نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد ۱۵، مرداد - شهریور ۱۴۰۰، ص. ۵۸۱-۵۶۷

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 3, Vol. 15, Aug.-Sep. 2021, p. 567-581

مقاله علمی - پژوهشی

تحلیل دینامیکی مدیریت پایدار منابع آب مبتنی بر همبست منابع آب-غذا-انرژی

مورد مطالعه: استان خوزستان

محمد جواد کیهان‌پور[۱]، سید حبیب موسوی جهرمی[۲]*، حسین ابراهیمی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۰۳

چکیده

پژوهش حاضر به تحلیل دینامیکی سیاست‌های مدیریت پایدار منابع آب مبتنی بر همبست منابع آب، غذا و انرژی با توجه به تغییرات تقاضای حاصل از رشد جمعیت و رشد اقتصادی در افق بیست‌ساله با استفاده از رویکرد پویایی سیستم پرداخته است. مدل‌سازی و شبیه‌سازی اولیه مدل بر مبنای داده‌های استان خوزستان به‌عنوان یک کلان واحد ساختاری منابع آب-غذا-انرژی و با توجه به ادامه روند وضعیت موجود صورت گرفت. بر اساس نتایج تحلیل حساسیت مونت کارلو مدل، به توسعه سیاست‌گذاری پایداری منابع آب در قالب چهار دسته سیاست شامل: مدیریت تقاضای آب، مدیریت عرضه آب، مدیریت منابع غذا و مدیریت تقاضای منابع انرژی و نیز ترکیب سیاست‌ها در یک سیستم ایده آل پرداخته شد. درنتیجه شبیه‌سازی راه‌کارهای پیشنهادی، ترکیبی از سیاست مدیریت تقاضای آب و مدیریت منابع غذا به‌عنوان بهترین راه‌کار، انتخاب گردید. به‌طوری‌که با توسعه اراضی تحت پوشش شبکه آبیاری تحت‌فشار، بهبود ۱۶ درصدی راندمان آبیاری و اصلاح ۱۰ درصدی الگوی کشت و نیز کاهش ۶ درصدی تلفات محصولات کشاورزی در مدیریت عرضه منابع غذایی و نیز کاهش ۵ درصدی تقاضای غذا ناشی از تلفات غذایی مصرف و افزایش سالیانه ۵ درصدی بهبود عملکرد محصولات به‌عنوان منتخب سیاست‌های مدیریت پایدار منابع آب می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: امنیت منابع، مدل‌سازی پویایی سیستم، مدیریت پایدار منابع آب، همبست آب-غذا-انرژی

مقدمه

سالیانه حدود ۸۰ میلیون نفر به جمعیت جهان افزوده می‌شود و مصرف آب در جهان نیز به‌طور متوسط سالیانه یک درصد افزایش می‌یابد(UN, 2018) . با ادامه روندکنونی مصرف آب در صورت عدم اتخاذ سیاست‌های صحیح، در سال ۲۰۳۰، مردم جهان تنها ۶۰ درصد آب موردنیاز خود را در دسترس خواهند داشت (UNESCO, 2015). طبق برآوردهای فائو، بخش کشاورزی برای تأمین نیاز افزایش جمعیت تا سال ۲۰۵۰ باید تولیدات خود را تا ۶۰ درصد افزایش دهد (FAO, 2011). همچنین بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی، مقدار مصرف انرژی تا سال ۲۰۳۵ حدود ۵۰ درصد افزایش خواهد یافت (IEA,2010). بانک جهانی در رابطه با وابستگی منابع آب و انرژی، عبارت انرژی تشنه را تعریف کرد(WB, 2012) . متخصصان در مجمع جهانی اقتصاد[۴]، در جهت انجام اقداماتی با هدف ارتباط بین آب و توسعه اقتصادی به توافقاتی رسیدند که منجر به ارائه هم بست آب-غذا-انرژی[۵] گردید (Hoff, 2011). اهداف رویکرد همبست بهبود امنیت منابع آب، غذا و انرژی، مشخص کردن مسیر ارتباطات خارجی و تصمیم‌سازی بین بخش‌ها با در نظر گرفتن پیوند بین آن‌ها و پشتیبانی از حرکت به سمت پایداری می‌باشد. امنیت آبی به میزان دسترسی به منابع آب، حفظ منابع آب زیرزمینی و سلامت آب اشاره دارد. امنیت انرژی شامل پیوستگی تأمین انرژی مرتبط با

۱- دانشجوی دکتری رشته عمران-مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر قدس، تهران، ایران
۲- استاد گروه عمران-مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر قدس، تهران، ایران
۳- دانشیار گروه عمران-مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر قدس، تهران، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: Jahromi@gmail.com
DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.3.8.2

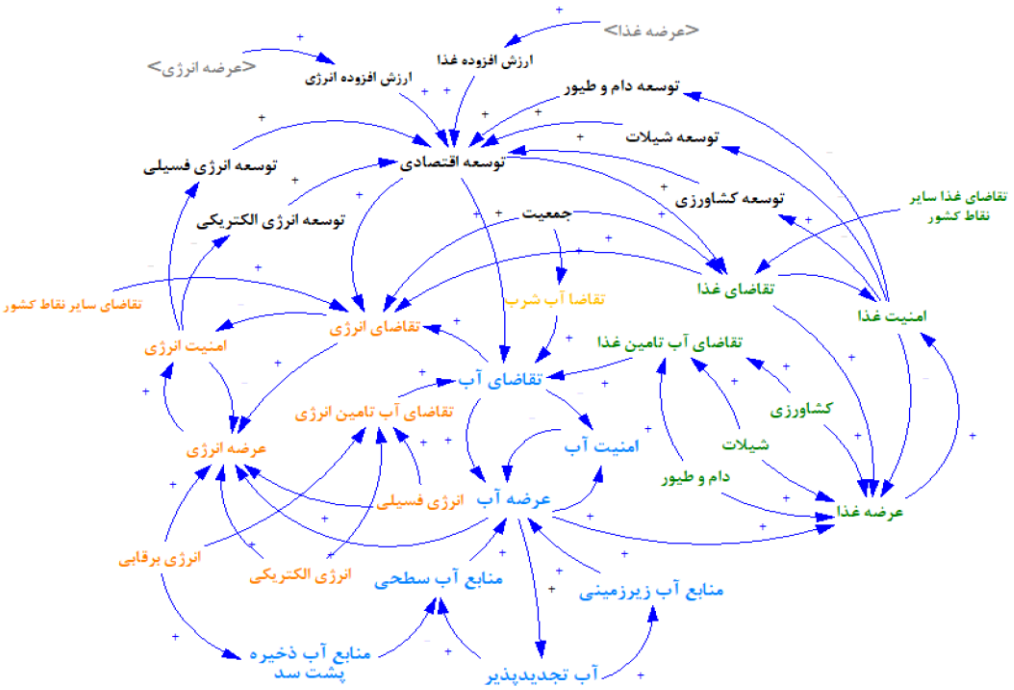
4- World Economic Forum (WEF)
5- Nexus WFE

نیاز، دسترسی به فرآورده‌های انرژی و عرضه کافی انرژی جهت برآوردن تقاضا است. امنیت غذایی دسترسی به غذا، توانایی تأمین غذا و ثبات غذایی در طول زمان را شامل می‌شود. به‌طورکلی در ساده‌ترین مفهوم امنیت آب، غذا و انرژی تعادل بین عرضه و تقاضای منابع درنظر گرفته می‌شود (Bizikova et al., 2013). در حقیقت با استفاده از این رویکرد اثرات تصمیم‌گیری در یک بخش بر روی سایر اجزاء شفاف‌سازی می‌شود و با پیش‌بینی پتانسیل‌ها و هم‌افزایی دانش بین بخشی طراحی، ارزیابی و اولویت‌بندی گزینه‌های مختلف را امکان‌پذیر می‌سازد. با رشد تقاضا، رقابت بر سر منابع نیز افزایش خواهد یافت. کمبود فزاینده و وابستگی منابع، مصرف‌کنندگان رقیب و عدم موفقیت در مدیریت استراتژیک بخش محور، عواملی هستند که می‌توانند اهمیت جدایی‌ناپذیر پیوند بین منابع آب، غذا و انرژی (WFE) را برجسته کنند(Al-Saidi & Elagib, 2017) . در بررسی پیشینه پژوهش، بیشتر مطالعات موجود در زمینه شناسایی پیوندهای بین منابع، به‌طور جداگانه مربوط به پیوند آب و غذا (WF) و یا پیوند آب و انرژی(WE) است. مطالعات پیوند آب و غذا (WF) بسیار شناخته‌شده است. ازآنجاکه کشاورزی برجسته‌ترین مصرف‌کننده است در اکثر حوضه‌های آب، مطالعات گسترده انجام شده است. این مطالعات متمرکز بر جنبه‌های مختلف پیوند از جمله بهینه‌سازی مصرف آب کشاورزی با توجه به سطح زیر کشت (Altherton, 2013; Hung, 2015)، بررسی روابط بین صادرات غذا و آب مجازی (El-Gufi, 2014) و کاهش در استفاده از محصولات با تقاضای زیاد آب و تغییر ترکیب محصول به سمت محصولات کم تقاضای آب و ارزیابی اثرات الگوی مصرف غذا بر روی منابع آب (Du et al., 2015). مطالعات پیوند آب و انرژی (WE) در مقایسه با پیوند آب و غذا، محدود است. این مطالعات مباحث مختلفی از جمله توسعه زیرساخت‌های تصفیه آب (Li, 2014) ، بهبود بهره‌وری انرژی در سیستم‌های تأمین آب و برنامه‌ریزی سیستم‌های پمپاژ برای بهینه-سازی مصرف انرژی (Khiareddine et al., 2018) و تقاضای آب برای نیروگاه برق‌آبی و تولید سوخت‌های زیستی (Pacetti, 2015) و برخی پژوهش‌ها نیز به ارزیابی و برآورد مصرف انرژی در مراحل تأمین آب پرداخته‌اند (Plappally & Lienhard, 2012) و مطالعات دیگری نیز بر مصرف آب برای تولید انرژی تمرکز داشته‌اند: آب مجازی و انرژی (Wang et al., 2015) و آب و انرژی و انتشار کربن و انرژی‌های نو (Zhuang, 2014 ; Jeffers, 2013). علاوه بر پژوهش‌های ذکرشده مطالعاتی که به‌طور هم‌زمان به همبست آب-غذا-انرژی پرداخته‌اند برخی از آن‌ها کیفی و برخی به‌صورت کمی و تعداد محدودی مدل‌سازی و شبیه‌سازی وجود دارد، اکثر آن‌ها در مقیاس مکانی محدود انجام شدند. هاولز و همکاران (۲۰۱۳) مدل کیفی روابط متقابل بین منابع WFE با تأکید بر آب انرژی و کاربری اراضی و اقلیم طراحی کردند (Howells et al., 2013) . داهر و موهتر مدلی را با در نظر گرفتن پیوند آب، زمین، انرژی، ردپای کربن و اقتصاد را توسعه داده است. با استفاده از این ابزار امنیت محور غذا، سناریوهای مختلفی فراهم و تقاضای مواد غذایی در مقیاس ملی مورد ارزیابی دادند(Mohtar & Daher, 2016) . ازآنجاکه این مدل با استفاده از SD[1] توسعه‌نیافته، بازخوردهای زمانی بین عناصر سیستم مورد غفلت قرار گرفت و منابع در یک زمان خاص تحلیل شده‌اند. با توجه به آنکه بحران آب در ایران تحت تأثیر سه عامل عمده رشد سریع و الگوی نامناسب استقرار جمعیت، کشاورزی ناکارآمد و ساختار نامناسب مدیریت منابع و عطش توسعه است (Madani, 2014). عدم برنامه‌ریزی جامع، تصمیم‌گیری‌های بخشی و بین بخشی، اختلاف‌نظر در سیاست‌گذاری منابع آب باعث تشدید مسئله بحران آب در دو دهه گذشته شده است(UNESCO, 2015; Islami & Rahimi, 2019) بر این مبنا پژوهش حاضر به مدل‌سازی پویایی سیستم مدیریت پایدار منابع آب مبتنی بر همبست آب-غذا-انرژی با توجه به روند افزایش تقاضای حاصل از رشد جمعیت و رشد اقتصادی می‌پردازد و در جستجوی سیاست‌های پایدار مدیریت منابع آب در راستای امنیت منابع خواهد بود.

