

پیش‌بینی وضعیت آبخوان دشت ایسین - بندرعباس با مدل پویایی سیستم (مقاله پژوهشی)

۱- مهتاب صالحی، دانشجوی دکتری تخصصی مدیریت و کنترل بیابان، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، ایران.

۲- رسول مهدوی نجف‌آبادی*، دانشیار گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، ایران.

ra_mahdavi2000@hormozgan.ac.ir

۳- مرضیه رضایی، دانشیار گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، ایران.

۴- علیرضا نفرزادگان، دانشیار گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، ایران.

۵- مهدی قربانی، استاد گروه احیا مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران.

دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵

چکیده

هدف پژوهش حاضر، ایجاد مدل و شبیه‌سازی وضعیت آبخوان دشت ایسین و بررسی عرضه و تقاضای آب زیرزمینی در شرایط تداوم روند فعلی در دو بخش کشاورزی و شرب تا افق ۱۴۱۰ می‌باشد. مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن سه زیرسیستم منبع آب زیرزمینی، تقاضای آب و جمعیت توسعه داده شد که حجم مخزن آب زیرزمینی، تقاضا و کسری مصارف کشاورزی و خانگی، و جمعیت را شبیه‌سازی و پیش‌بینی می‌کند. مدل مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار Vensim توسعه داده شد و در بازه زمانی ۱۳۹۹-۱۳۸۹ برای آبخوان دشت ایسین کالیبره و صحت‌سنجی شد و تا افق ۱۴۱۰، متغیرهای مربوطه شبیه‌سازی گردید. نتایج نشان داد که مدل از دقت بالایی در شبیه‌سازی وضعیت سیستم منابع آب زیرزمینی برخوردار است. تقاضای آب کشاورزی با یک نرخ رشد منفی در حال کاهش است، لذا مقدار آن تا سال ۱۴۱۰ به میزان $6/7$ MCM کاهش می‌یابد و به تبع آن کسری آب کشاورزی نیز روند کاهشی داشته است. جمعیت دشت ایسین تا سال ۱۴۱۰، حدود ۷۷۲۲ نفر به آن افزوده شده و تقاضای آب خانگی از 4 MCM به $12/1$ MCM افزایش می‌یابد. دشت ایسین از سال ۱۴۰۱ با کسری آب شرب به مقدار $3/9$ MCM مواجه بوده و این کسری تا سال ۱۴۱۰ به مقدار $10/7$ MCM می‌رسد. بخش کشاورزی به‌عنوان مصرف‌کننده اصلی آب زیرزمینی روند نزولی داشته، مقدار حجم مخزن آب زیرزمینی ایسین از 128 MCM در سال ۱۳۹۹ به $226/5$ MCM در سال ۱۴۱۰ می‌رسد. بنابراین، عرضه و تقاضای آب زیرزمینی در این دشت باید براساس توسعه پایدار صورت گیرد. همچنین انتقال فاضلاب تصفیه‌شده شهر بندرعباس و افزایش تاسیسات تغذیه مصنوعی و لایروبی تاسیسات از قبل احداث شده به بهبود وضعیت آبخوان کمک خواهد نمود.

واژگان کلیدی: آب زیرزمینی، منابع و مصارف، کشاورزی، شبیه‌سازی، نرم‌افزار Vensim.

مقدمه

بالاترین مراتب تصمیم‌گیری در سطح بین‌المللی، ملی و منطقه‌ای رسیده شود. نتیجه این فرایند، عنوان تازه‌ای را به ادبیات مدیریت آب به‌نام بحران آب اضافه نموده است [۲]. به‌طوری که اثرات کم آبی، اهمیت آب را برجسته می‌کند. لذا در نتیجه سال‌ها سیاست‌های ناپایدار و بهره‌برداری بیش از حد، بیش از نیمی از جمعیت جهان (۵۷٪) با کمبود شدید آب مواجه خواهند شد. همچنین با

با توجه به اینکه آب سطحی در مناطق خشک و نیمه‌خشک کم می‌باشد، آب زیرزمینی نقش حیاتی را در تامین آب این مناطق ایفا می‌کند [۱۴]. بررسی تغییرات و توجه به مسائل آب نشان می‌دهد که هر چند اولین هشدارها و جرقه‌ها از محیط‌های علمی برخاسته اما به‌صورت تدریجی با مشاهده عینی پدیده‌های ناشی از نحوه بهره‌برداری باعث شده است مدیریت منابع آب به

[۱۳]. در سال‌های اخیر استفاده از دیدگاه سیستماتیک برای مقابله با مشکلات اجتماعی و محیط‌زیستی در حال افزایش می‌باشد [۱۸].

سیستم دینامیک اساساً برای درک تصمیمات سیاست‌گذاری و بازخوردها استفاده می‌شود. لذا با شناسایی حلقه‌های بازخورد بین عوامل، مدل‌های سیستم دینامیک می‌توانند به‌طور موثر پیامدهای آینده برنامه‌ریزی مدیریت پایدار منابع آب را درک کنند [۱۱]. به‌طوری که این امر امکان مشاهده ساختار و رفتار پویای هر سیستم و پاسخ آن به مداخلات در طول زمان را ممکن می‌سازد. اگر مدل، واقعیت را با دقت کافی توصیف کند، می‌توان از آن برای بدست آوردن درک بهتری از یک موقعیت یا یک موضوع استفاده نمود [۳۲]. تاکنون پژوهش‌های مختلفی در سطح ملی و بین‌المللی در زمینه مدیریت منابع آب اعم از منابع آب سطحی و زیرزمینی از رویکرد پویایی سیستم استفاده نموده‌اند.

مدیریت یکپارچه منابع آب در حوضه آبریز زهره - جراحی با هدف شناسایی علل موثر بر عرضه و تقاضای آب و رفتار سیستم منابع آبی در درازمدت با رویکرد سیستمی صورت گرفت. به‌طوری که ادامه وضعیت موجود موجب کاهش حجم آب در دسترس و منفی شدن بیلان آب زیرزمینی می‌شود. از طرف دیگر، رشد جمعیت و توسعه بخش کشاورزی، روند افزایشی تقاضای آب را به دنبال خواهد داشت [۱۲].

وضعیت فعلی و آینده عرضه و تقاضا آب در حوضه آبریز هیرمند با استفاده از مدل ونسیم^۱ شبیه‌سازی گردید. به‌طوری که اعمال طرح ۴۶۰۰۰ هکتاری کشاورزی و خط دوم انتقال آب به زاهدان، کسری آب در بخش کشاورزی و محیط‌زیست را افزایش می‌دهد. همچنین، سناریو تداوم روند فعلی سبب گسترش ریزگردها در حوضه آبریز هیرمند می‌شود. از طرف دیگر، صرفه‌جویی در مصرف آب شرب به میزان ۲۰٪، موجب تامین آب در بخش کشاورزی و محیط‌زیست می‌شود. همچنین افزایش بازده آبیاری موجب افزایش تقاضای آب کشاورزی می‌شود [۸]. برای بررسی وضعیت و عوامل موثر بر ناپایداری آبخوان سیرجان در بازه زمانی ۱۴۱۴-۱۳۸۰ از روش پویایی

رشد چشم‌گیر جمعیت جهانی، تولید کشاورزی با چالش قابل توجهی در تامین تقاضای رو به رشد غذا و تنوع ساختار غذایی انسان‌ها مواجه شده است. علاوه بر این، فقدان و تخریب زمین‌های کشاورزی ناشی از گسترش شهری و توسعه اقتصادی این وضعیت را تشدید کرده است [۳۱]. مطابق گزارش فائو در سال ۲۰۰۷ تعداد افرادی که در جهان دچار سوء‌تغذیه می‌باشند تقریباً ۹۲۳ میلیون نفر پیش‌بینی شده است و تا سال ۲۰۵۰، جمعیت جهان به ۹/۳ میلیارد نفر خواهد رسید. بنابراین منابع آب فعلی، باید سیستم‌های کشاورزی را برای تامین غذای جمعیت ۲/۷ میلیاردی در حال افزایش جهان را پاسخ‌گو باشند [۶]. این در حالی است که مساحت اراضی آبیاری شده در سراسر جهان برابر با ۲۷۷ میلیون هکتار بوده که این میزان تنها ۲۰٪ از اراضی قابل کشت را شامل می‌شود و ۸۰٪ از اراضی به‌علت کم بودن میزان آب قابل کشت نمی‌باشند [۳۰]. بنابراین، مدیریت تقاضای آب کشاورزی به‌عنوان مصرف‌کننده اصلی منابع آب، می‌تواند به‌طور خاص برای توسعه سیاست‌های جدید آب و برای کاهش تنش‌های منابع آب که تأثیر عمده‌ای بر تامین آب خانگی دارد، مورد استفاده قرار گیرد [۱۶].

مدیریت موثر تقاضا و عرضه آب، ستون فقرات هر توسعه پایدار برای سیستم‌های هیدرولوژیکی، اقتصادی و زیست‌محیطی به‌ویژه در مناطق خشک است [۲۸]. عدم تعادل بین عرضه و تقاضا در بخش آب شیوه‌های خلاقانه‌تر مدیریت منابع آب را خواستار است [۷]. پایداری منابع آب زیرزمینی به‌شدت به حلقه‌های بازخورد پیچیده بین سیستم‌های انسانی و طبیعی در راستای توسعه سیاست‌ها وابسته است [۱۰]. طبیعت پیچیده منابع آب به‌خصوص منابع آب زیرزمینی نیازمند تعریف و به کارگیری مدل جهت رسیدن به شناخت کافی درباره آنها و پیش‌بینی وضعیت آینده آنهاست [۴]. لذا نیاز فوری به بهبود کیفیت و کمیت آب موجود بدون توسل به راه‌حل‌های پرهزینه یا افزایش فشار بر محیط طبیعی می‌باشد [۳]. تکنیک‌ها و روش‌های بسیاری برای مقابله با پیچیدگی مرتبط با عناصر، پارامترها، بازخوردها و سیستم‌های تأثیرگذار مختلف در مدیریت آب با موفقیت پیشنهاد و اعمال شده است و یکی از مهم‌ترین آنها سیستم دینامیک است

^۱ Vensim

ذخیره آب زیرزمینی، مصرف آب کشاورزی و مصرف کل آب، روند کاهشی داشتند. تحلیل حساسیت با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو نشان داد که تغییر زمین‌های آبیاری شده، تأثیرگذارترین پارامتر بر ذخیره آب زیرزمینی، تغییر ذخیره آب (برداشت کل)، مصرف آب کشاورزی و مصرف کل آب است [۱۴].

