Geography and Environmental Sustainability
Homepage: http://ges.razi.ac.ir/

Water–Food Nexus Modeling for Assessing Watershed Sustainability Using a System Dynamics Approach (Case Study: Sarab Seyed Ali, Lorestan Province)

Arman Kiani[1] | **Kaka Shahedi**[2] | **Mahmoud Habibnejad Roshan**[3] | **Ali Haghizadeh**[4]

1. Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
2. Corresponding Author, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: k.shahedi@sanru.ac.ir
3. Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
4. Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khoramabad, Iran.

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 04 Dec 2025
Received in revised form: 14 Feb 2026
Accepted: 22 Feb 2026
Available online: 22 Jun 2026

Keywords:
Water resources,
Food resources,
System dynamics,
VENSIM,
Sarab Sayed Ali.

ABSTRACT

Food production is closely linked to water availability. In this context, water–food nexus modelling was conducted using system dynamics, based on water, food, and population data, with an emphasis on sustainability through analysis of supply and demand differences during the period 2001–2046, using VENSIM software in the Sarab Seyed Ali watershed. After structural and behavioral validation, the results showed that water resources over the 45-year period would decline by 1.57 billion cubic meters, most of which is due to groundwater depletion. For food resources, from 2001 to 2031, food sustainability improved, so that by 2031 food supply exceeded demand by 715 thousand tons. However, between 2031 and 2046, this trend reversed, and food accumulation in 2046 reached 485 thousand tons, reflecting a reduction in food reserves compared to 2031. Sensitivity analysis, considering regional conditions, identified the cultivated area of beet as the most influential factor in the model. Moreover, four scenarios: baseline, crop pattern change, wastewater system development, and livestock and poultry management were applied to the model and evaluated. Comparing the results of the three scenarios with the baseline (Scenario 1) showed that Scenario 3, with a reduction of 1.03 billion cubic meters in water resources, and Scenario 4, with an increase of 2.08 million tons in food supply, could enhance sustainability compared to the other scenarios. Therefore, adopting systemic and practical strategies within the framework of management policies can significantly improve sustainability.

Cite this article: Kiani, A., Shahedi, K., Habibnejad Roshan, M., & Haghizadeh, A. (2026). Water–Food Nexus Modeling for Assessing Watershed Sustainability Using a System Dynamics Approach (Case Study: Sarab Seyed Ali, Lorestan Province). *Geography and Environmental Sustainability*, *16*(2), 71-96. https://doi.org/10.22126/GES.2026.13299.2939

© The Author (s).
DOI: https://doi.org/10.22126/GES.2026.13299.2939
Publisher: Razi University

جغرافیا و پایداری محیط
وبگاه نشریه: http://ges.razi.ac.ir/

مدل‌سازی پیوند آب – غذا برای سنجش پایداری منابع آبخیز با استفاده از رویکرد سیستمی (مطالعه موردی: سراب صیدعلی استان لرستان)

آرمان کیانی[۱]| کاکا شاهدی[۲]| محمود حبیب‌نژاد روشن[۳]| علی حقی‌زاده[۴]

۱. گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
۲. نویسنده مسئول، گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: k.shahedi@sanru.ac.ir
۳. گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
۴. گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخچهٔ مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۱۳
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۳
دسترسی آنلاین: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

کلیدواژه‌ها:
منابع آب،
منابع غذا،
پویایی سیستم،
VENSIM،
سراب صیدعلی.

چکیده

تولید غذا با دردسترس‌بودن آب ارتباط نزدیکی دارد. در این راستا، مدل‌سازی همبست آب–غذا با استفاده از پویایی سیستم، بر پایه آمار و اطلاعات آب، غذا و جمعیت و با تأکید بر پایداری از طریق تحلیل اختلاف بین عرضه و تقاضا در دوره زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۲۵، با استفاده از نرم‌افزار VENSIM در آبخیز سراب صیدعلی انجام پذیرفت. پس از اعتبارسنجی ساختاری و رفتاری، نتایج نشان داد که منابع آب طی دوره زمانی ۴۵ساله با کاهش ۱/۵۷ میلیارد مترمکعبی مواجه خواهد شد که بخش عمده آن مربوط به افت آب‌های زیرزمینی است. در بخش منابع غذایی از ۱۳۸۰ تا ۱۴۱۰، پایداری منابع غذایی افزایش داشته، به‌طوری که در ۱۴۱۰ عرضه غذا به میزان ۷۱۵ هزار تن بر تقاضا پیشی می‌گیرد. از ۱۴۱۰ تا ۱۴۲۵ این روند معکوس شده و انباشت غذا در ۱۴۲۵ به ۴۸۵ هزار تن رسیده که نشان‌دهنده افت ذخایر غذایی نسبت به سال ۱۴۱۰ می‌باشد. بر اساس تحلیل حساسیت و باتوجه‌به شرایط منطقه‌ای سطح کشت چغندرقند به‌عنوان مؤثرترین عامل در مدل شناسایی گردید. همچنین چهار سناریو پایه، تغییر الگوی کشت، توسعه سیستم فاضلاب و مدیریت تعداد دام و طیور بر مدل اعمال و مورد ارزیابی قرار گرفت. با مقایسه نتایج سه سناریو با مدل پایه (سناریو ۱)، می‌توان دریافت که ترکیب سناریو سوم با کاهش ۱/۰۳ میلیارد مترمکعبی منابع آب و سناریو چهارم با افزایش ۲/۰۸ میلیون‌تنی غذا، نسبت به دیگر سناریوها می‌توانند موجب ارتقا پایداری شوند؛ بنابراین، به‌کارگیری راهکارهای سیستمی و عملی در چارچوب سیاست‌های مدیریتی می‌تواند موجب ارتقا پایداری شود.

استناد: کیانی، آرمان؛ شاهدی، کاکا؛ حبیب‌نژاد روشن، محمود؛ حقی‌زاده، علی (۱۴۰۵). مدل‌سازی پیوند آب - غذا برای سنجش پایداری منابع آبخیز با استفاده از رویکرد سیستمی (مطالعه موردی: سراب صیدعلی استان لرستان). *جغرافیا و پایداری محیط*، *۱۶*(۲)، ۹۶-۷۱. https://doi.org/10.22126/GES.2026.13299.2939

© نویسندگان.
DOI: https://doi.org/10.22126/GES.2026.13299.2939
ناشر: دانشگاه رازی

مقدمه

تقاضا برای منابع طبیعی در مقیاس جهانی در حال افزایش است و مدیریت آن‌ها با پیچیدگی همراه است (Kellner, 2023) به‌طوری که جمعیت جهان تا سال ۲۰۵۰ از ۹/۸ میلیارد نفر فراتر می‌رود که تضمین خودکفایی غذا را با چالش‌های جدی روبه رو می‌کند، لذا پیش‌بینی می‌شود که تنها ۱۴ کشور خودکفایی در بخش غذا را حفظ می‌کنند (Beltran-Pea et al., 2020). برای پرداختن موفقیت‌آمیز به مسائل مربوط به امنیت غذایی، لازم است تا به طور کامل درک کنیم که چگونه این منابع با یکدیگر در محیط طبیعی خود تعامل دارند تا نیازهای جمعیت را برآورده سازند. انجام این کار امکان مدیریت منابع پیچیده‌تر، هدایت خطرات و افزایش پیشرفت به سمت پایداری و تاب‌آوری را میسر می‌سازد (Bieber et al., 2018). تولید غذا بیشترین سهم را در مصرف آب شیرین در جهان دارد و از آن‌جا که آب نقشی اساسی در این فرآیند ایفا می‌کند، تولید غذا می‌تواند فشار قابل‌توجهی بر منابع آبی وارد سازد (Lu et al., 2025). این فشار نه تنها موجب افزایش تقاضا می‌شود، بلکه رقابت بر سر منابع محدود را تشدید کرده و در نهایت به کمبود منابع، وابستگی شدید، رقابت میان مصرف‌کنندگان و حتی سوء مدیریت استراتژیک منجر خواهند شد (Zahedi et al., 2025).

علاوه بر این، چالش‌هایی مانند تغییرات اقلیمی، رشد جمعیت و گسترش شهرنشینی باعث می‌شوند که راهبردهای فعلی مدیریت آب برای پاسخ‌گویی به تقاضای روزافزون، به‌تنهایی کافی نباشند و نتوان آن‌ها را جدا از مسائل مرتبط با امنیت غذایی بررسی کرد (Luo et al., 2024; Rosegrant et al., 2009). به دلیل ارتباط تنگاتنگ بخش آب و غذا، نمی‌توان آنها را جداگانه مدیریت کرد، زیرا محدودیت تأمین آب و عدم مدیریت صحیح منابع آب به تولید غذا آسیب می‌رساند و پایداری منابع غذایی را کاهش می‌دهد (Alexandratos & Bruinsma, 2012: 35). این رویکرد یکپارچه تشخیص می‌دهد که تولید غذا به طور جدایی ناپذیری با در دسترس بودن و مدیریت منابع آب در ارتباط است. در مناطق کم‌آب، چالش تضمین امنیت غذایی دو چندان شده‌است (Shubbar et al., 2024).

از سوی دیگر به علت اینکه ارتباط بین آب، غذا و اثرات زیست‌محیطی در مقیاس‌های مکانی و زمانی رخ می‌دهد (Shubbar et al., 2024)، لذا یافتن ابزارهای گوناگونی که بتوانند ارتباط بین آب و غذا را از لحاظ تحلیل پایداری و امنیت در بعد مکان و زمان نشان دهند، امری ضروری است (Shubbar et al., 2024). یکی از این ابزارها رویکرد همبست می‌باشد که از درک جامع وابستگی متقابل بین منابع حمایت می‌کند و بر حل چالش‌های پایدار و نوآورانه در جهت مدیریت بخش آب برای دستیابی به امنیت غذایی تاکید می‌کند (Rai, 2023). روش‌های متنوعی برای مفهومی‌سازی درک وابستگی بین متغیرها و پیچیدگی آن ها ظهور کرده‌اند، که به حل مسائل و چالش‌های حیطه تخصیص منابع می‌پردازند (Dargin et al., 2019). یکی از این روش‌ها پویایی سیستم برای مدل‌سازی روابط پیچیده بین مولفه آب و غذا می‌باشد (Shubbar et al., 2024). پویایی سیستم شامل ابزارها و روش‌های مختلف برای تجزیه و تحلیل تعاملات علت و معلولی و توضیح تکامل رفتار سیستم در طول زمان است و برای طیف گسترده‌ای از اهداف استفاده می‌شود، که تجزیه و تحلیل استراتژیک و طراحی سیاست را در بر می‌گیرد (Liu et al., 2022). پویایی سیستم همچنین توانایی شبیه‌سازی یک سیستم پیچیده با توجه به پیچیدگی و تعاملات بین متغیرها، حلقه‌های بازخوردی و غیر خطی بودن را دارا می‌باشد، و می‌تواند زمینه شناسایی چالش‌ها، فرصت‌ها و تنظیم آن را فراهم آورد (Susnik et al., 2012).

از زمانی که واژه همبست آب - انرژی–غذا توسط هافمن ارائه شد (Hoff, 2011)، تحقیقات کاربردی از جهت تقویت درک هم‌افزایی سیستم عرضه و تقاضا آب - انرژی–غذا با تأکید بر پایداری و تعامل شاخص‌ها با افزایش در بهره‌وری و بهینه‌سازی صورت پذیرفت (Farmandeh et al., 2024; Hua et al., 2024; Pena-Torres et al., 2024; Naidoo et al., 2021; Endo et al., 2020). در شماری از این پژوهش‌ها، مدل همبست با چالش‌هایی از جمله ماهیت میان‌رشته‌ای، نبود داده‌های دقیق و معتبر، پیچیدگی ساختارهای اقتصادی و اجتماعی، و همچنین شیوه‌های سیاست‌گذاری رایج مواجه تلقی شده است (Scanlon et al., 2017; Weitz et al., 2017). مطالعات بخشی و دومؤلفه‌ای نیز با هدف بررسی دقیق‌تر و بهبود وضعیت امنیت و پایداری منابع آب و غذا انجام شده‌اند، چراکه تولید غذا به‌عنوان اصلی‌ترین عامل تقاضای آب شناخته

می‌شود و پیوند آب و غذا یکی از ارکان کلیدی در چارچوب همبست آب–انرژی–غذا به شمار می‌رود.

این مطالعات بر سطح زیر کشت و حوضه آبخیز متمرکز بوده‌اند و نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که افزایش تقاضای غذا در طول زمان با رشد جمعیت و کاهش قابل‌توجه میزان دسترسی به آب در آینده شدت می‌گیرد. در این حالت می‌توان با اعمال سیاست‌های متنوع تاب‌آوری و بهبود سیستم در جهت برنامه‌ریزی بهینه و پایدار را تعدیل نمود (Pagano et al., 2025; Hofmann et al., 2024). در بسیاری از این پژوهش‌ها مطالعات همبست در چهارچوب یک سیستم پویا و دینامیک به‌صورت کمی مدل‌سازی شده که ادغام مؤلفه و متغیرها به‌صورت کمی به درک تعاملات و پیچیدگی سیستم کمک کرده و سناریوسازی را باتوجه‌به ساختار این مدل‌ها آسان می‌کند (Yu et al., 2025; Li et al., 2024; Susnik et al.,2022; De Vito et al., 2019; Purwanto et al., 2019; De Vito et al., 2017).

در شماری از این تحقیقات، از نرم‌افزار پویایی سیستم ونسیم به دلیل قابلیت‌های منحصربه‌فرد آن، از جمله امکان سناریوسازی، تحلیل حساسیت مدل، اتصال داده‌ها، توزیع انعطاف‌پذیر و بهره‌مندی از الگوریتم‌های پیشرفته و دسترسی سریع در فرایند اجرا استفاده شده است (Chen & Chen., 2020; هاشمی و همکاران، ۱۴۰۰; اصلانی و همکاران، ۱۴۰۲; Hurtado et al., 2024; Shubbar et al., 2024). همچنین به علت وضعیت نابسامان مدیریت منابع و مصارف، ناهماهنگی در عرضه و تقاضا، تغییرات اقلیمی، چالش‌های جمعیتی و سایر عوامل مؤثر در سطح آبخیزهای ایران، نیاز به تدوین و به‌کارگیری یک چارچوب سیستمی با رویکردی پویا، جامع، پایدار و یکپارچه بیش‌ازپیش احساس می‌شود. این چارچوب باید بتواند تعامل و تعادل چندبخشی میان مؤلفه‌های آب و غذا را برقرار سازد و فرایند تصمیم‌گیری و سیاست‌گذاری در دو حوزه کلیدی آب و غذا را پشتیبانی کند.

