازخورد پویا و شبیه سازی های مبتنی بر سناریو، این مدل نقاط اهرم مهمی را شناسایی می کند و به توسعه استراتژی های سازگار و بلندمدت برای حمایت از تولید پاک تر و توسعه پایدار منجر می شود. مطابق نتایج، سرمایه گذاری های استراتژیک پایدار در تحقیق و توسعه باعث رشد اقتصادی، کارایی فنی و پذیرش نوآوری می شود. تجزیه و تحلیل زیرسیستم زیست محیطی، بر ضرورت حکمرانی یکپارچه چندبخشی و سرمایه گذاری در مقیاس بزرگ در فناوری های پاک، به کاهش آلودگی و تاب آوری اکوسیستم تأکید می کند. سیاست های اجتماعی افزایش بخش کیفیت زندگی از طریق بهداشت و آموزش، روندهای جمعیتی را تثبیت و از عرضه پایدار نیروی کار حمایت می کنند. علاوه بر این، نتایج نشان می دهد که اصلاحات نهادی همراه با بهبود حکمرانی، فساد را کاهش داده است، انسجام سیاست گذاری را بهبود بخشیده و تاب آوری را برای مسیرهای تصمیم گیری آینده، افزایش داده است. این رویکرد جامع و چندبعدی، یک چارچوب تصمیم گیری قوی را برای سیاست گذاران فراهم می کند تا مسیرهای تولید پاک تری را هدایت کنند و رشد اقتصادی، رفاه اجتماعی، نظارت بر محیط زیست و اثربخشی نهادی در سیستم های اجتماعی-فنی پیچیده و در حال تحول، متعادل شوند.

واژه های کلیدی: سیستم دینامیک، توسعه پایدار، اکوسیستم های تولیدی، تاب آوری، شبیه سازی خط مشی



۱- مقدمه

توسعه پایدار مفهومی چندبعدی است که ثبات بلندمدت ابعاد اقتصادی، اجتماعی، زیست محیطی و نهادی را در بر می گیرد (Mensah, 2019). اکوسیستم های تولیدی، عناصر حیاتی اقتصاد جهانی اند و باید پایداری و تاب آوری را برای تداوم عملکرد و جلوگیری از پیامدهای منفی زیست محیطی و اجتماعی در خود ادغام کنند (Dacre et al., 2025). پایداری به معنای پاسخ گویی به نیازهای فعلی، بدون آسیب به توان نسل های آینده تعریف می شود و بر سه رکن اصلی حفاظت از محیط زیست، دوام اقتصادی و عدالت اجتماعی متکی است (Bañon Gomis et al., 2011; Mensah, 2019).

با این حال، در شرایط واقعی که با عدم قطعیت و تغییرات پیوسته همراه است، دستیابی به پایداری، نیازمند گنجاندن تاب آوری، یعنی توانایی سیستم برای جذب اختلالات، سازگاری با تغییرات و حفظ عملکردهای اصلی است (Folke et al., 2010; Walker et al., 2004). این دیدگاه یکپارچه، مبنای پژوهش حاضر را شکل می دهد و تعاملات بین ابعاد چهارگانه پایداری را در اکوسیستم های تولیدی بررسی می کند.

پیچیدگی فزاینده و آسیب پذیری سیستم های تولیدی، نیازمند رویکردهای پویایی است که به طور هم زمان به پایداری و تاب آوری توجه داشته باشند (Machado et al., 2019). مدل های سنتی خطی قادر به درک حلقه های بازخورد و وابستگی های متقابل پیچیده این سیستم ها نیستند؛ در حالی که مدل سازی پویایی شناسی سیستم، ابزار مناسبی را برای شبیه سازی پویایی بلندمدت این روابط پیچیده در زیرسیستم های اقتصادی، زیست محیطی، اجتماعی و نهادی فراهم می آورد (Cosenz et al., 2020; Zenezini & Marco, 2020).

در سیستم های تولیدی واقع در مناطق کم منابع و حساس به محیط زیست نظیر استان کرمان، چالش هایی نظیر کمبود آب، تخریب محیط زیست و بی ثباتی اجتماعی-اقتصادی وجود دارد که تحلیل دقیق تعامل بین نیروی کار، منابع آبی، حکمرانی، آلودگی و رشد اقتصادی را ضروری می کند (Ghorbani et al., 2021). مطالعه حاضر با تکیه بر متغیرهای استخراج شده برای هر زیرسیستم (Rezaei et al., 2023)، مدلی پویا را توسعه داده است که چهار بعد کلیدی پایداری اقتصادی، زیست محیطی، اجتماعی و نهادی را شامل می شود. این مدل در قالب یک مطالعه موردی بر استان کرمان، پویایی رفتار بلندمدت سیستم های تولیدی را شبیه سازی می کند و با هدف شناسایی نقاط اهرمی، بر طراحی استراتژی هایی برای بهبود پایداری و تاب آوری متمرکز است.

با وجود پیشرفت های انجام شده، شکاف های پژوهشی متعددی باقی مانده است: ابتدا بیشتر مطالعات، زیرسیستم های پایداری را به صورت مجزا بررسی می کنند و فاقد یکپارچگی میان ابعاد مختلف اند؛ دوم، تاب آوری معمولاً به صورت مستقل و نه در قالب مدل های یکپارچه تحلیل شده است؛ سوم، کمبود مطالعات تجربی در زمینه به کارگیری مدل های پویایی شناسی سیستم در سیستم های تولیدی واقعی، همچنان محسوس است؛ امری که برای اعتباربخشی نظریه ها و تقویت اثرگذاری سیاستی ضروری است.

در پاسخ به این شکاف ها، اهداف این مطالعه به شرح زیر است:

۱. توسعه یک مدل پویایی شناسی سیستم یکپارچه شامل چهار زیرسیستم کلیدی پایداری؛

۲. مدل سازی پویایی پایداری و تاب آوری در سیستم های تولیدی؛

۳. اعتبارسنجی مدل از طریق مطالعه موردی در استان کرمان.

هدف این پژوهش، تبیین و شبیه‌سازی پویایی پایداری و تاب‌آوری در سیستم تولیدی استان کرمان از طریق یک مدل جامع پویایی‌شناسی سیستم است. این مطالعه می‌کوشد مشخص کند که چگونه تعامل متغیرهای اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و نهادی رفتارهای مشاهده‌شده، همچون نوسانات تولید اقتصادی، کاهش منابع آب، انباشت آلودگی و رشد کاهنده، جمعیت را شکل می‌دهد و چگونه این رفتارها در قالب یک ساختار بازخوردی بازتولید و تحلیل می‌شود. هدف اصلی آن است که سازوکارهای علی-معلولی ایجادکننده این الگوهای ناپایدار شناسایی و زمینه برای ارزیابی سیاست‌های مختلفی فراهم شود که سیستم را به‌سوی مسیر پایداری و تاب‌آورتر هدایت می‌کنند. این پژوهش با ارائه یک چارچوب تصمیم‌سازی مبتنی بر مدل‌سازی پویا، می‌کوشد نشان دهد کدام مسیرهای سیاستی قادرند بهره‌وری اقتصادی را در بلندمدت تقویت کنند، فشار زیست‌محیطی را کاهش دهند، کیفیت زندگی اجتماعی را بهبود بخشند و در نهایت ساختار نهادی را برای تحقق توسعه پایدار تقویت کنند.

۲- مفاهیم، مبانی نظری و بررسی پیشینه

مفاهیم پایداری در اکوسیستم‌های تولیدی از نظر چهار زیرسیستم اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و نهادی بررسی می‌شود که با ابعاد سنتی توسعه پایدار مطابقت دارند ([Elkington, 1998](#)). این زیرسیستم‌ها با روابط غیرخطی و حلقه‌های بازخورد پیچیده در تعامل اند و پایداری را افزایش یا کاهش می‌دهند ([Meadows, 2008](#)); ([Sterman, 2000](#)). مفهوم پایداری از تمرکز اولیه بر رشد اقتصادی، به‌سوی درک روابط متقابل ابعاد چهارگانه تحول یافته است.

توسعه پایدار، نوعی تعادل بین رشد اقتصادی و حفاظت از محیط‌زیست ([Mensah, 2019](#)) است و به تأمین نیازهای نسل حاضر، بدون آسیب به نسل‌های آینده اشاره دارد ([WCED, 1987](#)) و تاب‌آوری نیز به توانایی سیستم در جذب اختلال و حفظ عملکرد اشاره می‌کند ([Folke et al., 2010](#)). این دو مفهوم، مکمل و تقویت‌کننده یکدیگرند و اتخاذ رویکردی یکپارچه برای تحلیل آنها در سیستم‌های تولیدی ضروری است ([Dacre et al., 2025](#)). مطالعه تمرکز بر هماهنگی رابطه بین توسعه اقتصادی، حفاظت از محیط‌زیست و مصرف انرژی را در کشورهای در حال توسعه، به‌عنوان اهداف پژوهش در نظر گرفته است و برای روشن‌شدن ارتباط بین مصرف انرژی، رشد اقتصادی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، یک سیستم شبیه‌سازی انرژی-اقتصاد-محیط‌زیست^۱ توسعه داده شده است که به صرفه‌جویی مالی و پایداری از طریق بازیافت اشاره دارد. متغیرهای کلیدی شامل تولید ناخالص داخلی^۲، تولید صنعتی، مصرف کل انرژی و انتشار آلودگی بود. آنها چهار سناریو توسعه، شامل سناریو پایه، توسعه سریع، تأخیر در توسعه و توسعه هماهنگ را برای تحلیل روندهای توسعه مصرف انرژی، توسعه اقتصادی و کاهش انتشار زیست‌محیطی برای توسعه پایدار در کشورهای در حال توسعه بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که سناریوی توسعه هماهنگ در دستیابی به اهداف توسعه پایدار، به‌ویژه بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش تدریجی انتشار گازهای گلخانه‌ای زیست‌محیطی نسبت به دیگر سناریوها، مؤثرترین سناریو بوده است. این مطالعه نشان می‌دهد که نه اولویت‌دادن به رشد سریع اقتصادی و نه نادیده‌گرفتن نگرانی‌های زیست‌محیطی، به یک مسیر سالم و پایدار منجر نمی‌شود ([Wu et al., 2021](#)). مطالعه دیگری با بررسی تعاملات پیچیده میان سیستم‌های زیست‌محیطی، اجتماعی و

اقتصادی، چالش‌های دستیابی به توسعه پایدار را بررسی کرده و ناپایداری را نتیجه آثار نامطلوب تخریب محیط‌زیست و نبود تعادل اجتماعی می‌داند. نتایج مدل نشان می‌دهد که مسیر فعلی توسعه جهانی، هم از نظر طبیعی و هم از نظر اجتماعی، ناپایدار است. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که الگوهای توسعه اقتصادی ناپایدار و کنترل‌نشده، به تأثیرات منفی درخور توجهی بر تولید ناخالص داخلی منجر می‌شود، به‌ویژه از طریق تغییرات آب‌وهوایی و آثار آن بر دارایی‌های سرمایه‌ای و بهره‌وری انرژی. آثار اجتماعی که بازتاب‌دهنده سازگاری اجتماعی با تغییرات آب‌وهوایی‌اند، در مدل محدود ظاهر شده‌اند و این موضوع نشان‌دهنده محدودیت‌های بالقوه در سازگاری اجتماعی یا نیاز به ادغام گسترده‌تر متغیرهای اجتماعی است. این مطالعه، بهبود ادغام متغیرهای اجتماعی و توسعه مدل‌های ترکیبی پویایی سیستم و عامل مبنا را برای پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌کند. این یافته‌ها ناپایداری اجتماعی و زیست‌محیطی مسیر توسعه جهانی فعلی را برجسته می‌کنند (Feder et al., 2024).

برخی از مطالعات، اثربخشی مدل‌های ترکیبی پویایی‌شناسی سیستم را در بهبود پایداری اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی نشان داده‌اند؛ برای مثال، پژوهشی یک مدل پویایی سیستم را برای ارزیابی توسعه پایدار ارائه و تنش‌های میان رشد اقتصادی و رفاه زیست‌محیطی و اجتماعی را بررسی کرده است. مدل شامل پنج زیرسیستم صنعت پارک علمی، جمعیت، مسکن و کاربری زمین، آلودگی محیط‌زیست و اقتصاد شهری بود. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که حداکثرسازی سود صنعتی همراه با حداقل‌سازی آسیب‌های زیست‌محیطی و اجتماعی، شرط اساسی برای توسعه پایدار است. سه سناریو شامل رشد اقتصادی، حفاظت محیط‌زیست و مدیریت یکپارچه ارزیابی و سناریوی مدیریت یکپارچه مؤثرترین گزینه تشخیص داده شد که متعادل‌کننده سودآوری صنعتی، حفاظت محیطی و عدالت اجتماعی بود (Ho & Wang, 2005). پژوهش دیگری، یک مدل پویایی سیستم را برای شبیه‌سازی مدیریت پایداری در شرکت‌های صنعتی توسعه داد. این مطالعه، روابط میان متغیرهایی مانند آموزش پایداری، مدیریت پسماند، مدیریت اخلاقی، نظارت و دستمزد کارگران را بررسی کرد. مدل، سه بُعد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی پایداری را ادغام کرد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که متغیرهایی همچون آموزش پایداری، مدیریت پسماند، رفتار اخلاقی، نظارت و حداقل دستمزد، عوامل اثرگذارند. همچنین سناریوهای آزمایشی نشان دادند که بهبود مدیریت و کاهش رفتارهای غیراخلاقی، ظرفیت پویای شرکت‌ها را به‌طور درخور توجهی افزایش می‌دهد (Bayu et al., 2022).

همچنین، یکی از پژوهش‌ها اهمیت نوآوری و رفاه کارکنان را در ارتقای عملکرد سیستم تولید بررسی کرده (Becerra-Fernandez et al., 2022) و پژوهش دیگری نشان داده است که توسعه مبتنی بر منابع تجدیدناپذیر ناپایدار است و رویکردی گام‌به‌گام برای مدل‌سازی پویایی سیستم ارائه و با استفاده از یک مدل رشد اقتصاد کلان، مفهوم پایداری را تبیین می‌کند. متغیرهای اصلی شامل موجودی سرمایه، تولید، مصرف، پس‌انداز و سرمایه‌گذاری بودند و مدل در ادامه با افزودن عوامل اکولوژیکی، پایداری فیزیکی، اجتماعی و زیست‌محیطی را در بر گرفت. نتایج نشان داد که توسعه اقتصادی با وجود ظاهر پایدار، با لحاظ تخلیه منابع تجدیدناپذیر در بلندمدت ناپایدار می‌شود و تعادل حالت پایدار به دلیل کاهش مستمر این منابع، حفظ‌شدنی نیست. همچنین ادغام متغیرهای اجتماعی مانند رشد جمعیت و حداقل سطح مصرف، مبادلات میان حفظ منابع و تأمین معاش را آشکار و تأکید کرد که حتی با وجود حلقه‌های بازخورد اکولوژیکی، در صورت ادامه تخلیه منابع تجدیدناپذیر، رکود اقتصادی اجتناب‌ناپذیر

خواهد بود (Yamuguchi, 2001). همچنین نتایج مطالعه دیگری، بیانگر آن بود که استفاده از روش‌های بازیافت موجب صرفه‌جویی مالی و ارتقای پایداری بلندمدت می‌شود. آنها از مدلسازی پویایی سیستم استفاده کردند و بر ادغام شیوه‌های بازیافت و به‌کارگیری مجدد با هدف بهبود عملکرد زیست‌محیطی و سودآوری تمرکز داشتند. در این مدل، متغیرهایی مانند جریان مواد، مدیریت پسماند، کیفیت محصول، تصویر سبز شرکت و منابع مالی، عوامل کلیدی مؤثر بر موفقیت مدل پایدار در نظر گرفته شدند. شبیه‌سازی سناریوهای مختلف نشان داد که ادغام بازیافت و استفاده مجدد، به‌ویژه در مناطقی به تأمین پایدار مواد اولیه منجر می‌شود که فاقد زیرساخت‌های بازیافت‌اند. یافته‌ها بیان می‌کند که هرچند افزایش محتوای مواد بازیافتی ممکن است کیفیت محصول را اندکی کاهش دهد، حفظ کیفیت بالاتر از ۸۵ درصد امکان‌پذیر است. همچنین درصد بیشتر مواد بازیافتی، تصویر سبز شرکت را تقویت می‌کند و بر تقاضا اثر مثبت دارد، اگرچه این رویکرد باید با توجه به محدودیت‌های فناوری و کیفیت در سطوح پذیرفتنی باقی بماند. عوامل بیرونی نظیر مشوق‌های دولتی و مالیات بر آلودگی نیز، بر تصمیمات مدیریتی تأثیرگذارند. نتایج نهایی نشان می‌دهد که به‌کارگیری شیوه‌های پایدار، موجب صرفه‌جویی در هزینه‌های مواد و بهبود اعتبار برند می‌شود و از پایداری اقتصادی و زیست‌محیطی بلندمدت حمایت می‌کند (Hosseini & Hosseini, 2022).

