



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی

پژوهش‌های آب‌بخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی

مدل‌سازی پایداری آب، انرژی و غذا بر پایه رویکرد پویایی سامانه در آبخیز سراب صیدعلی استان لرستان

آرمان کیانی^۱، کاکا شاهی^{۲*}، محمود حبیب‌نژادروشن^۳، علی حقی‌زاده^۴

۱- دانشجوی دکتری گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۲ و ۳- استاد گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۴- استاد گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

آب، انرژی و غذا اساس توسعه پایدار جوامع هستند، و به شکل جدایی‌ناپذیر و درهم‌تنیده با یکدیگر مرتبط هستند، به گونه‌ای که تغییر در هر یک از آن‌ها سبب پیامدهای مستقیم و غیرمستقیمی بر دیگری است. هدف این پژوهش، ارائه و توسعه یک رویکرد روش‌شناختی نوین بود که بتوان به طور کارآمد از فرآیند تصمیم‌سازی و سیاست‌گذاری در عرضه و تقاضای منابع یک آبخیز پشتیبانی کرد و پایداری آب، انرژی و غذا بر پایه رویکرد پویایی سامانه در قالب سناریوهای مختلف را به طور کمی مدل‌سازی کرد. از ساختار این چارچوب می‌توان به عنوان ابزار مفیدی در بهبود سیاست‌گذاری و ارتقای سطح پایداری آبخیزها بهره برد و چشم‌اندازهای کارآمدتری را در مدیریت منابع فراهم آورد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، یک چارچوب کمی و یکپارچه مبتنی بر پویایی سامانه با در نظر گرفتن تعاملات عرضه و تقاضا منابع با رویکرد همبست آب-انرژی-غذا در آبخیز سراب صیدعلی، توسعه و مدل‌سازی شد. از آنجایی که مدل‌سازی دقیق و قابل اطمینان پویایی‌شناسی سامانه برای ارزیابی پایداری منابع نیازمند پایگاه داده‌ای جامع و شفاف است، داده‌های لازم از مراجع رسمی و معتبر ملی گردآوری شد. به منظور مدل‌سازی و اعتبارسنجی مدل در منطقه مطالعه‌شده، از داده‌های تاریخی ثبت‌شده سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲ به عنوان ورودی به نرم‌افزار Vensim استفاده شد. افزون بر این، گام زمانی شبیه‌سازی به طور سالانه تنظیم و افق کلی مدل‌سازی، با در نظر گرفتن ملاحظات فنی و رویکردهای سیاست‌گذاری بلندمدت شرکت مدیریت منابع آب ایران، از سال ۱۳۸۰ تا سال ۱۴۲۵ تعیین شد تا امکان پیش‌بینی رفتار آینده سامانه فراهم آید.

نوع مقاله: پژوهشی

*مستول مکاتبات: k.shahedi@sanru.ac.ir

استناد: کیانی، آ.، شاهی، ک.، حبیب‌نژادروشن، م.، حقی‌زاده، ع. ۱۴۰۵. مدل‌سازی پایداری آب، انرژی و غذا بر پایه رویکرد پویایی سامانه در آبخیز سراب صیدعلی استان لرستان. پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۹(۳): ۹۷-۱۲۲.

شناسه دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2026.372167.1659

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۸، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۱/۰۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۳۱، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۵، دوره ۳۹، شماره ۳، شماره پیاپی ۱۵۲، پاییز ۱۴۰۵، صفحه‌های ۹۷ تا ۱۲۲.

© نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



پس از توسعه مدل، اعتبارسنجی آن با بهره‌گیری از آزمون‌های استاندارد پویایی‌شناسی سامانه مانند آزمون کفایت مرزی، سازگاری ابعاد و آزمون بازتولید رفتار، انجام شد. نتایج بر اساس حلقه‌های بازخوردی تحلیل شدند. با تلفیق یافته‌های تحلیل حساسیت و ویژگی‌های بومی منطقه، سناریوهای مختلفی تعریف و در مدل پیاده‌سازی شد. سرانجام، مطلوب‌ترین سناریو با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس فازی رتبه‌بندی و انتخاب شد.

نتایج و بحث

با توجه به متغیرهای مربوط به بخش آب، انرژی، غذا و مؤلفه‌های اجتماعی و اقتصادی فرآیند مدل‌سازی از سال ۱۳۸۰ تا ۱۴۲۵ انجام شد. پس از اعتبارسنجی مدل، نتایج نشان داد در سال ۱۳۸۰ جمعیت ساکن آبخیز ۵۶۴۰۰ نفر بود. بر اساس مدل‌سازی انجام‌شده مبتنی بر متغیرهایی چون نرخ تولد، نرخ مرگ و میر و نرخ مهاجرت، جمعیت در سال ۱۴۲۵ برابر با ۸۵۷۷۰ نفر پیش‌بینی شد. این یافته نشان‌دهنده ۵۲٪ افزایش جمعیت بود. از سال ۱۳۸۰ تا ۱۴۲۵، کاهش منابع آب منطقه قابل توجه خواهد بود. کاهش حجم آب سطحی در دوره نخست از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۴ حدود ۲۱ میلیون مترمکعب بود و در دوره دوم از سال ۱۳۸۵ تا ۱۴۲۵، دو میلیون مترمکعب پیش‌بینی شد. در طول دوره مدل‌سازی حجم آب زیرزمینی حدود ۱/۷۷ میلیارد مترمکعب کاهش یافت. این درحالی است که کاهش پایداری منابع آب (سطحی و زیرزمینی) ۱/۷۹ میلیارد مترمکعب برآورد شد. روند پایداری انرژی (فسیلی و الکتریکی) از سال ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ افزایشی و ۲/۲ میلیون بشکه نفت بود. روند انرژی در دوره زمانی ۱۴۰۱ تا ۱۴۱۹ کاهش بود، اما همچنان در محدوده مثبت باقی ماند، یعنی پاسخگوی نیازهای منطقه است. از سال ۱۴۲۰ تا ۱۴۲۵ اندازه‌های شاخص پایداری انرژی منفی پیش‌بینی شد و تا سال ۱۴۲۵ به محدوده منفی ۱/۸ میلیون بشکه نفت خواهد رسید. این یافته بیانگر کاهش شدید پایداری انرژی و ایجاد چالش‌های اساسی این بخش است. روند پایداری منابع غذایی با توجه به مجموع چهار منبع (کشاورزی، دام و طیور، شیلات و خوراک دام و طیور با منشا کشاورزی) از سال ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۹، افزایشی پیش‌بینی شد و عرضه مواد غذایی تا سال ۱۴۰۹ حدود ۵۹۷ هزار تن بیش از تقاضا خواهد بود. از سال ۱۴۱۰ تا ۱۴۲۵ این روند تغییر خواهد کرد و ذخیره غذا در سال ۱۴۲۵ به ۳۹۰ هزار تن کاهش خواهد یافت. این یافته نشان‌دهنده کاهش ذخایر و تضعیف پایداری منابع غذایی است. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد در زیرسامانه آب، سهم آب زیرزمینی از مصرف و راندمان آبیاری، در زیرسامانه انرژی سهم انرژی فسیلی و اندازه مصرف سرانه انرژی در بخش‌های مسکونی و تجاری و در زیرسامانه کشاورزی سطح زیرکشت چغندر قند و سرانه مصرف غذا، متغیرهای مهمی به‌شمار می‌آیند. در این پژوهش بر اساس نتایج تحلیل حساسیت و شناسایی نقاط اثرگذار بر مدل، سناریوی اصلاح الگوی مصرف با ضریب نزدیکی ۰/۷۵۵ به‌عنوان بهترین گزینه برای ارتقای پایداری منابع معرفی شد. از سوی دیگر، کمترین اثرگذاری بر بهبود پایداری منابع مربوط به سناریوی حالت پایه با ضریب نزدیکی ۰/۱۸۹ بود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

ماهیت مدیریت و برنامه‌ریزی جامع در آبخیزها، پیچیده و چندبعدی است. زیرا، ابعاد آب‌شناختی، اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی به‌شکل درهم‌تنیده بر یکدیگر اثرگذارند. تحقق مدیریت کارآمد در چنین سامانه‌ای نیازمند درک علمی، دقیق و ژرف از چالش‌ها و تعاملات میان مؤلفه‌های مختلف مانند منابع آب، انرژی و غذا است. با وجود اثربخشی رویکرد همبست با نگاه سامانه‌ای، اجرای این رویکرد همچنان با چالش‌هایی مانند کمبود داده‌های دقیق، ماهیت میان‌رشته‌ای موضوع، پیچیدگی ساختارهای اقتصادی و اجتماعی و خلاهای موجود در سیاست‌گذاری مواجه است. بر اساس نتایج این پژوهش، پیشنهاد می‌شود با توسعه مدل‌های جامع‌تر همبست و با درنظر گرفتن نبودن قطعیت‌ها و تغییرات اقلیمی، زمینه تصمیم‌سازی آگاهانه و مدیریت پایدار منابع را با اصلاح الگوی مصرف، تنوع‌بخشی به منابع، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین و تقویت مدیریت خطر، فراهم آورد.

واژگان کلیدی

آبخیز سراب صیدعلی، پایداری، پویایی سامانه، Vensim، همبست

مقدمه

پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۵۰ میلادی، تقاضای جهانی برای سه منبع حیاتی آب، انرژی و غذا به ترتیب حدود ۵۵٪، ۸۰٪ و ۶۰٪ افزایش خواهد یافت (ون و همکاران ۲۰۲۲). آب، انرژی و غذا اساس توسعه پایدار جوامع هستند، به‌طوری که تغییر در هر یک از آن‌ها باعث فشار و اثرات مستقیم و غیرمستقیم بر دیگر منابع می‌شود (یان و همکاران ۲۰۱۸). اصل بنیادین در تأمین امنیت و پایداری آب، انرژی و غذا ایجاد تعادل میان عرضه و تقاضا است (طایفه و همکاران ۲۰۲۳). از این‌رو، مفهوم پیوند آب-انرژی-غذا به‌عنوان رویکردی نوین مطرح‌شده است. با این رویکرد و تمرکز بر ارتباطات بازخوردی میان عناصر مهم، می‌توان امکان بررسی تکامل مشترک و ویژگی‌های بلندمدت سامانه‌های منابع آب، انرژی و غذا را فراهم آورد (لیو ۲۰۱۹). با بهره‌گیری از پویایی سامانه به دلیل توانایی زیاد در مدل‌سازی جریان منابع، امکان مدل‌سازی و پیش‌بینی سناریوهای آینده نیز فراهم‌شده است (لوو و همکاران ۲۰۲۵). یکی از ابزارهای قدرتمند برای پیاده‌سازی مدل‌های پویایی سامانه، نرم‌افزار Vensim است. با بهره‌گیری از این نرم‌افزار امکان تحلیل و مدل‌سازی روابط میان منابع فراهم‌شده است (نیوول و همکاران ۲۰۱۹).

از هنگامی که واژه همبست آب-انرژی-غذا به‌وسیله هاف ارائه شد (هاف ۲۰۱۱)، پژوهش‌های گوناگونی درباره این رویکرد انجام‌شده است. در این راستا، کیهان‌پور و همکاران (۲۰۲۱) پایداری منابع آب از دیدگاه پیوند آب، انرژی و غذا در استان خوزستان را ارزیابی کردند و دریافتند با افزایش ۱۶٪ راندمان آبیاری، عملکرد محصولات غذایی ۵٪ افزایش یافت و مصرف انرژی در فرآیند تولید محصولات غذایی کاهش یافت. در پژوهشی، لونی و شریف‌زاده (۲۰۲۲) ضرورت‌ها و چالش‌های رویکرد همبست آب-انرژی-غذا در ایران را بررسی کردند و دریافتند که سیاست‌گذاری‌های بخشی، نبودن مدیریت یکپارچه، کمبود منابع مالی و اطلاعاتی و نبود قوانین بالادستی از موانع اصلی در مسیر اجرای این رویکرد به‌شمار

می‌آید. ژنگ و همکاران (۲۰۲۲) همبست آب، انرژی، غذا و جامعه در آبخیز هانجیانگ چین را با استفاده از پویایی سامانه مدل‌سازی کردند. یافته‌های این پژوهش بیانگر آن بود که با صرفه‌جویی در مصرف منابع، به‌طور سالانه می‌توان کمبود انرژی را از ۱۶/۱۷٪ به ۷/۵٪ و کاهش منابع آبی را از ۱۵/۸۹٪ به ۷/۲٪ ارتقا داد. گوهرشاهی و همکاران (۲۰۲۴) پایداری منابع آب شهرستان‌های درمیان و سریشه در استان خراسان جنوبی را با رویکرد همبست آب، انرژی و غذا بررسی کردند و گزارش کردند که می‌توان با سناریوهای ترکیبی با افزایش ۶۰٪ راندمان آبیاری، تولید غذا را ۳۰٪ افزایش داد و همزمان زمینه را برای گسترش ۵۰٪ بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر فراهم آورد. پاگانو و همکاران (۲۰۲۵) مدیریت منابع در دو آبخیز پینیوس و خابا در کشور یونان را براساس یک سامانه مشارکتی پویا و سناریوهای مختلف بررسی کردند و دریافتند که با درک تعاملات پیچیده در فرآیند مدل‌سازی همراه با درنظر گرفتن مشارکت سودبران می‌توان سبب ارتقا تصمیم‌گیری‌ها و مدیریت پایدار منابع شد.

بر اساس نتایج پژوهش‌های پیشین در زمینه پیوند آب، انرژی و غذا و توجه نداشتن به مؤلفه‌های اثرگذار و بدون درنظر گرفتن رویکرد بخشی، لازم است خلاءهای موجود در این پژوهش‌ها برطرف شود. از این‌رو، با به‌کارگیری همزمان مؤلفه‌های اثرگذار (مانند تغذیه دام و طیور، راندمان آبیاری، سطح زیرکشت و غیره) و توجه به اصل دیدگاه سامانه‌ای و کل‌نگر در مقیاس آبخیز، می‌توان یک رویکرد همبست با ساختاری پویا، برای بهره‌گیری از نتایج تحلیل حساسیت و طراحی سناریو با در نظر گرفتن سهم نسبی متغیرها و ویژگی‌های منطقه‌ای، برای ارتقای مدیریت منابع ارائه داد.

