

بهینه‌سازی تخصیص آب در دسترس بر مبنای شاخص پایداری آب زیرزمینی در حوضه آرازکوسه با استفاده از رویکرد پویایی سیستم

زینب محمودی^۱، عبدالرضا بهره‌مند^{۲*}، خدایار عبدالهی^۳، رسول میرعباسی^۴، امیر سعدالدین^۵، شاپور کوهستانی^۶ و
چوقی بایرام کمکی^۷

چکیده

حفظ تعادل مناسب بین مسائل زیست‌محیطی و تقاضاهای انسانی و بهره‌برداری بهینه از منابع، تحت تقاضاهای پیچیده در یک حوضه و یا یک آبخوان نیازمند استفاده از تکنیک‌های ریاضی است. در این راستا ترکیبی از دو تکنیک قدرتمند تجزیه و تحلیل، شامل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی در فرآیند تصمیم‌گیری و مدیریت جامع، پایدار و بهینه اقتصادی پروژه‌ها بسیار مؤثر و راهگشاست. در این پژوهش، شبیه‌سازی سیستم منابع آب حوضه آرازکوسه با استفاده از مدل پویایی سیستم در محیط نرم‌افزار VENSIM بر اساس روابط علی و معلولی انجام و بر اساس معادله بیلان آب حوضه، میزان آب در دسترس حاصل از منابع آب سطحی و زیرزمینی تخمین زده شد. محاسبه نیاز آبی در مصارف مختلف شرب، محیط‌زیست، کشاورزی و صنعت انجام و بر اساس نیازها و آب در دسترس، مقدار عرضه آب به مصارف مختلف محاسبه شد. با استفاده از تکنیک برنامه‌ریزی خطی، بهینه‌سازی منابع آب با دو هدف حداکثرسازی سود اقتصادی حاصل از سطح زیرکشت و حداقل‌سازی آب مصرفی در بخش کشاورزی، انجام شد. نتایج حاصل نشان داد که ۷۵ درصد تأمین آب مورد نیاز در مصارف مختلف به‌ویژه کشاورزی در حوضه از آب زیرزمینی تأمین می‌شود؛ درحالی‌که آب در دسترس حاصل از منابع آب سطحی تقریباً دو برابر بیشتر از آب زیرزمینی است. این موضوع نشان می‌دهد که علی‌رغم اینکه بخشی از آب تغذیه شده ممکن است زمانی نقش رواناب داشته باشد؛ اما حجم زیادی از آب در دسترس حوضه به شکل رواناب از دسترس خارج می‌شود. لذا تأمین آب مورد نیاز مصارف مختلف به استفاده بیش از حد از ذخایر آب زیرزمینی منجر می‌شود. همچنین بررسی اثر بهینه‌سازی مصرف آب در بخش کشاورزی، بر شاخص پایداری آب زیرزمینی، نشان داد که این شاخص از مقدار ۱۴/۴ در وضعیت فعلی به مقدار ۱/۹ در شرایط بهینه آب مورد نیاز کشاورزی تغییر می‌کند.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی خطی، تخصیص منابع آب، حوضه آرازکوسه، نرم‌افزار ونسیم.

ارجاع: محمودی ز. بهره‌مند ع. عبدالهی خ. میرعباسی ر. سعدالدین ا. کوهستانی ش. و بایرام کمکی ج. ۱۳۹۹. بهینه‌سازی تخصیص آب در دسترس بر مبنای شاخص پایداری آب زیرزمینی در حوضه آرازکوسه با استفاده از رویکرد پویایی سیستم. مجله پژوهش آب ایران. ۳۸: ۴۵-۵۹.

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

۳- استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد.

۴- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۵- دانشیار گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

۶- استادیار گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جیرفت.

۷- استادیار گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

* نویسنده مسئول: abdolreza.bahremnd@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۱۲

مقدمه

افزایش روزافزون تقاضای آب به دلیل رشد جمعیت، پیشرفت صنعتی و کشاورزی در دنیای امروز امری اجتناب‌ناپذیر است و از طرفی، محدودیت منابع آبی و اصل پایداری در مدیریت آن، تأمین آب کلیه نیازهای موجود را غیرممکن ساخته است. برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، کاهش بارش و بروز خشک‌سالی در اکثر نقاط جهان و آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی، بر شدت کمبود منابع آب قابل استفاده افزوده‌اند؛ بنابراین، استفاده از این منبع حیاتی مستلزم اعمال مدیریت صحیح است (صادقی و همکاران، ۱۳۹۰). یکی از نیازهای اصلی برنامه‌ریزی دقیق در مورد مسائل آب، پیش‌بینی در مورد تقاضا و آشنایی به عوامل و ابزارهای مؤثر بر تقاضا است. نیازهای روزافزون به آب بر اثر رشد جمعیت، محدودیت منابع آب قابل استحصال در کشور، هزینه سنگین طرح‌های جدید توسعه منابع آب و از طرف دیگر، آثار زیست‌محیطی و اجتماعی آن‌ها از جمله دلایلی هستند که مدیریت تقاضا و تولید آب را به‌عنوان دو راهکار مؤثر بر مدیریت جامع منابع آب مطرح و ضروری می‌کند (محمودی و سرلک، ۱۳۸۷). از میان مدل‌های متعدد در مدیریت منابع آب برخی از مدل‌ها دارای خصوصیات پویایی هستند. در این مدل‌ها درک مسائل و تغییرات به‌صورت حلقه‌ای و بازخورد^۱ است. هدف عمده این روش‌ها شبیه‌سازی رفتار سیستم‌ها در وضعیت فعلی و آینده برای تسریع و تسهیل یادگیری است. روش پویایی سیستم‌ها در مقایسه با دیگر روش‌های تحلیل سیستم‌ها ساده و مؤثر است و در شرح سیستم به ریاضیات پیچیده نیاز ندارد. این روش را ابتدا توسط فورستر برای درک بهتر مسائل استراتژی در سیستم‌های دینامیکی پیچیده ابداع کرد (فورستر، ۱۹۶۱؛ استرمن، ۲۰۰۰؛ شیخ‌خوزانی و همکاران، ۱۳۸۹).

تفکر سیستمی^۲ روشی برای درک شهودی از اشیا، سیستم‌ها و نیز الگوهای رفتاری آن‌هاست. تفکر سیستمی در صدد فهم کل سیستم و اجزای آن، روابط بین جزء و کل و روابط بین کل با محیط آن است (مرعشی و همکاران، ۱۳۸۸). روش پویایی سیستم^۳ یک تکنیک

مدل‌سازی و شبیه‌سازی است که مخصوصاً برای مسائل مدیریتی طولانی‌مدت، مزمن و پویا طراحی می‌شود. علم پویایی سیستم، یک ابزار مدیریتی است که قادر به شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده منابع آب می‌باشد. به کمک این روش می‌توان ارتباط بین عناصر مختلف سیستم را به‌صورت روابط علت و معلولی درآورد و نیز امکان مدیریت پارامترها و ساختارهایی که برای بهبود رفتار نیاز به تغییر دارند، میسر می‌شود (استرمن، ۲۰۰۰). نرم‌افزار VENSIM از جمله ابزارهای قدرتمند در مطالعه سیستم‌های منابع آب است. این نرم‌افزار، نوعی ابزار مدل‌سازی تصویری است که قادر به مجسم کردن، پردازش، بهینه‌سازی و تحلیل سیاست‌های پیچیده سیستم‌های منابع آب و مدل‌های مربوط به سیستم‌های پویا است. از نرم‌افزار VENSIM برای شبیه‌سازی تخصیص منابع آب حوضه و طرح‌های توسعه منابع آب نیز استفاده می‌شود. به‌کمک این روش شبیه‌سازی، یادگیری رفتار سیستم‌ها در وضعیت فعلی و آینده تسریع و تسهیل و نیز پیامدهای نامشخص تصمیم‌گیری‌ها آشکار می‌شود.

اولین مدل شبیه‌سازی برای سیستم مخازن آب سطحی را مهندسان ارتش آمریکا در سال ۱۹۵۳ برای مطالعات بهره‌برداری شش مخزن روی رودخانه میسوری طراحی کردند. سیمونویچ (۲۰۰۳) مدل Canada Water را برای کل منطقه کانادا و قسمتی از کشور آمریکا در اطراف جزایر بزرگ به وسعت ۱۰ میلیون کیلومتر مربع مدل‌سازی کرد. سیمونویچ و احمد (۲۰۰۰) با استفاده از روش پویایی سیستم بهره‌برداری از یک مخزن را برای سال پرآبی و چندین سیلاب رخ داده برای یک سد بررسی و رفتار مخزن را در برابر سیلاب شبیه‌سازی کردند. شن و همکاران (۲۰۰۵) از برنامه‌ریزی دینامیک برای تعیین شیوه ایجاد مدیریت یکپارچه منابع آب زمینی، آب و هوا در سطح حوضه‌های آبخیز استفاده کردند. از جمله تحقیقات انجام شده در این زمینه در خارج از کشور می‌توان به مطالعات وینز (۲۰۰۵)، چانگ و همکاران (۲۰۰۷)، لی و همکاران (۲۰۱۲)، چن و همکاران (۲۰۱۴) و ماشالی و فرنالد (۲۰۲۰) اشاره کرد. از جمله مطالعات انجام شده در ایران می‌توان به مدنی و مارینو (۲۰۰۹) مدیریت روابط متقابل مختلف اجتماعی، اقتصادی، سیاسی و فیزیکی در حوضه زاینده‌رود، صلوی تبار و همکاران (۱۳۸۵) مدیریت آب شهری در تهران، گلیان و همکاران

1- Feedback

2- System Thinking

3- System Dynamic approach

(۲۰۱۵) استفاده تلفیقی آب‌های سطحی و زیرزمینی را برای بسیاری از مناطق جهان مفید دانستند و با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی، تخصیص منابع آب و خاک را به بخش‌های مختلف حوضه بهینه کردن. کاظمی کرانی و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از روش‌های الگوریتم ژنتیک تصادفی و آشوبناک (تنت، هنون، لجستیک) به بررسی استفاده بهینه از منابع آبی در حوضه کویر درانجیر برای تعیین الگوی کشت مناسب در راستای توسعه پایدار پرداختند. تحلیل نتایج عددی حاصل از پژوهش آنان، قابلیت بهتر الگوریتم ژنتیک تنت را نسبت به دیگر روش‌ها نشان داده است.