مواد و روش‌ها

مورد مطالعه: استان خوزستان: استان خوزستان دربرگیرنده بخش‌هایی از ۳ حوضه آبریز اصلی کرخه، کارون بزرگ و جراحی – زهره می‌باشد. استان خوزستان ۱۷ درصد از وسعت حوضه کرخه معادل ۸۶۸۳ کیلومتر مربع را دارا می‌باشد .استان خوزستان ۴۳ درصد از وسعت آن را معادل ۲۸۸۷۱ کیلومتر مربع را در بر می‌گیرد. استان خوزستان ۶۱ درصد از وسعت آن را معادل ۲۴۸۳۲ کیلومترمربع را دارا می‌باشد (مطالعات آمایش استان خوزستان، گزارش منابع طبیعی، منابع آب،۱۳۹۱). ساختار اقتصاد استان خوزستان دارای شرایط ویژه‌ای است. بخش صنعت و معدن که شامل نفت نیز هست با حدود ۷۸ درصد از کل تولید ناخالص استان بخش اصلی فعالیت‌های اقتصادی استان را به خود اختصاص داده است (سازمان برنامه‌وبودجه کشور، ۱۳۹۶). خوزستان، حدود ۸۰ درصد نفت خام و ۱۶ درصد گاز کشور را تولید می‌کند و این باعث شده عمده سرمایه‌گذاری نفت در خوزستان باشد (شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب، ۱۳۹۸). از اصلی‌ترین امکانات و قابلیت‌های توسعه استان خوزستان، جاری بودن بخش عظیمی از آب‌های سطحی کشور، برخورداری ۹ سد عظیم احداث‌شده یا در حال احداث در مناطق مختلف استان و امکان استفاده چندمنظوره از آن‌ها به‌منظور توسعه بخش‌های کشاورزی، شیلات، انرژی و تأمین آب شرب است.

1- System dynamics (SD)



شکل ۱- فرضیات دینامیکی مدل مدیریت پایدار منابع آب مبتنی بر همبست آب-غذا-انرژی

از دیگر امکانات استان وجود منابع قابل‌توجه خاک و پوشش گیاهی، برخورداری از اقلیم مناسب و امکان کاشت و برداشت سه نوبت محصولات کشاورزی در بخش وسیعی از استان است که نقش به سزایی در توسعه و پیشرفت منطقه و کل کشور دارد (وزارت جهاد کشاورزی استان خوزستان، ۱۳۹۵).

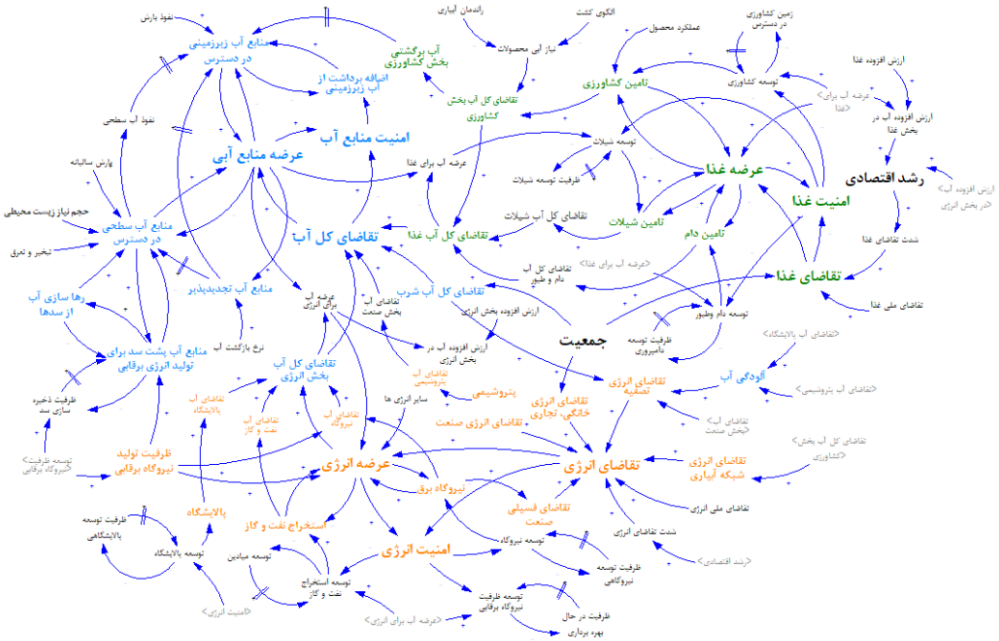
مدل‌سازی پویایی سیستم: پژوهش حاضر مبتنی بر رویکرد پویایی سیستم به مدل‌سازی و شبیه‌سازی مدیریت پایدار منابع آب با استفاده از نرم‌افزار Vensim DSS 6.4E پرداخته است. روش‌شناسی پویایی سیستم گام‌های زیر را در بر می‌گیرد: گام اول: شناسایی و تعریف مسئله، گام دوم: شناسایی فرضیه‌های پویا، گام سوم: نمودار علّی[1] و نمودار جریان، گام چهارم: شبیه‌سازی و اعتبارسنجی مدل، گام پنجم: تعریف سناریوهای مختلف، انتخاب و پیاده‌سازی راه‌حل مناسب (Sterman, 2000). منطبق با روش‌شناسی پویایی سیستم، فرضیه‌های دینامیکی مسئله مدیریت پایدار منابع آب مبتنی بر همبست آب-غذا-انرژی طراحی گردید. شکل ۱ فرضیات دینامیکی پژوهشی حاضر را نشان می‌دهد.

پس از فرموله کردن فرضیه‌های پویا، روابط بین متغیرهای هر زیرسیستم باهم و با دیگر زیرسیستم‌ها در قالب نمودارهای علّی که متشکل از حلقه‌های بازخور مثبت و منفی هستند همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، طراحی گردید.

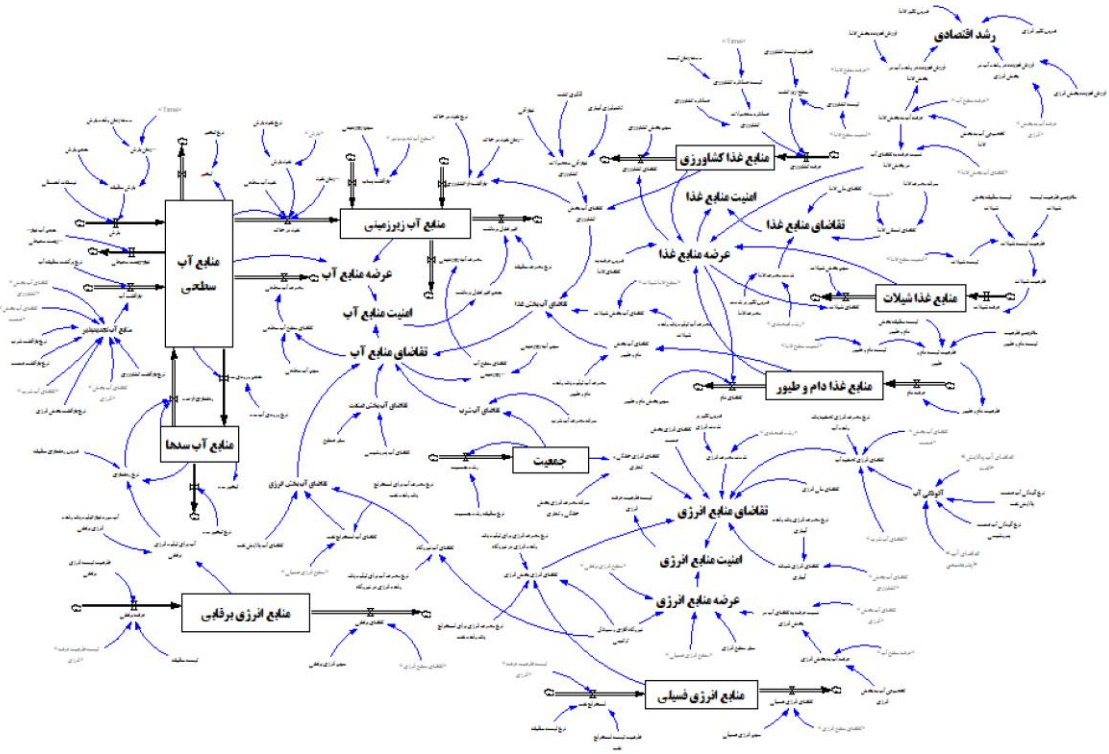
پس از آن به‌منظور ساخت مدل جریان روندهای متغیرها در طول زمان موردتوجه قرار می‌گیرند و با توجه به این روندها و بر اساس قوانین ریاضی و توابع رگرسیونی ارتباط بین متغیرها، فرموله شد. شکل ۳ نمودار جریان مدل مدیریت پایدار منابع آب مبتنی بر همبست آب-غذا-انرژی را نشان می‌دهد. در ادامه نمودار جریان هر یک از زیرسیستم‌ها و جزئیات مدل‌سازی آن‌ها ارائه خواهد شد.

