

ارزیابی اثر تغذیه مصنوعی بر تعادل بخشی آبخوان با استفاده از شاخص پایداری

حمید کاردان مقدم^۱، محمدابراهیم بنی حبیب^{۲*}، سامان جوادی^۳

۱. دانشجوی دکتری منابع آب پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۲. دانشیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۳. استادیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۲/۲۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۶/۲۵)

چکیده

برگشت تراز آب زیرزمینی به تراز مطلوب با استفاده از راهکارهای تعادل بخشی از اهداف اصلی سیاست گذاران آب کشور است. یکی از راهکارهای طرح یادشده، تغذیه مصنوعی است که به منظور کمی کردن میزان اثربخشی آن، با استفاده از شاخص های پایداری در آبخوان ارزیابی شد. برای نخستین بار پایداری سیستم آب زیرزمینی، با استفاده از ترکیب سه شاخص اعتماد پذیری، آسیب پذیری و مطلوبیت و با در نظر گرفتن اثر سناریوی تغذیه مصنوعی ارزیابی شد. به این منظور با استفاده از مدل MODFLOW اثر تغذیه مصنوعی شوراب سیوجان بر وضعیت آبخوان بیرجند طی یک دوره ۱۰ ساله شبیه سازی و پیش بینی وضعیت آبخوان تا افق ۱۴۰۴ در شرایط نرمال اقلیمی در سه سناریوی برداشت آب انجام گرفت. نتایج شبیه سازی نشان داد سیستم آبخوان در بخش انتهایی، که چاه مشاهده ای خوسف قرار دارد، با توجه به مسیر حرکت تغذیه آب زیرزمینی، اختلاف کم بین تراز مطلوب و تراز آب زیرزمینی و ضخامت کم ناحیه اشباع، بیشترین پایداری را به میزان ۵۵ درصد داشته است. بررسی شاخص ها در منطقه تحت تأثیر تغذیه مصنوعی در آبخوان نشان می دهد اجرای طرح تغذیه مصنوعی توانسته بین ۲۱ تا ۲۵ درصد با توجه به سناریوی کاهش، ثابت بودن برداشت و افزایش برداشت مقدار شاخص پایداری سیستم را بهبود دهد. شاخص ارائه شده در این تحقیق با توجه به قابلیت توزیعی بودن و امکان بررسی اثر سناریوهای مختلف، می تواند در سایر آبخوان ها و در تصمیم گیری به کار برده شود.

کلیدواژگان: آسیب پذیری، اعتماد پذیری، تغذیه مصنوعی، شاخص پایداری سیستم، مطلوبیت.

مقدمه

استفاده بیش از ظرفیت منابع آب زیرزمینی در یک منطقه مشکلات متعدد و گاه جبران ناپذیری مانند افت سفره و کاهش حجم آبخوان [۱-۳]، کاهش کیفیت آب [۴-۶]، تهاجم جبهه‌های آب شور ساحلی و کویری [۷] و نشست زمین [۹ و ۱۰] را بر محیط زیست آن منطقه تحمیل می‌کند. با توجه به افت سفره‌های آب زیرزمینی، طرح‌های تعادل بخشی آبخوان در چند سال اخیر اجرا شده است که یکی از آنها استفاده از طرح‌های تغذیه مصنوعی است. استفاده از طرح‌های تغذیه مصنوعی مشکلات زیست‌محیطی را در منطقه تحت تأثیر طرح کاهش می‌دهد [۱۱ و ۱۲]. به‌طور کلی، مناطق خشکی که پتانسیل مناسبی از نظر شدت بارندگی و پتانسیل کمی از نظر نفوذ و تغذیه آب‌های زیرزمینی دارند مستعد اجرای طرح‌های تغذیه مصنوعی‌اند [۱۳]. ارزیابی مناسب برای طرح تغذیه مصنوعی می‌تواند اثربخشی این راهکارها برای برنامه احیا و تعادل بخشی آبخوان‌ها را نشان دهد. ارزیابی‌های انجام شده در خصوص اجرای طرح‌های تغذیه مصنوعی معطوف به استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در پایش عملکرد سیستم سطحی، تغییرات و تنوع در محصولات کشاورزی [۱۴]، پراکنش و توزیع آلودگی در پایین دست طرح تغذیه مصنوعی [۱۵]، فعالیت‌های میکروارگانسیم‌ها [۱۶-۱۸] و کاهش میزان نفوذپذیری اراضی [۱۹] بوده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بیشتر ارزیابی‌های انجام شده روی ساختار و اثر کیفی طرح است و تا کنون بررسی کمی تغذیه منابع آب زیرزمینی، که هدف اصلی طرح‌های تغذیه مصنوعی است، انجام نشده است. بنابراین، به‌منظور ارزیابی یک طرح منابع آب، به‌خصوص تغذیه منابع آب زیرزمینی با استفاده از طرح تغذیه مصنوعی، از شاخص برای سنجش کارایی آن استفاده می‌شود. تحلیل مهندسی ارزش و استفاده از شاخص با استفاده از شبیه‌سازی می‌تواند درک صحیحی از موضوع را بیان کند. بنابراین، تحلیل و ارزیابی یک سیستم بسیار اهمیت دارد و یکی از راهکارهای ارزیابی سیستم تحت تأثیر طرح تغذیه مصنوعی، استفاده از شاخص و ارائه آن برای پایداری است. شاخص‌های

متعددی در خصوص پایداری سیستم منابع آب ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به شاخص CWSI [۲۰]، شاخص پایداری WSI [۲۱] و شاخص جامع خشکسالی [۲۲] اشاره کرد. تحلیل کمی آبخوان به‌منظور بررسی وضعیت آبی آبخوان تحت اعمال سناریو با استفاده از مدل عددی MODFLOW انجام شده که مطالعات زیادی در این خصوص انجام شده است. قدیر و همکارانش [۲۳] در سال ۲۰۱۶ با استفاده از مدل عددی MODFLOW شبیه‌سازی وضعیت پایداری آبخوان را برای یک دوره ۳۵ ساله (۱۹۸۵-۲۰۲۰) با در نظر گرفتن احداث کانال برای توسعه آبیاری شبیه‌سازی کردند. نتایج شبیه‌سازی آنها نشان داد توسعه بخش کشاورزی سبب کاهش حجم دینامیک آبخوان می‌شود و میزان پایداری آبخوان کاهش می‌یابد. همچنین تعیین میزان برداشت و سیاست‌های بهره‌برداری از آبخوان نیز سابقه مطالعاتی گسترده‌ای دارد، به‌طوری که صادقی طیبس و همکارانش [۲۴] در سال ۱۳۹۴ با استفاده از مدل شبیه‌سازی-بهینه‌ساز با تعریف سه تابع کمبود ناشی از عدم تأمین نیازها، افت سطح ایستابی و شاخص اصلاح‌شده کمبود برنامه‌ها و سیاست‌های بهره‌برداری از آبخوان را برای تصمیم‌گیری با استفاده از جبهه پارتو برای متولیان و تصمیم‌گیران معرفی کردند. همچنین هاشیموتو و همکارانش [۲۵] در سال ۱۹۸۲ شاخص انعطاف‌پذیری را برای ارزیابی سیستم منابع آب ارائه دادند. استفاده از این شاخص برای ارزیابی یک سیستم آب زیرزمینی با توجه به تحت تأثیر بودن آبخوان از عوامل مختلف، عدم تغییرپذیری سریع تراز آب زیرزمینی نسبت به میزان تقاضا و تفاوت مفهوم مخزن تأمین آب در سیستم سد و سیستم آب زیرزمینی سبب می‌شود که شاخص انعطاف‌پذیری قابلیت استفاده در سیستم آب زیرزمینی را نداشته باشد. بنابراین، با اصلاح شاخص انعطاف‌پذیری پیشنهادی هاشیموتو و همکارانش [۲۵] به‌منظور مشخص کردن اثربخشی یا پایداری سیستم آب زیرزمینی، شاخص پیشنهادی پایداری سیستم آب زیرزمینی ارائه شده است. این شاخص با توجه به در نظر گرفتن سیستمی آبخوان بر

آبخیزداری، دو پروژه از مجموع ۱۵ پروژه برنامه احیا و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی است که به تغذیه آبخوان‌ها با استفاده از رواناب سطحی و استفاده بهینه از آن مربوط می‌شود [۲۷].