در تحقیق حاضر سعی شد با استفاده از روش پویایی سیستم و محیط برنامه‌نویسی VENSIM، مقدار آب در دسترس منابع سطحی و زیرزمینی در حوضه آرازکوسه تعیین شود و میزان تأمین نیازهای شرب، محیط‌زیستی، کشاورزی و صنعتی برای دوره زمانی ۱۳۹۵-۱۳۸۱ شبیه‌سازی و مورد ارزیابی قرار گیرد. همچنین بعد از تعیین مقدار آب تخصیص یافته برای مصارف مختلف، با استفاده از تکنیک برنامه‌ریزی خطی چند هدفه به بهینه‌سازی مقدار آب تخصیص یافته در کشاورزی با دو هدف حداکثر نمودن سود اقتصادی و حداقل نمودن میزان مصرف در حوضه مذکور پرداخته شد. از آنجا که در حوضه آرازکوسه بخش وسیعی از مساحت حوضه را اراضی کشاورزی تشکیل می‌دهد و ۷۵ درصد تأمین آب آبیاری برای اراضی مزروعی از آب زیرزمینی تأمین می‌شود، اثرات بهینه‌سازی آب تخصیص یافته به کشاورزی بر روی شاخص پایداری آب زیرزمینی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، حوضه آرازکوسه است که با مساحت حدود ۱۵۳۵ کیلومترمربع بخشی از حوضه گرگان‌رود، واقع در استان گلستان که در شمال شرقی کشور در مختصات طول شرقی ۱۲° ۰۹' تا ۵۵° ۴۰' و عرض شمالی ۱۵° ۴۵' تا ۳۶° ۱۰' قرار گرفته است. این حوضه، از لحاظ تقسیمات سیاسی در محدوده شهرستان‌های آزادشهر، مینودشت و گنبد واقع شده است. ارتفاع متوسط و شیب متوسط حوضه آرازکوسه به ترتیب برابر با ۱۱۵۲ متر و ۲۹ درصد است. بارش متوسط سالانه این حوضه ۶۵۰ میلی‌متر و دمای متوسط

(۱۳۸۴) حوضه آچی‌چای، ضرغامی و اکبری (۲۰۱۲)، علمی و همکاران (۱۳۹۳) مدل‌سازی پویای سیستم سد گلک و آب‌های زیرزمینی در استان سیستان و بلوچستان، کدخداحسینی و همکاران (۱۳۹۶) تخصیص منابع آب سد چغاخور در استان چهارمحال و بختیاری اشاره کرد.

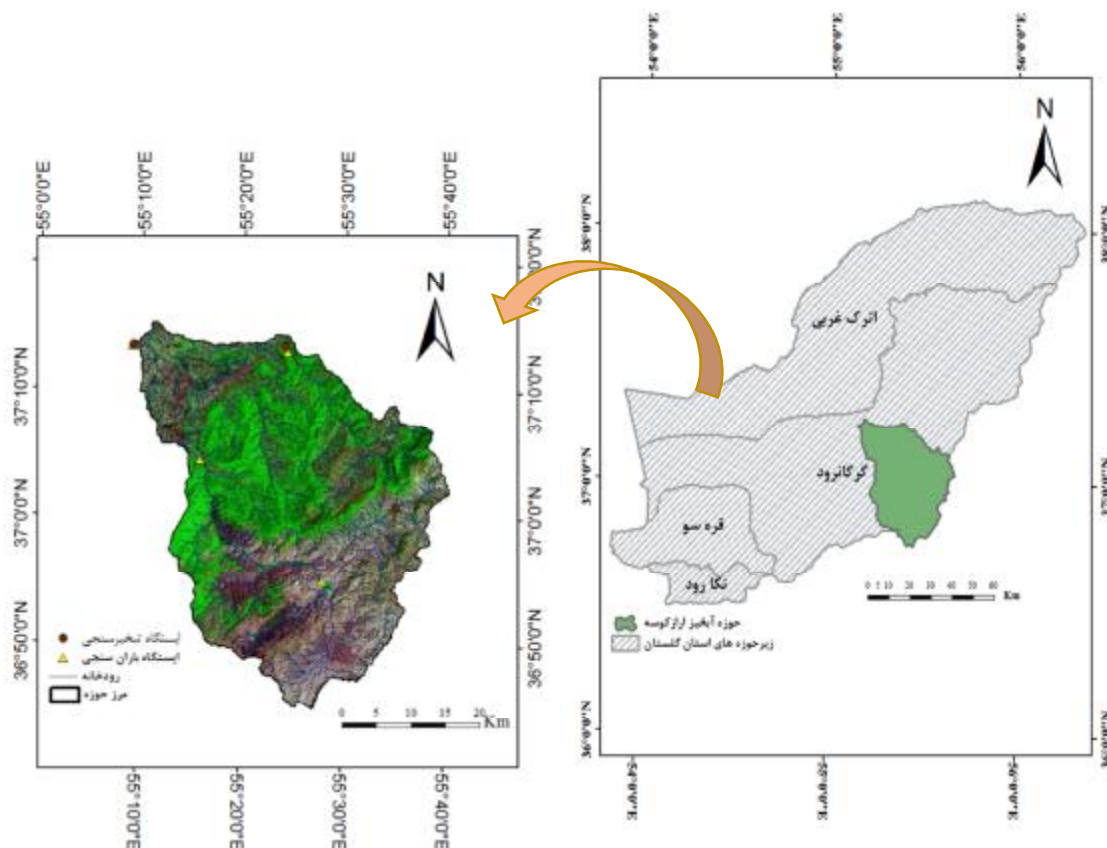
در این پژوهش، طرح تخصیص منابع آب حوضه آرازکوسه با در نظر گرفتن رویکرد پویایی سیستم و با استفاده از نرم‌افزار VENSIM شبیه‌سازی و تحلیل می‌شود.

در بخش دوم این پژوهش به بهینه‌سازی منابع آب تخصیص یافته به بخش کشاورزی با استفاده از تکنیک برنامه‌ریزی خطی پرداخته می‌شود. بهینه‌سازی مصرف و تخصیص منابع آب موجود به‌ویژه در بخش کشاورزی به‌عنوان یک عامل تأثیرگذار در حفاظت محیط‌زیست و یک راهکار پایدار در مدیریت منابع آب ضروری است (صادقی و همکاران، ۲۰۰۹). بنابراین برای مدیریت مؤثر منابع آب و تحقق توسعه پایدار منابع تجدیدپذیر آب زیرزمینی یک منطقه، محاسبه بیلان و رعایت محدودیت‌های برداشت یک پیش‌نیاز اساسی است.

کارایی بالای مدل برنامه‌ریزی خطی در تخصیص بهینه آب آبیاری در الگوی چند محصوله توسط مهدی مرادی و همکاران (۲۰۰۷) و بهینه‌سازی برداشت تلفیقی منابع آب توسط ودولا و همکاران (۲۰۰۴) گزارش شده است. فرموله کردن شرایط پیچیده حاکم بر اکوسیستم‌های طبیعی برای بهینه‌سازی مدیریت منابع آب توسط پژوهش‌گران مختلفی از جمله صادقی و همکاران (۲۰۰۹)، لی و گوو (۲۰۱۴) در بهره‌برداری بهینه تخصیص منابع آب آبیاری در شرایط عدم قطعیت و با بهینه‌کردن مزایای اکولوژیکی، اقتصادی و اجتماعی اراضی؛ آلماراز و همکاران (۲۰۱۵) در طراحی شبکه‌های تخصیص آب مورد توجه قرار گرفته است. همچنین حسن اصفهانی و همکاران (۲۰۱۵)، در ارزیابی تخصیص بهینه آب آبیاری با استفاده از دیدگاه بیلان آب و روزبهدانی و همکاران (۲۰۱۵) در تخصیص بهینه و پایدار آب برای دستیابی به منافع اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی آب، روش بهینه‌سازی مدیریت منابع آب را پیشنهاد کردن. دیواکار و همکاران (۲۰۱۳) در تولید از مدل ترکیبی تعیین آب قابل دسترس و مدل بهینه‌سازی تخصیص استفاده کردن و نشان دادند که سطح رضایتمندی و بازگشت اقتصادی حالت بهینه نسبت به تجارب وضعیت موجود بهبود یافته است. داس و همکاران

نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود بیشترین مساحت اراضی این حوضه را جنگل (۴۰ درصد) و مرتع (۳۶ درصد) تشکیل می‌دهد. زراعت آبی و زراعت دیم نیز به ترتیب مساحت حدود ۱۹۸ کیلومترمربع و ۱۳۶ کیلومترمربع از حوضه آرازکوسه را پوشش می‌دهد.