شبیه‌سازی عرضه و تقاضای آب در شنژن^۳ چین به‌منظور شناسایی عوامل حساس کلیدی و بررسی سناریوهایی برای استفاده از منابع آب در دوره زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۰۳۵ با استفاده از رویکرد پویایی سیستم صورت گرفت. به‌طوری که یکی از علل عدم توسعه شهر شنژن، کمبود منابع آبی معرفی گردید. بدین منظور اقداماتی مانند افزایش توانایی‌های صرفه‌جویی در مصرف آب، توسعه منابع آب دریا، ترویج استفاده مجدد از آب، بهینه‌سازی ساختار اقتصادی و مدیریت رشد جمعیت به عنوان استراتژی‌هایی تأثیرگذار در کاهش بحران آب در نظر گرفته شدند [۳۳].

اقدامات صورت گرفته در دشت ایسین تاکنون به مدیریت موفق آبخوان ایسین منتج نشده است. همچنین سناریوی فعلی که در آن مصرف آب سطحی و زیرزمینی به‌طور قابل توجهی از ظرفیت تغذیه طبیعی و احیا فراتر می‌رود، به‌طور فزاینده‌ای آشکار می‌کند که اگر به اندازه کافی و برای مدت طولانی به منابع آبی رسیدگی نشود؛ اختلال در چرخه هیدرولوژیکی و کاهش ذخایر باعث می‌شود تا آب طبیعی بسیار سریع‌تر از حد انتظار تخلیه شود [۳]. لذا پیش‌بینی وضعیت آبخوان ایسین و پارامترهای تأثیرگذار بر آن به‌عنوان پایه اقدامات و سناریوهای مدیریتی احتمالی جهت تعادل‌بخشی آبخوان نیاز است. پژوهش حاضر، اولین تلاش برای اعمال مدل‌سازی سیستم دینامیک جهت مدیریت آبخوان ایسین است. در این راستا با توجه به افت کمی و کیفی آبخوان ایسین و ماهیت چند وجهی و پیچیده سیستم منابع آب زیرزمینی، پژوهش حاضر بر آن است تا به بررسی وضعیت آبخوان دشت ایسین در صورت تداوم شرایط فعلی و عرضه و تقاضای آب زیرزمینی را در دو بخش کشاورزی و شرب تا افق ۱۴۱۰ بپردازد.

سیستم استفاده شد. پس از صحت‌سنجی مدل با آزمون شرایط حدی و آنالیز حساسیت، به تعیین سناریوها؛ و اجرای مدل تراز آب زیرزمینی تا افق ۱۴۱۴ و سپس بررسی وضعیت آب در سال‌های آتی پرداخته شد. به‌طوری که مصرف آب در بخش کشاورزی از کلیدی‌ترین متغیرهای برون‌زای موثر است و با ادامه وضعیت موجود شرایط آبخوان ناپایدارتر خواهد شد [۱۹].

پیش‌بینی تقاضای آب حوضه رودخانه پرل با استفاده از چهار زیر سیستم جمعیت، صنعت، کشاورزی و منابع آب در محیط نرم‌افزار ونسیم^۱ صورت گرفت. در نتیجه، خطای پیش‌بینی کوچک برآورد گردید که پیش‌بینی تقاضای آب در منطقه مورد مطالعه را با استفاده از مدل پویایی سیستم امکان‌پذیر می‌کند [۹].

آسیب‌پذیری منابع آب در شهر چنای^۲ هند با رویکرد سیستم دینامیک و استفاده از سه سیستم آب زیرزمینی، آب دریا و آب سطحی صورت گرفت. بدین منظور قابلیت کاربرد مدل با توسعه شاخص‌های امنیت آب، تأمین آب و فاضلاب؛ و تحلیل رفتار فعلی و آینده شاخص‌های توسعه‌یافته و توسعه سناریوهای محتمل تحت شرایط جایگزین بررسی گردید. نتایج اعتبارسنجی نشان از افزایش قابلیت اطمینان مدل بود. همچنین بر ضرورت تقویت سیستم زیرساخت‌های آب از جمله بهبود دسترسی به آب و بهره‌وری مصرف برای انطباق با تقاضای آینده آب شهر تأکید گردید [۲۰].

شبیه‌سازی مدیریت آب در منطقه جنوب شرقی نیومکزیکو، ایالات متحده آمریکا با استفاده از رویکرد سیستم دینامیک در دو مرحله کالیبراسیون (۲۰۱۵-۲۰۰۰) و پیش‌بینی آینده (۲۰۱۶-۲۰۵۰) صورت گرفت. بدین منظور شش سناریوی سیاستی برای بررسی ارزیابی روندهای مدیریت آب؛ و همچنین از چندین معیار آماری برای ارزیابی عملکرد مدل توسعه‌یافته کمک گرفته شد. به‌طوری که خروجی‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های تاریخی مطابقت بسیار خوبی داشتند که نشان‌دهنده شبیه‌سازی دقیق مدل بود. در سناریوی ادامه روند فعلی، برداشت کل آب و جمعیت کل روند افزایشی؛ در حالی که

¹ Pearl² Chennai³ Shenzhen

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دشت ایسین در محدوده مختصات جغرافیایی $27^{\circ} 14'$ تا $27^{\circ} 26'$ عرض شمالی و $56^{\circ} 1'$ تا $56^{\circ} 21'$ طول شرقی قرار دارد. این حوضه در زمره زیرحوضه‌های دو رودخانه اصلی کل و شور می‌باشد که جریان‌های آن‌ها به خلیج فارس تخلیه می‌شود [۲۱]. آبخوان ایسین با وسعت $101/4 \text{ Km}^2$ واقع در دشتی به همین نام در 20 کیلومتری شمال بندرعباس واقع شده است. در دشت ایسین، یک شهر و 26 آبادی متأثر از آبخوان ایسین وجود دارد که متعلق به دو دهستان ایسین و تازیان و بخش مرکزی شهرستان بندرعباس هستند. کل جمعیت شهر و آبادی‌های متأثر از آبخوان دشت ایسین مطابق سرشماری صورت گرفته در سال 1395 برابر با 36798 نفر می‌باشد و در مجموع 10494 خانوار در این

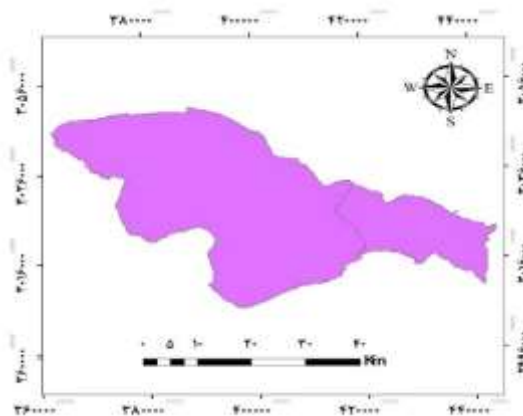
منطقه وجود دارد. نرخ رشد 5 ساله جمعیت دشت ایسین در بازه زمانی $1390-1395$ برابر با $0/62$ می‌باشد [۲۴]. میانگین بارندگی سالانه دشت در پایه زمانی مشترک 26 سال ($1373-1399$)، $182/2 \text{ mm}$ می‌باشد. کل حجم تخلیه آب از چاه‌های بهره‌برداری مطابق با آماربرداری سال 1396 در دشت ایسین، $12/3 \text{ MCM}$ بوده است که از این مقدار، 8 MCM در بخش کشاورزی، 4 MCM در بخش شرب و $0/3 \text{ MCM}$ در بخش صنعت استفاده می‌گردد. افت تراز آب برای کل دشت از سال آبی $65-1364$ تا سال آبی $1400-1399$ برابر $4/6$ - متر بوده است. به‌طور متوسط برای هر سال $0/1$ متر افت تراز آب به‌دست می‌آید [۲۲]. سطح زیرکشت باغات از سال 1396 تا 1399 از $5/9$ درصد به $3/8$ درصد کاهش و صیفی‌جات از $4/8$ درصد به $7/4$ درصد افزایش پیدا نموده است [۲۳] (شکل ۱).