هدف این پژوهش، ارائه و توسعه یک رویکرد روش‌شناختی نوین بود که بتوان به‌طور کارآمد از فرآیند تصمیم‌سازی و سیاست‌گذاری در عرضه و تقاضای منابع یک آبخیز پشتیبانی کرد و پایداری آب، انرژی و غذا بر پایه رویکرد پویایی سامانه در قالب

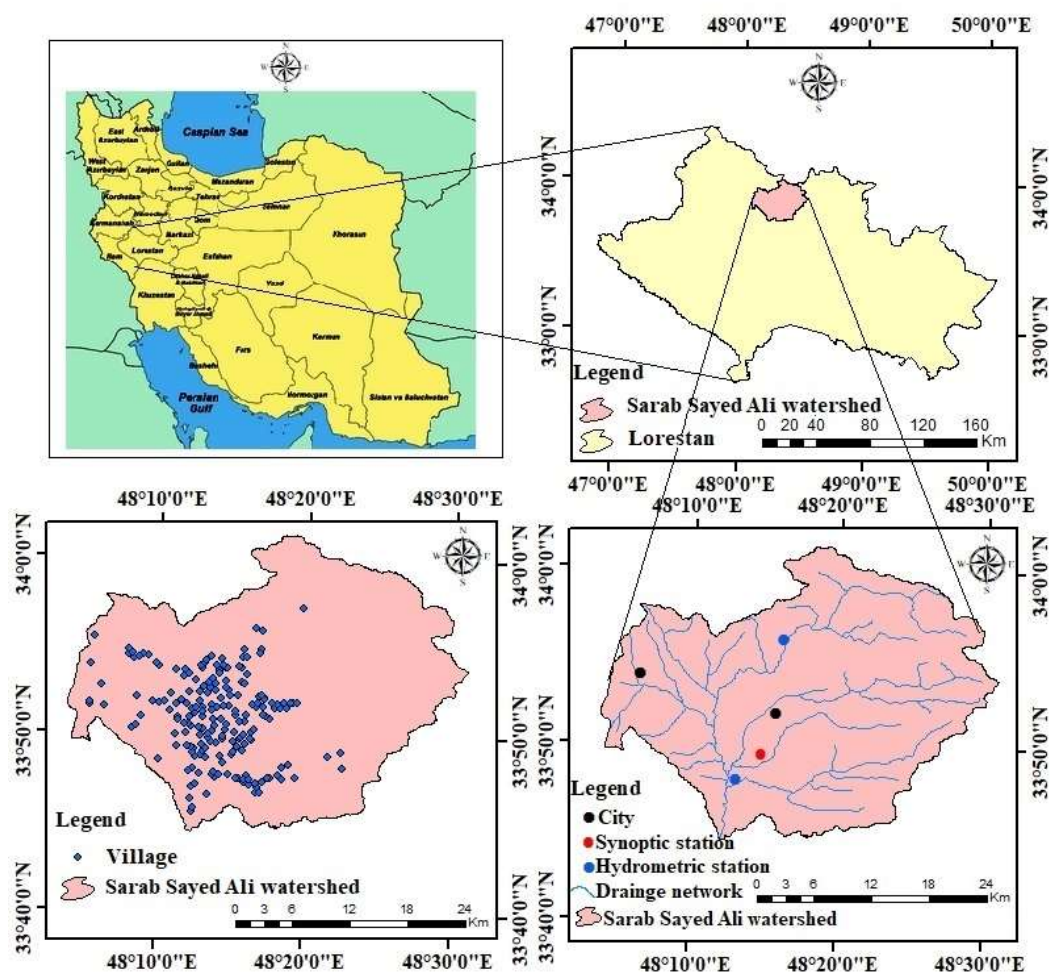
سناریوهای مختلف در آبخیز سراب صیدعلی در استان لرستان را به‌طور کمی مدل‌سازی کرد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مطالعه‌شده

مساحت منطقه پژوهشی (آبخیز سراب صیدعلی در شهرستان سلسله) در استان لرستان، ۷۹۷/۵ کیلومترمربع بود. موقعیت جغرافیایی این آبخیز ۳۹° ۴۸' ۴۸" تا ۴۸° ۳۰' ۴۸" طول شرقی و ۳۴° ۳۴' ۳۳" تا ۳۳° ۲۳' ۰۱" عرض شمالی است. دو شهر الشتر و فیروزآباد و ۱۸۱ روستا در این محدوده هستند (شاهدی و همکاران ۲۰۲۳). زمین‌های کشاورزی با مساحت بیش از ۲۹۷۰۰ هکتار به دو شیوه آبی و دیم کشت می‌شوند. منابع آب منطقه شامل چاه‌های ژرف و نیمه‌ژرف، ایستگاه پمپاژ فیض‌آباد، آب‌های سطحی و

چشمه‌ها است. بر اساس آمار و اطلاعات ۳۵ ساله هواشناسی (۱۳۹۴-۱۳۶۰) میانگین سالانه بارندگی ۵۰۴ میلی‌متر، میانگین سالانه دما ۱۷/۹ درجه سانتی‌گراد است (مهندسین مشاور جاماب ۲۰۱۹). میانگین سالانه آبدهی خروجی آبخیز در دوره بلندمدت (۱۳۹۵-۱۳۶۰) برابر با ۷/۴۳ مترمکعب بر ثانیه بود (شاهدی و همکاران ۲۰۲۳). به‌دلیل نبودن نیروگاه تولید انرژی الکتریکی در این آبخیز، برق مصرفی ساکنان آبخیز به‌وسیله برق منطقه‌ای باختر تأمین و توزیع می‌شود. انرژی فسیلی و فرآورده‌های نفتی منطقه به‌وسیله خطوط انتقال و تانکرهای سوخت‌رسان از مناطق نفت‌خیز جنوب کشور تأمین می‌شود. موقعیت جغرافیایی آبخیز سراب صیدعلی در ایران و استان لرستان در شکل ۱ نشان‌داده شده است.



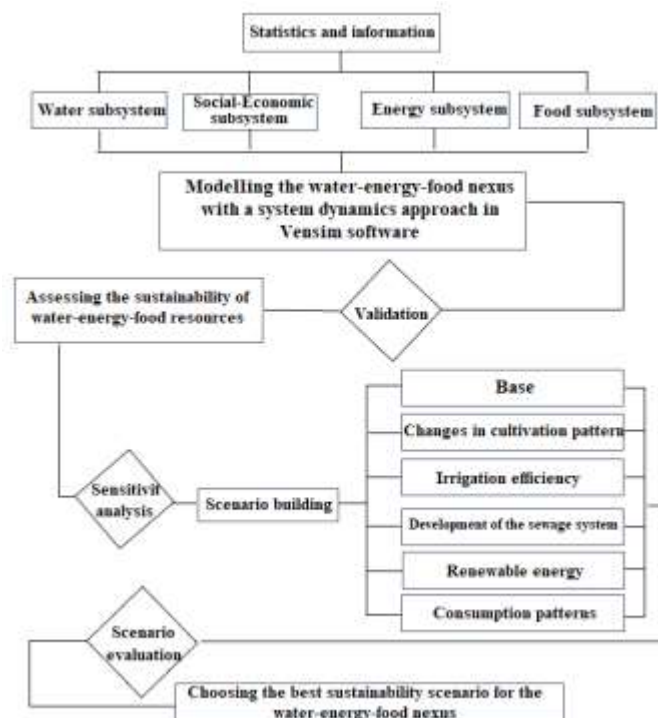
شکل ۱- موقعیت آبخیز سراب صیدعلی در ایران و استان لرستان.

Figure 1- Location of the Sarab Sayed Ali Watershed in Iran and Lorestan Province.

روش پژوهش

در این پژوهش یک چارچوب کمی و یکپارچه مبتنی بر پویایی سامانه با در نظر گرفتن تعاملات عرضه و تقاضا منابع با رویکرد همبست آب-انرژی-غذا در آبخیز سراب صیدعلی توسعه و مدل‌سازی شد. از آنجایی که مدل‌سازی دقیق و قابل اطمینان پویایی‌شناسی سامانه برای ارزیابی پایداری این منابع نیازمند پایگاه داده‌ای جامع و شفاف است، داده‌های لازم (شامل متغیرهای پویای سامانه، سنجه‌های ثابت و سری‌های زمانی) با توجه به ماهیت چندرشته‌ای پژوهش از مراجع رسمی و معتبر ملی گردآوری شد. این نهادها شامل شرکت مدیریت منابع آب ایران، سازمان جهاد کشاورزی، شرکت توزیع نیروی برق و شرکت ملی پخش فرآورده‌های نفتی، مرکز آمار ایران و دیگر نهادهای مرتبط بودند. به‌منظور مدل‌سازی و اعتبارسنجی مدل در منطقه مطالعه‌شده، از داده‌های تاریخی ثبت‌شده سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲ به‌عنوان ورودی به نرم‌افزار Vensim استفاده شد. افزون بر

این، گام زمانی شبیه‌سازی به‌طور سالانه تنظیم و افق کلی مدل‌سازی، با در نظر گرفتن ملاحظات فنی و رویکردهای سیاست‌گذاری برنامه‌های بلندمدت شرکت مدیریت منابع آب ایران، از سال ۱۳۸۰ تا سال ۱۴۲۵ تعیین شد تا امکان پیش‌بینی رفتار آینده سامانه فراهم آید. پس از توسعه مدل، اعتبارسنجی آن با بهره‌گیری از آزمون‌های استاندارد پویایی‌شناسی سامانه مانند آزمون کفایت مرزی، سازگاری ابعاد و آزمون بازتولید رفتار انجام شد. سپس، نتایج بر اساس حلقه‌های بازخوردی تحلیل شد. در گام پایانی نیز، با تلفیق یافته‌های تحلیل حساسیت و ویژگی‌های بومی منطقه، سناریوهای مختلفی تعریف و در مدل پیاده‌سازی شد. سرانجام، مطلوب‌ترین سناریو با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس فازی رتبه‌بندی و انتخاب شد. مراحل انجام پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- مراحل انجام پژوهش.

Figure 2- Research steps.

(۱) Sustainability = Supply – Demand

در این پژوهش، پایداری در این مدل بر اساس تفاوت میان عرضه و تقاضا تعریف و برآورد شد. چنانچه عرضه منابع پاسخگوی سطح تقاضا و نیازها باشد، وضعیت پایدار یا پایداری مثبت است و اگر عرضه نیازهای ساکنین و بخش‌ها را پاسخگو نباشد، شرایط ناپایدار یا پایداری منفی است.

زیرسامانه اجتماعی-اقتصادی

سامانه اجتماعی-اقتصادی را می‌توان به‌عنوان یک ساختار پویا در نظر گرفت که تعامل میان جمعیت، اقتصاد را با منابع حیاتی پیوند داده است (چامس و همکاران ۲۰۲۱). محرک‌های اصلی تقاضا در این مدل، بر پایه پویایی جمعیت و رشد اقتصادی استوار است. داده‌های جمعیتی بر اساس نرخ تولد، مرگ و میر و مهاجرت از نتایج سرشماری‌های دوره‌ای و برآوردهای سالانه مرکز آمار استخراج و وارد نرم‌افزار مدل شدند، که بر اساس آن شکل‌گیری الگوهای جمعیتی، مسیر تقاضای منابع تعیین شد (زیاری و یوسفی ۲۰۲۴). در این پژوهش، معادله کلی مدل‌سازی جمعیت به‌شکل رابطه ۲ بود (اندلا ۲۰۲۴).

$$P(t) = P(t_0) + \int_{t_0}^{t_n} [B_s - D_s + M] dt \quad (2)$$

$P(t)$: اندازه جمعیت در زمان t ، $P(t_0)$: اندازه جمعیت در زمان اولیه و شروع مدل، B_s : اندازه تولد، D_s : اندازه مرگ و میر و M : اندازه مهاجرت بر اساس تغییرات تجمعی با روش انتگرال‌گیری از زمان t_0 یا زمان اولیه تا t_n یا زمان پایانی مدل است.

افزون بر این، رشد اقتصادی به‌دلیل افزایش درآمد با اثرگذاری بر الگوهای مصرف، باعث افزایش فشار بر مصرف منابع و عملکرد پایداری با همبست می‌شود (وانگ و همکاران ۲۰۲۱). ازاین‌رو، متغیر رشد اقتصادی به‌شکل رابطه ۳ ارائه شد و در ساختار کلی مدل نیز پیاده‌سازی شد (کیهان‌پور و همکاران ۲۰۲۱).

$$EG = VA_{we} \times E_{if} + VA_{wf} \times F_{if} \quad (3)$$

پویایی سامانه و مدل مفهومی

موضوع همبست در محدوده تفکر سامانه‌ای جای دارد و این تفکر را می‌توان با روش‌های پویا و توسعه‌یافته حل کرد (مداوئس ۲۰۰۸). ازاین‌رو، پویایی سامانه ارائه‌شده به‌وسیله فارستر (فارستر ۱۹۶۱)، توانایی بررسی ساز و کارهای بازخوردی پیچیده و تغییرات پویا را فراهم آورد (لی و همکاران ۲۰۲۴). در چارچوب پویایی‌شناسی سامانه، معماری مدل بر پایه تعامل یکپارچه و علمی سه متغیر بنیادین تبیین می‌شود.

متغیر اول، متغیر حالت است که وضعیت انباشت سامانه را در هر لحظه از زمان نشان می‌دهد و تغییر اندازه آن فقط به‌وسیله جریان‌های ورودی و خروجی متصل به آن رخ می‌دهد. متغیر دوم، متغیر جریان است که نشان‌دهنده سرعت افزایش یا کاهش متغیر حالت (انباشت) در واحد زمان است. متغیر سوم، متغیرهای کمکی برای بیان روابط جبری، منطقی یا تجربی با اثرگذاری بر متغیر حالت و جریان هستند. متغیر کمکی معمولاً بازنمایی‌کننده مفاهیمی مانند شاخص‌ها، نسبت‌ها، تقاضاهای محاسبه‌شده، کارایی‌ها و توابع سیاستی هستند و سبب ساده‌سازی ساختار مدل و افزایش شفافیت معادله‌ها می‌شوند (استرمن ۲۰۰۲).

