

## مقدمه

آب یک منبع حیاتی و مهم برای زندگی انسان‌ها و سایر موجودات می‌باشد، بررسی‌های گوناگون حاکی از این است که تا سال ۲۰۲۵ فقط حدود دو میلیارد نفر از مردم دنیا در مناطقی با امنیت آبی بالا زندگی خواهند کرد، منابع آبی دارای ارزش اکولوژیکی، اقتصادی و قابلیت بهره‌برداری به صورت محدود می‌باشند. در زمان‌هایی که عرضه یک منبع آبی کم‌تر از تقاضای مورد نیاز باشد باعث ایجاد تضاد بین مناطق مختلف کشورها می‌شود [۲۴].

عوامل زیادی در تشدید مسئله کم‌آبی نقش دارند که از جمله آن‌ها می‌توان به تأثیرات بی‌سابقه آب و هوایی، توسعه اجتماعی و اقتصادی، رشد بی‌رویه جمعیت، بهره‌برداری نادرست و تخریب منابع آب اشاره کرد و بخش عظیمی از آن به صورت مستقیم برای پاسخگویی به نیازهای انسانی و زیست‌محیطی در دسترس نیست و منابع آب به طور نابرابر در سطح جهان توزیع شده است [۱۱]. اکثر نواحی جهان به خصوص مناطق خشک و نیمه‌خشک به علت توزیع زمانی و مکانی و همچنین تغییرات اقلیمی متفاوت با مشکل کمبود آب مواجه هستند. منطقه خاورمیانه جزء خشک‌ترین مناطق جهان می‌باشد که در این میان کشور ایران با چالش‌های گوناگون در زمینه کمبود آب روبه‌رو است. هم‌چنین توزیع پراکنده و متفاوت بارش در نواحی گوناگون باعث تشدید این پدیده شده و جمعیت ایران در سالیان اخیر به سرعت افزایش پیدا کرده و در این میان برآورده کردن نیازهای غذایی برای جمعیت رو به رشد جزء اولویت‌های مهم ایران می‌باشد، رشد شهرنشینی و افزایش فعالیت‌های صنعتی این وضعیت را پیچیده‌تر کرده است و در این میان بخش کشاورزی بیش از گذشته دارای اهمیت بوده و شرایط موجود باعث بالا رفتن مستمر و مداوم تقاضای آب در ایران شده است که با وجود تلاش‌های دولت برای فراهم کردن منابع آب جدید و تقاضای آب، شکاف عظیمی بین عرضه و تقاضای منابع آب در ایران وجود دارد، وجود بهره‌وری پائین، نبود تعادل میان عرضه و تقاضای آب نیازمند برنامه‌ریزی صحیح و مؤثر مدیریت منابع آب در ایران می‌باشد، در نواحی از ایران که با خشک‌سالی شدید مواجه هستند، مدیریت منابع آب سخت‌تر و نیازمند داشتن دانش و آگاهی کافی از تغییرات اقلیمی و تأثیر آن‌ها بر منابع آب کشور می‌باشد [۲۹]. طبق آخرین برآوردهای سازمان یونسکو و فائو میانگین بارندگی ایران با دیگر مناطق جهان دارای اختلاف معناداری بوده است، به طوری که متوسط بارندگی سالانه بر روی کره زمین ۸۶۰، آسیا ۷۳۲ میلی‌متر و در کشور ایران میانگین

مدل‌سازی پویای جامع منابع آب تحت سناریوهای  
زیست‌محیطی-اقتصادی در منطقه سیستان

فهیمه بزی<sup>۱</sup>، علی سردار شهرکی<sup>۲\*</sup>، محمود هاشمی تبار<sup>۳</sup>، ندا علی احمدی<sup>۴</sup>  
تاریخ دریافت ۱۴۰۳/۰۹/۰۲ تاریخ پذیرش ۱۴۰۳/۱۰/۱۵  
DOI: 10.22034/WMJ.2025.2046476.1091

## چکیده

منابع آب در دسترس بشر در نقاط گوناگون جهان به طور گسترده مورد بهره‌برداری بی‌رویه قرار گرفته و رشد روزافزون جمعیت، تغییرپذیری آب و هوا و نیاز به مواد غذایی فراوان بر این منبع حیاتی فشارهای زیادی وارد کرده است. به نحوی که در حال حاضر کمبود آب یکی از چالش‌های عمده در اکثر کشورها به شمار می‌رود. پژوهش حاضر در منطقه سیستان به بررسی مدل‌سازی اقتصادی جامع منابع آب تحت سناریوهای زیست‌محیطی در یک افق ۳۱ ساله (۱۴۱۵-۱۳۸۵) با استفاده از روش پویایی سیستم و نرم‌افزار (DSS Vensim) پرداخته است. نتایج پژوهش نشان داد، میزان تقاضا در بخش کشاورزی در سال ۱۴۱۵ از ۱۶۰۳۳ به ۲۰۴۱۲ میلیون مترمکعب می‌رسد و بیش‌ترین مقدار تقاضا مربوط به بخش شرب و کشاورزی می‌باشد. افزایش راندمان آبیاری در کاهش تقاضای آب بخش کشاورزی و کاهش کمبود آب مؤثر است. اجرای سناریوی توسعه سطح زیرکشت در افق ۱۴۱۵ عرضه محصولات کشاورزی به میزان ۱۵۹۶ تن در سال ۱۴۱۵ افزایش یافته است. تقاضای آب در بخش کشاورزی در سال ۱۴۰۲ و ۱۴۱۵ به میزان ۱۶۰۳۳ و ۷۴۶۵ میلیون مترمکعب کاهش یافته است.

واژه کلیدی: سناریوهای زیست‌محیطی-اقتصادی، مدل‌سازی پویا، منابع آب، منطقه سیستان

- ۱- دانشجوی دکتری اقتصاد کشاورزی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.
- ۲- دانشیار اقتصاد کشاورزی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.  
Email: a.s.shahraki@eco.usb.ac.ir
- ۳- استادیار اقتصاد کشاورزی، گروه اقتصاد کشاورزی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.
- ۴- دکترای اقتصاد کشاورزی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

ریزش‌های جوی سالیانه حدود ۲۶۰ میلی‌متر است، از طرف دیگر میانگین سالیانه تبخیر در سطح جهان ۷۰۰ میلی‌متر و در ایران ۲۱۰۰ میلی‌متر است [۲۷]. بعد از دو مسئله مهم تغییر اقلیم و بحران کمبود آب، پدیده ریزگردها سومین چالش جهانی در عصر حاضر به شمار می‌آید که در سال‌های گذشته شدت و فراوانی آن در سطح جهانی و منطقه‌ای افزایش زیادی داشته و دارای اثرات مثبت و منفی زیادی بر بوم‌سازگان بوده است [۲۵]. هنگامی که سرعت باد از یک مقدار معین زیاد شود نیروی اعمالی به ذره‌های خاک سطح زمین باعث کنده شدن ذره‌ها از سطح، ورود به جریان هوا و معلق شدن آن‌ها می‌شود که باعث ایجاد پدیده ریزگردها می‌شود. در واقع می‌توان بیابان‌ها و دریاچه‌های خشک‌شده را به علت نبود بارش سالیانه کافی و فقدان آب لازم در تمامی حوضه‌ها از مراکز اصلی پیدایش و تولید ریزگردها به شمار آورد [۳]. در این میان در منطقه سیستان آب به‌عنوان یک عنصر حیاتی و نادر محسوب می‌شود و زندگی ۷۰ درصد مردم منطقه سیستان به تالاب هامون و رودخانه هیرمند وابسته می‌باشد و از بین رفتن این دو منبع مهم در منطقه به معنی حذف عامل حیاتی زندگی مردم می‌باشد، با شروع خشک‌سالی‌های متوالی پس از سال ۱۳۸۷ و خشک شدن و قطع کامل آب رودخانه هیرمند و نبود بارندگی‌های مناسب و احداث سد بر روی رودخانه هیرمند تالاب هامون خشک‌شده و به دنبال آن پوشش گیاهی منطقه از بین رفته است و به علت فرسایشی بودن خاک منطقه، این تالاب به محل مناسبی برای برداشت رسوبات بادی تبدیل شده است و باعث شدت یافتن طوفان‌های شن و گردوغبار در منطقه شده و آثار زیست‌محیطی زیان‌باری برجای گذاشته است [۱۶].

پدیده ریزگردها در منطقه سیستان طی سالیان اخیر آثار زیست‌محیطی جدی بر اکوسیستم منطقه و پیامدهای منفی بر بخش کشاورزی از جمله کاهش تولیدات کشاورزی، صنعت، آلودگی منابع آبی، اختلال در زندگی روزمره مردم، نارضایتی اجتماعی و شهروندی، مهاجرت‌های پی‌درپی و اجباری، فرسایش و از بین رفتن حاصلخیزی خاک، آسیب رساندن به سلامتی ساکنان منطقه، ناامنی و تضعیف اقتصاد مردم و سرانجام باعث نگاه منفی مردم منطقه به دستگاه‌های رسمی و ذی‌ربط به علت عدم توانایی در حل مسئله ریزگرد و مدیریت صحیح و کارآمد منابع آبی شده است [۲۱].

مطالعات مختلفی در زمینه مدیریت منابع آب و پویایی سامانه‌ها انجام شده است که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود. نوری و همکاران [۲۲] در مطالعه‌ای با عنوان تخصیص بهینه منابع آب مخازن چاه نیمه سیستان تحت سناریوهای مدیریتی آب‌وخاک با استفاده از روش الگوریتم پیشرفته فرا ابتکاری (روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات) و نرم‌افزار متلب تحت رهاسازی شده طی سال ۱۳۸۱/۳۱ ۲۵ میلیون مترمکعب با مقدار تقاضای ۹۸/۳۱ میلیون مترمکعب بوده و در سال دو به مقدار ۴۸/۷۱ و در سال سه ۴۶/۱۶ مقدار تقاضای ۹۸/۳۱ عدم تأمین نیاز داشته که در سال دو نسبت به سال‌های دیگر عدم تأمین نیاز کم‌تری وجود داشته است و با انجام دو سناریوی

به یک‌میزان آب کم‌تری به بخش کشاورزی تعلق خواهد گرفت و با وجود پدیده ریزگردها در منطقه موردنظر با انجام سناریوی تثبیت ریزگردها مشخص شد که در تخصیص بهینه منابع آب می‌توان از الگوریتم ژنتیک استفاده کرد و پیشنهاد کردند که برای تخصیص بهینه منابع آب در منطقه سیستان تا حدالامکان از مدل‌سازی‌های فرا ابتکاری بهره برد.

