

توسعه مدلی برای محاسبه شاخص پایداری کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی

اصغر کمالی^۱، محمدحسین نیکسخن^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران

۲. دانشیار، دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۲/۲۶؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۴/۰۴)

چکیده

امروزه یکی از دغدغه‌های مهم در بسیاری از کشورهای جهان، تأمین آب به‌منظور توسعه پایدار است. برای مدیریت مؤثر منابع آب زیرزمینی به‌منظور توسعه پایدار از یک سو به ابزار مناسب برای مدل‌سازی و از سوی دیگر به معیاری برای محاسبه پایداری نیاز است. این تحقیق وضعیت پایداری آبخوان با استفاده از مدل ترکیبی را که شامل مدل هیدرولوژیکی SWAT، مدل جریان آب زیرزمینی MODFLOW و مدل انتقال آلاینده MT3DMS می‌شود، در حوضه مطالعاتی اصفهان-برخوار بررسی می‌کند. خروجی مدل SWAT به‌عنوان ورودی مدل MODFLOW و خروجی مدل MODFLOW به‌عنوان ورودی مدل MT3DMS استفاده می‌شود. ارتفاع و غلظت آب در هر سلول مدل کمی و کیفی (MODFLOW و MT3DMS) به‌عنوان ورودی MATLAB برای محاسبه شاخص پایداری (با استفاده از سه معیار عملکرد اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری) تحت سه سناریوی مدیریتی (ادامه برداشت روند فعلی، افزایش ۳۰ درصدی برداشت از آبخوان و کاهش ۳۰ درصدی برداشت از آبخوان) استفاده می‌شود. نتایج نشان‌دهنده شاخص پایداری طی دوره شبیه‌سازی برابر ۰/۰۵۲ و به‌ترتیب تحت سناریوی اول، دوم و سوم برابر ۰/۰۴۰، ۰/۰۳۳ و ۰/۰۵۰ است. نتایج نشان می‌دهد با کاهش ۳۰ درصدی بهره‌برداری از آبخوان، شاخص پایداری کمی و کیفی آبخوان در بیشتر نقاط به‌طور شایان توجهی بهبود خواهد یافت.

کلیدواژه‌گان: شاخص پایداری، SWAT، MODFLOW، MT3DMS، MATLAB.

مقدمه

آب‌های زیرزمینی منبع مهم آب شیرین در دنیا هستند و بخش مهمی از آب‌های تجدیدپذیر جهان به حساب می‌آیند. بیش از ۹۶ درصد آب موجود در کره زمین را آب‌های شور اقیانوس‌ها تشکیل می‌دهند. دو سوم مقدار باقی‌مانده، به‌صورت برف و یخ در کوه‌ها و مناطق قطبی و فقط یک درصد از کل آب موجود در کره زمین به‌صورت آب شیرین مایع است [۱]. سهم آب زیرزمینی از کل منابع آب شیرین مایع موجود، حدود ۹۹ درصد تخمین زده شده است و فقط حدود یک درصد از این منابع آب دریاچه‌ها و رودخانه‌هاست [۲]. از این‌رو، در چند دهه اخیر آب زیرزمینی به‌عنوان یک منبع مهم آب شیرین در جهان شناخته شده است و حدود یک سوم آب شیرین بشر را تأمین می‌کند [۳]. از یک سو، فرارگرفتن ایران در منطقه خشک و نیمه‌خشک، که از نظر منابع آب وضعیت نامطلوب‌تری نسبت به متوسط دنیا دارد، و از سوی دیگر خشکسالی‌های متعدد و طولانی و نوسانات زیاد آب و هوایی، مقدار تأمین آب شیرین از آب زیرزمینی را به ۶۰ درصد می‌رساند. برداشت‌های بی‌رویه، مدیریت نادرست و تغییر شرایط آب و هوایی سبب به‌هم‌خوردن تعادل طبیعی این منابع شده و آثاری همچون افت سطح آب زیرزمینی، ورود مواد آلاینده به آب زیرزمینی و نشست زمین را در پی داشته است. امروزه یکی از دغدغه‌های مهم بسیاری از کشورها، تأمین آب به‌منظور توسعه پایدار است. بنابراین، برای مدیریت صحیح منابع آب‌های زیرزمینی، از یک سو به ابزارهای مناسب برای مدل‌سازی و از سوی دیگر برای سنجش کارایی سناریوها، به روش‌هایی برای سنجش پایداری نیاز است.

در چند دهه اخیر تلاش‌های زیادی برای شبیه‌سازی آبخوان و اعمال سناریوهای مدیریتی مختلف صورت گرفته است که از جمله می‌توان به تحقیقات زیر اشاره کرد:

Rejani و همکارانش (۲۰۰۸) یک مدل دوبعدی کمی و کیفی آب زیرزمینی برای آبخوان ساحلی Balasore در هند ارائه دادند و به کمک آن رفتار آبخوان و چگونگی تغییرات شوری در آن را تحت سناریوهای مختلف پمپاژ بررسی کردند [۴]. El Yavoti و همکارانش (۲۰۰۸) نیز برای آبخوان آزاددشت Bou-Areg واقع در ساحل دریای مدیترانه در شمال شرقی مراکش اقدام به اجرای مدل سه‌بعدی جریان آب زیرزمینی به‌وسیله مدل MODFLOW در شرایط متنوع

هیدروژئولوژیکی و تنش‌های مختلف کردند [۵]. Singh و Panda (۲۰۱۲) برای بررسی پدیده غرقابی شدن زمین‌های کشاورزی بر اثر بالآمدن سطح آب زیرزمینی و ایجاد پدیده شوری در منطقه Haryana State واقع در هند، یک مدل شبیه‌ساز کمی و کیفی از آبخوان منطقه و اعمال سناریوهای مختلف مدیریتی ساختند [۶]. Cao و همکارانش (۲۰۱۳) یک مدل شبیه‌سازی آب زیرزمینی برای منطقه NCP واقع در چین ارائه دادند و به کمک آن سناریوهایی را ارزیابی کردند که توسعه پایدار منابع آب را در منطقه داشته باشند [۷]. Chitrakar و Sana (۲۰۱۵) مدل شبیه‌ساز کمی و کیفی آب زیرزمینی با MODFLOW و MT3DMS برای دشت ساحلی Al Batinah واقع در عمان ارائه دادند و تأثیر سناریوهای مختلف را بر نفوذ آب شور در منطقه بررسی کردند [۸]. Negm و Eltarabily (۲۰۱۶) یک مدل شبیه‌سازی کمی و کیفی آب زیرزمینی با MODFLOW و MT3DMS برای منطقه El-Menoufia واقع در مصر ارائه دادند و غلظت آلاینده نیترات را در منطقه بررسی کردند [۹]. هدف از اقدامات و سیاست‌گذاری‌های برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب، کاهش اثر سیاست‌هایی است که آثار منفی چه در حال و چه در آینده روی سیستم‌های منابع آب می‌گذارند و در مقابل توسعه سیاست‌ها و اقداماتی است که از نظر اقتصادی-اجتماعی، زیست‌محیطی، سیاسی و حقوقی و... آثار مثبتی بر سیستم دارند. به این منظور لازم است پارامترها یا شاخص‌هایی برای اندازه‌گیری عملکرد وجود داشته باشند تا شرایط سیستم‌های منابع آب را تحت سیاست‌ها و برنامه‌های مدیریتی مختلف (سناریوها) ارزیابی و مقایسه کنند. برای نیل به این هدف، علاوه بر شبیه‌سازی سیستم، به پارامترها یا شاخص‌هایی برای اندازه‌گیری عملکرد کمی و کیفی سیستم نیاز است تا شرایط سیستم‌های منابع آب را تحت سیاست‌ها و برنامه‌ریزی‌های مدیریتی مختلف ارزیابی و مقایسه کنند. چگونگی پایش پایداری و معیارهای مربوط به آن از دیگر دغدغه‌های دانشمندان در سه دهه اخیر بوده است. Loucks در سال ۱۹۹۷ برای نخستین‌بار رابطه‌ای برای پایداری با استفاده از سه معیار برگشت‌پذیری، اطمینان‌پذیری و آسیب‌پذیری سیستم ارائه کرد [۱۰]. این رابطه در تحقیقات متعددی استفاده شد، اما Sandoval و Solis در سال ۲۰۱۰ این رابطه را اصلاح کرد [۱۱].

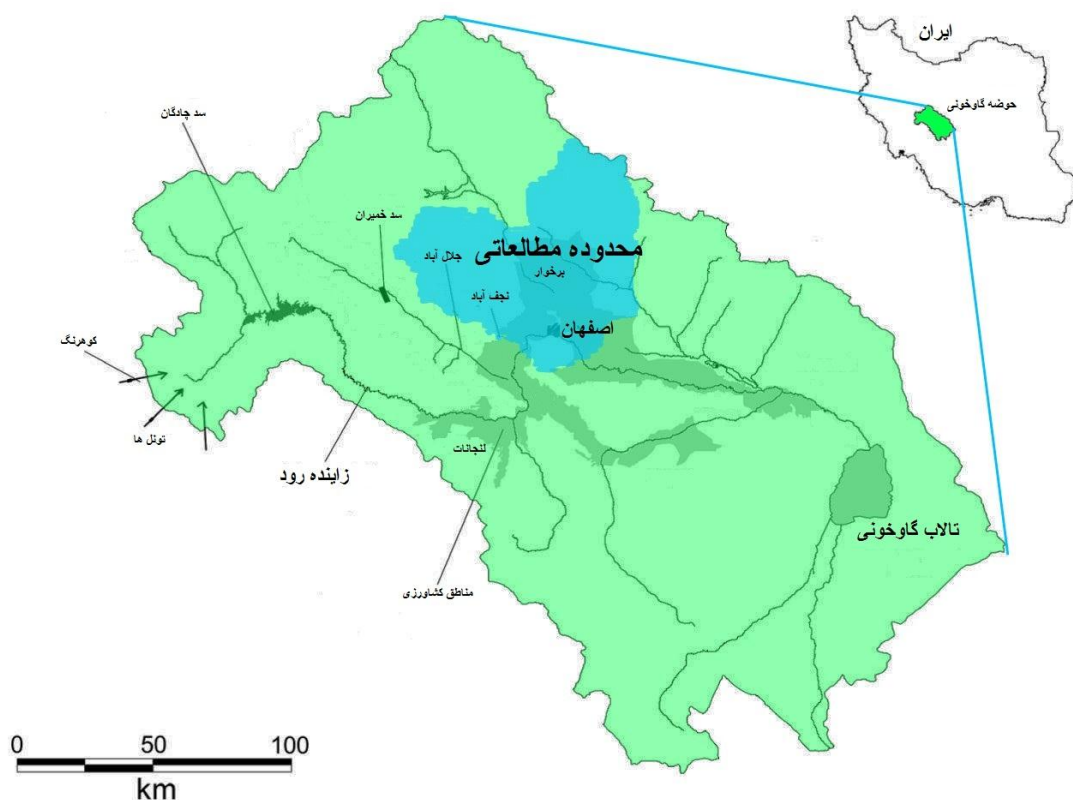
اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری تحت سناریوهای مدیریتی مختلف با MATLAB برای هر سلول انجام شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه شده

محدوده مطالعاتی اصفهان- برخوار یکی از ۶۰۹ محدوده مطالعاتی کشور ایران است که در حوضه آبریز درجه ۲ باتلاق گاوخونی و حوضه درجه ۱ ایران مرکزی قرار گرفته است. این محدوده به‌طور کامل در استان اصفهان و از نظر وضعیت منابع آب جزء محدوده‌های ممنوعه- بحرانی کشور است و با مساحت کل ۳۳۸۵ کیلومترمربع، مساحت دشت ۲۶۸۸ کیلومترمربع (معادل ۷۹ درصد مساحت محدوده) و مساحت آبخوان حدود ۱۵۰۰ کیلومترمربع یکی از محدوده‌های بزرگ مهم و دشت‌های تحت پوشش شرکت آب منطقه‌ای اصفهان است. شکل ۱ موقعیت محدوده مطالعه شده اصفهان- برخوار را نشان می‌دهد.