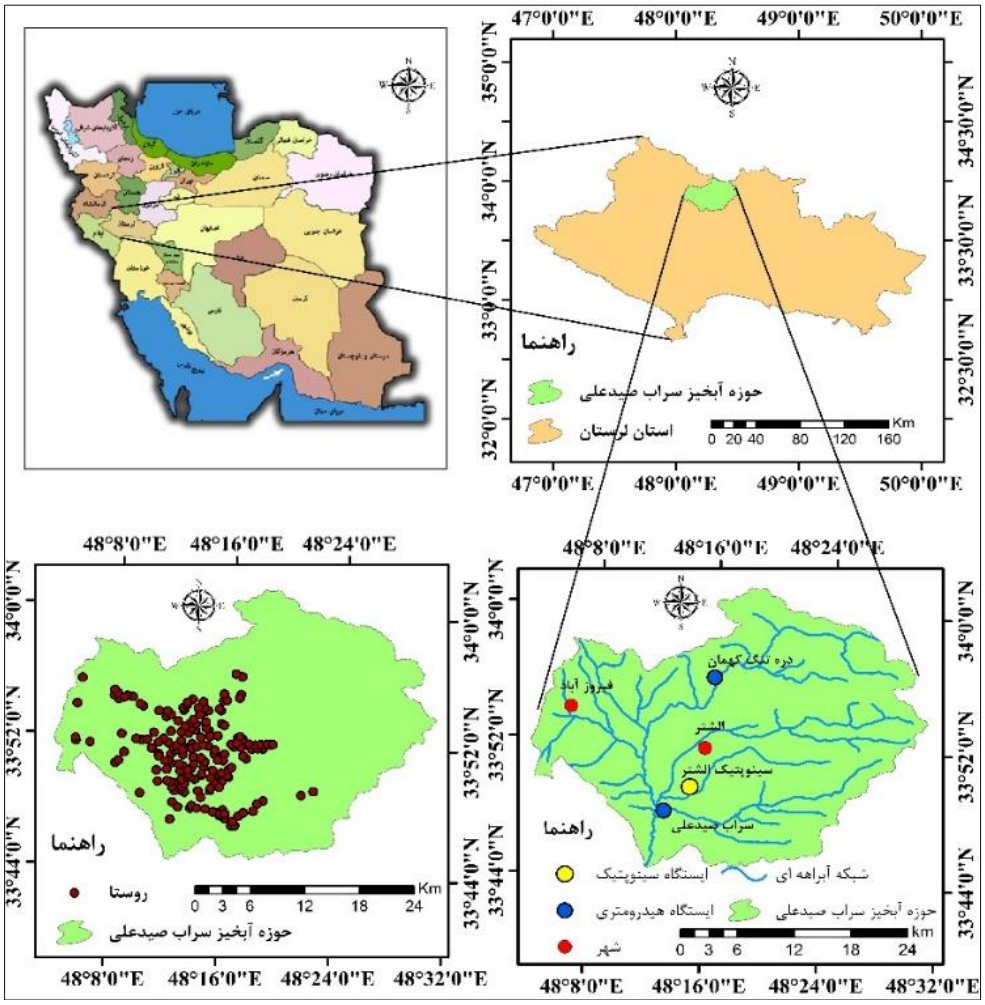
باتوجه‌به آنکه مطالعات پیشین در زمینه پیوند آب و غذا عمدتاً بر تحلیل‌های بخشی و تک‌بعدی تمرکز داشته‌اند و کمتر به مقیاس آبخیز و نقش عوامل کلیدی همچون بازچرخانی منابع آب، تغذیه دام و طیور و مدیریت جمعیت دامی باوجود اهمیت و اثرگذاری چشمگیر آن‌ها توجه کرده‌اند؛ ازاین‌رو، می‌توان با ادغام انباشت خوراک دام و طیور در رویکردی همبستی و ساختاری پویا، با بهره‌گیری از قابلیت‌های تحلیل حساسیت مبتنی بر واریانس و شناسایی سهم نسبی متغیرهای، سناریوهای اصولی همچون توسعه سامانه‌های تصفیه و بازچرخانی فاضلاب و کاهش تعداد دام و طیور را به‌منظور مدیریت و ارتقای بهره‌وری منابع طراحی و اجرا کرد. این رویکرد تلفیقی نه‌تنها خلأهای موجود در مطالعات پیشین را پوشش می‌دهد، بلکه چارچوبی منسجم و سیاست‌محور برای مدیریت پایدار منابع آب و غذا در سطح آبخیز ارائه می‌کند. به‌طورکلی هدف اصلی این پژوهش، سنجش پایداری منابع آب و غذا در آبخیز سراب صیدعلی واقع در استان لرستان، با بهره‌گیری از رویکرد پویایی سیستم با تمرکز بر مؤلفه‌های فیزیکی و زیست‌محیطی در چارچوب سناریوهای متنوع است. این مطالعه در واقع تلاشی نوآورانه در زمینه سیاست‌گذاری و ارتقای پایداری آبخیز موردمطالعه به شمار می‌آید.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه موردمطالعه

در این پژوهش آبخیز سراب صیدعلی واقع در شهرستان سلسله از توابع استان لرستان به وسعت ۷۹۷/۵ کیلومترمربع که از زیر حوضه‌های شمالی کرخه که در موقعیت جغرافیایی ″۳۹ ′۴۸°۰۳ تا ″۴۸ ′۳۰ °۴۸ طول شرقی و ″۳۴ ′۴۴ °۳۳ تا ″۲۳ ′۰۱ °۳۴ عرض شمالی قرار دارد به‌عنوان منطقه موردمطالعه انتخاب گردید. دو شهر الشتر و فیروزآباد و تعداد ۱۸۱ روستا در این آبخیز واقع شده‌اند که جمعیتی بالغ بر ۶۵۸۲۳ نفر در آن سکونت دارند، و دارای شاخص توسعه انسانی ۰/۶۵۴ می‌باشد (شاهدی و همکاران، ۱۴۰۲). کاربری اراضی به‌طورکلی شامل مناطق شهری و مسکونی، اراضی کشاورزی، جنگل و مرتع، و به مقدار خیلی کمی صنعتی می‌باشد. اراضی کشاورزی در این منطقه بیش از ۲۹۷۰۰ هکتار مساحت دارند که به‌صورت آبی و دیم کشت می‌شوند، به‌طوری که اراضی آبی عمدتاً به‌صورت باغات گردو، گندم، چغندر، یونجه، کلزا، لوبیا کشت شده، ولی اراضی دیم بیشتر به‌صورت گندم، جو، نخود و عدس کشت می‌شوند. بهره‌برداری از منابع آب در این آبخیز با استفاده از چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق، ایستگاه پمپاژ فیض‌آباد و آب‌های سطحی و چشمه‌ها انجام می‌پذیرد. در این آبخیز در دوره

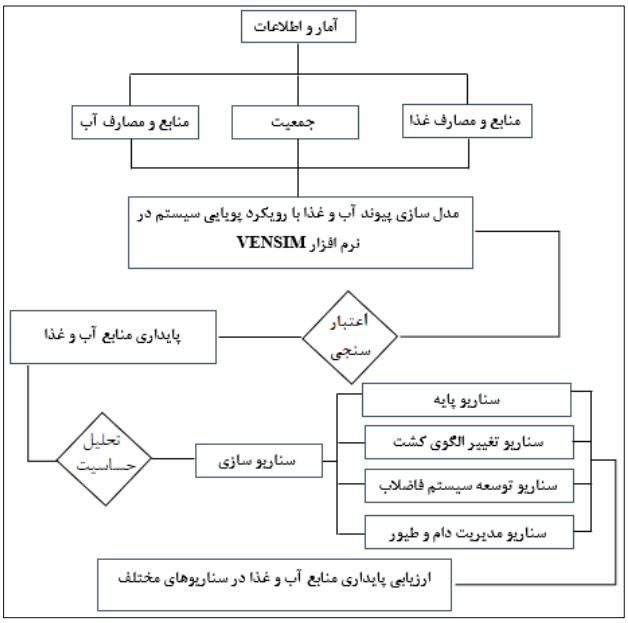
۳۵ساله (۱۳۶۰-۱۳۹۴)، متوسط بارندگی سالانه بارندگی سالانه ۵۰۴ میلیمتر، متوسط درجه‌حرارت سالانه ۱۷/۹ سانتی‌گراد، میانگین ارتفاع منطقه ۲۰۹۸ متر از سطح دریا و شیب متوسط آن ۱۴/۵ درجه می‌باشد (مهندسین مشاور جاماب، ۱۳۹۸: ۱۷). همچنین میانگین دبی متوسط سالانه خروجی در درازمدت از سال ۱۳۶۰ تا ۱۳۹۵ برابر با ۷/۴۳ مترمکعب می‌باشد (شاهدی و همکاران، ۱۴۰۲). شکل ۱ شمای کلی و موقعیت آبخیز سراب صیدعلی در ایران و استان لرستان را نشان می‌دهد.



شکل ۱. شمای کلی و موقعیت آبخیز سراب صیدعلی در ایران و استان لرستان

روش مطالعه

در این تحقیق یک مدل پیوند آب - غذا با استفاده از رویکرد پویایی سیستم بین سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۲۵ و بر اساس داده‌های هواشناسی و هیدرولوژی، منابع و مصارف آب (شرب، صنعت، کشاورزی، زیست‌محیطی)، آمار و اطلاعات مربوط به غذا (کشاورزی، دام و طیور، شیلات) و همچنین متغیرهای جمعیتی اخذ شده از شرکت مدیریت منابع آب، سازمان جهاد کشاورزی و دیگر سازمان‌های مربوطه توسعه داده می‌شود. منابع و مصارف آب و غذا در آبخیز سراب صیدعلی به‌صورت یک سیستم پویا و یکپارچه دو مولفه‌ای با تأکید بر جنبه‌های فیزیکی و زیست‌محیطی در محیط پویایی سیستم در نرم‌افزار VENSIM پس از اعتبارسنجی با روش‌هایی مانند آزمون سازگاری ابعاد مدل، ارزیابی ساختار مدل و آزمون تکرار رفتار مدل‌سازی می‌شوند. پس از مدل‌سازی و بر اساس ویژگی‌های منطقه‌ای و نتایج تحلیل حساسیت سناریوسازی انجام می‌پذیرد، تا بتوان بر اساس آن تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی را برای آینده و مدیریت عرضه و تقاضا انجام داد. مراحل انجام تحقیق در شکل ۲ نمایش‌داده‌شده است.



شکل ۲. مراحل انجام پژوهش

پویایی سیستم و مدل مفهومی

ازآنجایی‌که موضوع همبست در محدوده تفکر سیستمی جایی می‌گیرد و این تفکر را می‌توان با روش‌های پویا و توسعه‌یافته حل نمود (Meadows, 2008)؛ بنابراین پویایی سیستم ارائه شده توسط فارستر (Forrester, 1961: 51) به‌عنوان مناسب‌ترین روش برای توصیف پیوند آب و غذا استفاده می‌شود. مفهوم و روش پویایی‌شناسی سیستم، مدیریت هماهنگ منابع را محور اصلی خود قرار می‌دهد (Keyhanpour et al., 2021). زیرا پویایی سیستم با استفاده از حلقه‌های بازخوردی پویا و معادلات دیفرانسیل درک متقابل اجزاء و روابط را آسان‌تر می‌کند (Feng et al., 2016). در این چارچوب، ارتباط میان متغیر زیرسیستم‌های آب، غذا و جمعیت و همچنین پیوند آن‌ها با سایر بخش‌ها، با استفاده از روابط علی و معلولی، مدل جریان–حالت و روابط ریاضی بررسی و برای تحلیل تعاملات در سیستم آب–غذا توسعه داده می‌شود. در واقع نمودار جریان - حالت به‌صورت کمی اصول و روند جریان و انباشت منابع یا اطلاعات را نشان می‌دهند (Hofmann et al., 2024). به‌طوری که روند متغیرها در طول زمان بررسی و رابطه بین متغیرها با درنظرگرفتن روندها و مطابق با قوانین موجود به‌صورت ریاضی فرمول‌بندی می‌شود (Keyhanpour et al., 2021). همچنین از نرم‌افزار کاربردی VENSIM که در حوزه پویایی سیستم برای مدیریت پایدار منابع و مصارف به کار می‌رود، به‌منظور فهم بهتر ساختار، داده‌ها و روابط درون سیستم استفاده می‌شود.

مفهوم پایداری در همبست آب - غذا

چارچوب همبست آب–غذا بر پایه تحلیل روابط پویا میان این منابع طراحی شده است تا امنیت این منابع را مورد ارزیابی قرار دهد (Chang et al., 2025). این چارچوب که اساس آن بر مفهوم پایداری استوار است، به‌عنوان یک اصل بنیادین مطرح می‌شود و هدف اصلی آن ایجاد تعادل میان عرضه و تقاضا در دو بخش یاد شده است (Schneider et al., 2019). براین‌اساس، پایداری را می‌توان مطابق رابطه (۱) تعریف نمود (Keyhanpour et al., 2021).

$$Sustainability=Supply-Demand \quad \text{رابطه (۱)}$$

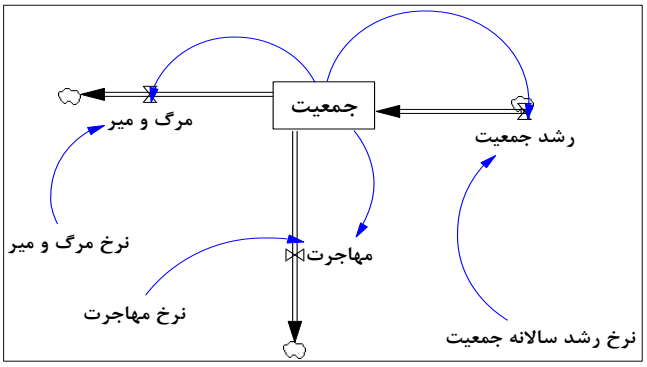
بنابراین، پایداری در این مدل بر اساس اختلاف میان عرضه و تقاضا تعریف و برآورد می‌شود. چنانچه عرضه منابع حیاتی شامل آب و غذا توانایی پاسخگویی به سطح تقاضا و نیازهای جمعیت منطقه را داشته باشد، وضعیت به‌عنوان پایدار یا پایداری مثبت تلقی می‌گردد. در مقابل، درصورتی‌که عرضه نتواند نیازهای مذکور را پوشش دهد، شرایط ناپایداری یا پایداری منفی شکل خواهد گرفت.

زیرسیستم جمعیت

ازآنجایی‌که رشد جمعیت تأثیر زیادی بر استفاده از منابع دارد، گنجاندن یک عامل جمعیتی ضروری است. این مؤلفه کلیدی در واقع با عنوان اندازه جمعیت شناخته می‌شود. این زیرسیستم به‌طورکلی از ساختار الگوی محدودیت رشد تبعیت می‌کند، این الگو بیان‌کننده آن است که افزایش جمعیت باعث افزایش تولد می‌شود که خود باعث ایجاد یک حلقه تقویتی می‌گردد، ولی عامل مرگ و مهاجرت باعث تعدیل این حلقه می‌شوند (جعفری، ۱۳۹۶: ۶۴). در این زیرسیستم جریان‌های اطلاعاتی جمعیت با استفاده از عامل تولد، مرگ و مهاجرت براساس جمعیت اولیه و نرخ رشد سالانه جمعیت به صورت شکل ۳ توسعه داده شده و مدل‌سازی انجام می‌پذیرد. معادله کلی آن به صورت رابطه۲ نوشته می‌شود (Ndlela, 2024: 39):

$$P(t)=P(t_0)+\int_{t_0}^{t_n}[B_s-D_s+M]dt \qquad \text{رابطه (۲)}$$

در رابطه فوق P(t) میزان انباشت جمعیت، $P(t_0)$ میزان جمعیت در زمان اولیه، B_s تولد، D_s میزان مرگ‌ومیر و M میزان مهاجرت می‌باشد.