فیض الهی [۱۰] به بررسی و مطالعه سازمان فضایی حاکم در سه بخش اقتصادی، اجتماعی و منابع آب و متغیرهایی که بر مدیریت تقاضای منابع آب اثر گذارند پرداختند، نتایج نشان داد سه روش سیاست تقویت آبی‌پروری، سرمایه‌گذاری، تقویت منطقه تجاری، سیاست بازچرخانی آب جزء مهم‌ترین راهکارهای مدیریت منابع آب در منطقه می‌باشد و پیشنهاد کردند که با توجه به ظرفیت منطقه، پتانسیل توسعه برای این بخش از فعالیت تا سطح زیر کشت ۵۰۰۰ هکتار و با تولید سالیانه ۳۰ هزار تن در منطقه افزایش یابد و سیاست تقویت منطقه آزاد تجاری می‌تواند در جهت رشد، توسعه و ایجاد اشتغال افزایش سرمایه‌گذاری خارجی و داخلی در منطقه مفید واقع شود. مردانیان و همکاران [۲۰] در مطالعه‌ای با عنوان تخصیص بهینه منابع آب حوزه آبخیز خان میرزا با استفاده رویکرد برنامه‌ریزی خطی به بررسی وضعیت حجم آب سطحی و زیرزمینی موجود در حوضه و برآورده کردن نیازهای چهار بخش صنعت، کشاورزی، شرب و محیط زیستی طی سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۳ با استفاده از مدل ویپ پرداختند نتایج نشان داد که در چهار سناریوی مرجع، بدبینانه، خوش‌بینانه و واقع‌گرایانه به ترتیب ۵۱ ۷۹ ۳۰ ۴۱ میلیون مترمکعب از حجم تقاضا قابل تأمین نمی‌باشد و با توجه حجم زیاد نیاز آبی بخش کشاورزی، این بخش نیازمند مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح برای جلوگیری از اتلاف آب می‌باشد. علی احمدی و همکاران [۴] به بررسی تخصیص بهینه و مدیریت منابع آب در منطقه سیستان پرداختند، نتایج نشان داد که برای افزایش سطح زیر کشت در منطقه و صرفه‌جویی در میزان مصرف ذخایر چاه نیمه انجام سناریوی افزایش ۵۰ درصدی راندمان آبیاری می‌تواند سودمند باشد، به‌طورکلی مصرف آب در بخش کشاورزی بیش‌تر بوده و پیشنهاد کردند برای توسعه منطقه و بهبود وضعیت درآمدی ساکنان به‌جای کشاورزی و دامداری به سایر توانمندی‌های مردم منطقه توجه ویژه شود و برای جلوگیری از هدررفت آب از روش‌های نوین آبیاری بهره برد. غفاری مقدم و همکاران [۱۴] در مطالعه‌ای با عنوان مدیریت اقتصادی منابع آب در بخش کشاورزی حوضه هیرمند تحت رویکرد تئوری بازی و بازار آب با استفاده از تئوری بازی و روش آینده‌پژوهی جهت بررسی بحران آب در بخش کشاورزی منطقه سیستان پرداختند، نتایج نشان داد که با توجه به موضوع تخصیص بهینه آب بالاترین میزان به مناطق هیرمند و پایین‌ترین میزان آب به مناطق زابل و نیمروز اختصاص داده شده است و به ترتیب در سناریوی راندمان آبیاری و افزایش آن به مقدار ۵۰ درصد و ۷۰ درصد عملکرد محصولات در مقایسه

با راندمان آبیاری ۳۵ درصد افزایش یافته است و پیشنهاد کردند که به کارگیری این سناریوها باعث بهبود یافتن شرایط آبی و کشاورزی منطقه خواهد شد.

مطالعه‌ی عبدی دهکردی و همکاران [۲] با عنوان توسعه چارچوب ارزیابی پایداری برای مدیریت یکپارچه سامانه‌های منابع آب با استفاده از رویکرد دینامیک سیستم و نرم‌افزار ونسیم به بررسی شناسایی سامانه‌های مدیریتی مناسب در منابع آب حوزه کارون ایران پرداختند. نتایج نشان داد که با لحاظ کردن طرح‌های انتقال آب بین حوضه‌ای و توسعه در بخش کشاورزی نیازهای کاربران پائین‌دستی به‌طور کامل تأمین نمی‌شود و باید به کیفیت آب و نیازهای زیست‌محیطی پائین‌دست توجه ویژه شود و اگر روند کنونی ادامه یابد سیستم نمی‌تواند در آینده پاسخگوی نیازهای پروژه‌های در حال توسعه باشد. آن<sup>۱</sup> و همکاران [۱] به بررسی به حداقل رساندن تقاضای آب در شهر دبی پرداختند، نتایج شبیه‌سازی نشان داد که راندمان افزایش مصرف آب ۵۹/۱۴ درصد و نسبت آب بازیافت شده و آب شیرین دریا در تأمین آب ۱۳/۷۰ درصد بیش‌تر شده است و پیشنهاد کردند که ارائه نتایج می‌تواند به‌عنوان منبع مهمی برای رسیدن به توسعه پایدار اقتصادی و مدیریت و بهینه‌سازی منابع آب باشد. مطالعه‌ی یوسفی و همکاران [۲۸] با عنوان طراحی مدل سرمایه‌گذاری و توسعه سامانه‌های آبیاری برای مدیریت پایدار منابع آب با استفاده از رویکرد پویایی سامانه‌ها و نرم‌افزار ونسیم نشان داد که با تداوم الگوی کشت فعلی همه‌ی سناریوهای بارندگی و جمعیتی و تقاضای آب کشاورزی از آب‌های زیرزمینی در حال بیش‌تر شدن است و عرضه آب رو به کاهش است. لیرا و لوکاس<sup>۲</sup> [۱۹] در مطالعه‌ی با عنوان شبیه‌سازی و ارزیابی سناریوهای مدیریت منابع آب تحت تأثیر تغییرات اقلیمی برای مدیریت تطبیقی حوضه‌های آبخیز کشاورزی ساحلی با استفاده از روش سیستم مدل‌سازی یکپارچه ال ام اس منابع آب ساحلی را شبیه‌سازی کردند و به بررسی تحلیل اثرات تغییرات آب و هوایی بر مدیریت منابع آب و کیفیت و کمیت آب زیرزمینی در حوضه کشاورزی ساحلی آلمیروس، یونان پرداختند نتایج نشان داد که با استفاده از روش‌های کشت دیم برای به حداقل رساندن مقدار آب مورد استفاده در آبیاری، همراه یا بدون توسعه و بهره‌برداری از مخازن، برای مبارزه با کمبود کیفیت و کمیت آب زیرزمینی در حوضه مورد استفاده قرار گیرد. رحمانی و همکاران [۲۳] در مطالعه‌ی با عنوان مدل سیستم پشتیبان تصمیم و دینامیک سیستم مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی با استفاده از پیوند امنیتی آب، انرژی و غذا به بررسی مدیریت منابع آب در استان البرز پرداختند. نتایج سناریوها نشان داد که سیاست‌های ترکیبی نظیر تغذیه مصنوعی آبخوان به میزان ۱۰ میلیون مترمکعب در سال، کنترل مصرف آب چاه‌ها، بهره‌برداری و استفاده مجدد از آب برای تأمین ۱۰ درصدی بخش کشاورزی و هم‌چنین توسعه ۱۰ درصدی

راندمان آبیاری با استفاده از سامانه‌ها و فناوری نوین آبیاری، حفظ و نگهداری گیاهان و کاهش توسعه سامانه‌های پمپ آب خورشیدی در بخش کشاورزی عالی‌ترین و مؤثرترین راه‌حل با توجه به شرایط موجود می‌باشد.

لذا هدف از این مطالعه شبیه‌سازی با رویکرد پویایی سیستم در منطقه سیستان جهت توسعه پایدار می‌باشد این مطالعه برای شبیه‌سازی فرآیندهای تعاملی و بازخورد در شرایط اقتصادی و زیست‌محیطی و پیش‌بینی اثرات اقدامات مدیریت منابع آب برای بهبود هر چه بهتر شرایط در آینده‌ای نه‌چندان دور مورد استفاده قرار می‌گیرد. لذا ایجاد یک مدل مدیریت منابع آب که فرآیندهای اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی را ادغام می‌کند و به رشد و توسعه منطقه کمک شایانی می‌کند لازم و ضروری می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

منطقه سیستان در قسمت جنوبی شرقی ایران و شمال استان سیستان و بلوچستان و انتهای رودخانه هیرمند واقع شده است. این منطقه با طول جغرافیایی ۶۰ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۵۰ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و ۵ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۲۸ دقیقه شمالی و با مساحتی حدود ۱۵۱۹۷ کیلومترمربع در حدود ۸/۱ از خاک استان سیستان و بلوچستان را به خود اختصاص داده است [۵]. این منطقه شامل پنج شهر زابل، زهک، هیرمند، هامون و نیمروز و ۱۸ دهستان و بیش از ۹۸۵ روستا و آبادی است. حداکثر دما ۳۴/۵ درجه سانتی‌گراد و حداقل دما ۸/۵ درجه سانتی‌گراد است، میانگین بارش سالیانه ۵۷ میلی‌متر و دارای اقلیمی گرم و خشک است مهم‌ترین ویژگی آب و هوایی منطقه، بادهای معروف به ۱۲۰ روز می‌باشد که از اوایل تابستان شروع شده و تا شهریورماه ادامه دارد [۱۲]. منبع اصلی تأمین آب مورد نیاز منطقه، رودخانه هیرمند است که سرچشمه‌ی آن از کوه‌های هندوکش و بابا یغما از کشور افغانستان سرچشمه می‌گیرد و به ایران وارد می‌شود [۹]. از مشخصات شاخص منطقه سیستان وجود تالاب هامون است، این تالاب در طول تاریخ به علت موقعیت جغرافیایی، موجودیت تقریباً دائمی و به دلیل شیرین بودن منابع آبی آن، پراهمیت‌ترین تالاب قسمت خاوری فلات ایران به شمار می‌آید. این تالاب شامل سه ناحیه هامون در مغرب و جنوب غربی، هامون پوزک در قسمت شمال و هامون صابوری در قسمت غربی سیستان است. تالاب هامون از نظر اقتصادی برای ساکنان منطقه بسیار اهمیت دارد و از لحاظ زیست‌محیطی منبعی بزرگ و مهم محسوب می‌شود. در سال‌های مرطوب و پرآب، این سه دریاچه به یکدیگر وصل می‌شوند و پهنه‌ی عظیمی را ایجاد می‌کنند، مساحت کل این سه دریاچه مساوی با ۱۵۰۹ کیلومترمربع و محیطشان ۴۳۴ کیلومتر می‌باشد و هم‌چنین ارتفاعات کوه خواجه به ارتفاع حدود ۵۹۵ متر از سطح دریا در منطقه سیستان قرار گرفته است [۲۶]. شکل (۱) موقعیت