زیرسیستم امنیت منابع آب: همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، این زیرسیستم منطبق با چرخه هیدرولوژیکی آب طراحی شده است. منابع آب سطحی، متغیر انباشت و متغیرهای نرخ بارش، بازگشت آب ناشی از منابع تجدید پذیر و نیز رهاسازی آب از سدها منجر به افزایش نرخ سالیانه منابع آب سطحی می‌گردند و از سوی دیگر تبخیر و تعرق، حجم آب ورودی سدها، مصرف آب سطحی ناشی از تقاضای کل آب، نیاز زیست‌محیطی و نفوذ در خاک و صادرات آب مجازی به‌عنوان نرخ‌های کاهشی منابع آب سطحی در دسترس در نظر رفته شده است. متغیر انباشت دیگر منابع آب زیرزمینی می‌باشد که با نرخ نفوذ در خاک و بازگشت پساب و بازگشت از کشاورزی افزایش و با نرخ مصرف آب زیرزمینی ناشی از تقاضای آب زیرزمینی و نیز حجم غیرقابل‌برداشت کاهش می‌یابد.

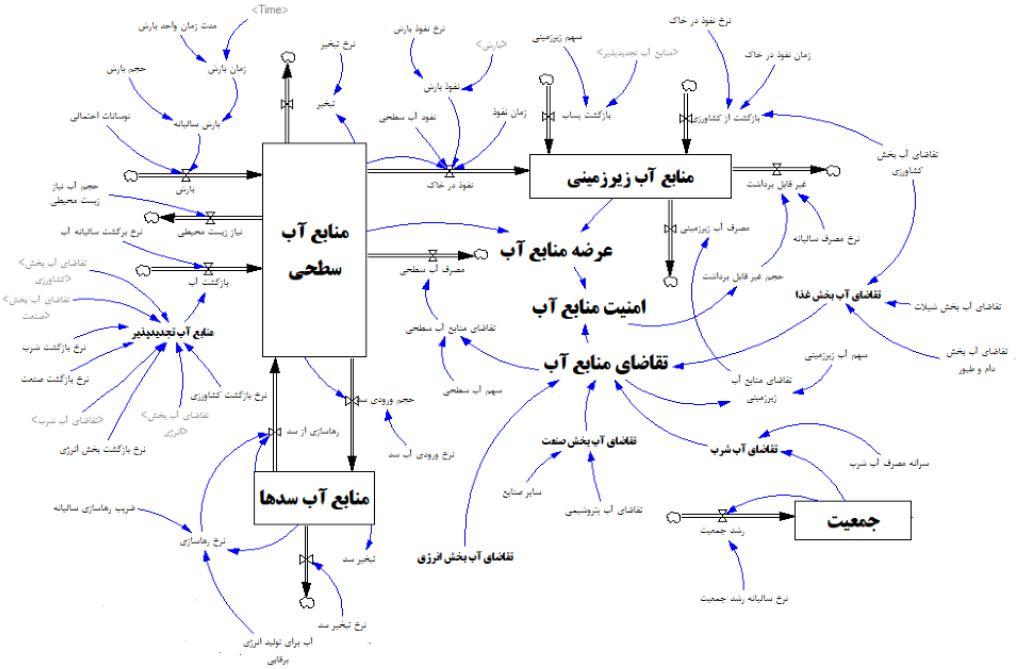
1 Causal diagrams



شکل ۲- نمودار علّی و معلولی مدل مدیریت پایدار منابع آب مبتنی بر همبست آب-غذا-انرژی



شکل ۳- نمودار جریان مدل مدیریت پایدار منابع آب مبتنی بر همبست آب-غذا-انرژی



شکل ٤- نمودار جریان زیرسیستم امنیت منابع آب مدل مدیریت پایدار منابع آب مبتنی همبست آب-غذا-انرژی

تقاضای کل آب ناشی از تقاضای کل آب شرب که به سطح جمعیت و سرانه مصرف آب مرتبط است و نیز ناشی از تقاضای کل آب بخش انرژی و تقاضای آب صنعت به‌جز صنایع بخش انرژی و نیز تقاضای کل آب غذا می‌باشد. عرضه منابع آبی از طریق دو انباشت منابع آب سطحی و منابع آب زیرزمینی تأمین می‌گردد و امنیت منابع آبی اختلاف بین عرضه و تقاضای آب در نظر گرفته شده است. داده‌های بارندگی با توجه به داده‌های تاریخی سه حوضه آبریز از سال ۱۳۶۰ الی ۱۳۹۶ استخراج و با توجه به سهم استان خوزستان از بارندگی سه حوضه آبریز، میانگین بارش حوضه بر اساس روش چندضلعی تیسن[1] (TP) منطبق با معادله (۱) محاسبه گردید که در آن $\bar{P}$ میانگین بارش در سطح حوضه است. i تقسیم‌بندی حوضه را نشان می‌دهد P_i میزان بارندگی در ایستگاه i است و A_i مطابق معادله مساحت ایستگاه i را نشان می‌دهد .

$$\bar{P} = \frac{\sum A_i \times P_i}{\sum A_i} \qquad (۱)$$

زیرسیستم امنیت منابع غذا: همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، عرضه غذا از منابع غذا بخش کشاورزی، بخش شیلات و دام و طیور تأمین می‌گردد. تقاضای غذا متناسب با میزان تقاضای داخلی غذا که ناشی از جمعیت و سرانه مصرف غذا و نیز تقاضای سایر نقاط کشور در محصولات غالب استان (گندم، جو، نیشکر، چغندرقند، خرما، ذرت و گوجه‌فرنگی) است. نرخ تأمین سالیانه بخش کشاورزی از میزان سطح زیر کشت و عملکرد محصول ناشی می‌شود. همین‌طور نرخ تأمین سالیانه بخش شیلات و دام و طیور به‌تناسب ظرفیت این بخش‌ها می‌باشد. امنیت منابع غذا درصورتی‌که از تعادل خارج گردد، به‌اندازه ظرفیت توسعه کشاورزی و ظرفیت توسعه شیلات و ظرفیت توسعه دام تنظیم می‌گردد. سوی دیگر تقاضای کل آب غذا از مجموع تقاضای آب هر سه بخش کشاورزی، دام و طیور و شیلات ناشی می‌شود. بخش کشاورزی به‌عنوان عمده‌ترین تقاضای آب می‌باشد و تقاضای آب در این بخش ناشی از میزان تولید منابع غذایی بخش کشاورزی و نیاز آبی محصولات و شدت مصرف آب در بخش کشاورزی است. شدت مصرف آب کشاورزی ناشی از سه عامل الگوی کشت، راندمان آبیاری و نیاز آبی در این بخش در نظر گرفته شده است. رشد اقتصادی، به‌ویژه رشد سریع تولید ناخالص داخل(GDP) ، می‌تواند به میزان قابل‌توجهی بر تقاضای منابع آب تأثیر بگذارد. مقدار ارزش‌افزوده (VA) در بخش انرژی و در بخش کشاورزی حاصل از تأمین آب، غذا و منابع انرژی نقش مهمی در تولید ناخالص داخلی و رشد اقتصادی دارد. تأثیر رشد ارزش‌افزوده بخش انرژی و بخش غذا بر رشد اقتصادی طبق معادلات (۲-۴) در مدل در نظر گرفته شده است به‌طوری‌که لگاریتم تولید ناخالص داخلی نشان‌دهنده رشد اقتصادی سالیانه است و لگاریتم‌های ارزش‌افزوده بخش‌های انرژی و کشاورزی میزان رشد سالانه ارزش‌افزوده این بخش‌ها را نشان می‌دهد.

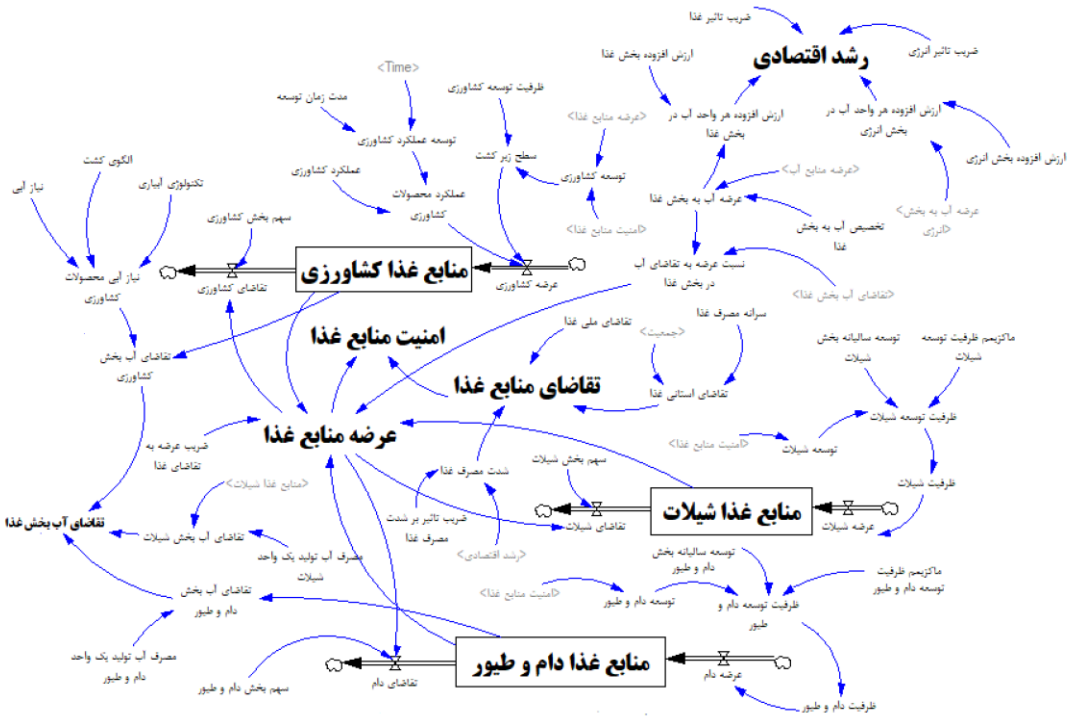
$$log\ GDP = b_0 + b_1 \times \log VA_{Agricalture\ t} + b_2 \times \log VA_{Energy\ t} \qquad (۲)$$