در حوزه تاب‌آوری، پویایی‌شناسی سیستم برای تحلیل سیستم‌های پیچیده مانند تولید و اکوسیستم‌های اجتماعی-اکولوژیکی کاربرد گسترده یافته است. مطالعه‌ای با استفاده از پویایی‌شناسی سیستم، مفهوم «فضای عملیاتی ایمن» را با استفاده از یک مدل پویایی سیستم و اجرای هشت سناریو در بستر سیستم‌های اجتماعی-اکولوژیکی، برای حفظ تاب‌آوری بررسی کردند. نتایج مطالعه تأکید کرد که حفظ سیستم در یک فضای امن، مستلزم (۱) مدیریت مؤثر بازخوردها برای تقویت تاب‌آوری بلندمدت؛ (۲) همکاری و مذاکره در زمینه منابع آب فرامرزی و (۳) بازنگری در سیاست‌های جهانی با آثار منفی بر مقیاس‌های منطقه‌ای است. این یافته‌ها نقش سیاست‌گذاری چندسطحی را در مدیریت پویای سیستم‌های اجتماعی-اکولوژیکی برجسته می‌کند (Hossain et al., 2017).

پژوهش دیگری نشان داد مدل‌های پویایی‌شناسی سیستم، قابلیت بهتری در نمایش نوسانات قابلیت اطمینان و ارزیابی تاب‌آوری فرآیندهای صنعتی دارند. نتایج نشان داد که مدل پویایی‌شناسی سیستم، تغییرات زمانی قابلیت اطمینان و نقش مهم نگهداری پیشگیرانه را بهتر منعکس می‌کند (Salzano et al., 2014). در همین راستا، مطالعه دیگری تأثیر راهبردهای پیشگیرانه را در بازگشت سیستم به عملکرد مطلوب بررسی کردند. آنها مفهوم تاب‌آوری را در سیستم‌های تولیدی، با الهام از سیستم‌های اجتماعی-اکولوژیکی بررسی و با استفاده از مدلسازی پویایی سیستم، برنامه‌های بهبود قابلیت اطمینان ماشین را شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که رویکردهای واکنشی در مواجهه با افزایش تقاضا، موجب کاهش قابلیت اطمینان و افت عملکرد می‌شود؛ در حالی که استراتژی نگهداری پیشگیرانه، توان بازگرداندن سیستم به وضعیت مطلوب را دارد (Rydzak et al., 2006). پژوهش دیگری، شاخص تاب‌آوری پویا را برای ارزیابی تاب‌آوری در سیستم‌های اجتماعی-اکولوژیکی توسعه داد. این شاخص، مجموعه‌ای از مؤلفه‌های کلیدی از جمله تنوع زیستی، شبکه‌های اجتماعی، نهادها، حکمرانی چندمرکزی، خدمات اکوسیستمی، سرمایه فیزیکی، کارایی، دانش تطبیقی و برابری جنسیتی را در یک معیار کمی واحد ادغام می‌کند. این مطالعه همچنین نشان داد که حوزه اجتماعی در تحقیقات تاب‌آوری کمتر بازنمایی می‌شود و این شکاف با ادغام بینش‌های علوم اجتماعی، کاهش می‌یابد. درمجموع، شاخص تاب‌آوری پویا ابزاری کمی برای تکمیل ارزیابی‌های کیفی و

انجام مقایسه‌های بین‌سیستمی پیشنهاد شده است (Meirelles, 2018). در سطح تولید، پژوهشی با ترکیب پویایی‌شناسی سیستم و دیمتل‌فازی، روابط میان عوامل تاب‌آوری و شاخص‌های پایداری را شبیه‌سازی کرد. برای تبیین روابط علی میان عوامل تاب‌آوری، از روش دیمتل‌فازی استفاده و سپس این روابط در قالب نمودار علی و مدل انباشت-جریان به صورت پویا شبیه‌سازی شد. پنج سناریو با وزن‌های متفاوت برای عوامل تاب‌آوری طراحی و شبیه‌سازی و به کمک روش تاپسیس، سناریوی بهینه تعیین شد. نتایج نشان داد که یک ترکیب خاص از وزن‌دهی عوامل، بهترین پیامد را ایجاد می‌کند. این پژوهش با تلفیق دیمتل‌فازی و مدل‌سازی پویایی سیستم، به شکاف موجود در پیشینه، یعنی نبود چارچوب‌های پویا، که هم‌زمان عوامل کلیدی تاب‌آوری و شاخص‌های پایداری را در یک مدل یکپارچه لحاظ کنند، پاسخ داده است (Zare Mehrjerdi, 2022).

پویایی‌شناسی سیستم، ابزار مهمی برای تحلیل پویایی اقتصادی در سیستم‌های تولیدی است که پایداری اقتصادی را از طریق رقابت‌پذیری، نوآوری و بهره‌وری منابع بررسی می‌کند (Porter & Kramer, 2006). سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پاک و بهینه‌سازی مصرف منابع، باعث کاهش هزینه، افزایش سود و تقویت تاب‌آوری بازار می‌شود (Kamande & Lokina, 2013) و توسعه پایدار نیازمند تعادل میان رشد اقتصادی و مسئولیت‌های اجتماعی-زیست‌محیطی است (Spangenberg, 2004). مطالعات با مدل پویایی‌شناسی سیستم، نشان داده‌اند که واکنش فوری سیستم تولید به شوک‌ها ممکن است ناپایداری ایجاد کند، اما سیاست‌گذاری تدریجی پایداری بیشتری دارد. پژوهشی با به‌کارگیری مدل‌سازی پویایی‌شناسی سیستم، پویایی اقتصادی سیستم‌های تولید را در یک مطالعه موردی صنعتی تحلیل کردند. تحلیل سناریو نشان داد که واکنش‌های سریع و تهاجمی به شوک‌های تقاضا، مانند افزایش فوری نیروی کار، بی‌ثباتی و ناکارآمدی ایجاد می‌کند؛ در حالی که سیاست‌های تدریجی و هماهنگ با اهداف بلندمدت عملکرد بهتری دارند. یافته‌ها همچنین اهمیت حلقه‌های بازخورد داخلی را برجسته می‌کند؛ به گونه‌ای که افزایش ظرفیت بدون توجه به آموزش نیروی کار یا محدودیت‌های عملیاتی، بازده را کاهش می‌دهد (Britten & Curiel Sosa, 2020).

همچنین، سرمایه‌گذاری در فناوری سبز و آموزش پرسنل موجب کاهش مصرف انرژی و بهبود بهره‌وری می‌شود. پژوهشی با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم، پویایی اجرای نوآوری‌های زیست‌محیطی را در شرکت‌های تولیدی، مدل‌سازی کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که سرمایه‌گذاری در تجهیزات سازگار با محیط‌زیست، مصرف انرژی و هزینه‌ها را کاهش می‌دهد و حرکت تدریجی را از فناوری‌های سنتی به فناوری‌های سبز تسهیل می‌کند. تقاضای بازار و آگاهی زیست‌محیطی نیز، محرک‌های کلیدی پذیرش شیوه‌های پایدار شناسایی شدند. مدل نشان داد که ارتقای مهارت و آموزش کارکنان، نقش اساسی در موفقیت نوآوری‌های زیست‌محیطی دارد (Pérez-Pérez et al., 2021).

پویایی‌شناسی سیستم نقش مهمی در تحلیل زیرسیستم زیست‌محیطی در برابر چالش‌هایی چون تغییرات اقلیمی، کاهش منابع طبیعی و آلودگی دارد (Geissdoerfer et al., 2017). مطالعه‌ای در بررسی مدیریت زباله، بر نقش تفکیک و استفاده مجدد در کاهش آلودگی تأکید کرد. این مطالعه با تمرکز بر چالش‌های دفع نامناسب زباله و تأثیر آن بر تغییرات آب و هوا و سلامت عمومی، از حلقه‌های علی و نمودارهای ذخیره و جریان برای تحلیل سیستم پیچیده مدیریت پسماند استفاده کرد. نتایج نشان داد کاهش بالقوه زباله امکان‌پذیر است و نقش حیاتی مرتب‌سازی

و بازیافت را در کاهش آلودگی محیط‌زیست برجسته می‌کند. سه سناریوی متعادل، مطلوب و نامطلوب برای پیش‌بینی روند تولید و بازیافت زباله، تحلیل شد. براساس این مطالعه، مدلسازی پویایی‌شناسی سیستم، چارچوب جامعی را برای تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد در مدیریت پسماند ارائه می‌کند ([Retuerto et al., 2021](#)). پژوهش دیگری تأثیر ساختار صنعتی و کشاورزی را بر کیفیت آب، در پنج سناریو تحلیل کرد. مدل، تعامل بین کیفیت آب، جمعیت، منابع آب و بخش‌های اولیه، ثانویه و ثالث را نشان می‌دهد و ۹ زیرصنعت کلیدی آلاینده را شناسایی می‌کند. پنج سناریوی مبتنی بر تجدید ساختار صنعتی برای بررسی آثار توسعه اقتصادی شبیه‌سازی شد. نتایج حاکی از بهبود مداوم کیفیت آب و بیشترین تأثیر از سوی بخش کشاورزی، صنایع تولید کاغذ و پرورش دام و طیور بود. طبق این مطالعه، بهینه‌سازی مشارکتی این صنایع کیفیت آب را به‌طور محدود بهبود می‌دهد؛ اما اجرای استراتژی تولید پاک‌تر ضروری است ([Wang et al., 2021](#)). همچنین در مدل‌های اقتصادی-انرژی-محیط‌زیست، پژوهشی بر نیاز به اصلاح ساختار انرژی و سرمایه‌گذاری زیست‌محیطی، برای پایداری تأکید داشت. مدل آنها شامل سه زیرسیستم اقتصادی، انرژی و محیط‌زیست است که با استفاده از تولید ناخالص داخلی، مصرف انرژی و آلودگی آب، هوا و پسماند صنعتی به هم پیوند داده شده‌اند. شبیه‌سازی‌ها نشان داد سیستم فعلی ناپایدار است و رشد سریع مصرف انرژی و افزایش آلودگی، سلامت عمومی و توسعه اقتصادی را تهدید می‌کند. با این حال، تنظیم ساختار انرژی و سرمایه‌گذاری در حفاظت محیط‌زیست، کیفیت محیط‌زیست را بهبود می‌دهد و رشد اقتصادی پایدار را تضمین می‌کند. تحلیل سناریوها نشان داد الگوی توسعه هماهنگ و یکپارچه‌سازی سیاست‌های انرژی و محیط‌زیست، بیشترین منافع جامع را فراهم می‌کند ([Zuo et al., 2017](#)). مطالعه دیگری با ترکیب پویایی‌شناسی سیستم و سیستم اطلاعات جغرافیایی^۳ برای تحلیل سیستم اقتصادی-انرژی-محیط‌زیست، سناریوهای فناوری و محیط‌زیستی را برای توسعه متعادل بررسی کرد. مدل شامل هشت زیرسیستم از جمله تولید ناخالص داخلی، ورودی فناوری و سرمایه، منابع تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر، انتشار گازهای گلخانه‌ای و پسماند جامد بود. براساس شبیه‌سازی‌ها، شرایط فعلی ناپایدار است، سناریوی فناوری برای رشد اقتصادی اجرایی است و سناریوی محیط‌زیست توسعه متعادل و بلندمدت را حفظ می‌کند. همچنین اولویت‌های سیاستی ساده برای توسعه پایدار کافی نیست و ترکیب سیاست‌ها برای توازن محیط‌زیست، انرژی و اقتصاد ضروری است ([Wu & Ning, 2018](#)). در پژوهش دیگری، اثربخشی ترکیب سیاست‌های مختلف در دستیابی به اهداف 3E نشان داده شده است. سه سناریوی تک‌سیاستی و چهار سناریوی ترکیبی شبیه‌سازی شده و نتایج مشخص کرد که ادامه روند فعلی، نقش محدود صنایع پیشرفته، سهم بالای انرژی فسیلی و تحقق نیافتن اهداف کاهش آلودگی هوا را به‌همراه دارد. اجرای سیاست‌های جامع در هر سه بعد به‌طور چشمگیری مؤثر است و ترکیب بهینه‌سازی ساختار صنعتی، تحول ساختار انرژی و کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای، توسعه اقتصادی پیشرفته، انقلاب انرژی پاک و کاهش آلودگی هوا را تضمین می‌کند ([Zhu et al., 2022](#)). پژوهشی رابطه رشد جمعیت را با تولید غذا، مصرف انرژی و آلودگی بررسی کرد. مدل شامل تولید مواد غذایی، تقاضای انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای بود و متغیرهای کلیدی شامل اندازه جمعیت، مصرف غذا و انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و تولید ناخالص داخلی بود. شبیه‌سازی‌ها نشان داد افزایش جمعیت، تقاضای غذا و انرژی و آلودگی هوا را افزایش می‌دهد و تغییرات نرخ رشد جمعیت، تأثیر درخور توجهی بر مصرف انرژی و انتشار آلودگی دارد که این مسئله، اهمیت سیاست‌های مدیریت انرژی را برجسته می‌کند ([Mobaseri et](#)

[\(al., 2021\)](#). مطالعه دیگری نشان داد که رشد اقتصادی متوسط با کاهش متوسط کربن، تعادل بهتری میان توسعه و حفاظت زیست محیطی ایجاد می کند. آنها توسعه هماهنگ رشد اقتصادی و حفظ محیط زیست را با مدل پویایی شناسی سیستم بررسی کردند که زیرسیستم های اقتصاد، مصرف انرژی، انتشار کربن و توسعه اجتماعی را ادغام می کند. براساس شبیه سازی سه سناریو، تولید متوسط و کم کربن متوسط، بهترین تعادل را بین رشد اقتصادی و حفاظت محیط زیست فراهم می کند. روند تعدیل ساختار صنعتی مشخص کرد که نسبت صنایع سبز و متوسط کاهش و نسبت صنایع سبک و سنگین افزایش می یابد ([Li et al., 2019](#)). آنها همچنین بر اهمیت محدودیت های اکولوژیکی در مدیریت منابع و آلاینده ها تأکید کرده و نشان داده اند که تعادل بین مصرف منابع و انتشار آلاینده ها برای حفظ محیط زیست، ضروری است. حلقه های بازخورد نشان می دهند نرخ تولید بر کیفیت آب، هوا و امنیت انرژی تأثیر می گذارد ([Mota-López et al., 2017](#)).

ابعاد اجتماعی که پیش تر جنبه ای ثانویه در توسعه پایدار داشتند، امروزه مؤلفه های اساسی در نظر گرفته می شوند. در همین راستا، مطالعه ای با ادغام الگوریتم بهینه سازی چندهدفه و پویایی شناسی سیستم، مدلی را برای پیش بینی جمعیت شهری ارائه داد که شامل عوامل طبیعی، زیست محیطی، اجتماعی-اقتصادی و سیاست های دولتی مانند نرخ باروری، مرگ و میر، شاخص های اقتصادی، تحصیلات و مراقبت های بهداشتی است. سیاست های اشتغال و باروری، بیشترین تأثیر مثبت را دارند ([Li et al., 2023](#)). در مطالعه دیگری، تعامل عوامل اقتصادی-اجتماعی مؤثر بر فقر بررسی و بر اهمیت بودجه ریزی مؤثر، اصلاح دستمزدها و کنترل قیمت ها در کاهش فقر تأکید شد. شبیه سازی ها نشان داد فقر عمدتاً تحت تأثیر تعامل هزینه، توزیع هزینه و خط فقر است و غفلت از بودجه ریزی برنامه های فقرزدایی، فقر را افزایش می دهد. سیاست هایی مانند کنترل قیمت ها، بهبود توزیع هزینه ها و تعدیل دستمزد برای گروه های کم درآمد، مکانیسم های کاهش فقر بلندمدت پیشنهاد شد. مطالعه بر اهمیت بودجه مستقیم دولت در برنامه هایی تأکید کرد که مصرف جامعه را به طور مستقیم تحت تأثیر قرار می دهند ([Ahmad & Kustiwan, 2019](#)). پژوهش دیگری، از مدل پویایی شناسی سیستم برای ارزیابی آثار اجتماعی-اقتصادی استفاده کرد و نشان داد این پروژه ها نرخ بیکاری را کاهش و تولید ناخالص داخلی را افزایش می دهند. مدل شامل معیارهای اقتصادی و مزایای غیرمستقیم مانند تأثیر بر تولید ناخالص داخلی، نرخ بیکاری و مالیات های بخش های اقتصادی بود. نتایج نیز کاهش نرخ بیکاری و افزایش تولید ناخالص داخلی بخش ها را نشان داد ([Nguyen et al., 2017](#)). همچنین پژوهشی با مدل سازی سیستم های تولید-زندگی-اکولوژیکی شهری^۴، تأثیر متقابل عملکردهای زیستی، اقتصادی و اجتماعی را بر کیفیت زندگی تحلیل کرد. نتایج همبستگی مثبت بین جمعیت، تولید ناخالص داخلی و مساحت ساخته شده را نشان داد و مشخص کرد که افزایش فضاهای سبز، بازتاب دهنده رشد آگاهی زیست محیطی است. تعامل بین تولید، زندگی و عملکردهای اکولوژیکی نیز به طور چشمگیری بر توسعه شهری و کیفیت زندگی تأثیر می گذارد و مدل توانایی بررسی هماهنگی کارکردهای شهری را دارد ([Wu & Huang, 2023](#)).