سالانه آن ۱۸/۵ درجه سلسیوس می‌باشد. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی حوضه آرازکوسه در استان گلستان و همچنین ایستگاه‌های باران‌سنجی (پنج ایستگاه باران‌سنجی) و تبخیر سنجی (چهار ایستگاه تبخیرسنجی) مورد استفاده در این مطالعه به همراه شبکه هیدروگرافی



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه آرازکوسه در استان گلستان به همراه شبکه هیدروگرافی و ایستگاه‌های تبخیرسنجی و باران‌سنجی مورد استفاده در تحقیق

روش تحقیق

مدل‌سازی تخصیص بهینه منابع آب در این پژوهش در دو مرحله اصلی انجام شد: مرحله اول، شبیه‌سازی سیستم حوضه آراز کوسه، محاسبه آب در دسترس و تخصیص اولیه آب در مصارف چهارگانه آب شرب، محیط‌زیست، کشاورزی و صنعت و مرحله دوم، بهینه‌سازی مصرف آب در بخش کشاورزی با استفاده از تکنیک برنامه‌ریزی خطی با دو هدف حداکثر کردن سود اقتصادی و حداقل کردن آب مصرفی است. در نهایت اثر بهینه‌سازی آب در بخش کشاورزی بر شاخص پایداری آب زیرزمینی حوضه آرازکوسه بررسی می‌شود.

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل نقشه کاربری اراضی و اطلاعات مربوط به انواع محصولات مورد کاشت در حوضه آرازکوسه (شامل عملکرد و سطح زیرکشت انواع محصولات) و داده‌های اقلیمی- هیدرولوژیکی شامل آمار ماهانه تبخیر از تشت، دما، بارش سال‌های آبی ۱۳۹۵-۱۳۸۱ است که از اداره کل منابع طبیعی و جهاد کشاورزی و سازمان آب منطقه‌ای استان گلستان تهیه شد. اطلاعات مربوط به جمعیت ساکن موجود در حوضه آرازکوسه از سالنامه آماری استان گلستان سال ۱۳۹۶ استخراج شد.

زیربخش مهم این پژوهش بحث پویایی مؤلفه‌های بیلان آبی در حوضه آرازکوسه است که با توجه به آن‌ها حجم کل آب در دسترس از منابع آب سطحی و زیرسطحی تعیین می‌شود. در واقع معادله اصلی شبیه‌سازی سیستم هیدرولوژی در یک حوضه معادله بیلان آبی است که مقدار ذخیره و جریان را در حوضه نشان می‌دهد. در ادامه معادله بیلان آب ارائه شده است:

$$\frac{dS}{dt} = P - SR - R_m - AET \quad (1)$$

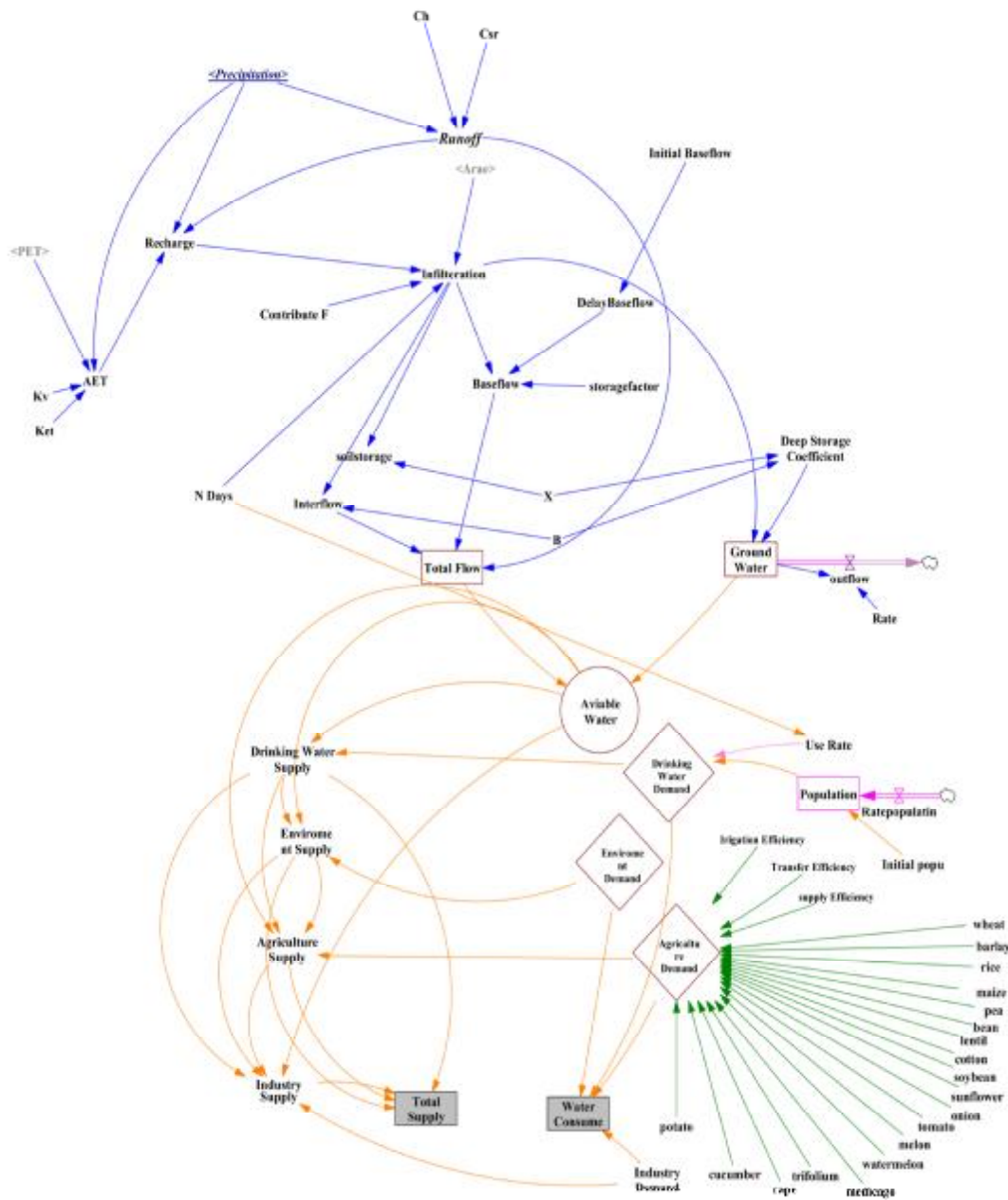
محاسبه حجم آب در دسترس در حوضه آرازکوسه

برای تعیین حجم کل آب در دسترس از نتایج حاصل از برآورد حجم ماهانه آب سطحی و آب زیرزمینی استفاده شد. در واقع با مشخص شدن حجم آب در دسترس و برآورد حجم تقاضا در بخش‌های مختلف اعم از شرب، محیط‌زیست، کشاورزی و صنعت می‌توان بررسی کرد که تا چه میزان منابع آب حوضه توانایی تأمین نیازهای حوضه موردنظر را دارا هستند. در جدول ۱ روش‌های محاسبه مؤلفه‌های بیلان آبی و تشریح مؤلفه‌های آن‌ها ارائه شده است.

چارچوب مفهومی مدل پویای سیستم در نرم‌افزار VENSIM با توجه به وجود نگرش سیستمی در مدیریت منابع آب و ویژگی پویای حوضه‌ها، در این تحقیق سیستم منابع آب حوضه آرازکوسه با در نظر گرفتن رویکرد پویایی سیستم‌ها و با استفاده از محیط برنامه‌نویسی VENSIM شبیه‌سازی شده است. بدین‌منظور، مدل مفهومی حوضه ایجاد و همه عوامل مؤثر در بیلان آب مشخص و سپس منابع و مصارف آب در این حوضه، به‌طور دقیق برآورد شد. برای انجام شبیه‌سازی با نرم‌افزار VENSIM، لازم است ابتدا ساختار مدل (تعریف متغیرهای سیستم و اتصالات و روابط بین متغیرهای مذکور) تهیه شود و پس از وارد کردن داده‌های مربوطه در نرم‌افزار، اجرا و شبیه‌سازی مدل صورت پذیرد تا نتایج خروجی حاصل شدند. شکل ۲ نمودار علت و معلولی سیستم منابع آب، عرضه و تقاضای آب را در هر بخش نشان می‌دهد. شکل ۲ نمایشگر ساختار مدل دبی جریان کل و آب زیرزمینی و شیوه عرضه و تقاضا را در مصارف چهار گانه شرب، زیست‌محیطی، کشاورزی و صنعت نشان می‌دهد. در ادامه به‌طور مختصر به تشریح چگونه محاسبه هر زیرمدل پرداخته می‌شود. مدل پویای سیستم در این پژوهش شامل چند زیربخش و هر زیربخش مؤلفه‌های مهم دیگری را دربرمی‌گیرد. اولین