ب- شهرستان بندرعباس



الف- موقعیت استان هرمزگان در ایران



ج- دشت ایسین

شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

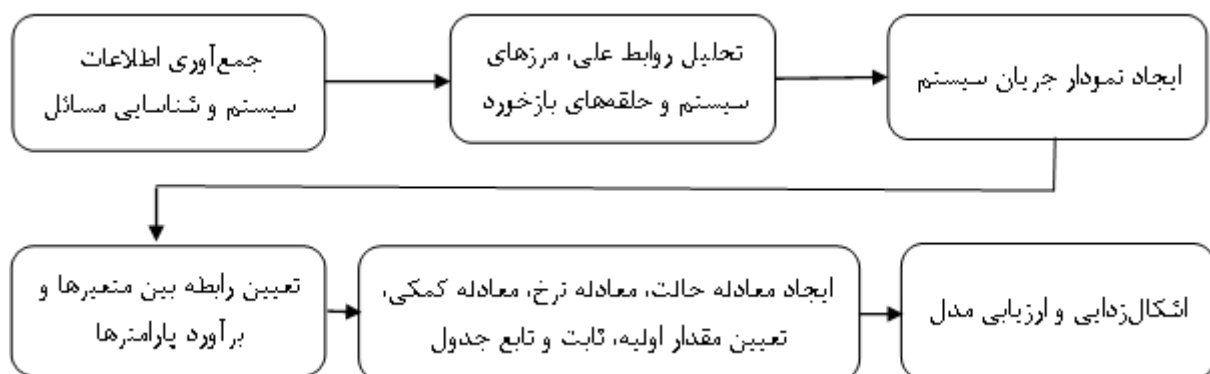
مدل‌سازی پویایی سیستم

مدل‌سازی پویایی سیستم یک تکنیک شبیه‌سازی است که برای تعیین چگونگی تغییر یک سیستم براساس یک دوره عمل خاص استفاده می‌شود [۲۵]. مراحل مدل‌سازی پویایی سیستم نشان داده شده توسط مطالعات مختلف، اکثراً مشابه بوده و برای رسیدن به اهداف تحقیقات از مسیر مشابهی عبور نموده‌اند (شکل ۲). به‌طوری که ممکن است نحوه بیان مراحل مدل‌سازی اندکی با یکدیگر تفاوت داشته باشد. به‌طوری که [۲۶] مراحل مدل‌سازی را به صورت زیر بیان داشته: ۱- بیان مسئله؛ ۲- شرح سیستم؛ ۳- توسعه مدل؛ ۴- تست مدل؛ ۵- استفاده از مدل برای تجزیه و تحلیل سیاست‌ها [۲۷].

مدل ایجاد شده با روش سیستم دینامیک می‌تواند وضعیت سیستم منابع آب منطقه مورد مطالعه را در هر لحظه منعکس کند تا درک و فهم رابطه بین عرضه و تقاضا امکان‌پذیر شود. بنابراین، استفاده از سیستم دینامیک برای پیش‌بینی و تحلیل تقاضای آب یک سیستم پیچیده و بزرگ متصل به چندین عامل می‌تواند رابطه بین عوامل مختلف موثر بر تقاضای آب را به‌طور دقیق و کمی توصیف کرده و پایه قابل اعتمادی برای استفاده منطقی و توسعه پایدار منابع آب فراهم کند [۹].

برخی ویژگی‌های مدل شبیه ساز Vensim به‌طور خلاصه به شرح زیر می‌باشد [۹]:

وارد ساختن اجزای تشکیل‌دهنده این مدل بسیار ساده است. مجوز استفاده از این مدل به‌صورت رایگان در اختیار محققان کشور قرار دارد؛ این مدل در عین جامع بودن، بسیار کاربر دوست است؛ استفاده از این مدل نیازی به آشنایی با سایر نرم‌افزارهای موجود ندارد و هر کاربری به‌راحتی می‌تواند از آن استفاده کند؛ در این مدل، امکان تعریف تاریخ و گام‌های زمانی مختلف وجود دارد. این مدل، می‌تواند داده‌ها را هم به‌صورت مستقیم و هم از طریق فایل‌های متنی یا Excel دریافت کند. همچنین نتایج خروجی مدل هم به‌صورت نمودارهایی که براساس خواسته‌های کاربر تنظیم می‌شود و هم به‌صورت جداولی که به‌راحتی قابل ارسال به Excel هستند، نشان داده می‌شوند. در این مدل، اولویت تامین نیاز و مدیریت میزان تخصیص از منابع مختلف آبی به سادگی امکان‌پذیر خواهد بود؛ قابلیت مقایسه گزینه‌های مختلف از دیگر ویژگی‌های مدل شبیه‌ساز Vensim می‌باشد. تعریف سناریوها در Vensim در واقع قلب سیستم برنامه‌ریزی منابع آب در این مدل است. با تعریف گزینه‌ها می‌توان شرایط حوضه آبریز را پس از اعمال گزینه‌های مختلف مدیریتی کنترل نموده و با یکدیگر مقایسه نمود.



شکل ۲- نمودار جریان مدل‌سازی دینامیک [۹]

Excel و Vensim مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و رفتار پارامترهای مورد بررسی تا سال ۱۴۱۰ شبیه‌سازی گردید و در نمودارهای مختلف نمایش داده شد. به‌منظور تجزیه و تحلیل اطلاعات، فرآیند مدل‌سازی براساس مراحل ذکرشده انجام گردید.

جهت بررسی عرضه و تقاضای آب در کاربری‌های مختلف دشت ایسین، اطلاعات مورد نیاز از طریق گزارش‌ها و اطلاعات شرکت سهامی آب منطقه‌ای و جهاد کشاورزی هرمزگان و سرشماری‌های نفوس و مسکن در سال‌های مختلف گردآوری شد و با استفاده از نرم‌افزارهای

تعریف مسئله

نخستین و مهم‌ترین گام، تعیین دقیق مرزهای سیستمی است که ساختار پیچیده مورد مطالعه در آن شکل می‌گیرد. با شناسایی و تعریف زیرمتغیرها (عواملی که بر متغیر مرجع تأثیر می‌گذارند)، می‌توان به تعیین رفتار واقعی سیستم پرداخت [۱۷]. به‌منظور تبیین مسئله پژوهش، ابتدا به بررسی روند تاریخی متغیر مرجع و متغیرها و مفاهیم کلیدی اثرگذار بر آن در یک بازه ده‌ساله (۱۳۸۹ تا ۱۳۹۹) پرداخته شد. از آنجا که تعداد متغیرهای مؤثر بر متغیر مرجع بسیار زیاد است و تحلیل روند تغییرات همه آن‌ها عملاً دشوار است، متغیرهای حجم آب زیرزمینی، جمعیت و تقاضای آب شرب به‌عنوان متغیرهای اصلی انتخاب و روند تاریخی آن‌ها به‌طور ویژه مورد بررسی قرار گرفت.

شرح سیستم

برای تعیین مرز سیستم باید متغیرهای تاثیرگذار بر متغیر مرجع شناسایی گردند، این متغیرها تحت عنوان متغیرهای فرعی نام‌گذاری می‌شوند. با توجه به دینامیک‌های فعال در مدل، متغیر مرجع تحقیق، حجم منبع آب زیرزمینی دشت ایسین می‌باشد و متغیرهای تاثیرگذار بر متغیر مرجع در جدول (۱) قابل ملاحظه است، در ادامه پس از شناسایی متغیرهای مرجع و متغیرهای تاثیرگذار بر متغیر مرجع (تعیین مرز سیستم)

دینامیک‌های نمودار علی و معلولی (شکل ۳) و سپس نمودار جریان مربوطه (شکل ۴) ترسیم گردید. مدل منابع و مصارف آب محدوده دشت ایسین شامل سه زیرسیستم منابع آب زیرزمینی، جمعیت و تقاضای آب می‌باشد. زیرسیستم‌ها و متغیرهای آنها در مدل پویایی آب عبارتند از (جدول ۱):

زیر سیستم سفره آب زیرزمینی: شامل منابع تغذیه‌کننده با متغیرهای نفوذ از بارش، جریان ورودی، نفوذ از آب سطحی و آب برگشتی از مصارف مختلف است و منابع کاهش‌دهنده شامل تبخیر از آبخوان، جریان خروجی، زهکشی، تخلیه از چشمه‌ها و آب استخراج شده می‌باشد.

زیرسیستم جمعیت: جمعیت یکی از مهمترین و تاثیرگذارترین عواملی است که بر فرآیند چرخه آب تاثیر می‌گذارد. متغیر جمعیت اشاره به تاثیر انسان در فرآیند چرخه آب دارد و تابعی از نرخ تولد، مهاجرت و نرخ مرگ و میر دارد. متغیر جمعیت خود متاثر از عوامل مختلف اجتماعی، فرهنگی، آموزشی و غیره است [۱۷].

زیر سیستم تقاضای آب: شامل تقاضاهای آب شرب، صنعت و کشاورزی می‌باشد. به‌دلیل ناچیز بودن مقادیر تقاضا در بخش صنعت (۲/۳٪ از کل حجم تخلیه) از آن صرف‌نظر شد. تقاضای آب شرب از حاصل‌ضرب جمعیت در سرانه مصرف آب شرب برای هر نفر بدست می‌آید. نیاز کشاورزی شامل اراضی در دست کشاورزی و الگوی مصرف برای هر هکتار می‌باشد. تقاضای آب شرب و کشاورزی هر دو از آب زیرزمینی تامین می‌شود.

جدول ۱- پارامترهای تاثیرگذار بر متغیر مرجع

زیرسیستم تقاضای آب	زیرسیستم جمعیت	زیرسیستم منابع آب زیرزمینی	
		منابع تغذیه‌کننده:	منابع تخلیه‌کننده:
		نفوذ از بارش	تبخیر از آبخوان
		جریان ورودی	جریان خروجی
	نرخ رشد جمعیت	نفوذ از آب سطحی	زهکشی
تقاضای آب شرب		آب برگشتی از مصارف مختلف	تخلیه از چشمه‌ها
تقاضای آب کشاورزی			آب استخراج‌شده

توسعه مدل (جریان)

درک جامعی از ساختار سیستم، از جمله روابط مثبت و منفی بین متغیرها است و وسیله‌ای مناسب برای رسم ساختارهای بازخورد است. دو مفهوم اساسی تحلیل

این مرحله یکی از مهم‌ترین مراحل در مدل‌سازی سیستم دینامیک می‌باشد. نمودار حلقه‌های علی و معلولی نشان‌گر

از حلقه بسته آب در شکل ۳، نمودار انباشت - جریان برای آبخوان دشت ایسین ساخته شده است. شکل ۴ موجودی و جریان کلیدی را در مدل نشان می‌دهد. نمودار انباشت - جریان در واقع تبدیل شکل ۳ به سیستمی مرکب از انباره‌ها، متغیرهای نرخ و روابط بین آن‌ها می‌باشد. نمودار انباشت - جریان مدل آبخوان دشت ایسین همه متغیرهای مطرح در نمودار علت و معلولی است که در محیط نرم‌افزار Vensim در شکل ۴ رسم شده است.