نهادهای نقش کلیدی در هدایت پایداری دارند؛ زیرا ساختارهای حاکمیتی، توانمندسازهای توسعه پایدار را شکل می دهند. در همین راستا، مطالعه ای با استفاده از پویایی شناسی سیستم، پویایی فساد را در کشورهای در حال توسعه بررسی کرد. متغیرهای کلیدی شامل فساد، پاسخگویی، بازبودن اقتصادی، مخارج و ثبات دولت بود. عواملی مانند تورم، دولت و شفافیت در افزایش یا کاهش فساد در کشورهای در حال توسعه مؤثرند ([Ullah, 2012](#)). پژوهشی

دیگر، تعامل عوامل ساختاری، فرهنگی و مالی را در شکل‌گیری فساد بررسی کرد. مدل متغیرهایی مانند شفافیت، استانداردهای اخلاقی، شرایط اقتصادی و چارچوب‌های نظارتی را در حلقه‌های بازخورد ترکیب کرد. مدل در سه زیرسیستم تعامل محرک‌های معتبر و سازمانی، تعامل محرک‌های فردی، فرهنگی و سازمانی و تعامل محرک‌های سازمانی و مالی دسته‌بندی شد. همچنین مطالعه سه راه‌حل را ارائه داد: فساد باید در سطوح دولتی و سازمانی درک شود، استراتژی‌های ضد فساد باید مبتنی بر مدیریت ذینفعان و اخلاق باشد و اصلاحات ضد فساد باید به رکود اقتصادی توجه کند (Zarghami, 2024). در مدلی دیگر، اثر متقابل حکمرانی خوب، رضایت از زندگی و ضریب GINI بررسی شد. مدل آنها شامل متغیرهای درون‌زا مانند رضایت از زندگی، کنترل فساد و ثبات سیاسی و عوامل برون‌زا مانند هزینه‌های دولت و نرخ بیکاری بود و اثر اثربخشی حکمرانی بر تورم، کنترل فساد و حاکمیت قانون تحلیل شد. حکمرانی اثربخش تورم، نابرابری و رضایت اجتماعی را بهبود می‌بخشد (Zare Mehrjerdi & Abedi, 2023). همچنین مطالعه‌ای با ترکیب اقتصادسنجی و پویایی‌شناسی سیستم پیشنهاد داد که کنترل فساد باید متناسب با وضعیت نهادی کشورها تنظیم شود. مدل آنها شامل سیزده عامل نهادی، از جمله کنترل فساد، پاسخگویی، اثربخشی دولت، رشد تولید ناخالص داخلی و حاکمیت قانون بود و روابط علی بین آنها با تحلیل اقتصادسنجی تعیین شد. نتایج نشان داد که کاهش فساد مستلزم استراتژی سرمایه‌گذاری متناسب با شرایط کشور است؛ برای مثال در کشورهای در حال توسعه تمرکز بر کنترل تورم، بازبودن اقتصادی و حاکمیت قانون؛ در کشورهای بریکس، ثبات سیاسی، نبود خشونت و حاکمیت قانون و در کشورهای توسعه‌یافته، تولید ناخالص داخلی سرانه، کنترل نابرابری درآمد، ثبات سیاسی، کیفیت نظارتی و حاکمیت قانون کلیدی است (Taylor et al., 2022).

پیشینه موجود نشان می‌دهد که پایداری در اکوسیستم‌های تولیدی، یک مفهوم چندبعدی است، تحت تأثیر زیرسیستم‌های اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و نهادی قرار دارد و پیامدهای بلندمدت سیستم را با حلقه‌های بازخورد پیچیده شکل می‌دهد.

طبق مطالعات مربوط به پایداری، توسعه اقتصادی بدون لحاظ مؤلفه‌های محیط‌زیستی و اجتماعی، به ناپایداری می‌انجامد. مدل‌های چند زیرسیستمی هم بر ضرورت توازن میان رشد اقتصادی، مصرف انرژی و کاهش آلودگی تأکید دارند؛ اما بیشتر ابعاد اجتماعی و نهادی مانند عدالت، رفاه و کیفیت زندگی به صورت جامع ادغام نشده‌اند، بسیاری از پژوهش‌ها در سطح ملی یا بین‌المللی انجام شده‌اند و مدل‌های محلی شده برای استان‌ها و اکوسیستم‌های تولیدی خاص، محدود است.

براساس حوزه تاب‌آوری، برخی واکنش‌ها قابلیت اطمینان را در صنایع تولیدی کاهش می‌دهند و مدیریت پیشگیرانه و بازخورد، نقش کلیدی در بازگرداندن سیستم به وضعیت مطلوب دارند. با این حال بیشتر افراد، مطالعات تاب‌آوری را جدا از پایداری بررسی کرده‌اند و شاخص‌های چندبعدی تاب‌آوری هم، که مؤلفه‌های نهادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را یکپارچه می‌کنند، محدود است. مطالعات در حوزه تولید نشان می‌دهند که واکنش شتاب‌زده به شوک‌ها موجب ناپایداری می‌شود و فناوری‌های پاک، بازیافت و سرمایه‌انسانی در پیاده‌سازی نوآوری و کاهش هزینه‌ها نقش حیاتی دارند. با این حال، تحلیل هم‌زمان عوامل فنی، اجتماعی و نهادی در مدل‌های رفتاری تولید، بسیار محدود است.

از سوی دیگر، پیشینه اجتماعی و نهادی بر نقش رضایت اجتماعی، سیاست گذاری، کیفیت حکمرانی و کنترل فساد در پایداری تأکید دارد؛ به طوری که سیاست های اجتماعی، حکمرانی خوب و کاهش فساد، آثار مستقیمی بر رفاه و پایداری اقتصادی و زیست محیطی دارند. با این حال، مدل های پویایی شناسی سیستم یکپارچه، شامل هر چهار بعد اقتصادی، اجتماعی، زیست محیطی و نهادی بسیار محدودند و به ویژه در مقیاس منطقه ای کمتر به آنها توجه می شود.

مطالعه حاضر با هدف پرکردن این شکاف ها، یک مدل پویایی شناسی سیستم یکپارچه چهاربعدی را ارائه می دهد که پیوندهای ساختاری میان پایداری و تاب آوری را در نظر گرفته است. این پژوهش با تحلیل سناریوهای ترکیبی، اثر سیاست ها را بر پایداری و تاب آوری بررسی می کند و چارچوبی علمی را برای مدیریت آینده نگرانه تولید ارائه می دهد که شامل پیش بینی آثار اقتصادی سیاست ها، تحلیل چالش های محیط زیستی، بررسی جمعیت، مهاجرت، اشتغال و نقش حکمرانی و نهادها در اکوسیستم تولیدی است.

۳- روش پژوهش

این پژوهش با مدل سازی پویایی شناسی سیستم، مدلی را برای تحلیل پایداری و تاب آوری در سیستم های تولیدی استان کرمان توسعه می دهد. فرآیند مدل سازی با نرم افزار Vensim PLE انجام شد و مطالعه موردی، استان کرمان را بررسی کرد که با چالش هایی مانند کم آبی، تخریب زیست محیطی، ناهماهنگی مهارت ها و جمعیتی مواجه است. در ادامه این فرآیند، مدل سازی را برای ساخت مدل دنبال می کنیم.

۳-۱ بیان مسئله و تعیین مرز در مطالعه کاربردی

این پژوهش حول نیاز به درک و افزایش پایداری و تاب آوری سیستم های تولیدی انجام شده است. شاخص ها در چهار زیرسیستم طبقه بندی شده اند: اقتصادی (علم، فناوری، نوآوری)، زیست محیطی (کیفیت هوا، تصفیه زباله، بهره وری انرژی)، اجتماعی (فقر، توزیع درآمد، بهداشت، ایمنی) و نهادی (شفافیت اطلاعات و ثبات سیاسی) (Rezai et al., 2023).

در این مطالعه، استان کرمان به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است تا پویایی های اقتصادی، زیست محیطی، اجتماعی و نهادی و نقش آنها در شکل گیری پایداری و تاب آوری سیستم تولیدی بررسی شود. داده های تاریخی سال های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۴ مبنای استخراج رفتارهای مرجع و سپس توسعه ساختار مدل انباشت-جریان قرار گرفته اند. هدف از به کارگیری این داده ها، شناسایی الگوهای تاریخی، آشکارسازی ریشه های ناپایداری و فراهم کردن شواهد تجربی برای تدوین فرضیه دینامیکی است.

رفتار مرجع زیرسیستم اقتصادی نشان داد که تولید ناخالص داخلی استان طی دوره بررسی شده، الگوی نوسانی و شکننده ای را تجربه کرده است. دوره هایی از رشد نسبی، افت های ناگهانی، نوسان های ممتد و در نهایت جهش های جبرانی، بیانگر وجود ساختارهایی است که از یک سو ظرفیت رشد اقتصادی را محدود می کنند و از سوی دیگر، تاب آوری و پایداری آن را در برابر اختلالات بیرونی کاهش می دهند. وابستگی شدید فرایندهای تولید به منابع آب، فرسودگی فناوری و ضعف در نوآوری، تغییرات کارآمدی نهادی و تأثیرپذیری اقتصاد از شوک های

بیرونی، مجموعه‌ای از سازوکارهای بازخوردی را شکل می‌دهند که رفتار ناپایدار GDP را توضیح می‌دهد. بر همین اساس، مدل دینامیکی اقتصادی با تمرکز بر تعامل میان منابع، فناوری و سرمایه‌گذاری و همچنین سازوکارهای تقویتی و تضعیفی مرتبط با ظرفیت تولید، توسعه یافت.

تحلیل داده‌ها در زیرسیستم زیست‌محیطی نشان داد که منابع آب تجدیدپذیر استان طی پانزده سال گذشته، به طور مستمر کاهش یافته و در مسیر یک روند نزولی انباشتی قرار گرفته است. این الگو متأثر از افزایش پیوسته مصرف آب در بخش‌های صنعتی، کشاورزی و خانگی، برداشت بیش از حد از سفره‌های آب زیرزمینی، افزایش فراوانی خشک‌سالی‌ها و ضعف سیاست‌های تخصیص و مدیریت منابع آب است. کاهش منابع آب، نشان‌دهنده احتمال ورود سیستم به یک وضعیت بحرانی است. این رفتار مرجع، نیاز به درک عمیق سازوکارهای بازخوردی بین مصرف آب، تولید، جمعیت و سیاست‌گذاری را ضروری می‌کند. همچنین روند تاریخی انباشت آلودگی و انتشار گازهای گلخانه‌ای مشخص کرد که فعالیت‌های صنعتی و حمل‌ونقل، وابستگی گسترده به سوخت‌های فسیلی و نبود فناوری‌های کارآمد کنترل آلودگی، موجب شکل‌گیری یک رفتار افزایشی و فزاینده در افزایش آلاینده‌ها شده است که نتیجه، تأخیر توسعه اقتصادی است و در طول زمان تجمع می‌شود؛ رفتاری که با وجود تأخیر زمانی، بر کیفیت زندگی، سلامت جامعه و بهره‌وری نیروی کار تأثیر منفی گذاشته و کنترل آن به‌مرور، دشوارتر شده است. این یافته‌ها در مدل، به صورت جریان‌های ورودی و خروجی وابسته به تولید و جمعیت، همراه با تأخیرهای بلندمدت تجدیدپذیری و ظرفیت جذب آلاینده وارد شدند.

زیرسیستم اجتماعی نیز، رفتار جمعیت استان را طی دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۴ به صورت روند افزایشی با آهنگ رشد کاهنده نشان می‌دهد. افزایش امید به زندگی و ارتقای شاخص توسعه انسانی، موجب تقویت تدریجی سهم گروه‌های میان‌سال و سالمند شده و مهاجرت به‌ویژه در میان جوانان، به دلیل محدودیت‌های فرصت‌های شغلی، نابرابری درآمدی و فقر و فشارهای اجتماعی، جریان خروجی مهمی را در ساختار جمعیتی شکل داده است. در کنار این عوامل، ثبات نسبی نرخ مشارکت نیروی کار نشان می‌دهد که رشد جمعیت الزاماً با افزایش ظرفیت نیروی کار همراه نیست و بخشی از جمعیت در بازار کار فعال نمی‌شود. این رفتارها در مدل پویایی‌شناسی سیستم، در قالب حلقه‌های بازخوردی مرتبط با بار جمعیتی، مهاجرت و عرضه نیروی کار بازنمایی و به نقش آنها در شکل‌گیری تاب‌آوری اجتماعی توجه شده است.

جدول ۱، خلاصه‌ای از نتایج این مطالعه کاربردی را نشان می‌دهد که پایداری و تاب‌آوری سیستم تولیدی در استان کرمان، حاصل برهم‌کنش پیچیده و مستمر میان زیرسیستم‌های اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و نهادی است. الگوهای رفتاری شناسایی شده بیانگر آن‌اند که ناپایداری موجود نه تنها نتیجه ضعف در یک حوزه خاص، محصول تعامل سازوکارهای بازخوردی چندبعدی است. کاهش مداوم منابع آب، افزایش آلودگی و تغییرات ساختار جمعیتی، هریک به صورت مستقیم و غیرمستقیم بر ظرفیت تولید و توان بازگشت سیستم از اختلالات، اثر می‌گذارند. از سوی دیگر، نوسانات اقتصادی نیز موجب تشدید فشار بر محیط زیست و تضعیف شاخص‌های اجتماعی می‌شود.