در این مطالعه اثربخشی مکانی بهسازی طرح تغذیه مصنوعی شوراب سیوجان در محدوده مطالعاتی بیرجند، که یکی از محدوده‌های بحرانی در شرق کشور است، با تکیه بر برنامه احیا و تعادل بخشی آبخوان ارزیابی می‌شود. طرح تغذیه مصنوعی شوراب سیوجان در ناحیه شمالی مرکز آبخوان بیرجند در روستای شوراب و در فاصله ۲۸ کیلومتری غرب بیرجند و در هشت کیلومتری روستای شوراب واقع شده است. محدوده‌ای که برای پخش سیلاب در نظر گرفته شده است حدود هزار هکتار و در ناحیه خروجی حوضه و با در نظر گرفتن رواناب به میزان ۲۱۸/۱ مترمکعب بر ثانیه است. حوضه آبخیز شوراب بیرجند با وسعتی معادل ۶۲/۴۵ کیلومترمربع ضریب رواناب سالیانه ۰/۱۰۷ دارد. از مجموع ۱۰/۵۵ میلیون مترمکعب کل آب ورودی به حوضه ۱/۱۳ مترمکعب آن به صورت جریان سطحی از حوضه خارج می‌شود و باقی تبقیر شده و یا نفوذ می‌کند. محل اجرای تغذیه مصنوعی ۵۰۰ متری حاشیه غربی رودخانه شوررود در بخش شمال دشت و حدود ۲ کیلومتری جنوب شرق روستای شوررود به لحاظ دانه‌درشت بودن آبرفت و محدود بودن درصد مواد دانه‌ریز نسبت به سایر مناطق آبرفت پیشنهاد شد. در شکل ۱ محل ساختگاه تغذیه مصنوعی نشان داده شده است.

تعریف تراز مطلوب آب زیرزمینی

بر اساس برنامه احیا و تعادل بخشی آب زیرزمینی، تراز آب زیرزمینی در آبخوان‌ها باید طی ۲۰ سال (چهار برنامه پنج‌ساله) به تراز آب زیرزمینی اولیه برگردد [۲۷]. بر این اساس باید ۱۱۰ میلیارد مترمکعب کسری آبخوان‌ها طی ۲۰ سال و به طور متوسط سالانه پنج میلیارد مترمکعب جبران شود [۲۷]. بررسی تغییرات تراز آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای نشان می‌دهد سطح آب رفتار نوسانی دارد و این رفتار با توجه به روند داده‌ها سیکل نوسانی را نشان می‌دهد. به طوری که در شش‌ماهه نخست سال با برداشت از منابع آب، افت تراز آب زیرزمینی را شاهد هستیم و در شش‌ماهه دوم سال، با تغذیه ناشی از نزولات

اساس افت آب زیرزمینی و برگشت تراز آب آبخوان به تراز مطلوب آب زیرزمینی در آبخوان بر اساس سناریوهای تعادل بخشی، تعریف می‌شود. این شاخص به صورت توزیعی در آبخوان ارزیابی می‌شود و این امکان را می‌دهد که در بخش‌های مختلف آبخوان، شاخص‌های اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری و مطلوبیت سیستم سنجیده شود. استفاده از این شاخص‌ها علاوه بر مشخص کردن منطقه اثربخشی هر طرح تعادل بخشی، میزان پایداری سیستم را با توجه به شاخص‌ها نشان می‌دهد. تا کنون از شاخص‌های کمی برای ارزیابی سیستم‌های آب زیرزمینی و اثربخشی سناریوی تعادل بخشی استفاده نشده است. در این پژوهش با استفاده از شاخص پیشنهادی، برای بررسی اثر سناریوهای مختلف و ارزیابی تغییرات تراز آب زیرزمینی می‌توان مدیریت آبخوان و تصمیم‌گیری را آسان‌تر و کارایی اجرای طرح را افزایش داد.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه شده و طرح تعادل بخشی

آبخوان بیرجند در محدوده کویر لوت در شرق ایران با مساحت ۵۲۰ کیلومترمربع، با میانگین بارندگی ۱۵۴ میلی‌متر در یک اقلیم خشک و سرد قرار دارد. بررسی تغییرات حجم آبخوان و افت آب زیرزمینی طی دوره ۲۰ ساله تا سال آبی ۱۳۹۳-۱۳۹۴ نشان می‌دهد این آبخوان افت شدید سطح آب زیرزمینی دارد و طی این مدت بیش از ۱۲ میلیون مترمکعب از حجم استاتیک آبخوان آب برداشت شده است [۲۶]. این بحران آبی ناشی از برداشت بی‌رویه آب در این آبخوان و آبخوان‌های مشابه، لزوم اجرای طرح‌های تعادل بخشی را تأیید کرده است. برنامه تعادل بخشی و احیای آب زیرزمینی بر اساس بیلان منفی آبخوان‌های کشور و افت شدید سفره‌های آب زیرزمینی تدوین شد. وزارت نیرو به منظور احیا و تعادل بخشی آب زیرزمینی در کشور، برنامه تعادل بخشی آبخوان‌ها را در ۱۵ پروژه کلان ملی با هدف تأمین و بازگشت تراز آب زیرزمینی طرح‌ریزی کرد. بر اساس آمار ارائه شده طی دوره ۱۳۷۵-۱۳۹۱ حدود ۷۵ و در سال‌های قبل از آن ۳۵ میلیارد مترمکعب مازاد برداشت از آبخوان‌ها وجود داشته است. اجرای ۴۰۰ پروژه تغذیه مصنوعی و پخش سیلاب در محدوده‌های ممنوعه و مطالعه و اجرای پروژه‌های

تراز آب زیرزمینی بالاتر یا برابر با تراز مطلوب باشد، مقدار $(W_s - W_t)$ صفر در نظر گرفته می‌شود.

استفاده از شاخص برگشت‌پذیری برای ارزیابی یک سیستم آب زیرزمینی قابل تعریف نیست. شاخص برگشت‌پذیری به مفهوم برگشت سیستم از حالت شکست به حالت پیروزی یا مطلوب است و در آب‌های زیرزمینی با توجه به نوسانات و روند کلی تراز آب، ملموس نیست. تغییرات تراز آب در چاه‌های مشاهده‌ای مانند تراز آب در پشت یک سد، تابع سریعی از جریان‌های ورودی و خروجی نیست به طوری که میزان تغییرپذیری حجم سفره آب زیرزمینی نسبت به منحنی عرضه و تقاضا مربوط به بهره‌برداری از یک سد کم است. به طور کلی، آبخوان را می‌توان مانند مخزن دارای آب در نظر گرفت، اما مشابه مخزن سد نیست که در آن اضافه تأمین نیاز آبی در یک گام زمانی سبب خشک شدن مخزن سد می‌شود. این تغییرات کم سبب می‌شود که از مفهوم شکست و پیروزی کمتر استفاده شود و استفاده از مفهوم برگشت‌پذیری و رابطه ارائه شده برای آن، در بخش آب زیرزمینی صحیح نباشد. بنابراین، با استفاده از این مفهوم، شاخص مطلوبیت آب زیرزمینی تعریف می‌شود. در این شاخص، برگشت تراز آب زیرزمینی به حالت تراز مطلوب تحت یک سناریو یا بدون اعمال سناریو به عنوان شاخص مطلوبیت سیستم معرفی می‌شود. با توجه به افت منابع آب زیرزمینی، به منظور جبران کمبود آب، از سناریوی تغذیه مصنوعی استفاده شد. اثر سناریو و میزان برگشت آب در آبخوان تا تراز مطلوب آب زیرزمینی، با استفاده از شاخص مطلوبیت سنجیده شد. این شاخص بر مبنای درصد برگشت تراز آب زیرزمینی تا تراز مطلوب در هر سناریو با استفاده از رابطه ۵ به دست می‌آید. در شکل ۲ مفهوم شاخص مطلوبیت نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، درصد بالآمدن تراز آب زیرزمینی نسبت به تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده و تراز مطلوب به عنوان شاخص مطلوبیت با خط چین نشان داده شده است.