1- An

2- Lira and Lucas



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه سیستان و منابع آب منطقه

جدول ۱: جزئیات برخی مقادیر مهم پارامترها و منابع تاریخی مورد استفاده در مدل

منبع	مقادیر اولیه مورد استفاده	متغیرها
مرکز آمار ایران و آمارنامه جهاد کشاورزی	۳۵۰۰۰ (نفر)	کل جمعیت
آمارنامه جهاد کشاورزی	۱۳۲۳۴۴ (رأس)	دام سنگین
آمارنامه جهاد کشاورزی	۸۹۰۷۸۴ (رأس)	دام سبک
شرکت آب منطقه‌ای استان	۳۳۰ (میلیون مترمکعب)	ذخایر چاه نیمه ۱، ۴، ۳، ۲
آمارنامه جهاد کشاورزی	۷۱۵۴۵۰ (تن)	میزان عملکرد عمده محصولات زراعی و باغی
آمارنامه جهاد کشاورزی	۸۲۷۰۰ (هکتار)	سطح زیرکشت
آمارنامه جهاد کشاورزی	۰/۱۲ (مترمکعب در روز)	سرانه نیاز آب جمعیت شهری در هر روز
آمارنامه جهاد کشاورزی	۰/۱۲ (مترمکعب در روز)	سرانه نیاز آب جمعیت روستایی در هر روز
آمارنامه جهاد کشاورزی	۰/۰۹۰ (مترمکعب در روز)	سرانه نیاز آب دام سنگین در هر روز
آمارنامه جهاد کشاورزی	۰/۰۱ (مترمکعب در روز)	سرانه نیاز آب دام سبک در هر روز
اداره کل هواشناسی	۴۱۰۰ (میلی متر)	میزان تبخیر سالیانه

برخی متغیرهای ذخیره و ضرایب ثابت مدل در منطقه مورد مطالعه ارائه شده است.

#### روش پویایی سیستم

سامانه‌های پویا علمی است که توسط پروفیسور جی فورستر در سال ۱۹۵۶ جهت مطالعه پیچیدگی سامانه‌ها تدوین شده است. پویا شناسی سیستم بر حسب تفکر بازخوردی است که تفکر بازخوردی عبارت است از تغذیه عکس اطلاعات، انرژی یا ماده در داخل سیستم. به عبارت دیگر هر جریان رفت و برگشت میان علت و معلول

جغرافیایی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

در این پژوهش به تحلیل مدل‌سازی اقتصادی جامع منابع آب با رویکردهای تلفیقی سامانه‌های پویا و پشتیبان تصمیم تحت سناریوهای زیست‌محیطی در یک افق ۳۱ ساله (۱۴۱۵-۱۳۸۵) پرداخته شده است. داده‌های مورد استفاده در این مطالعه از مطالعات کتابخانه‌ای و امور آب و آبفای استان، شرکت آب منطقه‌ای سیستان و بلوچستان، وزارت جهاد کشاورزی و سازمان جهاد کشاورزی استان، آمارنامه‌های کشاورزی استان سیستان و بلوچستان، مطالعات جامع شرکت‌های مشاور آب) تهیه شده است. در جدول (۱) مقادیر مهم

یک بازخورد است. در پویا شناسی سامانه‌ها، ساختمان سیستم از روابط علت و معلولی یا همان بازخوردی‌های موجود در یک سیستم تشکیل شده است. قابلیت‌های پویا شناسی سیستم به نحوی است که به بهره‌گیری از فنون قوی و درک معنوی است و در آن پایین‌ترین میزان استفاده از قواعد و فرمول‌های ریاضی، بستر مفیدی برای حل موضوعات و سختی‌های توسط مهیا می‌سازد و باعث درک مفهومی از پیچیدگی و پویایی در محیط اطراف می‌شود [۱۸].

در پویایی‌های سیستم و آشنایی با انواع مدل‌ها، مدل‌سازی را در سه مرحله می‌توان انجام داد:

الف) تشکیل و رسم نمودارهای علت و معلولی

ب) تدوین و رسم نمودارهای جریان

ج) نوشتن معادلات ریاضی

پویایی سامانه‌ها بر ساختار، رفتار و عملکرد سامانه‌ها، متکی می‌باشد و از حلقه‌های معنادار و بازخوردی مرتبط به هم ایجاد شده است. نمودارهای علت و معلولی و ذخیره و جریان در مدل‌سازی پویا، روشی ساده جهت نمایش ساختارهای حلقوی تعاملات متغیرهای شکل‌دهنده در یک چارچوب نظری و کاربردی در یک سیستم می‌باشد.

برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی این پژوهش از نرم‌افزار ونسیم<sup>۱</sup> استفاده شد. نرم‌افزار ونسیم نوعی ابزار شبیه‌سازی تصویری است که به شکلی ساده و قابل انعطاف ساخت نمونه‌های مختلف را ممکن می‌سازد. این نرم‌افزار به کاربر امکان تعریف، شبیه‌سازی، تحلیل و بهینه‌سازی و ذخیره مدل‌های سیستم دینامیک را می‌دهد.

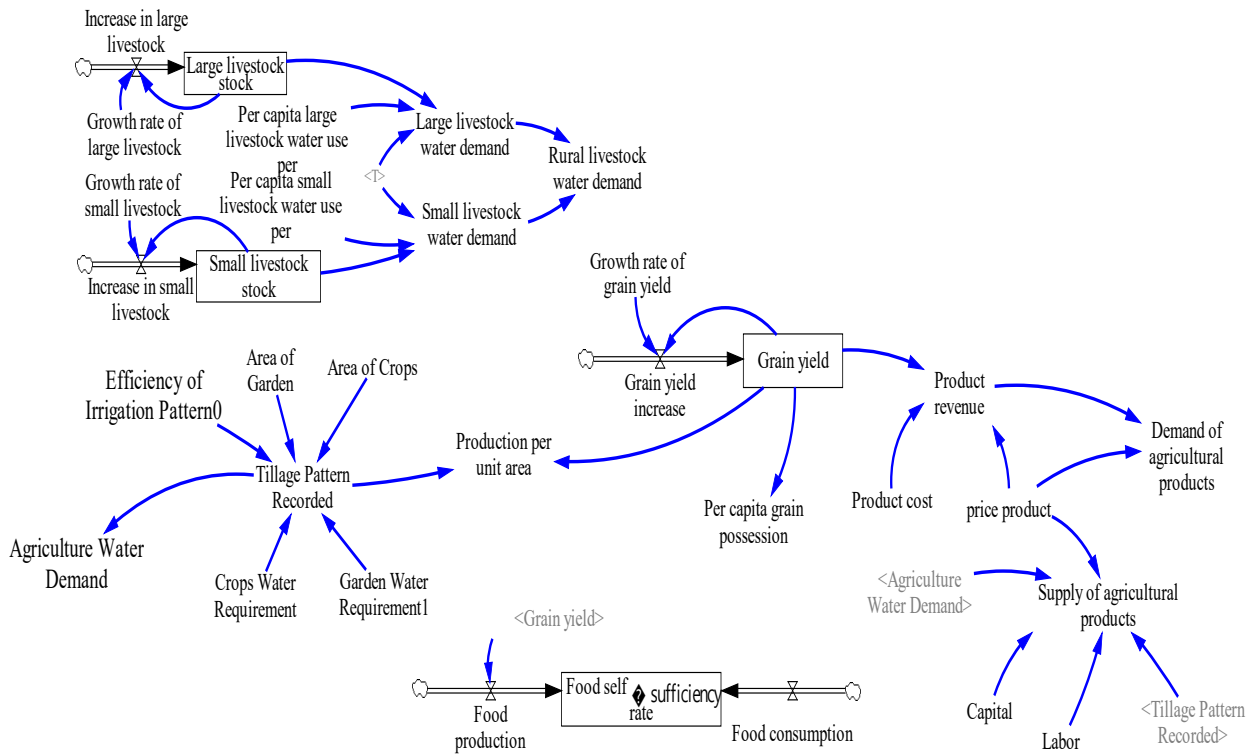
**نمودار ذخیره جریان:** زیرسیستم‌های موجود در مدل بر اساس نمودارهای حلقه‌های علی و معلولی گسترش یافته‌اند تا باعث توصیف بهتر تجمع و نقصان شده و روند جریان مواد در سیستم را معین نمایند. نمودار ذخیره و جریان منطقه سیستم از نمودارهای ذخیره و جریان زیرسامانه‌های کشاورزی، اقتصادی، اجتماعی، آب و زیست‌محیطی تشکیل شده است که به ترتیب در شکل‌های زیر نشان داده شده است. متغیرهای ذخیره سیستم شامل دام سنگین، دام سبک، عملکرد محصول، نرخ خودکفایی مواد غذایی، سرانه دستمزد خانوار شهری و روستایی، حجم ذخایر مخازن چاه نیمه و جمعیت کل می‌باشد. این متغیرهای ذخیره با تغییر در نرخ ورودی و خروجی متغیرها کاهش یا افزایش می‌یابند.

**زیرسیستم کشاورزی:** بالاترین میزان مصرف آب در منطقه سیستم متعلق به بخش کشاورزی می‌باشد. اراضی قابل کشت در منطقه حدود ۱۳۵ هزار هکتار است. در منطقه سیستم بخش کشاورزی به سه بخش اصلی کشاورزی سیستم، زهک و میانکنگی تقسیم‌بندی می‌شود. بیش از ۷۰ درصد تأمین آب در منطقه متعلق به بخش کشاورزی می‌باشد. منطقه سیستم دارای الگوی کشت متنوعی از انواع مختلف محصولات آبی می‌باشد. زیرسیستم تعریف شده در این مدل حاوی ۱۵ دسته از محصولات گوناگون کشاورزی شامل