هدف این مطالعه توسعه مدلی برای محاسبه پایداری کمی و کیفی منبع آب زیرزمینی است. با توجه به ماهیت مسئله، مدل مد نظر باید به شکل نسبی همه مؤلفه‌های اساسی و اثرگذار بر رفتار سیستم آبخوان را همراه با لحاظ کردن کیفیت آب در نظر بگیرد. به این منظور پس از جمع‌آوری اطلاعات، ابتدا از مدل SWAT برای تخمین مقدار اولیه از تغذیه آب زیرزمینی و توزیع زمانی و مکانی آن برای استفاده در مدل MODFLOW استفاده شده و سپس یک مدل شبیه‌ساز جامع کمی و کیفی آب زیرزمینی براساس آمار و اطلاعات موجود با استفاده از مدل جامع GMS v10.1 توسعه داده شده است. در GMS نیز به ترتیب از مدل‌های MODFLOW و MT3DMS به‌عنوان شبیه‌سازهای کمی و کیفی استفاده شده است. واسنجی این مدل‌ها پیش از کاربرد در پیش‌بینی و ارزیابی پاسخ سیستم اهمیت ویژه‌ای دارد که در مدل کمی روش واسنجی خودکار با مدل PEST و در مدل کیفی نیز واسنجی به روش دستی استفاده شده است. محاسبه شاخص پایداری نیز با استفاده از معیارهای عملکرد



شکل ۱. موقعیت محدوده مطالعه شده اصفهان- برخوار

اطلاعات موجود از منطقه

در این مطالعه به دلیل کمبود ایستگاه‌های باران‌سنجی و سینوپتیک و هواشناسی داخل منطقه اصفهان - برخوردار، از اطلاعات ثبت‌شده ایستگاه‌های نزدیک به حوضه در فواصل زمانی مختلف استفاده شده است. بخشی از رودخانه دائمی زاینده‌رود (مهم‌ترین رودخانه دائمی مرکزی ایران) به طول حدود ۲۱ کیلومتر نیز از جنوب محدوده عبور می‌کند.

آبخوان اصفهان - برخوردار از نوع آزاد محسوب می‌شود و در سال‌های اخیر در بیشتر مناطق آن با افزایش شوری مواجهیم. براساس آمار گرفته‌شده از جهاد کشاورزی و بررسی‌ها و نقشه‌های موجود، میزان کل اراضی قابل کشت در محدوده مطالعاتی حدود ۷۰ هزار هکتار است که به دلیل کم‌آبی سال‌های گذشته و گسترش زیاد شهرها و نواحی صنعتی آمار و ارقام رو به کاهش است. به طور مثال، اخیراً و در خشکسالی‌ها این رقم حدود ۵۵ هزار هکتار است. از این نظر دشت اصفهان - برخوردار بعد از کوهپایه و به همراه دشت‌های نجف‌آباد - فلاورجان و بویین - فریدن رتبه دارد.

عمده‌ترین فعالیت کشاورزی منطقه، فعالیت‌های زراعی با مساحت حدود ۳۱ هزار هکتار است که حدود ۵۶/۷ درصد عرصه‌های کشاورزی منطقه را شامل می‌شود. به دلیل کیفیت نامناسب آب زیرزمینی در بیشتر مناطق محدوده برای شرب، آبرسانی از زاینده‌رود (از تصفیه‌خانه باباشیخ‌علی و از طریق خط لوله آبرسانی اصفهان بزرگ) به بیشتر مناطق شهری و روستایی واقع در محدوده انجام شده است. براساس آمار آبفا و آب منطقه‌ای، میزان متوسط چند سال اخیر آب شرب

مصرفی شهرهای یادشده حدود ۱۷۲ میلیون مترمکعب در سال است که حدود ۲ میلیون مترمکعب در سال از آن با آب زیرزمینی تأمین می‌شود. در محدوده مطالعه‌شده سه تصفیه‌خانه جنوب، شمال و شاهین‌شهر وجود دارد. طبق بررسی‌های انجام‌شده، تعداد چاه‌های مشاهده‌ای پیژومتری منطقه ۳۶ عدد است. پس از آماده‌سازی زمانی داده‌های ایستگاه‌ها، شش ایستگاه به دلیل کم‌بودن داده و وجود داده پرت حذف شدند و برای چند ایستگاه در برخی سال‌ها کمبود آماری بود که از روش حداقل مربعات و رگرسیون، سری داده‌ها از ۱۵ مهر ۱۳۸۱ (۱۷ اکتبر ۲۰۰۲) تا ۱۷ اسفند ۱۳۹۱ (۷ مارس ۲۰۱۳) به مدت ۱۲۵ گام زمانی ماهانه تکمیل شد. تعداد چاه‌های مشاهده‌ای کیفی نیز ۱۵ عدد است که داده‌ها به صورت نامنظم و کم موجود بودند. خطی بین داده‌ها برآزش

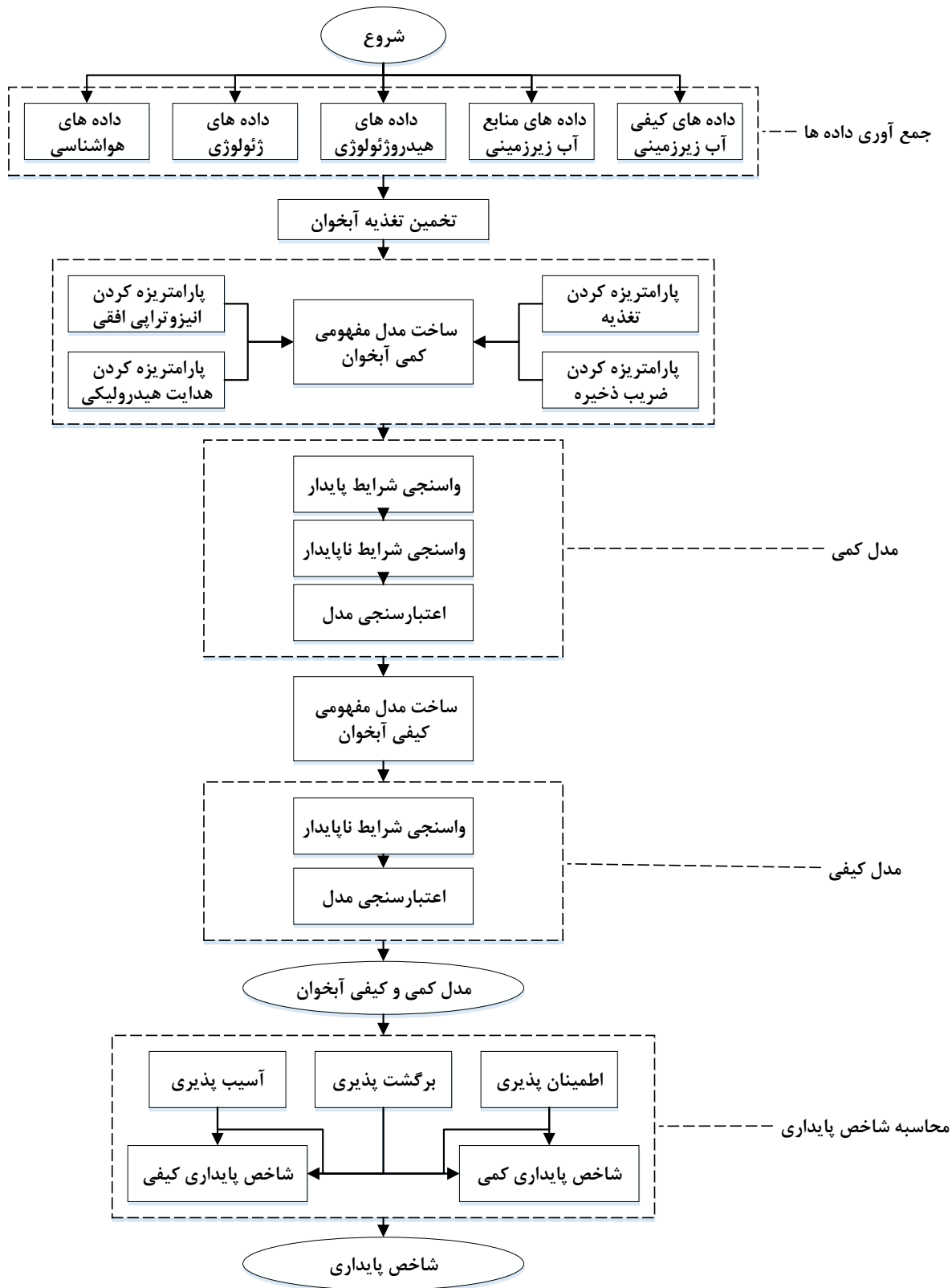
داده شد و داده‌ها به صورت ماهانه از ۱۵ مهر ۱۳۸۱ (۷ اکتبر ۲۰۰۲) تا ۱۷ اسفند ۱۳۹۱ (۷ مارس ۲۰۱۳) به مدت ۱۲۵ گام زمانی ماهانه استخراج شد تا هم داده‌های پرت حذف شود و هم داده‌ها کامل شود.