1- Thiessen Polygon

$$Economic\ growth = \frac{\mathrm{GDP}_t - \mathrm{GDP}_{t-1}}{\mathrm{GDP}_{t-1}} \quad (۳)$$

$$VA\ growth = \frac{\mathrm{VA}_t - \mathrm{VA}_{t-1}}{\mathrm{VA}_{t-1}} \quad (۴)$$

ضرایب رگرسیون b1 و b2 بر اساس داده‌های سری زمانی (۲۰۱۱ تا ۲۰۱۶) رشد اقتصادی و رشد ارزش‌افزوده در انرژی و کشاورزی محاسبه شده است. b1 نشان‌دهنده رشد ارزش‌افزوده بخش کشاورزی و b2 تأثیر رشد ارزش‌افزوده بخش انرژی بر میزان رشد اقتصادی است. همچنین، تأثیر رشد اقتصادی بر تقاضای منابع آب در بخش انرژی و بخش مواد غذایی موردتوجه قرار گرفته است.



شکل ۵- نمودار جریان زیرسیستم امنیت منابع غذا مدل مدیریت پایدار منابع آب مبتنی بر همبست آب-غذا-انرژی

زیرسیستم امنیت منابع انرژی: همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، عرضه انرژی از منابع انرژی فسیلی، منابع انرژی برقابی و منابع انرژی نیروگاهی و سایر منابع انرژی تأمین می‌گردد. تقاضای انرژی متناسب با میزان تقاضای داخلی انرژی که ناشی از جمعیت و سرانه مصرف انرژی و شدت مصرف انرژی که تحت اثر توسعه اقتصادی است و نیز تقاضای سایر نقاط کشور است. مهم‌ترین پیوند امنیت منابع انرژی با امنیت منابع آب میزان تقاضای مصرفی آب در استخراج و تولید نفت و نیز آلودگی آب است. در ادامه برخی متغیرها و روابط ریاضی حاکم بر این زیرسیستم مدل در جدول ۱ و نیز برخی مقادیر ثابت مدل در جدول ۲ تشریح می‌گردد.

نتایج و بحث

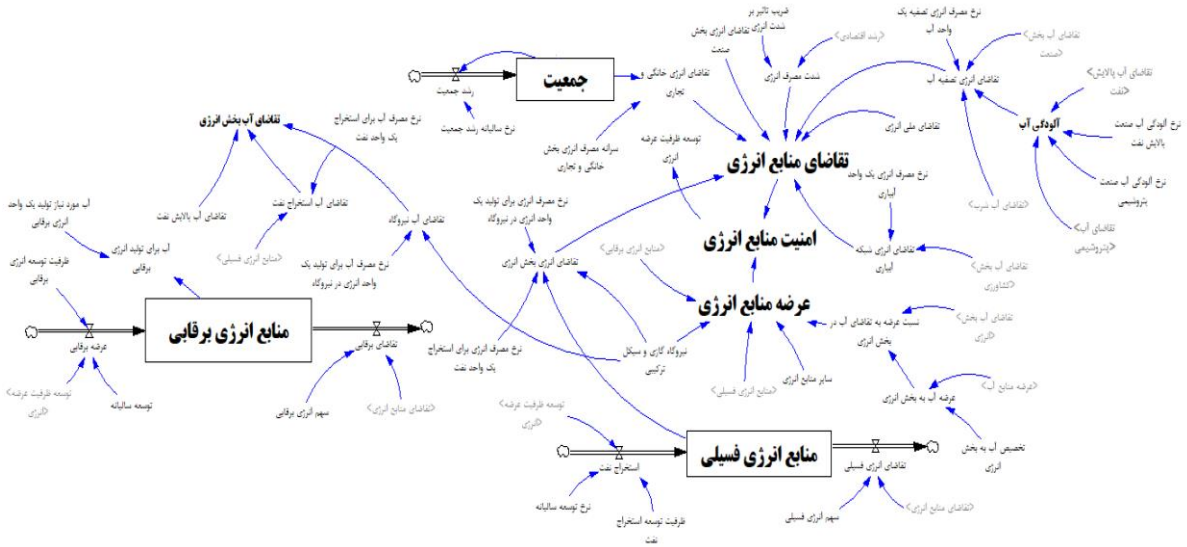
شبیه‌سازی اولیه مدل پویا در افق زمانی ۲۰ ساله صورت گرفته است. سال مبنا در مدل ۱۳۹۰ می‌باشد و از داده‌های سری زمانی ۱۳۹۰ الی ۱۳۹۵ برای ارزیابی اعتبار رفتاری مدل استفاده شده است. جمع‌آوری اطلاعات سری زمانی به استناد نتایج عملکرد وزارت جهاد کشاورزی، وزارت نیرو، سدهای کشور، میزان ارزش‌افزوده با توجه به گزارش‌های مرکز آمار ایران و به سازمان مدیریت برنامه‌وبودجه کشور می‌باشد و نیز شرکت ملی پالایش و پخش فرآورده‌های نفتی، شرکت ملّی مناطق نفت‌خیز جنوب در نظر گرفته شده است. اعتبارسنجی مدل شامل آزمون‌های برازندگی، آزمون سازگاری ابعاد، آزمون شرایط حدی، آزمون تائید پارامتری، آزمون حساسیت پارامتری، آزمون کفایت مرز، آزمون بازتولید رفتار، آزمون خطای انتگرال‌گیری انجام شد شکل ۷ نتایج آزمون خطای انتگرال‌گیری را نشان می‌دهد.

جدول ۱- برخی روابط ریاضی حاکم بر مدل دینامیکی مدیریت پایدار منابع آب مبتنی بر همبست آب-غذا-انرژی

روابط ریاضی متغیرهای زیرسیستم امنیت منابع آب
امنیت منابع آب =عرضه منابع آب-تقاضای منابع آب
عرضه منابع آب=منابع آب زیرزمینی+منابع آب سطحی
تقاضای منابع آب) =تقاضای آب بخش صنعت+تقاضای آب بخش انرژی+تقاضای آب شرب+ تقاضای آب بخش غذا(
منابع آب سطحی) INTEG =بارش+رهاسازی از سد+بازگشت آب-حجم ورودی سد-نیاز زیست محیطی-تبخیر-نفوذ در خاک-مصرف آب سطحی(
منابع آب تجدید پذیر=(تقاضای آب بخش صنعت×نرخ بازگشت صنعت)+(تقاضای آب بخش انرژی×نرخ بازگشت بخش انرژی)+(تقاضای آب بخش کشاورزی×نرخ بازگشت کشاورزی)+(تقاضای آب شرب×نرخ بازگشت شرب)
نرخ رهاسازی)IF THEN ELSE=منابع آب سدها>=آب برای تولید انرژی برقابی،) منابع آب سدها-آب برای تولید انرژی برقابی)/منابع آب سدها،×0 (ضریب رهاسازی سالیانه
آب برای تولید انرژی برقابی=منابع انرژی برقابی× آب موردنیاز تولید یک واحد انرژی برقابی
بارش =بارش سالیانه×نوسانات احتمالی
منابع آب زیرزمینی) INTEG =بازگشت از کشاورزی+بازگشت پساب+نفوذ در خاک-غیر قابل برداشت-مصرف آب زیرزمینی(
بازگشت از کشاورزی)SMOOTH =تقاضای آب بخش کشاورزی×نرخ نفوذ در خاک، زمان نفوذ در خاک(
جمعیت) INTEG =رشد جمعیت،(4.764e+006
تقاضای آب بخش انرژی) =تقاضای آب نیروگاه+تقاضای آب استخراج نفت +تقاضای آب پالایش نفت(
تقاضای آب بخش غذا=تقاضای آب بخش شیلات+تقاضای آب بخش دام و طیور+تقاضای آب بخش کشاورزی
تقاضای آب بخش کشاورزی=منابع غذا کشاورزی×نیاز آبی محصولات کشاورزی
روابط ریاضی متغیرهای زیرسیستم امنیت منابع غذا
امنیت منابع غذا =عرضه منابع غذا-تقاضای منابع غذا
تقاضای منابع غذا =(تقاضای ملی غذا+تقاضای استانی غذا)×شدت مصرف غذا
عرضه منابع غذا)IF THEN ELSE=نسبت عرضه به تقاضای آب در بخش غذا ,1=<منابع غذا شیلات+منابع غذا کشاورزی+منابع غذا دام و طیور, (نسبت عرضه به تقاضای آب در بخش غذا×ضریب عرضه به تقاضای غذا+۱×(منابع غذا شیلات+منابع غذا کشاورزی+منابع غذا دام و طیور(((
منابع غذا کشاورزی) INTEG =عرضه کشاورزی-تقاضای کشاورزی(1.6e+007,
عرضه کشاورزی =سطح زیر کشت×عملکرد محصولات کشاورزی
تقاضای آب بخش کشاورزی=منابع غذا کشاورزی×نیاز آبی محصولات کشاورزی
نیاز آبی محصولات کشاورزی=نیاز آبی×تکنولوژی آبیاری×الگوی کشت
شدت مصرف غذا)+1 =رشد اقتصادی×ضریب تأثیر بر شدت مصرف غذا(
تقاضای آب بخش غذا=تقاضای آب بخش شیلات+تقاضای آب بخش دام و طیور+تقاضای آب بخش کشاورزی
تقاضای آب بخش دام و طیور =منابع غذا دام و طیور×مصرف آب تولید یک واحد دام و طیور
تقاضای آب بخش شیلات =منابع غذا شیلات×مصرف آب تولید یک واحد شیلات
منابع غذا دام و طیور) INTEG =عرضه دام-تقاضای دام(21370,
تقاضای دام =عرضه منابع غذا×سهم بخش دام و طیور
منابع غذا شیلات) INTEG =عرضه شیلات-تقاضای شیلات(43138,
رشد اقتصادی) =ارزش‌افزوده هر واحد آب در بخش انرژی×ضریب تأثیر انرژی)+(ارزش‌افزوده هر واحد آب در بخش غذا× ضریب تأثیر غذا(
روابط ریاضی متغیرهای زیرسیستم امنیت منابع انرژی
امنیت منابع انرژی =عرضه منابع انرژی-تقاضای منابع انرژی
عرضه منابع انرژی)IF THEN ELSE=نسبت عرضه به تقاضای آب در بخش انرژی ,1=<سایر منابع انرژی+منابع انرژی برقابی+منابع انرژی فسیلی+نیروگاه گازی و سیکل ترکیبی, ((نسبت عرضه به تقاضای آب در بخش انرژی)×(1+(سایر منابع انرژی+منابع انرژی برقابی+منابع انرژی فسیلی+نیروگاه گازی و سیکل ترکیبی((
تقاضای منابع انرژی) =تقاضای انرژی‌بخش انرژی+تقاضای انرژی تصفیه آب+تقاضای انرژی خانگی و تجاری+تقاضای انرژی شبکه آبیاری+ تقاضای انرژی‌بخش صنعت+ تقاضای ملی انرژی(شدت مصرف انرژی×
منابع انرژی برقابی) INTEG =عرضه برقابی-تقاضای برقابی(5923,
آب برای تولید انرژی برقابی=منابع انرژی برقابی×آب موردنیاز تولید یک واحد انرژی برقابی
تقاضای آب استخراج نفت =منابع انرژی فسیلی×نرخ مصرف آب برای استخراج یک واحد نفت
تقاضای آب بخش انرژی) =تقاضای آب نیروگاه+تقاضای آب استخراج نفت +تقاضای آب پالایش نفت(
تقاضای آب نیروگاه=نیروگاه گازی و سیکل ترکیبی×نرخ مصرف آب برای تولید یک واحد انرژی در نیروگاه
تقاضای انرژی‌بخش انرژی= نیروگاه گازی و سیکل ترکیبی×نرخ مصرف انرژی برای تولید یک واحد انرژی در نیروگاه
+منابع انرژی فسیلی×نرخ مصرف انرژی برای استخراج یک واحد نفت
منابع انرژی فسیلی) INTEG =استخراج نفت-تقاضای انرژی فسیلی(9e+008,
نسبت عرضه به تقاضای آب در بخش انرژی=تقاضای آب بخش انرژی/عرضه آب به بخش انرژی
تقاضای انرژی شبکه آبیاری =تقاضای آب بخش کشاورزی×نرخ مصرف انرژی یک واحد آبیاری
شدت مصرف انرژی)+1 =رشد اقتصادی×ضریب تأثیر بر شدت انرژی(
تقاضای انرژی تصفیه آب) =تقاضای آب شرب+آلودگی آب+تقاضای آب بخش صنعت×(نرخ مصرف انرژی تصفیه یک واحد آب