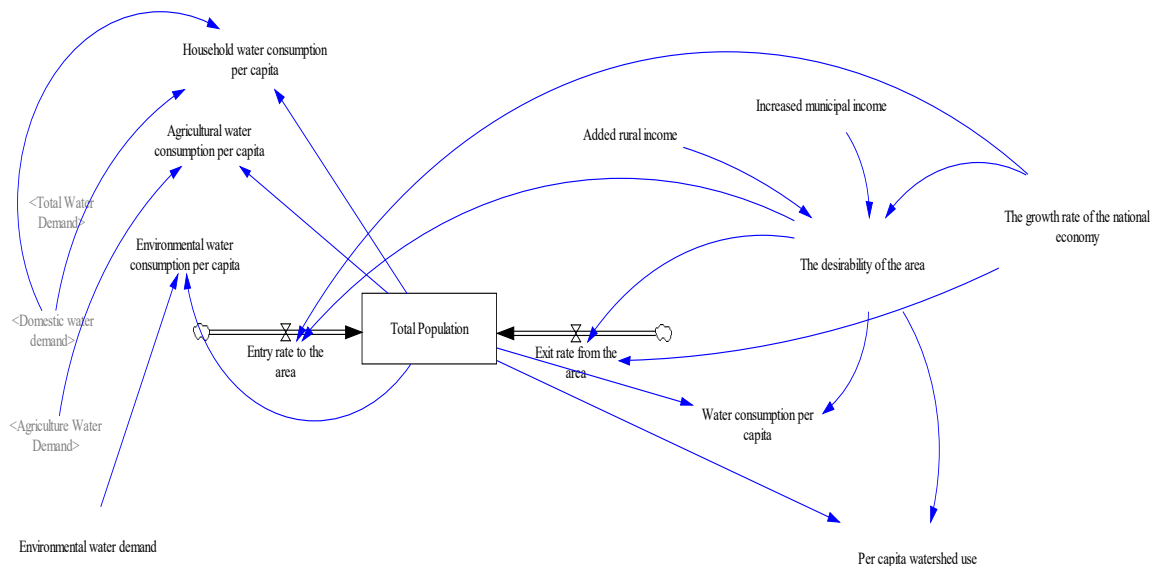
یونجه، باغی، پیاز، گوجه، خیار، هندوانه، خربزه، آفتابگردان، کنجد، ذرت، گندم، جو، سورگوم، حبوبات و بندی گیاهان دارویی که به دو دسته زراعی و باغی تقسیم‌بندی شده‌اند می‌باشد. مقدار سطح زیرکشت کل محصولات باغی و زراعی در نظر گرفته شده است. در بخش کشاورزی تأمین و نیاز آب ارتباط تنگاتنگ و مثبتی با کل سطح زیرکشت در این بخش دارد. اگر در بخش کشاورزی مصرف آب با راندمان بالای آبیاری همراه شود باعث به حداقل رسیدن اتلاف آب و افزایش مصرف آب خالص می‌شود. به‌کارگیری از زمین به‌مثابه یک عنصری اساسی در سامانه‌های منابع آب در نظر گرفته می‌شود. تغییر در سطح زیرکشت شده مختص به نیاز آب برای کشاورزی است و تأثیر بسزایی بر عملکرد محصول می‌گذارد. در نهایت هفت شاخص، سطح زیرکشت، نرخ خودکفایی محصول، عملکرد محصول، عملکرد در واحد سطح، سرانه ذخیره محصول، عرضه و تقاضای محصولات کشاورزی در این زیرسیستم طراحی شده است.

عملکرد هر محصول با افزایش سطح زیرکشت افزایش می‌یابد. مقدار عملکرد محصول بر درآمد آن محصول تأثیرگذار بوده که رابطه علی و معلولی مثبت با عملکرد محصول دارد؛ که در آن درآمد تابعی مثبت از قیمت محصول و تابعی منفی از هزینه مرتبط به محصول کشت شده می‌باشد. مقدار قیمت محصول بر تأمین و نیاز محصولات کشاورزی تأثیرگذار بوده و برای نیاز محصولات کشاورزی دارای رابطه علی و معلولی منفی و تأمین محصولات کشاورزی رابطه علی و معلولی مثبت محصولات دارد. شکل (۲) نمودار ذخیره - جریان زیرسیستم کشاورزی را نشان می‌دهد.

**زیرسیستم اقتصادی، اجتماعی:** جمعیت و مطلوبیت منطقه متغیرهای اصلی در زیرسیستم اقتصادی، اجتماعی را تشکیل می‌دهند. تقاضای آب در بخش شرب، زیست‌محیطی و کشاورزی تحت تأثیر وضعیت اقتصادی، اجتماعی منطقه است. مطلوبیت منطقه به افزایش مهاجرت، جذب جمعیت و افزایش درآمد سرانه شهری و روستایی در منطقه می‌انجامد که خود عامل افزایش سرانه مصرف آب در بخش‌های مختلف است و به دنبال آن تقاضا و نیاز آبی کل منطقه افزایش می‌یابد. در این مطالعه مطلوبیت منطقه تحت تأثیر عواملی همچون نرخ رشد اقتصاد ملی و سرانه مصرف آب در نظر گرفته شده است. نرخ رشد اقتصاد ملی به‌صورت عاملی برون‌زا بر مطلوبیت منطقه تأثیرگذار است. سرانه مصرف آب در منطقه با کل تقاضای آب رابطه مستقیم دارد. تا زمانی که عرضه آب با تقاضا برابر باشد و به‌عبارت‌دیگر، هیچ محدودیتی وجود نداشته باشد، منطقه موردنظر با کمبود آب مواجه نمی‌شود و ساکنان آن در رفاه به سر می‌برند. در این زیرسیستم، مقدار اولیه کل جمعیت و نیاز سرانه آب بخش شرب، کشاورزی و زیست‌محیطی با استفاده از داده‌های سازمان آمار و شرکت آب منطقه‌ای استان سیستم و بلوچستان وارد مدل شد. شکل (۳) نمودار ذخیره - جریان زیرسیستم اقتصادی، اجتماعی را نشان می‌دهد.



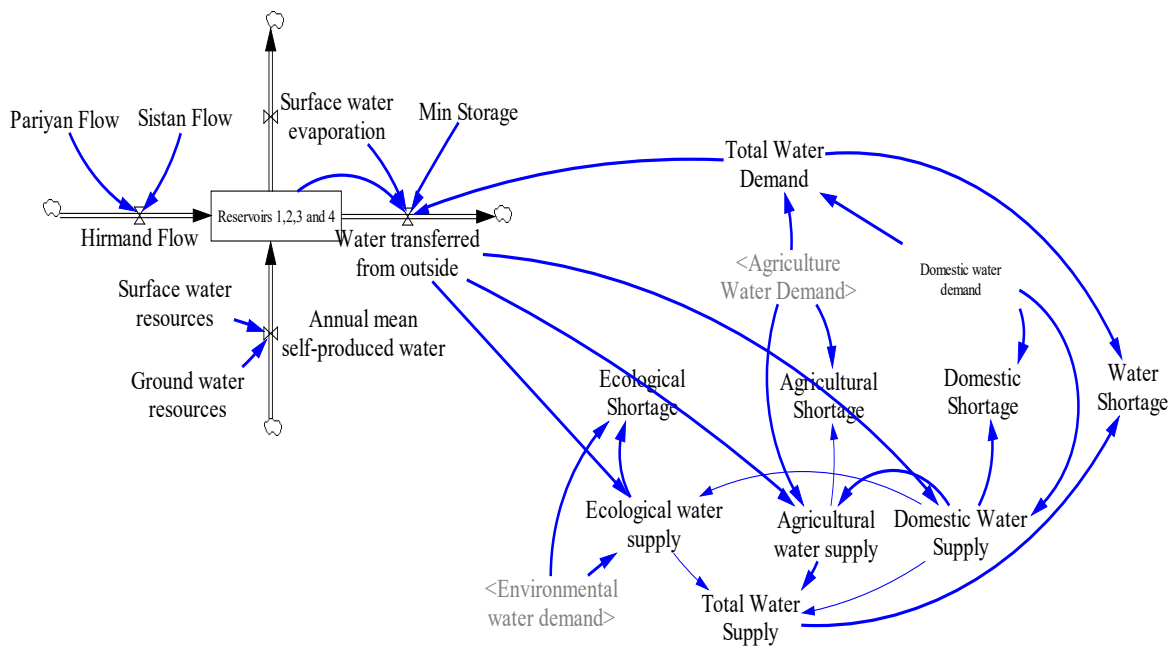
شکل ۲: نمودار ذخیره - جریان زیرسیستم کشاورزی



شکل ۳: نمودار ذخیره - جریان زیرسیستم اقتصادی، اجتماعی

انتقال آب بین حوضه‌ای، ارتباط متقابل آب‌های سطحی، زیرزمینی، تصفیه‌شده، هیدرولوژی منطقه و تأمین آب در منطقه اجزای اساسی و مهم این زیرسیستم را تشکیل می‌دهند. ویژگی‌های اقلیمی و

زیرسیستم عرضه و تقاضای آب: نمودار حلقه علی و معلولی زیرسیستم عرضه و تقاضای آب، متغیرهای چرخه عرضه و تقاضای آب، تأمین آب و اکوسیستم منطقه سیستم را نشان می‌دهد. طرح‌های



شکل ۴: نمودار ذخیره - جریان زیرسیستم عرضه و تقاضای آب

### نتایج و بحث

#### واسنجی و اعتبارسنجی مدل

مدل‌ها نمایشی از حقایق یا تصور و شناخت ما از حقیقت هستند. جهت مفید بودن یک مدل باید ببینیم آیا چیزهایی که در واقعیت دیده می‌شود در مدل وجود دارند. صحت سنجی مدل از طریق مقایسه نتایج مدل با اطلاعات مشاهده‌شده و آزمون شرایط حدی می‌باشد [۱۳]. صحت سنجی مدل توسط روش‌های رسمی و غیررسمی گوناگونی انجام می‌شود. از مرسوم‌ترین آزمون‌های اعتبارسنجی، مقایسه نتایج مدل با اطلاعات مشاهده‌شده (آزمون تکرار رفتار) و آزمون شرایط حدی می‌باشد. توجه به این نکته مهم است که درجه اطمینان‌پذیری از صحت مدل به نگاه مدل‌ساز بر اساس مدل پویا بستگی دارد و به اهداف مدل‌ساز مربوط می‌شود [۱۴].

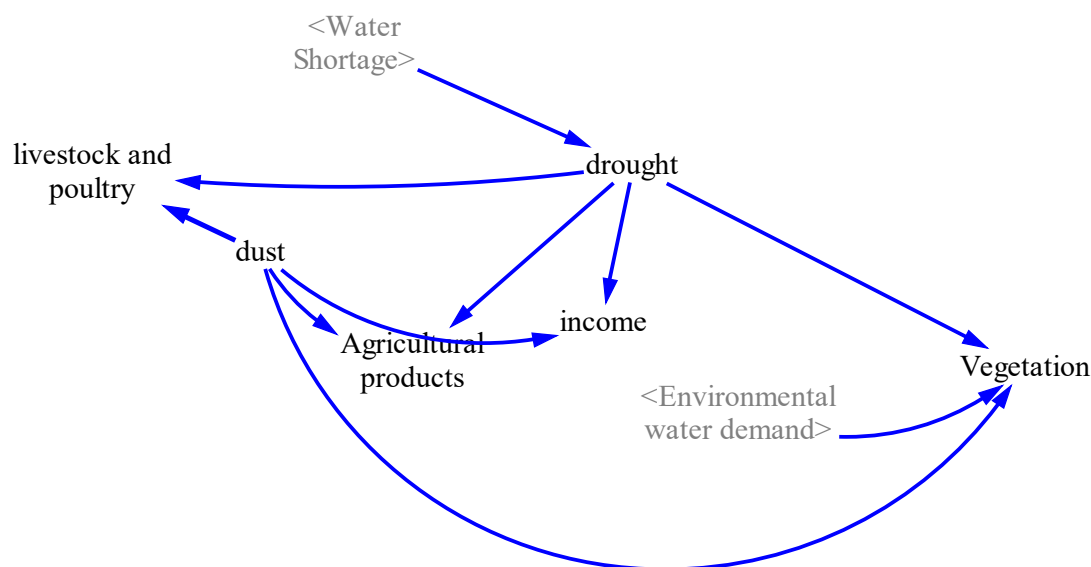
#### آزمون تکرار رفتار

به بررسی نتایج مدل توسط مقایسه داده‌های شبیه‌سازی‌شده مدل با داده‌های مشاهده‌شده پرداخته می‌شود. در آزمون روند داده‌های شبیه‌سازی‌شده با مدل با داده‌های مشاهده‌شده مطابقت داده می‌شود. به دلیل اینکه هرکدام از ابزارهای آماری در جهت مقایسه داده‌های تاریخی و ایجادشده دارای معایب و محاسنی در بررسی‌های آماری است. در ابتدا در این آزمون داده‌های تاریخی و داده‌های ایجادشده رسم شده، سپس آزمون خطا با استفاده از ضریب تعیین  $R^2$  معیار نش- ساتکیف و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) برای ارزیابی عملکرد پیش‌تر مدل انجام می‌شود [۷].