جدول ۱- خلاصه‌ای از وضعیت موجود در سه زیرسیستم اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی استان کرمان (۲۰۲۴-۲۰۱۰)

Table 1- Summary of the current situation in the three subsystems of Kerman Province (2010-2024)

متغیر	زیرسیستم	مرجع کلیدی	الگوی رفتاری ۲۰۲۴-۲۰۱۰	عوامل علی و سازوکارهای بازخوردی	برداشت تحلیلی	پیامد برای پایداری و تاب‌آوری
تولید ناخالص داخلی	اقتصادی	تولید ناخالص داخلی	نوسانی با دامنه متوسط: رشد پایدار (۲۰۱۲-۲۰۱۰)، افت ناگهانی (۲۰۱۳)، نوسان و بازیابی نسبی (۲۰۱۷-۲۰۱۴)، سقوط شدید (۲۰۲۰-۲۰۱۸)، رشد پرشتاب (۲۰۲۳-۲۰۲۱)	وابستگی تولید به منابع آب و مشارکت نیروی کار	کاهش بهره‌وری صنعتی به دلیل فرسودگی فناوری، نوسانات سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه و ظرفیت نوآوری، نوسان در کیفیت حکمرانی و کارایی نهادی	کاهش بهره‌وری نشان‌دهنده تاب‌آوری اقتصادی پایین و وابستگی به منابع محدود؛ تأییدکننده وجود حلقه‌های تقویتی رشد و حلقه‌های تضعیف‌کننده ناشی از محدودیت‌های محیطی و نهادی
منابع آب	زیست محیطی	منابع آب	روند نزولی پایدار و مداوم (رفتار کاهش انباشتی)	افزایش مصرف آب در صنعت، کشاورزی و بخش خانگی	استخراج بیش از ظرفیت سفره‌های زیرزمینی، افزایش تقاضای وضعیت بحرانی منابع؛ وجود تأخیرهای ساختاری کاهش بارش و در بازتولید آب؛ نقش مهم تشدید خشک‌سالی این متغیر در حلقه‌های ناشی از تغییرات تضعیف‌کننده اقتصادی-اقلیمی، مدیریت زیست‌محیطی ناکارآمد تخصیص آب	استخراج بیش از ظرفیت سفره‌های زیرزمینی، افزایش تقاضای وضعیت بحرانی منابع؛ وجود تأخیرهای ساختاری کاهش بارش و در بازتولید آب؛ نقش مهم تشدید خشک‌سالی این متغیر در حلقه‌های ناشی از تغییرات تضعیف‌کننده اقتصادی-اقلیمی، مدیریت زیست‌محیطی ناکارآمد تخصیص آب
انباشت گازهای گلخانه‌ای / آلودگی هوا	زیست محیطی	انباشت گازهای گلخانه‌ای / آلودگی هوا	روند افزایشی فزاینده (رفتار انباشتی تقویتی)	افزایش تولید و فعالیت‌های صنعتی	گسترش صنعتی، نشان‌دهنده وجود حلقه‌های وابستگی بالا به تقویتی مخرب که به افزایش تولید و سوخت‌های فسیلی، کاهش کیفیت زندگی و فناوری ناکافی کنترل بهره‌وری منجر می‌شود؛ آلودگی، افزایش حمل اهمیت سیاست‌های انرژی و کنترل آلودگی	گسترش صنعتی، نشان‌دهنده وجود حلقه‌های وابستگی بالا به تقویتی مخرب که به افزایش تولید و سوخت‌های فسیلی، کاهش کیفیت زندگی و فناوری ناکافی کنترل بهره‌وری منجر می‌شود؛ آلودگی، افزایش حمل اهمیت سیاست‌های انرژی و کنترل آلودگی



براساس این تحلیل، الگوهای تاریخی استخراج‌شده نه تنها ماهیت مسئله را روشن می‌کنند، بنیانی تجربی برای ساختاردهی مدل انباشت-جریان و تدوین سناریوهای سیاستی‌اند. مطالعه موردی استان کرمان نشان می‌دهد که بدون مداخله سیاستی بلندمدت و هماهنگ در حوزه‌های اقتصادی، محیط‌زیستی، اجتماعی و نهادی، الگوی موجود سیستم را در معرض ناپایداری‌های شدیدتر قرار می‌دهد. این یافته‌ها اهمیت بهره‌گیری از مدل‌سازی پویایی سیستم را به عنوان ابزار تحلیلی جامع برای ارزیابی آثار متقابل سیاست‌ها و طراحی مسیرهای پایدار توسعه برجسته می‌کنند.

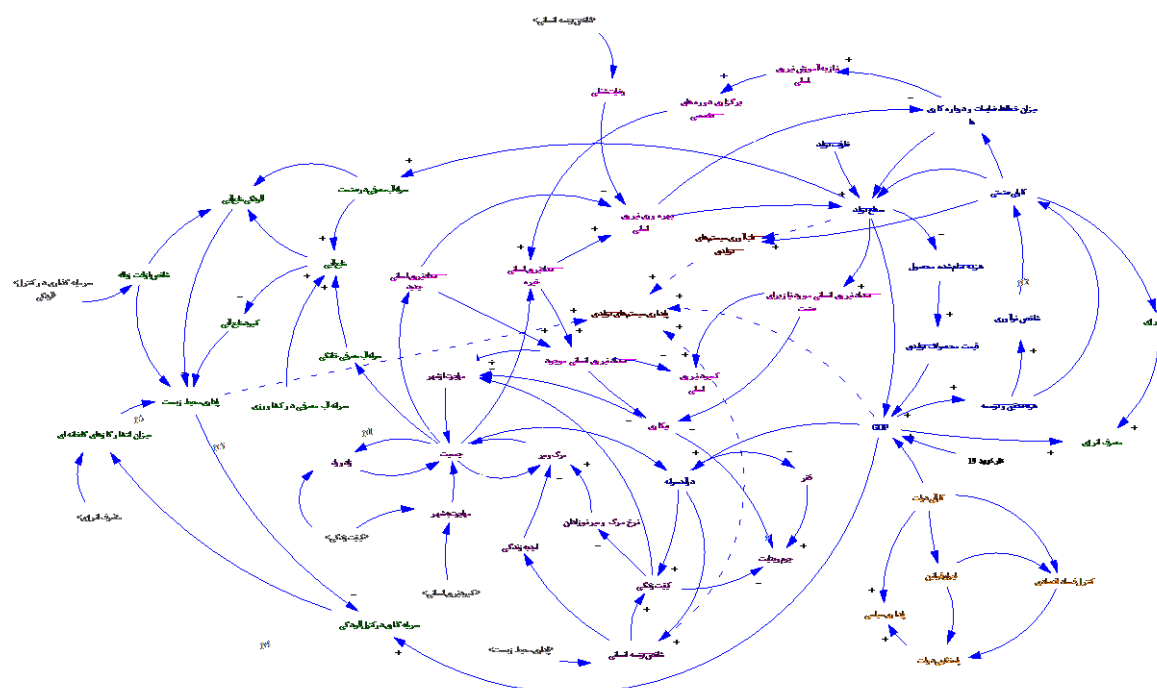
۲-۳ تدوین فرضیه‌های پویا

فرضیه‌های پویا در مدل‌سازی پویایی سیستم، بیان‌کننده سازوکارهای علی-معلولی و حلقه‌های بازخوردی‌اند. در این مطالعه، فرضیه‌های پویا براساس تحلیل رفتارهای مرجع در هریک از زیرسیستم‌ها تدوین می‌شوند و سازوکارهای شکل‌دهنده الگوهای مشاهده‌شده را توضیح می‌دهند. برپایه این تحلیل، فرض می‌شود که پایداری و تاب‌آوری سیستم تولیدی استان کرمان، نتیجه تعامل هماهنگ چهار مؤلفه کلیدی کارایی و بهره‌وری اقتصادی، مسئولیت‌پذیری و سلامت زیست‌محیطی، رفاه و کیفیت زندگی اجتماعی و اثربخشی نهادی و قدرت حکمرانی است. هرگونه ناهماهنگی یا ضعف در هریک از این ابعاد، موجب تضعیف عملکرد کل سیستم می‌شود و سیستم را به سمت رفتارهای ناپایدار، نوسانی یا رو به وخامت سوق می‌دهد.

این فرضیه‌های پویا توضیح می‌دهند که چگونه ساختارهای بازخوردی متقابل میان زیرسیستم‌ها، رفتارهای مشاهده‌شده را در مدل ایجاد می‌کنند. بر این اساس، مدل فرض می‌کند که رشد اقتصادی از طریق حلقه‌های تقویتی ناشی از نوآوری، تحقیق و توسعه^۵ و افزایش بهره‌وری ایجاد می‌شود؛ اما این رشد از طریق مصرف منابع آب و تولید آلودگی، وارد حلقه‌های تضعیف‌کننده زیست‌محیطی می‌شود که ظرفیت تولید را محدود می‌کنند. هم‌زمان تغییرات اجتماعی مانند مهاجرت جوانان، افزایش نرخ بیکاری، تغییر کیفیت زندگی و پیری جمعیت، موجب کاهش عرضه نیروی کار و از طریق حلقه‌های اجتماعی موجب کاهش بهره‌وری و افت تولید می‌شود. علاوه بر این، قدرت نهادی و کیفیت حکمرانی، تعیین‌کننده آن است که آیا سیاست‌های اصلاحی این حلقه‌های تضعیف‌کننده را خنثی و رشد اقتصادی را به مسیر پایدار هدایت می‌کنند یا خیر.

در مجموع، فرضیه‌های پویا بیان می‌کنند که وضعیت ناپایدار فعلی سیستم تولیدی استان کرمان، حاصل تعامل ساختارهای بازخوردی اصلی حلقه‌های تقویتی رشد اقتصادی و حلقه‌های تضعیف‌کننده زیست‌محیطی و اجتماعی است که این ساختارهای بازخوردی در کنار یکدیگر، الگوهای واقعی مشاهده‌شده را در رفتارهای مرجع بازتولید می‌کنند و مبنای طراحی نمودار انباشت-جریان و تحلیل سیاست‌ها در مراحل بعدی مدل‌سازی قرار می‌گیرند.

شکل ۱، CLD سیستم را نمایش می‌دهد و وابستگی متقابل زیرسیستم‌ها و رفتار سیستمی آنها را در طول زمان بررسی می‌کند.



شکل ۱. نمودار حلقه علی مدل

Fig. 1. Model's CLD

در ادامه، نمودارهای انباشت و جریان، بینش‌های کیفی CLD را به چارچوبی کمی برای شبیه‌سازی تبدیل می‌کنند. متغیرهای انباشت کلیدی شامل منابع آب، آلودگی آب، شاخص بازیافت، گازهای گلخانه‌ای، جمعیت، رضایت شغلی و کارایی فنی‌اند و در شکل ۲ نمایش داده شده‌اند.

۳-۳ فرمول‌بندی معادله و پارامترسازی

$$\text{Production} = \text{Production Capacity} \cdot (1 - \text{Defect Rate}) \cdot (1 + \text{Labour Performance}) \cdot (1 + \text{Technical Efficiency}) \quad (1)$$
$$\text{Defect Rate} = \max(1, (1 - \text{Technical Efficiency})) \cdot (1 - \text{Labour Performance}) \quad (2)$$

در زیر سیستم زیست محیطی، مصرف انرژی تابعی از GDP و شدت انرژی است (Liu et al., 2015):

$$\text{Energy Consumption} = \text{GDP} \cdot \text{Energy Intensity} \quad (3)$$

● تقاضای آب کشاورزی؛

- استفاده از آب خانگی، (Pluchinotta et al., 2021)؛

$$\text{Domestic Water Use} = \text{Population} \cdot \text{Water Use per Capita} \quad (4)$$

● مصرف آب صنعتی:

$$\text{Industrial Water Use} = \text{Production} \cdot \text{Water Coefficient for Industrial} \quad (5)$$

در زیرسیستم اجتماعی، جمعیت به صورت زیر محاسبه می شود (Stermann, 2000):

$$\text{Population}(t) = \int (\text{Birth Rate} + \text{Immigration Rate} - \text{Death Rate} - \text{Emigration Rate}) dt + 2.971 \times 10^6 \quad (6)$$

شاخص توسعه انسانی^۶ از ترکیب سرانه تولید ناخالص داخلی و پایداری زیست محیطی محاسبه می شود (Lefaan & Dalimi, 2018).

$$\text{Human Development Index} = (\text{GDP Per Capita} \cdot \text{Environmental Sustainability})^{1/3} / 40 \quad (7)$$

متغیر کیفیت زندگی ترکیبی از مؤلفه اقتصادی و توسعه اجتماعی را متعادل می کند (Ilyasov et al., 2019); (Retuerto et al., 2021).

$$\text{Quality of Life} = (\text{GDP Per Capita} / 12.5484 + \text{Human Development Index} / 3.67112 \times 10^6) / 2 \quad (8)$$

در زیرسیستم نهادی، کنترل فساد به صورت تابعی از اثربخشی دولت و حاکمیت قانون تعریف شده است:

$$\text{Control of Corruption} = 0.326 + 0.639 \cdot \text{Government Effectiveness} - 1.654 \times 0.0543 + 0.588 \cdot \text{Rule of Law} \quad (9)$$

پاسخگویی دولت، تابعی از حاکمیت قانون و کنترل فساد نشان داده شده است (Zare Mehrjerdi & Abedi, 2023):

$$\text{Voice and Accountability} = 0.006 + 0.321 \cdot \text{Rule of Law} + 0.161 \cdot \text{Control of Corruption} \quad (10)$$

در پایان، برای ارزیابی تاب آوری و پایداری تولید، دو متغیر تعریف می شود:

- تاب آوری تولید:

$$\text{Production Resilience} = \text{Production} \cdot \text{Technical Efficiency} \quad (11)$$

این معادله نشان می دهد که تاب آوری نه تنها به سطوح تولید، به کارایی فنی سیستم نیز بستگی دارد (Zare Mehrjerdi, 2022):

- پایداری تولید:

$$\text{Production Sustainability} = \text{Environmental Sustainability} + \text{GDP} + \text{Human Development Index} + \text{Production Resilience} \quad (12)$$

این مدل تأکید می کند که توسعه پایدار تنها در سایه بهبود هم زمان ابعاد زیست محیطی، اقتصادی، اجتماعی و نهادی حاصل خواهد شد (Bayu et al., 2022).

۴- یافته ها

به عنوان گام بعدی در فرآیند مدل سازی پویایی شناسی سیستم، این بخش از نتایج تحلیل سناریو و به دنبال آن اعتبارسنجی و آزمایش مدل ارائه می شود.

۴-۱ تجزیه و تحلیل سناریو، توسعه سناریو و طراحی شبیه سازی

تحلیل سناریو، دوره ۲۰۲۴ تا ۲۰۴۰ را با یک بازه زمانی شبیه سازی برای اعتبارسنجی مدل از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۴ پوشش می دهد. اهرم های سناریویی برای هر زیرسیستم انتخاب شدند تا محرک های کلیدی تغییر را منعکس کنند.

۴-۱-۱ طراحی و تحلیل سناریو: زیرسیستم اقتصادی

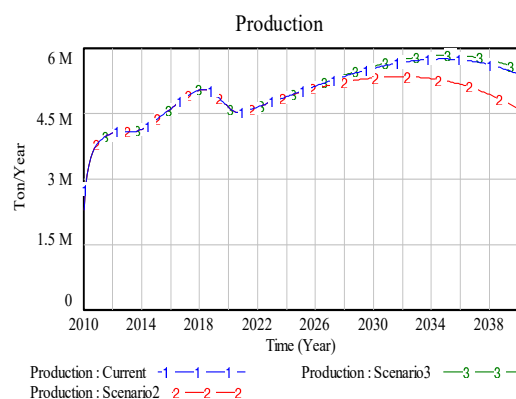
پس از تجزیه و تحلیل ساختاری و بررسی عوامل درون‌زا و برون‌زا، سرمایه‌گذاری تحقیق و توسعه به دلیل تأثیر درخور توجه آن بر شاخص‌های کلیدی عملکرد، اهم سناریو انتخاب شد. سه سطح سرمایه‌گذاری تحقیق و توسعه در نظر گرفته شد که در جدول ۲ خلاصه شده است.

جدول ۲. سناریوها در سرمایه‌گذاری تحقیق و توسعه

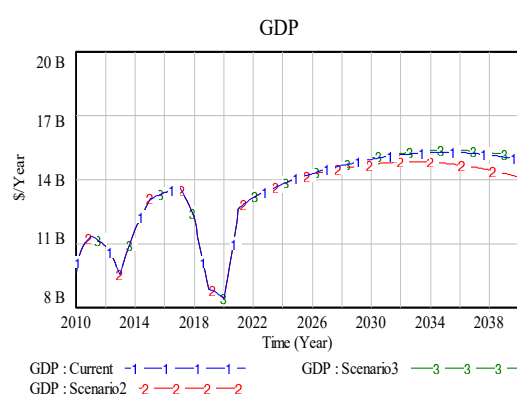
Table 2. Scenarios in R&D Expenditure

سناریو	هزینه‌های تحقیق و توسعه (% از تولید ناخالص داخلی)	توضیحات
پایه	۵/۰٪	تحقیق و توسعه سطح فعلی یا متوسط
سرمایه‌گذاری کم	۳٪	کاهش سرمایه‌گذاری و حداقل نوآوری
سرمایه‌گذاری بالا	۷٪	افزایش سرمایه‌گذاری و نوآوری تهاجمی

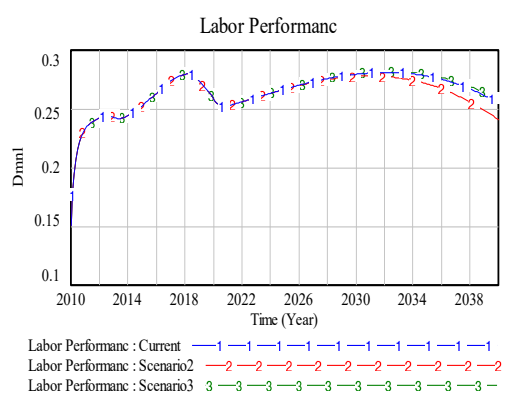
شکل‌های ۳ تا ۸ مقادیر تولید ناخالص داخلی، سطح تولید، کارایی فنی، عملکرد نیروی کار، تاب‌آوری و پایداری تولید را در طول زمان، تحت سه سناریوی سیاستی برای سرمایه‌گذاری تحقیق و توسعه نشان می‌دهند.