جدول ۱- روش‌های تعیین مؤلفه‌های بیلان آبی حوضه آرازکوسه و تشریح اجزای معادلات

مؤلفه‌های بیلان آبی	معادله مورد استفاده	تشریح اجزای معادله
تبخیر و تفرق واقعی	$AET = P / (1 + (P / (K_v * PET))^{(1/K_e)})^{(1/K_e)}$	در این معادله P، بارش ماهانه، PET، تبخیر- تفرق پتانسیل و K_v و K_e ضرایب بی‌بعد معادله هستند.
رواناب سطحی	$SR_m = C_{sr} * C_h * P$	C_{sr} ضریب رواناب واقعی و بدون بعد، C_h ضریب بی بعد نشان‌دهنده وضعیت رطوبت خاک است.
تغذیه آب زیرزمینی	$R_m = P - AET - SR_m$	$C_{sr} = \frac{C_{wp} \bar{P}_{24}}{(C_{wp} \bar{P}_{24} - RCD * C_{wp}) + RCD}$ ترم باقی‌مانده معادله بیلان آبی، به‌عنوان مقدار آب تغذیه زیرزمینی در نظر گرفته شده است.
حجم آب نفوذ یافته	$Inf = \frac{contribut F * R_m * A}{N \text{ days} * 24 * 3600}$	Contribute F، ضریبی است که درصدی از مساحت حوضه را که در ایجاد تغذیه مشارکت می‌کند را نشان می‌دهد. A، مساحت حوضه، N days، تعداد روزهای ماه مورد نظر
جریان پایه	$Q_{b(t)} = bQ_{b(t-1)} + (1-b) * Inf$	β ، پارامتر ذخیره‌سازی، $Q_{b(t-1)}$ ، جریان پایه از ماه قبل بر حسب مترمکعب در ماه
دبی کل رودخانه	$Q_{total} = SR_m + Q_b + interflow$	Interflow، جریان آب زیرقشری که درصد خیلی کمی از حجم آب نفوذ یافته را تشکیل می‌دهد.
ذخیره آب زیرزمینی	$GW = DS_f * Inf$	DS _f ، عامل ذخیره عمیق آب زیرزمینی است
حجم کل آب در دسترس	$TAW = Q_{total} + GW$	حجم کل آب در دسترس از مجموع دبی کل رودخانه و حجم آب ذخیره شده زیرزمینی به‌دست می‌آید.



شکل ۲- ساختار گرافیکی روابط علت و معلولی اجزا مدل توسعه یافته در محیط VENSIM

محاسبه میزان تقاضای آب در مصارف مختلف

نیاز آبی شرب

برای محاسبه نیاز شرب، ابتدا با استفاده از متغیرهای میزان رشد جمعیت، جمعیت اولیه و سرانه مصرف آب، میزان مصرف آب آشامیدنی محاسبه می‌شود. سرانه مصرف آب شامل مصرف خانگی (شرب، بهداشت، شست‌وشو و ...)، تجاری و صنعتی، عمومی، فضای سبز و

تلفات آب است که میزان مصرف آن، برای هر فرد، به‌طور سالانه محاسبه می‌شود. با توجه به اطلاعات آب منطقه‌ای استان گلستان، سرانه مصرف برای هر فرد در استان گلستان ۱۷۰ لیتر به ازای هر نفر در نظر گرفته شد. میزان رشد جمعیت در حوضه مورد مطالعه ۱/۱ درصد در سال است بررسی آمار جمعیت در سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۵ نیز بیان‌کننده این موضوع است.

نیاز آبی محیط‌زیستی

پایداری، احیا، و بهبود اکوسیستم‌های آبی و حفظ کیفیت رودخانه‌ها امری ضروری است. برای تعیین این نیاز از روش مونتانا (تنانت، ۱۹۷۶) که روشی معتبر از دیدگاه معاونت امور آب و آبفا محسوب می‌شود، برای ایستگاه هیدرومتری ارازکوسه در خروجی حوضه مورد مطالعه محاسبه شد. در جدول ۲ حداقل نیاز آبی زیست‌محیطی به روش مونتانا ارائه شده است.

$$P = P_0 * (1 + R)^n \quad (۴)$$

$$DWD = (UR * P) \quad (۵)$$

در معادلات فوق P ، جمعیت در سال مقصد، R میزان رشد جمعیت، P_0 جمعیت در سال مبدا و n تفاوت میان سال مبدا و مقصد است. در معادله (۵) نیز DWD ، نشان‌دهنده نیاز آبی شرب، و UR میزان مصرف است.

جدول ۲- حداقل نیاز زیست‌محیطی به روش مونتانا (تنانت، ۱۹۷۶)

سهام میانگین سالانه رودخانه (درصد)		کیفیت حیات ماهی در رودخانه
مهر تا اسفند (اکتبر تا مارس)	فروردین تا شهریور (آوریل تا می)	
۶۰-۱۰۰	۶۰-۱۰۰	وضعیت بهینه
۴۰	۶۰	بسیار عالی
۳۰	۵۰	عالی
۲۰	۴۰	خوب
۱۰	۳۰	قابل قبول
۱۰	۱۰	ضعیف
۱۰ >	< ۱۰	کمبود شدید

* در این تحقیق طبق طبقه قابل قبول، ۶ ماه اول سال ۳۰ درصد و ۶ ماه دوم سال ۱۰ درصد آبدهی رودخانه به نیاز زیست‌محیطی تعلق می‌گیرد.

نیاز آب کشاورزی

نیاز آب در بخش کشاورزی با به‌دست آوردن نیاز آبی محصولات غالب حوضه و ضریب بازدهی آبیاری که با استفاده از مساحت‌های ماهانه اراضی تحت آبیاری تحت فشار و ثقلی محاسبه می‌شود، به‌دست می‌آید.

$$IE = 0.75 * PrI / (PrI + UnPrI) + 0.32 * UnPrI / (PrI + UnPrI) \quad (۶)$$

که در آن، PrI مساحت اراضی تحت آبیاری تحت فشار و $UnPrI$ مساحت اراضی تحت آبیاری ثقلی است. نیاز آبی خالص محصولات حوضه با استفاده از نرم‌افزار NETWAT و در نهایت با استفاده از معادله زیر نیاز آبی کشاورزی محاسبه شد:

$$AD = \left(\sum_{j=1}^n AD_{jt} * a_{jt} * A / efd \right) / SE * TE \quad (۷)$$

در معادله فوق، AD نیاز آبی کشاورزی به مترمکعب در ماه، AD_{jt} نیاز خالص آبی هر محصول به مترمکعب در ماه، a_{jt} نسبت مساحت هر محصول به کل مساحت اراضی آبی، A کل مساحت اراضی آبی حوضه ارازکوسه به هکتار، efd بازده آبیاری و SE و TE به ترتیب ضریب توزیع و انتقال هستند. محصولات آبی کشت شده در حوضه ارازکوسه

شامل نوزده محصول (گندم، جو، برنج، ذرت علوفه‌ای، نخود، لوبیا، عدس، پنبه، سویا، آفتاب‌گردان، سیب‌زمینی، پیاز، گوجه فرنگی، خیار، خربزه، هندوانه، یونجه، شیدر و کلزا) است که اطلاعات مربوط به سطح زیرکشت هر یک از محصولات از اداره جهاد کشاورزی استان گلستان تهیه شد.

نیاز آبی صنعت

به‌دلیل در دسترس نبودن اطلاعات مناسب به‌صورت داده‌های ماهانه، این نیاز به روش فصلی محاسبه شد. با توجه به آمار کلی این نیاز که از سازمان آب منطقه‌ای استان گلستان تهیه شد، نیاز آبی صنعت را برای شش ماهه سرد و گرم محاسبه شد. به این صورت که مقدار نیاز صنعت موجود برای شش ماه گرم با ضریب ۱/۲ و در ماه‌های سرد با ضریب ۰/۸ محاسبه شد.

محاسبه میزان تأمین آب در بخش‌های مختلف

در این پژوهش، تأمین نیازها با اولویت‌بندی به‌ترتیب تأمین نیاز شرب، محیط‌زیست، کشاورزی و در نهایت صنعت است (بر اساس الویت بندی وزارت نیرو، ۱۳۸۸). با

توجه به آب در دسترس کل مقدار عرضه برای هر ماه طی سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۵ محاسبه شد. در واقع مقدار عرضه آب با توجه نیاز آبی برای هر بخش تعیین می‌شود.