برای ارزیابی بهتر عملکرد مدل، کل سری زمانی به دو مجموعه داده تقسیم می‌گردد. بخش اول، شامل داده‌های ۱۳۹۰-۱۳۸۶ که

عرضه و تقاضای آب منطقه از جمله تخبیر و بارندگی در منطقه می‌باشد. در نمودار حلقه علی و معلولی، دینامیک میان این اجزا با به‌کارگیری از پیکان‌های علامت‌دار نشان داده‌شده است که به شکل روابط علی و معلولی مثبت و منفی علامت‌گذاری شده‌اند. علاوه بر این نمودار علی و معلولی، دخالت‌های انسانی که به منظور تأمین آب شکل می‌گیرد (انتقال بین حوضه‌ای) را نشان می‌دهد که این امر باعث بالا بودن میزان دسترسی به آب به‌منظور فراهم کردن نیاز شرب، صنعت، کشاورزی و سرانجام محیط‌زیست در نظر گرفته‌شده است. نیاز به آب با توجه به حجم بسیار اندک آب‌های زیرزمینی در منطقه سیستم از آب‌های سطحی فراهم می‌گردد. شکل (۴) نمودار ذخیره - جریان زیرسیستم عرضه و تقاضای آب را نشان می‌دهد.

**زیرسیستم زیست‌محیطی:** در این زیرسیستم متغیرهای خشک‌سالی و ریزگرد به‌عنوان متغیرهای اصلی زیرسیستم زیست‌محیطی تعریف‌شده‌اند. منابع آب موجود در منطقه سیستم تحت تأثیر جریان‌ات ورودی رودخانه هیرمند می‌باشد. در شرایط عدم رعایت حق آبه از سمت کشور همسایه و فقدان منابع آب این رودخانه منطقه با کمبود منابع آبی روبه‌رو خواهد شد که خود عامل افزایش پدیده خشک‌سالی و ریزگرد می‌باشد که هرکدام تأثیر بسزایی در کاهش تولید محصولات کشاورزی، کاهش پوشش گیاهی منطقه، افزایش تقاضای آب زیست‌محیطی و آسیب به صنعت دام و طیور دارند. کاهش درآمد ساکنان منطقه ارتباط تنگاتنگی با پدیده خشک‌سالی و ریزگرد دارد و دارای رابطه علی و معلولی مثبت می‌باشد. شکل (۵) نمودار ذخیره - جریان زیرسیستم زیست‌محیطی را نشان می‌دهد.



شکل ۵: نمودار ذخیره - جریان زیرسیستم زیست محیطی

$$RMSE = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 \right]^{0.5} \quad \text{معادله (۳)}$$

که در آن ها،  $y_{mji}$  مقدار داده محاسباتی و  $y_{sji}$  نمایانگر داده مشاهداتی می باشد.  $\bar{y}_{mji}$  و  $\bar{y}_{sji}$  مقدار میانگین داده های محاسباتی و مشاهداتی می باشد.

که در آن  $y_i$  مقدار اندازه گیری شده و  $\hat{y}_i$  مقدار پیش بینی شده برای متغیر مورد نظر از داده های اعتبارسنجی است. شاخص RMSE نیز نشان دهنده میزان دقت پیش بینی است. مقادیر شاخص فوق در بهترین حالت (نااریبی) باید تا حد امکان کوچک و نزدیک به صفر باشد.

#### نتایج آزمون تکرار رفتار

در جدول ۲ مقادیر ضریب تعیین میان داده های شبیه سازی شده تمامی متغیرهای سطح بالاتر از ۷۰ درصد است و تمامی مقادیر در معیار نش - ساتکلیف (NSE) مقدار آن بیش تر از ۰/۰۵ و هم چنین میزان خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) کم تر از ۰/۳ است که این نتایج مبنای مناسبی برای اعتبارسنجی مدل و پیش بینی های ساخته شده با استفاده از مدل ارائه می دهد. اکثر مقادیر مطلوب معیار نش - ساتکلیف (NSE) بیش تر از ۰/۵ و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) عددی نزدیک صفر دارد (جدول ۲). ضریب تعیین ( $R^2$ ) بیش تر از ۰/۸۰ می باشد.

#### نتایج سناریوهای مدیریت منابع آب منطقه سیستان

در ادامه نتایج حاصله از سناریوهای پیشنهادی (اولیه و ترکیبی) بیان گردیده است.

برای مدل کالیبره سازی استفاده می شود و یک مجموعه داده دیگر در سال های ۱۳۹۷-۱۳۹۱ برای اعتبارسنجی مدل استفاده می شود. شش متغیر ذخیره برای انجام کالیبراسیون و اعتبارسنجی، شامل جمعیت کل، دام سبک، دام سنگین، عملکرد محصول، سطح زیرکشت، ذخایر چاه نیمه، سرانه دستمزد خانوار شهری و سرانه دستمزد خانوار روستایی استفاده می شود.

ضریب تعیین نمایانگر میزان احتمال همبستگی بین دو دسته داده ضریب در حقیقت نتایج تقریبی پارامتر مورد نظر در آینده را طبق مدل ریاضی تعریف شده که منطبق بر داده های موجود است بیان می دارد و طبق رابطه زیر محاسبه می شود. این شاخص بین صفر و یک متغیر است.

$$R^2 = \frac{[\sum (y_{mji} - \bar{y}_{mji})(y_{sji} - \bar{y}_{sji})]^2}{\sum (y_{mji} - \bar{y}_{mji})^2 \sum (y_{sji} - \bar{y}_{sji})^2} \quad \text{معادله (۱)}$$

معیار نش - ساتکلیف از رابطه زیر به دست می آید که دامنه تغییرات آن از منفی بی نهایت تا یک را شامل می شود هر چه این معیار به عدد یک نزدیک تر باشد صحت سنجی مدل دقیق تر خواهد بود مقادیر بزرگ تر از ۰/۵ بیانگر عملکرد قابل قبول مدل می باشد.

$$NSE = 1 - \frac{\sum (y_{mji} - y_{sji})^2}{\sum (y_{sji} - \bar{y}_{sji})^2} \quad \text{معادله (۲)}$$

جدول ۲: آزمون‌های مدل پارامترهای آماری

متغیرها	کالیبراسیون				اعتبارسنجی			
	سال	۱۳۸۶	۱۳۸۸	۱۳۹۰	۱۳۹۱	۱۳۹۳	۱۳۹۵	۱۳۹۷-۱۳۹۹
	R <sup>2</sup>	NSE (RMSE)	R <sup>2</sup>	NSE (RMSE)	R <sup>2</sup>	NSE (RMSE)	R <sup>2</sup>	NSE (RMSE)
جمعیت کل	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۶	۰/۹۸	۰/۹۴	۰/۹۱
دام سبک	۰/۹۵	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۶	۰/۹۶	۰/۷۹	۰/۹۲
دام سنگین	۰/۹۶	۰/۸۳	۰/۸۲	۰/۸۳	۰/۹۶	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۸۳
عملکرد محصول	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۸۹	۰/۹۹	۰/۶۹	۰/۸۱	۰/۸۴	۰/۹۳
ذخایر چاه نیمه	۰/۸۰	۰/۹۳	۰/۸۲	۰/۹۳	۰/۵۶	۰/۸۸	۰/۷۷	۰/۸۴
سرانه دستمزد خانوار شهری	۰/۹۷	۰/۷۸	۰/۹۶	۰/۷۸	۰/۸۴	۰/۹۷	۰/۹۹	۰/۹۲
سرانه دستمزد خانوار روستایی	۰/۹۲	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۹	۰/۸۵

زیست‌محیطی نسبتاً صاف است.

**سناریوی رعایت حق آبه هیرمند:** یکی دیگر از سناریوهای موردبررسی رعایت حق آبه ۸۲۰ میلیون مترمکعبی سالانه از سمت کشور افغانستان می‌باشد. طبق نتایج به‌دست‌آمده از اعمال این سناریو در مدل SDM در شکل (۶) ارائه شده است. در زیرسیستم عرضه و تقاضای آب، در سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۱۵ تأمین آب به میزان ۱۰۳۳۷/۲ و ۶۳۱۰ میلیون مترمکعب و ذخایر چاه نیمه به میزان ۱۳۹۳۹/۰۰ و ۹۹۱۳/۳ کاهش یافته است. کمبود کل آب به میزان ۷۰۵/۷۴۰ و ۶۹۴/۸۰۰ افزایش یافته است که این میزان به بخش کشاورزی اختصاص یافته است.