مراحل انجام تحقیق

هدف از این تحقیق، توسعه مدلی برای محاسبه پایداری کمی و کیفی منبع آب زیرزمینی است. به این منظور پس از جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز، ابتدا مدل SWAT برای تخمین مقدار اولیه از تغذیه آب زیرزمینی و توزیع زمانی و مکانی آن توسعه داده شد. سپس یک مدل شبیه‌ساز جامع کمی و کیفی آب زیرزمینی براساس آمار و اطلاعات موجود از منطقه بررسی شده با مدل جامع v10.1 GMS توسعه داده شد. در GMS نیز به ترتیب از مدل‌های MODFLOW و MT3DMS به عنوان شبیه‌سازهای کمی و کیفی استفاده شده است. واسنجی این مدل‌ها پیش از کاربرد در پیش‌بینی و ارزیابی پاسخ سیستم نسبت به آنچه دیده نشده است، اهمیت ویژه‌ای دارد. به این منظور در مدل کمی ابتدا به روش دستی و سپس به روش واسنجی خودکار با مدل PEST و در مدل کیفی نیز واسنجی به روش دستی استفاده شد. محاسبه شاخص پایداری نیز با استفاده از معیارهای عملکرد اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری تحت سناریوهای مدیریتی مختلف توسط MATLAB برای هر سلول مدل GMS انجام شد. شکل ۲ مراحل انجام این تحقیق را نشان می‌دهد.

مدل SWAT

ابزار ارزیابی آب و خاک (SWAT) مدلی در مقیاس حوضه رودخانه و پیوسته از نظر زمانی است که روی گام زمانی اجرا می‌شود و به منظور پیش‌بینی تأثیرات مدیریت بر آب، رسوبات، محصولات کشاورزی طراحی شده است. این مدل مبتنی بر فیزیک و قابلیت شبیه‌سازی بازه‌های زمانی طولانی است. مؤلفه‌های اصلی SWAT آب و هوا، هیدرولوژی، خصوصیات خاک، پارامترهای رشد گیاهان، مواد معدنی، مدیریت زمین و آب زیرزمینی هستند. در SWAT یک حوضه آبریز به چندین زیرحوضه تقسیم می‌شود که آنها نیز به زیرمجموعه‌هایی به نام واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRUs) تقسیم می‌شوند. HRU به مناطقی در هر زیرحوضه اطلاق می‌شود که ترکیبات یکسانی از پوشش زمین، خاک، شیب زمین و سیاست‌های مدیریتی را شامل می‌شوند.



شکل ۲. مراحل انجام تحقیق

مدل کمی و کیفی آبخوان

GMS یا Groundwater Modeling System نرم افزار بسیار پیچیده و جامعی برای مدل سازی آب های زیرزمینی است. این نرم افزار توسط هزاران نفر در بخش های دولتی، بخش های خصوصی و سایت های بین المللی استفاده می شود و در حقیقت واسطه گرافیکی و به عنوان پیش پرداز و پس پرداز برای ۱۰ مدل آب زیرزمینی است که بیشتر به روش های عددی تفاضل محدود و اجزای محدود به شبیه سازی کمی و کیفی آب های زیرزمینی می پردازد. این مدل ابزارهایی را برای تحلیل زمین آماری، پارامتریزه کردن، توسعه مدل مفهومی و تبدیل آن به یک مدل ریاضی، کالیبراسیون، آنالیز حساسیت و واسنجی مدل را فراهم می کند و توسط آزمایشگاه تحقیقات محیط زیست دانشگاه Brigham Young و با مشارکت بخش مهندسی آب ارتش آمریکا توسعه داده شده است و محصول شرکت Aquaveo است.

کد MODFLOW که توسط سازمان زمین شناسی آمریکا ارائه شده است، کاربردهای گسترده و مقبولیت زیادی نزد هیدروژئولوژیست ها دارد. نسخه اصلی مدل MODFLOW توسط McDonald و Harbough (۱۹۸۰) در USGS تهیه و ارائه شده است [۱۲]. این نرم افزار با زبان برنامه نویسی FORTRAN نوشته شده است و معادلات دیفرانسیل جریان آب زیرزمینی در محیط متخلخل را بر پایه روش های تفاضل محدود حل می کند. از جمله ویژگی های دیگر MODFLOW می توان به ساختار ماژولی آن اشاره کرد. بدین ترتیب که می توان برای فرایندهای خاص هیدرولوژیکی ماژول خاصی را فعال یا غیرفعال کرد. این دلایل سبب شده MODFLOW از سوی بسیاری سازمان ها به عنوان نرم افزار برتر استفاده شود. معادلات توصیف کننده جریان سه بعدی آب زیرزمینی با فرض ثابت بودن چگالی، در آبخوان مطابق فرمول ۱ هستند:

$$K_{xx} \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + K_{yy} \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + K_{zz} \frac{\partial}{\partial z} \left(h \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

در فرمول ۱، K_{xx} ، K_{yy} و K_{zz} مؤلفه های هدایت هیدرولیکی در سه جهت x ، y و z ؛ h ارتفاع عمودی سطح ایستابی با ارتفاع پیزومتري؛ W ترم تغذیه یا زهکش؛ S_y آبدهی ویژه و t زمان است.

MT3DMS یک مدل عددی سه بعدی قدرتمند برای شبیه سازی انتقال ماده حل شده در شرایط و محیط های هیدروژئولوژیکی پیچیده است که قادر به شبیه سازی فرایندهای انتقال به صورت مستقل یا با هم است. MT3DMS در مدل سازی انتقال جریان های پایدار و ناپایدار، پراکندگی ناهمگون، زوال مرتبه نخست و فرایند واکنش ها و همچنین جذب سطحی خطی یا غیرخطی بسیار تواناست. همه این موارد MT3DMS را قادر به شبیه سازی آلاینده های چندگانه مختلف و واکنش های آنها ساخته است. این مدل توسط بسیاری از محققان با مدل MODFLOW مرتبط شده و پرداختن به مسئله مربوط به انتقال را بدون نیاز به ساخت مدلی جدید میسر ساخته است. معادله عمومی توصیف کننده شرایط انتقال سه بعدی ماده حل شده در آب زیرزمینی در محیط متخلخل به شرح زیر است:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \quad (2)$$

در رابطه ۲، D_{ij} ضرایب هیدرودینامیکی پخش شدگی، C غلظت جریان تغذیه یا زهکش، θ تخلخل، v_i سرعت نیست و R ضریب تأخیر هستند.

معیارهای عملکرد و شاخص پایداری

شاخص پایداری (SI) کارایی گزینه های مدیریتی مختلف را جمع بندی می کند. همچنین این شاخص تخمینی بر ظرفیت سیستم در کاهش آسیب پذیری آن است. اگر یک سیاست پیشنهادی سبب شود که یک سیستم پایدارتر شود، این شاخص نشان می دهد سیستم ظرفیت بیشتری در کاهش آسیب پذیری در آینده دارد. معیارهای عملکرد سیستم های منابع آب، از مهم ترین اجزای تخمین پایداری منابع آب هستند. این معیارها برای ارزیابی سیستم های مدیریت منابع آب به کار گرفته می شوند.

معیارهای عملکرد سیستم های منابع آب به منظور محاسبه شاخص های پایداری کمی و کیفی براساس پارامترهای حد مطلوب وضعیت منبع (desire) و وضعیت منبع (reservoir) برای زامین منبع آب تعریف می شوند. کمبود کمی و کیفی به ترتیب به صورت روابط ۳ و ۴ تعریف می شود. D_t کمبود آب در گام زمانی t ام را در محل z نشان می دهد.

$$D_t^j = \begin{cases} Desire_t^j - Reservoir_t^j & \text{if } Desire_t^j > Reservoir_t^j \\ . & \text{if } Desire_t^j \leq Reservoir_t^j \end{cases} \quad (3)$$

$$D_t^j = \begin{cases} Reservoir_t^j - Desire_t^j & \text{if } Reservoir_t^j > Desire_t^j \\ . & \text{if } Reservoir_t^j \leq Desire_t^j \end{cases} \quad (4)$$

حد مطلوب وضعیت منبع از بدترین وضعیت منبع در کل گام‌های زمانی تعریف می‌شود.

$$Vul^j = \frac{\sum D_t^j}{N \times (Desire_{all}^j - Reservoir_{all}^j)} ; 0 \leq Vul^j \leq 1 \quad (7)$$

شاخص پایداری: به صورت میانگین هندسی معیارهای عملکرد تعریف می‌شود.

$$SI^j = \left[\prod_{m=1}^M C_m^j \right]^{\frac{1}{M}} ; 0 \leq SI^j \leq 1 \quad (8)$$

در رابطه ۸ C_m^j معیارهای عملکرد، M تعداد معیارهای عملکرد را نشان می‌دهد.

مقادیر حد مطلوب وضعیت منبع ($Desire_t^j$) در همه گام‌های زمانی ثابت و برابر با وضعیت منبع در گام زمانی نخست ($Reservoir_1^j$) در نظر گرفته شده است.

شاخص پایداری کلی نیز به صورت میانگین شاخص پایداری سلول‌ها محاسبه می‌شود.

$$SI = Average(SI^j) ; 0 \leq SI \leq 1 \quad (9)$$

نتایج و بحث

حل معادلات دیفرانسیل جزئی آب‌های زیرزمینی از طریق عددی مستلزم تعیین شرایط مرزی و استفاده از اطلاعات موجود در این مرزهاست. از آنجا که آبخوان دشت اصفهان - برخوار از نوع آزاد است، سطح زمین قسمت فوقانی آبخوان را تشکیل می‌دهد. بنابراین، از نقشه توپوگرافی سطح زمین از لندست ۹۰ متر استفاده شد. نقشه تراز سنگ کف آبخوان هم این گونه به دست آمد که ۱۰ درصد از عمیق‌ترین چاه‌های بهره‌برداری شده انتخاب شد و به روش درون‌یابی کریجینگ در ArcGIS به دست آمد. نوع مرزهای جانبی آبخوان از طریق نقشه زمین‌شناسی موجود از منطقه به دست آمد و عمق آب در مرزهای آبخوان نیز با درون‌یابی از چاه‌های مشاهداتی در هر گام زمانی روی مرزها محاسبه شد. سطح ایستابی مهر ۱۳۸۱، که از چاه‌های مشاهداتی درون‌یابی شده به روش کریجینگ به دست آمده است، به عنوان بار هیدرولیکی اولیه

قابلیت اطمینان: اطمینان‌پذیری یا قابلیت اطمینان تعداد دفعاتی است که وضعیت منبع بهتر از حد مطلوب وضعیت منبع باشد یا کمبود برابر صفر شود.

$$Rel^j = \frac{No. of time steps D_t^j = 0}{No. of all time steps} ; 0 \leq Rel^j \leq 1 \quad (5)$$

که در آن N_s عدد مربوط به تعداد دفعاتی است که وضعیت منبع بهتر از حد مطلوب وضعیت منبع باشد و یا کمبود برابر صفر شود و N تعداد کل گام‌های زمانی طی دوره شبیه‌سازی یا دوره بررسی شده است.