اولویت‌ها	معادله
تأمین نیاز شرب	$TAWD = IF(TAW \geq DWD; DWD; IF(TAW \leq DWD; TAW; IF(TAW \leq 0; 0; DWD)))$
تأمین نیاز محیط‌زیستی	$TAW E = IF((TAW - TAWD) \geq EWD; EWD; IF((TAW - TAWD) \leq EWD; (TAW - DWD); IF((TAW - TAWD) \leq 0; 0; EWD)))$
تأمین نیاز کشاورزی	$TAWA = IF((TAW - TAWD - TAW E) \geq AD; AD; IF((TAW - TAWD - TAW E) \leq AD; (TAW - TAWD - TAW E); IF((TAW - TAWD - TAW E) \leq 0; 0; AD)))$
تأمین نیاز صنعت	$TAW I = IF((TAW - TAWD - TAW E - TAW A) \geq IWD; IWD; IF((TAW - TAWD - TAW E - TAW A) \leq IWD; (TAW - TAWD - TAW E - TAW A); IF((TAW - TAWD - TAW E - TAW A) \leq 0; 0; IWD)))$
تشریح اجرای معادلات	TAW حجم کل آب در دسترس، TAWD میزان تأمین نیاز آب شرب، EWD نیاز آب محیط‌زیستی، TAW E تأمین نیاز زیست محیطی، TAWA، تأمین نیاز آب کشاورزی، IWD نیاز آب صنعت، TAW I تأمین نیاز صنعت

تحت پوشش محصول z ، A سطح کل قابل کشت در منطقه به هکتار، B_j قیمت فروش محصول به ریال z ، C_j هزینه کل (کاشت و داشت و برداشت) محصول z به ریال، Y_j میزان عملکرد محصول z در منطقه به کیلوگرم در هکتار، Y_j^{\max} حداکثر عملکرد محصول z به کیلوگرم در هکتار، K_j ضریب حساسیت محصول z در ماه t ، $TAWA_{jt}$ کل آب تخصیص داده شده به محصول z در ماه t به مترمکعب، AD_{jt} نیاز آبی محصول z در ماه t به مترمکعب است. در تابع هدف اول متغیرهای تصمیم شامل کل آب تخصیص داده شده به هر محصول و درصد سطح تحت پوشش می‌باشند.

شاخص پایداری آبخوان

شاخص پایداری آبخوان در واقع بیانگر بخشی از آب آبخوان است که از آن برداشت می‌شود (وربا و لیبون، ۲۰۰۷).

دومین بخش مهم این تحقیق بهینه‌سازی آب تخصیص یافته به بخش کشاورزی است. بهینه‌سازی تخصیص آب در این تحقیق با استفاده از برنامه‌ریزی خطی با دو هدف حداقل‌سازی مصرف آب و حداکثرسازی سود اقتصادی حاصل از کشت محصولات و با دو محدودیت سطح و مقدار آب تخصیص یافته به بخش کشاورزی انجام شد. در این پژوهش، مدلی برای بهینه‌سازی تخصیص آب بین بخش کشاورزی و شرب و صنعت در جهت حداکثر کردن سود اقتصادی، حداقل‌سازی مصرف منابع آب تدوین و در نهایت به بررسی اثر آن بر پایداری سیستم منابع آب زیرزمینی پرداخته شد. تابع هدف: حداکثر کردن منافع اقتصادی حاصل از کشت محصولات با توجه به حداقل کردن مصرف آب

$$\text{Max} Z_1 = \sum_{j=1}^n [a_j * A * (Y_j * B_j - C_j)] \quad (8)$$

$$Y_j = Y_j^{\max} * \prod_{t=1}^{12} \left[1 - K_{jt} \left(1 - \frac{TAWA_{jt}}{AD_{jt}} \right) \right] \quad (9)$$

در این معادله متغیرها عبارتند از: z شمارنده تعداد محصول، n تعداد کل محصولات مورد بررسی، α_j درصد

$$Z_2 = \left(\frac{\sum_{t=1}^{12} \left[TGAW_t - Per * ((1 - efd) * TAWA_{jt}) + PW * TAWD_t + PW_i * TAWI_t \right]}{\sum_{i=1}^{12} per * (1 - efd) * TAWA_{jt} + PW * TAWD_t + PW_i * TAWI_t} \right)^2 \quad (10)$$

از بررسی‌های انجام شده در دو بخش هیدرولوژی و تخصیص منابع آب موجود در مصارف ایجاد شد. در بخش هیدرولوژی مبنای اساسی مدل‌سازی منابع آب حوضه بر اساس معادلهٔ بیلان آبی است. تبخیر- تعرق واقعی به‌عنوان جزء مهم بیلان آب با استفاده از روش تورک (۱۹۶۱) بر اساس منحنی بودیکو محاسبه شد. قانون اول منحنی بودیکو بیان می‌کند که در مقیاس سالانه در سطح حوضه تبخیر- تعرق واقعی به‌شدت تحت تأثیر بارش منطقه است. رواناب سطحی به‌عنوان جزء دوم معادلهٔ بیلان آبی، بر اساس معادلهٔ مورد استفاده در مدل WetSpass محاسبه و با استفاده از پارامترهای مربوطه واسنجی شد تا بهترین تطابق با داده‌های رواناب مشاهداتی حاصل شود. در گام بعدی محاسبهٔ جریان پایه با استفاده تغذیهٔ محاسبه شده در حوضه برای هر ماه محاسبه و با استفاده از پارامتر β واسنجی شد تا با دبی پایه جدا شده از دبی کل در ایستگاه هیدرومتری ارازکوسه با استفاده از نرم‌افزار WHAT^۱ (نرم‌افزار جداسازی آب پایه از دبی کل بر اساس روش فیلتر دیجیتال بازگشتی) مقایسه شد. از مجموع دبی پایه و رواناب سطحی و جریان زیرقشری شبیه‌سازی شده دبی کل خروجی حوضه محاسبه شد و برای ارزیابی مدل با داده‌های مشاهداتی دبی ایستگاه هیدرومتری ارازکوسه به‌صورت بصری، ضریب کارایی نش ساتکلیف و ضریب تبیین مورد مقایسه قرار گرفتند. مقادیر بهینه و محدودهٔ قابل قبول پارامترهای استفاده شده در بخش مدل هیدرولوژیک در جدول ۴ ارائه شده است.

شکل ۲ و ۳ هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده حوضه را در دو مرحلهٔ واسنجی و اعتبارسنجی نشان می‌دهد. ضریب کارایی نش ساتکلیف و ضریب تبیین جریان کل در دوره واسنجی به‌ترتیب برابر با ۰/۶۲ و ۰/۶۵ و در دوره اعتبارسنجی به‌ترتیب برابر با ۰/۵۴ و ۰/۶۰ است. نتایج حاصل از ارزیابی دقت قابل قبول مدل پویا در شبیه‌سازی سیستم منابع آب حوضه را نشان می‌دهد.

برای محاسبه آب زیرزمینی در دسترس در طول دورهٔ شبیه‌سازی از حجم نفوذی آب و ضریب ذخیرهٔ عمقی استفاده و در نهایت مقدار آب دسترس از مجموع آب زیرزمینی و دبی کل حوضه محاسبه شد. ۷۵ درصد مقدار آب مصرفی در حوضه، از آب زیرزمینی و ۲۵ درصد آن از منابع آب سطحی تأمین می‌شود. قابل ذکر است که نتایج

در این معادله متغیرها عبارتند از: $TGAW_t$ کل آب زیرزمینی تخصیص داده شده به منطقه در ماه t به مترمکعب، $TADW$ کل آب تخصیص داده شده به بخش شرب منطقه در ماه t به مترمکعب، efd بازدهی کاربرد آب در منطقه، Per درصد نفوذ عمقی آب به آب زیرزمینی در منطقه، PW درصد تبدیل آب به پساب در منطقه است که برای مصرف شرب، صنعت در نظر گرفته شد. متغیرهای تصمیم در تابع هدف دوم شامل کل آب تخصیص داده شده به بخش شرب و صنعت است. در تابع هدف دوم میزان آب تخصیص داده شده به کشاورزی که در تابع هدف اول مورد محاسبه قرار گرفت، به‌عنوان ورودی در تابع هدف دوم مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به محدود بودن منابع آب سطحی، زیرزمینی و سطح زیرکشت اراضی در منطقهٔ مورد بررسی، چهار محدودیت زیر در مدل بهینه‌سازی تعریف شد:

$$DWD_t \leq TAWD_t$$

$$TAWA_{jt} \leq AD_{jt}$$

$$\sum_{j=1}^n a_{jt}$$

$$TAW_t \Rightarrow TAWA_t + TAWD_t + TAWI_t$$

روش ارزیابی مدل پویا

برای صحت‌سنجی و تأیید مدل از مقایسهٔ داده‌های دبی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در دورهٔ واسنجی (سال‌های ۱۳۹۰-۱۳۸۱) و اعتبارسنجی (سال‌های ۱۳۹۵-۱۳۹۱) با استفاده از دو معیار ارزیابی نش ساتکلیف و ضریب تبیین R^2 استفاده شد.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o^i - Q_E^i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o^i - \bar{Q}_0)^2} \quad (11)$$

در این معادله NSE ، ضریب کارایی نش ساتکلیف است که بین صفر و ۱ تغییر می‌کند و هرچه به یک نزدیک‌تر شود، کارایی بالای مدل را نشان می‌دهد. Q_o^i دبی مشاهداتی ماهانه و Q_E^i دبی شبیه‌سازی شده است. \bar{Q}_0 نیز میانگین دبی مشاهداتی کل دوره را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

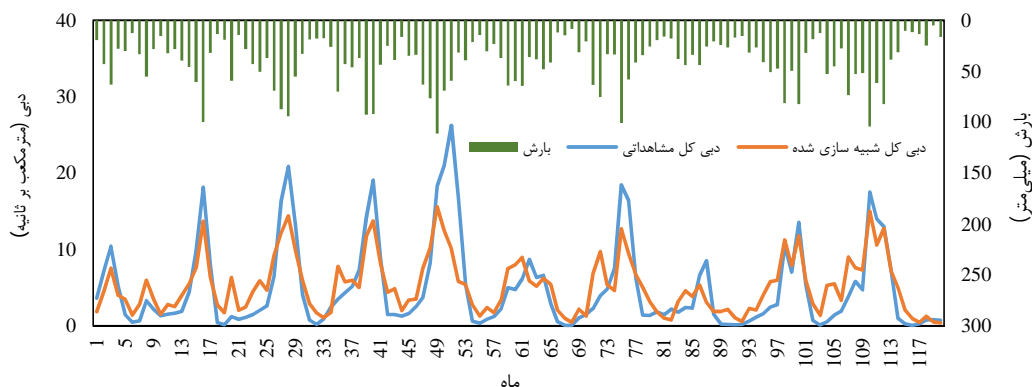
نتایج مستخرج از مدل ساخته شده در محیط VENSIM مدل علی و معلولی ایجاد شده در محیط VENSIM پس

بعد از تعیین مقدار آب در دسترس وارد فاز دوم تحقیق که همان تعیین مقدار آب تخصیص یافته به مصارف مختلف شرب، محیط‌زیستی، کشاورزی و صنعت می‌باشد که بر اساس تقاضا و عرضه محاسبه می‌شوند. میزان نیاز ماهانه در مصارف شرب، محیط‌زیست، کشاورزی و صنعت با استفاده از روش‌های مذکور محاسبه شد. جدول ۵ میزان نیاز ماهانه را در این مصارف نشان می‌دهد.