سیستم‌های پویا، انبار و جریان، و همچنین بازخورد هستند. انبارها و جریان‌ها برای نشان دادن تجمع و کاهش در نتیجه جریان‌ها در یک سیستم استفاده می‌شوند [۱۷]. با توجه به اینکه نمودارهای علی - معلولی قابلیت اجرا در نرم‌افزار را ندارند، به منظور اجرا در نرم‌افزار، نمودارهای جریان با الهام از نمودارهای علی و معلولی توسعه داده می‌شوند، در این مرحله لازم است تا معادلات حاکم بر متغیرها وارد مدل شده (جدول ۲) و ساختار و قوانین تصمیم‌گیری مشخص، و پارامترها، روابط رفتاری و شرایط اولیه حاکم تخمین زده شود، شکل (۴) نشان‌دهنده نمودار جریان تحقیق می‌باشد.

جدول ۲- معادلات اصلی وارد شده به مدل

متغیرها	معادله	واحد اندازه‌گیری
	(دشارژ + آب استخراج شده) - (شارژ + آب برگشتی از مصارف) حجم مخزن آب زیرزمینی	MCM
شارژ	جریان ورودی به آبخوان + تغذیه طبیعی از بارش + نفوذ از جریان‌های سطحی	MCM/year
دشارژ	تخلیه از چشمه‌ها + تبخیر + زهکشی + جریان خروجی از آبخوان	MCM/year
تقاضای خانگی	سرانه مصرف خانگی * جمعیت	MCM/year
تقاضای کشاورزی	رشد تقاضای کشاورزی + تقاضای اولیه	MCM/year
رشد تقاضای کشاورزی	(۱۰۰/نرخ رشد تقاضای کشاورزی) * تقاضای کشاورزی	MCM/year
جمعیت	رشد جمعیت + جمعیت اولیه	person/year
رشد جمعیت	(۱۰۰/نرخ رشد جمعیت) * جمعیت	person/year
آب برگشتی	آب برگشتی شهری + آب برگشتی صنعت + آب برگشتی کشاورزی	MCM/year
آب برگشتی شهری	ضریب ذخیره * تقاضای آب خانگی	MCM/year
آب برگشتی کشاورزی	ضریب ذخیره * تقاضای کشاورزی	MCM/year
کسری آب کشاورزی	مصرف کشاورزی - تقاضای کشاورزی	MCM/year
کسری آب شرب	تقاضای شرب - مصرف خانگی	MCM/year

صحت‌سنجی مدل

آزمون شرایط حدی، آزمون انطباق رفتار با الگوی مرجع و آزمون خطای انتگرال نیز بررسی شد.

مدل‌های سیستم‌های پویا همیشه براساس ویژگی‌های ساختاری خاص خود ارزیابی می‌شوند [۲۹]. اعتبارسنجی ساختار و رفتار مدل قبل از استفاده از آن در تحلیل سناریو ضروری است [۵]. به منظور اطمینان از صحت مدل، ضمن بررسی ارزیابی ساختاری و آزمون سازگاری ابعاد؛

استفاده از مدل برای تجزیه و تحلیل سیاست

مرحله نهایی مدل‌سازی پویایی سیستم، کاربرد مدل برای تجزیه و تحلیل سیاست‌ها می‌باشد. در این راستا، مدل با فرض وجود تداوم شرایط جاری بدون هیچ تغییر (شرایط

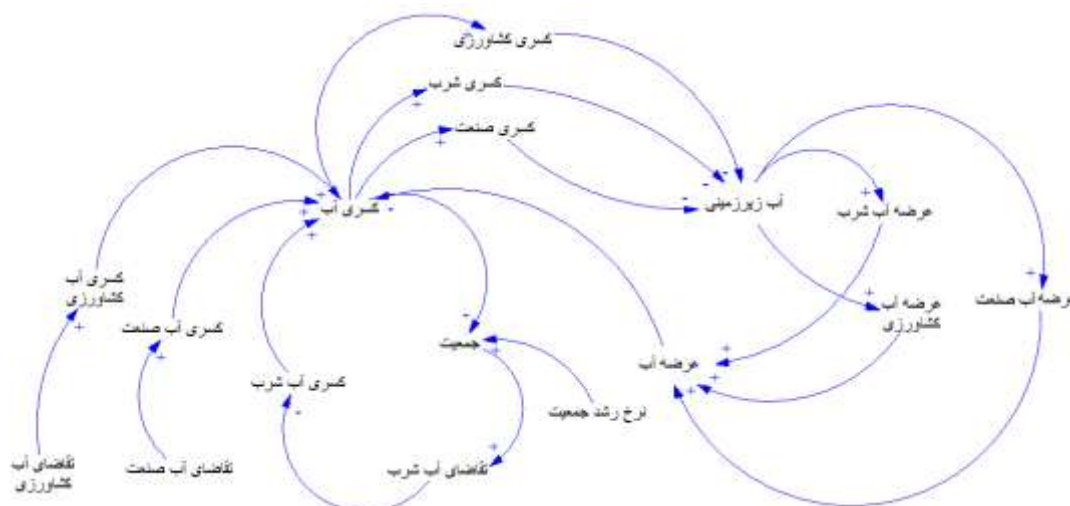
صحت‌سنجی شد. نتایج مدل‌سازی در شکل‌های (۵) تا (۱۶) نشان داده شده‌اند.

این مدل از یک چارچوب عرضه و تقاضا آغاز می‌شود. در بخش تقاضا، سطح جمعیت و رشد کشاورزی، کل تقاضا را برای آب مشخص می‌کند. در بخش عرضه، منابع آب زیرزمینی، مصارف خانگی و کشاورزی را تامین می‌نماید. مدل منابع و مصارف آب زیرزمینی دشت ایسین شامل سه زیرسیستم منبع آب زیرزمینی، تقاضای آب و جمعیت است (شکل‌های ۳ و ۴). همانطور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود علامت مثبت نشان از تاثیر مثبت یک متغیر بر متغیر بعدی و علامت منفی نشان از تاثیر منفی یک متغیر بر متغیر بعدی است.

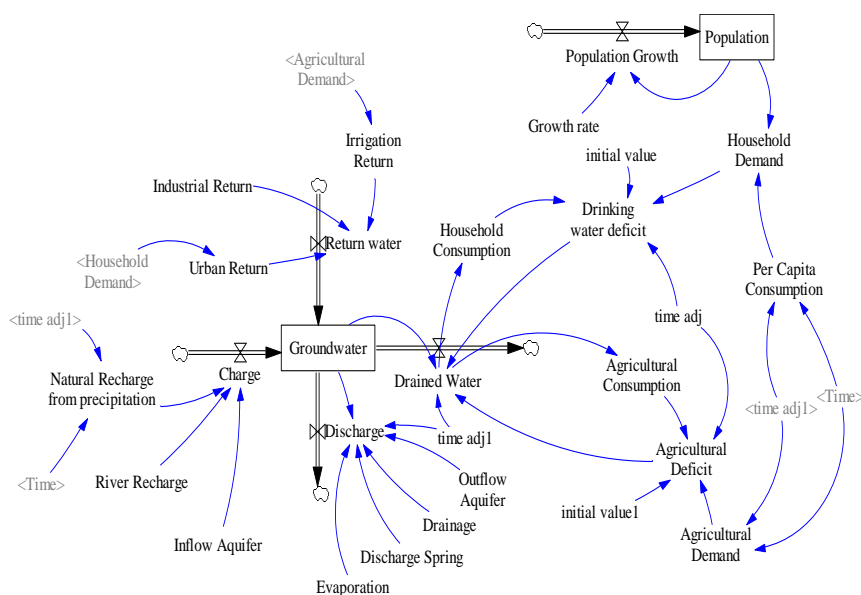
سال ۱۳۹۹)، حجم مخزن آب زیرزمینی، تقاضا و کسری مصارف کشاورزی و خانگی، و جمعیت را تا افق ۱۴۱۰ شبیه‌سازی و پیش‌بینی می‌نماید.