شکل ۳. روابط جریان-حالت زیرسیستم جمعیت

زیرسیستم آب

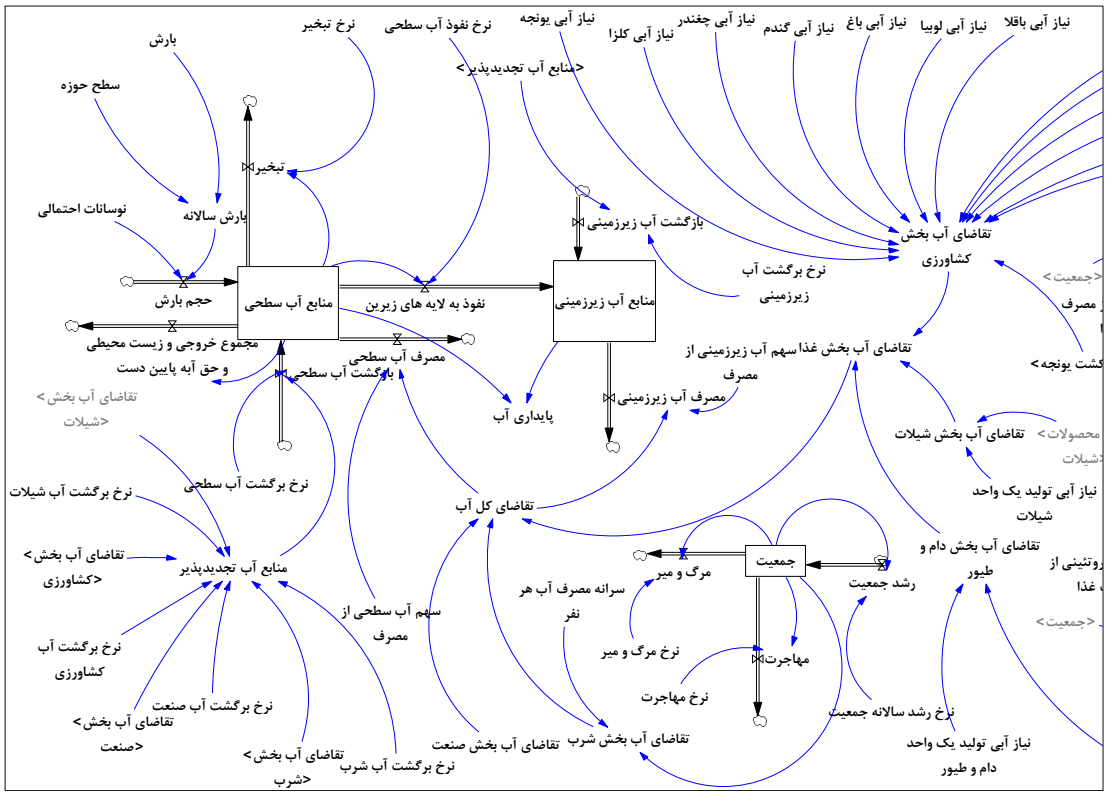
این زیرسیستم به بررسی منابع و مصارف آب می‌پردازد. به‌طوری که منابع آب سطحی و زیرزمینی با استفاده از متغیر انباشت، جریان‌ها، متغیرهای کمکی و ثابت‌ها مدل‌سازی می‌شود (Ndlela, 2024: 53). در این مدل توسعه داده شده منبع تأمین آب سطحی شامل بارش و برگشت آب (عمدتاً پساب) است، اما تقاضای آب شامل تبخیر، نفوذ به لایه‌های زیرسطحی، نیاز زیست‌محیطی و حق آبه پایین‌دست و مصارف جوامع (شرب، صنعت، غذا شامل: کشاورزی، دام و طیور و شیلات) می‌شود. منبع تأمین آب زیرزمینی با استفاده از نفوذ منابع آب سطحی درون زمین برای تغذیه آن و برگشت آب انجام می‌پذیرد، ولی تقاضا به شکل محور جریان شامل مصارف جوامع می‌باشد. همچنین مؤلفه جمعیت در این زیرسیستم گنجانده شده است. روابط ۳ و ۴ معادله حاکم بر این زیرسیستم و شکل ۴ روابط جریان - حالت این زیرسیستم را نشان می‌دهد.

$$WR_S(t)=WR_S(t_0)+\int_{t_0}^{t_n}[P+R_S-E-I-C_S-O]dt \qquad \text{رابطه (۳)}$$

$$WR_g(t)=WR_g(t_0)+\int_{t_0}^{t_n}[I+R_g-C_g]dt \qquad \text{رابطه (۴)}$$

$WR_s(t)$ ذخیره آب سطحی حوضه، $WR_s(t_0)$ ذخیره آب سطحی حوضه در زمان اولیه، P حجم بارش، R_S بازگشت آب به منابع سطحی، E تبخیر، I آب نفوذ یافته به آب زیرزمینی و لایه‌های زیرین، C_s مصرف آب سطحی، O میزان خروجی و نیاز زیست‌محیطی از حوضه می‌باشد.

$WR_g(t)$ ذخیره آب زیرزمینی، $WR_g(t_0)$ ذخیره آب زیرزمینی در زمان اولیه، R_g بازگشت آب به منابع زیرزمینی و C_g مصرف آب زیرزمینی است.



شکل ۴. روابط جریان-حالت زیرسیستم آب

زیرسیستم غذا

شکل ۵ نمودار جریان- حالت زیرسیستم منابع غذایی را نشان می‌دهد. همانطور که نشان داده شده است، تأمین غذا از منابع غذایی کشاورزی، منابع غذایی شیلات و غذای دام و طیور حاصل شده و پایداری با استفاده از آن‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این زیرسیستم تامین علوفه و تامین تغذیه دام نیز نشان داده شده است. تقاضای غذا در این زیرسیستم تابعی از جمعیت و مصرف سرانه غذا می‌باشد که تحت تأثیر توسعه اقتصادی قرار دارد. عرضه سالانه محصولات کشاورزی متناسب با سطح زیر کشت و عملکرد محصول می‌باشد که نقش تعیین کننده و کلیدی در این زیرسیستم دارد. تقاضای غذا برای آب از تقاضای آب هر سه بخش کشاورزی، دام و طیور، شیلات و میزان آب مصرفی در هر واحد متاثر بوده که بخش کشاورزی تقاضای اصلی آب را شامل می‌شود (Ndlela, 2024: 69). تقاضای آب در این بخش به دلیل میزان تولید مواد غذایی در بخش کشاورزی، تقاضای آب برای محصولات کشاورزی و شدت مصرف آب در بخش کشاورزی است. روابط ۵ تا ۸ معادلات حاکم بر این زیرسیستم را مشخص می‌کند.

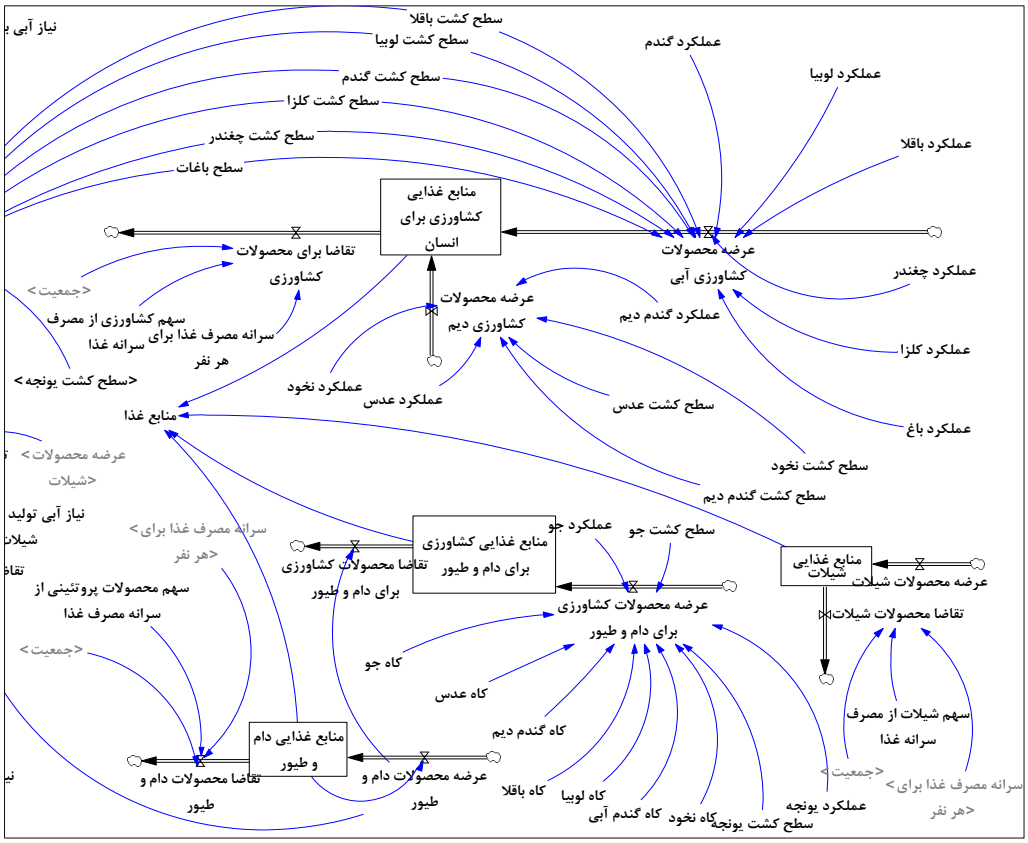
$$F_{ag(H)}(t)=F_{ag(H)}(t_0)+\int_{t_0}^{t_n}[S_{ag(w)}+S_{ag(d)}-D_{ag(H)}]dt \qquad \text{رابطه (۵)}$$

$$F_f(t)=F_f(t_0)+\int_{t_0}^{t_n}[S_f-D_f]dt \qquad \text{رابطه (۶)}$$

$$F_l(t)=F_l(t_0)+\int_{t_0}^{t_n}[S_l-D_l]dt \qquad \text{رابطه (۷)}$$

$$F_{ag(L)}(t)=F_{ag(L)}(t_0)+\int_{t_0}^{t_n}[S_{ag(L)}-D_{ag(L)}]dt$$ رابطه (۸)

در روابط بالا $F_{ag(H)}(t)$ منابع غذایی کشاورزی مورداستفاده انسان، $F_{ag(H)}(t_0)$ منابع غذایی کشاورزی مورداستفاده انسان در زمان اولیه، $S_{ag(w)}$ عرضه محصولات کشاورزی آبی، $S_{ag(d)}$ عرضه محصولات کشاورزی دیم و $D_{ag(H)}$ تقاضا و مصرف محصولات کشاورزی برای انسان، $F_f(t)$ منابع غذایی شیلات، $F_f(t_0)$ منابع غذایی شیلات در زمان اولیه، S_f عرضه محصولات شیلاتی و D_f تقاضا برای مصرف محصولات شیلاتی، $F_l(t)$ منابع غذایی دام و طیور، $F_l(t_0)$ منابع غذایی دام و طیور در زمان اولیه، S_l عرضه محصولات دام و طیور و D_l تقاضا برای مصرف محصولات دام و طیور، $F_{ag(L)}(t)$ منابع غذایی کشاورزی مورداستفاده دام و طیور، $F_{ag(L)}(t_0)$ منابع غذایی کشاورزی مورداستفاده دام و طیور در زمان اولیه، $S_{ag(L)}$ عرضه محصولات کشاورزی برای دام و طیور و $D_{ag(L)}$ تقاضا و مصرف محصولات کشاورزی دام و طیور می‌باشد.

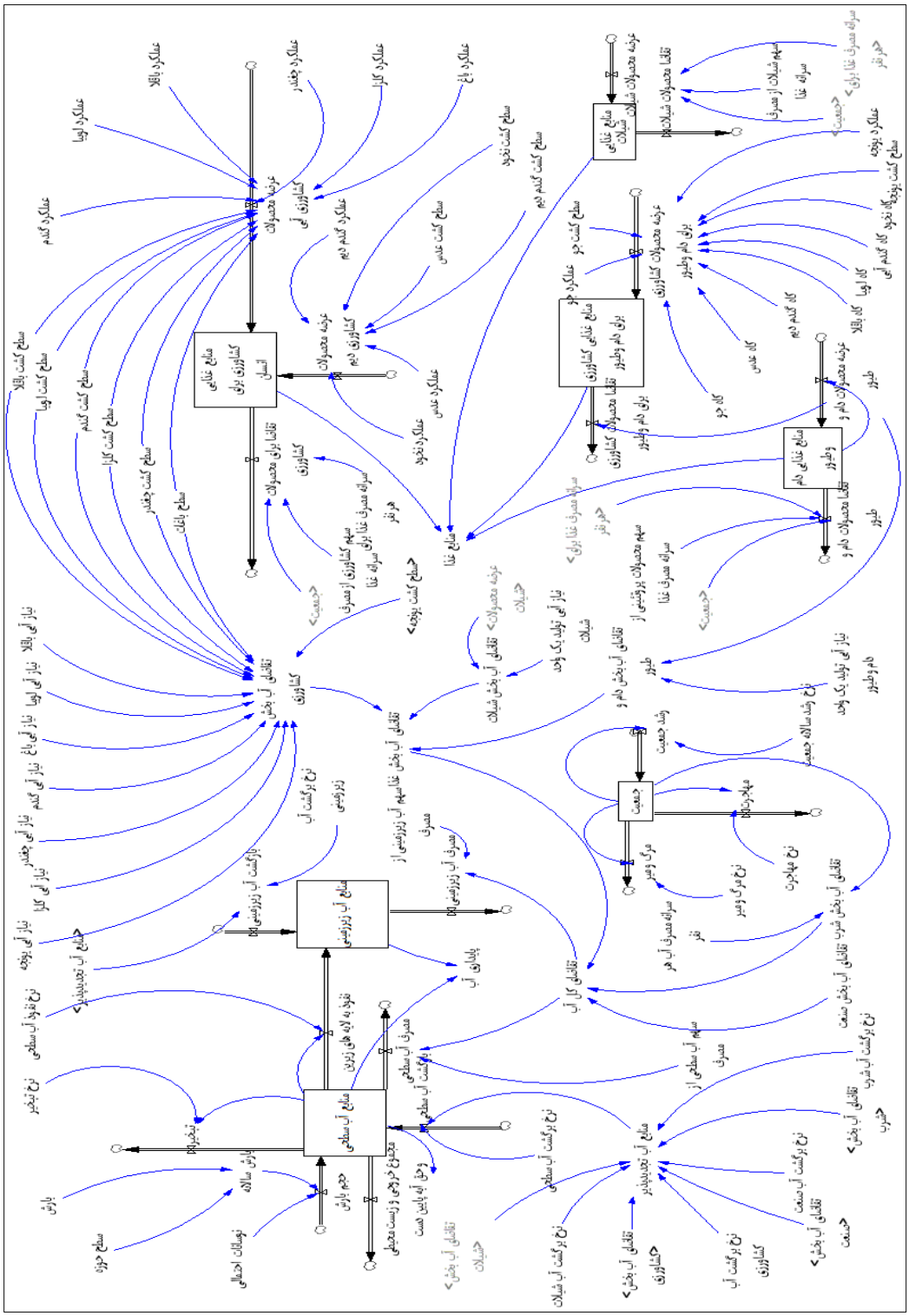


شکل ۵. روابط جریان–حالت زیرسیستم غذا

سیستم کلی

با اتکا به تحلیل کیفی پیوندهای درونی، نمودار انباشت–جریان مطابق شکل ۶ و بر اساس روش انتگرال‌گیری اویلر توسعه داده شد (Ndlela, 2024: 59). انتخاب این روش به دلیل برخورداری از منطق «اگر–آنگاه–دیگری» و انطباق آن با ماهیت روابط حاکم بر مدل صورت می‌پذیرد (Hofmann et al., 2024). در این مدل‌سازی، گام زمانی یک‌ساله به‌عنوان بازه شبیه‌سازی پایداری منابع آب و غذا با تمرکز بر انباشت سه متغیر کلیدی شامل آب، غذا و جمعیت ترسیم گردیدند. باتوجه‌به نبود سد در منطقه مطالعه، متغیر حالت سد از مدل حذف گردید و تأمین آب ساکنان صرفاً از طریق منابع آب سطحی و منابع آب زیرزمینی فرض شد. تنوع بالای تولیدات کشاورزی در منطقه موجب شکل‌گیری سبد غذایی متنوع برای ساکنان که شامل غلات و حبوبات، محصولات پروتئینی و لبنی و به‌ویژه طیف گسترده‌ای از میوه‌ها و سبزیجات می‌شود. پایداری آب از طریق برآورد مجموع منابع آب سطحی و زیرزمینی و پایداری غذا باتوجه‌به مجموع انباشت منابع

غذایی کشاورزی، شیلات، دام و طیور و همچنین منابع غذایی مورداستفاده در تغذیه دام و طیور ارزیابی می‌گردد.