$$\beta_{EL} = 100 * \left(\frac{R_{EL} - I_{EL}}{R_{EL} - R_{pr}} \right) \quad (5)$$

در این رابطه I_{EL} بیان‌کننده تراز آب زیرزمینی پس از افت، R_{EL} تراز آب زیرزمینی در تراز مطلوب و R_{pr} تراز آب زیرزمینی مشاهداتی یا پیش‌بینی شده (بدون اجرای سناریوی تعادل بخشی) است.

اعتمادپذیری کمی سیستم آبخوان به صورت رابطه ۳ معرفی می‌شود. این مفهوم در شکل ۲ نشان داده شده است. به بیان دیگر، در هر یک از گام‌های زمانی (ماهانه) که تراز آب زیرزمینی بالاتر از تراز مطلوب قرار گیرد، نسبت به کل دوره محاسبه می‌شود.

$$\alpha_{EL} = \frac{n_{EL}}{N_{EL}} \quad (3)$$

که در آن n_{EL} تعداد دوره‌هایی است که تراز آب زیرزمینی بالاتر از تراز مطلوب (تراز تعادل) باشد و N_{EL} تعداد کل دوره‌هاست.

آسیب‌پذیری بیان‌کننده میزان کمبود در سیستم آب زیرزمینی است [۳۰] که شدت شکست‌های سیستم را نشان می‌دهد. این شدت شکست می‌تواند بر اساس میانگین ماکزیمم کمبودها در یک دوره متوالی شکست در سیستم یا احتمال بیشتر شدن کمبود در یک یا چند دوره از یک حد معین و یا میانگین شکست‌ها بیان شود [۲۵ و ۳۱]. میزان آسیب‌پذیری آبخوان از نظر کمی با استفاده از رابطه ۴ در آبخوان با توجه به تغییرات تراز آب آبخوان طی دوره شبیه‌سازی محاسبه شده است. میزان شکست یک سیستم آب زیرزمینی در اجرای سناریوی تعادل بخشی بر اساس کمبود بین اختلاف تراز آب زیرزمینی با تراز مطلوب در تعداد دوره‌هایی که این تراز پایین‌تر از تراز مطلوب است نسبت به کل اختلاف بین تراز آب زیرزمینی بدون اعمال سناریو تا تراز مطلوب در نظر گرفته می‌شود. شکل ۲ مفهوم آسیب‌پذیری را با توجه به پارامترهای استفاده شده در رابطه ۴ نشان می‌دهد. بر این اساس در گام‌های زمانی که تراز آب زیرزمینی پایین‌تر از تراز مطلوب باشد، سیستم آبخوان دارای کمبود و آسیب‌پذیر است که در شکل ۲ این فاصله یا کمبود با رنگ خاکستری نشان داده شده است. این تراز در دوره پیش‌بینی مدل‌سازی محاسبه می‌شود و شاخص به دست می‌آید.

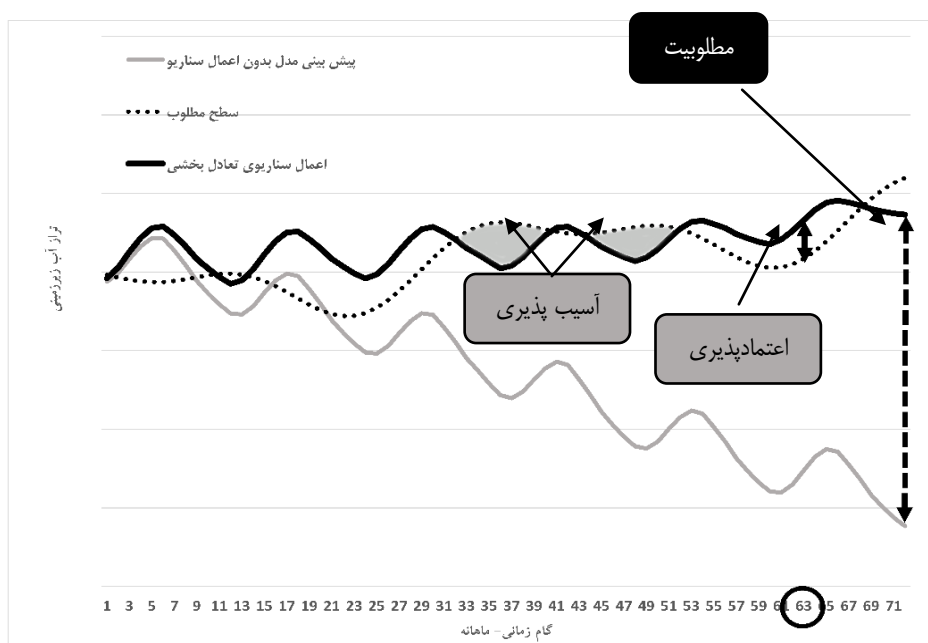
$$\gamma_{EL} = \frac{\sum_{i=1}^n (W_s - W_t)}{\sum_{i=1}^n (W_t - W_{pr})} \quad (4)$$

در این رابطه W_t : تراز آب زیرزمینی مطلوب در هر گام زمانی، W_s : تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در هر دوره زمانی برای هر سناریو، W_{pr} تراز آب زیرزمینی بدون اعمال سناریو و n : تعداد دوره‌هایی که تراز آب زیرزمینی پایین‌تر از تراز مطلوب قرار می‌گیرد، است. در شرایطی که