بحث و نتایج

پس از جمع‌آوری داده‌های موردنیاز، با توجه به گام زمانی مدل‌سازی که به صورت سالانه می‌باشد، اطلاعات وارد مدل شدند. به منظور ایجاد مدل پویایی سیستم آبخوان دشت ایسین از نرم‌افزار ونسیم استفاده گردید. سپس مدل اولیه براساس داده‌های سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۹ کالیبره و



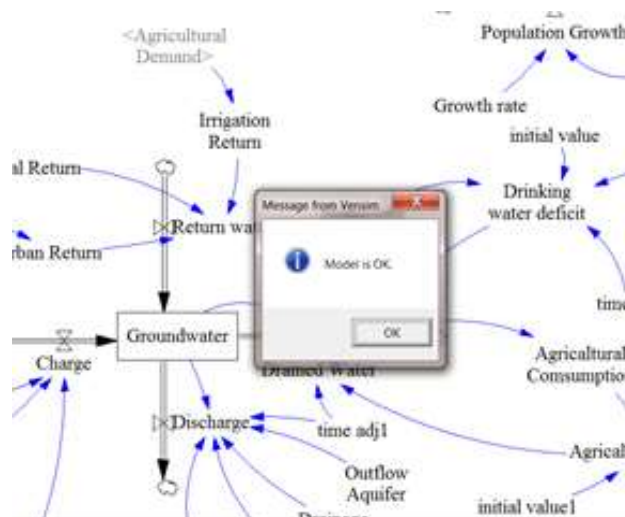
شکل ۳- نمودار علی و معلولی مسئله تحقیق



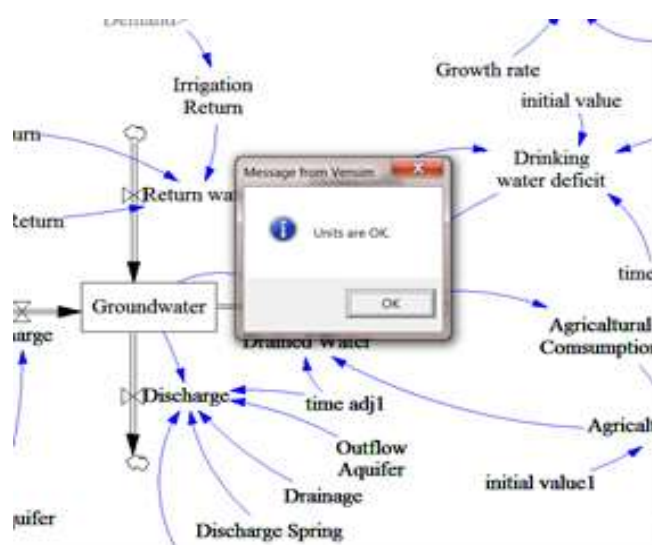
شکل ۴- نمودار انباشت- جریان تحقیق

روابط در نظر گرفته شده بررسی می‌شود و در آزمون سازگاری ابعاد، در طول توسعه مدل بررسی می‌شود که آیا واحدها با یکدیگر سازگار هستند یا خیر.

نتایج آزمون ارزیابی ساختاری و آزمون سازگاری ابعاد نشان داد که مدل از نظر این دو آزمون مورد تایید قرار گرفته است (شکل ۵ و ۶). به طوری که در آزمون ارزیابی ساختار، ساختار مدل از نظر میزان صحت ارتباطات و



شکل ۵- نتیجه حاصل از انجام آزمون سازگاری ابعاد در نرم‌افزار ونسیم



شکل ۶- نتیجه حاصل از انجام آزمون ارزیابی ساختار در نرم‌افزار ونسیم

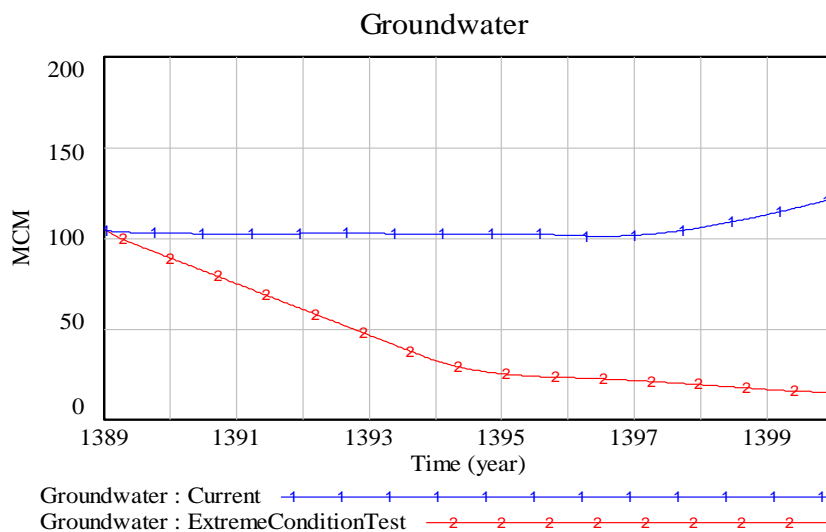
نظر آزمون شرایط حدی، اعتبار مدل مورد تایید قرار گرفت که با نتایج تحقیق [۱] مطابقت دارد. نتایج حاصل از آزمون انطباق رفتار با الگوی مرجع در شکل‌های (۸) تا (۱۰) و جدول (۳) نشان داده شده است. در این آزمون داده‌های واقعی مقدار متغیرهای جمعیت، تقاضای آب خانگی و منابع آب زیرزمینی با مقدار شبیه‌سازی شده در بازه زمانی ۱۳۸۹-۱۳۹۹ مقایسه شده است. همانطور که از مقایسه نتایج مشخص است، مدل

نتایج نشان داد مدل در شرایط حدی از رفتار منطقی برخوردار است. به طوری که فرض گردید، به صورت ناگهانی مقدار باران کاهش یافته است و به صفر می‌رسد. در این شرایط مورد انتظار است تا مقدار حجم منبع آب زیرزمینی شروع به کاهش یافتن کند و به صفر نزدیک شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل نیز انتظار ناشی از کاهش بارندگی را مطابق با شکل (۷) تایید می‌نماید. بنابراین از

توانسته است تا حد خوبی رفتار متغیرهای مرجع را به درستی شبیه‌سازی نماید. به طوری که خروجی مدل با مقادیر مشاهده‌ای تفاوت معنی‌داری نداشته و از یک روند برخوردار بوده است و مقدار MAE بالغ بر ۹۶٪ می‌باشد که با نتایج تحقیق [۱۵] و [۱۸] مطابقت دارد.

جدول ۳- مقایسه مقدار شبیه‌سازی شده و داده‌های واقعی مدل در آزمون انطباق رفتار با الگوی مرجع

سال	جمعیت (نفر)		تقاضای آب خانگی (MCM/Year)		منابع آب زیرزمینی (MCM)	
	واقعی	شبیه سازی	واقعی	شبیه سازی	واقعی	شبیه سازی
۱۳۸۹	۳۴۱۰۰	۳۴۰۹۹	۱/۶	۱/۶	۱۰۴/۶	۱۰۴/۶
۱۳۹۰	--	۳۴۵۳۵	۱/۸	۱/۸	۱۰۲/۸	۱۰۲/۳
۱۳۹۱	--	۳۴۹۷۶	۲	۲	۱۰۲/۲	۹۹/۳
۱۳۹۲	--	۳۵۴۲۳	۲/۳	۲/۳	۱۰۲/۶	۹۸/۷
۱۳۹۳	--	۳۵۸۷۶	۲/۷	۲/۷	۱۰۲/۸	۹۷/۳
۱۳۹۴	--	۳۶۳۳۴	۳/۱	۳/۱	۱۰۲/۱	۹۵/۶
۱۳۹۵	۳۶۷۹۸	۳۶۷۹۸	۳/۵	۳/۵	۱۰۲/۲	۹۶/۸
۱۳۹۶	--	۳۷۲۶۹	۴	۴	۱۰۱/۷	۹۹/۳
۱۳۹۷	--	۳۷۷۴۵	--	--	۱۰۱/۶	۹۸/۷
۱۳۹۸	--	۳۸۲۲۷	--	--	۱۰۵/۹	۱۰۷/۲
۱۳۹۹	--	۳۸۷۱۶	--	--	۱۱۳	۱۲۸/۱
مقدار متوسط قدرمطلق خطا ^۱ (MAE)	۰٪	۰٪	۰/۱٪	۰/۱٪	۳/۹٪	۳/۹٪



شکل ۷- رفتار منابع آب زیرزمینی در سناریوی آزمون حدی

¹ Mean Absolute Error

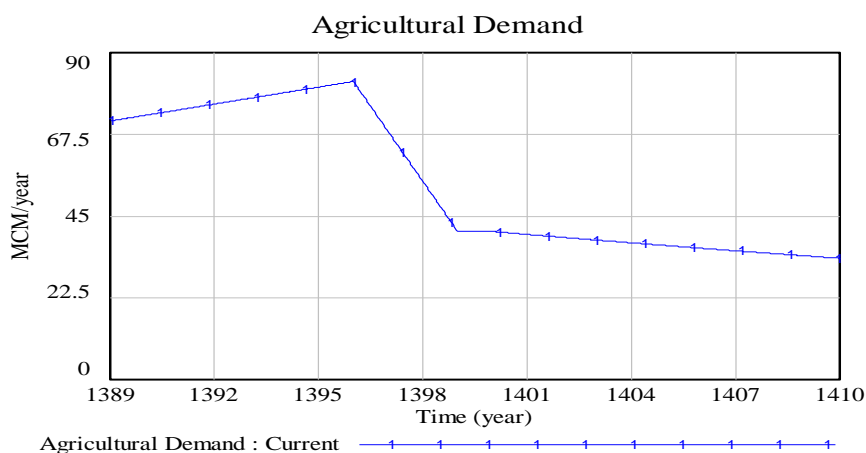
که تقاضای آب کشاورزی در سال ۱۴۱۰ به میزان MCM ۶/۷ کاهش می‌یابد. میانگین تقاضای آب کشاورزی در بازه زمانی ۱۳۹۹-۱۴۱۰ به میزان MCM ۳۶/۶ بود. از آنجایی که تقاضای آب کشاورزی روند کاهشی داشته لذا کسری آب کشاورزی هم روند کاهشی دارد (شکل ۱۲). مقدار کسری آب کشاورزی در سال ۱۳۹۹ برابر با MCM ۲۲/۹ و در سال ۱۴۱۰ برابر با MCM ۱۲/۳، و میانگین کسری آب کشاورزی در دوره ۱۱ ساله برابر با MCM ۱۷/۶ می‌باشد. مطابق با تحقیق [۲۲] دلیل کاهش تقاضای آب کشاورزی علاوه بر افت تراز سطح ایستابی، بالا بودن مقادیر EC نیز می‌باشد. همچنین بیان شده است که کشاورزان در برخی از آبادی‌های دشت ایسین به‌خصوص در قسمت غربی به دلیل شوری زیاد، باغات خود را در سالیان گذشته رها نموده و این آبادی‌ها فاقد کشت و زرع هستند (مانند روستای قلات پایین). از طرفی برخی از کشاورزان با تمکن مالی بالا در گذشته به تعداد محدود اقدام به خرید آب شیرین‌کن سرچاهی نموده و کشاورزی خود را رونق داده‌اند (مانند روستای کنارو). اما در سال‌های اخیر مجوز نصب آب شیرین‌کن ممنوع گردیده است. لذا برخی از کشاورزان تلمبه‌های آبی را خاموش نموده و فعالیت کشاورزی ندارند.

