Archive of SID

Journal of Watershed Engineering and Management
Volume 11, Issue 4, 2019, Pages 840-850
DOI: 10.22092/ijwmse.2018.116637.1401

نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز
جلد ۱۱، شماره ۴، ۱۳۹۸، صفحات ۸۴۰-۸۵۰

شبیه‌سازی کیفیت آبخوان در اثر تهاجم جبهه‌های آب شور با استفاده از مدل SEAWAT، مطالعه موردی: دشت بابل‌رود

داود قربان‌پور لندی[*1]، کریم سلیمانی[2]، میرخلاق میرنیا[3]، کاکا شاهدی[4] و عبدالنبی کلاه‌چی[5]

[1] دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی ساری، [2] استاد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی ساری، [3] استاد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مازندران، [4] دانشیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی ساری و [5] دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۱۸

چکیده

رشد جمعیت و تغییرات ناشی از گرمایش زمین تاثیرات مختلفی بر محیط پیرامون داشته است. این تغییرات سبب چالش‌هایی در روند بهره‌برداری از منابع آب از دیدگاه کمی و کیفی شده است. کاهش سطح آب زیرزمینی شیرین و بالازدگی آب شور دریا در آبخوان‌های ساحلی سبب کاهش میزان بهره‌وری از آب در این مناطق شده است. در این پژوهش، شبیه‌سازی کیفیت آبخوان در اثر تهاجم جبهه‌های آب شور با استفاده از مدل عددی با استفاده از نرم‌افزار $GMS_{v.10}$ انجام گرفته است. با استفاده از دو مدل کیفی MT3D و SEAWAT، وضعیت کیفی آبخوان تحلیل و پیش‌بینی شد. مدل پیش‌بینی ۱۰ ساله نشان داد که میزان افزایش غلظت TDS رابطه مستقیمی با افت سطح ایستابی دارد. پس از واسنجی ضریب پخشیدگی مولکولی، نسبت پخش افقی به طول پخش ۰/۵، نسبت پخش عمودی به طول پخش ۰/۲ به‌دست آمد. تحلیل نتایج کیفی نشان داد که در شمال غرب آبخوان (چاه دریاکنار) میزان غلظت TDS افزایش داشته است که تهاجم جبهه‌های آب شور دریا به‌طرف ساحل را محتمل می‌کند. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از مدل کیفی نشان می‌دهد که تهاجم جبهه‌های آب شور از دو بعد سطح و عمق جریان آب زیرزمینی می‌باشد و اختلاف چگالی بین منابع آب شور و شیرین سبب هجوم منحنی جبهه‌ی آب شور شده است. وضعیت تهاجم جبهه‌های آب شور به‌طرف ساحل حاکی از افزایش غلظت بیش از ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در طی دوره پیش‌بینی می‌باشد. در این پژوهش به‌منظور تصمیم‌گیری در خصوص عوامل موثر بر افزایش یا کاهش پیشروی جبهه‌های آب شور ساحلی سه روش کاهش برداشت آب از منابع آب زیرزمینی، استفاده از طرح‌های افزایش تغذیه آبخوان و احداث سد زیرزمینی مورد تحلیل و مدل‌سازی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که کاهش برداشت، بیشترین تاثیر را در عقب‌زدگی جبهه‌های آب شور نسبت به دو روش دیگر دارد.

واژه‌های کلیدی: آبخوان، ضریب پخشیدگی مولکولی، غلظت TDS، مدل آب زیرزمینی، مدل MT3D

مقدمه

با توجه به این‌که آب‌های زیرزمینی یکی از منابع تأمین‌کننده آب مصرفی برای مصارف گوناگون می‌باشند، لذا مدیریت و ارزیابی این منابع یکی از اساسی‌ترین مراحل مدیریت منابع آب و لازمه مدیریت پایدار منابع آب است. در ایران، همانند بسیاری از

[*] مسئول مکاتبات: dghorbanpour1356@gmail.com

www.SID.ir

Archive of SID

کشورها کمبود جدی در داده‌های منابع آب به‌خصوص در رابطه با آب‌های زیرزمینی و کیفیت آن وجود دارد. چالش‌های زیادی در جهت توسعه و بهره‌برداری بهینه از منابع آب هست که افزایش تصاعدی جمعیت، افزایش فعالیت‌های انسانی، تغییرات آب و هوا و مخاطرات طبیعی از مهمترین آن‌ها است. توجه به کمیت و کیفیت سفره آب زیرزمینی در اثر تهاجم جبهه‌های آب شور به‌طرف آبخوان ساحلی به لحاظ محدودیت این منابع در مصارف شرب و کشاورزی، برداشت غیر مجاز و بی‌رویه، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. امروزه استفاده از ابزارهای هوشمند برای شبیه‌سازی فرایندهای مختلف طبیعی با توجه به هزینه و زمان کم بسیار رشد چشمگیری داشته، با توجه به سرعت پاسخگویی، صرفه‌جویی زمانی را برای مدیریت بسیار پر رنگ‌تر کرده است. یکی این از ابزارها در جهت استفاده بهینه در منابع آب، مدل‌سازی آبخوان می‌باشد.