برگشت‌پذیری: توانایی سیستم در تغییر شرایط آن است. در واقع این پارامتر برای سیستم‌های منابع آب به این صورت تعریف می‌شود که چقدر می‌تواند پس از شکست سیستم آن را به حالت مطلوب بازگرداند. Hashimoto و همکارانش (۱۹۹۲) احتمال اینکه یک سیستم پس از شکست به حالت مطلوب برگردد را برگشت‌پذیری بیان کردند [۱۳]. Moy و همکارانش (۱۹۸۶) ماکزیمم دوره‌های متوالی که یک سیستم قبل از بازگشت به حالت مطلوب، کمبود داشت را به عنوان تعریف برگشت‌پذیری یا انعطاف‌پذیری سیستم‌های منابع آب تعریف کردند [۱۴]. در این تحقیق تعداد دفعاتی که طی دوره شبیه‌سازی سیستم از حالت شکست به حالت مطلوب برگشته به تعداد کل گام‌های زمانی که در آنها سیستم کمبود مواجه بوده است را به عنوان برگشت‌پذیری سیستم تعریف کردند.

$$Res^j = \frac{No. of times D_t^j = 0 \text{ follows } D_t^j > 0}{No. of times D_t^j = 0 \text{ ocured}} ; \quad (6)$$

$0 \leq Res^j \leq 1$
آسیب‌پذیری: پارامتری شبیه کمبودها در سیستم است، اگر اتفاق بیفتد [۱۵]. اساساً آسیب‌پذیری شدت شکست‌های سیستم را بیان می‌کند و می‌تواند به عنوان میانگین شکست‌ها [۱۶]؛ میانگین ماکزیمم کمبودها طی یک دوره متوالی شکست در سیستم [۱۳ و ۱۵] و احتمال بیشتر شدن کمبود در یک یا چند دوره از یک حد معین [۱۷] تعریف شود. در این تحقیق از تعریف، نسبت مجموع کل کمبودها بر تفاضل

۱۶ آبان ۱۳۸۱ (۷ نوامبر ۲۰۰۲) انتخاب شد که تغییرات سطح آب ناچیز است. بنابراین، می‌توان فرض کرد که در این دوره بین میزان تغذیه و تخلیه آبخوان تعادل برقرار است. در کالیبراسیون پایدار پارامترهای هدایت هیدرولیکی و انیزوتراپی افقی به‌دست آمده و در کالیبراسیون ناپایدار که با ۹۵ گام زمانی ماهانه از ۱۶ آبان ۱۳۸۱ (۷ نوامبر ۲۰۰۲) تا ۱۵ مهر ۱۳۸۹ (۱۷ اکتبر ۲۰۱۰) انجام شده است، پارامترهای هدایت هیدرولیکی، انیزوتراپی افقی و تغذیه (به‌دست‌آمده از SWAT) تدقیق شده و آبدهی ویژه نیز برآورد شد. کالیبراسیون مدل کمی در دو سطح انجام شده است. ابتدا پارامترهای مدل به‌صورت دستی تنظیم شده‌اند به‌طوری که خروجی‌های مدل با تراز چاه‌های مشاهداتی تا حد ممکن تطبیق یابند. سپس عمل کالیبراسیون خودکار با استفاده از PEST با توجه به مقادیر اولیه به‌دست‌آمده برای پارامترها در انتهای مرحله کالیبراسیون دستی و معرفی مقادیر پیشینه و کمینه مجاز برای هر یک از پارامترها و اعمال سایر تنظیمات در این نرم‌افزار، انجام شده است. کمترین و بیشترین مقدار پارامترها براساس مطالعات قبلی و گزارش‌های موجود انتخاب شده است (جدول ۱).

جدول ۱. مقادیر بیشترین و کمترین مقدار پارامترهای مدل

| پارامتر | حدود تغییرات | | پارامتر | حدود تغییرات | |
|------------------------------|--------------|---------|--------------------|--------------|--------|
| | بیشترین | کمترین | | بیشترین | کمترین |
| هدایت هیدرولیکی (متر در روز) | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۶ | ضریب ذخیره | ۰/۰۶ | |
| انیزوتراپی افقی | ۱×۱۰-۱۰ | ۱×۱۰-۱۰ | تغذیه (متر در روز) | ۰/۰۰۰۸ | |

با توجه به قابلیت‌های نرم‌افزار GMS در کالیبراسیون مدل‌های عددی، از قابلیت Regularization در این نرم‌افزار برای کالیبراسیون در محدوده مدل‌سازی استفاده شد. با استفاده از این قابلیت، تعدادی نقاط نشانه (Pilot Points) در محدوده مدل تعریف شده و براساس مقادیر منتج از کالیبراسیون دستی، به هر یک از این نقاط نشانه یک مقدار اولیه اختصاص داده می‌شود. در مرحله بعد نرم‌افزار GMS با درون‌یابی مقادیر براساس مقادیر داده‌شده برای نقاط نشانه، مقادیر را برای همه سلول‌های مدل محاسبه کرده و با اجرای مدل با استفاده از این مقادیر، توزیع سطح آب در محدوده مدل را شبیه‌سازی می‌کند. سپس با مقایسه مقادیر تراز سطح آب مشاهداتی و محاسباتی در محل چاه‌های مشاهداتی، خطای محاسباتی

استفاده شد. با توجه به اینکه اطلاعات موجود در زمینه آمار تخلیه چاه‌ها به‌صورت دبی لحظه‌ای است و همچنین ساعات کارکرد چاه‌های بهره‌برداری با توجه به نیازهای کشاورزی برای ماه‌های مختلف سال متفاوت است، بنابراین نمی‌توان دبی سالیانه را یکنواخت بین همه روزهای سال تقسیم کرد. ۳۹۷۴ چاه بهره‌برداری در منطقه وجود دارد که طبق آمار، اغلب آنها بیشترین برداشت از آبخوان را به‌ترتیب در ماه‌های تابستان، بهار، پاییز و زمستان دارند. با توجه به نقشه هم‌عمق آب زیرزمینی، سطح آب زیرزمینی در عمقی بیش از پنج متر از سطح زمین قرار دارد، بنابراین تبخیر از آب زیرزمینی انجام نمی‌گیرد.

شبکه سلولی به‌کاررفته سلول‌هایی با اندازه‌های مساوی (۵۰۰ × ۵۰۰) و دارای ۱۱۷ سطر و ۱۳۶ ستون و یک لایه و کلاً ۱۵۹۱۲ سلول دارد که از این تعداد ۶۴۹۸ سلول فعال هستند و باقی آنها سلول‌های غیرفعال در مدل‌سازی (خارج از محدوده مدل‌سازی) هستند.

پس از آماده‌سازی مدل عددی کمی، مدل برای شرایط پایدار و ناپایدار واسنجی شده است. برای واسنجی در شرایط ماندگار، دوره نخست از ۱۵ مهر ۱۳۸۱ (۱۷ اکتبر ۲۰۰۲) تا

پس از آماده‌سازی مدل عددی کیفی، مدل برای شرایط ناپایدار واسنجی شده است. برای واسنجی در شرایط ناپایدار که با ۹۶ گام زمانی ماهانه از ۱۵ مهر ۱۳۸۱ (۱۷ اکتبر ۲۰۰۲) تا ۱۵ مهر ۱۳۸۹ (۱۷ اکتبر ۲۰۱۰) انجام شده است، پارامترهای ضریب پخش‌شدگی طولی و عرضی، تخلخل و بارهای نفوذی از اراضی مختلف برآورد شده است. کالیبراسیون مدل کیفی به‌صورت دستی تنظیم شده‌اند به‌طوری که خروجی‌های مدل با تراز چاه‌های مشاهداتی تا حد ممکن تطبیق یابند.

برای صحت‌سنجی مدل کمی و کیفی، ابتدا سطح آب برای ۲۹ گام زمانی ماهانه از ۱۵ مهر ۱۳۸۹ (۱۷ اکتبر ۲۰۱۰) تا ۱۷ اسفند ۱۳۹۱ (۷ مارس ۲۰۱۳) توسط مدل پیش‌بینی شد و نتایج به‌دست‌آمده با آمار مشاهداتی مقایسه شد.

رسید. برای پارامترهای هدایت هیدرولیکی، انیزوتراپی افقی و ضریب ذخیره از قابلیت Regularization و بقیه پارامترهای کالیبراسیون کمی و کیفی نیز به صورت پلیگونی استفاده شده است.

مقادیر خطاها و ضریب همبستگی در چاه‌های مشاهداتی برای مدل کمی و کیفی در دوره واسنجی ناپایدار، صحت‌سنجی و کل دوره مدل‌سازی در جدول‌های ۲ و ۳ آمده است که نشان‌دهنده دقت زیاد مدل است.

مدل تعیین می‌شود و مدل سعی می‌کند با اصلاح مقادیر در نقاط نشانه، بار دیگر درون‌یابی انجام شود و مقادیر جدید این پارامتر در هر سلول از مدل محاسبه می‌شود. با تکرار این روند و همگراشدن مقادیر در نقاط نشانه به مقادیر واقعی خود، برنامه متوقف می‌شود و توزیع نهایی این پارامتر در محدوده مطالعاتی را براساس درون‌یابی در محل نقاط نشانه تعیین می‌کند. بدین ترتیب حالت بهینه توزیع پارامتر در سطح محدوده مدل‌سازی با دقت مناسبی برآورد شده و خطای مدل به حداقل مقدار ممکن خواهد