همچنین اعتبار مدل از نظر خطای انتگرال نیز بررسی شد. جهت بررسی این موضوع مقدار Time Step در مدل که ۰/۳ می‌باشد به مقدار ۰/۱۵ کاهش داده شد. پس از شبیه‌سازی مدل با مقدار جدید، هیچ‌گونه تغییری در رفتار متغیرها مشاهده نگردید. لذا از نظر این آزمون نیز اعتبار مدل مورد تایید قرار گرفت.

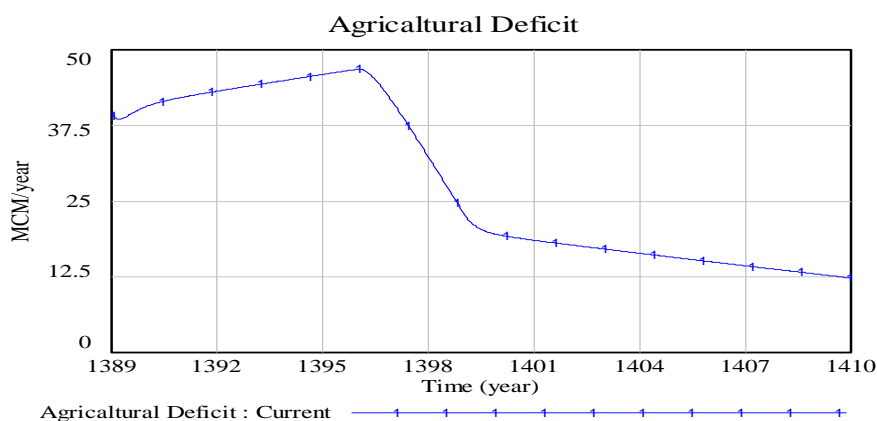
بررسی نتایج اعتبار مدل، نشان از عملکرد مطلوب مدل و وجود همبستگی منطقی بین پارامترهای آن می‌باشد. به‌طوری که این مدل می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای تجزیه و تحلیل استراتژی‌های مختلف مدیریت قبل از اجرا و صرف زمان و هزینه برای کمک به تصمیم‌گیرندگان استفاده شود [۱۸].

تحلیل سناریوی شبیه‌سازی شرایط جاری تا افق ۱۴۱۰

در سناریوی شبیه‌سازی شرایط جاری، مدل با فرض وجود شرایط سال ۱۳۹۹ شبیه‌سازی شده است. در این سناریو مقدار تقاضای بخش کشاورزی با آهنگ ۰/۰۱- تغییر یافته است. با ادامه شرایط جاری تقاضای آب کشاورزی که بیشترین بخش مصرف‌کننده آب می‌باشد، کاهش یافته و از مقدار MCM ۴۰ در سال ۱۳۹۹ به مقدار MCM ۳۳/۳ در سال ۱۴۱۰ خواهد رسید (شکل ۱۱). به‌طوری



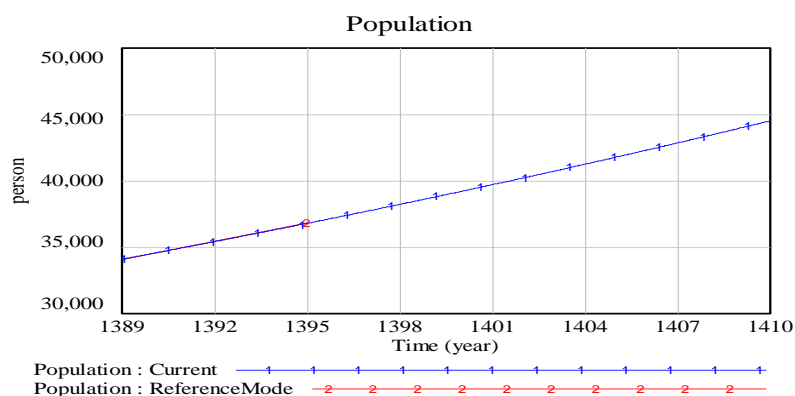
شکل ۱۱- مقدار متغیر تقاضای آب کشاورزی در سناریوی ادامه شرایط جاری تا افق ۱۴۱۰



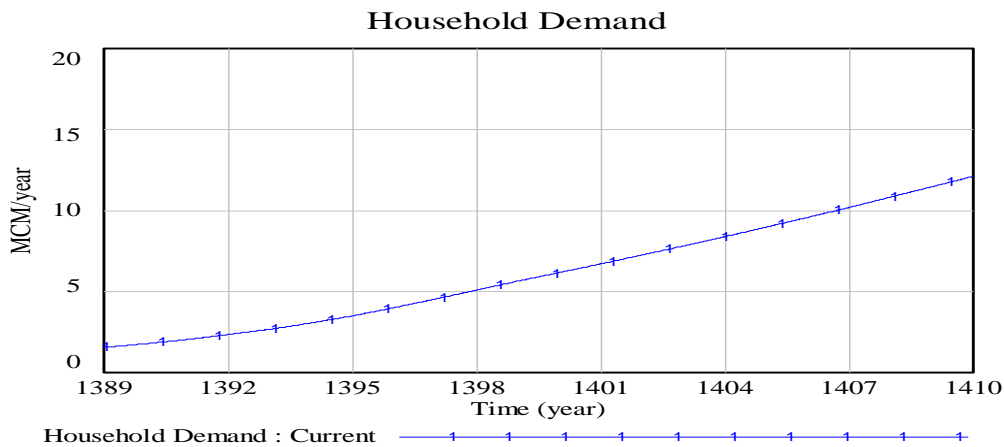
شکل ۱۲- مقدار متغیر کسری آب کشاورزی در سناریوی ادامه شرایط جاری تا افق ۱۴۱۰

آب در نتیجه افزایش جمعیت در بازه زمانی موردنظر با استفاده از منابع آب موجود در منطقه وجود دارد؛ نتایج به دست آمده با نتایج تحقیق [۷] و [۱۲] مطابقت دارد. به طوری که افزایش تقاضا باعث کم شدن فاصله عرضه و تقاضا می‌شود تا زمانی که دیگر عرضه جوابگوی تقاضا نباشد. لازم به ذکر است به جز شهر تازیان پایین با جمعیت ۴۲۶۳ نفر که در قسمت غربی ایسین قرار دارد؛ پرجمعیت‌ترین آبادی‌ها در قسمت شرقی ایسین واقع شده‌اند. همچنین مطابق با تحقیق [۲۲]، قسمت شرقی ایسین بیشتر با افت سطح ایستابی مواجه است تا شوری. درست است که افت سطح ایستابی در قسمت شرقی ایسین بیشتر به دلیل تقاضای آب کشاورزی است، اما در آینده با توجه به اینکه پرجمعیت‌ترین آبادی‌ها در این محدوده واقع شده تامین آب شرب با بحران روبرو است. از طرف دیگر، افزایش جمعیت به طور مستقیم بر مصرف آب خانگی و به صورت غیرمستقیم بر مصرف آب در بخش کشاورزی و صنعت تاثیرگذار است.

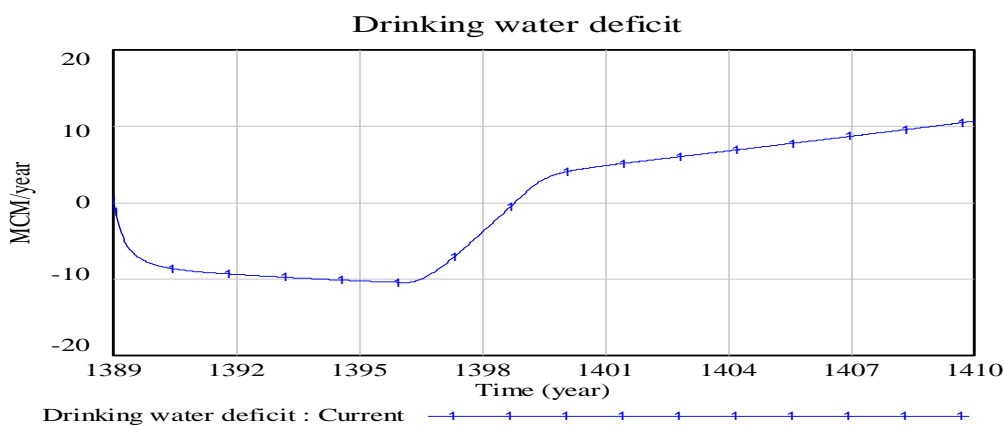
جمعیت دشت ایسین با فرض وجود شرایط سال ۱۳۹۹ با آهنگ ۰/۰۱ در حال تغییر است (شکل ۱۳). به طوری که جمعیت روند رو به رشد خود را ادامه داده و از ۳۸۷۱۵ نفر در سال ۱۳۹۹ به ۴۴۵۱۹ نفر در سال ۱۴۱۰ می‌رسد. به عبارت دیگر، در سال ۱۴۱۰، ۷۷۲۲ نفر به جمعیت سال ۱۳۹۹ افزوده می‌شود. با افزایش جمعیت تقاضای بخش خانگی نیز افزایش یافته به طوری که از مقدار $5/6$ MCM در سال ۱۳۹۹ به مقدار $12/1$ MCM در سال ۱۴۱۰ خواهد رسید (شکل ۱۴). همچنین مقدار میانگین تقاضای آب خانگی در بازه زمانی ۱۳۹۹-۱۴۱۰ به میزان $8/8$ MCM می‌باشد. همانطور که در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود، با افزایش یافتن تقاضا در بخش خانگی، از سال ۱۴۰۱ کسری آب شرب افزایش می‌یابد. به طوری که مقدار کسری آب شرب از $1/01$ MCM در سال ۱۳۹۹ به مقدار $10/7$ MCM در سال ۱۴۱۰ خواهد رسید و مقدار میانگین کسری آب شرب در دوره زمانی ۱۳۹۹-۱۴۱۰ برابر با $5/8$ MCM می‌باشد. به طوری که نتایج نشان می‌دهد احتمال عدم تامین تقاضای فزاینده