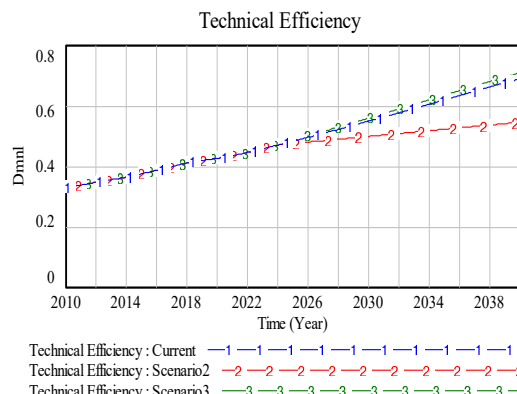
شکل ۴. تولید در سناریوهای R&D
Fig. 4. Production in R&D scenarios



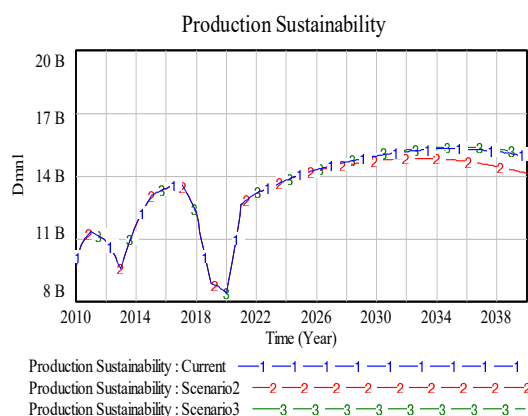
شکل ۳. GDP در سناریوهای R&D
Fig. 3. GDP in R&D scenarios



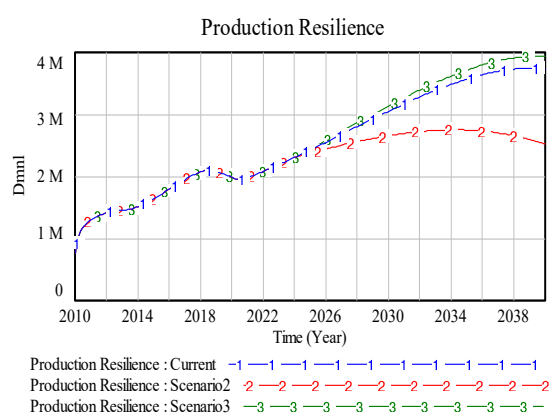
شکل ۶. عملکرد نیروی کار در سناریوهای R&D
Fig. 6. Labour Performance in R&D Scenarios



شکل ۵. کارایی فنی در سناریوهای R&D
Fig. 5. Technical Efficiency in R&D Scenarios



شکل ۸. پایداری تولید در سناریوهای R&D
 Fig. 8. Production Sustainability in R&D Scenarios



شکل ۷. تاب‌آوری تولید در سناریوهای R&D
 Fig. 7. Production Resilience in R&D Scenarios

در سناریوی پایه، رشد GDP متوسط و باثبات است؛ اما بهبود اقتصادی کند باقی می‌ماند. سناریوی R&D پایین، ضعیف‌ترین نتایج را در تمامی شاخص‌ها دارد. در مقابل، سناریوی R&D بالا با نوآوری سریع، رشد پایدار و بهبود چشمگیر در کارایی و تاب‌آوری سیستم، بهترین عملکرد را ارائه می‌دهد. تولید در سناریوی R&D پایین پس از افزایش اولیه، دچار رکود و کاهش می‌شود. در سناریوی پایه، رشد ملایم و پایدار است و در سناریوی بالا، تولید به‌طور مستمر رشد می‌کند و با بهره‌وری نیروی کار و بازخوردهای مثبت سیستمی تقویت می‌شود. به‌طور مشابه، کارایی فنی در سناریوی پایین رشد کمی دارد و سریع تثبیت می‌شود؛ در حالی که در سناریوی بالا، رشد شتاب‌گرفته و چشم‌گیری دارد. بهره‌وری نیروی کار نیز در همه سناریوها ابتدا افزایش می‌یابد؛ اما در بلندمدت فقط در سناریوی R&D بالا، به بالاترین سطح می‌رسد. سناریوی پایین نیز عملکرد ضعیفی دارد و سناریوی پایه، عملکرد متوسطی ارائه می‌دهد. تاب‌آوری تولید در هر سه سناریو بهبود می‌یابد؛ اما این بهبود تنها در سناریوی بالا پایدار و صعودی باقی می‌ماند. سناریوی پایه رشد کندتری دارد و سناریوی پایین پس از افزایش اولیه، روند نزولی را تجربه می‌کند. در نهایت، پایداری تولید در سناریوی بالا بیشترین بهبود را نشان می‌دهد؛ در حالی که سناریوی پایه بهبودی ملایم و سناریوی پایین کاهش بلندمدت را تجربه می‌کند. این نتایج بر نقش تعیین‌کننده سرمایه‌گذاری پایدار و بلندمدت در R&D برای تقویت عملکرد، سازگاری و تاب‌آوری سیستم تأکید می‌کند.

۴-۱-۲ طراحی و تحلیل سناریو: زیرسیستم زیست‌محیطی

مصرف آب کشاورزی در استان کرمان، با سهمی حدود ۹۲٪ از کل مصرف، مهم‌ترین عامل تنش‌های زیست‌محیطی محسوب می‌شود و مدیریت آن، نقش حیاتی در پایداری محیط دارد. تقاضای آب کشاورزی متغیر اهرمی برای سناریوها انتخاب شد. سه سناریو برای مدیریت تقاضای آب در نظر گرفته شده‌اند که در جدول ۳، خلاصه شده است.

جدول ۳. سناریوها در تقاضای آب کشاورزی

Table 3. Scenarios in Agricultural Water Demand

سناریو	تقاضای آب کشاورزی (میلیون متر مکعب)	توضیحات
پایه	۷۷/۶	تغییر نکردن تقاضای آب کشاورزی
حفاظت متوسط	۵/۵	اجرای اقدامات متوسط صرفه‌جویی در مصرف آب
کاهش تهاجمی	۰/۴	سیاست‌های قوی برای کاهش تقاضای آب

در زمینه کمبود آب، سناریوی ۱ افزایش سریع و مداوم کمبود را نشان می‌دهد که ناشی از نبود تعادل میان عرضه و تقاضاست. سناریوی ۲ نرخ رشد کمبود را کاهش می‌دهد؛ اما روند را معکوس نمی‌کند. تنها در سناریوی ۳، کمبود ابتدا افزایش می‌یابد؛ ولی در ادامه تثبیت و سپس کاهش می‌یابد که این نشانه‌ای از موفقیت در تعادل بخشی بین عرضه و تقاضای آب است. در خروج آب نیز، سناریوی ۱ تداوم جریان بالای خروجی را نشان می‌دهد که ناشی از مصرف تنظیم نشده کشاورزی و بازگشت ناکارآمد آب است. سناریوی ۲ کاهش تدریجی خروجی را در اثر افزایش بهره‌وری و سناریوی ۳ بیشترین کاهش پایدار را نشان می‌دهد که نتیجه بهینه‌سازی مصرف و کاهش تلفات در کشاورزی است و به افزایش جریان‌های اکولوژیکی برای اکوسیستم‌های پایین دست منجر می‌شود. درباره پایداری زیست محیطی، سناریوی ۱ کاهش مستمر شاخص را در نتیجه کاهش منابع، افزایش کمبود و آلودگی نشان می‌دهد، سناریوی ۲ ثبات نسبی و بهبود تدریجی را در میان مدت فراهم می‌کند و سناریوی ۳ بیشترین بهبود را دارد؛ به طوری که شاخص از سطح اولیه فراتر می‌رود و به سطح بالایی از پایداری می‌رسد که ناشی از کاهش برداشت، کنترل آلودگی و کاهش فشار بر اکوسیستم است. در نهایت در پایداری تولید، سناریوی ۱ با وجود ثبات اولیه تولید، کاهش تدریجی پایداری را به دلیل فشارهای انباشته بر منابع و محیط نشان می‌دهد، سناریوی ۲ بهبود آهسته و پایداری را ارائه می‌دهد که نتیجه اصلاحات متوسط در بهره‌وری آب است و سناریوی ۳ بیشترین بهبود بلندمدت را به همراه دارد که بازتاب تغییر ساختاری به سوی بهره‌وری و انعطاف پذیری بیشتر است.

۳-۱-۴ طراحی و تحلیل سناریو: زیرسیستم اجتماعی

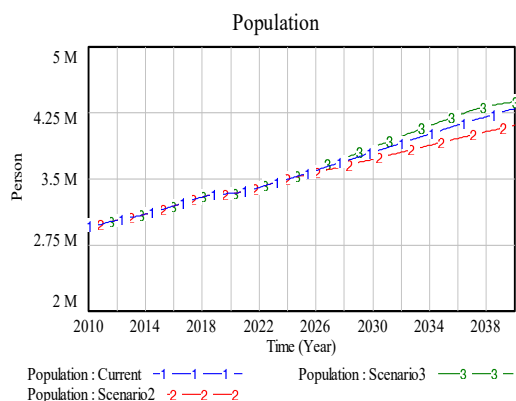
در زیرسیستم اجتماعی، کیفیت زندگی متغیری محوری و حساس به سیاست، نقطه اهرمی برای سناریوها انتخاب شد. همچنین سه سناریو تعریف شد که در جدول ۴ شرح داده شده است.

جدول ۴. سناریوها در کیفیت زندگی

Table 4. Scenarios in Quality of Life

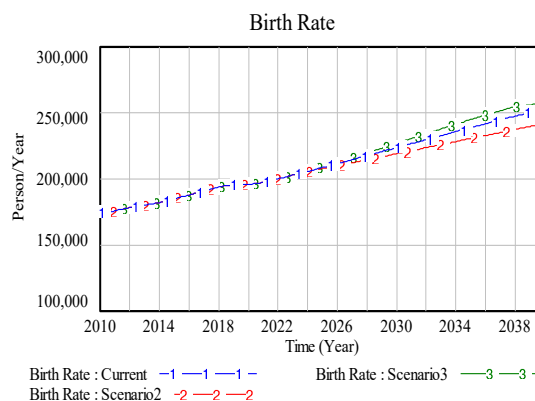
سناریو	شاخص کیفیت زندگی	توضیحات
پایه	مانند قبل	انعکاس شرایط اجتماعی-اقتصادی فعلی
کیفیت زندگی پایین	کاهش ۲۰ درصدی	وخامت وضعیت رفاهی و خدمات اجتماعی
کیفیت زندگی بالا	افزایش ۲۰ درصدی	بهبود سرمایه گذاری‌های اجتماعی و استانداردهای زندگی

شکل‌های ۱۴ تا ۱۸، نرخ زاد و ولد و جمعیت، مرگ و میر عمومی و نوزادان و پایداری تولید را تحت سناریوهای شبیه‌سازی شده سطوح مختلف QoL نشان می‌دهد.



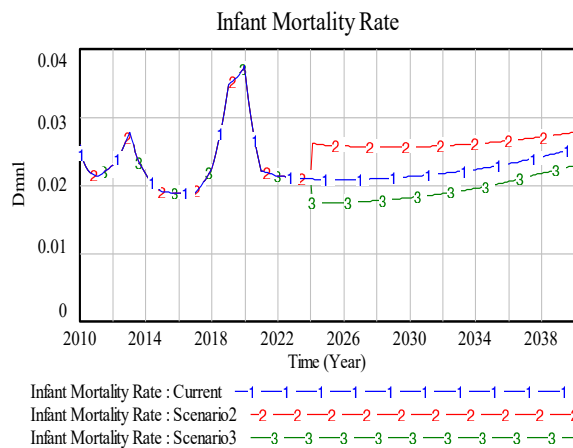
شکل ۱۵. جمعیت در سناریوهای QoL

Fig. 15. Population in QoL Scenarios



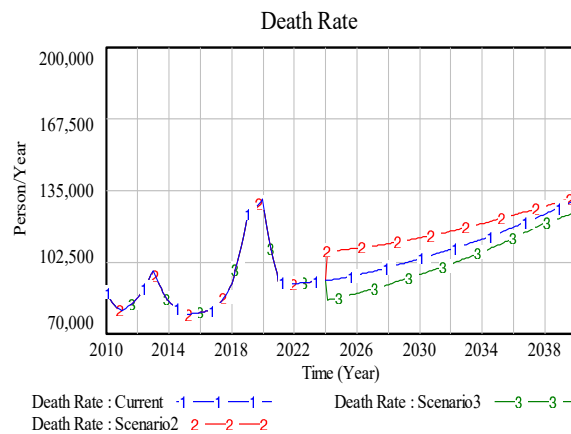
شکل ۱۴. نرخ زاد و ولد در سناریوهای QoL

Fig. 14. Birth Rate in QoL Scenarios



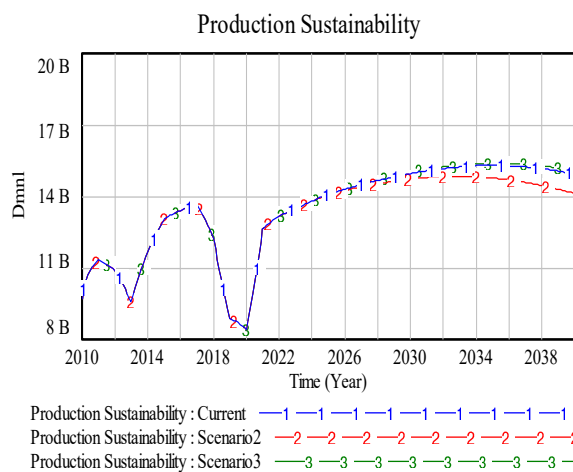
شکل ۱۷. میزان مرگ و میر نوزادان در سناریوهای QoL

Fig. 17. Infant Mortality Rate in QoL Scenarios



شکل ۱۶. میزان مرگ و میر در سناریوهای QoL

Fig. 16. Death Rate in QoL Scenarios

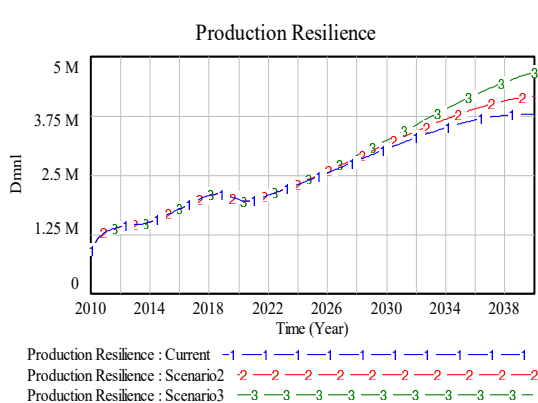


شکل ۱۸. پایداری تولید در سناریوهای QoL

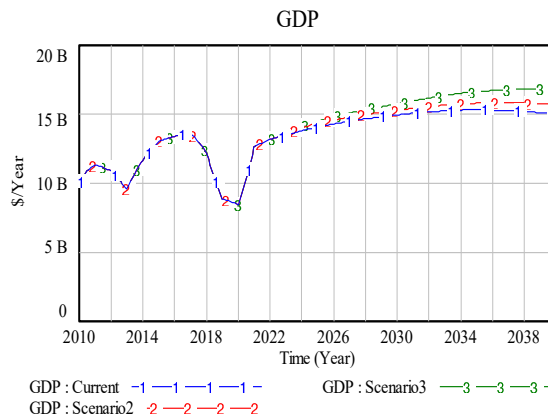
Fig. 18. Production Sustainability in QoL Scenarios

در سناریوی پایه، نرخ زاد و ولد و جمعیت رشد ثابتی دارد و روند فعلی ادامه می‌یابد. در سناریوی QoL پایین، کاهش رفاه به افت نرخ زاد و ولد و کاهش رشد جمعیت منجر می‌شود و عواملی مانند کاهش قصد فرزندآوری، دسترسی محدود به خدمات بهداشتی، افزایش مرگ و میر و مهاجرت مؤثرند. در مقابل در سناریوی QoL بالا، نرخ زاد و ولد از سناریوی پایه فراتر می‌رود و در سطح بالاتری تثبیت می‌شود که این امر حاصل شرایط زندگی بهتر، دسترسی به خدمات بهداشتی و آموزشی و امنیت خانوار است. دربارهٔ نرخ مرگ و میر و مرگ‌ومیر نوزادان نیز، سه الگوی متمایز مشاهده شد. در سناریوی پایه، این نرخ‌ها تقریباً ثابت باقی ماندند. در سناریوی QoL پایین، به‌ویژه در ابتدای شبیه‌سازی، افزایش چشم‌گیری در این نرخ‌ها مشاهده شد. برعکس در سناریوی QoL بالا، مرگ‌ومیر نوزادان به سرعت کاهش یافت، مرگ‌ومیر کلی نیز، روند نزولی تدریجی داشت و در سطوح سالم تثبیت شد. این یافته‌ها نشان‌دهندهٔ اثرگذاری محیط سیاست QoL بر شاخص‌های بهداشتی و نقش سرمایه‌گذاری‌های اجتماعی در بهبود سلامت جمعیت است. درنهایت، روند پایداری تولید نیز الگوهای مشخصی در سناریوها نشان داد. سناریوی پایه رشد متوسط و پایدار، تولید را به دلیل اینرسی سیستم‌های موجود ثبت کرد. در سناریوی QoL پایین، کاهش کیفیت زندگی به کاهش تدریجی و سپس درخور توجه پایداری تولید منجر شد و با تأخیری آشکار، اهمیت سرمایه‌گذاری اجتماعی را برجسته کرد. در سناریوی QoL بالا، پایداری تولید روند افزایشی و پیوسته داشت و