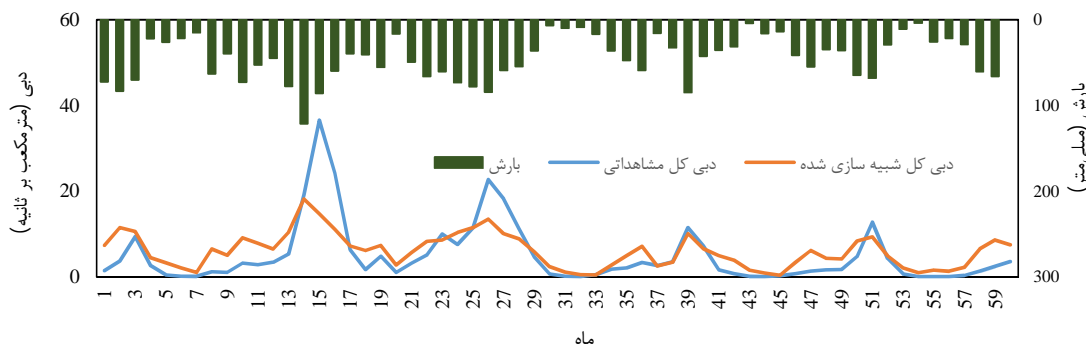
به‌دست آمده در این مورد با مطالعات وزارت نیرو (۱۳۸۸) مطابقت دارد. به طور کلی حجم کل آب زیرزمینی در دسترس سالانه در حوضه آرازکوسه حدود ۷۵ میلیون مترمکعب و حجم کل آب سطحی در دسترس ۱۵۵ میلیون مترمکعب است. این نشان می‌دهد که در حوضه آرازکوسه حجم زیادی از آب سطحی از حوضه و از دسترس خارج می‌شود که این باعث فشار بیشتر به آب زیرزمینی برای تأمین نیازها می‌شود و پایداری آبخوان را دچار خطر می‌کند.

جدول ۴- مقادیر بهینه و محدوده قابل قبول پارامترهای استفاده شده در بخش مدل هیدرولوژیک

پارامتر	زیرمدل	محدوده قابل قبول	مقدار بهینه
K_v	تبخیر و تعرق واقعی	۰ - ۱	۰/۶۵
K_{et}	تبخیر و تعرق واقعی	۰/۵ - ۱۰	۱/۱۵
RCD	رواناب سطحی	۱ - ۱۵	۶/۶
LP	رواناب سطحی	۰/۳ - ۳/۵	۰/۶۵
Contribute F	تغذیه	۰ - ۱	۰/۳۸
β	جریان پایه	۰ - ۱	۰/۴۸



شکل ۲- مقایسه هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهداتی حوضه آرازکوسه در دوره واسنجی (۱۳۹۰-۱۳۸۱)



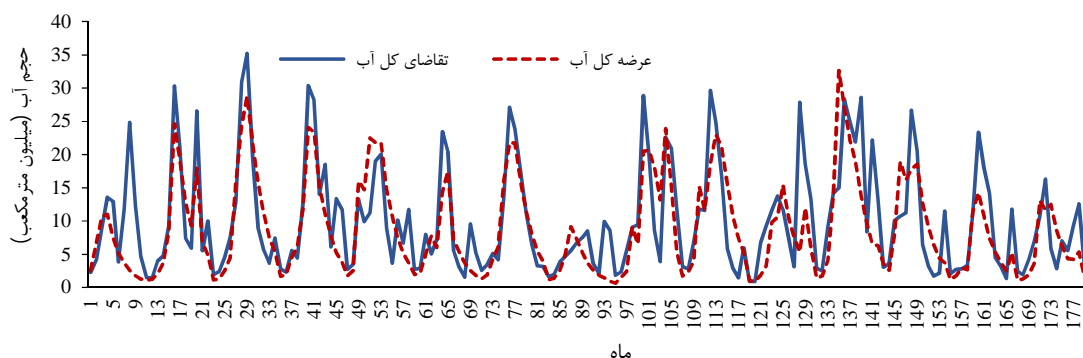
شکل ۳- مقایسه هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهداتی حوضه آرازکوسه در دوره اعتبارسنجی (۱۳۹۵-۱۳۹۱)

آبیاری می‌توان به افزایش بازدهی آبیاری در سطوح زیرکشت کمک نمود. در ادامه به بررسی میزان تأمین هر یک از نیازها با توجه به مقدار آب در دسترس پرداخته شد. به ترتیب اولویت میزان تأمین آب برای مصارف شرب، محیط‌زیستی، کشاورزی و صنعتی در حوضه آرازکوسه مورد توجه قرار گرفت. در شکل ۴ میزان عرضه و تقاضای کل مصارف حوضه در طی دوره آماری ۱۵ ساله شبیه-سازی نشان داده شده است.

جدول ۵ نشان می‌دهد که بیشترین میزان مصرف آب در حوضه را کشاورزی به خود اختصاص داده است. با توجه به اینکه در حوضه آراز کوسه حدود ۳۲ درصد از سطح اراضی آبی به کشت برنج اختصاص دارد و آبیاری در اراضی تحت کشت برنج به صورت غرقابی است و از آنجا که در آبیاری با روش غرقابی بازدهی آبیاری در حوضه نسبت به سایر روش‌های آبیاری مانند قطره‌ای و بارانی پایین‌تر است؛ لذا تا حدودی با استفاده از ضرائب انتقال و توزیع در

جدول ۵- نیاز شرب، محیط‌زیستی، کشاورزی و صنعت در حوضه آرازکوسه (میلیون مترمکعب)

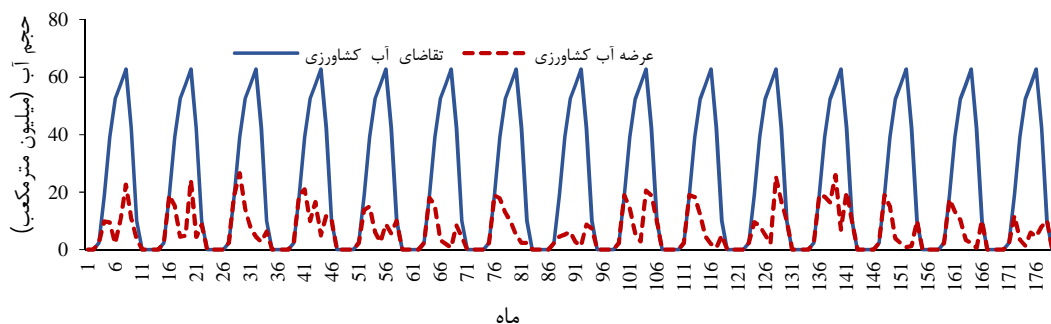
ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	اگوست	سپتامبر	نوامبر	اکتبر	دسامبر
نیاز شرب	۰/۶۹	۰/۶۴	۰/۶۹	۰/۶۷	۰/۶۹	۰/۶۷	۰/۶۹	۰/۶۹	۰/۶۷	۰/۶۷	۰/۶۹	۰/۶۹
نیاز محیط‌زیستی	۵/۴	۶/۶	۷/۷	۶/۷	۴/۶	۲/۶	۰/۶۴	۰/۷۱	۰/۶۴	۱/۵۵	۰/۹۳	۱/۷
نیاز کشاورزی	۰	۰	۰/۹۵	۷/۹	۱۶/۵۲	۲۲/۱۳	۲۴/۲۲	۲۶/۵۱	۱۷/۵۸	۹/۵	۴/۲۴	۰
نیاز صنعت	۰/۰۹۷	۰/۰۹۷	۰/۰۹۷	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۰۹۷	۰/۰۹۷	۰/۰۹۷
مجموع	۶/۱۸۷	۷/۳۳	۹/۴۳	۱۵/۳	۲۱/۹۶	۲۵/۵۴	۲۵/۶۹	۲۸/۰۵	۱۹/۰۳	۱۱/۸۷	۸/۹	۲/۴



شکل ۴- نمودار عرضه و تقاضای ماهانه کل آب در حوضه آرازکوسه طی دوره ۱۵ ساله شبیه‌سازی شده در طی سال‌های ۱۳۸۱-۱۳۹۵

تقاضای آب به بخش کشاورزی اختصاص دارد، به بررسی چگونگی ارتباط عرضه و تقاضا پرداخته می‌شود. شکل ۵ نمودار عرضه و تقاضای میزان آب در بخش کشاورزی را نشان می‌دهد.