شکل ۶. همبست آب و غذا توسعه داده شده در آبخیز سراب صیدعلی

اعتبارسنجی

برای اطمینان از صحت چارچوب مدل‌سازی و میزان انطباق آن با واقعیت، ضروری است که پس از تکمیل مدل، فرایند اعتبارسنجی و تأیید آن انجام گیرد (Ndlela, 2024: 79). این مرحله با بهره‌گیری از آزمون‌های اعتبارسنجی ساختاری و

رفتاری صورت می‌پذیرد تا اعتماد لازم به نتایج مدل فراهم گردد (Forrester & Senge, 1979: 62). در بخش اعتبارسنجی ساختاری آزمون‌های شامل کفایت مرزی و سازگاری ابعاد، مدل را مورد ارزیابی قرار می‌دهند (Barlas et al., 1996). در بخش اعتبارسنجی رفتاری، آزمون باز تولید نقش مهمی در ارزیابی میزان اعتبار مدل ایفا می‌کند. یکی از شاخص‌های آماری باز تولید رفتار مدل، شاخص RMSPE است که بر اساس رابطه ۹ محاسبه می‌شود. اگر مقدار این شاخص کمتر از ۰/۱ باشد و به سمت صفر میل کند نشان از تایید رفتار مدل‌سازی با دقت بالا می‌دهد (Keyhanpour et al., 2021).

$$RMSPE=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{(S_i-A_i)^2}{A_i}} \quad \text{رابطه (۹)}$$

در رابطه فوق n تعداد داده، S_i داده شبیه‌سازی شده و A_i داده مشاهداتی می‌باشد.

تحلیل حساسیت و سناریوسازی

تحلیل حساسیت برای تعیین میزان حساسیت مدل به تغییر در مؤلفه‌ها و نشان‌دادن با اهمیت‌ترین پارامتر در مدل استفاده می‌شود. به‌طوری که پارامتری که مقدار خاص آن می‌تواند به طور قابل‌توجهی بر نحوه رفتار سیستم تأثیر بگذارد شناسایی شده و می‌توان از آن برای سناریوسازی یا بهبود سناریوها استفاده نمود (Keyhanpour et al., 2021). پس از بررسی ویژگی‌های منطقه‌ای و تحلیل حساسیت مدل با استفاده از روش مبتنی بر تفاضل واریانس ۱۰± درصدی متغیر (Most, 2024)، سناریوسازی برای بررسی تأثیر استراتژی‌ها و سیاست‌های مختلف در مدل اعمال می‌شود (Hofmann et al., 2024). هدف اصلی سناریوسازی، پیش‌بینی و درک نتایج دنیای واقعی براساس اجرای سیاست‌های متنوع در مدل است. پس از شناسایی سیاست‌هایی که می‌توانند مدیریت منابع آب و غذا را بهبود بخشند، شبیه‌سازی‌هایی برای پیش‌بینی نحوه واکنش سیستم واقعی به این مداخلات انجام می‌شود. به طوریکه در این مدل سناریوی حالت پایه و حفظ وضعیت موجود (Jack et al., 2022: 96)، سناریوی تغییر الگوی کشت به علت کشت بی‌رویه محصولات بهاره و کاهش ۲۵ درصد سطح زیرکشت موثرترین محصول جهت صرفه‌جویی در مصرف آب ضروری است.

این کاهش نه تنها به مدیریت بهینه منابع آبی می‌انجامد، بلکه با توجه به محدودیت‌های آبی موجود، به عنوان راهکاری کلیدی در جهت رسیدن به تعادل در تولید محصولات استراتژیک عمل خواهد کرد. بر این اساس، تعیین سقف ۲۵ درصدی می‌تواند به عنوان یک هدف راهبردی در برنامه‌ریزی‌های آتی بخش کشاورزی مد نظر قرار گیرد. همچنین سناریوی توسعه سیستم فاضلاب شهری و صنعتی با توجه به عدم وجود سیستم فاضلاب و تصفیه آن در آبخیز سراب صیدعلی (شاهدی و همکاران، ۱۴۰۲) با در نظر گرفتن این موضوع که در کشورهای پیشرفته مانند انگلستان تا ۹۰ درصد فاضلاب و پساب تصفیه می‌شود (Voulvoulis, 2024)، امکان دستیابی به نرخ تصفیه در حدود ۸۰ درصد پساب با توجه به نوع فناوری در کشورهای در حال توسعه محقق شود. یکی از سناریوهای تأثیرگذار بر منابع آب و غذا، تغییر در میزان تولید محصولات پروتئینی است. این تغییر می‌تواند به‌طور هم‌زمان بر مصرف منابع آبی و ظرفیت تولید محصولات کشاورزی اثرگذار باشد. در شرایطی که منطقه مورد مطالعه دارای ویژگی‌های کوهستانی و فعالیت‌های کشاورزی گسترده است، بررسی کاهش ۲۵ درصدی تولید پروتئین می‌تواند نشان دهد که این اقدام تا چه میزان در ارتقاء امنیت پایدار آب و غذا و تقویت تاب‌آوری سیستم در بخش دام و طیور، می‌تواند تاب‌آوری منابع را در پیوند آب و غذا تحت تأثیر قرار دهد و نقش مهمی در بهینه‌سازی تخصیص منابع و پایداری بلندمدت ایفا کند.

نتایج

در این مطالعه، سال ۱۳۸۰ به دلیل دسترسی به داده‌ها و اطلاعات مناسب به‌عنوان سال پایه و نقطه آغاز مدل‌سازی انتخاب شد. بر همین اساس، باتکیه‌بر شرایط اولیه، ساختار سیستم، متغیر و نرخ‌های مربوطه، شبیه‌سازی و پیش‌بینی آینده انجام گرفت. این فرایند با درنظرگرفتن ملاحظات فنی و برنامه‌ای در چارچوب افق‌های سیاست‌گذاری منطبق با رویکرد شرکت مدیریت منابع آب ایران، تا سال ۱۴۲۵ انجام می‌پذیرد.

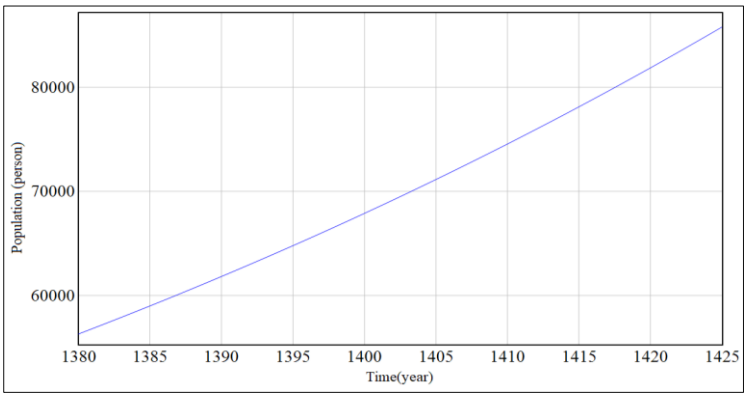
اعتبارسنجی

در ابتدا قبل از ارائه نتایج لازم است که ساختار، ارتباط اجزا و نتایج مدل‌سازی مورد اعتباربخشی و اعتبارسنجی قرار گیرد تا از درستی مدل اطمینان حاصل شده و بعد از آن نتایج ارائه شده مورد بحث‌وبررسی قرار گیرد. در مدل‌سازی انجام شده، روابط جریان - حالت شرح داده شده برای هفت نفر از کارشناسان و نخبگان بخش تخصیص وزارت نیرو و اعضای هیئت‌علمی مؤسسه تحقیقات آب به‌عنوان بازوی علمی وزارت نیرو که در تدوین اسناد بالادستی به‌ویژه قانون برنامه هفتم، مدیریت کلان کشور و تلفیق منابع و ارتباط میان بخش‌های عرضه و تقاضاکننده آب، کشاورزی و عامل جمعیت نقش‌آفرین بوده‌اند، مورد ارزیابی قرار گرفت. کفایت مرزهای مدل پس از تعدیلاتی موردتأیید و پذیرش قرار گرفت.

با درنظرگرفتن روابط و وابستگی میان متغیرها و تناسب واحدهای اندازه‌گیری هر یک از این متغیرها در چرخهٔ پویایی سیستم، نتایج نشان داد که ابعاد و واحدهای تعریف شده در نرم‌افزار VENSIM با ساختار مفهومی سیستم سازگار بوده و موردقبول می‌باشد. به‌منظور ارزیابی اعتبار رفتاری مدل، شاخص آماری RMSPE به‌عنوان معیاری برای سنجش دقت مدل بکار گرفته شد. این ارزیابی بر روی نمونه‌های از داده‌های انباشت جمعیت، تقاضای آب بخش شرب و تقاضای محصولات دام و طیور، به دلیل دسترس‌پذیری و کیفیت قابل اتکای داده‌ها، تغییرات رفتاری و اثرگذاری متغیرهای در سیستم انجام پذیرفت (David et al., 2024). نتایج حاصل از محاسبه این شاخص نشان می‌دهد که مقدار شاخص RMSPE برای متغیر انباشت جمعیت در بازه زمانی ۱۳۸۳ تا ۱۳۸۶ برابر با ۰/۰۲۹، برای متغیر آب مورد تقاضای بخش شرب در دوره ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۶ برابر با ۰/۰۱۹ و برای تقاضای محصولات دام و طیور بین سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۲ برابر ۰/۰۴ بوده است. ازآنجایی‌که مقادیر به‌دست‌آمده کمتر از آستانه قابل‌قبول ۰/۱ هستند، می‌توان نتیجه گرفت که مدل از دقت مناسبی در بازتولید رفتار واقعی سیستم برخوردار است؛ بنابراین، اعتبار نتایج حاصل از مدل‌سازی باتوجه‌به تطابق رفتار مدل با داده‌های مشاهداتی تأیید می‌شود و مدل توانسته است عملکرد قابل‌قبولی در شبیه‌سازی متغیرهای کلیدی ارائه دهد. این موضوع نشان‌دهنده قابلیت اعتماد به مدل در تحلیل‌های آتی و استفاده از آن در تصمیم‌گیری‌ها می‌باشد.

جمعیت

نمودار تغییرات جمعیت در شکل ۷ نشان داده شده است. میزان جمعیت از ۵۶۴۰۰ نفر در سال ۱۳۸۰ به ۸۵۷۷۰ نفر در سال ۱۴۲۵رسیده، این افزایش حدود ۵۲ درصدی در مدت ۴۵ سال بازگو کننده رشد پیوسته و صعودی جمعیت می باشد.

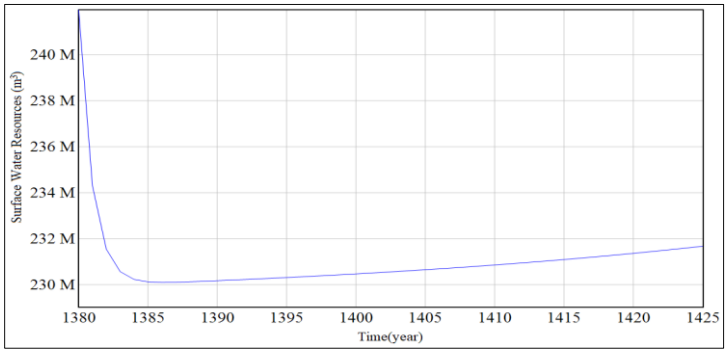


شکل ۷. تغییرات جمعیت در آبخیز سراب صیدعلی

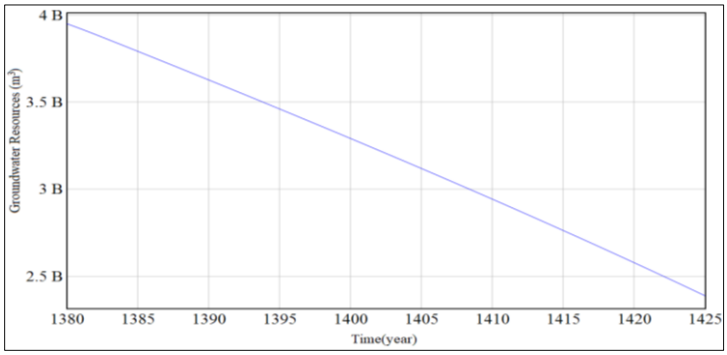
منابع آب

در زیرسیستم منابع آب، تغییرات مربوط به حجم آب سطحی، آب زیرزمینی و شاخص پایداری منابع آب به ترتیب در اشکال ۸ تا ۱۰ ارائه شده‌اند. مدل‌سازی تغییرات حجم آب سطحی در آبخیز سراب صیدعلی بر پایه عوامل مؤثر از جمله بارندگی، بازگشت آب، تبخیر، نفوذ، نیازهای زیست‌محیطی و خروجی از حوزه صورت گرفته است. نتایج حاصل از این مدل نشان می‌دهد که در بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۶، حجم آب سطحی با شیب قابل توجهی کاهش یافته و حدود ۱۲ میلیون مترمکعب

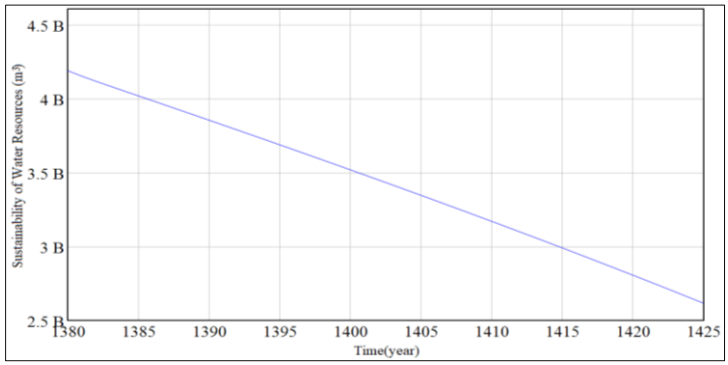
از میزان انباشت آن کاسته شده است. در مقابل، از سال ۱۳۸۷ تا ۱۴۲۵، حجم آب سطحی با افزایش حدود ۱/۶ میلیون مترمکعب همراه خواهد بود. نتایج مدل‌سازی کاهش حجم منابع آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه را طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۲۵ به میزان تقریبی۱/۵۶ میلیارد مترمکعب نشان می‌دهند. این شدت کاهش، بیان کننده وابستگی شدید تقاضای آب به منابع آب زیرزمینی را آشکار می‌سازد. در بخش مربوط به پایداری منابع آب، که مجموع آب سطحی و زیرزمینی را در طول دوره مدل‌سازی در نظر می‌گیرد، کل حجم منابع آب در سال ۱۳۸۰ برابر با ۴/۱۹ میلیارد مترمکعب بوده که در سال ۱۴۲۵ این میزان به ۲/۶۲ میلیارد مترمکعب می‌رسد و کاهش ۱/۵۷ میلیارد مترمکعبی را در طول دوره مدل‌سازی نشان می‌دهد. با توجه به اختلاف ۱۰ میلیون مترمکعبی میان حجم کل منابع آب و آب زیرزمینی بهره‌برداری شده، می‌توان نتیجه گرفت که پایداری منابع آب در حوزه آبخیز سراب صیدعلی تا حد زیادی به منابع آب زیرزمینی وابسته است.