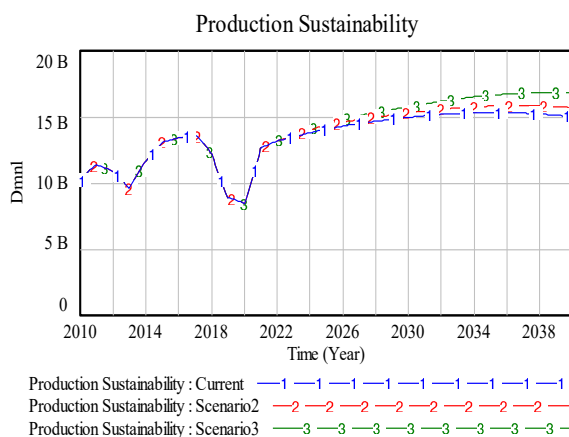
Fig. 21. Political Stability in Government Effectiveness Scenarios



شکل ۲۴. تاب‌آوری تولید در سناریوهای اثربخشی دولت



شکل ۲۳. GDP در سناریوهای اثربخشی دولت



شکل ۲۵. پایداری تولید در سناریوهای اثربخشی دولت

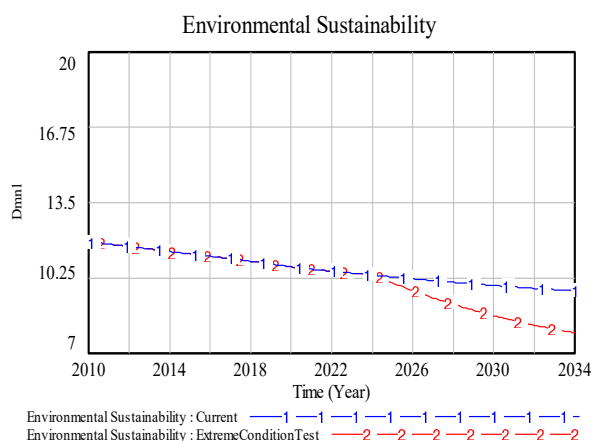
در سناریوی پایه که اثربخشی دولت بدون تغییر می‌ماند، این شاخص‌ها راکد می‌مانند، ثبات سیاسی شکننده است، حاکمیت قانون ضعیف اجرا می‌شود و پاسخگویی دولت نیز، محدود باقی می‌ماند. این وضعیت مانع از شکل‌گیری بازخوردهای مثبت و بهبود سیستمی می‌شود. در سناریوی دوم، با بهبود ۵۰ درصدی اثربخشی دولت از طریق اصلاحات، شاخص‌ها به تدریج بهبود می‌یابند، کنترل فساد روند صعودی پیدا می‌کند، حاکمیت قانون و ثبات سیاسی تقویت می‌شود، پاسخگویی دولت و مشارکت مدنی نیز افزایش می‌یابد. این سناریو، تأخیر در اثرگذاری اصلاحات و مزایای بلندمدت ناشی از تعامل متقابل شاخص‌های نهادی را نشان می‌دهد. سناریوی سوم با بهبود ۱۵ درصدی اثربخشی دولت، به تحول سریع‌تر و عمیق‌تر نهادی منجر می‌شود. کنترل فساد، ثبات سیاسی، حاکمیت قانون و پاسخگویی دولت همگی به‌طور معناداری تقویت می‌شوند و بازخوردهای تقویت‌کننده‌ای را ایجاد می‌کنند که به تغییر ساختاری منتهی می‌شود. در بعد اقتصادی، سناریوی پایه به رکود در GDP منجر می‌شود. در سناریوی دوم با اصلاحات متوسط، GDP به تدریج رشد می‌کند، اعتماد سرمایه‌گذاران افزایش و بهره‌وری، نوآوری و پایداری بهبود می‌یابد؛ اما رشد محدود باقی می‌ماند و به تداوم و تعمیق اصلاحات نیاز دارد. در سناریوی سوم نیز، رشد اقتصادی سریع و پایدار است و اصلاحات نهادی، بهبود نظارت و خدمات عمومی به هم‌افزایی منجر می‌شود.

۲-۴ اعتبارسنجی و آزمایش مدل

برای اطمینان از صحت و قابلیت اطمینان مدل شبیه‌سازی، اعتبارسنجی و آزمایش مدل با استفاده از آزمون‌های کلیدی در مقایسه با داده‌های تاریخی و گزارش‌های آماری انجام شد (Sterman, 2000).

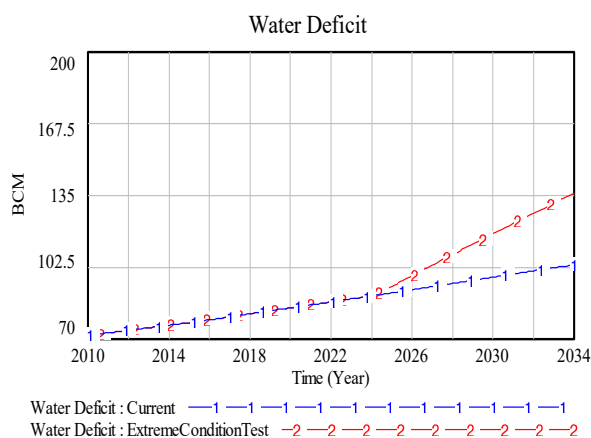
۱-۲-۴ آزمون شرایط شدید

در این بخش، استحکام مدل در مواجهه با تغییرات شدید ارزیابی شد. در یک آزمایش، مصرف آب کشاورزی از سال ۲۰۲۵ به میزان ۵۰ درصد افزایش یافت. مدل به‌طور منطقی واکنش نشان داد، کمبود آب بدتر شد (شکل ۲۶)، پایداری زیست‌محیطی کاهش یافت (شکل ۲۷)، رشد HDI کند و در نهایت راکد شد (شکل ۲۸) و نرخ مهاجرت اندکی کاهش یافت (شکل ۲۹). این رفتارها با انتظارات نظری و منطق بازخوردهای سیستم سازگار بود و هیچ الگوی غیرواقعی یا ناپایداری مشاهده نشد. همچنین نتایج نشان داد که مدل از ساختار معتبر و پایداری برخوردار است.



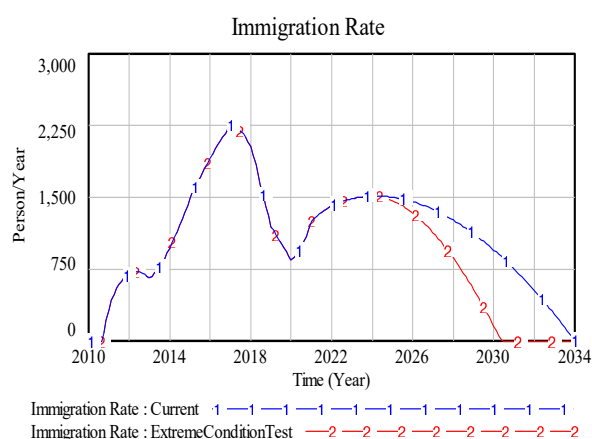
شکل ۲۷. پایداری زیست‌محیطی در آزمون شرایط شدید

Fig. 27. Environmental Sustainability in Extreme-Conditions Test



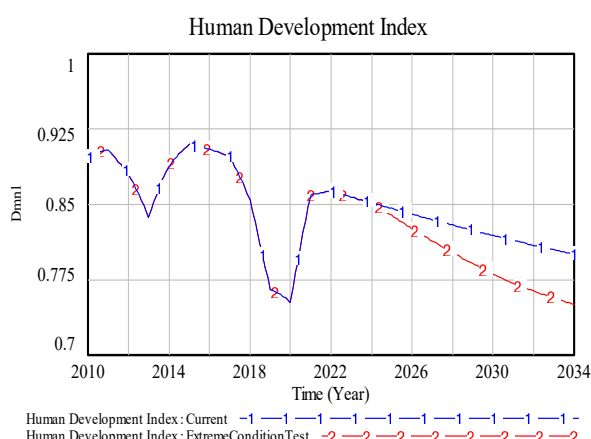
شکل ۲۶. کمبود آب در آزمون شرایط شدید

Fig. 26. Water Deficit in Extreme-Conditions Test



شکل ۲۹. نرخ مهاجرت در آزمون شرایط شدید

Fig. 29. Immigration Rate in Extreme-Conditions Test

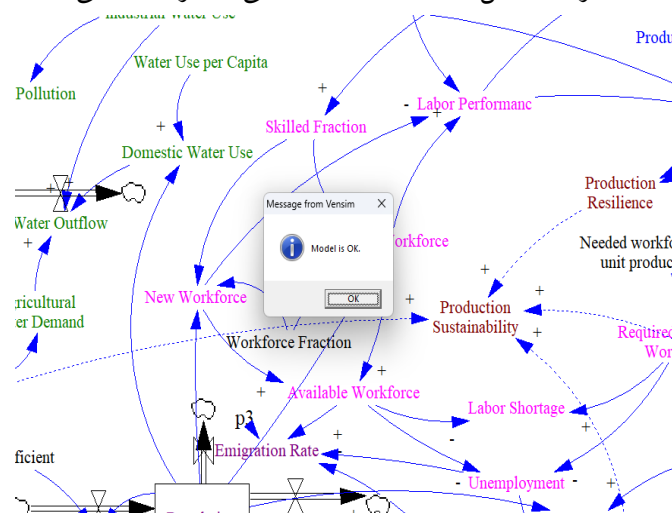


شکل ۲۸. شاخص توسعه انسانی در آزمون شرایط شدید

Fig. 28. Human Development Index in Extreme-Conditions Test

۲-۲-۴ آزمون تأیید ساختار

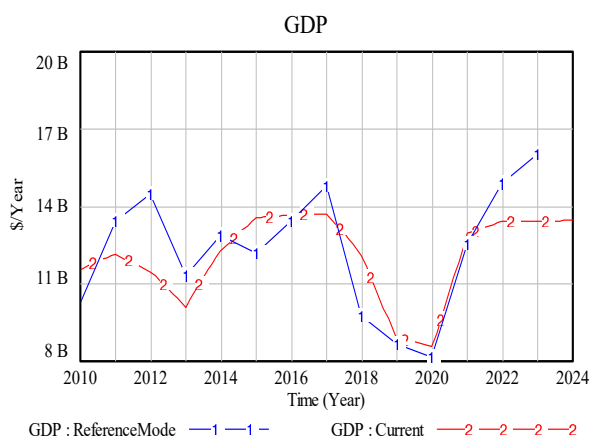
آزمون اعتبارسنجی ساختار با استفاده از Vensim، منطق درونی، روابط علی، حلقه‌های بازخورد و ارتباط متقابل متغیرها را بررسی کرد تا هماهنگی بین چارچوب مفهومی و اجرای محاسباتی مدل، پویایی‌شناسی سیستم را ارزیابی کند. همان‌طور که در شکل ۳۰ نشان داده شده است، نتایج تأیید کرد که ساختار مدل از نظر منطقی سالم، با دانش نظری و تجربی هم‌خوان و فاقد هرگونه ناسازگاری یا خطای فرمولاسیون است. این یافته‌ها، یکپارچگی ساختاری مدل را تأیید و مناسب‌بودن آن را برای تحلیل‌های رفتاری و سیاستی بیشتر اثبات می‌کند.



شکل ۳۰. نتیجه آزمون تأیید ساختار مدل
Fig. 30. Model Structure Verification Test Result

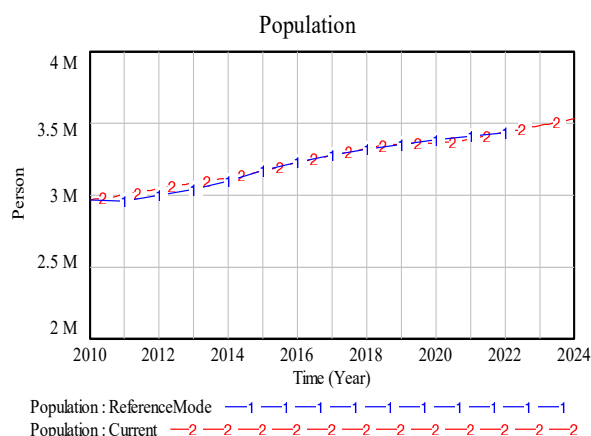
۲-۲-۴ آزمون بازتولید رفتار

آزمون بازتولید رفتار، توانایی مدل پویایی‌شناسی سیستم را در بازنمایی روندهای تاریخی متغیرهای کلیدی می‌سنجد. در این مطالعه، شبیه‌سازی با داده‌های واقعی استان کرمان، برای متغیرهای جمعیت و تولید ناخالص داخلی مقایسه شد. این مدل، دقت بالایی را در بازنمایی جمعیت با تنها ۰,۵٪ خطا (شکل ۳۱) و تولید ناخالص داخلی با خطای ۹,۹٪ (شکل ۳۲) نشان داد. این نتایج بر روایی رفتاری قوی و قابلیت اعتماد مدل برای تحلیل سیاستی و توسعه سناریو دلالت دارند.



شکل ۳۲. نتیجه آزمون بازتولید رفتار تولید ناخالص داخلی

Fig. 32. GDP in Behaviour-Reproduction Test



شکل ۳۱. نتیجه آزمون بازتولید رفتار جمعیت

Fig. 31. Population in Behaviour-Reproduction Test

۵. بحث

۵-۱ بحث در زیرسیستم اقتصادی

بحث زیرسیستم اقتصادی، نقش حیاتی سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه را در شکل‌دهی به پویایی بلندمدت اقتصادی، از جمله تولید ناخالص داخلی، تولید، کارایی فنی، عملکرد نیروی کار، انعطاف‌پذیری و پایداری برجسته می‌کند. سناریوی پایه، رشد ملایم GDP را نشان می‌دهد که سطح فعلی R&D برای حفظ رشد کافی است؛ اما برای تحول ساختاری کافی نیست. کاهش سرمایه‌گذاری به رکود و افزایش آن به رشد پایدار و تحول اقتصادی می‌انجامد. در سطح تولید نیز، کاهش R&D توانایی نوآوری را محدود و تولید را راکد می‌کند؛ در حالی که افزایش آن موجب ارتقای فناوری می‌شود و رقابت‌پذیری جهانی را تقویت می‌کند. کارایی فنی نیز تحت تأثیر غیرخطی و تأخیردار R&D و سناریوی پایه بهبود تدریجی است؛ اما سرمایه‌گذاری پایین، کندی پیشرفت و افزایش آسیب‌پذیری را در برابر شوک‌ها نشان می‌دهد. در مقابل سرمایه‌گذاری قوی، حلقه‌های بازخورد مثبت و ادغام فناوری را تسریع می‌کند. سرمایه‌گذاری بیشتر در زمینه تاب‌آوری تولید، پاسخ‌گویی سیستم را به شوک‌ها افزایش می‌دهد و در آن تأخیر وجود دارد؛ اما بهبودهایی در بلندمدت رخ می‌دهد و سرمایه‌گذاری کم به کاهش انعطاف‌پذیری منجر می‌شود. در نهایت، نقش R&D در پایداری تولید مشخص است. سناریوی پایه ثبات نسبی، سناریوی کاهش، عملکرد ضعیف و سناریوی افزایش، بهره‌وری بالا و نتایج پایدار را نشان می‌دهد. به طور کلی، این بحث تأیید می‌کند که سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه، سنگ‌بنای بهبود اقتصادی بلندمدت است و درحالی‌که تحقق مزایا ممکن است زمان ببرد، اما ابعاد متعددی را در بر می‌گیرد و نیاز به سیاست‌های نوآوری سازگار و آینده‌نگر را تقویت می‌کند.