همان‌گونه که در شکل بالا مشاهده می‌کنید میزان عرضه از میزان تقاضا کمتر است و در سال‌های اخیر به دلیل خشک‌سالی و کاهش بارش در سطح حوضه اختلاف عرضه و تقاضا بیشتر می‌شود. با توجه به اینکه بیشترین میزان



شکل ۵- نمودار عرضه و تقاضا ماهانه آب کشاورزی برای سطح زیرکشت ۱۹۸ کیلومترمربع در حوضه آرازکوسه طی دوره ۱۵ ساله شبیه‌سازی ۱۳۸۱-۱۳۹۵

در این مناطق مهمترین مسأله در مدیریت آب، ایجاد تعادل بین عرضه و تقاضای آب است. از آنجایی که مقدار عرضه معمولاً محدود می‌باشد و مقدار تقاضا نیز با افزایش جمعیت روند صعودی دارد، برنامه‌ریزی برای استفاده بهینه از آب در بخش کشاورزی اهمیت ویژه‌ای دارد.

نتایج حاصل از تخصیص بهینه آب در بخش کشاورزی با استفاده از برنامه‌ریزی خطی برای استخراج الگوی کشت بهینه محصولات واقع در منطقه مورد مطالعه و تعیین مقدار بهینه تخصیص منابع آب از تکنیک برنامه‌ریزی خطی در محیط نرم‌افزار Lingo با دو هدف حداکثرسازی میزان آب مصرفی و حداکثرسازی منفعت اقتصادی استفاده شد. نتایج حاصل از مقایسه دو وضعیت فعلی و وضعیت بهینه در جدول ۶ نشان داده شده است.

در شکل ۵ به وضوح مشاهده می‌شود که میزان تقاضا بسیار بیشتر از مقدار عرضه آب در بخش کشاورزی است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عرضه و تقاضا در این بخش نشان می‌دهد که در وضعیت فعلی میزان آب مورد نیاز کشاورزی سالانه برابر با $2851928333/5$ مترمکعب و مقدار تأمین آب کشاورزی برابر با $71947452/2$ مترمکعب است؛ به بیان دیگر مقدار آب موجود در حوضه در بخش کشاورزی تنها ۲۵ درصد نیاز آب سطح زیرکشت حوضه ارازکوسه را تأمین می‌کند. مابقی آب مورد استفاده از آب‌بندان‌ها و چاه‌های موجود در حوضه تأمین می‌شود، به‌همین دلیل در این حوضه، در چندسال اخیر با افت شدید سفره آب زیرزمینی مواجه هستیم. با توجه به این نمودار می‌توان بیان کرد که آب مهم‌ترین عامل محدودکننده توسعه بخش کشاورزی در این حوضه است.

جدول ۶- مقایسه سطح زیرکشت و منفعت اقتصادی در دو شرایط فعلی و بهینه

محصولات	عملکرد محصول	شرایط فعلی		شرایط بهینه	
		سطح زیرکشت (هکتار)	منفعت اقتصادی (ریال)	سطح زیرکشت (هکتار)	منفعت اقتصادی (ریال)
گندم	۴۳۶۹/۱	۹۵۳۲	$2/84 \times 10^{11}$	۴۹۷۰	$1/4 \times 10^{11}$
جو	۴۵۶۶/۷	۸۰۲	۲۵۵۰۱۷۷۹۴۶۰	۳۱۶۸	$1/07 \times 10^{11}$
برنج	۴۵۵۰/۵	۶۵۵۰	$5/95 \times 10^{11}$.	.
ذرت	۴۳۲۰۸/۹	۲۲۲	۱۳۵۸۵۵۲۷۳۹۳	۱۹۸۰	$1/6 \times 10^{11}$
نخود	۱۷۵۴/۹	۳۵	۳۲۶۵۲۸۰۰۰	.	.
لوبیا	۱۱۸۷/۶۱	۱۸۹	۱۱۱۹۷۴۹۰۰۰	.	.
عدس	۱۲۳۷/۱	۶۶/۵	۴۹۶۴۰۹۸۶۵۰	.	.
پنبه	۱۸۲۰	۱۲۲	۲۳۲۵۶۳۸۷۰۰	۱۳۸۶	۲۶۳۹۹۱۴۲۰۰۰
سویا	۲۵۱۴	۶۳۰	۱۷۴۹۶۷۰۶۵۰۰	.	.
آفتابگردان	۱۵۶۲/۴	۲۲/۳	۲۸۲۳۵۳۳۶۸۰۰	.	.
کلزا	۲۱۸۵	۱۵۴	۵۵۰۰۰۰۳۳۰۰۰	۲۵۶۴	۹۱۹۲۹۱۲۳۰۰۰۰
سیب زمینی	۲۰۷۱۰	۱۵۴	۱۷۶۳۴۸۷۸۸۰۰	.	.
پیاز	۲۲۷۶۳/۳	۳۱۹/۹	۲۴۲۵۳۶۱۵۱۷۶	.	.
گوجه فرنگی	۳۸۱۵۸/۹	۱۲/۳	۴۸۸۸۳۹۰۸۱۱۰	.	.
خریزه	۳۴۳۴۰/۳	۳۸۸	$1/6 \times 10^{11}$.	.
هندوانه	۴۵۴۰۰/۵	۷	۱۲۳۲۰۱۷۵۰۰	.	.
خیار	۲۰۹۱/۷۵	۵۶	۱۲۷۶۶۷۱۷۰۴۰	.	.
یونجه	۱۲۲۴۱/۳	۲۵۰	۴۶۷۱۳۲۸۰۰۰۰	۱۹۸۰	$3/6 \times 10^{11}$
شیدر	۸۹۱۷/۳	۲۹۷	۶۰۱۲۲۴۵۲۵۰۰	۳۷۶۲	$7/6 \times 10^{11}$
مجموع		۱۹۸۱۰	$1/25 \times 10^{12}$	۱۹۸۱۰	$1/6 \times 10^{12}$

اولویت کشت قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که سود اقتصادی سالانه حاصل از رویکرد بهینه‌سازی برابر با $1/61 \times 10^{12}$ ریال و سود سالانه حاصل از الگوی کشت فعلی برابر با $1/25 \times 10^{12}$ ریال است. مقدار آب مصرفی مورد نیاز برای کشاورزی در وضعیت بهینه برابر با

همان‌گونه که در جدول فوق مشاهده می‌کنید، برای کشت بر اساس بهینه‌سازی مصرف آب و حداکثر کردن منفعت اقتصادی محصولات گندم، شیدر، جو، کلزا، ذرت، یونجه، پنبه به ترتیب با ۲۵، ۱۸/۹۹، ۱۵/۹، ۱۰، ۱۲/۹۵، ۹/۹۹ و ۷ درصد از کل مساحت اراضی آب حوضه ارازکوسه در

آب در کشاورزی با دو هدف حداقل‌سازی آب مصرفی و حداکثر سازی سود حاصل کشت محصولات، با استفاده از تکنیک برنامه‌ریزی خطی شد. نتایج حاصل از این بخش نشان می‌دهد که بهینه‌سازی مقدار آب در بخش کشاورزی می‌توان به‌طور قابل توجهی باعث کاهش میزان آب مصرفی و افزایش سود اقتصادی شود. در پایان برای بررسی اثر بهینه‌سازی مصرف آب در بخش کشاورزی به مقایسه شاخص پایداری آبخوان در دو وضعیت فعلی و بهینه پرداخته شد که نتایج این مورد این نیز به وضوح بیان می‌کند شاخص پایداری آبخوان از $14/4$ به $1/9$ رسیده است که این موضوع، پایداری هرچه بیشتر آبخوان را نشان می‌دهد.