شکل ۱۳- مقدار متغیر جمعیت در سناریوی ادامه شرایط جاری تا افق ۱۴۱۰



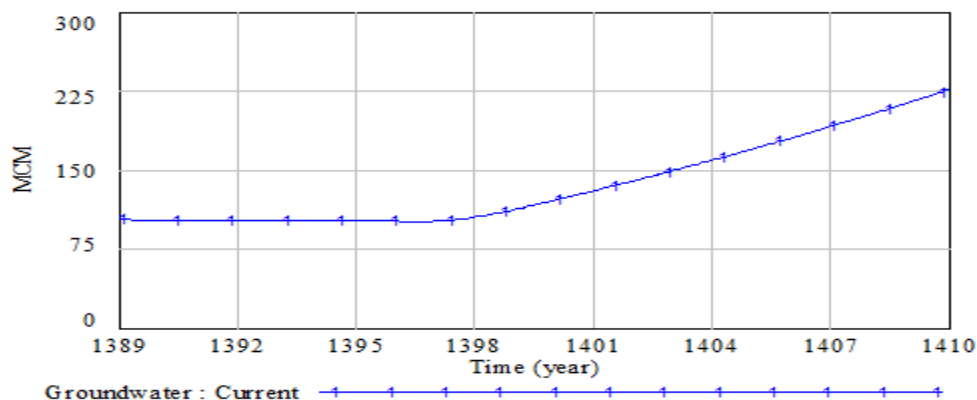
شکل ۱۴- مقدار تقاضای مصرف شرب در سناریو ادامه شرایط جاری تا افق ۱۴۱۰



شکل ۱۵- مقدار کسری مصرف شرب در سناریو ادامه شرایط جاری تا افق ۱۴۱۰

۱۷۷/۳ می‌باشد. با توجه به موارد اشاره شده در بخش‌های قبلی، گرچه حجم مخزن آب افزایش پیدا نموده است اما آب شور و غیرقابل استفاده است و این به معنی نابودی کشاورزی در منطقه مورد مطالعه به‌خصوص قسمت غربی آن است.

بنابراین با توجه به آن که میزان مصرف آب در بخش کشاورزی کاهش قابل توجه یافته، مقدار حجم منابع آب زیرزمینی رو به افزایش نهاده و از مقدار ۱۲۸ MCM در سال ۱۳۹۹ به مقدار ۲۲۶/۵ MCM در سال ۱۴۱۰ خواهد رسید (شکل ۱۶). مقدار میانگین حجم مخزن آب زیرزمینی در سال‌های ۱۳۹۹-۱۴۱۰ برابر با MCM



شکل ۱۶- رفتار متغیر حجم منبع آب زیرزمینی در سناریوی ادامه شرایط جاری تا افق ۱۴۱۰

نتیجه‌گیری

هدف پژوهش حاضر مدل‌سازی عرضه و تقاضای آب زیرزمینی در دو بخش کشاورزی و شرب، با در نظر گرفتن سناریو تداوم روند جاری تا افق ۱۴۱۰ در محیط نرم‌افزار ونسیم می‌باشد. نتایج کلی پژوهش به صورت زیر می‌باشد: نتایج اجرای مدل پیشنهادی بر روی آبخوان دشت ایسین نشان داد که مدل از دقت بالایی در شبیه‌سازی وضعیت سیستم منابع آب زیرزمینی برخوردار است.

با توجه به اینکه تقاضای آب کشاورزی با یک نرخ رشد منفی در حال کاهش است، لذا تقاضای آب در بخش کشاورزی تا سال ۱۴۱۰ به میزان $6/7$ MCM کاهش می‌یابد و به تبع آن کسری آب کشاورزی نیز روند کاهشی داشته است.

جمعیت دشت ایسین رو به افزایش بوده به طوری که تا سال ۱۴۱۰، حدود ۷۷۲۲ نفر به جمعیت سال ۱۳۹۹ افزوده شده و تقاضای آب خانگی از ۴ MCM به ۱۲/۱ MCM افزایش می‌یابد. در نتیجه دشت ایسین از سال ۱۴۰۱ با کسری آب شرب مواجه بوده و این کسری تا سال ۱۴۱۰ به مقدار بیشتری می‌رسد.

با توجه به اینکه بخش کشاورزی به عنوان مصرف‌کننده اصلی آب زیرزمینی روند نزولی داشته، مقدار حجم مخزن آب زیرزمینی ایسین از ۱۲۸ MCM در سال ۱۳۹۹ به ۲۲۶/۵ MCM در سال ۱۴۱۰ می‌رسد.

از آنجایی که مدل پایه توسعه‌یافته، قابلیت اخذ و اجرای سناریوهای مدیریتی را دارد و می‌تواند آن‌ها را پیش‌بینی و مدل‌سازی نماید و همچنین ساختار مدل در واکنش به تغییرات سیستم به سادگی قابلیت اصلاح را دارد؛ لذا پیشنهاد می‌شود جهت کمک به تعادل‌بخشی آبخوان منطقه مورد مطالعه و تغییر الگوی کشت، نقش محصولات زراعی مختلف در افت سطح آبخوان و همچنین بر درآمد کشاورزان در درازمدت با استفاده از مدل سیستم دینامیک بررسی گردد. همچنین براساس نتایج به دست آمده از تحقیق [۲۲] انتقال فاضلاب تصفیه‌شده شهر بندرعباس، با توجه به نگاه مثبت اکثریت اهالی روستاهای دشت ایسین به نظر قابل اجرا با مشارکت مردم می‌باشد. از سویی دیگر، افزایش تاسیسات تغذیه مصنوعی و لایروبی تاسیسات از قبل احداث شده، می‌تواند به بهبود تراز سطح ایستابی کمک کند. به طوری که با انجام عملیات آبخیزداری و پخش سیلاب در مزارع می‌توان در فاصله زمانی کوتاه در مواقع بارش سطح ایستابی را بالا برد.

قدردانی

نویسندگان مقاله مراتب تقدیر و تشکر خود را از شرکت سهامی آب منطقه‌ای هرمزگان به خاطر حمایت‌های مادی و معنوی به عمل می‌آورند.

References

- [1]. Azadi, S., Nozari, H., Marofi, S., & Ghanbarian, B. (2023). Environmental optimization of the cultivated area of Shahid Chamran irrigation network using system dynamics approach. *Soil and Water Sciences*, 27(3), 35-55. doi:[10.47176/jwss.27.3.35533](https://doi.org/10.47176/jwss.27.3.35533) [in Farsi]
- [2]. Azizi, Gh., Nazif, S., & Abbasi, F. (2016). Assessment of performance of Urmia basin dams using system dynamic approach. *Journal of Arid Regions Geographics Studies*, 7(25), 48-63. [in Farsi]
- [3]. Armenia, S., Barnabé, F., Franco, E., Iandolo, F., Pompei, A., & Tsaples, G. (2023). Identifying policy options and responses to water management issues through System Dynamics and fsQCA. *Technological Forecasting and Social Change*, 194, 122737. doi:[10.1016/j.techfore.2023.122737](https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122737)
- [4]. Barati, Kh. (2013). Sustainable exploitation of groundwater resources based on optimum crop pattern using system dynamics approach, Ph.D Thesis, Isfahan University of Technology. [in Farsi]
- [5]. Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *Syst Dyn Rev Syst Dyn Soc*, 12(3), 183-210. doi:[10.1002/\(SICI\)1099-1727\(199623\)12:3<183:AID-SDR103>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1727(199623)12:3<183:AID-SDR103>3.0.CO;2-4)
- [6]. FAO. (2012). global information system on water and agriculture. <http://www.fao.org/nr/aquastat/>.