برای پیاده‌سازی مدل‌های پویایی سامانه، به محیطی با امکان تعریف متغیرها، رسم روابط علی و شبیه‌سازی رفتار سامانه در طول زمان نیاز است. در این راستا، با بهره‌گیری از نرم‌افزار Vensim امکان نمایش ساختارهای علی و انباشت-جریان، تحلیل تعامل میان متغیرها و بررسی سناریوهای مختلف فراهم‌شده است و از آن برای تحلیل و مدیریت پایدار منابع و مصارف استفاده می‌شود.

مفهوم پایداری در همبست آب-انرژی-غذا

چارچوب همبست 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 سه بخش آب، انرژی و غذا است (اشنایدر و همکاران ۲۰۱۹). بر این اساس، پایداری را می‌توان به‌شکل رابطه ۱ تعریف کرد (کیهان‌پور و همکاران ۲۰۲۱).

VA_{we} : ارزش افزوده هر واحد آب در بخش انرژی، E_{if} : ضریب تأثیر انرژی، WA_{wf} : ارزش افزوده هر واحد آب در بخش غذا و F_{if} : ضریب تأثیر غذا است.

زیرسامانه آب

این زیرسامانه بر پایه چرخه آب‌شناختی و با در نظر گرفتن دو منبع آب‌های سطحی و زیرزمینی طراحی شد. تفاوت میان عرضه و تقاضای آب مبنای مدل‌سازی برای ارزیابی پایداری بود (نقدی و همکاران ۲۰۲۱). به منظور مفهوم‌سازی و ساختاردهی برای مدل‌سازی، داده‌های پایه هواشناسی و آب‌شناختی شامل نزولات جوی، نوسانات احتمالی بارش و نرخ تبخیر سطحی از سری‌های زمانی و پایگاه‌های داده معتبر استخراج شد. برای تعیین اندازه‌های حجم اولیه آب سطحی و آب زیرزمینی، از گزارش‌های کلان بیلان آب منطقه استفاده شد. افزون بر این، سنجه‌های حاکم بر نرخ جریان نفوذ عمقی و نرخ جریان برگشتی ناشی از مصارف در زیرسامانه‌های کشاورزی، صنعت، شرب و شیلات، سرانه مصرف آب شرب به ازای هر نفر با استناد به پژوهش‌های جامع بالادستی برآورد شدند. این سنجه‌ها در قالب معادله‌های اثرگذار بر ساختار بازخوردی به مدل معرفی شدند و مدل‌سازی در راستای پایداری منابع آب انجام شد. در این مدل، تقاضای آب شرب تابعی از جمعیت و سرانه مصرف است. افزون بر این، بخش کشاورزی به عنوان مهم‌ترین مصرف‌کننده آب در منطقه، نقش بسیار اثرگذاری در مدل‌سازی داشت. در این پژوهش، با استفاده از رابطه‌های ۴ و ۵ معادله حاکم بر این زیرسامانه محاسبه شد (اندلا ۲۰۲۴).

حجم بارش، t_0 : زمان اولیه، t_n : زمان پایانی، R_s : بازگشت آب به منابع سطحی، E : تبخیر، I : آب نفوذیافته به آب زیرزمینی و لایه‌های زیرین، C_s : مصرف آب سطحی، O : اندازه خروجی و نیاز زیست محیطی، $WR_g(t)$: ذخیره آب زیرزمینی در زمان t ، $WR_g(t_0)$: ذخیره آب زیرزمینی در زمان اولیه و شروع مدل، R_g : بازگشت آب به منابع زیرزمینی و C_g : مصرف آب زیرزمینی است.

زیرسامانه انرژی

تقاضای انرژی با تجمع مصرف در بخش‌های مسکونی، تجاری، صنعتی و کشاورزی مختلف برآورد می‌شود و این تأمین تقاضا بر اساس نوع کشور و منطقه به وسیله نیروگاه‌های برق‌آبی، فسیلی، هسته‌ای و دیگر منابع تأمین می‌شود (وو ۲۰۲۲). به منظور ساختاردهی به زیرسامانه در بخش انرژی و درک اثرات متقابل متغیرها، ضریب‌های شدت انرژی در فرآیندهای استخراج، انتقال و توزیع آب بخش‌های (کشاورزی، شرب، صنعت و شیلات) به همراه سنجه‌های سرانه مصرف انرژی در بخش‌های مسکونی، تجاری و صنعتی، مبتنی بر داده‌های ترازنامه انرژی تعیین شدند. در گام بعد، برای تنظیم معادله‌های نرخ در زیرسامانه انرژی، منابع تأمین‌کننده انرژی با تفکیک حامل‌های فسیلی و الکتریکی، بر پایه داده‌های تاریخی مصرف سالانه در (شامل بخش‌های کشاورزی، صنعت و مسکونی) تعیین و در مدل پیاده‌سازی شد. مدل‌سازی بخش انرژی بر پایه رابطه‌های ۶ و ۷ انجام شد (اندلا ۲۰۲۴).

$$E_e(t) = E_e(t_0) + \int_{t_0}^{t_n} [S_e - D_e] dt \quad (6)$$

$$E_f(t) = E_f(t_0) + \int_{t_0}^{t_n} [S_f - D_e] dt \quad (7)$$

$E_e(t)$: منابع انرژی الکتریکی (برق) در زمان t ، $E_e(t_0)$: منابع انرژی الکتریکی در زمان اولیه و شروع مدل، S_f : عرضه برق به شبکه سراسری توزیع برق، D_e : تقاضا

$$WR_s(t) = WR_s(t_0) + \int_{t_0}^{t_n} [P + R_s - E - I - C_s - O] dt \quad (4)$$

$$WR_g(t) = WR_g(t_0) + \int_{t_0}^{t_n} [I + R_g - C_g] dt \quad (5)$$

$WR_s(t)$: ذخیره آب سطحی در زمان t ، $WR_s(t_0)$: ذخیره آب سطحی در زمان اولیه و شروع مدل، P :

$$\int_{t_0}^{t_n} [S_f - D_f] dt$$

$$F_l(t) = F_l(t_0) + \int_{t_0}^{t_n} [S_l - D_l] dt \quad (10)$$

$$F_{ag(L)}(t) = F_{ag(L)}(t_0) + \int_{t_0}^{t_n} [S_{ag(L)} - D_{ag(L)}] dt \quad (11)$$

$F_{ag(H)}(t)$: منابع غذایی کشاورزی لازم برای انسان در زمان t ، $F_{ag(H)}(t_0)$: منابع غذایی کشاورزی مصرفی برای انسان در زمان اولیه و شروع مدل، $S_{ag(w)}$: 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 در زمان t ، $F_f(t_0)$: منابع غذایی شیلات در زمان اولیه و شروع مدل، S_f : عرضه محصولات شیلاتی، 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 و شروع مدل، S_l : عرضه محصولات دام و طیور و D_l : تقاضا برای مصرف محصولات دام و طیور، $F_{ag(L)}(t)$: منابع غذایی کشاورزی لازم برای دام و طیور در زمان t ، $F_{ag(L)}(t_0)$: منابع غذایی کشاورزی مصرفی برای دام و طیور در زمان اولیه و شروع مدل، $S_{ag(L)}$: عرضه محصولات کشاورزی برای دام و طیور و $D_{ag(L)}$: تقاضا و مصرف محصولات کشاورزی برای دام و طیور است.

سامانه کلی

بر پایه تحلیل کیفی روابط میان مؤلفه‌های اصلی، ساختار جریان-حالت برای همبست آب-انرژی-غذا با درنظر گرفتن مؤلفه جمعیت و رشد اقتصادی و تعاملات میان زیرسامانه‌ها به‌وسیله حلقه‌های بازخورد (امانی و همکاران ۲۰۲۵) بر پایه رویکرد انتگرال‌گیری اویلر تدوین و تکمیل شد (اندلا ۲۰۲۴). در فرآیند مدل‌سازی، از گام زمانی یک ساله برای مدل‌سازی و ارزیابی پایداری منابع آب، انرژی و غذا استفاده شد. با توجه به نبودن زیرساخت‌های ذخیره‌سازی بزرگ مقیاس مانند سد در منطقه مطالعه‌شده، متغیر مربوط به سد از مدل حذف شد. انرژی الکتریکی و فسیلی

برای مصرف برق، $F_f(t)$: منابع انرژی فسیلی در زمان t ، $F_f(t_0)$: منابع انرژی فسیلی در زمان اولیه و شروع مدل، S_f : عرضه فرآورده‌های نفتی و گاز و D_f : تقاضا برای مصرف فرآورده‌های نفتی و گاز است.

زیرسامانه غذا

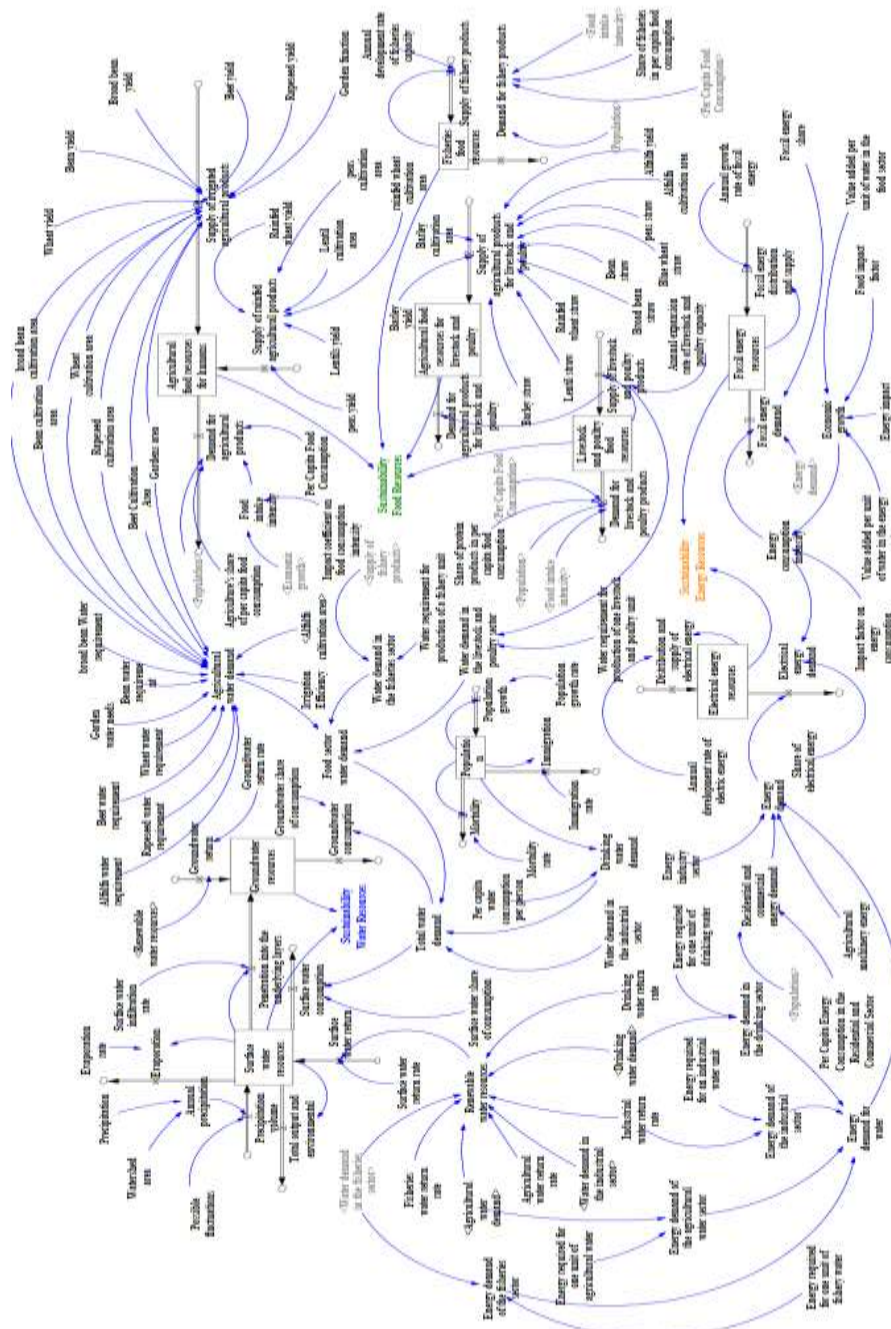
در این زیرسامانه، تولیدات غذایی از سه منبع اصلی شامل تولیدات زراعی، شیلاتی و دام و طیور تأمین می‌شود. افزون بر این، فرآیندهای مربوط به فراهم‌سازی خوراک دام و مدیریت تغذیه آن‌ها به‌عنوان اجزای مکمل سامانه درنظر گرفته شدند. با توجه به پیچیدگی و تنوع محصولات در زیرسامانه غذا، سری‌های زمانی داده‌های مربوط به سطح زیرکشت و عملکرد تولید در واحد سطح برای محصولات تفکیک‌شده در مدل استخراج شد. این محصولات شامل گندم آبی و دیم، جو، یونجه، چغندر قند، کلزا، لوبیا، باقلا، عدس، نخود و محصولات باغی بودند که داده‌های آن‌ها از سالنامه‌های آماری کشاورزی گردآوری شد. نیاز آبی هر یک از این محصولات با استفاده از نرم‌افزار NETWAT برآورد شد و اندازه‌های راندمان آبیاری نیز بر اساس گزارش‌های عملکرد منطقه‌ای در مدل لحاظ شد. در بخش پروتئین حیوانی نیز داده‌های مربوط به ظرفیت توسعه سالانه، نرخ تقاضا و نیاز آبی به ازای تولید هر واحد دام، طیور و شیلات وارد فرآیند مدل‌سازی شد. افزون بر این، سهم بقایای گیاهی به‌دست آمده از تولید محصولات زراعی (مانند کاه و کلش) در تأمین خوراک دام بر اساس ضریب‌های تبدیل استاندارد کشاورزی محاسبه شد. سرانجام، با درنظر گرفتن این متغیرها و بر اساس اطلاعات سرانه مصرف مواد غذایی (شامل محصولات گیاهی، پروتئین حیوانی و شیلات) و میانگین مصرف خوراک دام و طیور، پایداری تأمین غذا پیش‌بینی و ارزیابی شد. در این پژوهش معادله‌های حاکم بر این زیرسامانه به‌شکل رابطه‌های ۸ تا ۱۱ بود (اندلا ۲۰۲۴).

$$F_{ag(H)}(t) = F_{ag(H)}(t_0) + \int_{t_0}^{t_n} [S_{ag(w)} + S_{ag(d)} - D_{ag(H)}] dt \quad (8)$$

$$F_f(t) = F_f(t_0) + \quad (9)$$

بستر شکل‌گیری یک سبد غذایی متنوع و غنی برای ساکنان را فراهم آورد. این سبد غذایی هم شامل غلات و حبوبات به‌عنوان پایه تغذیه‌ای، و هم فرآورده‌های پروتئینی و لبنی بود. مدل توسعه‌داده شده همبست آب-انرژی-غذا در آبخیز سراب صیدعلی در شکل ۳ نشان‌داده شده است.