شکل ۸. تغییرات حجم آب سطحی آبخیز سراب صیدعلی



شکل ۹. تغییرات حجم آب زیرزمینی آبخیز سراب صیدعلی



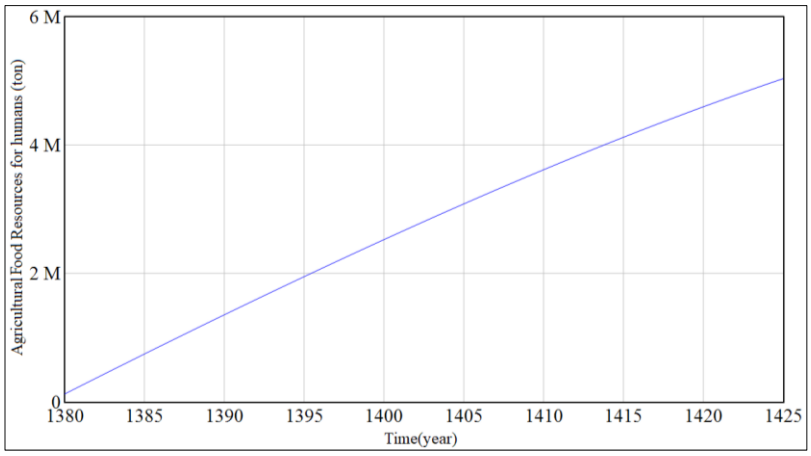
شکل ۱۰. پایداری منابع آب در آبخیز سراب صیدعلی

زیرسیستم غذا

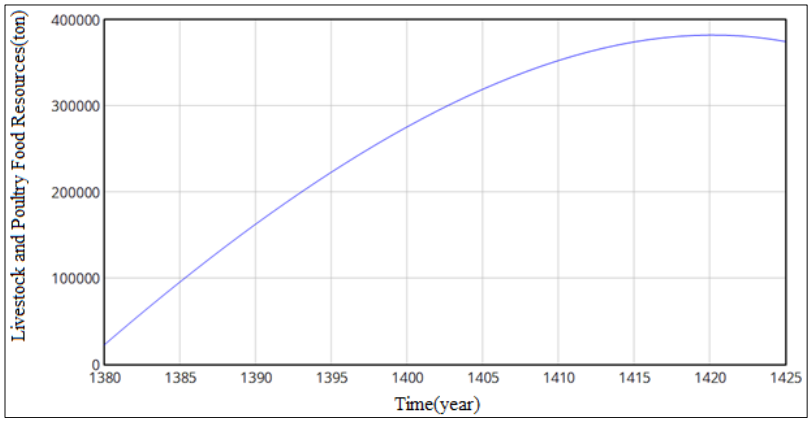
در اشکال ۱۱ تا ۱۴، انباشت غذا با منبع کشاورزی، دام و طیور، شیلات و انباشت غذا با منبع کشاورزی برای دام و طیور

نمایش داده شده‌اند. بررسی انباشت غذا با منبع کشاورزی در آبخیز سراب صیدعلی، بر پایه شاخص عرضه و تقاضای محصولات کشاورزی برای انسان طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۲۵، نشان می‌دهد که مجموع انباشت این منبع غذایی به حدود ۵ میلیون تن می‌رسد. منابع غذایی دام و طیور، شامل فرآورده‌های پروتئینی نظیر گوشت قرمز، مرغ، تخم‌مرغ و لبنیات، تا سال ۱۴۲۰ روندی افزایشی داشته و به بیش از ۳۸۱ هزار تن خواهد رسید. اما پس از سال ۱۴۲۰، با شیبی بسیار ملایم کاهش یافته و ذخایر این بخش رو به افول گذاشته‌اند. در حوزه محصولات شیلاتی، نتایج حاکی از آن است که از سال ۱۳۸۰ تا ۱۴۲۰، انباشت این منابع به ۱۳۷۵۰ تن افزایش یافته است. با این حال، پس از سال ۱۴۲۰، رشد متوقف شده و وضعیت نسبتاً با ثباتی را تجربه خواهد کرد. منابع غذایی کشاورزی برای دام و طیور، در بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۲۵، روندی نزولی داشته‌اند.

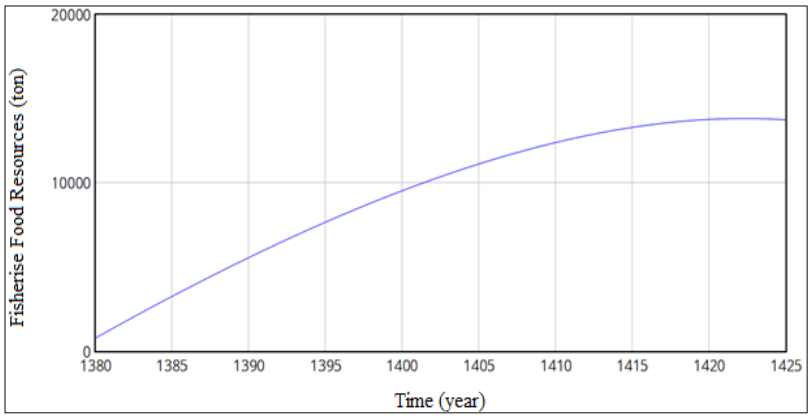
ثبت مقادیر منفی در این بخش نشان‌دهنده کمبود نهاده‌های مورد نیاز به میزان ۴٫۹ میلیون تن است، که تامین این میزان نهاده دامی به شکل واردات از سایر مناطق یا حوزه‌ها دیگر امری ضروری است. در نهایت، ارزیابی پایداری منابع غذایی با در نظر گرفتن مجموع انباشت در چهار بخش یادشده، با توجه به شکل ۱۵ نشان می‌دهد که در سال ۱۳۸۰ ذخیره غذا برابر با ۲۱۹ هزار تن بوده، که این مقدار از سال ۱۳۸۰ تا ۱۴۱۰، روند روبه رشدی داشته به صورتی که عرضه مواد غذایی تا سال ۱۴۱۰ به میزان ۷۱۵ هزار تن از تقاضا پیشی گرفته است. از سال ۱۴۱۰ تا ۱۴۲۵، روند مذکور معکوس شده، به‌گونه‌ای که میزان پایداری منابع غذایی در سال ۱۴۲۵ به ۴۸۵ هزار تن رسیده، این مقدار نشان‌دهنده کاهش ۲۳۰ هزار تنی انباشت غذا نسبت به مقدار حداکثر برآورد شده در سال ۱۴۱۰ بوده و بیانگر افت پایداری منابع غذایی پس از این دوره است. اما در حالت کلی و در دوره زمانی ۴۵ ساله، یعنی از سال ۱۳۸۰ تا ۱۴۲۵ میزان پایداری غذا روندی افزایشی داشته و مجموعا ۲۶۶ هزار تن به مقدار آن افزوده می‌شود.



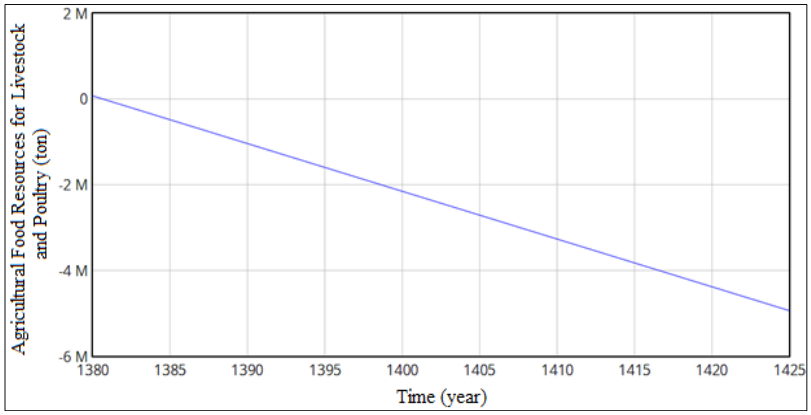
شکل ۱۱. تغییرات انباشت غذا با منبع کشاورزی در آبخیز سراب صیدعلی



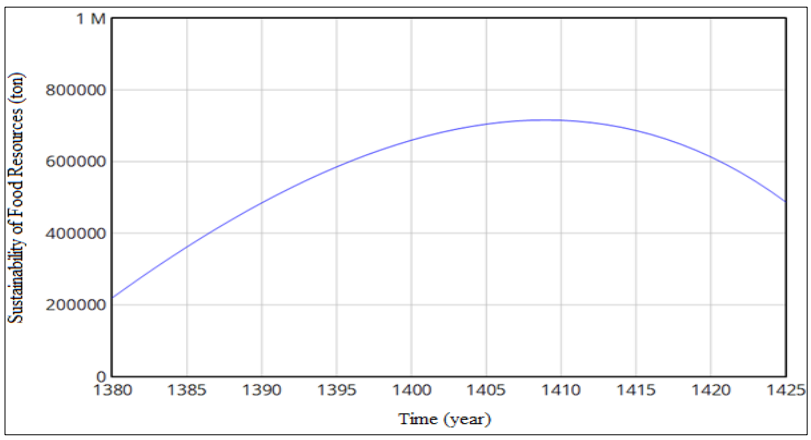
شکل ۱۲. تغییرات انباشت غذا با منبع دام و طیور در آبخیز سراب صیدعلی



شکل ۱۳. تغییرات انباشت غذا با منبع شیلات در آبخیز سراب صیدعلی



شکل ۱۴. تغییرات انباشت غذا با منبع کشاورزی برای دام و طیور در حوزه آبخیز سراب صیدعلی



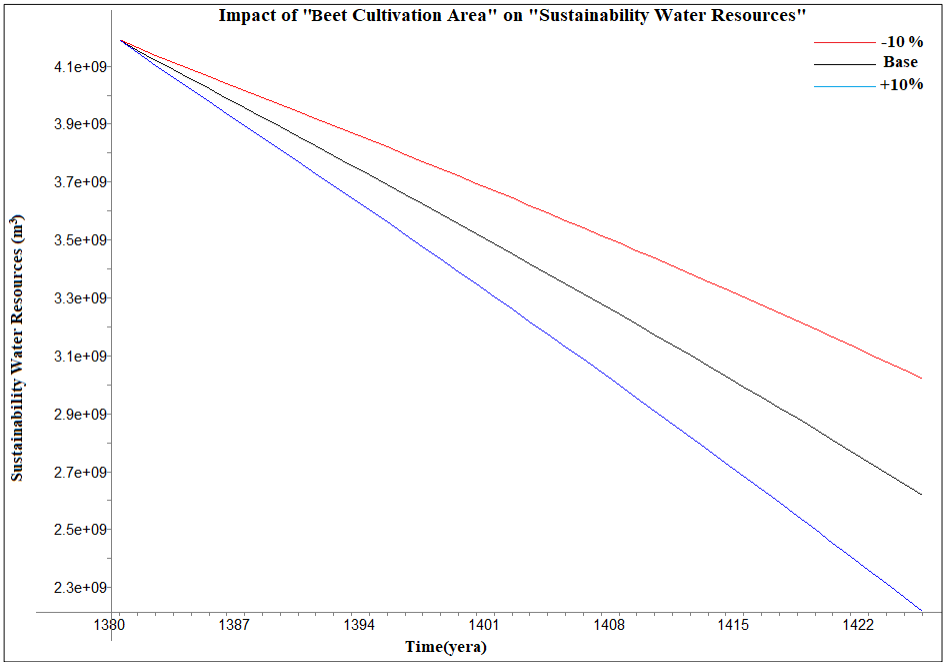
شکل ۱۵. پایداری منابع غذا در آبخیز سراب صیدعلی

تحلیل حساسیت و سناریوسازی

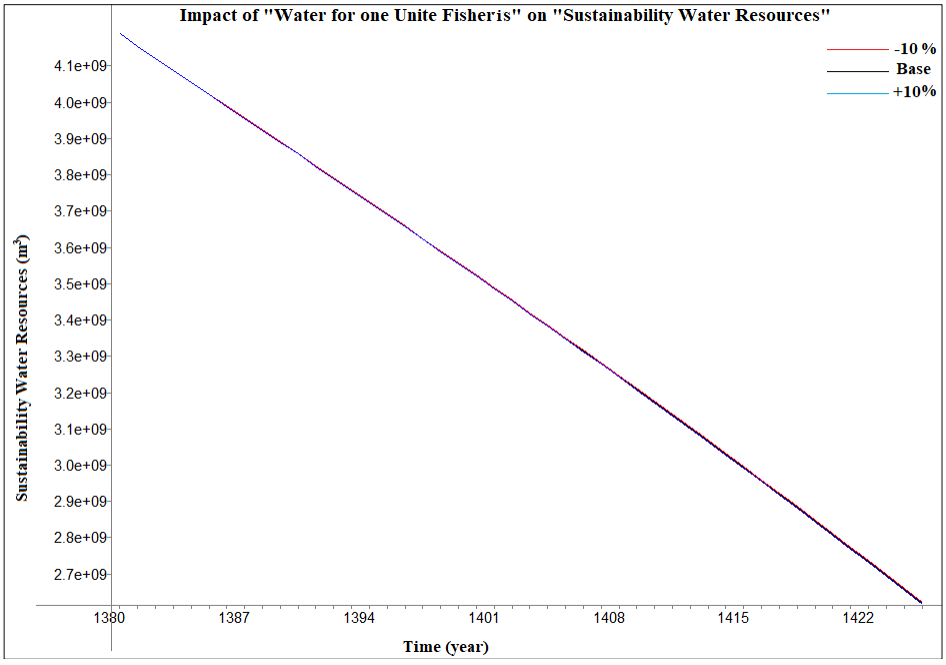
تحلیل حساسیت با اعمال تغییرات ±۱۰ درصدی در مقدار عددی هر متغیر انجام شده است. در این تحلیل، هدف آن است که میزان تأثیر افزایش یا کاهش ۱۰ درصدی هر متغیر بر شاخص‌های پایداری منابع آب و غذا مورد ارزیابی قرار گیرد. این رویکرد امکان شناسایی متغیرهای کلیدی و همچنین عوامل کم‌اهمیت را فراهم می‌سازد که در تصمیم‌گیری‌های آتی نقش مهمی ایفا می‌کنند.