۵-۲ بحث در زیرسیستم زیست‌محیطی

تحلیل تقاضای آب کشاورزی نشان می‌دهد که این عامل تأثیر درخور توجهی بر پایداری زیست‌محیطی و دسترسی به منابع دارد. کمبود آب، به تغییرات تقاضای کشاورزی بسیار حساس است. در سناریوی ۱، کمبود تشدید می‌شود و پیامدهایی چون تخریب زیست‌محیطی، کاهش بهره‌وری و خطرات اجتماعی-اقتصادی را به همراه دارد. سناریوی ۲ آستانه‌های بحرانی کمبود را به تأخیر می‌اندازد، اما آن را متوقف نمی‌کند. در این میان، تنها سناریوی ۳ قادر به توقف و کاهش واقعی کمبود است که نیاز به اقدام سریع و سیاست‌گذاری قاطع را با درک تأخیر زمانی بین مداخله و بهبود شرایط زیست‌محیطی، برجسته می‌کند. حجم برداشت آب نیز به شدت از الگوی تقاضا تأثیر می‌پذیرد. سناریوی ۱ خروجی بالا و ناکارآمدی را نشان می‌دهد، سناریوی ۲ مصرف بهینه و حفظ جریان‌های طبیعی را ممکن و سناریوی ۳ با حداقل اتلاف، بیشترین کارایی را ایجاد می‌کند، اگرچه نیازمند اقدامات مکمل برای حفاظت از یکپارچگی زیست‌محیطی است. در نهایت، کاهش تقاضای آب کشاورزی نقش مهمی در حفظ پایداری محیط‌زیست و تولید دارد. سناریوی ۱ آثار منفی بهره‌برداری مرسوم را نشان می‌دهد، سناریوی ۲ بهبودهای تدریجی را به ویژه در همراهی با حکمرانی و فناوری مؤثر محقق می‌کند و سناریوی ۳ نتایج مطلوب‌تری را ارائه می‌دهد که مستلزم اصلاحات نهادی و شرایط اولیه مناسب است.

۳-۵ بحث در زیرسیستم اجتماعی

تحلیل نقش اساسی، کیفیت زندگی را نشان می‌دهد. مقایسه سه سناریو بیانگر آن است که پیشرفت اجتماعی در تداوم سرمایه‌گذاری در کیفیت زندگی و زیرساخت‌های اجتماعی پایدار است. برخلاف مدل‌های سنتی که کاهش نرخ زاد و ولد را با بهبود کیفیت زندگی پیش‌بینی می‌کنند، این مدل نشان می‌دهد که احتمالاً کیفیت زندگی بهتر به دلیل امنیت اقتصادی و دسترسی به خدمات بهداشت باروری، نرخ باروری را تثبیت می‌کند و یا کمی افزایش می‌دهد. در مقابل، کیفیت زندگی پایین با مرگ‌ومیر نوزادان، سلامت ضعیف‌تر و سرمایه‌گذاری اجتماعی ناکافی، موجب کاهش باروری و رکود رشد جمعیت می‌شود. کیفیت زندگی بر مرگ‌ومیر نیز اثرگذار است و کیفیت زندگی پایین با دسترسی محدود به خدمات بهداشتی، مرگ‌ومیر را افزایش می‌دهد. بهبود کیفیت زندگی حتی با مداخلات متوسط، از طریق ارتقای مراقبت‌های سلامت و حمایت اجتماعی، نرخ مرگ‌ومیر را به‌طور مؤثری کاهش می‌دهد. در زمینه تولید، کیفیت زندگی بالا با بهبود سلامت، آموزش و ثبات اجتماعی، موجب افزایش بهره‌وری، نوآوری و همکاری نیروی کار می‌شود؛ در حالی که کاهش کیفیت زندگی به افت تدریجی تولید می‌انجامد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که پایداری تولید به سیاست‌های فراگیر اجتماعی و نه فقط به فناوری یا اقتصاد، وابسته است. در مجموع، کیفیت زندگی عاملی ساختاری و تقویت‌کننده در پویایی جمعیت، سلامت و تاب‌آوری تولید است. بهبود آن موجب بازخوردهای مثبت و کاهش آن به چرخه‌های بی‌ثبات منجر می‌شود. توسعه پایدار به سیاست‌هایی نیاز دارد که رفاه انسانی را هم‌سطح با پیشرفت اقتصادی و فناوری قرار می‌دهد.

۴-۵ بحث در زیرسیستم نهادی

بررسی زیرسیستم نهادی نشان می‌دهد که اثربخشی دولت، تأثیر عمیقی بر ابعاد کلیدی حکمرانی دارد و عامل کلیدی در کنترل فساد است. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که اصلاحات جزئی آغازگر تغییرند؛ اما اصلاحات عمیق و مداوم تنها مسیر دستیابی به نتایج پایدار است. تفاوت بین سناریوهای بهبود متوسط و بلندپروازانه، نشان‌دهنده آستانه تاب‌آوری نهادی است که اصلاحات محدود سیستم را آسیب‌پذیر نگه می‌دارد و اقدامات ساختاری قوی، پایداری را تضمین می‌کند. شاخص‌های حکمرانی نظیر ثبات سیاسی، حاکمیت قانون و پاسخگویی دولت، به‌شدت با اثربخشی دولت همبسته‌اند. در سناریوی پایه، اصلاحات محدود آثار جزئی دارد؛ اما در سناریوی پیشرفته، رهبری فراگیر و شفافیت اداری موجب جهش در کیفیت نهادی و حاکمیت قانون و پاسخگویی، تحت تأثیر مستقیم بهبود نهادی تقویت می‌شود. عملکرد اقتصادی نیز به اثربخشی حکمرانی وابسته است و ظرفیت رشد بدون اصلاحات، از بین می‌رود؛ در حالی که اصلاحات متوسط رشد اقتصادی را تا حدی فعال می‌کنند، فقط اصلاحات ساختاری ظرفیت پنهان را آزاد می‌کند. تأثیر این اصلاحات فوری نیست و به تداوم و تعهد سیاست‌گذاری نیاز دارد. در نهایت، پایداری و تاب‌آوری سیستم‌های تولیدی نیز، به‌شدت تحت تأثیر اثربخشی دولت‌اند. اصلاحات سطحی قادر به رفع ضعف‌های ساختاری نیستند و تنها اقدامات نیرومند حکمرانی به ایجاد سیستم‌های پایدار منجر می‌شوند. یافته‌ها نشان می‌دهند که اثربخشی نهادی، منشأ بازخوردهای تقویتی در کل سیستم است؛ در حالی که حاکمیت ضعیف، موجب پایداری ضعیف‌ها و آسیب‌پذیری‌ها می‌شود. توسعه پایدار، مستلزم تلاش هماهنگ، بلندمدت و مستمر برای تقویت نهادهای کارآمد، پاسخگو و تاب‌آور است.

۵-۵ مقایسه یافته‌های پژوهش با مطالعات مشابه

یافته‌های این پژوهش که تعامل چهار زیرسیستم اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و نهادی را عامل تعیین‌کننده در رفتارهای پایداری و تاب‌آوری سیستم تولیدی نشان می‌دهد، در راستای نتایج بسیاری از مطالعات اخیر در حوزه پایداری پویا قرار دارد. در این بخش، مقایسه نتایج اصلی پژوهش با مطالعات مشابه ارائه می‌شود.

مطالعه حاضر نشان داد پایداری و تاب‌آوری تنها در صورتی حاصل می‌شود که حلقه‌های بازخورد درون زیرسیستم‌ها هماهنگ باشند؛ به گونه‌ای که افزایش بهره‌وری اقتصادی بدون مدیریت مناسب منابع آب و فشارهای اجتماعی، ناپایداری ایجاد می‌کند. این یافته با نتایج مطالعات اخیر در حوزه مدل‌سازی پویایی سیستم‌های شهری و زیرسیستم‌های پیچیده هم‌راستاست؛ برای مثال در مدل‌های ارزیابی تاب‌آوری شهری با استفاده از پویایی‌شناسی سیستم، نشان داده شده است که افزایش توان بازخورد اجتماعی و زیست‌محیطی به بهبود تاب‌آوری کلی سیستم منجر می‌شود، به‌ویژه زمانی که سناریوهای چندبعدی طراحی شده باشند (Tang & Chen, 2023). علاوه بر این، در مطالعه‌ای که چارچوب پویایی‌شناسی سیستم را برای بهبود تاب‌آوری بررسی کرده است، ارتقای ابعاد اجتماعی باعث افزایش سریع‌تر تاب‌آوری در کوتاه‌مدت می‌شود که این تأکیدی بر نقش مؤلفه‌های اجتماعی در پایداری سیستم است (Zhu et al., 2025).

نتایج این پژوهش نشان داد که بدون توجه به محدودیت‌های محیطی مانند منابع آب و فشارهای آلودگی، رشد اقتصادی پایدار حفظ نمی‌شود. این نتیجه با مطالعات پویایی‌شناسی سیستم دیگر در زمینه پایداری تولید هم‌راستاست؛ برای مثال، تحلیل پویایی‌شناسی سیستم در تولید پایدار نشان داده است که تعادل میان متغیرهای اقتصادی و زیست‌محیطی، نتایج پایداری بلندمدت را بهبود می‌بخشد (Khakdaman et al., 2024). مطالعات دیگر نیز نشان داده‌اند که مدل‌های پویایی‌شناسی سیستم، به شناسایی نقاط بحرانی در کاهش آثار مخرب محیط‌زیستی کمک می‌کنند که این با نتایج این پژوهش درباره تأثیر آلودگی و منابع محدود بر توان تولیدی تطابق دارد (Kaur & Kander, 2025).

مطالعه حاضر با تأکید بر نقش عوامل اجتماعی نظیر مهاجرت، کیفیت زندگی و بیکاری در کاهش عرضه نیروی کار و پایداری اقتصادی همسو با پژوهش‌های جدید در پویایی‌شناسی سیستم است که نقش سرمایه اجتماعی و شبکه‌های اجتماعی را در تقویت تاب‌آوری سیستم‌ها برجسته می‌کند. تحقیقات جدید تحلیل پویایی‌شناسی سیستم، نشان داده‌اند که سرمایه اجتماعی و پویایی شبکه‌های اجتماعی، به‌خصوص در شرایط ناپایداری اقتصاد و محیط‌زیست، موجب افزایش انعطاف‌پذیری سیستم در برابر اختلال‌ها می‌شود (Bataleblu et al., 2024).

یکی از نقاط قوت این پژوهش، تلفیق چهار بعد اصلی پایداری و تاب‌آوری در یک مدل پویایی‌شناسی سیستم است. این رویکرد با نتیجه‌گیری‌های مطالعات اخیر درباره چارچوب‌های جامع پویایی‌شناسی سیستم، برای ارزیابی پایداری در تولید و دیگر سیستم‌های پیچیده هم‌راستاست؛ به‌طور مثال، پژوهشی نشان داد که ادغام جنبه‌های مختلف پایداری و تعاملات سیستم‌ها در بررسی تاب‌آوری، تحلیل دقیق‌تر و کاربردی‌تری را ارائه می‌دهد (Bataleblu et al., 2024).

مقایسه یافته‌های این پژوهش با مطالعات مشابه نشان می‌دهد که هماهنگی بازخوردها بین زیرسیستم‌ها برای تحقق پایداری و تاب‌آوری ضروری است؛ امری که در مدل‌های پویایی‌شناسی سیستم شهری و صنعتی نیز، تأیید

شده است. همچنین ابعاد اجتماعی و زیست‌محیطی، به‌ویژه در مواجهه با شوک‌ها و فشارهای متقابل، نقش مؤثری در ایجاد تاب‌آوری دارند. ادغام چهاربعدی پایداری در یک چارچوب پویایی‌شناسی سیستم، همان‌طور که در پیشینه اخیر پیشنهاد شده است، فهم بهتری از تعاملات پیچیده فراهم می‌کند.

۶. طراحی و ارزیابی سیاست‌ها

در مرحله نهایی مدل‌سازی پویایی‌شناسی سیستم، طراحی و ارزیابی سیاست با هدف توسعه، آزمون و اصلاح مداخلات مبتنی بر شبیه‌سازی انجام می‌شود.

در زیرسیستم اقتصادی، چارچوب‌های سیاستی باید دیدگاه سیستمی و بلندمدت اتخاذ و بر اقداماتی چون ایجاد بودجه چندساله برای R&D، حمایت از زیرساخت‌ها، ارتقای همکاری دانشگاه و صنعت، گنجاندن R&D در استراتژی صنعتی و تلفیق آن با توسعه سرمایه انسانی و اصلاحات نهادی تمرکز کنند. این سیاست‌ها از طریق یادگیری مستمر و جذب دانش، نوآوری را در صنایع تقویت می‌کنند.

در زیرسیستم زیست‌محیطی، سیاست‌ها بر سرمایه‌گذاری بلندمدت، حکمرانی یکپارچه و ابزارهای تطبیقی متمرکزند. اقداماتی چون بودجه‌گذاری برای انرژی پاک، مقررات سخت‌گیرانه، همکاری بین‌بخشی، آموزش عمومی، تسهیلات بازیافت و تلفیق شاخص‌های زیست‌محیطی در برنامه‌های صنعتی است. رویکردهای یکپارچه در مدیریت منابع آب، فناوری‌های کارآمد و تغییر رفتار نیز توصیه می‌شود.

سیاست‌های پیشنهادی در بعد اجتماعی، شامل ادغام کیفیت زندگی در سیاست‌گذاری جمعیتی، سرمایه‌گذاری در سلامت و آموزش، ترکیب اهداف اجتماعی با سیاست‌های صنعتی و حاکمیت تطبیقی مبتنی بر بازخورد سیستم‌اند. در زیرسیستم نهادی، سیاست‌ها بر اصلاحات ساختاری، شفافیت و مقابله با فساد تأکید دارند. اقدامات کلیدی شامل تقویت ظرفیت دولتی، دیجیتالی‌سازی و ارزیابی عملکرد با شاخص‌های ترکیبی است که ساختار منسجمی برای حاکمیت مؤثر، تاب‌آور و پایدار فراهم می‌کند.

۷. نتیجه‌گیری

تجزیه و تحلیل زیرسیستم اقتصادی، اهمیت حیاتی سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه را در دستیابی به نتایج اقتصادی پایدار و بلندمدت نشان می‌دهد. افزایش سرمایه‌گذاری‌های R&D، باعث بالاترین و پایدارترین رشد تولید ناخالص داخلی و تولید می‌شود؛ زیرا تولید وابسته به نوآوری مستمر است و تنها شامل نیروی کار و سرمایه نمی‌شود. سرمایه‌گذاری پایدار در R&D به بهبودهای قوی‌تر در کارایی فنی و بهره‌وری نیروی کار منجر می‌شود؛ در حالی که سرمایه‌گذاری کم، نتایج معناداری ندارد. همچنین تنها سرمایه‌گذاری بالا، ثبات و سازگاری بلندمدت تولید را تضمین می‌کند و تاب‌آوری و پایداری تولید، نیازمند عبور از یک آستانه حیاتی سرمایه‌گذاری در R&D است. در زیرسیستم زیست‌محیطی، مقیاس و شدت سرمایه‌گذاری در مدیریت تقاضای آب کشاورزی برای پایداری منابع آب حیاتی است. پایداری زیست‌محیطی تنها با کاهش تهاجمی مصرف آب کشاورزی، کنترل آلودگی و ترمیم اکوسیستم تحقق می‌یابد. سناریوی بلندپروازانه، پایدارترین و تاب‌آورترین نتایج را دارد؛ در حالی که سناریوهای کم و متوسط

به پایداری شکننده یا ناپایداری می‌انجامد. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که پایداری زیست‌محیطی و تولید تنها با استراتژی‌های یکپارچه، بلندمدت و دارای بودجه مناسب امکان‌پذیرند.

تحلیل زیرسیستم اجتماعی، کیفیت زندگی را محرک پویا و مؤثر بر پیامدهای جمعیتی و اجتماعی معرفی می‌کند. کیفیت زندگی پایین، باعث کاهش نرخ زاد و ولد، بی‌ثباتی جمعیتی و افزایش مرگ و میر عمومی و نوزادان می‌شود؛ در حالی که بهبود کیفیت زندگی، رشد جمعیت سالم و کاهش مرگ و میر را تضمین می‌کند. همچنین کیفیت زندگی بالاتر در سیستم‌های تولیدی، پایداری تولید را ارتقا می‌دهد و نشان می‌دهد توسعه انسانی و سرمایه‌گذاری اجتماعی، نقش کلیدی در توسعه پایدار دارند.

اثر بخشی دولت در زیرسیستم نهادی، عامل کلیدی کنترل فساد، ثبات سیاسی، حاکمیت قانون و پاسخگویی است. اصلاحات متوسط پیشرفت تدریجی ایجاد می‌کنند؛ اما بدون تغییرات ساختاری عمیق، خطر رکود وجود دارد. در مقابل اصلاحات بلندپروازانه، تحول سیستماتیک را ممکن می‌کند. اثر بخشی دولت به شدت بر عملکرد اقتصادی، رشد پایدار و تاب‌آوری تولید تأثیر می‌گذارد و نشان می‌دهد تولید ناخالص داخلی ارتباط نزدیکی با کیفیت مدیریت دولتی و ظرفیت نهادی دارد. این نتایج تأکید می‌کند که کیفیت نهادی برای سیستم‌های اقتصادی پایدار ضروری است.