(نفت، گاز و فرآورده‌های وابسته) به‌طور کامل از خارج از منطقه تأمین‌شده است. یعنی تغییرات در عرضه انرژی ناشی از عامل‌هایی خارج از کنترل منطقه بود، هرچند بخش محدودی از این اقدامات مانند توسعه زیرساخت‌های منطقه‌ای (ایستگاه‌های توزیع یا سامانه‌های تقویت بار) در چارچوب ظرفیت‌های محلی موثر بود. تنوع گسترده تولیدات کشاورزی در منطقه،



شکل ۳- همبست آب-انرژی-غذا توسعه‌داده شده در آبخیز سراب صیدعلی.

Figure 3- Water-energy-food nexus developed in the Sarab Sayed Ali Watershed.

اعتبار سنجی

در مدل‌های پویایی سامانه هرچه قدر بتوان روندهای واقعی و روابط درونی سامانه را با دقت بیشتری منعکس کرد، اعتبار علمی مدل افزایش خواهد یافت (لوو و همکاران ۲۰۲۵). به منظور اطمینان از دستیابی به اهداف پژوهش، اعتبارسنجی مدل با روش‌های آزمون کفایت مرزی، سازگاری ابعاد و آزمون بازتولید رفتار (زاهدی و همکاران ۲۰۲۴) انجام شد. آزمون کفایت مرزی مدل بر اساس نقش متغیرها و حلقه‌های بازخوردی در تبیین رفتار سامانه و جلوگیری از ورود متغیرهای غیرضروری به ساختار مدل است. این آزمون ماهیتی مفهومی و تحلیلی دارد و در نرم‌افزار Vensim این آزمون به‌طور مستقیم قابل محاسبه نیست، بلکه مدل‌ساز با بهره‌گیری از ابزارهایی مانند تحلیل حساسیت، شبیه‌سازی رفتار مدل و بررسی حلقه‌های بازخوردی، اندازه کفایت و مناسب بودن مرزها، مدل را ارزیابی می‌کند. آزمون سازگاری ابعاد برای اطمینان از صحت منطقی و فیزیکی روابط ریاضی مدل به‌کار می‌رود. در این آزمون، واحد اندازه‌گیری تمام متغیرها بررسی شد تا اطمینان به‌دست آید که طرفین هر معادله از دیدگاه واحد اندازه‌گیری هم‌ارز بوده و جریان‌ها، نرخ‌ها و موجودی‌ها دارای ابعاد واحدی منطقی هستند. در نرم‌افزار Vensim این آزمون به‌طور خودکار انجام شد. به این شیوه که برای هر متغیر واحد تعریف شد، و نرم‌افزار با اجرای قابلیت Units Check ناسازگاری‌های ابعادی در معادله‌ها را شناسایی کرد. در این پژوهش، از شاخص آماری ریشه میانگین مربعات خطای درصدی (RMSPE) برای ارزیابی اعتبار رفتار مدل، بر اساس رابطه ۱۲ محاسبه شد (کیهان‌پور و همکاران ۲۰۲۱).

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(S_i - A_i)^2}{A_i}} \quad (12)$$

n: تعداد داده، S_i : داده برآوردی و A_i : داده مشاهده‌ای است. چنانچه اندازه این شاخص کمتر از ۰/۱ باشد و به سمت صفر میل کند، نشان‌دهنده دقت زیاد مدل‌سازی و افزایش قابلیت اطمینان است.

تحلیل حساسیت و سناریوسازی

تحلیل حساسیت مدل به‌عنوان رویکردی مهم با شناسایی متغیرهای اثرگذار و سنجش اندازه حساسیت خروجی‌ها نسبت به تغییرات ورودی، امکان درک بهتر مدل‌های پویا و ارائه راهکارهای سیاستی پایدار را فراهم می‌آورد. پس از بررسی ویژگی‌های منطقه‌ای، ارزیابی تحلیل حساسیت مدل، با بهره‌گیری از روش مبتنی بر تفاضل پراکنش در بازه $\pm 10\%$ متغیرها (موست ۲۰۲۴) در محیط نرم‌افزاری Vensim انجام شد. پس از این مرحله، شش سناریو شامل سناریو پایه و حفظ وضعیت موجود (ژئو و همکاران ۲۰۲۳)، تغییر الگوی کشت (حاجی سلیمان و اوزگر ۲۰۲۴)، افزایش راندمان آبیاری (اروندی و همکاران ۱۴۰۰)، ساخت شبکه فاضلاب شهری و صنعتی (شاهدی و همکاران ۲۰۲۳)، بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر (اروسی و همکاران ۲۰۲۴) و اصلاح الگوی مصرف (ژانگ و همکاران ۲۰۲۴) در مدل پیاده‌سازی شد.

تصمیم‌گیری چند معیاره تاپسیس فازی

روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، رویکردهایی تحلیلی هستند که برای ارزیابی و اولویت‌بندی گزینه‌ها، به‌ویژه در شرایطی که تصمیم‌گیری با پیچیدگی‌های فراوان ناشی از عرضه و تقاضا همراه است، به‌کار گرفته می‌شوند (هان و همکاران ۲۰۲۵). در این پژوهش، برای اجرای این روش و انتخاب سناریوی برتر، تشکیل ماتریس تصمیم فازی، بهنجارسازی ماتریس تصمیم فازی، تعیین راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی، محاسبه فاصله هر گزینه از راه‌حل‌های ایده‌آل، محاسبه ضریب نزدیکی، انجام شد و سرانجام اولویت‌بندی سناریوها پیاده‌سازی شد (عقیلی ۱۳۹۹). بر اساس سناریوهای تعریف‌شده در محیط نرم‌افزار پویایی سامانه Vensim، ابتدا ماتریس تصمیم با توجه به سناریوها و معیارهای اصلی شامل پایداری منابع آب، انرژی و غذا تشکیل شد. سپس، با بهره‌گیری از روش تاپسیس فازی، سناریوها بر اساس معیارهای تعیین‌شده رتبه‌بندی و بهترین سناریو انتخاب شد (سانچز لوزانو و همکاران ۲۰۲۳).

نتایج و بحث

اعتبارسنجی

پیش از ارائه نتایج، اعتبارسنجی مدل سازی از دو جنبه ساختاری و رفتاری ضروری بود تا صحت و قابلیت اطمینان آن به دست آید. به منظور راستی آزمایی و اعتبارسنجی روابط جریان-حالت در مدل سازی انجام شده، از دیدگاه ۷ نفر از کارشناسان و نخبگان بخش تخصیص وزارت نیرو و مؤسسه تحقیقات آب کشور بهره گرفته شد. این فرآیند با برگزاری جلسات و مصاحبه های حضوری انجام شد، تا همگام با رفع ابهامات احتمالی، درکی مشترک و دقیق از روابط مذکور به دست آید. سرانجام، پس از بازخوردهای تخصصی و پیاده سازی های تعدیل کننده، مدل نهایی تأیید و پذیرش شد. با توجه به روابط و وابستگی میان

متغیرها و تناسب واحدهای اندازه گیری، ساختار مفهومی سامانه سازگار بود و اعتبار لازم را کسب کرد. انجام این ارزیابی در بازه های زمانی مختلف، به دلیل عامل هایی چون محدودیت در دسترس پذیری و قابل اطمینان بودن داده ها، لزوم بررسی تغییرات رفتاری و اندازه اثرگذاری این متغیرها در سامانه بود. نتایج ارزیابی شاخص آماری RMSPE روی نمونه های از چهار مجموعه داده مهم شامل جمعیت، تقاضای آب بخش شرب، عرضه محصولات شیلاتی و تقاضای انرژی الکتریکی، در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به اینکه اندازه های محاسبه شده شاخص RMSPE در تمام حالت ها کمتر از آستانه معیار ۰/۱ بود، می توان گفت قابلیت اطمینان و دقت مدل در بازتولید و مدل سازی رفتار واقعی سامانه، مطلوب بود.

جدول ۱- نتایج ارزیابی بازتولید رفتار مدل با استفاده از RMSPE.

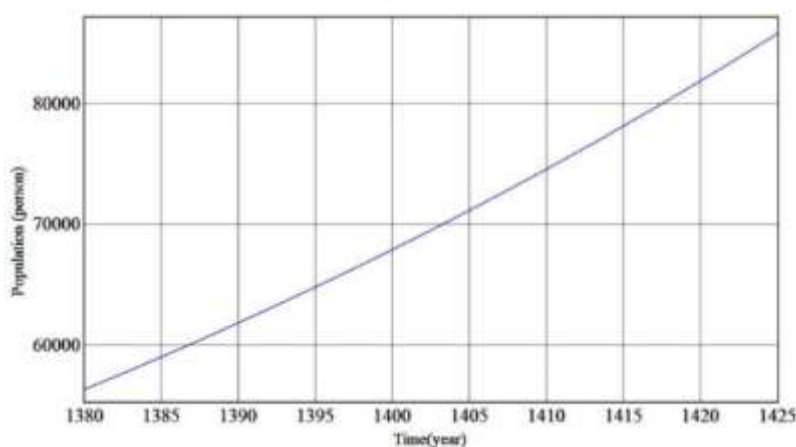
Table 1- Results from the evaluation of model behaviour reproduction using the RMSPE.

Variable	Time period	RMSPE
Population	2004-2007	0.029
Drinking water demand	2012-2017	0.019
Supply of fishery products	2004-2009	0.032
Electrical energy demand	2011-2017	0.031

جمعیت

نمودار تغییرات جمعیت در دوره زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۲۵ در شکل ۴ نشان داده شده است. بر اساس این نمودار، جمعیت از حدود ۵۶۴۰۰ نفر در سال ۱۳۸۰

به ۸۵۷۷۰ نفر در سال ۱۴۲۵ خواهد رسید. این تغییرات نشان دهنده ۵۲٪ افزایش جمعیت در یک بازه زمانی ۴۵ ساله بود.



شکل ۴- تغییرات جمعیت در آبخیز سراب سیدعلی.

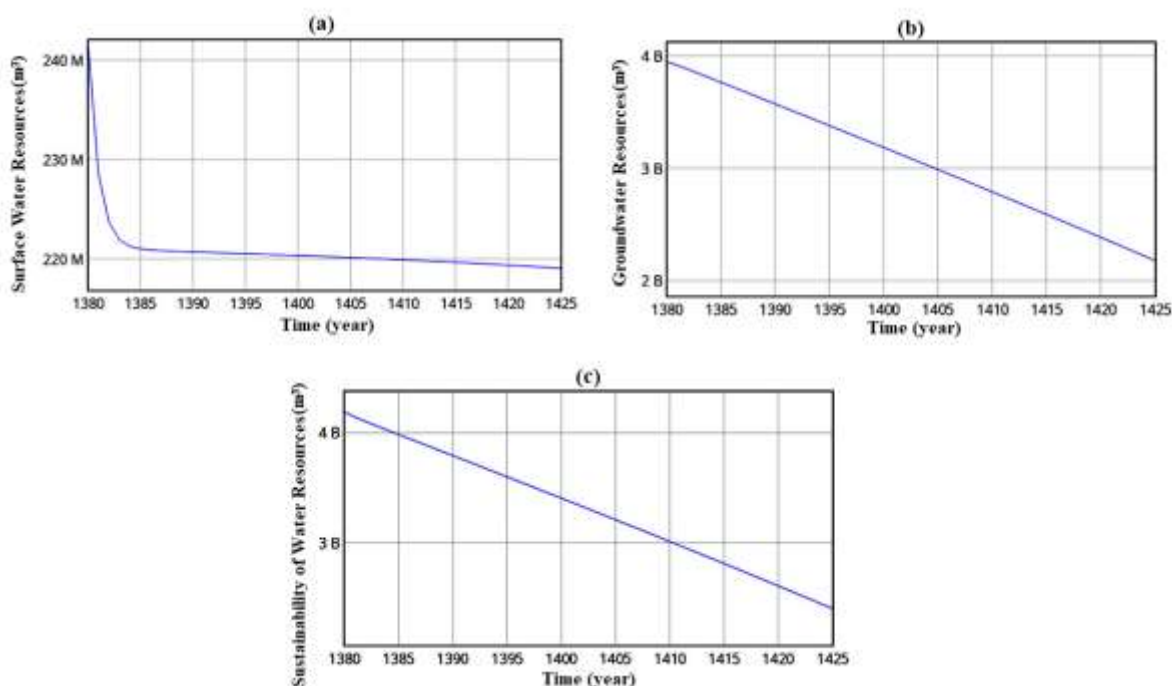
Figure 4- Population changes in the Sarab Sayed Ali Watershed.