بر اساس نتایج حاصل از تحلیل حساسیت در بخش مربوط به پایداری و امنیت منابع آب که به‌صورت شکل ۱۶ نشان داده شده است، سطح زیر کشت چغندرقند بیشترین تأثیر را بر خروجی‌های مدل دارد. این بدان معناست که تغییر در میزان

کشت این محصول می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بر وضعیت منابع آب تأثیرگذار باشد. در مقابل، میزان مصرف آب برای تولید یک واحد محصول شیلاتی براساس شکل ۱۷ کمترین تأثیر را در مدل از خود نشان داده است، که بیانگر اثر گذاری محدود آن در میزان پایداری منابع آب است.

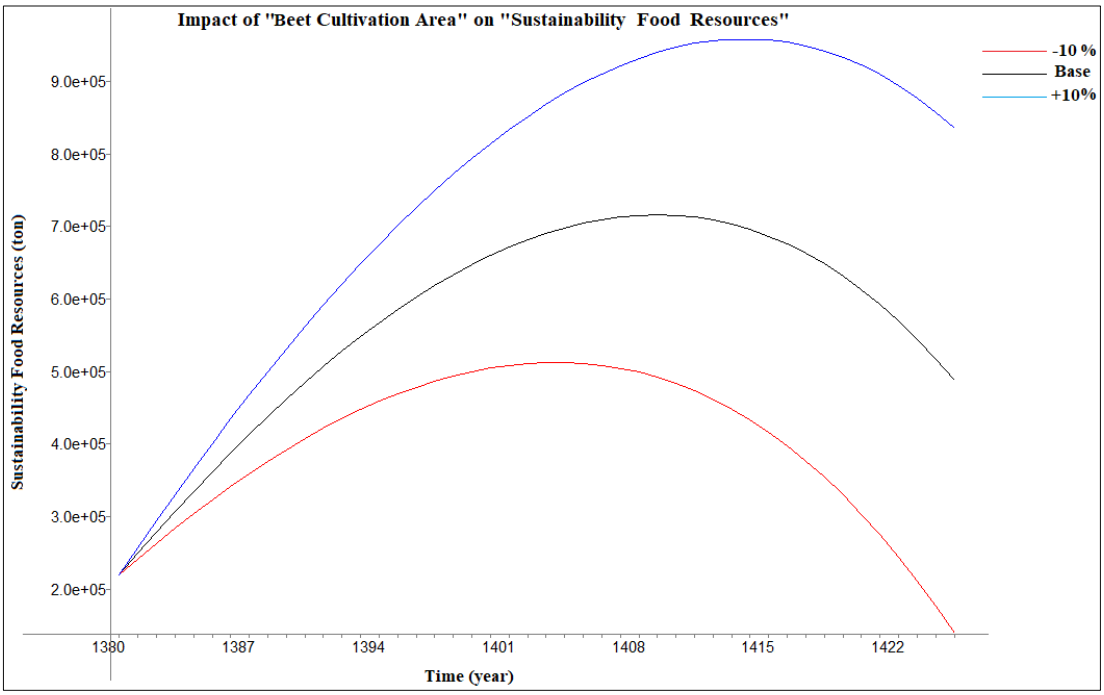


شکل ۱۶. تاثیر سطح زیرکشت چغندر بر پایداری منابع آب آبخیز سراب صیدعلی

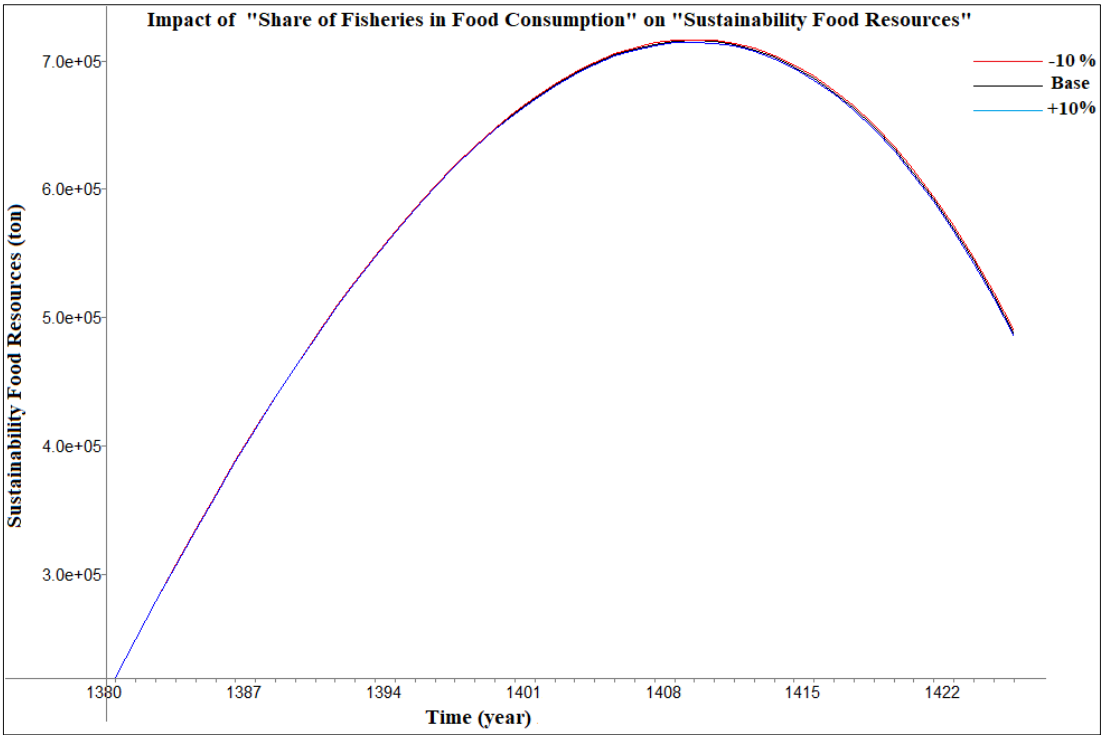


شکل ۱۷. تاثیر مصرف آب برای تولید یک واحد محصول شیلاتی بر پایداری منابع آب آبخیز سراب صیدعلی

در بخش مربوط به پایداری و امنیت غذایی نیز نتایج مشابهی به‌دست‌آمده است. بر اساس شکل ۱۸ سطح زیر کشت چغندر همچنان به‌عنوان مؤثرترین متغیر شناخته می‌شود و تغییرات آن می‌تواند به‌طور مستقیم بر امنیت غذایی تأثیر بگذارد. از سوی دیگر، با توجه به شکل ۱۹ سهم شیلات در بخش غذا کمترین نقش را در تغییرات مدل ایفا می‌کند، که نشان‌دهنده تأثیرگذاری محدود این بخش در سناریوهای مرتبط با پایداری و امنیت غذایی است.



شکل ۱۸. تاثیر سطح زیرکشت چغندر بر پایداری منابع غذا آبخیز سراب صیدعلی



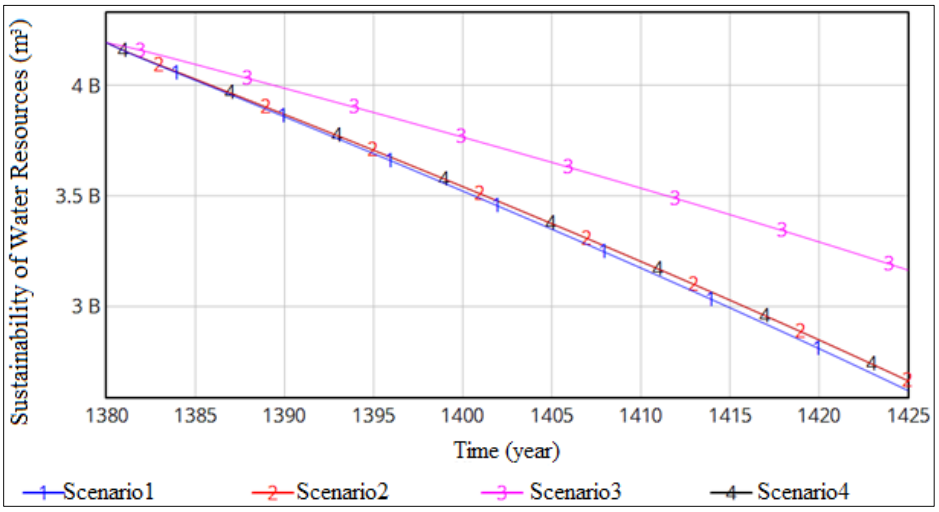
شکل ۱۹. تاثیر سهم شیلات در مصرف غذا بر پایداری منابع غذا آبخیز سراب صیدعلی

در نهایت، باتوجه‌به نتایج حاصل از تحلیل حساسیت و شناسایی نقاط اهرمی در مدل، می‌توان سناریوهای مختلفی را طراحی کرد و سیاست‌های مدیریتی مناسبی را در راستای بهبود پایداری منابع آب و غذا اتخاذ نمود. به‌منظور بررسی و تحلیل تأثیر سیاست‌های مختلف بر همبست آب و غذا، چهار سناریوی متمایز شامل سناریو پایه، تغییر الگوی کشت، توسعه سیستم فاضلاب شهری و صنعتی و مدیریت تعداد دام و طیور در چارچوب مدل‌سازی مطابق با جدول ۱ طراحی و پیاده‌سازی گردید.

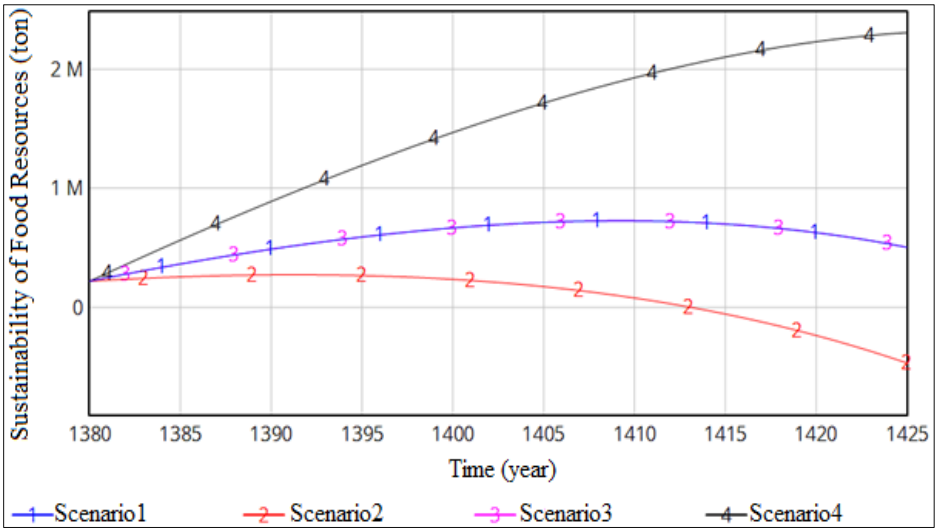
جدول ۱. سناریوهای اعمال شده بر مدل در آبخیز سراب صیدعلی

ردیف	سناریو	توضیحات	تغییرات
۱	پایه	ادامه روند فعلی بدون اعمال سیاست جدید، مبنای مقایسه سایر سناریوها.	حفظ وضع موجود
۲	تغییر الگوی کشت	جایگزینی محصولات پرمصرف با گونه‌های کم‌آب بر	کاهش ۲۵ درصدی سطح کشت چغندر قند و افزایش ۱۵ درصدی سطح کشت گندم آبی و ۱۰ درصدی سطح کشت کلزا
۳	توسعه سیستم فاضلاب شهری و صنعتی	گسترش زیرساخت‌های تصفیه و بازچرخانی فاضلاب برای افزایش منابع آب قابل‌استفاده	افزایش ۸۰ درصدی میزان بازگشت آب با احداث شبکه جمع آوری و تصفیه فاضلاب
۴	مدیریت تعداد دام و طیور	کاهش جمعیت دام و طیور برای کاهش مصرف آب و محصولات کشاورزی	کاهش ۲۵ درصدی محصولات دام و طیور

این سناریوها به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که امکان ارزیابی پیامدهای هر سناریو بر شاخص‌های کلیدی همبست آب و غذا فراهم کرده، و زمینه‌ساز تصمیم‌گیری‌های علمی و عملی بر مدیریت منابع آبخیز را فراهم می‌کنند. اشکال ۲۰ و ۲۱ نتایج حاصل از اعمال سیاست‌ها و سناریوها را نشان می‌دهد.



شکل ۲۰. اثرگذاری چهار سناریو اعمال شده بر پایداری منابع آب در آبخیز سراب صیدعلی



شکل ۲۱. اثرگذاری چهار سناریو اعمال شده بر پایداری منابع غذا در آبخیز سراب صیدعلی

بحث

روند مشاهده شده در نمودار تغییرات جمعیتی، بیانگر افزایش تدریجی و پایدار جمعیت طی دوره ۴۵ ساله است. شیب نسبتاً یکنواخت منحنی و عدم بروز نوسانات شدید در مؤلفه جمعیتی آبخیز سراب صیدعلی، از منظر تحلیل سیستمی نشان می‌دهد که جمعیت پیش‌بینی شده دارای رفتار همگرا است، بدین معنا که سیستم به سمت یک الگوی پایدار، قابل‌کنترل و قابل‌پیش‌بینی حرکت کرده و از بروز رفتارهای واگرا نظیر نوسان‌های دامنه‌دار، رشد انفجاری یا فروپاشی جمعیتی جلوگیری می‌کند. این ویژگی یکی از شاخص‌های مهم امنیت و پایداری منابع محسوب می‌شود، زیرا در مدل‌های همبست آب–قضا انتظار می‌رود درصورتی‌که ظرفیت تأمین منابع حیاتی متناسب با نیاز جمعیت باقی بماند، سیستم به سمت تعادل پویا حرکت کرده و رشد جمعیت ماهیتی کنترل شده، واقع‌بینانه و متناسب با ظرفیت تأمین آب و غذا داشته باشد و از ارائه برآوردهای غیرواقعی جلوگیری شود.

در مجموع، چنین روندی نه‌تنها بازتابی از پویایی سازگار جمعیت با شرایط منطقه‌ای و منابع است، بلکه می‌تواند به‌عنوان معیاری برای ارزیابی عملکرد سیاست‌های توسعه‌ای، سطح تاب‌آوری اجتماعی و وضعیت مدیریت منابع در دوره زمانی مدل‌سازی تلقی شود که امکان برنامه‌ریزی بلندمدت، تصمیم‌سازی آگاهانه و سرمایه‌گذاری هدفمند در حوزه‌های مختلف را فراهم کرده و زمینه جذب تدریجی و پایدار جمعیت در مناطق درحال‌توسعه را برآورده سازد. در دوره شبیه‌سازی ۴۵ ساله، روند تغییرات منابع آب نشان می‌دهد که در سال‌های ابتدایی دوره نوعی تعادل نسبی برقرار بوده و نشانه‌ای از بحران حاد مشاهده نمی‌شود، اما کاهش پیوسته و با شیب ملایم در حجم کل منابع آب، به‌روشنی بیانگر تضعیف تدریجی پایداری و امنیت آبی است. بخش عمده این کاهش پایداری به بهره‌برداری فزاینده از منابع آب زیرزمینی باز می‌گردد. به‌گونه‌ای که حجم آب‌های زیرزمینی از حدود ۳/۹۵ میلیارد مترمکعب در سال ۱۳۸۰ به حدود ۲/۳۸ میلیارد مترمکعب در سال ۱۴۲۵ کاهش‌یافته و افتی نزدیک به ۴۰ درصد را در طول دوره مدل‌سازی نشان می‌دهد.