منابع

۱. اعلی م. ت. فرزین س. احمدی م. ح. و آقابالایی ب. ۱۳۹۳. مدل‌سازی پویای سیستم سد و آب‌های زیرزمینی به‌منظور مدیریت بهینه آب (مطالعه موردی، سد گلک). نشریه مهندسی عمران و محیط‌زیست. ۴۴(۱): ۱-۱۲.
۲. شیخ خوزانی ز. حسینی خ و رحیمیان م. ۱۳۸۹. مدل‌سازی بهره‌برداری از مخازن چندمنظوره به روش پویایی سیستم. مجله مدل‌سازی در مهندسی. ۲۱۸: ۵۷-۶۶.
۳. صادقی ح. ذوالفقاری م و آرام ر. ۱۳۹۰. مدل‌سازی و پیش‌بینی کوتاه‌مدت تقاضای آب شهری. مجله سیاست‌های اقتصادی. ۸۷(۷): ۱۵۹-۱۷۲.
۴. صلی‌تبار ع. زرغامی م. و ابریشم‌چی ا. ۱۳۸۵. مدل پویایی سیستم در مدیریت آب شهری تهران. فصل‌نامه علمی پژوهشی آب و فاضلاب. ۵۹: ۱۲-۲۸.
۵. کاظمی کرانی ا. ثمره هاشمی م. گلستانی س. و ثمره قاسم شعبجره م. ۱۳۹۸. ارزیابی و انتخاب بهینه معیارهای الگوی کشت مبتنی بر توسعه پایدار. نشریه تحقیقات منابع آب ایران، ۱۵(۲): ۸۰-۹۰.
۶. کدخداحسینی م. شامحمدی ش. میرعباسی نجف‌آبادی ر. و نوذری ح. ۱۳۹۶. ارزیابی سناریوهای مختلف تخصیص منابع آب سد چغاخور با استفاده از روش پویایی سیستم. نشریه

۱۲۳/۳۳ میلیون مترمکعب است که در مقایسه با حجم آب مورد نیاز برای کشاورزی در وضعیت فعلی که مقدار برابر با $285/19$ میلیون مترمکعب است، حدود $16/18$ میلیون مترمکعب کاهش یافته است. نتایج نشان می‌دهد به‌کارگیری تکنیک بهینه‌سازی در کشاورزی با در نظر گرفتن ضرائب بازدهی آبیاری، ضریب توزیع و انتقال باعث می‌شود که بتوان نیاز حدود ۶۰ درصد از اراضی تحت کشت در حوضه ارازکوسه را تأمین کرد. درحالی‌که در وضعیت فعلی کشاورزی با مقدار آب تخصیص یافته به کشاورزی تنها می‌توان ۲۵ درصد آب مورد نیاز محصولات کشاورزی را تأمین کرد. مقدار شاخص پایداری آبخوان (Z_2) است که از رابطه ۱۰ در دو وضعیت فعلی و بهینه محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد که شاخص پایداری آبخوان در وضعیت فعلی و در وضعیت بهینه‌سازی آب مورد نیاز کشاورزی به‌ترتیب برابر با $14/4$ و $1/9$ است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، سیستم منابع حوضه ارازکوسه با در نظر گرفتن رویکرد پویایی سیستم، ساده‌سازی و شبیه‌سازی شد. بعد از انجام بخش هیدرولوژیکی برای تعیین اجزا بیلان آبی حوضه و همچنین تخمین میزان آب در دسترس حاصل از منابع آب سطحی و زیرزمینی در حوضه، اقدام به تخصیص منابع آب موجود در مصارف مختلف بر اساس اولویت نیاز آب شرب، محیط‌زیست، کشاورزی و صنعت با توجه به نیاز آبی تعیین شده هر بخش بر اساس روابط مربوطه شد. نتایج تخصیص میزان آب به مصارف مختلف حوضه نشان می‌دهد که میزان آب تخصیص یافته حاصل از آب سطحی تقریباً دو برابر بیشتر از آب زیرزمینی است اما اطلاعات و منابع موجود بیان می‌کند که حدود ۷۵ درصد نیازهای آبی حوضه ارازکوسه از آب زیرزمینی و تنها حدود ۲۵ درصد آن از منابع آب سطحی تأمین می‌شود و این نشان می‌دهد که میزان زیادی از آب سطحی از طریق رواناب از حوضه خارج و از طرفی برداشت بی‌رویه آب از آبخوان باعث به‌خطر افتادن پایداری آبخوان حوضه می‌شود. با توجه به این‌که بیشترین نیاز آبی در حوضه اراز کوسه را مصرف کشاورزی به‌خود اختصاص داده است و این درحالی‌که است که بیشترین میزان آب مورد نیاز کشاورزی از آب زیرزمینی تأمین می‌شود؛ لذا در ادامه کار این تحقیق به بهینه‌سازی مصرف

- based on satisfaction and economic benefits. *International Journal of Water*. 7(4): 363-381.
17. Forrester J. W. 1961. *Industrial dynamics*. Massachusetts Institute of Technology Press. 464 p.
18. Hassan-Esfahani L. Torres-Rua A and McKee M. 2015. Assessment of optimal irrigation water allocation for pressurized irrigation system using water balance approach, learning machines, and remotely sensed data. *Agricultural Water Management*. 153: 42-50.
19. Li F J. Dong S U. and Li F. 2012. A system dynamics model for analyzing the eco-agriculture system with policy recommendations. *Ecological Modelling*. 227: 34-45.
20. Li M. and Guo P. 2014. A multi-objective optimal allocation model for irrigation water resources under multiple uncertainties. *Applied Mathematical Modelling*. 38(19-20): 4897-4911.
21. Madani K. and Marino M. A. 2009. System Dynamics Analysis for Managing Iran's Ayandeh- Rud River Basin. *Water Resources Management*. 23(11): 2163-2187.
22. Mahdi-Moradi J. BozorgHaddad O. Karney M. A. and Marino B. W. 2007. Reservoir operation in assigning optimal multi-crop irrigation areas. *Agricultural Water Management*. 90: 149-19.
23. Mashaly A F. and Fernald A G. 2020. Identifying Capabilities and Potentials of System Dynamics in Hydrology and Water Resources as a Promising Modeling Approach for Water Management. *Water* 2020, 12, 1432; doi:10.3390/w12051432.
24. Roozbahani R. Schreider S and Abbasi B. 2015. Optimal water allocation through a multi-objective compromise between environmental, social, and economic preferences. *Environmental Modelling & Software*. 64: 18-30.
25. Sadeghi S. H. R. Jalili Kh. and Nikkami D. 2009. Land use optimization in watershed scale. *Land Use Policy*. 26: 186-193.
26. Simonovic S. P. 2003. Canada Water, A Tool for Modelling Canadian Water Resources. Presentation at the Canadian Commission for UNESCO (CCU), Annual General Meeting, 1-2 Ottawa, 1-2 March.
27. Simonovic S. P. and Ahmad S. 2000. System Dynamics Modelling of Reservoir Operation for Flood Management. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 14(3): 190-198.
28. Sterman J. D. 2000. *Business Dynamics, Business Dynamics: Systems Thinking and*
- علمی - پژوهشی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۱۱(۶): ۲۳-۳۳.
۷. گلیان س. ابریشم‌چی ا. و تجربی‌شی م. ۱۳۸۴. تحلیل سیاست‌های بهره‌برداری از منابع آب در حوزه آبخیز با روش پویایی سیستم. فصل‌نامه علمی - پژوهشی آب و فاضلاب. ۸۰: ۶۳-۷۰.
۸. محمودی ب. و سرلک م. ۱۳۸۷. برآورد عوامل مؤثر بر عرضه و تقاضای آب و جایگاه ایران در منطقه از نظر توسعه پایدار. مرکز تحقیقات استراتژیک، معاونت پژوهش‌های اقتصادی، بهمن ماه ۱۳۸۷، کد گزارش: ۵۰-۸۷-۲-۰۴.
۹. مرعشی س ج. بلیغ و. غیاث‌آبادی ع. ۱۳۸۸. تفکر سیستمی و ارزیابی کارآمدی آن در اداره جامعه و سازمان، انتشارات سازمان مدیریت صنعتی، چاپ دوم، تهران. ۱۶۶ ص.
۱۰. وزارت نیرو. شرکت مدیریت منابع آب ایران، شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گلستان، دفتر مطالعات پایه منابع آب. ۱۳۸۸. بیان آب در محدوده مطالعاتی گرگان. گزارش بهنگام‌سازی تلفیق مطالعات منابع آب حوزه آبخیز رودخانه‌های قره‌سو و گرگان. ۹۳ ص.
11. Almaraz S. DL. Marianne B. Catherine A P. Ludovic M. and Serge D. 2015. Design of a multi-contaminant water allocation network using multi-objective optimization. *Computer Aided Chemical Engineering*. 37: 911-916.
12. Chen C. H. Liu W. L. and Liaw S. L. 2005. Development of a Dynamic Strategy planning Theory and System for sustainable River Basin Land use Management. *Science of total Environment*. 346(1): 17- 37.
13. Chen H. Change Y. and Chen K. 2014. Integrated wetland management: An analysis with group model building based on system dynamics model. *Journal of Environmental Management* 146: 309-319.
14. Chung G. Lansey K. Blowers P. Brooks P. Ela W. Stewart S and Wilson P. 2007. A general water supply planning model: Evaluation of decentralized treatment. *Environmental Modelling & Software*. 23(7): 893-905.
15. Das B. Singh A. Panda S N and Yasuda H. 2015. Optimal land and water resources allocation policies for sustainable irrigated agriculture. *Land Use Policy*. 42: 527-537.
16. Divakar L. Babel M. S. Perret S. and Das G. A. 2013. Optimal water allocation model

- Modeling for a Complex World with CD-ROM. McGraw-Hill, Boston.
29. Tenant D. L. 1976. Instream flow regimens for fish. Wildlife, recreation and related environmental resources, Fisheries. 1(4). 6-10.
 30. Turc L. 1961. Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date. Annals of Agronomy. 12: 13-49.
 31. Vedula S. Mujumdar P. P. and Sekhar G. C. 2004. Conjunctive use modeling for multicrop irrigation. Journal of Agricultural Water Management. 73: 193-221.
 32. Vrba J. and A. Lipponen. 2007. Groundwater resource sustainability indicators. Groundwater Indicators Working Group.
 33. Winz I. 2005. A System Dynamic Approach to Sustainable Urban Development. the 23rd International Conference of the System Dynamics, Boston, USA, January.
 34. Zarghami M. and Akbarieh S. 2012. System dynamics modelling for Complex Urban Water System: Application to City of Tabriz, Iran. 2012. Resource, Conservation and recycling. 60: 99-106.