جدول ۲- برخی پارامترها و مقادیر ثابت مدل دینامیکی مدیریت پایدار منابع آب مبتنی بر همبست آب-غذا-انرژی

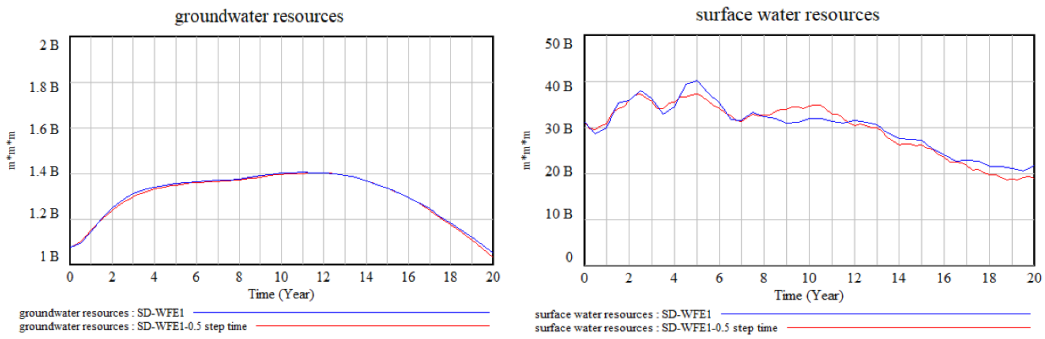
نام متغیر	مقدار	واحد	نام متغیر	مقدار	واحد
سرانه مصرف غذا	0.0418	Ton/Person	تقاضای ملی انرژی	6e+008	Barrel
تقاضای ملی غذا	1e+007	Ton	ضریب تأثیر بر شدت انرژی	0.05	1/Percent
جمعیت	4.764e+006	Person	تقاضای انرژیبخش صنعت	2e+007	Barrel
نیاز زیستمحیطی	3e+009	M^3/Year	سرانه انرژیبخش خانگی و تجاری	26	Barrel/Person
تقاضای آب پالایش نفت	2.7e+007	M^3	نرخ سالیانه رشد جمعیت	0.01	1/Year
نرخ بازگشت شرب	0.7	1/Year	نرخ مصرف انرژی تصفیه یک واحد آب	7e-008	Barrel/(M^3)
نرخ بازگشت صنعت	0.8	1/Year	نرخ آلودگی آب صنعت پتروشیمی	0.8	Dmnl
نرخ تبخیر	0.3	1/Year	سهم زیرزمینی	0.17	Dmnl
منابع آب سدها	1.8e+010	M^3	نیروگاه گازی و سیکل ترکیبی	1298	Barrel
نرخ مصرف آب برای تولید یک واحد انرژی در نیروگاه	5	M^3/ Barrel	نرخ مصرف انرژی برای تولید یک واحد انرژی در نیروگاه	100	Dmnl
نرخ نفوذ در خاک	0.145	1/Year	ظرفیت توسعه استخراج نفت	7.5e+008	Barrel/Year
سرانه مصرف آب شرب	171.87	M^3/Person	نرخ مصرف انرژی استخراج یک واحد نفت	1e-010	Dmnl
منابع انرژی برقابی	5923	Barrel	مصرف آب تولید یک واحد شیلات	10000	M^3/Ton



شکل ٦- نمودار جریان زیرسیستم امنیت منابع انرژی مدل مدیریت پایدار منابع آب مبتنی بر همبست آب-غذا-انرژی

همچنین از نظر رفتاری نیز رفتار متغیرهای مدل مورد تائید خبرگان قرار گرفت. جدول ۳ نتایج آزمون رفتاری با توجه به شاخص حداقل مجذور میانگین مربع نسبت خطا (معادله ۵) برخی متغیر را نشان می‌دهد.

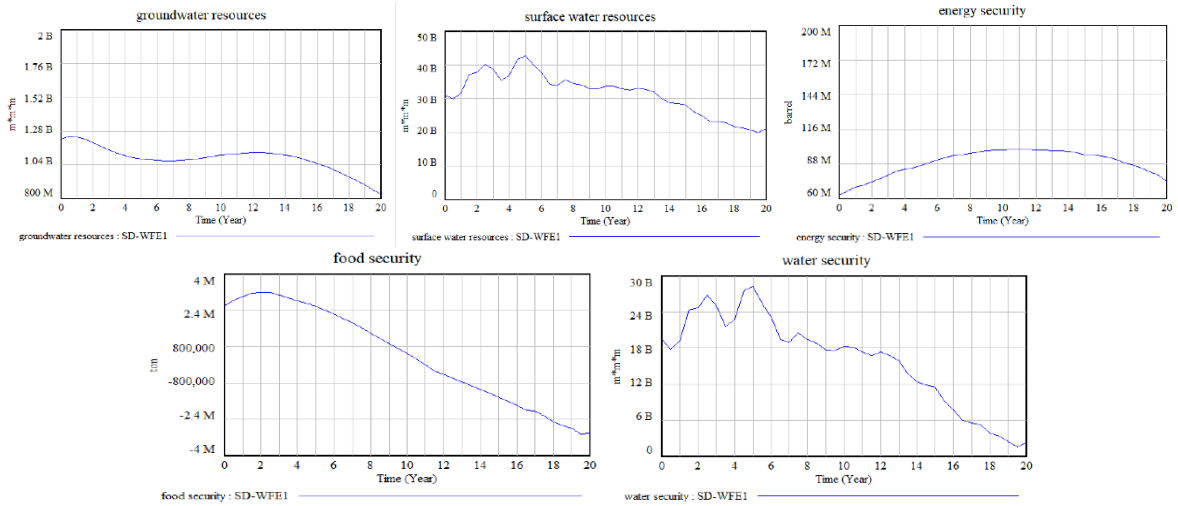
$$RMPSE = \sqrt{1/n \sum_{t=1}^{n} \left(\frac{St-At}{At}\right)^2} \quad (۵)$$



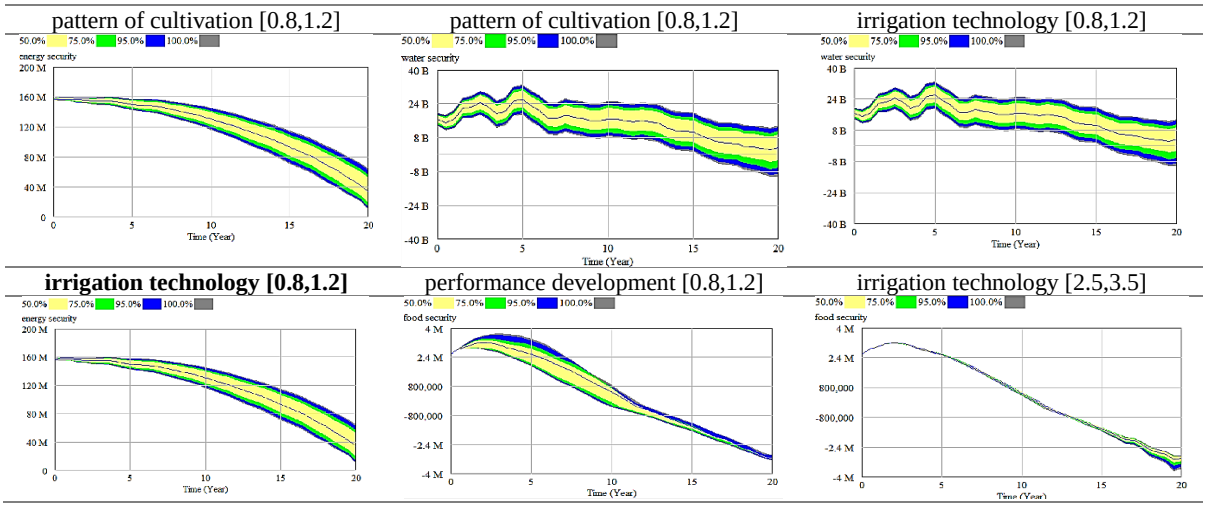
شکل ۷- نتایج اعتبارسنجی مدل: آزمون خطای انتگرال‌گیری