تغییرات حجم آب‌های سطحی در دو دوره به‌طور آشکار متفاوت بود. در دوره نخست (سال ۱۳۸۰)، حجم آب سطحی از ۲۴۲ میلیون مترمکعب به ۲۲۱ میلیون مترمکعب در سال ۱۳۸۴ کاهش یافت و کاهش حجم آب سطحی ۲۱ میلیون مترمکعب بود. در دوره دوم، حجم منابع آب سطحی از ۲۲۱ میلیون مترمکعب در سال ۱۳۸۵ با کاهش ۲ میلیون مترمکعب به ۲۱۹ میلیون مترمکعب در سال ۱۴۲۵ خواهد رسید. در مجموع کاهش آب سطحی در دوره زمانی مدل‌سازی ۲۳ میلیون مترمکعب پیش‌بینی شد. تغییرات حجم آب زیرزمینی در محدوده مطالعه‌شده از سال ۱۳۸۰ تا ۱۴۲۵ نشان داد که حجم آب‌های زیرزمینی از ۳/۹۵ میلیارد مترمکعب به ۲/۱۸ میلیارد مترمکعب کاهش یافت و این کاهش ۱/۷۷ میلیارد مترمکعب بود. در بخش مربوط به پایداری منابع آب (مجموع آب سطحی و زیرزمینی) حجم کل منابع آب از ۴/۱۹ میلیارد مترمکعب در سال ۱۳۸۰ به ۲/۳۹ در سال ۱۴۲۵ کاهش خواهد یافت و این کاهش ۱/۷۹ میلیارد مترمکعب در طول دوره مدل‌سازی بود.

نتایج این نمودار نشان داد در وضعیت موجود، جمعیت بدون مداخله سیاستی، چگونه در طول زمان تکامل می‌یابد و این تغییرات چه فشاری بر تقاضای منابع آب، غذا و انرژی می‌تواند وارد کند. پیش‌بینی جمعیت در این پژوهش بر پایه یک الگوی رشد نمایی ساده با فرض دسترسی نامحدود به منابع استوار است. از مدل نمایی ساده با هدف جلوگیری از ورود نبودن قطعیت‌های گسترده و خطاهای محاسبه‌ای ناشی از نبودن داده‌های پیچیده به خروجی‌ها، استفاده شد. روند مشاهده‌شده نشان‌دهنده یک الگوی پیوسته و افزایشی بود. این یافته بیانگر آن است که پویایی جمعیتی در طول زمان با ثبات نسبی ادامه یافت. شیب یکنواخت نمودار بیانگر آن است که رشد جمعیت تحت تأثیر شوک‌های ناگهانی نبوده و رفتار جمعیت پیش‌بینی‌شده همگرا است، یعنی سامانه به سمت یک الگوی پایدار، مهارشدنی و قابل پیش‌بینی در حرکت است.

زیرسامانه منابع آب

در زیرسامانه منابع آب، نمودار تغییرات مرتبط با حجم آب سطحی، آب زیرزمینی و پایداری منابع آب در شکل ۵ نشان‌داده شده است. بر پایه نتایج مدل‌سازی،



شکل ۵- تغییرات آب سطحی (الف)، آب زیرزمینی (ب) و پایداری منابع آب (ج) در آبخیز سراب صیدعلی.

Figure 5- Changes in the surface water (a), groundwater (b) and Sustainability of water resources (c) in the Sarab Said Ali Watershed.

بررسی پایداری منابع آب نتیجه تعامل میان حلقه‌های بازخوردی تقویت‌کننده و متعادل‌کننده در زیرسامانه آب است. در سال‌های ابتدایی، رشد جمعیت و توسعه فعالیت‌های کشاورزی و اقتصادی موجب افزایش تقاضای آب در بخش‌های مختلف از جمله کشاورزی، صنعت و شرب شده است. این افزایش تقاضا منجر به برداشت بیشتر از منابع آب سطحی و زیرزمینی شده و در کوتاه‌مدت، دسترسی به آب را افزایش داده است. این فرآیند یک حلقه بازخوردی تقویت‌کننده ایجاد کرده که در آن افزایش تقاضا به افزایش برداشت و مصرف آب منجر شده و در نتیجه فعالیت‌های اقتصادی و تولیدات کشاورزی گسترش یافته است.

با گذشت زمان، تداوم برداشت و افزایش مصرف موجب کاهش منابع آب تجدیدپذیر و کاهش ذخایر آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌شود. در این شرایط، حلقه‌های بازخوردی متعادل‌کننده در سامانه فعال می‌شوند. کاهش منابع در دسترس، همراه با افزایش تقاضای ناشی از رشد جمعیت، تولید غذا و رشد اقتصادی، فشار بیشتری بر منابع آب وارد می‌کند. در نتیجه شکاف میان عرضه و تقاضای آب افزایش یافته و پایداری منابع آب به تدریج کاهش می‌یابد. از این رو، غلبه تدریجی حلقه‌های متعادل‌کننده بر سامانه موجب کاهش پایداری منابع آب در طول دوره مدل‌سازی شد. بخش عمده این کاهش پایداری مربوط به بهره‌برداری فزاینده از منابع آب زیرزمینی است. با توجه به تفاوت اندک در حدود ۲۳ میلیون مترمکعبی میان کاهش کل حجم منابع آب و آب زیرزمینی، می‌توان گفت وابستگی پایداری منابع آبی این منطقه به منابع آب زیرزمینی حیاتی و ساختاری است (اسکلن ۲۰۲۳). هسته اصلی این وابستگی، تأمین نیاز گسترده زمین‌های آبی و باغ‌ها از این منابع زیرزمینی است. از دیدگاه سیاست‌گذاری می‌توان گفت هرگونه تغییر در الگوی برداشت از آبخوان‌ها به‌طور مستقیم و سریع بر پایداری کل نظام آبی منطقه، اثرگذار است. با توجه به کاهش پایداری منابع آب در آبخیز سراب صیدعلی در طول زمان، ضرورت بازنگری بنیادی در سیاست‌های عرضه و تقاضای آب ضروری و

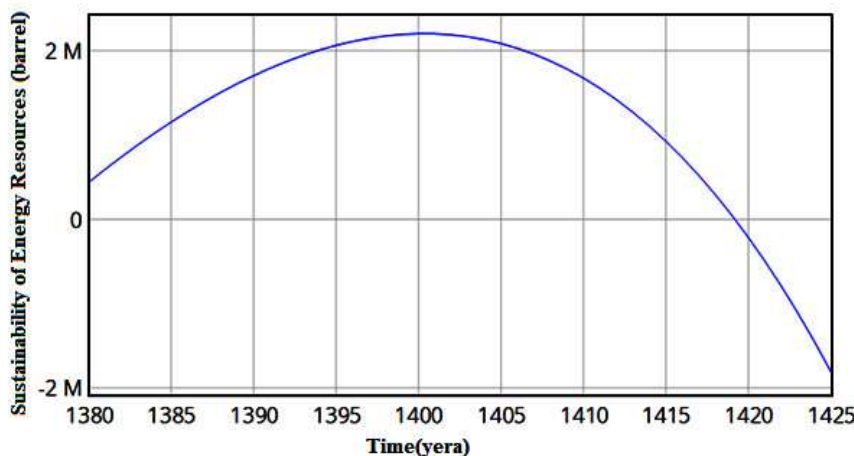
اجتناب‌ناپذیر است، و لازم است در چارچوب برنامه‌های کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت اجرا شود. برنامه‌های کوتاه‌مدت و میان‌مدت شامل نظارت بر برداشت‌های مجاز و غیرمجاز، تغییر الگوی کشت (جعفری و برادلی ۲۰۲۱)، فناوری‌های نوین آبیاری، سامانه پایش هوشمند مصرف آب است (ژینو ۲۰۲۵). در راستای اجرای برنامه‌های بلندمدت لازم است تعادل در بهره‌برداری از منابع آب با کاهش وابستگی به آب‌های زیرزمینی و تقویت نقش منابع آب پیاده‌سازی شود. تحقق این تحول راهبردی مستلزم اجرای برنامه‌ای دوجبه‌ای، که نخست شامل ذخیره‌سازی و تنظیم آب‌های سطحی به‌وسیله ساخت و بهره‌برداری از سازه‌های مهندسی و دیگری توسعه و ارتقای عملیات آبخیزداری و آبخوان‌داری در مقیاس آبخیز با تلفیق روش‌های مهندسی و زیستی، برای افزایش نفوذ رواناب به سفره‌های زیرزمینی با هدف تغذیه و افزایش حجم آب در آبخوان‌ها، امکان‌پذیر است.

زیرسامانه انرژی

روند پایداری منابع انرژی (فسیلی و الکتریکی) در بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۲۵ در شکل ۶ نشان‌داده شده است. روند اندازه پایداری انرژی از سال ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ افزایشی بود، به‌طوری که در سال ۱۳۸۰ پایداری انرژی در آبخیز سراب صیدعلی ۴۳۸ هزار بشکه نفت بود، و در سال ۱۴۰۰ این اندازه ۲/۲ میلیون بشکه نفت بود. این وضعیت بیانگر افزایش ظرفیت، ارتقای زیرساخت‌های انرژی و حرکت به سمت شرایط نسبتاً پایدار است. از سال ۱۴۰۱ تا سال ۱۴۱۹ روند اندازه پایداری و امنیت انرژی کاهشی و حدود ۲ میلیون بشکه نفت پیش‌بینی شد. این یافته نشان‌دهنده کاهش تدریجی در بهره‌وری یا کاهش ورودی منابع است، اما پایداری همچنان در محدوده مثبت باقی ماند و ۴۶ هزار بشکه نفت برآورد شد. می‌توان گفت منابع انرژی پاسخگوی نیازهای بخش‌های گوناگون خواهند بود. از سال‌های ۱۴۲۰ تا ۱۴۲۵ با فشار بر سامانه عرضه و افزایش تقاضا، شاخص پایداری به اندازه‌های منفی کاهش یافت،

رخداد نشان‌دهنده پاسخ‌گو نبودن منابع به تقاضای انرژی در بخش‌های گوناگون آب‌خیز مطالعه‌شده است.

به‌طوری که در سال ۱۴۲۵ آب‌خیز سراب صیدعلی با کمبود ۱/۸ میلیون بشکه نفت روبه‌رو خواهد بود. این



شکل ۶- پایداری انرژی در آب‌خیز سراب صیدعلی.

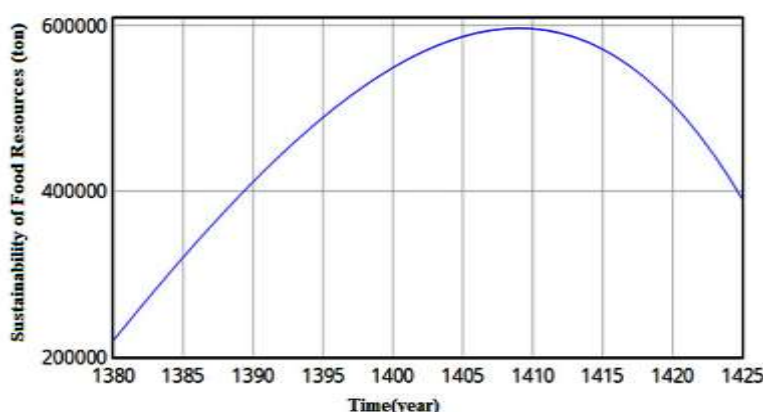
Figure 6- Energy sustainability in the Sarab Said Ali Watershed.

افزایش جمعیت، رشد اقتصادی و گسترش تولید غذا باعث افزایش تقاضای انرژی در بخش‌های مختلف شده و فشار بر منابع انرژی را افزایش می‌دهند. در نتیجه، حلقه‌های بازخوردی متعادل‌کننده فعال‌شده و پایداری منابع انرژی به تدریج کاهش می‌یابد.

زیرسامانه غذا

تغییرات انباشت مواد غذایی ناشی از چهار منبع اصلی کشاورزی، دام و طیور، شیلات و همچنین انباشت خوراک دام و طیور با منشا کشاورزی در شکل ۷ ارائه‌شده است. بررسی پایداری منابع غذایی نشان داد که در سال ۱۳۸۰ اندازه انباشت غذا از ۲۱۹ هزار تن به ۵۹۷ هزار تن در سال ۱۴۰۹ افزایش خواهد یافت. می‌توان گفت دریافت عرضه بر تقاضا پیشی گرفته و پایداری افزایش خواهد یافت. با این حال، این روند از سال‌های ۱۴۱۰ تا ۱۴۲۵ روند تغییر خواهد کرد و اندازه پایداری در سال ۱۴۲۵ به ۳۹۰ هزار تن کاهش خواهد یافت که بیانگر کاهش انباشت و تضعیف پایداری منابع غذایی است.

روند پایداری انرژی از سال ۱۳۸۰ تا ۱۴۲۵، همراه با نوسانات افزایشی و کاهشی بود. این نوسانات بیانگر آن بود که پایداری انرژی تابعی پیچیده از عامل‌هایی چون بهره‌وری سامانه، اندازه عرضه و تقاضا، ظرفیت‌های زیرساختی و به‌طور جامع حلقه‌های بازخوردی سامانه است. توجه نداشتن به این عامل‌ها موجب ناپایداری در این بخش می‌شود. حلقه‌های بازخوردی تقویت‌کننده بخش انرژی، با افزایش تولیدات کشاورزی و رشد اقتصادی، موجب افزایش پایداری منابع انرژی می‌شوند. افزایش و گسترش زیرساخت انرژی باعث دسترسی بیشتر به انرژی در بخش کشاورزی شده که موجب ارتقای آبیاری و مکانیزاسیون و سرانجام افزایش تولید غذا می‌شود. بهبود تولید و شرایط اقتصادی نیز سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های انرژی را تقویت کرده و ظرفیت تولید انرژی را افزایش می‌دهد. این فرآیند یک حلقه تقویت‌کننده ایجاد می‌کند که باعث رشد اولیه شاخص پایداری انرژی می‌شود. از سوی دیگر با گذشت زمان،



شکل ۷- پایداری منابع غذا در آبخیز سراب صیدعلی.

Figure 7- Sustainability of food sources in the Sarab Said Ali Watershed.

برای مصارف و با اجرای سیاست‌های موثر مانند بهینه‌سازی مصرف منابع، سرمایه‌گذاری در فناوری‌های جدید در بلندمدت می‌توان پایداری و امنیت غذایی را تضمین کرد.