جدول ۲. مقادیر خطاها و ضریب همبستگی مدل عددی کمی در دوره واسنجی ناپایدار، صحت‌سنجی و کل دوره مدل‌سازی

| واسنجی ناپایدار | | | | | | | |
|-------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|-------|---------------------|
| Mean error | | Mean absolute error | | Root mean squared error | | | |
| ۰/۰۵۹ | | ۰/۳۱۵ | | ۰/۵۱۰ | | | |
| Correlation Coefficient | | | | | | | |
| ۰/۸۲۶ | W _{Quan} 24 | ۰/۹۱۸ | W _{Quan} 17 | ۰/۹۵۵ | W _{Quan} 9 | ۰/۹۲۰ | W _{Quan} 1 |
| ۰/۹۹۸ | W _{Quan} 25 | ۱ | W _{Quan} 18 | ۰/۹۹۵ | W _{Quan} 10 | ۰/۹۸۹ | W _{Quan} 2 |
| ۰/۹۲۲ | W _{Quan} 26 | ۰/۹۹۷ | W _{Quan} 19 | ۰/۹۹۵ | W _{Quan} 11 | ۰/۹۹۴ | W _{Quan} 3 |
| ۰/۹۹۰ | W _{Quan} 27 | ۰/۹۹۶ | W _{Quan} 20 | ۰/۹۹۸ | W _{Quan} 12 | ۰/۹۴۴ | W _{Quan} 4 |
| ۰/۹۹۴ | W _{Quan} 28 | ۰/۹۸۱ | W _{Quan} 21 | ۰/۹۵۲ | W _{Quan} 13 | ۰/۹۷۲ | W _{Quan} 5 |
| ۰/۸۱۹ | W _{Quan} 29 | ۰/۹۹۲ | W _{Quan} 22 | ۰/۸۶۹ | W _{Quan} 14 | ۰/۷۹۲ | W _{Quan} 6 |
| ۰/۹۹۶ | W _{Quan} 30 | ۰/۹۸۷ | W _{Quan} 23 | ۰/۶۷۷ | W _{Quan} 15 | ۰/۷۶۴ | W _{Quan} 7 |
| | | | | ۰/۹۹۶ | W _{Quan} 16 | ۰/۷۵۶ | W _{Quan} 8 |
| صحت‌سنجی | | | | | | | |
| Mean error | | Mean absolute error | | Root mean squared error | | | |
| -۰/۰۱۲ | | ۰/۱۲۱ | | ۰/۳۳۷ | | | |
| Correlation Coefficient | | | | | | | |
| ۰/۵۹۴ | W _{Quan} 24 | ۰/۷۹۹ | W _{Quan} 17 | ۰/۸۰۸ | W _{Quan} 9 | ۰/۹۳۶ | W _{Quan} 1 |
| ۰/۹۹۹ | W _{Quan} 25 | ۱ | W _{Quan} 18 | ۰/۹۲۰ | W _{Quan} 10 | ۱ | W _{Quan} 2 |
| ۰/۹۱۸ | W _{Quan} 26 | ۱ | W _{Quan} 19 | ۰/۹۹۲ | W _{Quan} 11 | ۰/۷۸۶ | W _{Quan} 3 |
| ۰/۹۸۳ | W _{Quan} 27 | ۱ | W _{Quan} 20 | ۰/۹۹۳ | W _{Quan} 12 | ۰/۷۵۳ | W _{Quan} 4 |
| ۰/۸۵۰ | W _{Quan} 28 | ۰/۸۸۰ | W _{Quan} 21 | ۰/۳۴۱ | W _{Quan} 13 | ۰/۷۹۳ | W _{Quan} 5 |
| ۰/۸۶۹ | W _{Quan} 29 | ۰/۹۰۷ | W _{Quan} 22 | ۰/۸۳۰ | W _{Quan} 14 | ۰/۱۳۶ | W _{Quan} 6 |
| ۰/۹۹۸ | W _{Quan} 30 | ۰/۹۳۴ | W _{Quan} 23 | ۰/۸۲۷ | W _{Quan} 15 | ۰/۸۶۶ | W _{Quan} 7 |
| | | | | ۱ | W _{Quan} 16 | ۰/۹۴۰ | W _{Quan} 8 |

جدول ۳. مقادیر خطاها و ضریب همبستگی مدل عددی کیفی در دوره واسنجی ناپایدار، صحت‌سنجی و کل دوره مدل‌سازی

| واسنجی ناپایدار | | | | | | | |
|-------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|-------------------------|---------------------|-------|---------------------|
| Mean error | | Mean absolute error | | Root mean squared error | | | |
| ۰/۱۶۰ | | ۰/۹۵۷ | | ۱/۶۶۶ | | | |
| Correlation Coefficient | | | | | | | |
| ۰/۹۵۲ | W _{Qual} 13 | ۰/۹۴۶ | W _{Qual} 9 | ۰/۹۹۵ | W _{Qual} 5 | ۰/۹۹۹ | W _{Qual} 1 |
| ۰/۹۴۱ | W _{Qual} 14 | ۱ | W _{Qual} 10 | ۰/۹۹۴ | W _{Qual} 6 | ۱ | W _{Qual} 2 |
| ۰/۹۳۱ | W _{Qual} 15 | ۰/۷۸۰ | W _{Qual} 11 | ۰/۹۶۴ | W _{Qual} 7 | ۰/۹۶۹ | W _{Qual} 3 |
| | | ۰/۹۹۹ | W _{Qual} 12 | ۰/۹۱۷ | W _{Qual} 8 | ۰/۹۵۶ | W _{Qual} 4 |
| صحت‌سنجی | | | | | | | |
| Mean error | | Mean absolute error | | Root mean squared error | | | |
| -۰/۱۵۰ | | ۰/۲۶۹ | | ۰/۹۱۹ | | | |
| Correlation Coefficient | | | | | | | |
| ۰/۹۹۳ | W _{Qual} 13 | ۱ | W _{Qual} 9 | ۰/۹۳۷ | W _{Qual} 5 | ۰/۹۶۹ | W _{Qual} 1 |
| ۰/۹۹۵ | W _{Qual} 14 | ۱ | W _{Qual} 10 | ۰/۹۹۷ | W _{Qual} 6 | ۱ | W _{Qual} 2 |
| ۰/۹۹۷ | W _{Qual} 15 | ۰/۹۶۶ | W _{Qual} 11 | ۱ | W _{Qual} 7 | ۰/۹۷۵ | W _{Qual} 3 |
| | | ۱ | W _{Qual} 12 | ۰/۹۹۶ | W _{Qual} 8 | ۰/۹۹۹ | W _{Qual} 4 |

پایداری کمی و کیفی را محاسبه می‌کند. در نهایت، شاخص پایداری محاسبه شده را در محیط GMS نمایش می‌دهد. برای محاسبه شاخص پایداری برای کل آبخوان نیز میانگین کل سلول‌ها محاسبه شد.

$$\text{Quan SI} = \left[\text{Rel}_{\text{Quan}} \times \text{Res}_{\text{Quan}} \times (1 - \text{Vul}_{\text{Quan}}) \right]^{1/3} \quad (10)$$

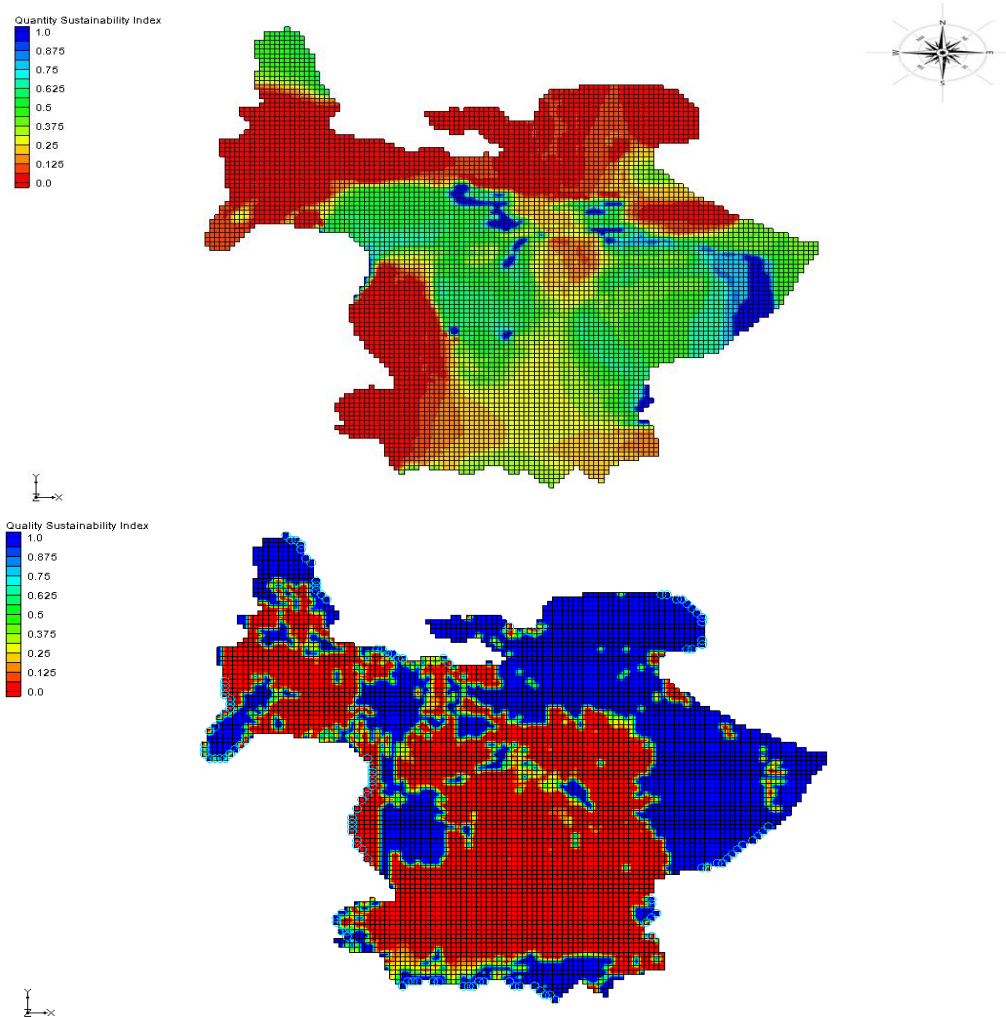
$$\text{Qual SI} = \left[\text{Rel}_{\text{Qual}} \times \text{Res}_{\text{Qual}} \times (1 - \text{Vul}_{\text{Qual}}) \right]^{1/3} \quad (11)$$

$$\text{SI} = \left[\text{Rel}_{\text{Quan}} \times \text{Res}_{\text{Quan}} \times (1 - \text{Vul}_{\text{Quan}}) \times \text{Rel}_{\text{Qual}} \times \text{Res}_{\text{Qual}} \times (1 - \text{Vul}_{\text{Qual}}) \right]^{1/6} \quad (12)$$

به دلیل جهت جریان آب زیرزمینی، کم است و در مناطق جنوبی و شرقی مقادیر مناسبی دارد. شاخص پایداری کیفی نیز در بیشتر مناطقی که کاربری اراضی کشاورزی، شهری و صنعتی دارند، به دلیل نفوذ پساب آنها، بسیار کم است و در سایر مناطق مقادیر مناسبی دارد.