جدول ۳- آزمون اعتبار رفتاری (حداقل مجذور میانگین مربع نسبت خطا) برخی متغیرهای مدل

محصولات کشاورزی	۱۳۹۰	۱۳۹۱	۱۳۹۲	۱۳۹۳	۱۳۹۴	۱۳۹۵	RMSPE[1]
مقدار واقعی	۱۳/۲	۱۳/۵	۱۳/۹	۱۴/۵	۱۴/۵	۱۵/۲	۰/۰۴۳
مقدار شبیه‌سازی‌شده	۱۳	۱۴	۱۴/۷	۱۵/۲	۱۵/۶	۱۵/۹	
جمعیت (میلیون نفر)	۱۳۹۰	۱۳۹۱	۱۳۹۲	۱۳۹۳	۱۳۹۴	۱۳۹۵	RMSPE
مقدار واقعی	۴/۵۳	۴/۵۷	۴/۶۲	۴/۶۷	۴/۷۱	۴/۷۲	۰/۰۰۴
مقدار شبیه‌سازی‌شده	۴/۵۳	۴/۵۷	۴/۶۵	۴/۶۸	۴/۷۲	۴/۷۶	
تقاضای آب کشاورزی	۱۳۹۰	۱۳۹۱	۱۳۹۲	۱۳۹۳	۱۳۹۴	۱۳۹۵	RMSPE
مقدار واقعی (میلیارد مترمکعب)	۱۱/۹۶	۱۲/۵	۱۲/۹	۱۳/۳	۱۴/۲	۱۴/۵	۰/۰۲۱
مقدار شبیه‌سازی‌شده	۱۱/۸۴	۱۲/۷۲	۱۳/۴۱	۱۳/۸۳	۱۴/۱۶	۱۴/۴۵	
تولید نفت خام	۱۳۹۰	۱۳۹۱	۱۳۹۲	۱۳۹۳	۱۳۹۴	۱۳۹۵	RMSPE
مقدار واقعی (میلیون بشکه نفت خام)	۸۰۰	۸۲۵	۸۳۰	۸۵۰	۸۸۰	۹۶۰	۰/۰۲۲
مقدار شبیه‌سازی‌شده	۸۰۰	۸۲۷	۸۵۷	۸۸۰	۹۰۵	۹۳۰	



شکل ۸- رفتار متغیرهای منابع آب سطحی و زیرزمینی، امنیت منابع آب، امنیت منابع غذا و امنیت منابع انرژی در افق شبیه‌سازی



شکل ۹- نتایج تحلیل حساسیت مونت‌کارلو برخی از متغیرهای برون‌زای مدل

1- Root Mean Square Percentage Error (RMSPE)

با پشت سر گذاشتن موفقیت‌آمیز آزمون‌های اعتبارسنجی، شبیه-سازی اولیه در افق ۲۰ ساله انجام شد. در شکل ۸ تغییرات هر یک از متغیرهای کلیدی نمودار جریان که رفتار آن‌ها برای تعیین وضعیت کلی پردازش و اهمیت دارد، ارائه شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در طول افق شبیه‌سازی بیست‌ساله (۱۳۹۵-۱۴۱۵) امنیت منابع آب، غذا روند کاهشی را طی خواهند کرد و امنیت غذا از سال دهم شبیه‌سازی به خطر خواهد افتاد. پس از شبیه‌سازی اولیه، تحلیل حساسیت مونت‌کارلو با ۲۰۰ تکرار و تابع توزیع احتمالی استاندارد انجام شد. با توجه به نتایج تحلیل حساسیت مدل متغیرهایی که بیشترین دامنه تغییرات را ایجاد می-کردند و به‌اصطلاح نقاط اهرمی مدل شناسایی شدند. شکل ۹ این نتایج را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج تحلیل حساسیت مدل و نیز به استناد راهکارهای مدیریت بحران منابع آبی، سیاست‌های مدیریت یکپارچه منابع آب با استفاده از نظر خبرگان و نیز منطبق بر مطالعات و برنامه‌ریزی‌های موجود در واحدهای درگیر مسئله در چهار دسته راهکار شناسایی گردید. سپس با اعمال هر یک از سیاست‌ها در مدل، نتایج بر روی متغیرهای هدف شامل امنیت آب، امنیت غذا و امنیت انرژی سنجیده شد. در ادامه به تشریح سیاست‌های می‌پردازیم.

سیاست مدیریت عرضه منابع آب: این دسته راهکارها متمرکز بر مدیریت عرضه منابع آب طراحی شده است و در صدد است منابع آب در دسترس را افزایش دهند. به‌طوری‌که با کاهش ظرفیت توسعه نیروگاه برقابی که با توجه به روند توسعه سدهای اجرایی در نظر گرفته شده است از ۲.۳ درصد به ۱.۸ درصد در سال از حجم آب ذخیره‌شده در پشت سدهای منطقه کاسته شده و موجب افزایش منابع آب در دسترس می‌گردد. با توجه به اینکه در روندهای توسعه ظرفیت مطابق برنامه‌های توسعه پاسخگویی به تقاضای برق در استان و نیز صادرات برق از استان طراحی شده است، این تغییر به‌گونه‌ای اعمال شده است که ظرفیت نیروگاه‌های برقابی پاسخگوی نیاز درون اکوسیستم خوزستان با توجه به روند افزایش تقاضا باشد. علاوه بر آن با اعمال تغییر افزایش نرخ تجدید پذیری آب در بخش‌های انرژی، صنعت و آب شرب با توجه به تغییرات امکان‌پذیر و قابل پیاده‌سازی نیز وضعیت عرضه منابع آب بهبود می‌گردد. منطبق با گزارش مطالعات منابع آب استان خوزستان، نرخ بازگشت آب شهری حدود ۸۰ درصد است. بر این اساس با توسعه شبکه فاضلاب و تصفیه آب افزایش ۱۰ درصدی نرخ بازگشت امکان‌پذیر خواهد شد. در خصوص تغییرات نرخ بازگشت آب از بخش انرژی و بخش صنعت نیز با توجه به امکان‌پذیری توسعه شبکه پساب صنعتی در بازه حدود ۵ الی ۱۰ درصدی، افزایش حداقل ۵ درصدی در نرخ بازگشت آب در نظر گرفته شد.

سیاست مدیریت تقاضای منابع آب: این دسته راهکارها متمرکز بر مدیریت تقاضای منابع آب طراحی شده است. ازآنجاکه بزرگ‌ترین متقاضی آب بخش کشاورزی می‌باشد. این دسته راهکار متمرکز بر افزایش راندمان آبیاری به‌وسیله توسعه تکنولوژی سیستم آبیاری و زهکشی و نیز اصلاح الگوی کشت محصولات کشاورزی است. روش آبیاری سطحی غالب و روش آبیاری تحت‌فشار غالب برای محصولات زراعی و باغی غالب بنا بر گزارش جهاد کشاورزی استان خوزستان همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود با در نظر گرفتن میزان سطح کشت محصولات زراعی و باغی حدود ۳۲ درصد اختلاف راندمان آبیاری محاسبه شده است. اکنون ۳۰ درصد از اراضی تحت پوشش شبکه آبیاری تحت‌فشار (بارانی، قطره‌ای و کم‌فشار) هستند؛ بنابراین چنانچه سایر اراضی نیز تحت پوشش شبکه آبیاری تحت‌فشار توسعه یابند به میزان حداقل ۱۶ درصد از کل نیاز آبیاری بخش کشاورزی کاسته می‌شود. از سوی دیگر با در نظر گرفتن اصلاحات الگوی کشت در برخی محصولات نظیر برنج، ذرت و گوجه‌فرنگی با توجه به شرایط منطقه و با توجه به امنیت غذایی کشور، میزان آب موردنیاز بخش کشاورزی تا ۱۰ درصد بهره‌ور می-گردد (مطالعات وزارت جهاد کشاورزی استان خوزستان، ۱۳۹۱).