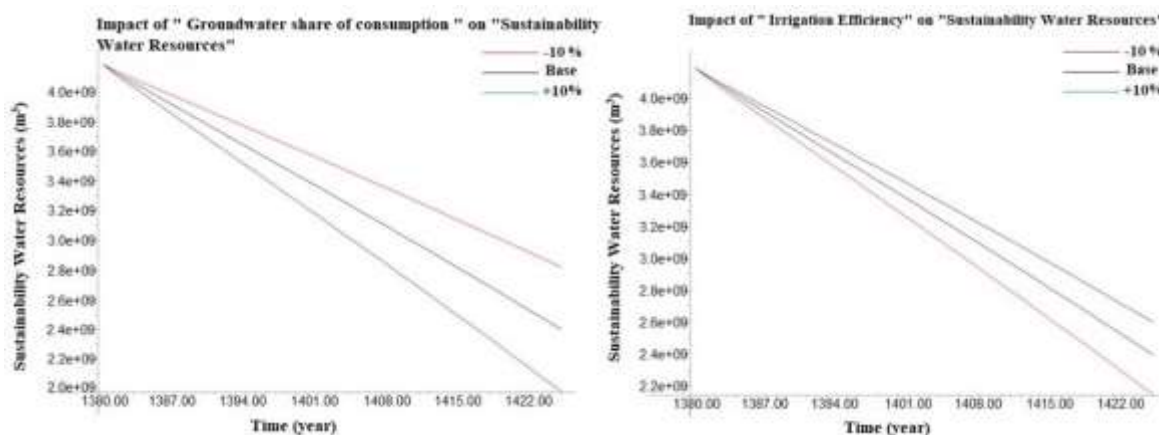
تحلیل حساسیت و سناریوسازی

در این پژوهش، تحلیل حساسیت مدل به‌منظور شناسایی متغیرهای اثرگذار بر پایداری منابع آب، انرژی و غذا اجرا شد. روش کار، پیاده‌سازی $\pm 10\%$ در اندازه‌های هر سنج و سپس بررسی دامنه تغییرات ایجادشده در شاخص‌های خروجی مدل‌سازی بود.

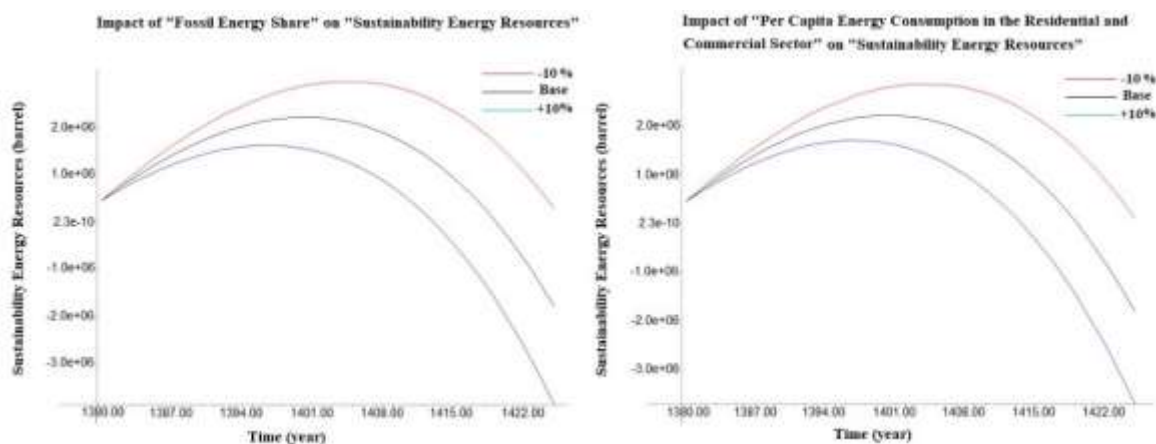
بر اساس نتایج تحلیل حساسیت که در شکل ۸ نشان داده شده است می‌توان گفت سهم آب زیرزمینی از مصرف و راندمان آبیاری به‌عنوان حساس‌ترین متغیرهای مدل در بخش پایداری منابع آب شناسایی شدند. از این‌رو، تمرکز بر مدیریت این دو متغیر، اساس دستیابی به راهبردهای موثر برای پایداری منابع آب در این منطقه است.

تحلیل حساسیت ارائه‌شده در شکل ۹ نشان داد سهم انرژی فسیلی و سرانه مصرف انرژی در بخش‌های مسکونی و تجاری دو متغیر مهم و اثرگذار در مدل‌سازی پایداری انرژی به‌شمار می‌آیند. از این‌رو، بیشترین نقش در شکل‌دهی چشم‌انداز امنیت انرژی، مربوط به تغییرات و نوسانات در این بخش‌ها، است.

روند نمودار پایداری منابع غذایی در طول دوره مدل‌سازی غیرخطی بود. با توجه به روند مثبت و باثبات پایداری غذا تا سال ۱۴۰۹ می‌توان گفت حلقه‌های تقویت‌کننده غالب بوده و موجب افزایش دسترسی به منابع آب، بهبود راندمان آبیاری و توسعه کشاورزی شده، و این موضوع موجب رشد تولید محصولات، افزایش عرضه مواد غذایی و در نتیجه افزایش پایداری منابع غذا می‌شود. افزون بر این، رشد جمعیت و افزایش تقاضای غذا در این دوره محرک توسعه تولید و سرمایه‌گذاری در کشاورزی است و اثر مثبت بر پایداری دارد. این روند رو به رشد می‌تواند تحت تأثیر بهبود سیاست‌ها، توسعه زیرساخت‌ها، افزایش بهره‌وری در تولید، تأمین نهاده با درنظر گرفتن توانایی منابع بومی در تأمین نیازهای اساسی جمعیت محلی باشد. از سال ۱۴۱۰ و بعد از آن، ناپایداری و کاهش ظرفیت تولید با توجه به غالب بودن حلقه‌های تعدیل‌کننده بر سامانه غذا پیش‌بینی شد. این حلقه‌های بازدارنده باعث افزایش برداشت آب و فشار بر مصرف شده، که به‌دنبال آن کاهش منابع آب تجدیدپذیر، کاهش عملکرد محصولات و کاهش عرضه غذایی رخ خواهد داد. افزون بر این، رشد بیشتر جمعیت و مصرف سرانه نیز شکاف میان عرضه و تقاضا را تشدید کرده که باعث گذر از مرحله رشد به کاهش می‌شود. از این‌رو، لزوم تنوع‌بخشی به محصولات غذایی



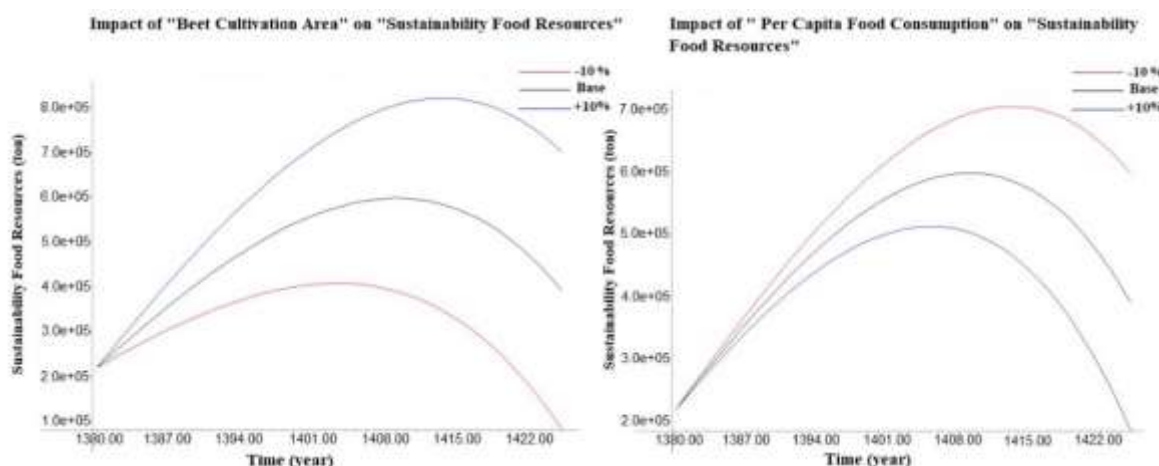
شکل ۸- اثر سهم آب زیرزمینی از مصرف و راندمان آبیاری بر پایداری منابع آب آبخیز سراب صیدعلی.
Figure 8- The effect of the Groundwater share of consumption and irrigation efficiency on the sustainability of water resources in the Sarab Said Ali Watershed.



شکل ۹- اثر سهم انرژی فسیلی و سرانه مصرف انرژی در بخش مسکونی و تجاری بر پایداری انرژی آبخیز سراب صیدعلی.
Figure 9- The effect of the fossil energy share and per capita energy consumption in the residential and commercial sector on the energy sustainability of the Sarab Said Ali Watershed.

این دو متغیر، افزون بر اثر مستقیم و سریع بر امنیت غذایی، در بلندمدت نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری نظام تولید و مصرف خواهند داشت (شکل ۱۰).

در بخش پایداری و امنیت غذایی، نتایج تحلیل حساسیت نشان داد سطح زیرکشت چغندر قند و سرانه مصرف غذا دو شاخص اثرگذار بودند. تغییرات



شکل ۱۰- اثر سطح زیرکشت چغندر و سرانه مصرف غذا بر پایداری منابع غذا آبخیز سراب صیدعلی.

Figure 10- The effect of beet cultivation area and per capita food consumption on the sustainability of food resources in the Sarab Syed Ali Watershed.

انرژی خورشیدی به اندازه ۶۳۰۰ وات ساعت برای هر خانوار در روز (اروسی و همکاران ۲۰۲۴) و کاهش ۵٪ تقاضا به‌عنوان یک سناریوی واقع‌بینانه مبتنی بر مدیریت تقاضا (ژانگ و همکاران ۲۰۲۴) طراحی و اجرا شد (جدول ۲).

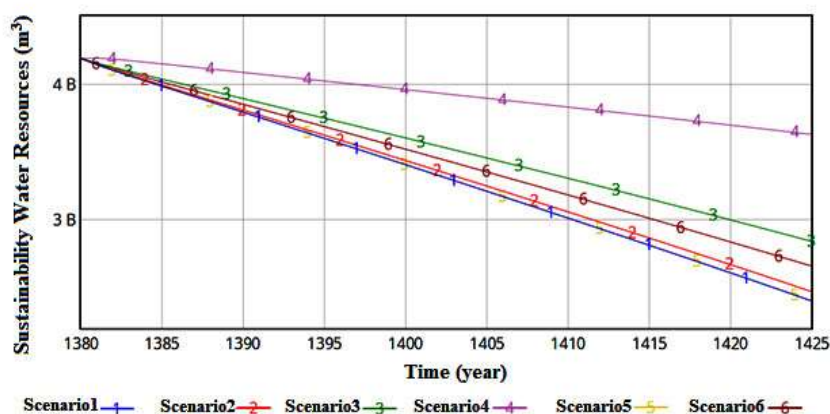
دستاوردهای کمی به‌دست آمده از اجرای سناریوها و سیاست‌های پیشنهادی، به‌شکل مقایسه میان سناریوها ارائه شد (شکل‌های ۱۱ تا ۱۳).

بر اساس خروجی‌های تحلیل حساسیت و شناسایی نقاط اثرگذار بر مدل، سناریو پایه (ژینو و همکاران ۲۰۲۳)، کاهش ۳۰٪ سطح زیرکشت چغندر بر پایه گزارش سازگاری با کم آبی در استان لرستان (مهندسین مشاور جاماب ۲۰۱۹)، ارتقا راندمان آبیاری تا حدود ۶۶٪ بر پایه ظرفیت توسعه سامانه‌های نوین آبیاری در ایران (اروندی و همکاران ۱۴۰۰)، استفاده ۸۰٪ تا ۹۰٪ از پساب بر اساس تجارب دیگر کشورها (وولیوس ۲۰۲۴)، توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر مانند

جدول ۲- سناریوهای پیاده‌سازی‌شده بر مدل در آبخیز سراب صیدعلی.

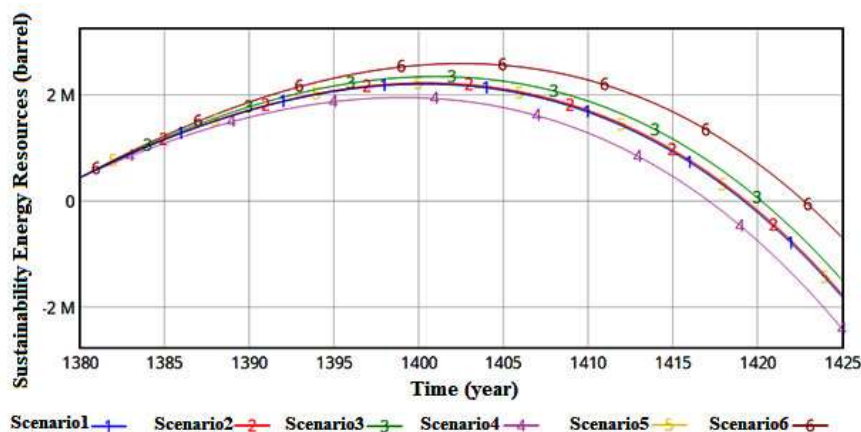
Table 2- Scenarios applied to the model in the Sarab Said Ali Watershed.

Scenario number	Scenario	Changes
1	base scenario	Maintaining the status quo
2	changes in cultivation pattern	A 30% reduction in the area of sugar beet cultivation, a 15% increase in the area of irrigated wheat cultivation, and a 15% increase in the area of rapeseed cultivation
3	improvements in irrigation efficiency	Increase irrigation efficiency by up to 66%
4	development of urban and industrial wastewater systems	An 80% increase in water return rate achieved by constructing a wastewater collection and treatment network
5	utilisation of renewable energy	Generating 6300 watt-hours of electricity (0.0037 barrels of oil equivalent) per day for each household and establishing infrastructure for 7000 households in the region.
6	modification of consumption patterns	5% reduction in demand for water, energy, and food, resulting in savings for residents



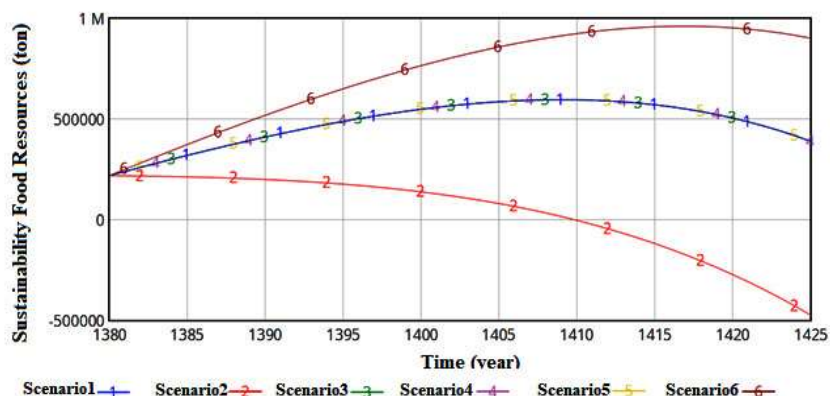
شکل ۱۱- اثرگذاری شش سناریو پیاده‌سازی‌شده بر پایداری منابع آب در آبخیز سراب صیدعلی.