برای محاسبه شاخص پایداری از نرم‌افزار MATLAB استفاده شد. این نرم‌افزار ارتفاع و غلظت هر سلول را به ترتیب از فایل‌های خروجی نرم‌افزارهای MODFLOW و MT3DMS دریافت کرده و معیارهای عملکرد اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و شاخص

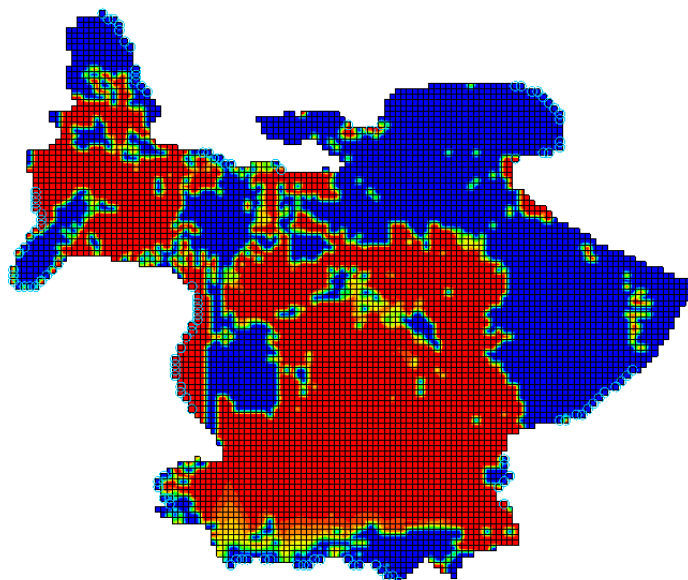
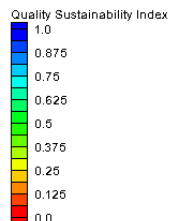
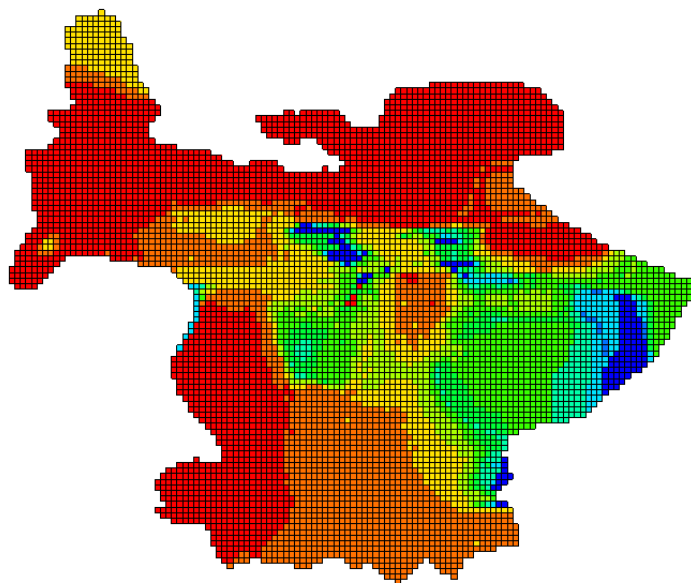
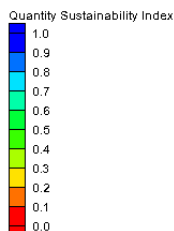
شکل ۳ شاخص پایداری کمی و کیفی را طی ۱۲۵ گام زمانی ماهانه دوره شبیه‌سازی را از ۱۵ مهر ۱۳۸۱ (۷ اکتبر ۲۰۰۲) تا ۱۷ اسفند ۱۳۹۱ (۷ مارس ۲۰۱۳) نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، شاخص پایداری کمی در بیشتر مناطق شمالی و غربی،



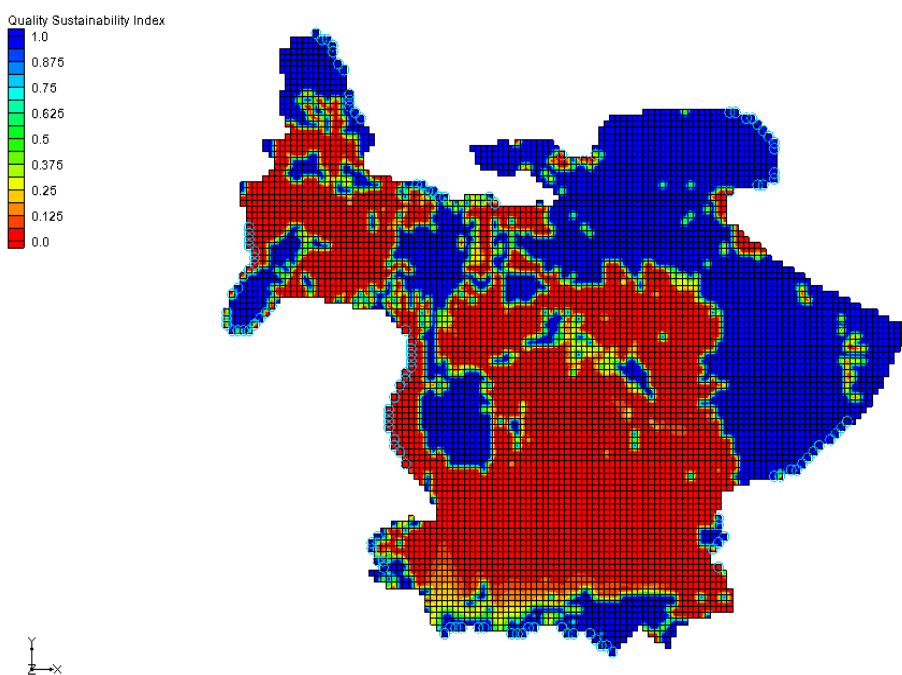
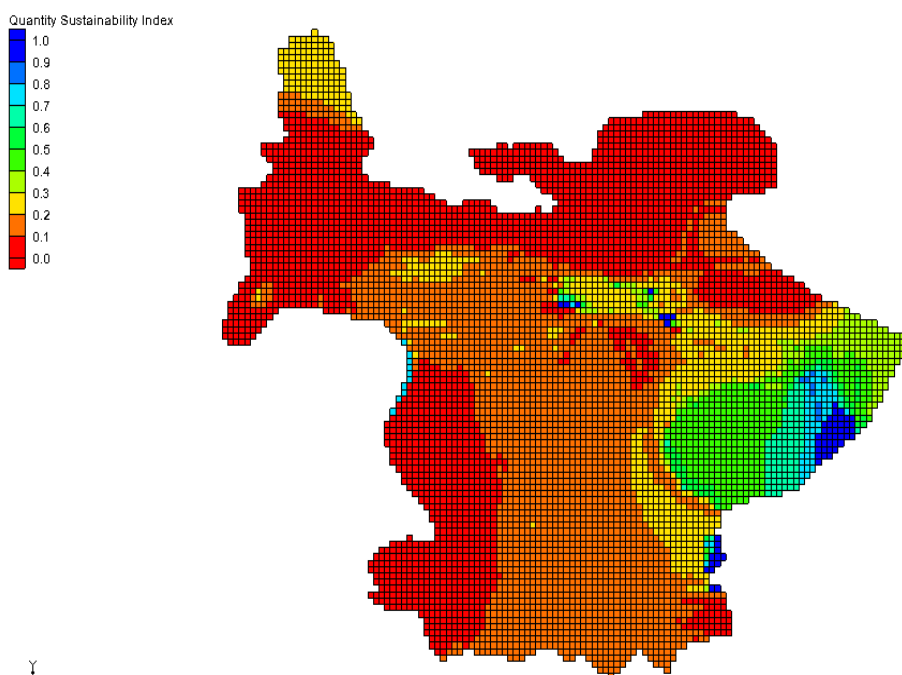
شکل ۳. شاخص پایداری کمی و کیفی طی ۱۲۵ گام زمانی دوره شبیه‌سازی

شکل ۵ شاخص پایداری کمی و کیفی را طی ۲۵۰ گام زمانی ماهانه (۱۲۵ گام زمانی ماهانه دوره شبیه‌سازی به علاوه ۱۲۵ گام زمانی ماهانه تحت شرایط سناریوی دوم) را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود شاخص پایداری کمی آبخوان به شدت کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه شاخص پایداری نیز کاهش می‌یابد.

شکل ۴ شاخص پایداری کمی و کیفی را طی ۲۵۰ گام زمانی ماهانه (۱۲۵ گام زمانی ماهانه دوره شبیه‌سازی به علاوه ۱۲۵ گام زمانی پیش‌بینی‌شده ماهانه تحت شرایط سناریوی نخست از ۱۷ اسفند ۱۳۹۱ (۷ مارس ۲۰۱۳) تا ۱۵ مرداد ۱۴۰۲ (۶ آگوست ۲۰۲۳) نشان می‌دهد. همان طور که از شکل مشخص است، با ادامه روند فعلی برداشت از آبخوان، وضعیت آبخوان، به خصوص وضعیت کمی آن، بدتر خواهد شد.



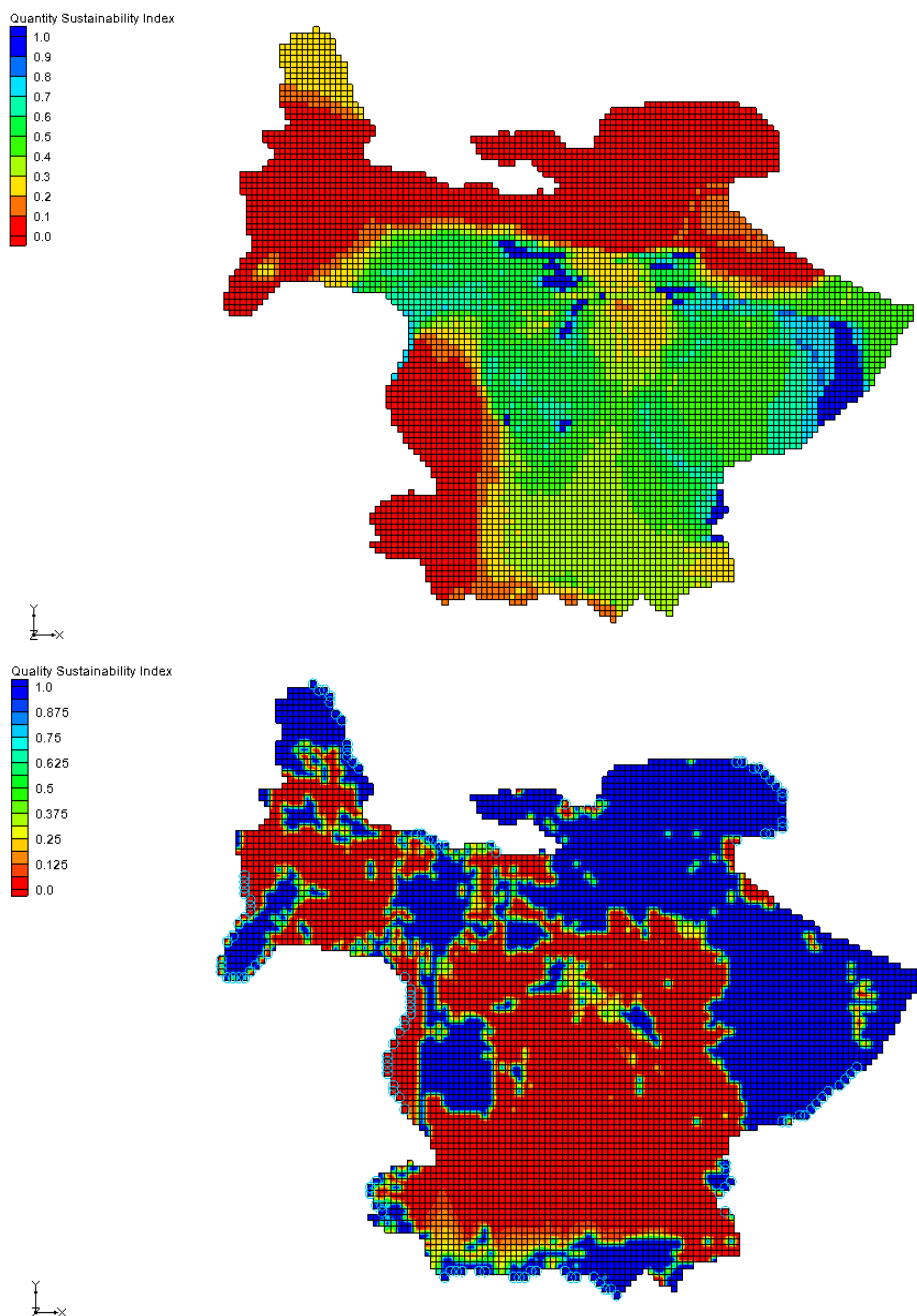
شکل ۴. شاخص پایداری کمی و کیفی طی ۲۵۰ گام زمانی (۱۲۵ گام زمانی دوره شبیه‌سازی به علاوه ۱۲۵ گام زمانی پیش‌بینی تحت سناریوی نخست)