جدول ٤- اطلاعات آبیاری برای محصولات زراعی و باغی غالب و راندمان روش‌های آبیاری سطحی و روش‌های آبیاری تحت‌فشار

نام محصول	روش آبیاری سطحی غالب	(درصد) راندمان آبیاری	روش آبیاری تحت‌فشار غالب	راندمان آبیاری (درصد)
گندم	نواری	۴۰	بارانی	۶۵
جو	نواری	۴۰	بارانی	۶۵
گوجه‌فرنگی	جوی پشته	۴۵	قطره‌ای	۸۵
ذرت	جوی پشته	۴۳	قطره‌ای	۸۵
چغندرقند	جوی پشته	۴۷	قطره‌ای	۸۵
نیشکر	جوی پشته	۳۶	کم‌فشار	۶۰
خرما	نشتی	۴۸	قطره‌ای	۸۵

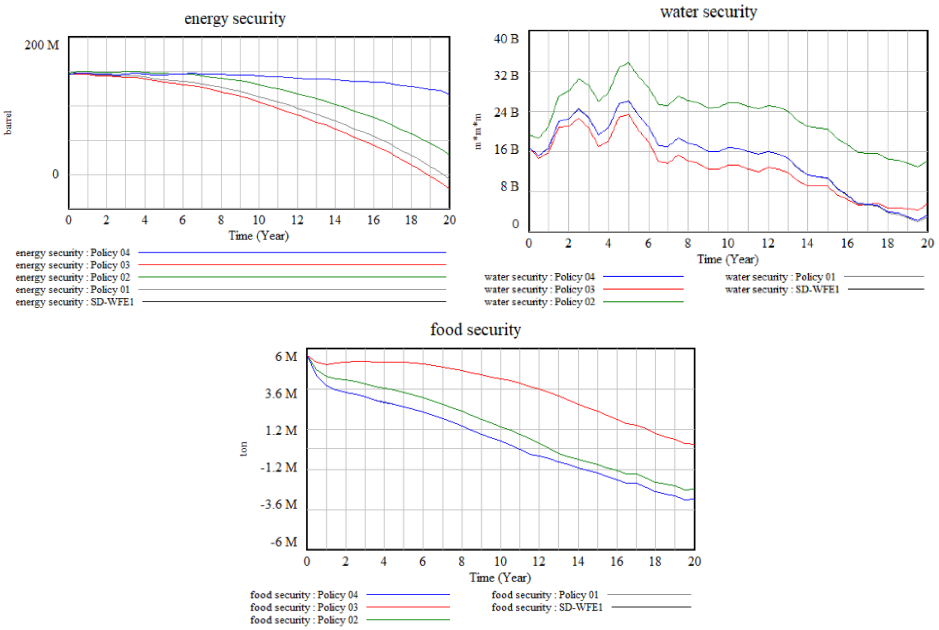
سیاست مدیریت عرضه و تقاضای منابع غذا: میزان شدت تلفات غذایی بنا به گزارش سازمان فائو و جهاد کشاورزی در ایران به‌طور میانگین ۱۲ درصد در مرحله تولید و قبل از برداشت، ۲۵ درصد در مرحله جابه‌جایی، انبار، فرآوری و توزیع و ۱۰ درصد در مصرف می‌باشد. چنانچه با شناسایی تلفات به مدیریت و کاهش آن در مراحل مختلف بپردازیم درواقع منجر به افزایش عرضه منابع غذایی شده‌ایم. مبتنی بر این سیاست مدیریت تلفات تولید با توجه به محصولات زراعی و باغی غالب منطقه شامل گندم و جو ۱۲ درصد در نظر گرفته شد. با توجه به امکان‌سنجی مدیریت تلفات محصولات غذایی، با در نظر گرفتن تحقق مدیریت نیمی از تلفات، تلفات مرحله تولید را از ۱۲ درصد به میزان حداقل به ۶ درصد برسانیم و علاوه بر آن با فرهنگ‌سازی و اصلاح الگوی مصرف منابع غذایی و تحقق مدیریت نیمی از تلفات بتوانیم ۵ درصد از سرانه تقاضای غذا بکاهیم و از سوی دیگر با بهبود ۵ درصدی سالیانه عملکرد تولید محصولات از طریق اصلاح بذر و کود و روش‌های نوین کشاورزی به راهکارهای پایدار امنیت منابع دست خواهیم یافت. مقادیر حداقلی تغییرات این سیاست بر این مبنا انتخاب شده است که امنیت منابع غذا برقرار گردد.

سیاست مدیریت تقاضای منابع انرژی: با توجه به حوضه موردمطالعه، استخراج منابع انرژی فسیلی و نیز صنایع پالایشگاهی فرآورده‌های نفتی و صنایع پتروشیمی بیشترین تقاضای مصرف آب در بخش انرژی را دارا می‌باشند و علاوه بر شدت آب مصرفی این صنایع، آلودگی‌های آب از جمله چالش‌های آینده می‌باشد. عطش توسعه در حوضه خوزستان بر بهره‌برداری هر چه بیشتر از منابع استخراجی نفت و گاز و نیز توسعه صنایع وابسته متمرکز می‌باشد و به دلیل ارزش‌افزوده بالای این صنایع و نقش در رشد و توسعه اقتصادی کشور آثار تخریبی این صنایع نادیده گرفته می‌شود. این سیاست در صدد است با کاهش نرخ آلودگی صنایع جهت کاهش انرژی تصفیه آب و نیز کاهش شدت مصرف انرژی در نیروگاه‌های حرارتی و صنایع پالایشی و پتروشیمی به پایداری منابع دست یابد. بر اساس آمار و اطلاعات ترازنامه هیدروکربوری سال ۱۳۹۵، میزان اتلاف انرژی در نیروگاه‌های حرارتی ۸۰۵ هزار بشکه در روز معادل نفت خام است و به‌طور میانگین حدود ۴۰ درصد از انرژی اولیه عرضه‌شده در کشور، به علت ناکارایی عرضه، پیش از رسیدن به مبادی مصرفی و مصرف‌کنندگان نهایی تلف می‌شود. بر این مبنا در سیاست مدیریت تقاضای انرژی با توجه به مطالعات درزمینهٔ مدیریت انرژی که پتانسیل صرفه‌جویی و جلوگیری از اتلاف انرژی را در صنعت پالایش نفت برآورد کرده است، میزان بهینه‌سازی در هر یک از بخش‌ها در نظر گرفته شده است. جدول ۵ خلاصه سیاست‌های پیشنهادی و تغییرات اعمالی بر روی مدل را نشان می‌دهد.

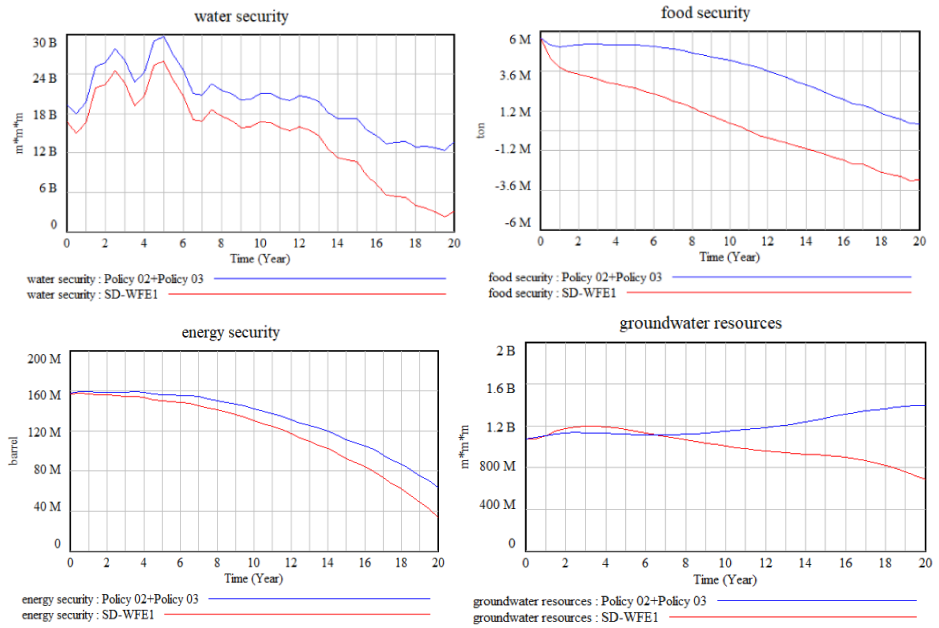
شکل ۱۰ مقایسه بین سیاست‌های اعمالی روی متغیرهای مدل را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود هر یک از سیاست‌ها متمرکز بر توسعه و بهبود منابع آب، غذا و انرژی از یک یا دو منظر هستند و به‌طور هم‌زمان بهبود هر سه منابع آب، غذا و انرژی حاصل نشده است.

جدول ۵- خلاصه سیاست‌های پیشنهادی و تغییراتی اعمالی بر روی مدل

سیاست	تغییر اعمالی بر روی مدل	میزان تغییر
مدیریت عرضه منابع آبی	کاهش ظرفیت توسعه نیروگاه برق‌آبی برای کاهش حجم آب ذخیره‌شده در پشت سدها	٪۲۰ کاهش
	افزایش نرخ بازگشت آب شهر	٪۱۰ افزایش
	افزایش نرخ بازگشت آب بخش انرژی	٪۵ افزایش
	افزایش نرخ بازگشت آب بخش صنعت	٪۵ افزایش
مدیریت تقاضای منابع آبی	اصلاح الگوی کشت	٪۱۰ بهبود
	توسعه راندمان آبیاری با استفاده از تکنولوژی‌های آبیاری تحت‌فشار	٪۱۶ افزایش
مدیریت منابع غذا	کاهش تقاضای غذا با مدیریت تلفات محصولات غذایی	٪۶ کاهش
	کاهش سرانه تقاضای غذ با اصلاح الگوی مصرف	٪۵ افزایش
	بهبود عملکرد تولید محصولات از طریق اصلاح بذر و کود و روش‌های نوین کشاورزی	٪۵ بهبود سالیانه
مدیریت تقاضای انرژی	کاهش میزان اتلاف انرژی در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی و گازی	٪۵ کاهش سالیانه
	کاهش میزان مصرف انرژی در صنعت پالایش نفت با افزایش با مدیریت انرژی	٪۱۰ کاهش
	کاهش میزان مصرف انرژی در صنایع پتروشیمی با مدیریت انرژی	٪۱۰ کاهش
	کاهش میزان مصرف انرژی با کاهش میزان آلودگی آب صنایع پتروشیمی با بهینه‌سازی میزان تولید پساب	٪۱۵ کاهش
	کاهش میزان مصرف انرژی تصفیه با کاهش میزان آلودگی آب پالایشگاه با بهینه‌سازی میزان تولید پساب	٪۱۵ کاهش



شکل ۱۰- نمودار مقایسه سیاست‌های اعمالی روی متغیرهای مدل در افق شبیه‌سازی بیست‌ساله



شکل ۱۱- نمودار مقایسه سیاست ترکیبی مدیریت منابع غذا و مدیریت تقاضای منابع آب در افق شبیه‌سازی بیست‌ساله

پس از اعمال هر یک از سیاست‌ها به‌صورت جداگانه بر روی مدل و نیز اعمال سیاست‌های ترکیبی به‌صورت دوتایی و سه‌تایی، متغیرهای کلیدی مدل بررسی شد و نتایج با یکدیگر مقایسه گردید. بررسی‌ها نشان داد ترکیبی از سیاست‌های ۲ و سیاست ۳ بهترین راهکار برای بهبود امنیت منابع آب، غذا و انرژی برای بیست سال شبیه‌سازی‌شده می‌باشند. شکل ۱۱ نتایج اعمال سیاست ترکیبی مدیریت تقاضای منابع آب و مدیریت منابع غذا را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

همان‌طور که ذکر شد طبق برآوردهای فائو، بخش کشاورزی برای تأمین نیاز افزایش جمعیت تا سال ۲۰۵۰ باید تولیدات خود را تا ۶۰ درصد افزایش دهد (FAO, 2011). همچنین بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی، مقدار مصرف انرژی تا سال ۲۰۳۵ حدود ۵۰ درصد افزایش خواهد یافت (IEA,2010). با رشد تقاضا، رقابت بر سر

منابع نیز افزایش خواهد یافت. هم بست آب-غذا-انرژی رویکرد نوینی در جهت مدیریت پایدار منابع با توجه به توسعه اقتصادی-اجتماعی به شمار می‌رود. کمبود فزاینده و وابستگی منابع، مصرف-کنندگان رقیب و عدم موفقیت در مدیریت استراتژیک بخش محور، عواملی هستند که می‌توانند اهمیت جدایی‌ناپذیر پیوند بین منابع آب، غذا و انرژی (WFE) را برجسته کنند (Al-Saidi & Elagib, 2017).