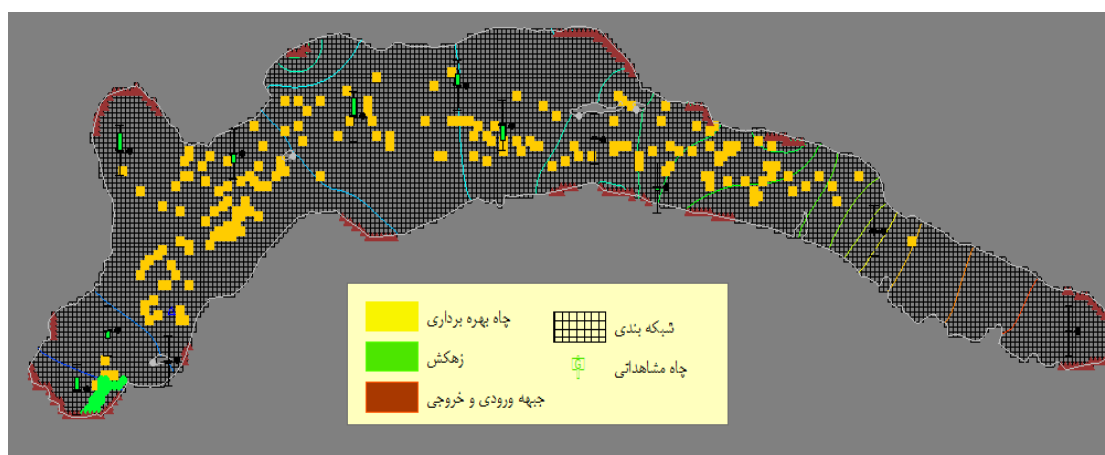
مدل‌سازی آبخوان

استفاده از مدل مفهومی آبخوان با توجه به قابلیت توزیعی بودن نتایج، می‌تواند اثربخشی آبخوان را در هر بخش از آبخوان نشان دهد. در این تحقیق اثر سناریوی بهسازی طرح تغذیه مصنوعی در سه حالت کاهش برداشت آب، عدم تغییر برداشت آب و افزایش برداشت (ادامه وضعیت کنونی) برای ۱۰ سال آتی (افق ۱۴۰۴) با استفاده از مدل MODFLOW مدل‌سازی شد. دوره آماری مدل‌سازی شامل شش سال برای واسنجی و سه سال برای صحت‌سنجی مدل از سال آبی ۱۳۸۵-۱۳۸۶ تا سال آبی ۱۳۹۳-۱۳۹۴ بوده و

گام زمانی شبیه‌سازی به صورت ماهانه و مهرماه ۱۳۸۵ (این انتخاب براساس کمترین تغییرات پارامترهای آبخوان، ترسیم هیدروگراف آبخوان، جمع‌آوری اطلاعات پایه منطقه و به‌روزرسانی اطلاعات بوده است) برای شبیه‌سازی حالت ماندگار مدل انتخاب شده است. مدل مفهومی آبخوان بیرجند (شکل ۳) بر اساس عوامل تأثیرگذار و مؤثر مانند منابع تغذیه و تخلیه آبخوان، مرز محدوده مدل‌سازی، مناطق تغذیه و تبخیر و تعرق و همچنین استراتژی‌گرافی در مدل MODFLOW با شبکه‌بندی ۲۵۰ متری در دو حالت ماندگار و غیرماندگار اجرا شد.



شکل ۲. شاخص‌های پایداری آبخوان با استفاده از هیدروگراف مشاهداتی، شبیه‌سازی و تراز مطلوب



شکل ۳. مدل مفهومی آبخوان بیرجند

یافته‌ها

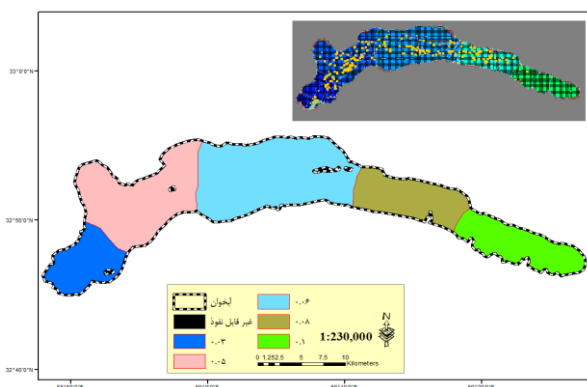
واسنجی و صحت‌سنجی مدل کمی

یکی از عوامل مهم در اجرای دقیق مدل، شناسایی عوامل حساس و واسنجی این عوامل برای به‌دست‌آوردن نتایج بهینه است. با توجه به اجرای مدل در دو حالت ماندگار و غیرماندگار دو عامل هدایت هیدرولیکی و ضریب آبدهی ویژه به عنوان عوامل حساس مشخص شده و براساس این دو عامل، مدل به دو صورت سعی و خطا و روش اتوماتیک PEST با استفاده از اطلاعات هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه لوگ‌های حفاری موجود در منطقه، نتایج آزمایش‌های پمپاژ و برآورد قابلیت انتقال، نوع سازندهای زمین‌شناسی و مطالعات پیشین واسنجی شده است. نتایج نشان داد با حرکت به سمت خروجی آبخوان، از میزان ضریب ذخیره کاسته می‌شود که جنس سازندهای زمین‌شناسی نیز این نتیجه را تأیید می‌کند. شکل‌های ۴ و ۵ نتایج نهایی میزان هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه را نشان می‌دهند.

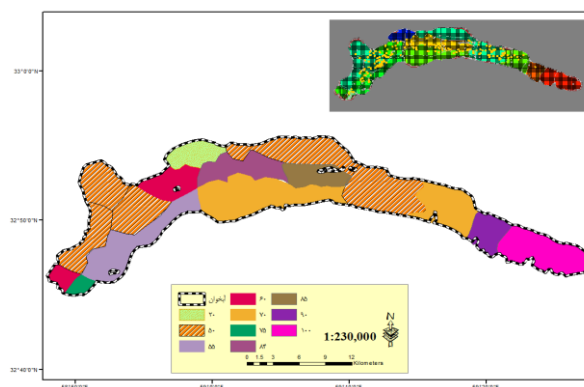
مبنای خطای شبیه‌سازی برای مدل‌سازی اختلاف کمتر از ۵۰ سانتی‌متر بین سطح آب مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده است که نتایج کمتر از ۱ درصد است. همچنین در مدل غیرماندگار میانگین مجذور خطا یعنی اختلاف بین تراز آب زیرزمینی مشاهده‌شده با تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی‌شده در کلیه ۱۲ پیزومتر مدل کمتر از ۲۱ سانتی‌متر است. پس از

واسنجی مدل ماندگار در آبخوان بیرجند و پس از شبیه‌سازی اولیه، واسنجی مدل کمی آبخوان برای پارامتر آبدهی ویژه (S_y) آبخوان برای مدت شش سال انجام شد. میزان خطای مدل در حالت ماندگار و غیرماندگار مطابق جدول ۱ محاسبه شد. میانگین مجذور خطا بین تراز آب زیرزمینی مشاهده‌شده با شبیه‌سازی‌شده طی شش سال کمتر از ۸۴ سانتی‌متر در همه پیزومترها است که دقت مناسب مدل را برای صحت‌سنجی و پیش‌بینی نشان می‌دهد.

یکی از دلایل و ضرورت‌های استفاده از یک مدل مناسب، کنترل و بررسی رفتار هیدرولیکی آبخوان در مقابل برداشت‌ها و اطلاعات زمان‌های گذشته است که باید تطابق کافی بین نتایج مشاهده‌ای و نتایج به‌دست‌آمده از مدل وجود داشته باشد. طول زمان تطابق برای صحت‌سنجی، بستگی به دو عامل نوع آبخوان و سیر تاریخی آبخوان دارد. به این منظور، از صحت‌سنجی مدل غیرماندگار برای سه سال پایانی مدل‌سازی استفاده شده است که دقت مناسب برای پیش‌بینی وضعیت آبی آبخوان را نشان می‌دهد. شکل ۶ صحت‌سنجی نتایج را برای سال پایانی (سال نهم) مدل‌سازی نشان می‌دهد. نتایج مناسب صحت‌سنجی بیان‌کننده دقت مناسب مدل در فرایند واسنجی است. نتایج صحت‌سنجی نشان‌دهنده کمترین اختلاف بین تراز آب در شبیه‌سازی و مشاهداتی است.