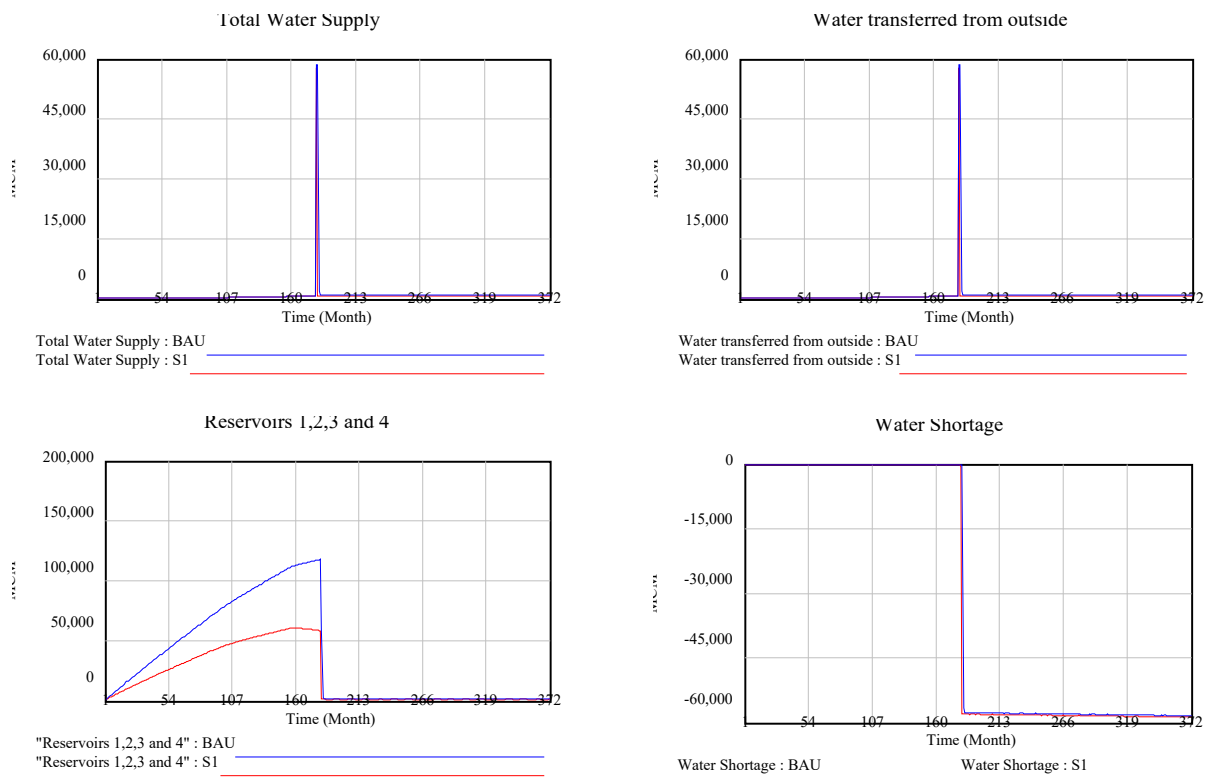
**راندمان آبیاری ۵۰ درصد:** تأثیر افزایش راندمان بر متغیرهای تولید در واحد سطح، الگوی کشت، تقاضای آب کشاورزی در شکل (۷) نشان داده شده است. در این سناریو طبق نتایج به‌دست‌آمده از مدل SDM در زیرسیستم کشاورزی تولید در واحد سطح در سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۱۵ به میزان ۸۴/۰۵۷ و ۱۰۱/۴۸ کیلوگرم در هکتار افزایش یافته است و الگوی کشت در سال‌های ۱۴۱۵ به میزان ۸۱۴۹۲/۰۰ هکتار نسبت به سال پایه کاهش یافته است و تقاضای آب بخش کشاورزی در سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۱۵ به میزان ۱۶۰۳۳ و ۱۴۹۲۸ میلیون مترمکعب کاهش یافته است؛ بنابراین، افزایش راندمان آبیاری بر کاهش تقاضای آب این بخش و کاهش کمبود آب مؤثر است. اگرچه در حالت کلی در منطقه سیستان با

**سناریو پایه:** سناریو یک، ادامه روند شرایط حاضر در منطقه سیستان می‌باشد. بدین معناست که اگر در منطقه موردنظر هیچ فعالیت مدیریتی صورت نگیرد از نظر کشاورزی، اقتصادی، اجتماعی، تأمین و نیاز آبی و زیست‌محیطی در آینده نه‌چندان دور منطقه سیستان چه وضعیتی را به دنبال خواهد داشت. نتایج شبیه‌سازی توسعه آینده تحت سناریو BAU در جدول ۳ نشان داده شده است. در زیرسیستم اقتصادی، اجتماعی در سال ۱۴۱۵ درآمد افزوده شده شهری و روستایی ۸۴/۹۲ و ۲۴۴/۳۲ میلیون ریال می‌رسد که نسبت به سال پایه درصد رشدی معادل ۰/۹۹۹ و ۶۷۰/۸ را دارد.

در زیرسیستم کشاورزی سطح زیرکشت در سال ۱۴۱۵ ۱۰۰۰/۲۸۳۴ هکتار می‌رسد که این مقدار نشان‌دهنده افزایش درصد رشدی معادل ۳۹/۴۶ نسبت به سال پایه است. میزان خودکفایی مواد غذایی نسبت به سال پایه ۲۳/۶۵۳ درصد کاهش یافته است. در زیرسیستم تأمین و نیاز آب، تأمین آب نسبت به سال پایه از ۷۲۳۲۵ به ۱۰۲۷۰ میلیون مترمکعب در سال ۱۴۱۵ رسیده است درصد رشد افزایشی، ۸۵/۰۰ برابری خواهد داشت. با توجه به تأمین و نیاز آب در سال ۱۴۱۵ نسبت به سال پایه با کمبود منابع آب مواجه خواهیم شد که درصد رشدی معادل ۱۰۱۱۸ را دارد. در زیرسیستم زیست‌محیطی با توجه به تأمین و نیاز آبی منطقه سیستان با کمبود منابع آبی مواجه خواهد شد. با توجه به رفتار نیاز منابع آب بالاترین میزان مصرف آب مربوط به بخش کشاورزی می‌باشد و روند نیاز آب و نیاز آب

جدول ۳: مقادیر شبیه‌سازی متغیرهای کلیدی در سناریو BAU

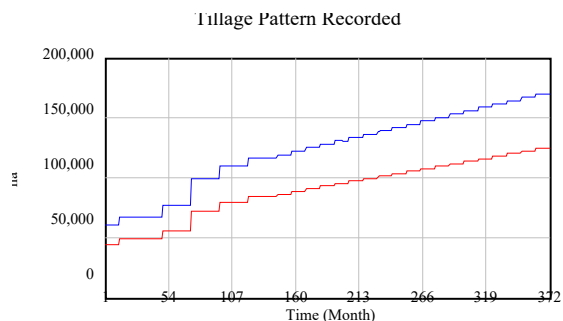
زیرسیستم	متغیرها	واحد	۱۳۸۵	۱۴۰۲	۱۴۱۵	رشد (%)
کشاورزی	سطح زیرکشت	هکتار	۸۴۰/۰۰	۲۰۳/۲۰۰	۱/۴۱۷/۰۴۰	۶۸/۶۹
	نرخ خودکفایی مواد غذایی	درصد	۲۸۴۳/۶	۱۶۵۵/۸	۳۷۲۴/۶	۳۰/۹۸۱
	تولید در واحد سطح	کیلوگرم / سطح زیرکشت	۱۵۶/۵۶	۸۴/۰۵۷	۱۰۱/۴۸	۳۶/۴۰۰
تأمین و نیاز آب	تأمین آب	میلیون مترمکعب	۷۲۳۲۵	۱۰۳۳۷/۲	۱۰۲۷۰	۸۵/۸۰۰
	کمبود آب	میلیون مترمکعب	۰	-۷۱/۸۳۰	-۶۹۴/۸۰۰	۱/۰۱۱۸
اقتصادی، اجتماعی	درآمد افزوده شده شهری	میلیون ریال	۵۴۳/۲۴	۴۸/۰۱۲	۴۸/۴۹۲	۰/۹۹۹
	درآمد افزوده شده روستایی	میلیون ریال	۳۲۴/۱۲	۱۶۷۲/۵	۲۴۴۳/۲	۴۶/۰۸
زیست محیطی	خشک سالی	هکتار	۰	-۶۹۴/۸۰۰	۷۰۵/۷۹۰	۱/۵۸۱
	درآمد	میلیون ریال	۰	-۴۵۷۸/۹	-۴۰۱۲۰۹	-۱۲/۳۶



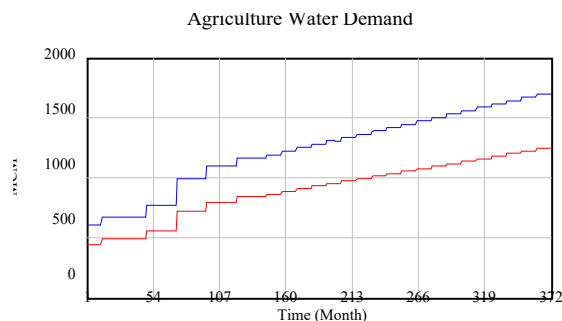
شکل ۶: رفتار متغیرهای ذخایر چاه نیمه، کمبود آب، تأمین آب، انتقال آب به خارج در سناریوی ۱.

می‌تواند در افزایش راندمان آبیاری مؤثر واقع گردد. سناریوی افزایش سطح زیرکشت: در سناریو توسعه سطح زیرکشت طبق سند چشم‌انداز ۱۴۰۴، منطقه سیستان تا سال ۱۴۰۴ به ۲۰۰ هکتار برسد. در نتیجه طبق این سناریو به صورت پنج درصد هرساله به سطح زیرکشت افزایش داده شد. طبق نتایج مدل SDM که شکل (۸) نشان داده شده است در زیرسیستم کشاورزی سطح

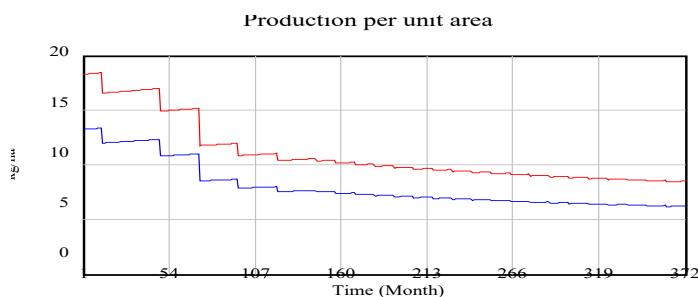
کمبود منابع آبی روبه‌رو هستیم ولی با به‌کارگیری این سناریو کمبود آب به کم‌ترین مقدار می‌رسد. در شرایط کنونی بخش کوچکی از اراضی منطقه با استفاده از سامانه‌های آبیاری مدرن آبیاری می‌شود و بیش‌تر به شیوه انهار سنتی آبیاری می‌گردد. افزایش بهره‌وری مصرف نیازمند برنامه‌ریزی دقیق و سرمایه‌گذاری مناسب می‌باشد. اعمال سیاست‌های تشویقی و حمایتی از طرح‌های بهینه مصرف آب



Tillage Pattern Recorded : BAU  
Tillage Pattern Recorded : S2



Agriculture Water Demand : BAU  
Agriculture Water Demand : S2



Production per unit area : BAU  
Production per unit area : S2

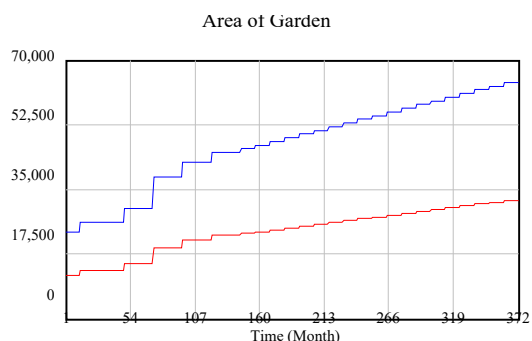
## شکل ۷: رفتار متغیرهای تقاضای آب کشاورزی، تولید در واحد سطح، الگوی کشت در سناریوی ۲.