شکل ۵. شاخص پایداری کمی و کیفی طی ۲۵۰ گام زمانی (۱۲۵ گام زمانی دوره شبیه‌سازی به علاوه ۱۲۵ گام زمانی پیش‌بینی تحت سناریوی دوم)

نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود شاخص پایداری کمی آبخوان و در نتیجه شاخص پایداری نیز افزایش می‌یابد.

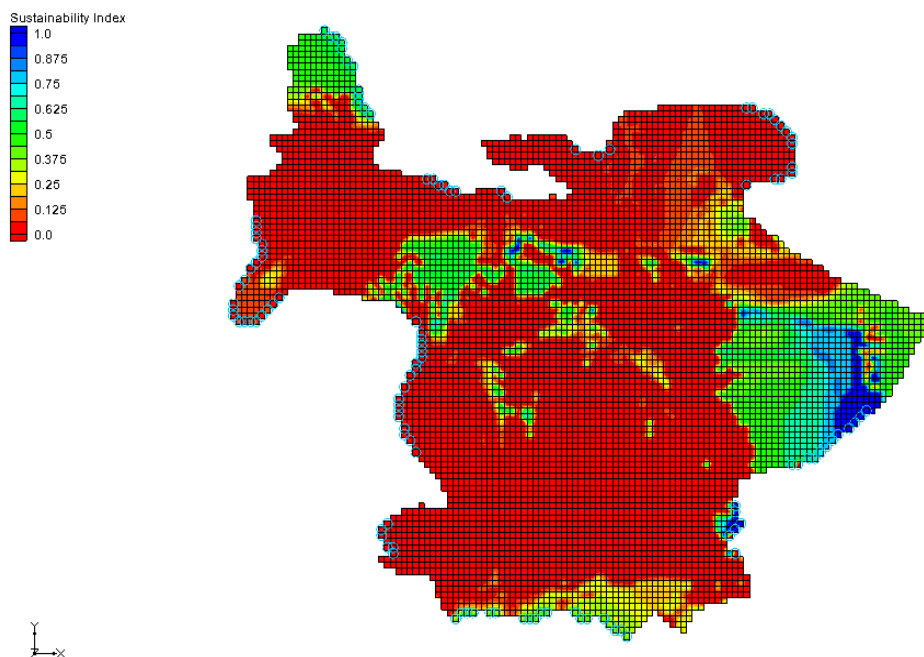
شکل ۶ شاخص پایداری کمی و کیفی را طی ۲۵۰ گام زمانی ماهانه (۱۲۵ گام زمانی دوره شبیه‌سازی به علاوه ۱۲۵ گام زمانی ماهانه تحت شرایط سناریوی سوم)



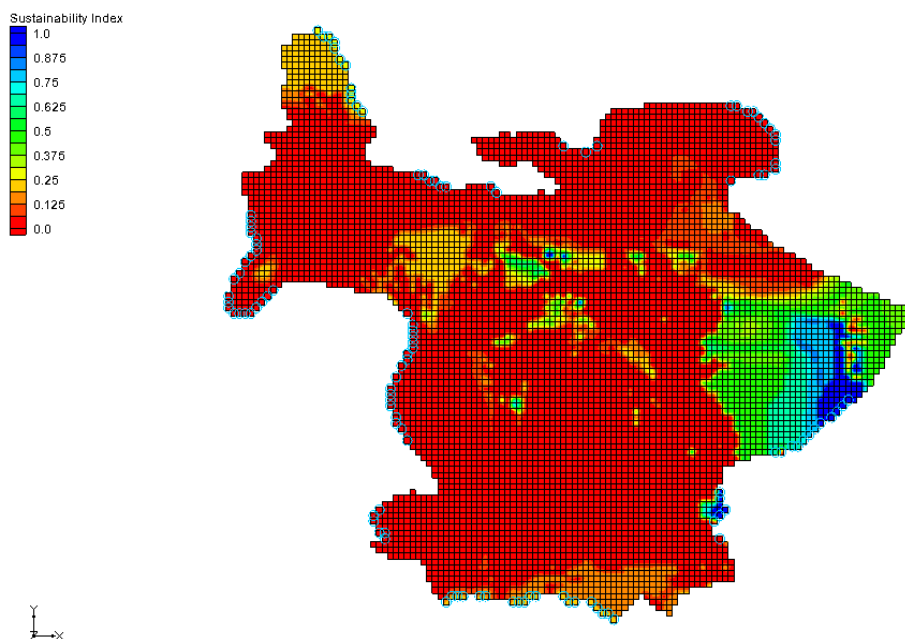
شکل ۶. شاخص پایداری کمی و کیفی طی ۲۵۰ گام زمانی (۱۲۵ گام زمانی دوره شبیه‌سازی به علاوه ۱۲۵ گام زمانی پیش‌بینی تحت سناریوی سوم)

زمانی ماهانه دوره شبیه‌سازی به علاوه ۱۲۵ گام زمانی ماهانه تحت شرایط سناریوی دوم) و طی ۲۵۰ گام زمانی ماهانه (۱۲۵ گام زمانی ماهانه دوره شبیه‌سازی به علاوه ۱۲۵ گام زمانی ماهانه تحت شرایط سناریوی سوم) نشان می‌دهند.

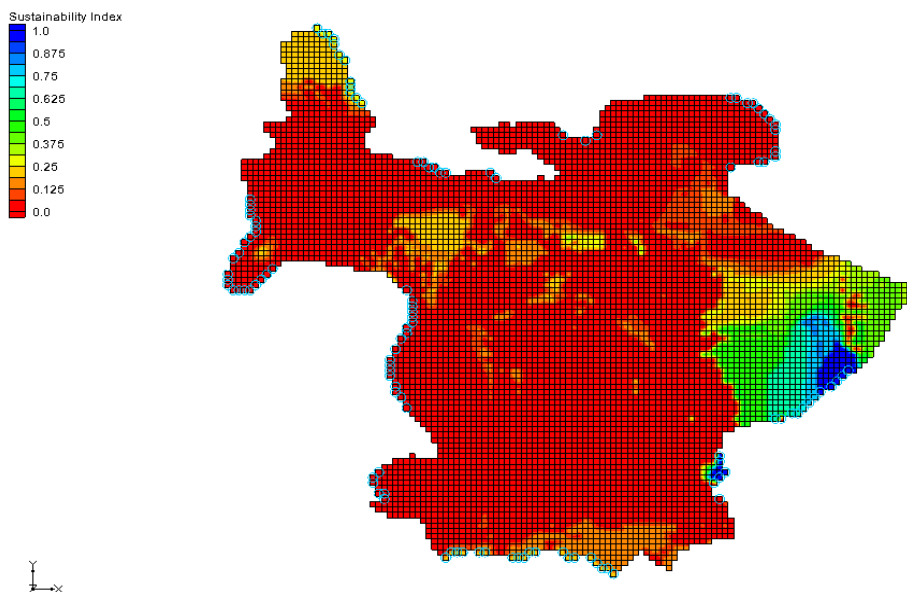
شکل‌های ۷-۱۰ به ترتیب شاخص پایداری را طی ۱۲۵ گام زمانی ماهانه دوره شبیه‌سازی، طی ۲۵۰ گام زمانی ماهانه (۱۲۵ گام زمانی ماهانه دوره شبیه‌سازی به علاوه ۱۲۵ گام زمانی پیش‌بینی شده ماهانه تحت شرایط سناریوی نخست)، طی ۲۵۰ گام زمانی ماهانه (۱۲۵ گام



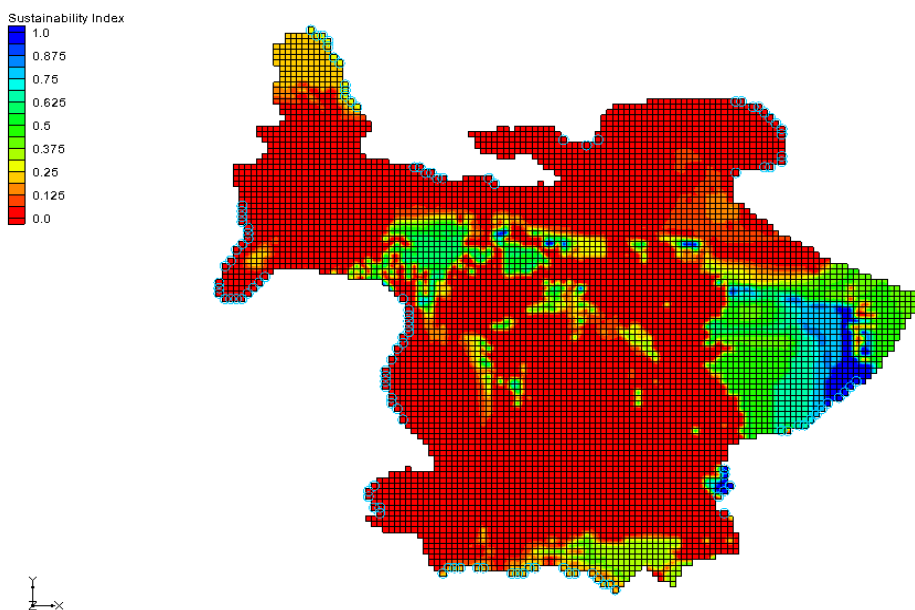
شکل ۷. شاخص پایداری طی ۱۲۵ گام زمانی دوره شبیه‌سازی ($SI = 0.0523$)