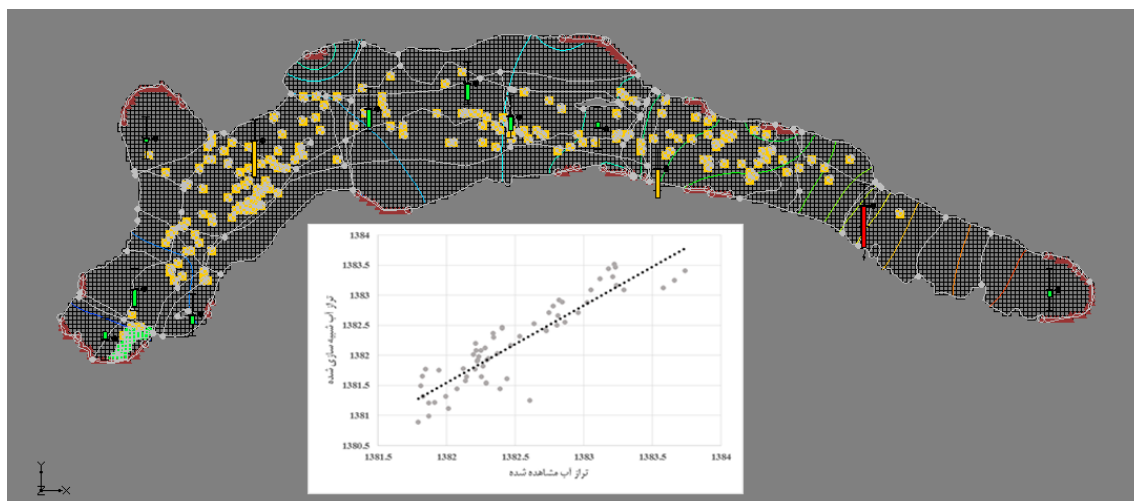
شکل ۵. آبدهی ویژه واسنجی‌شده در مدل کمی



شکل ۴. هدایت هیدرولیکی واسنجی‌شده در مدل کمی

جدول ۱. میزان خطای مدل کمی در دو حالت ماندگار و غیرماندگار

| پارامتر خطا | مدل ماندگار | مدل غیرماندگار |
|-------------------|-------------|----------------|
| میانگین خطا | ۰/۰۴۸ | ۰/۰۳۸ |
| میانگین مطلق خطا | ۰/۱۶۹ | ۰/۵۸۱ |
| میانگین مجذور خطا | ۰/۲۱۱ | ۰/۸۳۵ |



شکل ۶: نتایج صحت‌سنجی مدل کمی آبخوان

روند بهره‌برداری از آبخوان طی ۱۰ سال آینده، اختلافی حدود ۵ متر بین تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و تراز مطلوب را ایجاد می‌کند.

$$\begin{aligned}
 WT = & 1382 + 0.356 * \cos(0.165X) + \\
 & 0.148 * \sin(0.165X) + \\
 & 0.106 * \cos(0.33X) - \\
 & 0.114 * \sin(0.33X) - \\
 & 0.11 * \cos(0.495X) - \\
 & 0.087 * \sin(0.495X)
 \end{aligned} \quad (6)$$

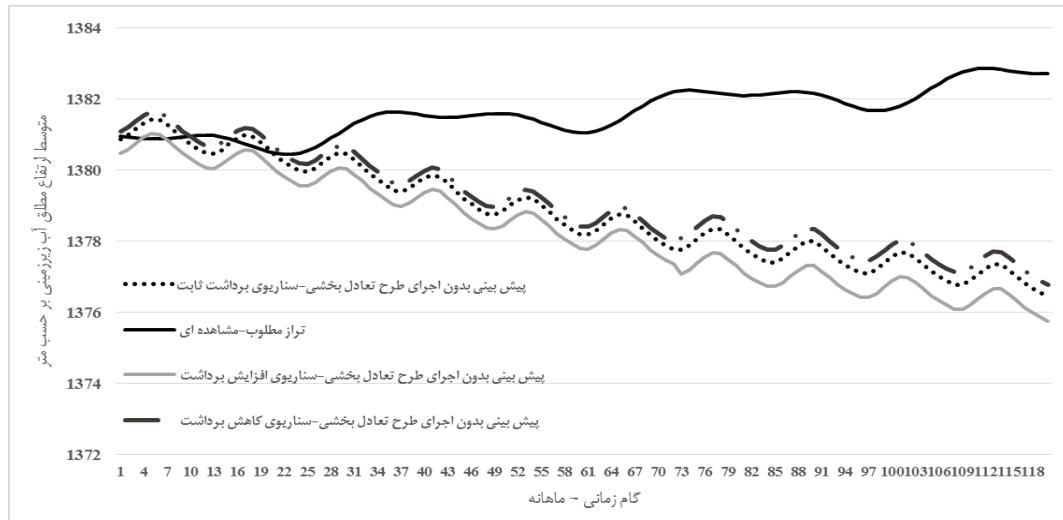
در این رابطه WT تراز آب مطلوب در گام زمانی و X گام زمانی است.

پیش‌بینی وضعیت هیدرولوژیکی تغذیه مصنوعی تا سال ۱۴۰۴

بررسی وضعیت هیدرولوژیکی بالادست طرح تغذیه مصنوعی شوراب، با در نظر گرفتن تکرار شرایط اقلیمی گذشته برای دوره ۱۰ ساله آینده تحلیل شد. بنابراین، با توجه به میزان بارندگی در دوره ۱۰ سال قبل و لحاظ کردن روند بارندگی در منطقه، میزان بارندگی برای دوره آینده پیش‌بینی شد. این طرح، سه حوضچه برای ذخیره آب دارد که حجم آنها حدود ۴۲۰ هزار مترمکعب است که به‌طور متوسط در سال‌های نرمال از نظر بارندگی حداقل یک بار سرریز می‌شود [۳۱]. ضریب نفوذ آب از مخزن محدوده پخش ۱۲ درصد [۳۱] اعلام شده است که با انجام ۱۸ آزمایش نفوذپذیری، در داخل مخزن پخش در سه شرایط رطوبتی متفاوت خاک این عدد به‌طور متوسط

پیش‌بینی و تعیین تراز آستانه آب زیرزمینی

پس از صحت‌سنجی مدل کمی آبخوان و تأیید دقت مناسب، پیش‌بینی تراز آب در مدل تا سال ۱۴۰۴، که پایان طرح احیا و تعادل بخشی آبخوان‌ها است، براساس سه سناریوی کاهش، افزایش و ثابت‌بودن برداشت آب انجام شد. انتخاب دوره ۱۰ ساله برای پیش‌بینی وضعیت آب زیرزمینی با توجه به هدف طرح تعادل بخشی و متأثر بودن عملیات سازه‌ای بر وضعیت آبخوان طی دوره میان‌مدت است. همچنین تکرار شرایط اقلیمی گذشته برای دوره آینده (سال آبی ۱۳۹۴-۱۳۹۵ تا ۱۴۰۳-۱۴۰۴)، در نظر گرفته و شبیه‌سازی شد. به‌منظور تعیین تراز مطلوب آب زیرزمینی در هر چاه مشاهده‌ای و آبخوان، از برازش سری فوری و روند تراز آب زیرزمینی استفاده شد. به این منظور تراز انتهای مطلوب آب زیرزمینی هر چاه مشاهده‌ای با توجه به هدف برنامه احیا و تعادل بخشی آبخوان‌ها تعیین و با استفاده از سری زمانی تراز آب زیرزمینی ثبت‌شده در چاه‌های مشاهده‌ای و آبخوان و برازش آن با نرم‌افزار MATLAB، تابع سری فوری استخراج و با تحلیل شیب روند سری زمانی تراز آب، تراز مطلوب آب زیرزمینی به‌دست آمد. سپس، از میزان تراز مطلوب برای ارزیابی شاخص پایداری سیستم آب زیرزمینی استفاده شد. رابطه ۶، منحنی برازش داده‌شده تراز مطلوب برای کل آبخوان را نشان می‌دهد. در شکل ۷ تغییرات تراز آب زیرزمینی در آبخوان در سه سناریوی برداشت آب، به همراه تراز مطلوب نیز ارائه شده است. تحلیل نتایج هیدروگراف نشان می‌دهد