میزان  $694/800$  و  $705/790$  میلیون مترمکعب کاهش یافته است و به دنبال آن خشک‌سالی در سال‌های  $1402$  و  $1415$  به میزان  $694/800$  و  $705/790$  هکتار افزایش داشته که درصد رشدی معادل  $1/5817$  را دارا می‌باشد. میزان آسیب‌پذیری صنعت دام و طیور و محصولات کشاورزی در سال  $1402$  و  $1415$  به میزان  $18/272$  و  $17/911$  و  $2652/641$  و  $2951/005$  افزایش یافته است و میزان درآمد ساکنان منطقه در سال‌های  $1402$  و  $1415$  به میزان  $4578/9$  و  $4012/9$  میلیون کاهش یافته است. پدیده ریزگرد درصد رشدی معادل  $13/76$  را داشته است.

با توجه به نتایج حاصله از سناریوهای اعمال شده نتیجه می‌گیریم که میزان تقاضا در بخش کشاورزی در سال  $1415$  از  $16033$  به  $20412$  میلیون مترمکعب می‌رسد و بیش‌ترین مقدار تقاضا مربوط به بخش شرب و کشاورزی می‌باشد. نتایج حاصله از راندمان آبیاری

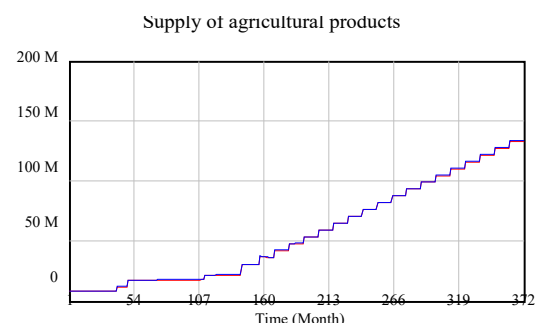
زیرکشت نسبت به وضعیت موجود در سال  $1415$  به میزان  $2834$  افزایش یافته است، از طرفی با افزایش سطح زیرکشت، عرضه محصولات کشاورزی به میزان  $1596$  تن در سال  $1415$  افزایش یافته است. تقاضای آب در بخش کشاورزی در سال  $1402$  و  $1415$  به میزان  $16033$  و  $7465$  کاهش یافته است.

**سناریوی تثبیت ریزگرد:** در منطقه سیستان پنج ماه بحرانی وجود دارد که باد قدرت فرسایش دارد و از لحاظ تولید و پیدایش اهمیت دارند. در هر ماه میزان تبخیر از سطح خاک  $1185$  مترمکعب محاسبه شد. در نتیجه در پنج ماه بحرانی، نیاز آبی برابر  $5975$  مترمکعب در هر هکتار می‌باشد و با مجموع مقدار آب برای اشباع در کل برای هر هکتار در سال  $5975$  مترمکعب آب لازم است. با اعمال این سناریو در مدل SDM نتایج برآورد شده در شکل (۹) نشان داده شده است. در این زیرسیستم کمبود منابع آبی در سال‌های  $1402$  و  $1415$  به



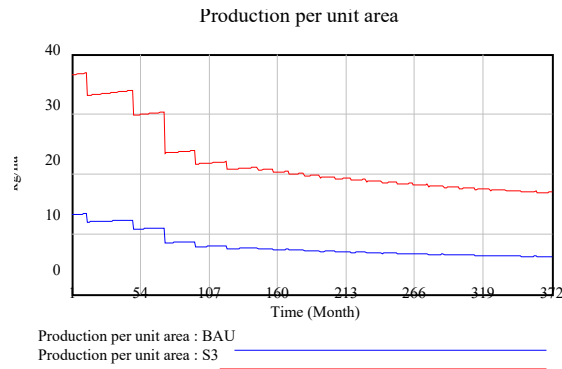
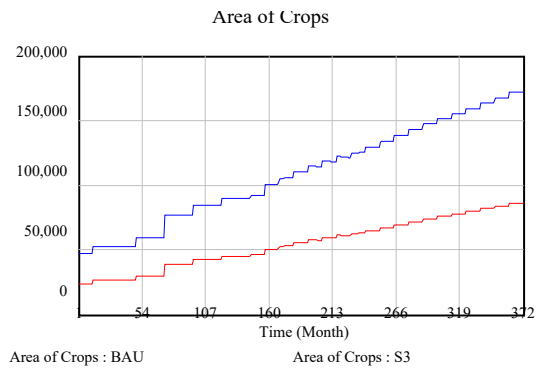
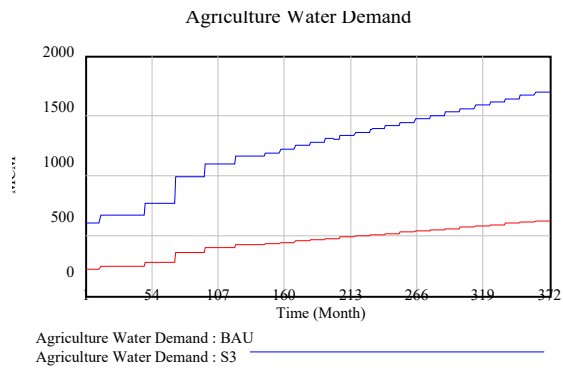
Area of Garden : BAU

Area of Garden : S3

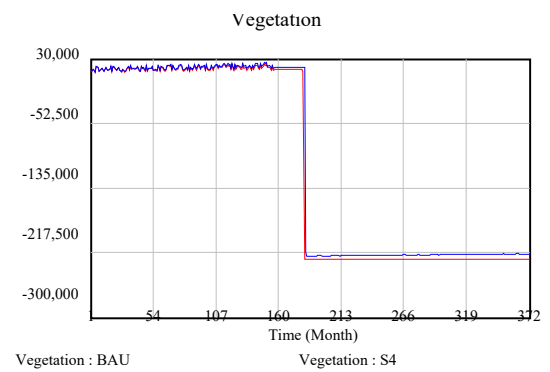
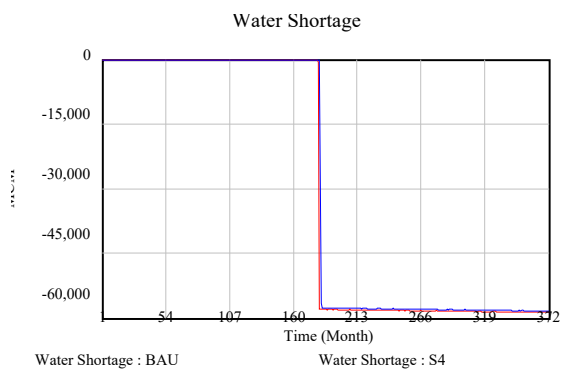
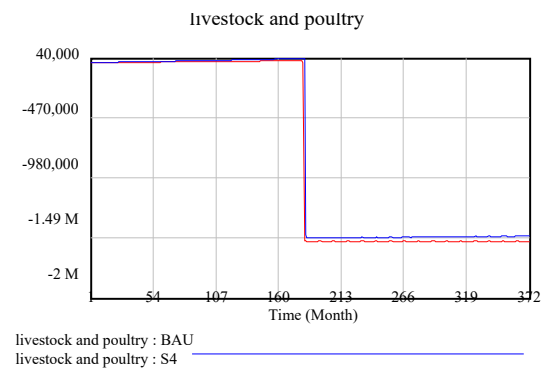
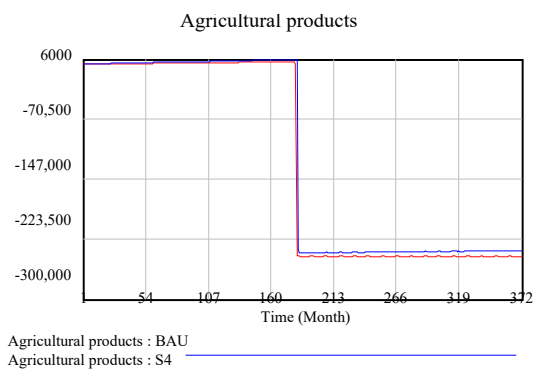


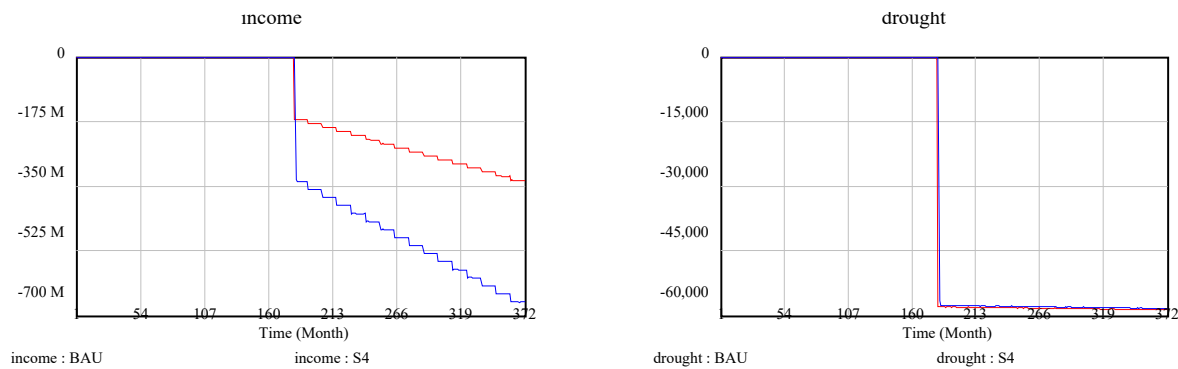
Supply of agricultural products : BAU

Supply of agricultural products : S3



شکل ۸: رفتار متغیرهای سطح زیر کشت، تقاضای آب کشاورزی، تولید در واحد سطح در سناریوی ۳.





شکل ۹: رفتار متغیرهای کمبود آب، خشک‌سالی، پوشش گیاهی، صنعت دام و طیور، درآمد، ریزگرد در سناریوی ۴.

آبیاری و کاهش میزان آب تخصیص‌یافته به هر هکتار در افزایش امنیت منابع آب دارای اهمیت است.

#### منابع

1- An, Z., Yan, J., Sha, J., Ma, Y., and Mou, S. 2021. Dynamic simulation for comprehensive water resources policies to improve water-use efficiency in coastal city. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(20): 25628-25649.

2- Abdi-Dehkordi, M., Bozorg-Haddad, O., Salavitar, A., and Goharian, E. 2021. Developing a sustainability assessment framework for integrated management of water resources systems using distributed zoning and system dynamics approaches. *Environment, Development and Sustainability*, 1-37.

3- Abbasi, A., Niko, A., and Malairi, M. 2018. The challenge of measuring and calculating micro-round settlement on various surfaces, *Iranian Journal of Chemical Engineering*, 38(3) (In Persian)

4- Ali Ahmadi, N., Moradi, A., Hosseini, M., and Sardar Shahraki, A. 2021. Simulation and dynamics of water resources system of Hirmand watershed under management scenarios, *Journal of Water and Soil Protection Research*, 28(1): 23-43 (In Persian).