Figure 11- The effect of six applied scenarios on the sustainability of water resources in the Sarab Said Ali Watershed.



شکل ۱۲- اثرگذاری شش سناریو پیاده‌سازی‌شده بر پایداری منابع انرژی در آبخیز سراب صیدعلی.

Figure 12- The effect of six applied scenarios on the sustainability of energy resources in the Sarab Said Ali Watershed.



شکل ۱۳- اثرگذاری شش سناریو پیاده‌سازی‌شده بر پایداری منابع غذا در آبخیز سراب صیدعلی.

Figure 13- The effect of six applied scenarios on the sustainability of food sources in the Sarab Said Ali Watershed.

به منظور کمی سازی اثر هر یک از سناریوها بر پایداری منابع آب، انرژی و غذا، تغییرات هر شاخص پایداری در طول دوره مدل سازی بر اساس تفاوت اندازه آن در ابتدا و انتهای دوره محاسبه شد. سپس، اندازه تغییرات نسبی هر شاخص پایداری نسبت به اندازه اولیه به طور درصد برآورد شد. این نتایج در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- تغییرات منابع آب، غذا و انرژی در فاصله زمانی سال ۱۳۸۰ تا ۱۴۲۵ بر اساس سناریوهای مختلف برای ارزیابی با روش تاپسیس فازی.

Table 3 – Changes in water, food, and energy resources between 1380 and 1425 under different scenarios, evaluated using the Fuzzy Topsis method.

Scenario number	Scenario	Sustainability Water Resources (%)	Sustainability Energy Resources (%)	Sustainability Food Resource (%)
1	base scenario	-43	-312	78
2	changes in cultivation pattern	-41	-300	116
3	improvements in irrigation efficiency	-32	-240	78
4	development of urban and industrial wastewater systems	-13	449	78
5	utilisation of renewable energy	-43	-309	78
6	modification of consumption patterns	-37	-57	312

نوع معیارها (سود و هزینه)، فرآیند بهنجار سازی انجام شد. اندازه های بهنجار شده با اوزان فازی معیارها ترکیب شدند. سپس، راه حل های ایده آل فازی و ضد ایده آل فازی برای هر معیار تعیین و فاصله هر سناریو از این دو نقطه با استفاده از فاصله اقلیدسی برای اعداد فازی مثلثی محاسبه شد. سرانجام، ضریب نزدیکی نسبی به دست آمده هر سناریو به راه حل ایده آل ارائه شد (جدول ۴).

بزرگی برخی اندازه های درصد تغییرات پایداری منابع بر پایه جدول ۳ بیانگر حساسیت زیاد شاخص های پایداری به تغییرات سناریوها و تفاوت زیاد میان شرایط اولیه و نهایی سامانه در دوره مدل سازی بود. به منظور ارزیابی سناریوها با روش تاپسیس فازی، درصد تغییرات شاخص های پایداری برای هر سناریو، با در نظر گرفتن نبودن قطعیت، به شکل اعداد فازی مثلثی متناظر با تابع عضویت مثلثی مدل سازی شدند. سپس، ماتریس تصمیم فازی تشکیل شد و بر اساس

جدول ۴- اولویت بندی سناریوها با روش تاپسیس فازی با استفاده از معیار درصد پایداری منابع آب، انرژی و غذا.

Table 4- Prioritisation of scenarios by the Fuzzy Topsis method using the criterion of percentage sustainability of water, energy, and food resources.

Scenario number	Scenario	proximity coefficient	Priority
1	base scenario	0.189	6
2	changes in cultivation pattern	0.245	4
3	improvements in irrigation efficiency	0.301	2
4	development of urban and industrial wastewater systems	0.289	3
5	utilisation of renewable energy	0.192	5
6	modification of consumption patterns	0.755	1

هزینه ترین سناریو برای انعطاف پذیری زیاد و افزایش تاب آوری سامانه های آب، انرژی و غذا بود (ناهو و میاندیل ۲۰۲۵). در این سناریو کاهش مصرف غذا باعث کاهش تقاضای کلی برای تولیدات غذایی

نتایج اولویت بندی سناریوها با استفاده از روش تاپسیس فازی در چارچوب همبست، نشان دهنده اصلاح الگوی مصرف با اندازه ضریب نزدیکی ۰/۷۵۵ در جایگاه نخست اولویت ها به عنوان سریع ترین و کم

می‌شود. این موضوع به‌طور هم‌زمان چندین حلقه‌های بازخوردی تقویت‌کننده میان جمعیت، تقاضای غذا، تولید کشاورزی، تقاضای آب کشاورزی، و حلقه میان تولید غذا و مصرف انرژی را تضعیف می‌کند. با تضعیف این حلقه‌های تقویتی، فشار وارد بر منابع آب و انرژی کاهش یافته و در نتیجه شاخص‌های پایداری در هر سه بخش به‌طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. افزایش راندمان آبیاری با ضریب نزدیکی برابر با ۰/۳۰۱ یک حلقه بازخورد تعدیلی را در سامانه که موجب کاهش مصرف آب برای تولید هر واحد محصول می‌شود تقویت می‌کند. در نتیجه فشار بر منابع آب تا حدی کاهش یافته و روند کاهش پایداری منابع را کندتر می‌کند (دانکس و بویسون ۲۰۲۵). با این حال، این بهبودی باعث افزایش سطح زیرکشت یا تولید کشاورزی شده و بخشی از صرفه‌جویی آب را خنثی می‌کند. از این‌رو، اثر کلی این سناریو بر بهبود پایداری منابع در حد متوسط باقی ماند.

با توجه به نبودن شبکه‌های جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب در دو شهر الشتر و فیروزآباد، سناریو ایجاد تصفیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی به‌عنوان سومین اولویت با ضریب نزدیکی ۰/۲۸۹ مطرح شد. تأمین آب در قالب استفاده مجدد از پساب تصفیه‌شده باعث ایجاد یک حلقه بازخورد تعدیلی جدید در سامانه می‌شود، زیرا بخشی از تقاضای آب با منابع غیرمتمعار تأمین می‌شود و فشار بر منابع آب کاهش می‌یابد. افزایش عرضه موثر آب باعث کاهش شکاف میان عرضه و تقاضا شده و پایداری منابع آب را بهبود می‌بخشد.

تغییر الگوی کشت با ضریب نزدیکی ۰/۲۴۵ در رتبه چهارم اولویت‌ها بود. این سناریو تا حدی باعث کاهش تقاضای آب در بخش کشاورزی می‌شود، زیرا ساختار کلی سامانه و ارتباط میان جمعیت، تقاضای غذا و تولید کشاورزی همچنان برقرار بوده، اما به‌دلیل کاهش تولید برخی محصولات و فعال ماندن حلقه تقویت‌کننده مرتبط با تقاضای غذا، پایداری غذایی در سامانه کاهش می‌یابد. پایین بودن رتبه بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر با ضریب نزدیکی ۰/۱۹۲ بیانگر آن بود که عامل‌های اصلی تعیین‌کننده تقاضای آب و

غذا در این سناریو تغییر نمی‌کنند، اما استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر موجب تغییر اصلی در زیرسامانه انرژی شده، به‌طوری که افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر موجب تضعیف حلقه تقویتی میان مصرف سوخت‌های فسیلی، رشد اقتصادی و کاهش ذخایر انرژی می‌شود. سرانجام، سناریوی پایه با ضریب نزدیکی ۰/۱۸۹ پایین‌ترین رتبه اولویت‌بندی را در مقایسه با دیگر سناریوها، کسب کرد. این موضوع بیانگر آن است که تداوم وضعیت موجود سبب پاسخ‌گو نبودن به چالش‌ها است. از این‌رو، تغییرات بنیادین و ساختاری در بخش مدیریت منابع لازم و ضروری است. یافته‌های این پژوهش نشان داد که بهره‌گیری از مدل‌سازی با در نظر گرفتن تعاملات سامانه‌ای در روش پویایی سامانه نقش موثری در فهم بهتر مدیریت عرضه و تقاضای منابع با ایجاد روابط غیرخطی و بازخوردهای متقابل میان اجزای سامانه دارد. این یافته با نتایج پژوهش‌های کیهان‌پور و همکاران (۲۰۲۱) و پاگانو و همکاران (۲۰۲۵) هم‌راستا است. با این حال، شدت و شیوه بروز این تعاملات و بازخوردها تحت تأثیر شرایط منطقه‌ای، روش‌های مدل‌سازی و داده‌های استفاده‌شده است. افزون بر این، نتایج این پژوهش با یافته‌های کیهان‌پور و همکاران (۲۰۲۱) و گوهرشاهی و همکاران (۲۰۲۴) هم‌راستا است. زیرا، افزایش راندمان آبیاری ضمن افزایش عملکرد محصولات کشاورزی، موجب کاهش مصرف آب و انرژی در فرآیند تولید می‌شود. این موضوع به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عامل‌ها در تقویت هم‌افزایی میان اجزای هم‌بست آب-انرژی-غذا شناخته شد. افزون بر این، نتایج پیاده‌سازی سیاست‌ها و سناریوهای مختلف نشان داد که تأکید بر اصلاح الگوی مصرف سبب کاهش فشار بر منابع و افزایش پایداری می‌شود. این نتایج با یافته‌های ژنگ و همکاران (۲۰۲۲)؛ گوهرشاهی و همکاران (۲۰۲۴) و پاگانو و همکاران (۲۰۲۵) مطابقت دارد. اما، اندازه صرفه‌جویی به‌دست‌آمده تابعی از ساختار اقتصادی، الگوی مصرف منابع و ویژگی‌های منطقه‌ای است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری جامع در مدیریت آبخیزها با ماهیتی پیچیده و چند بعدی همراه است. زیرا، عامل‌های پرشماری از جمله ابعاد آب‌شناختی، اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی به شکل درهم‌تنیده بر یکدیگر اثرگذارند. دستیابی به مدیریت کارآمد در چنین سامانه‌ای نیازمند شناخت ژرف، دقیق و علمی چالش‌ها و تعاملات میان مؤلفه‌های مختلف مانند منابع آب، انرژی و غذا است. این پژوهش با هدف توسعه یک مدل پویا برای مدیریت جامع منابع در آبخیز سراب صیدعلی انجام شد. این مدل بر پایه همبست آب-انرژی-غذا و بر پایه تعاملات میان عرضه و تقاضای این منابع طراحی شد. مدل‌سازی رفتار سامانه با در نظر گرفتن متغیرهای اثرگذار اجرا شد. نتایج مدل‌سازی در بازه زمانی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۲۵ نشان داد در شرایط تداوم وضعیت موجود، پایداری منابع آب به اندازه ۴۳٪ و پایداری منابع انرژی به اندازه ۳۱۲٪ کاهش خواهند یافت. این در حالی است که روند پایداری منابع غذا در این دوره افزایشی و برابر با ۷۸٪ بود. کارایی سناریوی اصلاح الگوی مصرف به دلیل مدیریت تقاضا و بهبود الگوی مصرف در مقایسه با شش سناریوی دیگر بهتر بود. به رغم کارآمدی رویکرد همبست با دیدگاه سامانه‌ای، اجرای این رویکرد با محدودیت‌هایی همچون نبودن داده‌های دقیق، میان رشته‌ای بودن، پیچیدگی ساختارهای اقتصادی و اجتماعی و خلا در

سیاست‌گذاری روبه‌رو است. با وجود این محدودیت‌ها و بر اساس نتایج این پژوهش، پیشنهاد می‌شود با توسعه مدل‌های جامع‌تر همبست و با در نظر گرفتن نبودن قطعیت‌ها و تغییرات اقلیمی، زمینه تصمیم‌سازی آگاهانه و مدیریت پایدار منابع را با اصلاح الگوی مصرف، تنوع‌بخشی به منابع، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین و تقویت مدیریت خطر، فراهم آورد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچگونه تضاد منافی در نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده‌شده در این پژوهش، با مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار مخاطب قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: مفهوم‌سازی، نرم‌افزار، تحلیل داده، نگارش

نویسنده دوم: نظارت، نرم‌افزار، تحلیل داده

نویسنده سوم: انجام پژوهش، بازبینی متن مقاله

نویسنده چهارم: انجام پژوهش، بازبینی متن مقاله

فهرست منابع

Amani M, Najafabadi MO, Mirdamadi SM, Torkashvand AM. 2025. Dynamic analysis of the water, food, and energy nexus in minab county: An integrated approach to sustainable water resource management in hormozgan province. Results in Engineering. 27: 106185. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106185>

Aqili SAH. 2017. Water-food-energy nexus approach for sustainability evaluation using scenario analysis and MCDM Techniques with respect to virtual water content; Case study: Lenjanat Sub-Basin. Master of Science. Faculty of Civil Engineering. Isfahan University of Technology. 170 p. (In Persian).