شکل ۷. تغییرات تراز آب زیرزمینی آبخوان طی ۱۰ سال پیش‌بینی به همراه تراز مطلوب آب زیرزمینی

نصرآباد و فدشک نیز ملموس است، به‌طوری که چاه مشاهده‌ای خوسف، که تحت تأثیر جریان آب زیرزمینی این طرح و کل آبخوان است، بیشترین میزان پایداری سیستم را نشان می‌دهد. سطح بالای آب زیرزمینی در این ناحیه، اختلاف کمتر از یک متر بین تراز آب زیرزمینی بدون اعمال سناریو با تراز مطلوب و قرارداشتن در منطقه خروجی آبخوان از جمله عواملی است که این چاه مشاهده‌ای به‌سرعت واکنش نشان می‌دهد و تراز آب زیرزمینی بالا می‌آید. در سایر چاه‌های مشاهده‌ای آبخوان شاخص پایداری سیستم آب زیرزمینی ناچیز است. شکل ۸ هیدروگراف آب زیرزمینی آبخوان را تحت اعمال سناریوی بهسازی طرح تغذیه مصنوعی در سه سطح برداشت آب و تراز مطلوب آب زیرزمینی نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد بهسازی طرح تغذیه مصنوعی در دو سال ابتدایی در هر سه حالت برداشت آب به‌صورت مطلوب روی آبخوان اثر داشت و پس از آن تراز آب زیرزمینی پایین‌تر از تراز مطلوب آب زیرزمینی قرار گرفت. بررسی شاخص‌های اعتمادپذیری و مطلوبیت آب زیرزمینی با اعمال سناریوی بهسازی تغذیه مصنوعی نشان داد مسیر جریان آب زیرزمینی از محل تغذیه مصنوعی تا خروجی آبخوان در اطراف چاه مشاهده‌ای خوسف تحت تأثیر حجم آب تغذیه‌شده قرار دارد. با توجه به ضخامت کم ناحیه اشباع و اختلاف کم تراز آب زیرزمینی مطلوب و شبیه‌سازی‌شده در اطراف چاه مشاهده‌ای خوسف بیشترین تأثیر تغذیه مصنوعی در این محدوده است. پراکنش توزیعی شاخص‌های اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری و مطلوبیت برای

۱۰ درصد برآورد شده است. همچنین با توجه به بارش‌های رخ داده در ۲۹ و ۳۰ بهمن‌ماه ۱۳۹۵ و آبیگری هر دو منطقه پخش، بر اساس حجم اولیه و حجم پنج روز بعد، تراز آب در مخزن و در نظر گرفتن میزان تبخیر با استفاده از آمار تبخیر از تشتک در ایستگاه سینوپتیک بیرجند، ضریب نفوذ ۱۱ درصد محاسبه شد.

ارزیابی کارایی فنی سناریوی بهسازی تغذیه مصنوعی

پس از بررسی میزان تغذیه ناشی از بهسازی طرح تغذیه مصنوعی شوراب سیوجان، سری زمانی تغذیه در مدل MODFLOW اعمال شد. با اعمال میزان تغذیه در مدل، اثر آن روی چاه‌های مشاهده‌ای تحت تأثیر (پایین دست طرح) و هیدروگراف آبخوان بررسی و شاخص‌های پایداری برای چاه‌های مشاهده‌ای که تحت تأثیر آن قرار داشتند و نیز برای آبخوان محاسبه شد. مطابق جدول ۲ اثربخشی سناریوی تغذیه مصنوعی، روی چاه مشاهده‌ای شمال محمدیه، که در پایین دست اجرای طرح تغذیه مصنوعی و در نزدیک‌ترین مکان به آن است، تأثیر مناسبی داشته است به‌طوری که مطلوبیت طرح تغذیه مصنوعی در سناریوی ثابت بودن میزان برداشت آب برای این چاه مشاهده‌ای ۲۴ درصد، میزان آسیب‌پذیری ۴۱ درصد و شاخص اعتمادپذیری ۳۰ درصد است. بر این اساس شاخص پایداری در این چاه مشاهده‌ای تحت تأثیر بهسازی تغذیه مصنوعی ۳۱ درصد است. با توجه به جهت حرکت آب زیرزمینی و محل طرح تغذیه مصنوعی، اثر این سناریوی تعادل بخشی (تغذیه مصنوعی) روی چهار چاه مشاهده‌ای خوسف، رکات،

مدل MODPATH و مسیر جریان تغذیه شده از طرح تغذیه مصنوعی را نشان می دهد. بنابراین، ضخامت کم، نوسانات کم آب زیرزمینی و نبود چاه بهره برداری در این منطقه از آبخوان، سبب زیادبودن شاخص پایداری در این چاه مشاهده ای شده است. بر این اساس انتخاب منطقه مناسب برای تغذیه مصنوعی می تواند سطح بهره روری از تغذیه مصنوعی را افزایش دهد. براساس شکل ۱۰ مشاهده می شود که بیشتر حجم تغذیه مصنوعی به طرف چاه مشاهده ای خوشف منتقل می شود. از آنجا که در آبخوان های کویری در خروجی آبخوان با غلظت زیاد املاح مواجه هستیم، حجم زیادی از آب به جبهه های آب شور اضافه می شود.

منطقه پایین دست طرح با استفاده از روابط ۲ تا ۴ (منطقه تحت تأثیر طرح تغذیه مصنوعی) و پایداری سیستم آب زیرزمینی در پایین دست طرح تغذیه مصنوعی با استفاده از رابطه ۵ محاسبه و به صورت شکل ۹ ترسیم شده است.

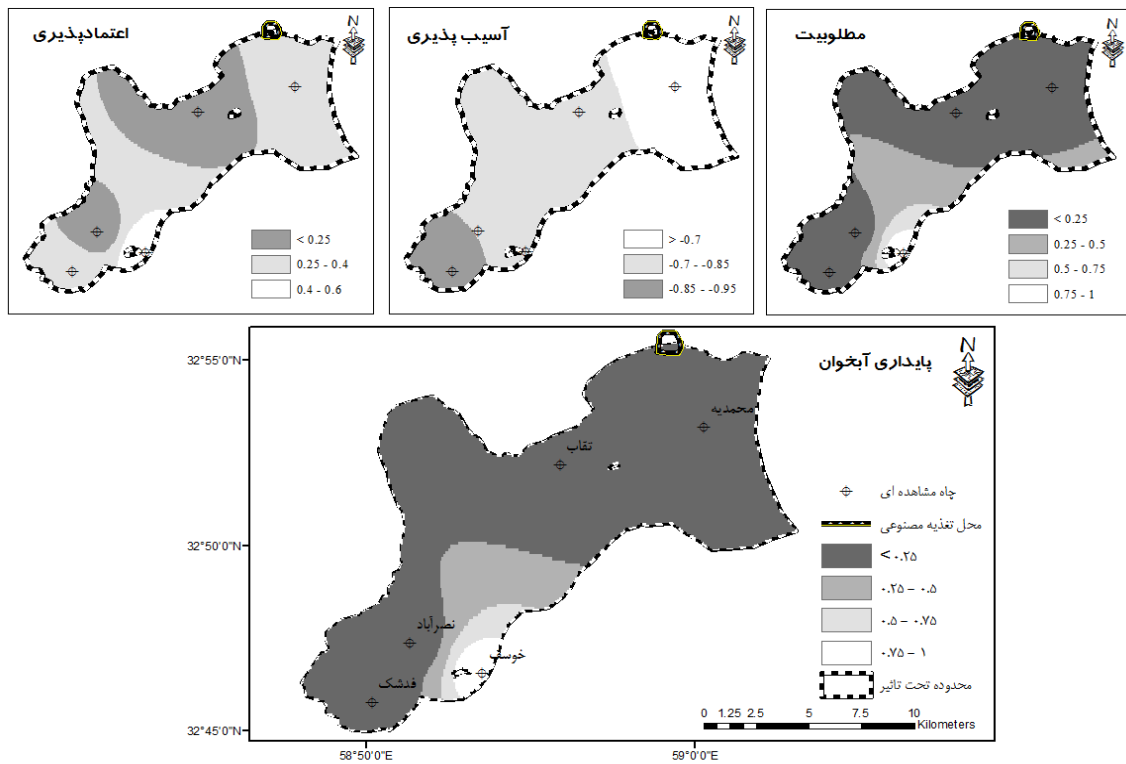
با توجه به جهت حرکت آب زیرزمینی و اثربخشی زیاد منطقه اطراف چاه مشاهده ای خوشف نسبت به سایر چاه های مشاهده ای شبیه سازی، جریان در مدل آب زیرزمینی با استفاده از مدل حرکت املاح MODPATH انجام و مسیر انتقال آب از محل تغذیه مصنوعی به طرف خروجی آبخوان شبیه سازی شد. تحلیل وضعیت انتقال حرکت املاح بیان کننده انتقال حجم زیاد آب زیرزمینی به طرف این چاه مشاهده ای بود. شکل ۱۰ نتایج خروجی از