5- Badie, B., and Hashemi Tabar, H. 2018. Effect of irrigation water pricing and rationing methods on cropping pattern and water demand in Sistan plain. *Water Research in Agriculture*, 33(3): 463-478.

6- Bani Talebi, B. 2021. Accounting information systems from the perspective of system dynamics in the structure of knowledge. *Management Accounting*,

نشان می‌دهد که در میان سناریوهای بررسی شده افزایش راندمان آبیاری در بخش کشاورزی بالاترین میزان تأثیر را بر پایداری منابع آب دارد و نیز نقش بسزایی در کاهش برداشت از منابع و افزایش ذخیره آب خواهد داشت، کمبود آب در زیرسیستم زیست‌محیطی در سال ۱۴۱۵ از ۶۹۴/۸۰۰ به ۷۰۵/۷۰ میلیون مترمکعب می‌رسد که خود عاملی مؤثر برای تشدید پدیده ریزگردها در منطقه می‌باشد. نتایج حاصله از مطالعه حاضر با نتایج مطالعاتی، علی‌احمدی و همکاران [۴]، غفاری مقدم و همکاران [۱۴] و گوهرشاهی و همکاران [۱۳] هم‌خوانی دارد.

#### پیشنهادات

در این مطالعه، باهدف بررسی تأثیرات متقابل زیرسیستم‌های کشاورزی، اقتصادی، اجتماعی، عرضه و تقاضای آب و زیست‌محیطی منطقه سیستان، مدلی جامع طبق پویایی سیستم‌ها بسط داده شد. در این رویکرد، روابط و بازخورد بین متغیرهای موجود در زیرسیستم‌ها با نمودار ذخیره و جریان بیان گردیده شد. نتایج حاصله نشان داد، با توجه به بالا بودن سرانه مصرف آب، بی‌شک در صورت ادامه روند فعلی و سوء مدیریت در مصرف آب در بخش شرب و کشاورزی و عدم رعایت حق آبه از سمت کشور افغانستان، منطقه مورد مطالعه در آینده‌ای نزدیک با بحران‌های جدی منابع آب مواجه خواهد شد و افزایش جمعیت این مشکلات را حادتر خواهد کرد؛ بنابراین پایش و نظارت مستمر بر میزان مصرف آب شرب و به حداقل رساندن تلفات آب در تأسیسات آب‌رسانی و ارتقاء سطح مدیریت تقاضا در جهت استفاده بهتر از این منبع حیاتی می‌تواند به مصرف بهینه منابع آب کمک شایان توجهی نماید. کمبود آب و در پی آن تشدید پدیده ریزگردها باعث کاهش فعالیت‌های کشاورزی و دام‌پروری شده که در نتیجه آن درآمد ساکنان منطقه با مشکلات فراوانی مواجه خواهد شد و سبب افزایش مهاجرت می‌شود؛ بنابراین در راستای نتایج حاصله پیشنهاد می‌شود توجه بیشتر به مدیریت منابع آب به منظور جلوگیری از هدررفت منابع آبی اهمیت و ضرورت دارد و تشویق کشاورزان در زمینه استفاده از فناوری‌های آبیاری برای بهبود راندمان

- 15- Kiani, A., Salari Sardari, F. A., Beyravandzadeh, M., and Darvishi, H. 2022. Analyze and prioritize safety Zabol spaces Analysis and prioritization of environmental security strategies in public spaces of Zabol. *Geographical Studies of Dry Areas*, 4(13): 107-126.
- 16- Kalher, R., and Pour Ali, A. 2019. Strategies to reduce environmental vulnerability caused by fine dust (case study: Zabol). *Passive Air Defense Journal*, 43(3): 102-93 (In Persian)
- 17- Liu, J., Liu, Y., and Wang, X. 2020. An environmental assessment model of construction and demolition waste based on system dynamics: a case study in Guangzhou. *Environmental Science and Pollution Research*, 37259-37237, 27.
- 18- Lu, S., Lia, Z., Sun, H., Wu, X., Bai, X., and Wang, C. 2021. Simulating trans-boundary watershed water resources conflict. *Resources Policy*, 102139, 73.
- 19- Lyra, A., and Loukas, A. 2023. Simulation and evaluation of water resources management scenarios under climate change for adaptive management of coastal agricultural watersheds. *Water Resources Management*, 37(6): 2625-2642.
- 20- Mardanian, S., Zare Bedaki, R., and Abdulahi, Kh. 2020. Optimal allocation of water resources in khanmirza watershed using WEAP. *Iranian Journal of Watershed Science and Engineering*, 14(49): 11-19 (In Persian)
- 21- Nazari, M., Forouzani, M., Yazdanpanah, M., and Bradaran, M. 2018. Explaining the security of farmers' livelihood in dusty conditions in Shush city. *Science and Promotion of Agricultural Education in Iran*, 13(2): 153-169 (In Persian)
- 22- Nouri, S., Shahraki, J., and SardarShahraki, A. 2019. Optimal allocation of water resources in sistan chah-nime reservoirs under the water and soil management scenarios. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(6) (In Persian)
- 23- Rahmani, M., Musavi Jahromi, S. H., and Hassanpour Darvishi, H. 2023. SD-DSS model of sustainable groundwater resources management using the water-food-energy security Nexus in Alborz province. *Ain Shams Engineering Journal*, 1(14) : 14(48): 1-22.
- 7- Chen, Z., and Wei, S. 2014. Application of system dynamics to water security research. *Water resources management* 28(2): 300-287.
- 8- Eidi, A., Kazimieh, F., Zarifian, S. 2019. Identification of factors affecting the sustainable management of agricultural water resources from the perspective of farmers (case study: wheat farmers in the villages of Maragheh city), *Knowledge of Agriculture and Sustainable Production*, 30(4): 326-311.
- 9- Erfani, M., Farashi, A., and Alizadeh, M. 2020. Simulating the state of jungle cat (*Felis chaus* Schreber, 1777) using cross-impact analysis in Sistan (Iran). *Modeling Earth Systems and Environmen* 793-783 , 7.
- 10- Elahi, F., Shahbazbegian, M.R., Hashemi, S.A.K., and Shayan, S. 2019. Analytical analysis of the spatial organization governing the water resources of the Minab plain with the systems dynamics approach. *Environmental Science Quarterly*, 17(4): 231-248 (In Persian)
- 11- Fanteso, B., and Yessoufou, K. 2022. Diversity and determinants of traditional water conservation technologies in the Eastern Cape Province (South Africa). *Environmental monitoring and assessment* (3)194):.14-1
- 12- Firoozi, F., Mahmoudi, P., Jahanshahi, S. M. A., Tavousi, T., Liu, Y., and Liang, Z. 2020. Modeling changes trend of time series of land surface temperature (LST) using satellite remote sensing productions (case study: Sistan plain in east of Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 13(1): 14-1.
- 13- Goharshahi, Gh., Shahraki, J., Sardar Shahraki, A., and Ali Ahmadi, N. 2023. Dynamic analysis of sustainable management of water resources based on the correlation of water, food and energy resources (case study: Madhim and Sarbisheh cities in South Khorasan province). *Scientific Journal of Irrigation and Water Engineering of Iran*, 14(3): 154-174 (In Persian)
- 14- Ghafari Moghadam, Z., Moradi, E., Hashemi Tabar, M., and Sardarshahraki, A. 2021. An analysis of the water crisis in the agricultural sector of Sistan region in different scenarios: a future research approach. *Water Research in Agriculture*, 35(2): 201-216 (In Persian)

- 27- Shahraki, J., Sardar Shahraki, A., and Hashemi Monfared, A. 2017. Evaluating the economic effects of water resource management scenarios in the former watershed. *Agricultural Economics Research*, 10(4): 59-84 (In Persian)
- 28- Yousefi, S., Mirdamadi, S. M., Hosseini, S. J. F., and Lashgarara, F. 2022. Designing an investment model and developing irrigation systems for sustainable management of water resources using a dynamic systems approach. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(11): 10691-10706.
- 29- Zareian, M. J. 2021. Optimal water allocation at different levels of climate change to minimize water shortage in arid regions (Case Study: Zayandeh-Rud River Basin (Iran)). *Journal of Hydro-Environment Research*, 30-13, 35.
- 101812.
- 24- Savari, M., Abdeshahi, A., Gharechae, H. R., and Nasrollahian, O. 2021. Explaining farmers' response to water crisis through theory of the norm activation model: Evidence from Iran. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 102284, 60.
- 25- Shayan, M., Ghanbari, S., Salmanpour, F., Miri, M., and Sanai Ghahi, M. 2017. Investigating the effects of fine dust in the emergence of human settlements challenges in urban space (case study of Abadan city). *Human Settlements Planning Studies Quarterly*, 2(39): 413-431 (In Persian)
- 26- Shahbazi, A. R., Jahantigh, H. A., Shahbazi, A. H., and Nikkhah Nouri, H. 2020. Analyzing the role of environmental capabilities of agriculture without water on the development of rural areas (with an emphasis on Jaliz cooperative cultivation in the Hamon lake bed). *Cooperation and Agriculture*, 255(9): 115-153 (In Persian)



## Abstract

## Comprehensive Dynamic Modeling of Water Resources under Environmental-Economic Scenarios in the Sistan Region

F. Bazi<sup>1</sup>, A. Sardar Shahraki<sup>\*2</sup>, M. Hashemi Tabar<sup>3</sup>, N. Ali Ahmadi<sup>4</sup>

Received: 2024/11/22 Accepted: 2025/01/04

Water resources available to humans in various parts of the world have been widely exploited and the ever-increasing population growth, climate variability and the need for abundant food have put a lot of pressure on this vital resource. Currently, water shortage is one of the major challenges in most countries. The current research in Sistan region has investigated the comprehensive economic modeling of water resources under environmental scenarios in a 31-year horizon (2006-2036) using the system dynamics method and software (DSS Vensim). The results of the research showed that the amount of demand in the agricultural sector in 2015 increased from 16033 to 20412 m<sup>3</sup>, and the highest amount of demand is related to the drinking and agricultural sectors. Increasing irrigation efficiency is effective in reducing the water demand of the agricultural sector and reducing the water shortage. The implementation of the scenario of the development of the cultivated area in the horizon of 1415, the supply of agricultural products has increased by 1596 tons in 1415. Water demand in the agricultural sector has decreased by 16033 and 7465 in 1402 and 1415.

**Keywords:** Dynamic modeling, Economic environmental scenario, Sistan Region, Water resources.

1. PhD student of Agricultural Economics, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

2. Associate Professor of Agricultural Economics, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran. a.s.shahraki@eco.usb.ac.ir

3. Assistant Professor of Agricultural Economics, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

4. Doctoral of Agricultural Economics, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.