بنابراین لزوم توسعه ابزاری برای هر منطقه با مرزهای مشخص و متناسب با منابع، مصارف، زیرساخت‌های موجود، شرایط اقلیمی و چالش‌های منطقه موردنظر احساس می‌شود. حوزه موردمطالعه (استان خوزستان) که در تأمین منابع آب و انرژی و غذای کشور نقش بسیار بااهمیتی دارد، در پاسخ به افزایش تقاضای روزافزون ناشی از رشد اقتصادی و افزایش جمعیت لزوم مدل‌سازی راهبردی و بهینه‌سازی تصمیم‌های اتخاذی منابع آبی در سه حوزه آب، کشاورزی و انرژی ضروری است. بر این مبنا در این پژوهش به مدل‌سازی مدیریت پایدار منابع آب پرداخته شد و رفتار سیستم در موقعیت مسئله در افق ۲۰ ساله شبیه‌سازی شد. با استفاده از نتایج تحلیل حساسیت مدل و نظر خبرگان و تصمیم‌گیرندگان راه‌کارهای مطلوب سیستمی و قابل‌اجرا در راستای سیاست‌های پایداری منابع استخراج و تجزیه‌وتحلیل گردید. با توجه به نتایج شبیه‌سازی راه‌کارها و تأثیرات این راه‌کارها در رفتار متغیرهای هدف مدل در بلندمدت، راه‌کارهای زیر به مدیریت پایدار منابع آب منجر خواهند شد:

- توسعه شبکه آبیاری و زهکشی اراضی کشاورزی به‌منظور افزایش ۱۶ درصدی راندمان آبیاری
- اصلاح ۱۰ درصدی الگوی کشت با توجه به شرایط اقلیمی منطقه و امنیت غذایی کشور و کشت با نیاز آبی کمتر
- مدیریت کاهش ۶ درصدی تلفات غذایی قبل از برداشت، حین برداشت و پس از برداشت
- اصلاح الگوی مصرف غذا به‌منظور مدیریت تلفات مصرف و کاهش تقاضای ۵ درصدی غذا
- توسعه ۵ درصدی سالیانه عملکرد محصولات کشاورزی با استفاده از اصلاحات بذر، کاربری کود و روش‌های نوین کشت

برای توسعه مدل در تحقیقات آتی، افزودن متغیر آب مجازی؛ توسعه متغیر اصلاح الگوی کشت در منطقه با توجه به نیاز آبی استاندارد گیاه و شرایط اقلیمی، تجدید پذیری فاضلاب آب شهری با در نظر گرفتن ردپای آب خاکستری، جزئیات مربوط به مهاجرت و کاربری اراضی، اثر انرژی‌های نو و تجدید پذیر در امنیت منابع و کیفیت آب پیشنهاد می‌گردد.

منابع

سازمان برنامه‌وبودجه استان خوزستان. ۱۳۹۱. مطالعات آمایش استان خوزستان -گزارش منابع طبیعی /https://www.mpo-kz.ir

مطالعات پایه منابع آب شرکت مدیریت منابع آب ایران. ۱۳۹۶. http://wrbs.wrm.ir.

مطالعات آمایش استان خوزستان گزارش منابع آب استان. ۱۳۹۲. سازمان برنامه و بوجه. جلد هفتم.

مطالعات آمایش استان خوزستان، گزارش منابع طبیعی، منابع آب استان. ۱۳۹۱. گزارش پشتیبان-جلد هفتم.

Akhtar, M.K., Wibe, J., Simonovic, S.P., MacGee, J., 2013. Integrated assessment model of society-biosphere-climate-economy-energy system. Environ. Modell. Software 49: 1–21.

Al-Saidi, M., Elagib, N.A., 2017. Towards understanding the integrative approach of the water, energy and food nexus. Sci. Total Environ. 574: 1131–1139.

Cooley, H., Heberger, M., Allen, L., Wilkinson, R., 2012. The water-energy simulator (WESim) user Manual. Water Reuse Foundation.

Daher, B.T., 2012. Water, energy, and food nexus: a basis for strategic planning for natural resources. Doctoral dissertation. Purdue University.

Daher, B.T. and Mohtar, R.H., 2015. Water–energy–food (WEF) Nexus Tool 2.0: guiding integrative resource planning and decision-making. Water International. 40 (5–6): 748–771.

Hoff, H. 2011. Understanding the nexus. Background Paper for the Bonn 2011 Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus. Stockholm Environment Institute, Stockholm.

Howells, M., Hermann, S., Welsch, M., Bazilian, M., Segerström, R., Alfstad, T. and Wiberg, D. 2013. Integrated analysis of climate change, land-use, energy and water strategies. Nature Climate Change. 3 (7): 621.

Huang, F., Liu, Z., Ridoutt, B.G., Huang, J. and Li, B. 2015. China's water for food under growing water scarcity. Food Security. 7 (5): 933–949.

IEA. 2010. World Energy Outlook 2010. Paris: OECD/ International Energy Agency

Islami, R. and Rahimi, A. 2019. Policymaking and Water Crisis in Iran. Quarterly Journal of The Macro and Strategic Policies. 7(27): 410-435. doi: 10.32598/JMSP.7.3.5

Khiareddine, A., Salah, C.B., Rekioua, D. and Mimouni, M.F. 2018. Sizing methodology for hybrid photovoltaic/wind/hydrogen/battery integrated to

use, reclamation, and disposal. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 16 (7): 4818–4848.

Sohofi, S.A., Melkonyan, A., Karl, C.K. and Krumme, K. 2016. System archetypes in the conceptualization phase of water-energy-food nexus modeling. Proceedings of the 34th International Conference of the System Dynamics Society.

Sterman, J. 2002. System Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world. Massachusetts Institute of Technology. Engineering Systems Division.

UN, The United Nations World Water Development Report. 2018: Nature-Based Solutions for Water, 2018, Available at: http://unesdoc.unesco.org/images/0026/002614/261424e.pdf.

UNESCO, the United Nations World Water Development Report. 2015. Water for a Sustainable World. Paris, 2015.

Wang, S., Cao, T., Chen, B., 2017. Water–energy nexus in China's electric power system. Energy Procedia. 105: 3972–3977.

Zhuang, Y. 2014. A System Dynamics Approach to Integrated Water and Energy Resources Management.

energy management strategy for pumping system. Energy 153, 743–762.

Li, X. 2014. Understanding the water-energy nexus: a case study of Ningxia. Master Thesis. Uppsala University.

Madani, K. 2014. Water management in Iran: what is causing the looming crisis? Journal of Environmental Studies and Sciences. 4(4): 315–328. https://doi.org/10.1007/s13412-014-0182-z

Melkonyan, A., Krumme, K., Gruchmann, T. and De La Torre, G., 2017. Sustainability assessment and climate change resilience in food production and supply. Energy Procedia. 123: 131–138.

Mohtar, R.H. and Daher, B. 2016. Water-energy-food nexus framework for facilitating multistakeholder dialogue. Water International. 41 (5): 655–661.

National Iranian Oil Products Distribution Company (NIOPDC), 2014. Petroleum Products Consumption Statistics. Ministry of Petroleum, Iran (In Persian).

Pacetti, T., Lombardi, L. and Federici, G. 2015. Water–energy Nexus: a case of biogas production from energy crops evaluated by Water Footprint and Life Cycle Assessment (LCA) methods. The Journal of Cleaner Production. 101: 278–291.

Plappally, A.K. and Lienhard V, J.H. 2012. Energy requirements for water production, treatment, end

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 3, Vol. 15, Aug.-Sep. 2021, p. 567-581

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد ۱۵، مرداد - شهریور ۱۴۰۰، ص. ۵۸۱-۵۶۷

Dynamic Analysis of Sustainable Water Resources Management Based on Water-Food-Energy Nexus Case Study: Khuzestan Province

M.J. Kayhanpour[1], S.H. Mousavi-Jahromi[2,*], H. Ebrahimi[3]
Recived: Jan.15, 2020 Accepted: Mar.23, 2021

Abstract

The present study dynamically analyzes the policies of sustainable water resources management based on the security of water, food and energy resources of Nexus with respect to changes in demand resulting from population growth and economic growth over a 20-year horizon using the system dynamics approach. The initial modeling and simulation of the model was performed based on the data of Khuzestan Plain as a large structural unit of water-food-energy resources and according to the continuation of the current situation. Based on the results of Monte Carlo Sensitivity Analysis, the model develops water resources sustainability policy in the form of four policy categories including: water demand management, water supply management, food resource management and energy demand management, as well as combining policies in an ideal system. As a result of simulating the proposed solutions, a combination of water demand management policy and food resource management was selected as the best solution. So that with the development of lands covered by pressurized irrigation network, 16% improvement of irrigation efficiency and 10% modification of cultivation pattern and also 6% reduction of agricultural crop losses in food supply management and also 5% reduction of food demand due to food losses An annual increase of 5% improves crop performance as a selection of sustainable water resources management policies.

Keywords: Resource Security, System Dynamics Modeling, Sustainable Water Resources Management, Water-Food-Energy Nexus

1- PhD Candidate, Department of Civil Engineering, Engineering and Management of Water Resources, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2- Professor, Department of Civil Engineering, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
3- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
(*- Corresponding Author Email: h-mousavi@srbiau.ac.ir)