این روند بیانگر غالب شدن حلقه‌های برداشت و مصرف آب بر سازوکارهای تنظیم طبیعی سامانه هیدرولوژیک به‌ویژه در شرایط خشکسالی و تنش آبی شده، زیرا برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی جایگزین بهره‌برداری از آب‌های سطحی شده است. در چارچوب همبست آب - غذا و تحلیل سیستمی ارتباطات میان متغیرها در آبخیز سراب صیدعلی می‌توان دریافت که این تحولات صرفاً محدود به بعد هیدرولوژیکی نبوده و در بلندمدت پیامدهای اقتصادی و اجتماعی قابل‌توجهی همچون افزایش هزینه انرژی برای پمپاژ آب، کاهش سودآوری فعالیت‌های کشاورزی، تغییر ناگزیر الگوی کشت و در ادامه بروز فشارهای اجتماعی مانند مهاجرت، تنش‌های محلی و افت کیفیت زندگی را به همراه خواهد داشت. بر اساس این تحلیل‌ها می‌توان دریافت که سامانه منابع آبی، هرچند در کوتاه‌مدت پایدار به نظر می‌رسد، اما در صورت مدیریت ضعیف و تداوم استفاده از الگوهای نامناسب مصرف، موجب ناپایداری آبخیز در بلندمدت شده و تمامی جنبه‌های فیزیکی، توسعه‌ای و زیست‌محیطی را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد.

روند تغییرات انباشت منابع غذا در دوره ۴۵ ساله نشان می‌دهد که سیستم تولید و مصرف غذا در آبخیز سراب صیدعلی در ابتدا تحت‌تأثیر حلقه‌های تقویت‌کننده عرضه قرار داشته و از سال ۱۳۸۰ تا سال ۱۴۱۰ قادر است رشد مثبت و روبه‌رشدی را تجربه کند. این وضعیت مطلوب بیانگر ظرفیت بالای منابع محلی در پاسخ‌گویی به نیازهای غذایی جمعیت و دام و طیور منطقه بوده است. بااین‌حال، پس از رسیدن به نقطه اوج، فعال‌شدن حلقه‌های بازدارنده ناشی از محدودیت‌هایی همچون کاهش حجم منابع آب، کمبود نهاده‌های کشاورزی و افزایش تعداد دام و طیور و در نتیجه افزایش تقاضا برای مصرف منابع غذایی، موجب تغییر مسیر سیستم و کاهش پایداری غذا از سال ۱۴۱۰ تا ۱۴۲۵ می‌شود. از منظر پویایی سیستم، این گذار از مرحله رشد به مرحله افت و کاهش پایداری، نشان‌دهنده تغییر جریان تولید نسبت به مصرف و فعال‌شدن حلقه‌های بازدارنده است. این تغییر روند با منطق مدل‌سازی همبست آب –غذا با رویکرد سیستمی به دلیل ارتباطات و تعاملات متقابل مؤلفه‌ها منطبق است.

همچنین از عوامل کلیدی اثرگذار برای افت پایداری منابع غذایی در آبخیز سراب صیدعلی می‌توان به افزایش تعداد دام و طیور و کاهش تولیدات کشاورزی برای دام و طیور اشاره کرد. این کاهش تولیدات کشاورزی به دلیل محدودیت سطح زیر

کشت، کاهش حجم منابع آب و افت بازده آب مصرفی در تولید غذا رخداده است. در نتیجه، تولیدکنندگان ناچار به استفاده از محصولات انسان‌محور مانند گندم و چغندرقند برای تغذیه دام تحت عنوان مصرف متقاطع منابع هستند. چنین جابه‌جایی نه‌تنها فشار مضاعفی بر ذخایر غذایی انسانی وارد می‌کند، بلکه چرخه پایداری غذا را در کل سیستم مختل می‌سازد.

برای مقابله با این روند نزولی و کاهش پایداری منابع غذایی در آبخیز سراب صیدعلی، لازم است که افزایش بهره‌وری آب در مزرعه، اصلاح الگوی کشت بر اساس نیاز آبی محصولات، استفاده از آب‌های غیرمتعارف برای تولید خوراک دام و تجارت هدفمند با رویکرد آب مجازی در اولویت قرار گیرد. همچنین واردات نهاده‌های دامی با نیاز آبی بالا و صادرات محصولات با نیاز آبی در سطح آبخیزها می‌تواند شکاف تأمین خوراک دام و طیور را پوشش داده و فشار بر منابع غذایی انسان‌محور را کاهش دهد.

باتوجه‌به سناریوهای اجرا شده می‌توان دریافت که در سناریو دوم، کاهش سطح زیر کشت چغندرقند و افزایش سطح زیر کشت گندم آبی و کلزا موجب افزایش صرفه‌جویی قابل‌توجهی در مصرف آب به دلیل نیاز آبی کمتر خواهد شد، به‌طوری که تا سال ۱۴۲۵، حدود ۴۴ میلیون مترمکعب آب در سناریو تغییر الگوی کشت نسبت به سناریو پایه صرفه جویی منابع آبی انجام می‌پذیرد. با وجود این دستاورد مهم در بخش منابع آب، کاهش سطح زیرکشت چغندر اثرات منفی بر پایداری منابع غذایی دارد. تا قبل از سال ۱۴۱۳ تولیدات آبخیز در بخش غذا توانسته نیازهای ساکنین را برطرف نمایدَ، اما از سال ۱۴۱۳ به بعد، پایداری غذا وارد محدوده منفی شده و در پایان دوره مدل‌سازی یعنی سال ۱۴۲۵ آبخیز مورد مطالعه با بیش از ۵۰۰ هزار تن کمبود غذا مواجه خواهد شد، به طوریکه تولیدات بخش غذا نمی تواند نیازهای غذایی ساکنین و اهالی را برطرف نماید، که این امر مبین تهدید جدی امنیت غذایی در آبخیز سراب صیدعلی است، که رفاه نسبی ساکنین حوزه را کاهش خواهد داد.

باتوجه‌به فقدان شبکه جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب در دو شهر الشتر و فیروزآباد، و تأکید سناریو سوم بر ایجاد زیرساخت‌های لازم برای تصفیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی اجرای این سیاست منجر به افزایش چشمگیر حجم آب برگشتی تا ۸۰ درصد در بخش شهری و صنعتی خواهد شد. باتوجه‌به اینکه در سال ۱۴۲۵ در این سناریو حجم منابع آب به ۳/۱۶ میلیارد مترمکعب می‌رسد و در سناریو پایه این رقم در سال ۱۴۲۵ برابر با ۲/۶۲ میلیارد مترمکعب است، با مقایسه این دو سناریو می‌توان دریافت که در سناریو سوم کاهش برداشت منابع آبی کاملاً محسوس بوده و صرفه‌جویی ۵۴۰ میلیون مترمکعبی را به همراه خواهد داشت. لازم به ذکر است که حجم آب برگشتی در جهت مصارف کشاورزی، زمینه‌ساز توسعه پایدار کشاورزی، بهبود مدیریت منابع آب و ارتقای شاخص‌های اقتصادی از طریق ایجاد اشتغال در منطقه خواهد شد.

تدوین سناریو چهارم در راستای ارتقای پایداری غذا به‌صورت کاهش تولید محصولات دام و طیور به دلیل نقش مستقیم این گروه تولیدی در مصرف نهاده‌های دامی، می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر میزان منابع آبی و غذا داشته باشد. برآوردها نشان می‌دهد که این سناریو، صرفه‌جویی حدود ۴۰ میلیون مترمکعبی حجم آب را در طول دوره مدل‌سازی نسبت به سناریو پایه به همراه خواهد داشت. از منظر امنیت غذایی نیز، مقایسه این سناریو با سناریو پایه نشان می‌دهد که در سال ۱۴۲۵، میزان انباشت و ذخیره مواد غذایی در سناریو پایه برابر با ۴۸۵ هزار تن در سال ۱۴۲۵ بوده، اما در سناریو چهارم این میزان به عدد ۲/۳ میلیون تن در سال ۱۴۲۵ رسیده، که این جهش چشمگیر، اهمیت مدیریت دام و طیور در بهبود ذخایر و پایداری منابع غذا در منطقه نشان می‌دهد.

باتوجه‌به سه سناریوی پیشنهادی (سناریوهای دوم، سوم و چهارم) و مقایسه نتایج آن‌ها با مدل پایه (سناریو اول)، مشخص می‌شود که سناریوی سوم مؤثرترین گزینه در زمینه پایداری منابع آب محسوب می‌شود، چرا که حجم منابع آب در این سناریو از سال ۱۳۸۰ از ۴/۱۹ میلیارد مترمکعب به ۳/۱۶ میلیارد مترمکعب در سال ۱۴۲۵ رسیده و کمترین کاهش حجم منابع آبی برابر با ۱/۰۳ میلیارد مترمکعبی را نسبت به سایر سناریوها به دلیل بهره‌برداری کمتر از منابع آب با بکارگیری بازچرخانی و تصفیه آب از خود نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان دریافت که این سناریو در مدیریت پایدار آب نسبت به دیگر سناریوها از عملکرد بهتری برخوردار می‌باشد.

در بخش غذا نیز یافته‌ها نشان می‌دهد که سناریوی چهارم بیشترین اثرگذاری را در ارتقای پایداری منابع غذا دارد. در این سناریو میزان ذخیره غذا از ۲۱۹ هزار تن در سال ۱۳۸۰ به ۲/۳ میلیون تن تا سال ۱۴۲۵ افزایش یافته است. این رشد ۲/۰۸ میلیون تنی، بیانگر ارتقای کارآیی زنجیره غذایی و توانمندی سناریوی چهارم در بهبود وضعیت امنیت و پایداری غذا و افزایش حجم ذخایر غذا به شمار می‌رود.

باتوجه‌به نتایج هر سناریو می‌توان دریافت که یک سناریوی منفرد نمی‌تواند به‌تنهایی پایداری سیستم آب–غذا را تضمین کند، زیرا هر سناریو تنها بخشی از پیچیدگی‌های این سیستم را پوشش می‌دهد و در برابر عدم قطعیت‌های محیطی و اجتماعی همچنان آسیب‌پذیر باقی می‌ماند. در همین راستا، سناریوی سوم اگرچه با تمرکز بر کاهش فشار بر منابع آب توانست بخشی از مشکلات کم‌آبی را تعدیل کند، اما به دلیل عدم تقویت کافی ذخایر غذایی همچنان شکننده باقی می‌ماند. ازسوی‌دیگر، سناریوی چهارم با افزایش ذخایر غذایی توانسته امنیت غذایی را بهبود بخشد، بااین‌حال در نبود مدیریت مؤثر بخش آب، فشار بر منابع آبی همچنان بالا خواهد بود؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب سناریوی سوم و چهارم الگویی کارآمد برای مدیریت یکپارچه آب و غذا فراهم می‌آورد، الگویی که نه‌تنها به تاب‌آوری بلندمدت آبخیز کمک می‌کند، بلکه با ایجاد هم‌افزایی میان کاهش فشار بر منابع آب و افزایش ذخایر غذایی، موجب بهینه‌شدن چرخه‌های تولید و مصرف و در نهایت کاهش ریسک‌های ناشی از کم‌آبی و ناامنی غذایی می‌شود.

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که بهره‌گیری از مدل‌سازی به روش پویایی سیستم می‌تواند نقش مؤثری در فهم بهتر مدیریت عرضه و تقاضای آب و غذا از طریق ایجاد روابط غیرخطی و بازخوردهای متقابل میان اجزا سیستم ایفا کند، موضوعی که با مطالعات انجام‌شده توسط (Yu et al., 2025; Li et al., 2024; Susnik et al., 2022; Keyhanpour et al., 2021; De Vito et al., 2019) هم راستا است. افزون بر این، نتایج تحقیق حاضر با پژوهش‌های (Pagano et al., 2025; Hofmann et al., 2024; De Vito et al., 2019) نیز همخوانی دارد، چرا که پایداری منابع غذایی و جمعیت را به طور مستقیم وابسته به پایداری منابع آبی می‌داند که کاهش در پایداری منابع آب منجر به افت تولید غذا می‌شود و این افت، امنیت غذایی را تهدید کرده و در نهایت تاب‌آوری جمعیت را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. همچنین، بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، طراحی سناریو و اعمال سیاست‌ها به‌صورت سناریوهای ترکیبی هم‌افزایی میان سیستم آب و غذا و چرخه‌های تولید و مصرف را بهینه کرده و ریسک‌های ناشی از کم‌آبی و ناامنی غذایی را کاهش داده و پایداری منابع آب و غذا را تقویت می‌کنند، امری که با مطالعات (Hofmann et al., 2024; Keyhanpour et al., 2021; De Vito et al., 2019) نیز مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

در فرایند برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری جامع برای مدیریت آبخیزها، پیچیدگی‌های متعدد و درهم‌تنیده‌ای وجود دارد که نیازمند شناخت دقیق، عمیق و علمی از مسائل و چالش‌های موجود در این حوزه‌هاست. بدون چنین شناختی، نه‌تنها امکان حل مشکلات فعلی فراهم نمی‌شود، بلکه استفاده نادرست از منابع و امکانات می‌تواند منجر به بروز بحران‌های جدید و اساسی در ابعاد مختلف اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی گردد.

پژوهش حاضر با هدف تحلیل و توسعه یک مدل پویا برای مدیریت منابع آبخیز سراب صیدعلی انجام شده است. این مدل بر پایه تعاملات میان عرضه و تقاضا طراحی شده و تلاش دارد رفتار سیستم را در مواجهه با تغییرات جمعیتی، مصرف منابع و فشارهای محیطی شبیه‌سازی کند. نتایج تحقیق بیان می‌دارد که پایداری منابع آب طی دوره زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۲۵ با کاهش ۳۷/۵ درصدی همراه بوده است، درحالی‌که پایداری غذا در همین بازه زمانی با افزایش ۱۲۱/۵ درصدی مواجه شده است. همچنین بررسی چهار سناریوی اعمال‌شده در مدل شامل سناریوی پایه، تغییر الگوی کشت، توسعه سیستم فاضلاب شهری و صنعتی و مدیریت تعداد دام و طیور بیانگر آن است که توسعه سیستم فاضلاب شهری و صنعتی موجب کاهش ۲۴/۵ درصدی پایداری در بخش منابع آب و مدیریت تعداد دام و طیور با افزایش ۹۵۰/۲ درصدی پایداری در بخش غذا نسبت به سایر سناریوها بیشترین تأثیر مثبت را بر ارتقای پایداری در دوره زمانی ۴۵ساله دارند؛ بنابراین، می‌توان با بهره‌گیری

از ترکیب سناریوهای متنوع، چارچوبی کارآمد برای مدیریت هم‌زمان آب و غذا تعریف کرد که به واسطه آن فشارهای ناشی از رشد جمعیت، بهره‌برداری از منابع آبی و مصرف غذا که منجر به افزایش هزینه‌های اقتصادی، بروز تنش‌های اجتماعی و تخریب اکوسیستم‌ها می‌شود را کاهش داده، و تاب‌آوری آبخیز را از طریق هم‌افزایی میان مؤلفه‌های تأثیرگذار تقویت نمود.