- [7]. Heidari, M., (2017). Using system dynamics as a decision support tool for water resources management and modeling vensim for Haraz basin, M.Sc. Thesis, Shahrood University of Technology. [in Farsi]
- [8]. Hekmatnia, M., Safdari, M., Hoseyni, S. M., & Shahraki, A. S. (2021). Modeling the dynamism of water resource system in the Hirmand catchment in Order to supply agriculture and environment sectors, *Journal of Natural Environment*, 74(2), 291-303. doi:10.22059/JNE.2021.321352.2198 [in Farsi]
- [9]. Huang, M., Li, X., & Wang, J. (2021). Research on regional water demand prediction of the upper and middle reaches of The Pearl River Basin based on system dynamics. *In IOP, Conference Series: Earth and Environmental Science*, 784(1), 012003. doi:10.1088/1755-1315/784/1/012003
- [10]. Jia, X., O'Connor, D., Hou, D., Jin, Y., Li, G., Zheng, C., Ok, Y. S., Tsang, D. C. W., & Luo, J. (2019). Groundwater depletion and contamination: Spatial distribution of groundwater resources sustainability in China, *Science of the total environment*, 672, 551-662. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.03.457
- [11]. Kotir, J.H., Brown, G., Marshall, N., & Johnstone, R. (2017). Environmental modelling & software systemic feedback modelling for sustainable water resources management and agricultural development : an application of participatory modelling approach in the Volta River Basin. *Environmental Modelling & Software*, 88, 106-118. doi:10.1016/j.envsoft.2016.11.015
- [12]. Layani, Gh., Bakhshoodeh, M., & Zibaei, M. (2020). A System Dynamics Approach for Evaluating the Impacts of Water Demand Management Policies in Kheirabad River Basin, *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 51(2), 195-216. doi:10.22059/IJAEDR.2019.286673.668795 [in Farsi]
- [13]. Mashaly, A. F., & 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*, 12, 1432. doi:10.3390/w12051432
- [14]. Mashaly, A. F. & Fernald, A. G. (2022). Analyzing and assessing dynamic behavior of a physical supply and demand system for sustainable water management under a semi-arid environment. *Water*, 14(12), 1939. doi:10.3390/w14121939
- [15]. Mazandarani zadee, H., & Koochi, S. (2022). Investigating the Impacts of Restoration Scenarios for Mashhad Aquifer Using Systems Dynamic Approach. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 53(3), 5247-541. doi:10.22059/IJSWR.2022.338863.669205 [in Farsi]
- [16]. Michelsen, A. M., & Young, R. A. (1993). Optioning agricultural water rights for urban water supplies during drought, *American Journal of Agricultural Economics*, 75(4), 1010-1020. doi:10.2307/1243988
- [17]. Nazari, B., Kanani, E., & Sepehri, S. (2023). Assessment of water productivity improvement strategies using system dynamics approach. *Applied Water Science*, 13(12), 240. doi:10.1007/s13201-023-02044-8
- [18]. Nezami, N., Tizghadam, M., Zarghami, M., Abbasi, M. (2023). Development of a system dynamics model for improving sustainable urban water management (case study: Isfahan City). *Journal of Water and Wastewater*, 34(1), 1-24. doi:10.22093/wwj.2022.338545.3252 [in Farsi]
- [19]. Pourkhosravani, M., Jamshidi Gohari, F., Sayari, N., & Abedzadeh, S. (2023). Modeling of groundwater resources in Sirjan Basin using the dynamics systems method. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 12(36), 99-114. doi: 10.22111/jneh.2022.42067.1893 [in Farsi]
- [20]. Rajarethinam, K., Varuvel, D., & Bagodi, V. (2021). System dynamic modelling for assessing the vulnerability of water resources: a case of Chennai City, Tamil Nadu, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(19), 1-14. doi:10.1007/s12517-021-08258-x

- [21]. Regional Water Company of Hormozgan. (2018). Report on the extension of the Isin Plain ban. [in Farsi]
- [22]. Salehi, M. (2024). Participatory Modeling of Comprehensive Groundwater Resources Management in Isin-Bandar Abbas Plain with System Dynamics Approach. Ph.D Thesis, University of Hormozgan. [in Farsi]
- [23]. Salehi, M., Mahdavi najafabadi, R., Rezai, M., Nafarzadegan, A. R., & Ghorbani, M. (2023). Study of The Relation Between the Status of The Isin Bandar Abbas Plain Aquifer and Land Use Changes. *Desert Management*, 11(1), 95-116. doi:10.22034/JDMAL.2023.1990499.1409 [in Farsi]
- [24]. Salehi, M., Mahdavi najafabadi, R., Rezai, M., Nafarzadegan, A. R., & Ghorbani, M. (2024). Investigating organizational cohesion and knowledge sharing among organizational stakeholders in the direction of cooperative management of the Isin Plain Aquifer in Hormozgan. *Desert Management*, 11(4), 37-54. doi:10.22034/jdmal.2024.2018501.1448 [in Farsi]
- [25]. Simonovic, S. (2009). Managing water resources: methods and tools for a systems approach. Paris: UNESCO Publishing. doi:10.4324/9781849771917
- [31]. Srijariya, W., Riewpaiboon, A., & Chaikledkaew, U. (2008). System dynamic modeling: An alternative method for budgeting. *Value Health*, 11, S115-S123. doi:10.1111/j.1524-4733.2008.00375.x
- [26]. Stave, A. K. (2003). A system dynamics model to facilitate public understanding of water management options in Las Vegas, Nevada. *Journal of Environmental Management*, 67(4), 303-313. doi:10.1016/S0301-4797(02)00205-0
- [33]. Sušnik, J., Vamvakeridou-Lyroudia, L. S., Savić, D. A. & Kapelan, Z. (2012). Integrated System Dynamics Modelling for water scarcity assessment: Case study of the Kairouan region. *Science of the total environment*, 440, 290-306. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.05.085
- [27]. Teimoori, M., Mirdamadi, S. M., Farajolah Hosseini, S. J., Rahimisooreh, S., & Afshar Kazemi, M. A. (2023). System Dynamic Modeling of Scenarios for the Protection of Groundwater Resources in Drought Conditions in South Khorasan Province, Iran. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 13 (4(52)), 41-54. doi:10.30495/WSRCJ.2023.31551.10825 [in Farsi]
- [28]. Wu, R. S., Liu, J. S., Chang, S.Y., & Hussain, F. (2017). Modeling of mixed crop field water demand and a smart irrigation system. *Water*, 9, 885. doi:10.3390/w9110885
- [29]. Winz, I., Brierley, G., & Trowsdale, S. (2009). The use of system dynamics simulation in water resources management. *Water Resources Management*, 23(7), 1301-1323. doi: 10.1007/s11269-008-9328-7
- [30]. UN-water. (2012). The United Nations World Water Development Report. Available at: <http://www.unwater.org/statistics>, Last access 12/10/2012
- [31]. Vermeulen, S. J., Aggarwal, P. K., Ainslie, A., Angelone, C., Campbell, B.M., Challinor, A. J., Hansen, J. W., Ingram, J. S. I., Jarvis, A., Kristjanson, P., Lau, C., Nelson, G. C., Thornton, P. K., & Wollenberg, E. (2012). Options for support to agriculture and food security under climate change. *Environmental Science & Policy*, 15(1), 136-144. doi:10.1016/j.envsci.2011.09.003
- [32]. Yuan, L., He, W., Degefu, D. M., Wan, Z., Ramsey, T. S., & Wu, X. (2023). A system dynamics simulation model for water conflicts in the Zhanghe River Basin, China. *International Journal of Water Resources Development*, 39(6), 1039-1055. doi:10.1080/07900627.2021.1873107
- [33]. Zheng, G., Han, J. C., Li, P., Li, B., Wu, X., Huang, Y., & Ahmad, M. (2024). A system dynamics simulation-based strategic analysis of integrated water resources utilization and management in Shenzhen city. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(15), 23091-23105. doi:10.1007/s11356-024-32599-1..

Prediction of the Aquifer Status in the Isin-Bandar Abbas Plain Using a System Dynamics Model (Research Paper)

- 1- **Mahtab Salehi**, Ph.D. Student in Desert Management and Control, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Hormozgan, Iran.
- 2- **Rasool Mahdavi Najafabadi***, Associate Professor in the Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Hormozgan, Iran.
ra_mahdavi2000@hormozgan.ac.ir
- 3- **Marzieh Rezai**, Associate Professor in the Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Hormozgan, Iran.
- 4- **Ali Reza Nafarzadegan**, Associate Professor in the Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Hormozgan, Iran.
- 5- **Mehdi Ghorbani**, Professor in the Department of Reclamation of Dry and Mountainous Areas, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Iran.

Received: 15 May. 2025

Accepted: 5 Jan. 2026

Abstract

This study aims to develop a system dynamics model to simulate the groundwater conditions of the Isin plain aquifer and to assess groundwater supply and demand in the agricultural and domestic sectors under a business-as-usual scenario, projected through the horizon year 2031. The proposed model was developed by considering three subsystems: groundwater resources, water demand, and population. It simulates and forecasts the volume of the groundwater reservoir, the demand and deficits in agricultural and domestic water consumption, as well as the population. The dynamic model of the proposed system was developed using Vensim software and was calibrated and verified for the period of 2010-2020 for the Isin Plain-Bandar Abbas aquifer. The relevant variables were then simulated up to the horizon of 2031. The results showed that the model has a high level of accuracy in simulating the status of the groundwater resources system. Considering that agricultural water demand is decreasing at a negative growth rate, it is expected to decline to 6.7 MCM by 2031. As a result, the agricultural water deficit has also decreased. The population of Isin Plain will have increased by 7,722 people by 2031, and the domestic water demand will rise from 4 MCM to 12.1 MCM. The Isin Plain has experienced a drinking-water deficit of 3.9 MCM since 2022, and this deficit is projected to reach 10.7 MCM by 2031. Considering that the agricultural sector, as the main consumer of groundwater, has shown a downward trend, the volume of the Isin groundwater resource increased from 128 MCM in 2020 to 226.5 MCM in 2031. The supply and demand of groundwater in this plain should be based on sustainable development, as the future of agriculture in the Isin plain is facing a serious crisis with significant economic and social consequences for the users. In addition, the transfer of treated wastewater from the city of Bandar Abbas, the expansion of artificial recharge facilities, and the dredging of previously constructed infrastructure will contribute to improving the condition of the aquifer.

Keywords: Groundwater, Resources and Consumptions, Agriculture, Simulation, Vensim Software.