مقایسه چهار سناریوی پایداری تولید نشان می‌دهد سرمایه‌گذاری در مدیریت تقاضای آب کشاورزی (شکل ۱۳)، بیشترین تأثیر مثبت و بلندمدت را بر پایداری تولید دارد و از دیگر زیرسیستم‌ها مانند کیفیت زندگی (شکل ۱۸)، اثر بخشی دولت (شکل ۲۵) و هزینه‌های R&D (شکل ۸) مؤثرتر است. این مسیرها افزایش درخور توجه و پایداری را تا سال ۲۰۴۰ نشان می‌دهند؛ در حالی که دیگر سناریوها آثار مثبت، اما معتدلی دارند.

با وجود نقاط قوت روش‌شناسی این مطالعه، محدودیت‌هایی وجود دارد که بر تفسیر و تعمیم‌پذیری یافته‌ها تأثیر می‌گذارد.

مدل‌سازی پویایی‌شناسی سیستم نیازمند تعادلی بین پیچیدگی و قابلیت مدیریت است. برخی ساده‌سازی‌ها برای کنترل مدل انجام شد که ممکن است دقت آن را در نمایش کامل دینامیک‌های واقعی محدود کند. مطالعه موردی شهر کرمان، امکان تحلیل عمیق زمینه‌ای را فراهم کرد؛ اما تعمیم‌پذیری یافته‌ها به دیگر مناطق یا اکوسیستم‌ها محدود است. برخی داده‌های مورد نیاز برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل ناقص، قدیمی یا دسترس‌ناپذیر بودند، به همین دلیل استفاده از تخمین یا فرضیات لازم شد.

علاوه بر این، مدل‌سازی سیستم نیازمند محاسبات پیچیده، زمان و منابع درخور توجهی است که ممکن است کاربرد گسترده آن را در محیط‌های با ظرفیت محدود کاهش دهد. دامنه تحقیق نیز به یک اکوسیستم خاص و مجموعه‌ای از زیرسیستم‌ها محدود بود که ممکن است دیگر ابعاد پایداری را نادیده بگیرد.

پیشنهاد می‌شود برای کاهش این محدودیت‌ها و پشتیبانی از تحقیقات آینده، مشارکت گسترده‌تری از ذینفعان شامل جوامع محلی و سازمان‌های دولتی فراهم شود تا دیدگاه‌های متنوع و مشروعیت مدل افزایش یابد. در مجموع، اگرچه روش‌شناسی این مطالعه ارزش تحلیلی قوی ارائه می‌دهد، تحقیقات آینده با مشارکت گسترده‌تر، زیرساخت داده‌های بهتر و اعتبارسنجی مداوم در زمینه‌های مختلف، قابلیت تعمیم و اثر بخشی مدل را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهند.

References

- Ahmad, F., & Kustiwan, I. (2019). Understanding Poverty in the Development Context and Poverty Reduction Policy Using System Dynamics Approach. *Achieving and Sustaining SDGs 2018 Conference: Harnessing the Power of Frontier Technology to Achieve the Sustainable Development Goals (ASSDG 2018)*, 59–78. <https://doi.org/10.2991/assdg-18.2019.6>.
- Bañon Gomis, A. J., Guillén Parra, M., Hoffman, W. M., & McNulty, R. E. (2011). Rethinking the Concept of Sustainability. *Business and Society Review*, 116(2), 171–191. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8594.2011.00381.x>.
- Bataleblu, A. A., Rauch, E., & Cochran, D. S. (2024). Resilient Sustainability Assessment Framework from a Transdisciplinary System-of-Systems Perspective. *Sustainability*, 16(21), 9400. <https://doi.org/10.3390/su16219400>.
- Bayu, F., Berhan, E., & Ebinger, F. (2022). A System Dynamics Model for Dynamic Capability Driven Sustainability Management. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 8(1), 1–27. <https://doi.org/10.3390/joitmc8010056>.
- Becerra-Fernandez, M., Ruiz-Acosta, L. E., Camargo-Mayorga, D. A., & Muñoz, M. A. (2022). A system dynamics model for sustainable corporate strategic planning. *Production*, 32, e20220011. <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20220011>.
- Britten, A., & Curiel Sosa, J. (2020). *System Dynamics Modelling of Manufacturing in the Aerospace Industry*. Figshare.
- Cosenz, F., Rodrigues, V. P., & Rosati, F. (2020). Dynamic business modeling for sustainability: Exploring a system dynamics perspective to develop sustainable business models. *Business Strategy and the Environment*, 29(2), 651–664. <https://doi.org/10.1002/bse.2395>.
- Dacre, N., Yan, J., Frei, R., Al-Mhdawi, M. K. S., & Dong, H. (2025). Advancing sustainable manufacturing: A systematic exploration of Industry 5.0 supply chains for sustainability, human-centricity, and resilience. *Production Planning & Control*, 36(11), 1499–1528. <https://doi.org/10.1080/09537287.2024.2380361>.
- Elkington, J. (1998). *Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business*. New Society Publishers.
- Feder, C., Callegari, B., & Collste, D. (2024). The system dynamics approach for a global evolutionary analysis of sustainable development. *Journal of Evolutionary Economics*, 34(2), 351–374. <https://doi-org.ezproxy.universite-paris-saclay.fr/10.1007/s00191-024-00866-6>.
- Folke, C., Carpenter, S. R., Walker, B., Scheffer, M., Chapin, T., & Rockström, J. (2010). Resilience Thinking: Integrating Resilience, Adaptability and Transformability. *Ecology and Society*, 15(4), 20. <https://doi.org/10.5751/es-03610-150420>.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>.
- Ghorbani, M., Eskandari-Damaneh, H., Cotton, M., Ghoochani, O. M., & Borji, M. (2021). Harnessing indigenous knowledge for climate change-resilient water management – lessons from an ethnographic case study in Iran. *Climate and Development*, 13(9), 766–779. <https://doi.org/10.1080/17565529.2020.1841601>.
- Ho, Y., & Wang, S. (2005). System dynamics model for the sustainable development of science city. *The 23rd International Conference of System Dynamics Society, Sloan School of Management, MIT, USA*. <https://proceedings.systemdynamics.org/2005/proceed/papers/HO240.pdf>.
- Hossain, M. S., Dearing, J. A., Eigenbrod, F., & Johnson, F. A. (2017). Operationalizing safe operating space for regional social-ecological systems. *Science of The Total Environment*, 584–585, 673–682. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.095>.
- Hosseini, A., & Hosseini, S. H. (2022). A System Dynamics Approach to Sustainable Business Model Transformation: A Manufacturing Case. *Journal of Systems Thinking in Practice*, 1(1), 24–48. <https://doi.org/10.22067/jstinp.2022.76303.1010>.

- Ilyasov, B. G., Makarova, E. A., & Zakieva, E. S. (2019). The Quality Of Life As A Complex Dynamic Object Of Management, Contemporary Issues of Economic Development of Russia: Challenges and Opportunities. *European Proceedings of Social and Behavioural Sciences*, 59(1), 35–43. <https://doi.org/10.15405/epsbs.2019.04.5>.
- Kamande, M. W., & Lokina, R. B. (2013). Clean Production and Profitability: An Eco-efficiency Analysis of Kenyan Manufacturing Firms. *The Journal of Environment & Development*, 22(2), 169–185. <https://doi.org/10.1177/1070496512471948>.
- Kaur, G., & Kander, R. (2025). System Dynamics for Manufacturing: Supply Chain Simulation of Hemp-Reinforced Polymer Composite Manufacturing for Sustainability. *Sustainability*, 17(2), 765. <https://doi.org/10.3390/su17020765>.
- Khakdaman, M., Dullaert, W., Inghels, D., van Keeken, M., & Wissink, P. (2024). A System Dynamics Supply Chain Analysis for the Sustainability Transition of European Rolled Aluminum Products. *Sustainability*, 16(20), 8892. <https://doi.org/10.3390/su16208892>.
- Lefaan, Y., & Dalimi, R. (2018). System dynamics model with human development paradigm for projection of electricity needs per household 2016-2050 in Papua Province–Indonesia. *2018 10th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICITEED.2018.8534793>.
- Li, D., Yu, Y., & Wang, B. (2023). Urban population prediction based on multi-objective lioness optimization algorithm and system dynamics model. *Scientific Reports*, 13(1), 11836. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39053-1>.
- Li, T., Liu, N., & Zhang, Q. (2019). System Dynamics Research on Economic Transformation and Environmentally Coordinated Development in China's Eastern Coastal Region. *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(5), 3569–3580. <https://doi.org/10.15244/pjoes/99070>.
- Liu, X., Mao, G., Ren, J., Li, R. Y. M., Guo, J., & Zhang, L. (2015). How might China achieve its 2020 emissions target? A scenario analysis of energy consumption and CO2 emissions using the system dynamics model. *Journal of Cleaner Production*, 103, 401–410. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.080>.
- Machado, C. P., Morandi, M. I. W., & Sellitto, M. (2019). System Dynamics and Learning Scenarios for Process Improvement and Regional Resilience: A Study in The Footwear Industry of Southern Brazil. *Systemic Practice and Action Research*, 32(6), 663–686. <https://doi.org/10.1007/s11213-019-9480-4>.
- Meadows, D. H. (2008). *Thinking in Systems: A Primer*. Chelsea Green Publishing.
- Meirelles, B. (2018). Operationalizing Social Ecological Systems Resilience analysis using a Dynamic Index. *9th International Congress on Environmental Modelling and Software*. <https://scholarsarchive.byu.edu/iemssconference/2018/Stream-C/51>.
- Mensah, J. (2019). Sustainable development: Meaning, history, principles, pillars, and implications for human action: Literature review. *Cogent Social Sciences*, 5(1), 1653531. <https://doi.org/10.1080/23311886.2019.1653531>.
- Mobaseri, M., Mousavi, S. N., & Mousavi Haghighi, M. H. (2021). Causal effects of population growth on energy utilization and environmental pollution: A system dynamics approach. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 19(4), 601–618. <https://doi.org/10.22124/cjes.2021.5088>.
- Mota-López, D., Sanchez-Ramirez, C., Alor-Hernández, G., & Huerta, M. (2017). A Systemic Conceptual Model to Support Decision-Making in the Sustainability Assessment of Industrial Ecosystems. *Research in Computing Science*, 132, 41–53. <https://doi.org/10.13053/rcs-132-1-4>.
- Nguyen, T., Cook, S., & Ireland, V. (2017). Application of system dynamics to evaluate the social and economic benefits of infrastructure projects. *Systems*, 5(2), 29. <https://doi.org/10.3390/systems5020029>.
- Pérez-Pérez, J. F., Parra, J. F., & Serrano-García, J. (2021). A system dynamics model: Transition to sustainable processes. *Technology in Society*, 65, 101579. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101579>.
- Pluchinotta, I., Pagano, A., Vilcan, T., Ahilan, S., Kapetas, L., Maskrey, S., Krivtsov, V., Thorne, C., & O'Donnell, E. (2021). A participatory system dynamics model to investigate sustainable urban

- water management in Ebbsfleet Garden City. *Sustainable Cities and Society*, 67, 102709. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102709>.
- Porter, M. E., & Kramer, M. R. (2006). The link between competitive advantage and corporate social responsibility. *Harvard Business Review*, 84(12), 78–92.
- Retuerto, M. G., Espinoza, D. Y., & Andrade-Arenas, L. (2021). System dynamics modeling for solid waste management in Lima Peru. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 12(7). <https://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2021.0120762>.
- Rezaei, A., Zare Mehrjerdi, Y., Owlia, M. S., & Khademizare, H. (2023). Identifying and prioritizing ecosystem indicators using Fuzzy Delphi and Fuzzy DEMATEL approaches. *Research in Production and Operations Management*, 14(2), 51–82. <https://doi.org/10.22108/pom.2023.134879.1462>.
- Rydzak, F., Magnuszewski, P., Sendzimir, J., & Chlebus, E. (2006). A concept of resilience in production systems. *Proceedings of the 24th International Conference of the System Dynamics Society*, 1–26.
- Salzano, E., Di Nardo, M., Gallo, M., Oropallo, E., & Santillo, L. C. (2014). The application of System Dynamics to industrial plants in the perspective of Process Resilience Engineering. *Chemical Engineering Transactions*, 36, 457–462. <https://doi.org/10.3303/CET1436077>.
- Spangenberg, J. H. (2004). Reconciling sustainability and growth: Criteria, indicators, policies. *Sustainable Development*, 12(2), 74–86. <https://doi.org/10.1002/sd.229>.
- Sterman, J. D. (2000). Systems thinking and modeling for a complex world. *Management*, 6(1), 7–17.
- Tang, X., & Chen, N. (2023). A multi-scenario urban resilience simulation study based on the system dynamics model. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 132, 103467. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2023.103467>.
- Taylor, I. W., Ullah, M. A., Koul, S., & Ulloa, M. S. (2022). Evaluating the Impact of Institutional Improvement on Control of Corruption—A System Dynamics Approach. *Systems*, 10(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/systems10030064>.
- Ullah, M. (2012). *Enhancing the Understanding of Corruption through System Dynamics Modelling: A Case Study Analysis of Pakistan*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Enhancing-the-Understanding-of-Corruption-through-A-Ullah/6cd8a11bedb06c9ef178503529a531df8147f1a5>.
- Walker, B., Holling, C. S., Carpenter, S. R., & Kinzig, A. (2004). Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecology and Society*, 9(2, article 5). <https://doi.org/10.5751/ES-00650-090205>.
- Wang, L., Wang, R., & Yan, H. (2021). System-Dynamics Modeling for Exploring the Impact of Industrial-Structure Adjustment on the Water Quality of the River Network in the Yangtze Delta Area. *Sustainability*, 13(14), Article 14. <https://doi.org/10.3390/su13147696>.
- WCED. (1987). *Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development*. Oxford University Press.
- Wu, D., & Ning, S. (2018). Dynamic assessment of urban economy-environment-energy system using system dynamics model: A case study in Beijing. *Environmental Research*, 164, 70–84. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.01.029>.
- Wu, H., Peng, D., & Wang, L. (2021). Model for sustainable development based on system dynamics and energy-economy-environment coordination: A case study of Beijing, China. *Energy Science & Engineering*, 9(6), 828–842. <https://doi.org/10.1002/ese3.837>.
- Wu, J., & Huang, J. (2023). A system dynamics-based synergistic model of urban production-living-ecological systems: An analytical framework and case study. *PLOS ONE*, 18(10), e0293207. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0293207>.
- Yamuguchi, K. (2001). A step-by step system dynamics modeling of sustainability. *Proc. of International Conference of the System Dynamics Society, Atlanta, US*.
- Zare Mehrjerdi, Y. (2022). Dynamic analysis of resiliency and sustainable production system. *Iranian Journal of Operations Research*, 13(2), 121–167.

- Zare Mehrjerdi, Y., & Abedi, S. (2023). Using System Dynamics to Model the Interaction Among the Factors of Good Governance, Satisfaction of Life and GINI Coefficient. *Decision Making: Theory and Practice*, 1(1), 47–69. <https://doi.org/10.22034/jdmt.2023.17893.1001>.
- Zarghami, S. A. (2024). The Labyrinth of Corruption in the Construction Industry: A System Dynamics Model Based on 40 Years of Research. *Journal of Business Ethics*, 195(2), 335–352. <https://doi.org/10.1007/s10551-024-05637-8>.
- Zenezini, G., & Marco, A. D. (2020). City logistics policy evaluation with system dynamics. *Transportation Research Procedia*, 46, 253–260. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.188>
- Zhu, A., Wang, D., Chen, Y., & Guo, Z. (2022). Optimization of the Beijing Economy-Energy-Emissions System 2021–2035: A Scenario Simulation Analysis Based on a System Dynamics Model. *Science Progress*, 105(3), 00368504221118231. <https://doi.org/10.1177/00368504221118231>.
- Zhu, X., Hu, S., Li, Z., & Wu, J. (2025). A System Dynamics Framework for Port Resilience Enhancement Along Maritime Silk Road: Insights from ESG Governance. *Systems*, 13(8), 719. <https://doi.org/10.3390/systems13080719>.
- Zuo, Y., Shi, Y., & Zhang, Y. (2017). Research on the Sustainable Development of an Economic-Energy-Environment (3E) System Based on System Dynamics (SD): A Case Study of the Beijing-Tianjin-Hebei Region in China. *Sustainability*, 9(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/su9101727>.

¹ 3E² GDP³ GIS⁴ PLE⁵ R&D⁶ HDI