Arvandi S, Zare A, Afshar Asl M. 2021. Nexus of water, food and energy in modern irrigation systems. Journal of Water Engineering Systems. 9(4): 55-66. (In Persian). https://journals.iau.ir/article_687578.html

Chamas Z, Abou Najm M, Al-Hindi M, Yassine A, Khattar R. 2021. Sustainable resource optimization under water-energy-food-carbon nexus. Journal of Cleaner Production. 278: 123894. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123894>

Dankens S, Buisson MC. 2025. The water-energy-food-environment nexus. The global commission on the economics of water (GCEW);

- International Water Management Institute. pp. 1-11. <https://cgspace.cgiar.org/items/886077c4-7f99-4777-8c93-b62ac30dd34a>
- Ersoy SR, Raabe M, Schneider S, Fahsold K, Roche MY. 2024. Solar power and the water-energy-food nexus. *Smart Energy Solutions for Africa*. pp. 1-12.
- Forrester JW. 1961. *Industrial dynamics*. The university press of the Massachusetts Institute of Technology. pp. 1-480. http://www.lapropective.fr/dyn/francais/memoire/autres_textes_de_la_prospective/autres_ouvrages_numerises/industrial-dynamics-forrester_1961.pdf&ved=2ahUKewjRm6WSpPqRAxVozgIHHRRCOZsQFnoECBcQAQ&usg=AOvVaw2FdJ9wK2rsQf8fzicWyUcK
- Francisco EC, de Arruda Ignacio PS, Piolli AL, Dal Poz MES. 2023. Food-energy-water (FEW) nexus: Sustainable food production governance through system dynamics modeling. *Journal of Cleaner Production*. 386: 135825. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135825>
- Hacisuleyman V, Ozger M. 2024. Multi-objective cropping pattern optimization and comparative assessment with the food-energy-water nexus. *Water Supply*. 24(12): 4077-4093. <https://iwaponline.com/ws/article/doi/10.2166/ws.2024.254/106243>
- Han F, Alkhawaji RN, Shafieezadeh MM. 2025. Evaluating sustainable water management strategies using Topsis and fuzzy Topsis methods. *Applied Water Science*. 15(4): 1-13. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02336-7>
- Hoff H. 2011. The water, energy and food security nexus. Bonn 2011 Nexus Conference, Bonn, Germany. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.104065>
- Goharshahi GA, Shahraki J, Sardar Shahraki A, Ali Ahmad N. 2024. Dynamic analysis of sustainable management of water resources based on the correlation of water, food and energy resources (Case study: Darmian and Sarbisheh Cities in South Khorasan Province). *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*. 55(3): 154-173. (In Persian). <https://doi.org/10.22125/IWE.2023.415390.1747>
- Jafary F, Bradley C. 2021. Agriculture and groundwater irrigation management in central Iran. *Exploring and Optimizing Agricultural Landscapes*. Cham: Springer International Publishing. pp. 721-734. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67448-9_39
- Jamab Consulting Engineers. 2019. Integrated management report on exploitation and withdrawal control of water resources in Lorestan Province. Iran Water Resources Management Company, Tehran. pp. 1-135. (In Persian).
- Keyhanpour MJ, Jahromi SHM, 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 D. 2019. Evaluating the dynamic resilience process of a regional water resource system through the nexus approach and resilience routing analysis. *Journal of Hydrology*. 578: 124028. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124028>
- Loni R, Sharifzadeh M. 2022. A review of water, energy, and food nexus in Iran: Necessity, challenges and suggested solutions. *Sustainability, Development and Environment*. 3(3): 29-49. (In Persian). <https://sanad.iau.ir/Journal/jsde/Article/846697>
- Lv Y, Yan S, Lai X, Li Y. 2025. Dynamic modeling of the water-energy-food-carbon nexus: Scenario analysis and security assessment in Sichuan Province, China. *Journal of Cleaner Production*. 502: 145370. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145370>
- Meadows D. 2008. *Thinking in systems: International bestseller*. Chelsea Green Publishing. pp. 1-78. <https://research.fit.edu/media/site-specific/researchfitedu/coast-climate-adaptation-library/climate-communications/psychology-and-behavior/Meadows-2008.-Thinking-in-Systems.pdf>
- Most T. 2024. Variance-based sensitivity analysis in the presence of correlated input variables. *ArXiv preprint arXiv*. 12: 04933. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.04933>
- Naghdi S, Bozorg-Haddad O, Khorsandi M, Chu X. 2021. Multi-objective optimization for allocation of surface water and groundwater resources. *Science of the Total Environment*. 776: 146026. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146026>
- Ndlela TJ. 2024. Assessing water-energy nexus dynamics for sustainable resource management in Cape Town: A system dynamics approach. Ph.D. Dissertation. Faculty of Engineering, Stellenbosch University. 116 p.
- Newell JP, Goldstein B, Foster AA. 2019. 40-year review of food-energy-water nexus literature and its application to the urban scale. *Environmental Research Letters*. 14(7): 073003. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab0767/meta>
- Nhamo L, Mpandeli S. 2025. Catalyzing sustainable development goals through the water-energy-food nexus. *iScience*. 28(2). [https://www.cell.com/iscience/fulltext/S2589-0042\(25\)00162-2](https://www.cell.com/iscience/fulltext/S2589-0042(25)00162-2)
- Pagano A, Coletta VR, Portoghese I, Panagopoulos, Panagopoulos A, Pisinaras V, Chatzi A, Malamataris D, Babakos K, Lilli M, Nikolaidis N, Giordano R. 2025. On the use of

participatory system dynamics modelling for WEF nexus management: Hints from two case studies in the Mediterranean regio. *Environmental Impact Assessment Review*. 115: 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2025.108012>

Sanchez Lozano JM, Teruel-Solano J, Soto-Elvira PL, Garcla-Cascales MS. 2013. Geographical information systems (GIS) and multi-criteria decision making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 24: 544-556. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.019>

Scanlon BR, Fakhreddine S, Rateb A, de Graaf I, Famiglietti J, Gleeson T, Zheng C. 2023. Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future. *Nature Reviews Earth and Environment*. 4(2): 87-101. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00418-9>

Schneider P, Avellan T, Le Hung A. 2019. Water-energy-food nexus and sustainability. In *Encyclopedia of sustainability in higher education*. Cham: Springer International Publishing. pp. 2062-2074. 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. (In Persian). <https://doi.org/10.22126/ges.2023.8473.2599>

Sterman J. 2002. *System dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. Massachusetts Institute of Technology. pp. 1-31. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/102741>

Tayefeh A, Abdous M, Zahedi R, Aslani A, Zolfagharzadeh MM. 2023. Advanced bibliometric analysis on water, energy, food, and environmental nexus (WEFEN). *Environmental Science and Pollution Research*. 30(47): 103556-103575. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29379-8>

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

Wang, K, Liu J, Xia J, Wang Z, Meng Y, Chen H, YeB. 2021. Understanding the impacts of climate change and socio-economic development through food-energy-water nexus: A case study of mekong river delta. *Resources, Conservation and Recycling*. 167:105390. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105390>

Wen C, Dong W, Zhang Q, He N, Li T. 2022. A system dynamics model to simulate the water-energy-food nexus of resource-based regions: A case study in Daqing City, China. *Science of the Total Environment*. 806: 150497. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150497>

Wu L. 2022. *Water-energy-food nexus assessment framework for integrated resource management*. Ph.D. Dissertation. Department of Civil, Geological, and Environmental Engineering, Saskatchewan University. 203 p. <https://harvest.usask.ca/bitstream/10388/14192/1/WU-DISSERTATION-2022.pdf>

Yan X, Jiang D, Fu J, Hao M. 2018. Assessment of sweet sorghum-based ethanol potential in China within the water-energy-food nexus framework. *Sustainability*. 10(4): 1046-1063. <https://doi.org/10.3390/su10041046>

Zahedi R, Sadeghitabar E, Khazaei 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>

Zeng Y, Liu D, Guo S, Xiong L, Liu P, Yin J, Wu Z. 2022. A system dynamic model to quantify the impacts of water resources allocation on water-energy-food-society (WEFS) nexus. *Hydrology and Earth System Sciences*. 26(15): 3965-3988. <https://doi.org/10.5194/hess-26-3965-2022>

Zhang P, Zhang L, Hao Y, Xu M, Pang M, Wang C, Voinov A. 2024. Food-energy-water nexus optimization brings substantial reduction of urban resource consumption and greenhouse gas emissions. *PNAS nexus*. 3(2). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgae028>

Zhu X. 2025. Advances in agricultural irrigation management and technology. *Water*. 17(17): 2591-2593. <https://doi.org/10.3390/w17172591>

Zhu M, Yang G, Jiang Y, Wang X. 2023. Agent-based modeling for water-energy-food nexus and its application in ningdong energy and chemical base. *Sustainability*. 15(14): 11428-11453. <https://doi.org/10.3390/su151411428>

Ziari K, Yousefi S. 2024. A comparative study of population growth indicators in Iranian cities and their geographical neighbors. *Urban Economics*. 8(2): 45-62. (In Persian). <https://doi.org/10.22108/ue.2024.142370.1292>



Modeling the Sustainability of Water, Energy, and Food Based on the System Dynamics Approach in the Sarab Seyed Ali Watershed, Lorestan Province

Arman Kiani¹, **Kaka Shahedi^{2*}**, **Mahmoud Habibnejad Roshan³**, **Ali Haghizadeh⁴**

1- Ph.D., Student, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

2 and 3- Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

4- Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khoramabad, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

Water, energy, and food are the basis of the sustainable development of societies and they are inextricably and interrelated, such that changes in each of them cause direct and indirect consequences on the others. The objective of this study was to present and develop a new methodological approach that can efficiently support the decision-making and policy-making process in the supply and demand of a watershed's resources, and to quantitatively model the sustainability of water, energy, and food based on the system dynamics approach across different scenarios. The structure of this framework can be used as an effective tool to improve policy-making and elevate the level of watershed sustainability, providing more efficient perspectives in resource management.

Materials and Methods

In this study, a quantitative and integrated framework based on system dynamics (SD) was developed and modeled, considering the interactions of resource supply and demand with a Water-Energy-Food nexus approach in the Sarab Seyed Ali watershed. Since accurate and reliable SD modeling for assessing resource sustainability requires a comprehensive and transparent database, the necessary data were collected from official and credible national authorities. For modeling and validation in the study area, historical data recorded between 2001 and 2023 were utilized as inputs for the Vensim software. Furthermore, the simulation time step was set annually, and the overall modeling horizon was determined from 2001 to 2046 considering technical aspects and the long-term policy orientations of the Iran Water Resources Management Company to enable the prediction of the system's future behavior. After developing the model, its validation was performed using standard SD tests, such as the boundary adequacy test, dimensional consistency test, and behavior reproduction test.

Article Type: Research Article

***Corresponding Authors' E-mail:** k.shahedi@sanru.ac.ir

Citation: Kiani, A., Shahedi, K., Habibnejad Roshan, M., Haghizadeh, A. 2026. Modeling the Sustainability of Water, Energy, and Food Based on the System Dynamics Approach in the Sarab Seyed Ali Watershed, Lorestan Province. *Watershed Management Research*. 39(3): 97-122.

DOI: 10.22092/WMRJ.2026.372167.1659

Received: 17 February 2026, **Received in revised form:** 29 March 2026, **Accepted:** 21 June 2026,

Published online: 23 September 2026

Watershed Management Research, Vol. 39, No. 3, Ser. No, 152, Autumn 2026, pp. 97-122.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)



The results were analyzed based on feedback loops. By integrating the findings from the sensitivity analysis with the local characteristics of the region, various scenarios were defined and applied to the model. Ultimately, the most desirable scenario was ranked and selected using the Fuzzy TOPSIS Multi-Criteria Decision-Making method.

Results and Discussion

Considering the variables related to the water, energy, food, and social and economic sectors, the modeling process was carried out from 2001 to 2046. After model validation, the results showed that in 2001, the population living in the watershed was 56,400. Based on modeling conducted based on variables such as birth rate, death rate, and migration rate, the population in 2046 was predicted to be 85,770 people. This finding indicates a 52 increase in population. From 2001 to 2046, the reduction in water resources in the region will be significant. The decrease in surface water volume in the first period from 2001 to 2005 was about 21 million m³, and in the second period from 2006 to 2046, 2 million m³ was predicted. During the modeling period, the volume of groundwater decreased by about 1.77 billion m³. This is while the decrease in the sustainability of water resources (surface and underground) was estimated at 1.79 billion m³. The trend in energy sustainability (fossil and electrical) from 2001 to 2046, was an increase of 2.2 million barrels of oil. The energy trend during the period 2022 to 2040, was decreasing, but it still remained in a positive range, meaning it met the needs of the region. From 2041 to 2046, negative energy sustainability index values were predicted, and by 2046, it will reach a range of negative 1.8 million barrels of oil. This finding indicates a sharp decline in energy sustainability and the emergence of significant challenges in this sector. The trend of food resource sustainability, considering all four sources (agriculture, livestock and poultry, fisheries, and livestock and poultry feed of agricultural origin), was predicted to increase from 2001 to 2030, and food supply demand by about 597 thousand tonnes by 2030. From 2031 to 2046, this trend changed, and food reserves decreased to 390 thousand tonnes in 2046. This finding indicate a reduction in reserves and a weakening of the sustainability of food resources. The results of the sensitivity analysis showed that, in the water subsystem, the groundwater share of consumption and irrigation efficiency; in the energy sector, the fossil energy share and per capita energy consumption in the residential and commercial sector; and in the agricultural sector, the beet cultivation area and per capita food consumption are considered key variables. In this study, based on the findings of sensitivity analysis and the identification of effective leverage points in the model, the consumption pattern modification scenario with a proximity coefficient of 0.755 is introduced as the best option to improve resource sustainability. On the other hand, the least impact on improving resource sustainability was related to the base case scenario with a proximity coefficient of 0.189.

Conclusion and Suggestions

Comprehensive management and planning in watersheds have a complex and multidimensional nature. Because hydrological, social, economic, and environmental affect each other in an intertwined manner. Achieving effective management in such a system requires a scientific, accurate, and in-depth understanding of the challenges and interactions among various components such as water, energy, and food resources. Despite the effectiveness of the integrated approach with a systems perspective, its implementation still faces challenges such as the lack of accurate data, the interdisciplinary nature of the subject, the complexity of economic and social structures, and existing gaps in policymaking. Based on the results of this study, it is suggested that by developing more comprehensive correlation models and taking into account the lack of certainties and climate change, the field of informed decision-making and sustainable resource management can be prepared by modifying consumption patterns, diversifying resources, utilizing new technologies, and strengthening risk management.

Keywords: Nexus, Sarab Sayed Ali Watershed, sustainability, system dynamics, vensim

Article Type: Research Article

Conflicts of interest

The authors of this article declare that they have no conflicts of interest regarding the writing and publication of the content and results of this research.

Data Availability Statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' Contribution

Author 1: Conceptualization, Software, Analysis of data, Writing

Author 2: Supervision, Software, Analysis of data

Author 3: Research, Reviewing the manuscript

Author 4: Research, Reviewing the manuscript