شکل ۸. شاخص پایداری طی ۲۵۰ گام زمانی (۱۲۵ گام زمانی دوره شبیه‌سازی به علاوه ۱۲۵ گام زمانی پیش‌بینی تحت سناریوی نخست) ($SI = 0.0406$)



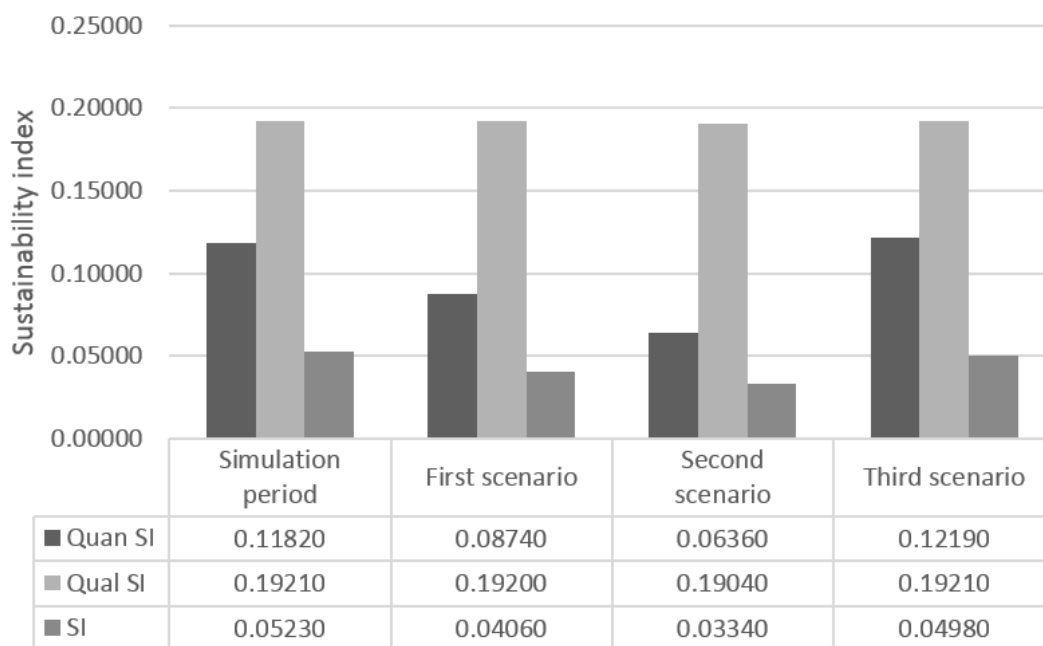
شکل ۹. شاخص پایداری طی ۲۵۰ گام زمانی (۱۲۵ گام زمانی دوره شبیه‌سازی به علاوه ۱۲۵ گام زمانی پیش‌بینی تحت سناریوی دوم) (SI = 0.0334)



شکل ۱۰. شاخص پایداری طی ۲۵۰ گام زمانی (۱۲۵ گام زمانی دوره شبیه‌سازی به علاوه ۱۲۵ گام زمانی پیش‌بینی تحت سناریوی سوم) (SI = 0.0498)

پایداری به‌شدت کاهش می‌یابد، که نشان‌دهنده آسیب‌پذیری زیاد آبخوان نسبت به تنش‌های احتمالی است. شاخص پایداری تحت سناریوی سوم (کاهش ۳۰ درصدی برداشت از آبخوان) روند رو به رشدی را در پیش گرفته است و با ادامه همین سناریو در سال‌های آتی بهبود وضعیت آبخوان پیش‌بینی می‌شود.

شکل ۱۱ شاخص پایداری کمی و کیفی و شاخص پایداری را به‌ترتیب طی دوره شبیه‌سازی، تحت سناریوهای اول و دوم و سوم نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با اعمال سناریوی نخست (ادامه روند برداشت فعلی از آبخوان) شاخص پایداری کاهش می‌یابد، یعنی وضعیت منبع بدتر خواهد شد. با اعمال سناریوی دوم (افزایش ۳۰ درصدی برداشت از آبخوان) شاخص



شکل ۱۱. شاخص پایداری کمی و کیفی و شاخص پایداری تحت سناریوهای اول، دوم و سوم

- [2].Wikipedia. Water distribution on Earth [Internet].2017. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Water_distribution_on_Earth.
- [3].Moreaux M, Reynaud A. Urban freshwater needs and spatial cost externalities for coastal aquifers: a theoretical approach. *Regional Science and Urban Economics*. 2006; 36(2):163-86.
- [4].Rejani R, Jha MK, Panda SN, Mull R. Simulation modeling for efficient groundwater management in Balasore coastal basin, India. *Water Resources Management*. 2008; 22(1):23.
- [5].El Yaouti F, El Mandour A, Khattach D, Kaufmann O. Modelling groundwater flow and advective contaminant transport in the Bou-Areg unconfined aquifer (NE Morocco). *Journal of Hydro-environment Research*. 2008; 2(3):192-209.
- [6].Singh A, Panda SN. Integrated salt and water balance modeling for the management of waterlogging and salinization. II: Application of SAHYSMOD. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2012; 138(11):964-71.
- [7].Cao G, Zheng C, Scanlon BR, Liu J, Li W. Use of flow modeling to assess sustainability of groundwater resources in the North China Plain. *Water Resources Research*. 2013; 49(1):159-75.
- [8].Chitrakar P, Sana A. Groundwater Flow and Solute Transport Simulation in Eastern Al Batinah Coastal Plain, Oman: Case Study. *Journal of Hydrologic Engineering*. 2015; 21(2):05015020.

جمع بندی و نتیجه گیری

در این تحقیق تغییرات شاخص پایداری کمی، شاخص پایداری کیفی و شاخص پایداری تحت سه سناریوی مدیریتی در آبخوان اصفهان-برخوار با استفاده از چهار مدل مدل هیدرولوژیکی حوضه (SWAT)، مدل جریان آب زیرزمینی (MODFLOW)، مدل انتقال آلاینده (MT3DMS) و MATLAB بررسی شده است. خطاهای Root Mean Squared، Mean Absolute Error و Mean Error به ترتیب برای کالیبراسیون مدل کمی برابر با ۰/۵۱۰، ۰/۳۱۵ و ۰/۰۵۹-، برای صحت سنجی مدل کمی برابر ۰/۳۳۷، ۰/۱۲۱ و ۰/۰۱۲-، برای کالیبراسیون مدل کیفی برابر ۱/۶۶۶، ۰/۹۵۷ و ۰/۱۶۰ و برای صحت سنجی مدل کیفی برابر ۰/۹۱۹، ۰/۲۶۹ و ۰/۱۵۰- است. خطاهای یادشده نشان دهنده کارایی زیاد مدل است. شاخص پایداری که کارایی گزینه‌های مدیریتی مختلف را بررسی می‌کند و با استفاده از سه معیار عملکرد برگشت پذیری، اطمینان پذیری و آسیب پذیری محاسبه شده به ترتیب برای طول دوره شبیه سازی، سناریوهای اول، دوم و سوم به ترتیب برابر ۰/۰۵۲، ۰/۰۴۰، ۰/۰۳۳ و ۰/۰۵۰ است.

منابع

- [1].USGS. How much water is there on, in, and above the Earth? [Internet]. 2016. Available from: <https://water.usgs.gov/edu/earthhowmuch.html>.

- [9]. Negm AM, Eltarabily MG. Modeling of Fertilizer Transport Through Soil, Case Study: Nile Delta.
- [10]. Loucks DP. Quantifying trends in system sustainability. *Hydrological Sciences Journal*. 1997; 42(4):513-30.
- [11]. Sandoval-Solis S, McKinney DC, Loucks DP. Sustainability index for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2010; 137(5):381-90.
- [12]. McDonald MG, Harbaugh AW. A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model.
- [13]. Hashimoto T, Loucks DP, Stedinger JR. Reliability, resiliency, robustness, and vulnerability criteria for water resource systems. *Water Resources Research*. 1982; 18(1).
- [14]. Moy WS, Cohon JL, ReVelle CS. A programming model for analysis of the reliability, resilience, and vulnerability of a water supply reservoir. *Water resources research*. 1986; 22(4):489-98.
- [15]. McMahon TA, Adeloye AJ, Zhou SL. Understanding performance measures of reservoirs. *Journal of Hydrology*. 2006; 324(1):359-82.
- [16]. Loucks DP, Van Beek E, Stedinger JR, Dijkman JP, Villars MT. *Water resources systems planning and management: an introduction to methods, models and applications*. Paris: Unesco. 2005.
- [17]. Mendoza VM, Villanueva EE, Adem J. Vulnerability of basins and watersheds in Mexico to global climate change. *Climate Research*. 1997; 9(1-2):139-45.
- [18]. Pulido-Velazquez M, Peña-Haro S, García-Prats A, Mocholi-Almudever AF, Henriquez-Dole L, Macian-Sorribes H, Lopez-Nicolas A. Integrated assessment of the impact of climate and land use changes on groundwater quantity and quality in the Mancha Oriental system (Spain). *Hydrology and Earth System Sciences*. 2015; 19(4):1677-93.
- [19]. Gassman PW, Sadeghi AM, Srinivasan R. Applications of the SWAT model special section: overview and insights. *Journal of Environmental Quality*. 2014; 43(1):1-8.
- [20]. Izady A, Davary K, Alizadeh A, Ghahraman B, Sadeghi M, Moghaddamnia A. Application of "panel-data" modeling to predict groundwater levels in the Neishabooh Plain, Iran. *Hydrogeology Journal*. 2012; 20(3):435-47.
- [21]. Poormohammadi S, dastorani MT, Jafari H, Rahimian MH, Goodarzi M, Mesmarian Z, et al. The groundwater balance analysis in Tuyserkan Hamedan plain, by using the mathematical model MODFLOW. *Ecohydrology*. 2016; 2(4): 371-382 (In Persian).
- [22]. Rezazade, M. S., Ganjali khani, M. and Kermani, M. Z. N. Comparing the performance of semi-distributed hydrological model SWAT and integrated model HEC - HMS in the simulation flow rate (Case study: Ab bakhsha watershed), *Ecohydrology*. 2015; 2(4): 479-467. (In Persian)