دراین‌رابطه پژوهش‌های (Yu et al., 2025; Li et al., 2024; Susnik et al., 2022; Keyhanpour et al., 2021; De Vito et al., 2019) بیان می‌کنند که مدل‌سازی عرضه و تقاضای منابع آب و غذا با روش پویایی سیستم می‌تواند نقش مؤثری در مدیریت منابع ایفا کند، تحقیقاتی که با پژوهش حاضر مطابقت دارد. همچنین طراحی و اعمال سناریوها می‌توان پایداری منابع آب و غذا را ارتقا بخشد، امری که با مطالعات (Pagano et al., 2025; Hofmann et al., 2024; De Vito et al., 2019) در این تحقیق همخوانی دارد؛ بنابراین اتخاذ راهکارهای سیستمی و کاربردی در چارچوب سیاست‌های پایداری همچون اصلاح الگوی مصرف، تنوع‌بخشی به منابع، مدیریت و بازچرخانی آب، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین و مدیریت ریسک امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است.

منابع

اصلانی، مصطفی؛ منعم، محمدجواد؛ باقری، علی (۱۴۰۲). توسعه مدل مفهومی پیوند آب، غذا و انرژی (Nexus) در مدیریت آب در شبکه‌های آبیاری با استفاده از رویکرد پویایی سیستم‌ها. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز. ۱۴ (۲۸)، ۱۶-۳۶. https://doi.org/10.61186/jwmr.14.28.16

جعفری، سمن‌ناز (۱۳۹۶). *مدلسازی پویایی سیستم آب-غذا در مقیاس حوضه آبخیز*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه تهران.

شاهدی، کاکا؛ کیانی، آرمان؛ بیاتی، فرشته (۱۴۰۲). ارزیابی پایداری آبخیز سراب صیدعلی شهرستان سلسله. *جغرافیا و پایداری محیط*، ۱۳ (۲)، ۳۹-۵۷. https://doi.org/10.22126/ges.2023.8473.2599

شرکت مهندسین مشاور جاماب (۱۳۹۸). *گزارش مدیریت یکپارچه بهره برداری و کنترل برداشت منابع آب استان لرستان*. تهران.

هاشمی، سیده فاطمه؛ شاهنظری، علی؛ رایینی، محمود؛ شهبازبگیان، محمدرضا؛ اداموسکی، یان (۱۴۰۰). تعیین الگوی کشت بهینه در حوضه آبریز تجن با استفاده از مدل‌سازی سیستمی. *پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز*، ۱۲ (۲۳)، ۱۵۵-۱۶۸. https://doi.org/10.52547/jwmr.12.23.155

References

Alexandratos, N., & Bruinsma, J. (2012). *World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision.* https://ageconsearch.umn.edu/record/288998/

Aslani, M., Monem, M. J., & Bagheri, A. (2023). Development of the Conceptual Model for Water, Food and Energy Chain (Nexus) in Water Management in Irrigation Networks using Systems Dynamics Approach. *Journal of Watershed Management Research*, *14*(28), 16-36. https://doi.org/10.61186/jwmr.14.28.16. (In Persian).

Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *System Dynamics Review: The Journal of the System Dynamics Society*, *12*(3), 183-210. https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1727(199623)12:3%3C183::AID-SDR103%3E3.0.CO;2-4

Beltran-Pena, A., Rosa, L., & D'Odorico, P. (2020). Global food self-sufficiency in the 21st century under sustainable intensification of agriculture. *Environmental Research Letters*, *15*(9), 095004. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9388

Bieber, N., Ker, J. H., Wang, X., Triantafyllidis, C., van Dam, K. H., Koppelaar, R. H., & Shah, N. (2018). Sustainable planning of the energy-water-food nexus using decision making tools. *Energy Policy*, *113*, 584-607. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.11.037

Chang, H., Zhao, Y., Cao, Y., He, G., Wang, Q., Liu, R., ... & Li, W. (2025). Evaluating Sustainability of Water–Energy–Food–Ecosystems Nexus in Water-Scarce Regions via Coupled Simulation Model. *Agriculture*, *15*(12), 1271. https://doi.org/10.3390/agriculture15121271

Chen, Y., & Chen, W. (2020). Simulation study on the different policies of Jiangsu Province for a dynamic balance of water resources under the water–energy–food nexus. *Water*, *12*(6), 1666.

https://doi.org/10.3390/w12061666

Dargin, J., Daher, B., & Mohtar, R. H. (2019). Complexity versus simplicity in water energy food nexus (WEF) assessment tools. *Science of the Total Environment*, *650*, 1566-1575. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.080

David, L. O., Aigbavboa, C., Nwulu, N., & Adepoju, O. O. (2024). Validation of Sustainable Project Delivery Framework for WEF Nexus. In *Sustainable Synergy: A Digital Framework for the Water-Energy-Food Nexus Project Delivery in Developing Economies* (pp. 375-400). Cham: Springer Nature Switzerland. https://www.doi.org/10.1007/978-3-031-72833-4_11

De Vito, R., Pagano, A., Portoghese, I., Giordano, R., Vurro, M., & Fratino, U. (2019). Integrated approach for supporting sustainable water resources management of irrigation based on the WEFN framework. *Water Resources Management*, *33*(4), 1281-1295. https://doi.org/10.1007/s11269-019-2196-5

De Vito, R., Portoghese, I., Pagano, A., Fratino, U., & Vurro, M. (2017). An index-based approach for the sustainability assessment of irrigation practice based on the water-energy-food nexus framework. *Advances in Water Resources*, *110*, 423-436. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.10.027

Endo, A., Yamada, M., Miyashita, Y., Sugimoto, R., Ishii, A., Nishijima, J., ... & Qi, J. (2020). Dynamics of water–energy–food nexus methodology, methods, and tools. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, *13*, 46-60. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2019.10.004

Farmandeh, E., Choobchian, S., & Karami, S. (2024). Conducting water-energy-food nexus studies: what, why, and how. *Scientific Reports*, *14*(1), 27310. https://doi.org/10.2166/ws.2023.281

Feng, M., Liu, P., Li, Z., Zhang, J., Liu, D., & Xiong, L. (2016). Modeling the nexus across water supply, power generation and environment systems using the system dynamics approach: Hehuang Region, China. *Journal of Hydrology*, *543*, 344-359. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.10.011

Forrester, J. W. (1961). *Industrial dynamics mit press cambridge.* MA. http://www.laprospective.fr/dyn/francais/memoire/autres_textes_de_la_prospective/autres_ouvrages_numerises/industrial-dynamics-forrester-1961.pdf

Forrester, J. W., & Senge, PM. (1979). *Tests for building confdence in system dynamics models.* TIMS Stud Manag Sci 14(1980):209–228. http://www.laprospective.fr/dyn/francais/memoire/autres_textes_de_la_prospective/autres_ouvrages_numerises/Tests_for_building_confdence_in-system-dynamics_models-1961.pdf

Hashemi, S., Shahnazari, A., Rayeni, M., Shahbazbegian, M., & Adamowski, A. (2021). Evaluation of Optimal Cropping Pattern in Tajan Watershed with Systematic Modeling. *Journal of Watershed Management Research*, *12*(23), 155-168. https://doi.org/10.52547/jwmr.12.23.155. (In Persian).

Hoff, H. (2011*). Understanding the nexus. background paper for the bonn2011 nexus conference: the water, energy and food security nexus.* https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.104065

Hofmann, V. S., Egieya, J. M., Parker, Y., Gorgens, J., & Goosen, N. J. (2024). Impact of resilience policies on cape town's water-food nexus: A system dynamics approach. *Bulletin of the National Research Centre*, *48*(1), 102. https://doi.org/10.1186/s42269-024-01255-6

Hua, E., Han, X., Engel, B. A., Guan, J., Sun, S., Wu, P., ... & Wang, Y. (2024). Developing a sustainable assessment framework for identifying industrial water suitability: Perspective on the water-energy-food nexus. *Agricultural Systems*, *220*, 104065. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.104065

Hurtado, A. R., Mesa-Pérez, E., & Berbel, J. (2024). Systems Modeling of the Water-Energy-Food-Ecosystems Nexus: Insights from a Region Facing Structural Water Scarcity in Southern Spain. *Environmental Management*, *74*(6), 1045-1062. https://doi.org/10.1007/s00267-024-02037-6

Jack, C., Van Aardenne, L., Wolski, P., Pinto, I., Quagraine, K., & Kloppers, P. (2022). *SmartAgri: updated climate change trends and projections for the Western Cape*. Climate System Analysis Group (CSAG), Environmental and Geographical Science, University of Cape Town Climate Change and Air Emissions Impact Assessment for Exploration Drilling and

Associated Activities in Block DWOB Off the West. https://www.elsenburg.com/books/smartagri-updated-climate-change-trends-and-projections-for-the-western-cape/

Jafari, S. (2017). Basin Scale System Dynamics Modeling of Water-Food Nexus. Master Thesis, Civil Engineering, University of Tehran. (In Persian).

Jamab Consulting Engineers. (2019). *Integrated management report on exploitation and withdrawal control of water resources in Lorestan Province*. Tehran, Iran. (In Persian).

Kellner, E. (2023). Identifying leverage points for shifting Water-Energy-Food nexus cases towards sustainability through the Networks of Action Situations approach combined with systems thinking. *Sustainability Science*, *18*(1), 135-152. https://doi.org/10.1007/s11625-022-01170-7

Keyhanpour, M. J., Jahromi, S. H. M., & Ebrahimi, H. (2021). System dynamics model of sustainable water resources management using the Nexus Water-Food-Energy approach. *Ain Shams Engineering Journal*, *12*(2), 1267-1281. https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.07.029

Li, W., Liang, Y., Liu, L., He, Q., Huang, J., & Yin, Z. (2024). Spatio-temporal impacts of land use change on water-energy-food nexus carbon emissions in China, 2011–2020. *Environmental Impact Assessment Review*, *105*, 107436. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107436

Liu, H., Wang, S., He, H., Tan, L., & Chan, A. P. (2022). Nip risk in the bud: A system dynamic model to govern NIMBY conflict. *Environmental Impact Assessment Review*, *97*, 106916. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106916

Lu, Z., Li, Y., & Li, W. (2025). To uncover economic losses and mitigation benefits of agricultural water scarcity by considering water availability, quality, and efficiency in China's largest dryland River Basin. *Environmental Impact Assessment Review*, *114*, 107924. https://doi.org/10.1016/j.eiar. 2025.107924

Luo, L., Xing, Z., Chu, B., Zhang, H., & Wang, H. (2024). Virtual land trade and associated risks to food security in China. *Environmental Impact Assessment Review*, *106*, 107461. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107461

Meadows, D. (2008). *Thinking in systems: International bestseller*. Chelsea Green Publishing. https://research.fit.edu/media/site-specific/researchfitedu/coast-climate-adaptation-] library/climate-communications/psychology-amp-behavior/Meadows-2008.-Thinking-in-Systems.pdf

Most, T. (2024). Variance-based sensitivity analysis in the presence of correlated input variables. *arXiv preprint arXiv:2408.04933*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.04933

Naidoo, D., Nhamo, L., Mpandeli, S., Sobratee, N., Senzanje, A., Liphadzi, S., ... & Mabhaudhi, T. (2021). Operationalising the water-energy-food nexus through the theory of change. *Renewable and sustainable energy reviews*, *149*, 111416. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111416

Ndlela, T. J. (2024). *Assessing water-energy nexus dynamics for sustainable resource management in Cape Town: A system dynamics approach.* Doctoral dissertation, Stellenbosch University.

Pagano, A., Coletta, V. R., Portoghese, I., Panagopoulos, A., Pisinaras, V., Chatzi, A., ... & Giordano, R. (2025). On the use of Participatory System Dynamics Modelling for WEF Nexus management: Hints from two case studies in the Mediterranean region. *Environmental Impact Assessment Review*, *115*, 108012. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2025.108012

Pena-Torres, D., Boix, M., & Montastruc, L. (2024). Multi-objective optimization and demand variation analysis on a water energy food nexus system. *Computers & Chemical Engineering*, *180*, 108473. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108473

Purwanto, A., Sušnik, J., Suryadi, F. X., & de Fraiture, C. (2019). Using group model building to develop a causal loop mapping of the water-energy-food security nexus in Karawang Regency, Indonesia. *Journal of Cleaner Production*, *240*, 118170. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118170

Rai, P. K. (2023). Role of water-energy-food nexus in environmental management and climate action. *Energy Nexus*, *11*, 100230. https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100230

Rosegrant, M. W., Ringler, C., & Zhu, T. (2009). Water for agriculture: maintaining food security under growing scarcity. *Annual review of Environment and resources*, *34*(1), 205-222. https://doi.org/10.1146/annurev.environ.030308.090351

Scanlon, B. R., Ruddell, B. L., Reed, P. M., Hook, R. I., Zheng, C., Tidwell, V. C., & Siebert, S. (2017). The food-energy-water nexus: Transforming science for society. *Water Resources Research*, *53*(5), 3550-3556. https://doi.org/10.1002/2017WR020889

Schneider, P., Avellan, T., & Le Hung, A. (2019). Water-energy-food nexus and sustainability. In *Encyclopedia of sustainability in higher education* (pp. 1-14). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-63951-2_474-1

Shahedi, K., Kiani, A., & Bayati, F. (2023). Evaluation of Sustainability in Sarab Seydali Watershed, Selseleh City. *Geography and Environmental Sustainability*, *13*(2), 39-57. https://doi.org/10.22126/ges.2023.8473.2599. (In Persian).

Shubbar, H. T., Tahir, F., & Al-Ansari, T. (2024). Bridging Qatar's food demand and self-sufficiency: A system dynamics simulation of the energy–water–food nexus. *Sustainable Production and Consumption*, *46*, 382-399. https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.02.017

Susnik, J., & Staddon, C. (2022). Evaluation of water-energy-food (WEF) nexus research: perspectives, challenges, and directions for future research. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, *58*(6), 1189-1198. https://doi.org/10.1111/1752-1688.12977

Susnik, J., Vamvakeridou-Lyroudia, L. S., Savić, D. A., & Kapelan, Z. (2012). Integrated System Dynamics Modelling for water scarcity assessment: Case study of the Kairouan region. *Science of The Total Environment*, *440*, 290-306. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.05.085

Voulvoulis, N. (2018). Water reuse from a circular economy perspective and potential risks from an unregulated approach. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, *2*, 32-45. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.01.005

Weitz, N., Strambo, C., Kemp-Benedict, E., & Nilsson, M. (2017). Closing the governance gaps in the water-energy-food nexus: Insights from integrative governance. *Global Environmental Change*, *45*, 165-173. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.06.006

Yu, B., Liu, X., Bi, X., Sun, H., & Buysse, J. (2025). Agricultural resource management strategies for greenhouse gas mitigation: The land-energy-food-waste nexus based on system dynamics model. *Environmental Impact Assessment Review*, *110*, 107647. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107647

Zahedi, R., Sadeghitabar, E., Khazaee, M., Faryadras, R., & Ahmadi, A. (2025). Potentiometry of wind, solar and geothermal energy resources and their future perspectives in Iran. *Environment, Development and Sustainability*, *27*(7), 15311-15337. https://doi.org/10.1007/s10668-024 04633-2