جدول ۲. ارزیابی پایداری آبخوان با بهسازی طرح تغذیه مصنوعی شوراب سیوجان

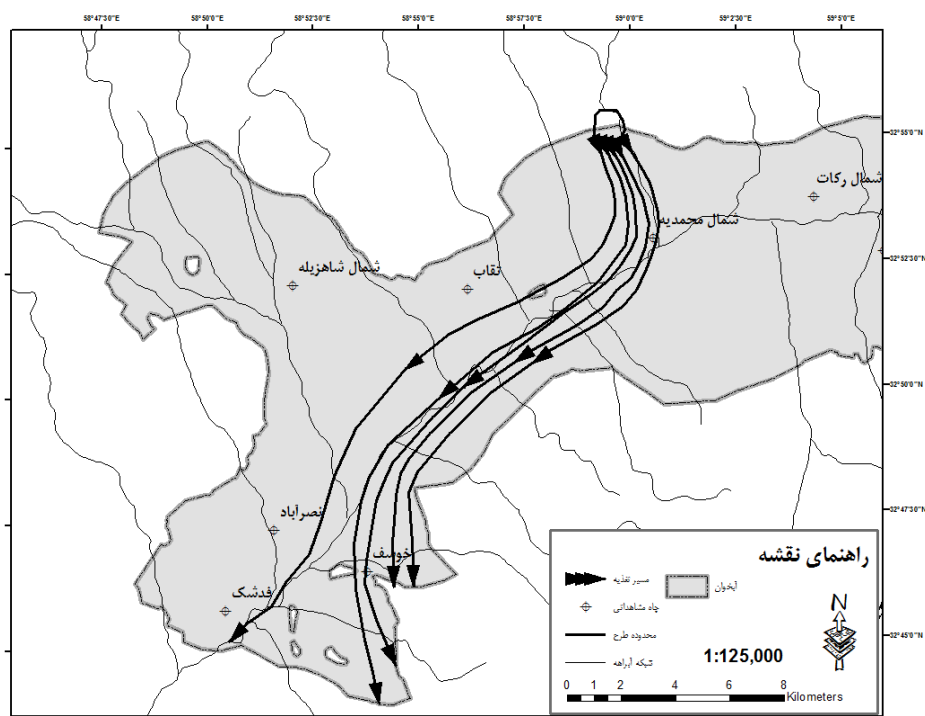
| نام پیزومتر | سناریوی برداشت آب | سناریوی بهسازی تغذیه مصنوعی | | | نام پیزومتر | سناریوی برداشت آب | سناریوی بهسازی تغذیه مصنوعی | | |
|-------------|-------------------|-----------------------------|------------|---------|-------------|-------------------|-----------------------------|------------|---------|
| | | اعتماد پذیری | آسیب پذیری | مطلوبین | | | اعتماد پذیری | آسیب پذیری | مطلوبین |
| | افزایش | ۰/۱۴ | ۰/۰۸ | -۰/۷۷ | افزایش | ۰/۱۴ | ۰/۰۸ | -۰/۷۷ | |
| تقاب | عدم تغییر | ۰/۱۵ | ۰/۱۱ | -۰/۷۵ | عدم تغییر | ۰/۱۵ | ۰/۱۱ | -۰/۷۵ | |
| | کاهش | ۰/۱۵۵ | ۰/۱۴ | -۰/۷۱ | کاهش | ۰/۱۵۵ | ۰/۱۴ | -۰/۷۱ | |
| | افزایش | ۰/۵۸ | ۰/۹ | -۰/۷۴ | افزایش | ۰/۵۸ | ۰/۹ | -۰/۷۴ | |
| خوسف | عدم تغییر | ۰/۶ | ۰/۹۷ | -۰/۷۲ | عدم تغییر | ۰/۶ | ۰/۹۷ | -۰/۷۲ | |
| | کاهش | ۰/۶۴ | ۱ | -۰/۷ | کاهش | ۰/۶۴ | ۱ | -۰/۷ | |
| | افزایش | ۰/۲۹ | ۰/۲۲ | -۰/۶۳ | افزایش | ۰/۲۹ | ۰/۲۲ | -۰/۶۳ | |
| شمال محمدیه | عدم تغییر | ۰/۳ | ۰/۲۴ | -۰/۵۹ | عدم تغییر | ۰/۳ | ۰/۲۴ | -۰/۵۹ | |
| | کاهش | ۰/۳۳ | ۰/۳ | -۰/۵۱ | کاهش | ۰/۳۳ | ۰/۳ | -۰/۵۱ | |



شکل ۸. هیدروگراف آبخوان با اعمال سناریوی بهسازی تغذیه مصنوعی با تراز مطلوب



شکل ۹. پایداری سیستم آب زیرزمینی در حالت عدم تغییر برداشت از آب زیرزمینی در انتهای سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۴ تحت سناریوی بهسازی تغذیه مصنوعی



شکل ۱۰. مسیر جریان آب زیرزمینی از محل تغذیه مصنوعی شوراب سیوجان

- local and transferred water used in Shijiazhuang City, China. *Water and Environment Journal*. 2013;27(2):157-69.
- [3]. Qian J, Zhan H, Wu Y, Li F, Wang J. Fractured-karst spring-flow protections: a case study in Jinan, China. *Hydrogeology Journal*. 2006;14(7):1192.
- [4]. Kruawal K, Sacher F, Werner A, Müller J, Knepper TP. Chemical water quality in Thailand and its impacts on the drinking water production in Thailand. *Science of the Total Environment*. 2005;340(1):57-70.
- [5]. Pophare AM, Lamsoge BR, Katpatal YB, Nawale VP. Impact of over-exploitation on groundwater quality: a case study from WR-2 Watershed, India. *Journal of earth system science*. 2014;123(7):1541-66.
- [6]. Zhai Y, Wang J, Huan H, Zhou J, Wei W. Characterizing the groundwater renewability and evolution of the strongly exploited aquifers of the North China Plain by major ions and environmental tracers. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2013;296(3):1263-74.
- [7]. Vandenbohede A, Van Houtte E, Lebbe L. Sustainable groundwater extraction in coastal areas: a Belgian example. *Environmental geology*. 2009;57(4):735-47.
- [8]. Werner AD, Bakker M, Post VE, Vandenbohede A, Lu C, Ataie-Ashtiani B, Simmons CT, Barry DA. Seawater intrusion processes, investigation and management: recent advances and future challenges. *Advances in Water Resources*. 2013;51:3-26.
- [9]. Galloway DL, Burbey TJ. Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*. 2011;19(8):1459-86.
- [10]. Zhang W, Gao L, Jiao X, Yu J, Su X, Du S. Occurrence assessment of earth fissure based on genetic algorithms and artificial neural networks in Su-Xi-Chang land subsidence area, China. *Geosciences Journal*. 2014;18(4):485-93.
- [11]. Zhang W, Huan Y, Yu X, Liu D, Zhou J. Multi-component transport and transformation in deep confined aquifer during groundwater artificial recharge. *Journal of environmental management*. 2015;152:109-19.
- [12]. Xu W, Du S. Information entropy evolution for groundwater flow system: a case study of artificial recharge in Shijiazhuang City, China. *Entropy*. 2014;16(8):4408-19.

بحث و نتیجه‌گیری

استفاده از طرح تغذیه مصنوعی و پخش سیلاب، یکی از سناریوهای برنامه احیا و تعادل بخشی آبخوان‌ها است که در سال‌های اخیر توسط وزارت نیرو در حال انجام است. ارزیابی سناریوی تغذیه مصنوعی با توجه به توزیعی بودن اثر آن، باید با استفاده از یک شاخص توزیعی سنجیده شود. به این منظور از شاخص پایداری سیستم آب زیرزمینی که از مفهوم شاخص انعطاف‌پذیری الهام گرفته شده، با تلفیق سه شاخص اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری و مطلوبیت استفاده شد. با استفاده از مدل آب زیرزمینی MODFLOW و تکرار شرایط گذشته برای آینده، بهسازی سناریوی تغذیه مصنوعی شوراب سیوجان برای یک دوره ۱۰ ساله در مدل اعمال و مدل‌سازی انجام شد. نتایج مدل با استفاده از شاخص پایداری سیستم آب زیرزمینی نشان داد پایین دست اجرای طرح تحت تأثیر زیاد تغذیه ناشی از این طرح قرار دارد و در چاه مشاهده‌ای شمال محمدیه شاخص پایداری آبخوان به ۳۱ درصد افزایش می‌یابد. تحلیل سایر چاه‌های مشاهده‌ای با اعمال طرح تغذیه مصنوعی نشان داد با توجه به موقعیت چاه مشاهده‌ای خوسف در مسیر جریان آب زیرزمینی و مسیر جریان آب زیرزمینی ناشی از تغذیه مصنوعی، بیشترین میزان شاخص پایداری سیستم به میزان ۵۵ درصد در سناریوی عدم تغییر برداشت آب می‌رسد. استفاده از این شاخص‌ها با توجه به قابلیت توزیعی بودن آن امکان توسعه، بهره‌برداری و مکان‌یابی مناسب و بهینه برای اجرای طرح‌های تغذیه مصنوعی در آبخوان‌ها را فراهم می‌کند. نتایج این تحقیق و ارائه شاخص پایداری سیستم آب زیرزمینی با توجه به بررسی توزیعی اثر سناریو و ارزیابی اثر آن می‌تواند برای آبخوان‌های دیگر با وضعیت مشابه به‌خصوص برای طرح‌های تعادل‌بخشی ارزیابی و آسیب‌شناسی شود.

منابع

- [1]. Campos-Gaytan JR, Kretzschmar T, Herrera-Oliva CS. Future groundwater extraction scenarios for an aquifer in a semiarid environment: case study of Guadalupe Valley Aquifer, Baja California, Northwest Mexico. *Environmental monitoring and assessment*. 2014;186(11):7961-85.
- [2]. Du S, Su X, Zhang W. Effective storage rates analysis of groundwater reservoir with surplus

- [13]. Makkawi MH. Geostatistics as a groundwater exploration planning tool: case of a brackish-saline aquifer. *Arabian Journal of Geosciences*. 2015;8(5):3311-9.
- [14]. Mesbah SH, Mohammadnia M, Kowsar SA. Long-term improvement of agricultural vegetation by floodwater spreading in the Gareh Bygone Plain, Iran. In the pursuit of human security, is artificial recharge of groundwater more lucrative than selling oil?. *Hydrogeology Journal*. 2016;24(2):303-17.
- [15]. Zhang W, Huan Y, Liu D, Wang H, Jiao X, Wu X, Du S. Influences of microbial communities on groundwater component concentrations during managed artificial recharge. *Environmental Earth Sciences*. 2016;75(1):84.
- [16]. Alidina M, Li D, Ouf M, Drewes JE. Role of primary substrate composition and concentration on attenuation of trace organic chemicals in managed aquifer recharge systems. *Journal of environmental management*. 2014;144:58-66.
- [17]. Li D, Alidina M, Ouf M, Sharp JO, Saikaly P, Drewes JE. Microbial community evolution during simulated managed aquifer recharge in response to different biodegradable dissolved organic carbon (BDOC) concentrations. *Water research*. 2013;47(7):2421-30.
- [18]. Valhondo C, Carrera J, Ayora C, Tubau I, Martinez-Landa L, Nödler K, Licha T. Characterizing redox conditions and monitoring attenuation of selected pharmaceuticals during artificial recharge through a reactive layer. *Science of the Total Environment*. 2015;512:240-50.
- [19]. Padyab M, Feiznia S. Determination of the lower permeability systems floodwater spreading using shallow sediment granulometry case study: Gachsaran floodwater spreading station. *Iranian Journal of Range and Desert Research*. 2016;23(1):108-116. [Persian]
- [20]. Policy Research Initiative. *Canadian Water Sustainability Index (CWSI) project report*. Government of Canada. 2007.
- [21]. Chaves HM, Alipaz S. An integrated indicator based on basin hydrology, environment, life, and policy: the watershed sustainability index. *Water Resources Management*. 2007;21(5):883-95.
- [22]. Safavi H, Golmohammadi M. Evaluating the water resource system performance using fuzzy reliability, resilience and vulnerability. *Iran-water resources research*. 2016;12(1):68-83. [Persian]
- [23]. Qadir A, Ahmad Z, Khan T, Zafar M, Qadir A, Murata M. A spatio-temporal three-dimensional conceptualization and simulation of Dera Ismail Khan alluvial aquifer in visual MODFLOW: a case study from Pakistan. *Arabian Journal of Geosciences*. 2016;9(2):149.
- [24]. Sadeghi Ts, Pourreza Bm, Akbarpour A, Samadi S. Application of multi objective optimization method amalgam in determining the policy of optimum discharge from groundwater resource using mathematical model. *Iranian journal of irrigation and drainage*. 2015;9(3):470-480. [Persian]
- [25]. Hashimoto T, Stedinger JR, Loucks DP. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water resources research*. 1982;18(1):14-20.
- [26]. Ministry of Power. *Prohibition discharge in Birjand plain*. 2011. [Persian]
- [27]. Ministry of Power. *Report of Reduction program and balance groundwater*. 2014. [Persian]
- [28]. Jha MK. PREDICTING GROUNDWATER LEVEL USING FOURIER SERIES INTEGRATED WITH LEAST SQUARE ESTIMATION METHOD. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2014;7(1):95.
- [29]. 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.
- [30]. McMahon TA, Adeloje AJ, Zhou SL. Understanding performance measures of reservoirs. *Journal of Hydrology*. 2006;324(1):359-82.
- [31]. Jain SK, Singh VP. *Water resources systems planning and management*. 1st ed. Elsevier, Amsterdam; 2003.