هدف از مدل‌سازی، شبیه‌سازی طبیعی رفتار آبخوان با استفاده از یکسری روابط ریاضی می‌باشد. در صورتی که بتوان شبیه‌سازی یک آبخوان را انجام و آن را با شرایط طبیعی تطبیق داد، به سهولت می‌توان با تغییر در محل، مقدار و زمان برداشت به بررسی اثرات بهره‌برداری از سفره پرداخت. از مدل آب زیرزمینی برای پیش‌بینی تراز سطح آب زیرزمینی، بررسی وضعیت آبخوان، تفسیر نمودن آن‌ها برای دستیابی به عوامل کنترل‌کننده در یک منطقه، دستیابی به سامانه‌ای منظم برای سازماندهی و یکپارچه‌سازی داده‌های صحرایی استفاده می‌شود. همچنین، مطالعه فرایندهای معمولی موجود در سامانه‌های زمین‌شناسی دارای اهمیت ویژه‌ای هستند، لذا استفاده از مدل با توجه به رشد فناوری، کاربرد گسترده‌ای به‌خصوص در شبیه‌سازی فرایندهای مختلف داشته که در این پژوهش به‌منظور اثر برداشت آب تهاجم و بالازدگی جبهه‌های آب شور استفاده می‌شود.

تحت شرایط طبیعی در آبخوان‌های ساحلی، آب شیرین به دریا می‌ریزد، اما با برداشت بی‌رویه از آبخوان‌ها، سطح سفره آب زیرزمینی یا سطح پیزومتری پائین می‌افتد، به‌طوری که سطح پیزومتری در آب شیرین، کمتر از گوه نمکی در سمت دریا خواهد شد و این سبب حرکت ناحیه انتقالی به‌طرف آبخوان تا رسیدن به یک حالت تعادل جدید می‌شود. این پدیده، نفوذ آب دریا نامیده می‌شود.

مدل SEAWAT یکی از مدل‌هایی است که برای شبیه‌سازی پدیده تداخل آب شور و شیرین و اثرات آن استفاده می‌شود. این مدل شبیه‌سازی را از نوار ساحلی، بر اساس فشار استاتیک آب شیرین، ارتفاع و شتاب گرانشی انجام می‌دهد. این مدل در سال‌های اخیر با توجه به فشار برداشت آب آبخوان‌های ساحلی قابلیت بالایی برای شبیه‌سازی و ارائه راه‌کارهای مدیریتی از خود نشان داده است. این مدل در نرم‌افزار GMS10 به‌صورت یکی از ماژول‌های نرم‌افزاری بوده، قابلیت شبیه‌سازی با استفاده از مدل MODFLOW را دارد.

Chang و همکاران (۲۰۱۱)، برای بررسی اثرات افزایش تراز آب دریا بر پیشروی آب شور، مطالعه‌ای انجام دادند. در این مطالعه فرض شد که یک سازوکار طبیعی با نام فرایند کشند[1]، به‌طور بالقوه توانایی کم کردن و یا در بعضی موارد، معکوس کردن کامل پیشروی آب شور بر اثر افزایش تراز آب دریا را دارد. برای بررسی صحت این فرض و فهمیدن اثرات پدیده کشند در هر دو نوع آبخوان تحت فشار و آزاد، مطالعه‌ای دقیق با استفاده از مدل SEAWAT انجام شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که اگر مقدار تغذیه ثابت بماند، افزایش تراز آب دریا در حالت پایدار روی گوه نمکی در آبخوان‌های تحت فشار، اثر طولانی مدتی نخواهد داشت. شبیه‌سازی در حالت ناپایدار[2] در آبخوان تحت فشار، سازوکاری را نشان داد که در آن، گوه نمکی که در ابتدا بر اثر افزایش تراز آب دریا، پیشروی کرده بود، به‌طور طبیعی به مکان اولیه خود رانده شد.

Valise (۲۰۱۳)، با استفاده از دو مدل MT3DMS و PHT3D تشریح روش‌های مختلف شبیه‌سازی را برای حرکت املاح انجام دادند. آن‌ها شوری آب زیرزمینی ناشی از تداخل آب شور و شیرین را یک عمل برگشت‌ناپذیر دانستند که سبب بروز مشکلات عدیده زیست‌محیطی و اجتماعی می‌شود.

[1] Lifting process
[2] Transient

www.SID.ir

Archive of SID

Arsenal (۲۰۱۴)، به بررسی روش‌های مختلف درون‌یابی شوری ناشی از بالازدگی آب در سفره‌های ساحلی و نقش آبیاری در اراضی کشاورزی پرداخت. نتایج ایشان نشان داد که روش تابع پایه شعاعی[1] به‌عنوان مناسب‌ترین روش درون‌یابی در آخرین دوره زراعی سبب بالازدگی تا دو متر در آبخوان منطقه خواهد بود.

Green و همکاران (۲۰۱۴)، شبیه‌سازی اثرات بالا آمدن آب دریا و شور شدن اراضی در اثر تغییر اقلیم با استفاده از تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA) طی دوره سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۱۰۰ را انجام دادند.

SybelArgo و Spa (۲۰۱۵)، با بررسی اثرات تغییر فصلی نفوذ آب دریا بر کیفیت آب برای مصارف شرب و آبیاری، در سفره ساحلی دارالسلام تانزانیا، به این نتیجه رسیدند که آب‌های زیرزمینی منبع اصلی برای رفع نیازهای داخلی، صنعتی و کشاورزی در دارالسلام است. با این حال، رشد جمعیت، افزایش شهرنشینی، صنعتی و گردشگری، و تغییرات آب و هوایی سبب شده که فشار بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی منجر به تبدیل شدن نفوذ بیشتر آب شور به سفره آب زیرزمینی شده است.

Casapaki و همکاران (۲۰۱۶)، روشی برای کشف اثر طولانی‌مدت نفوذ آب دریا به آب‌های زیرزمینی و تغییر کیفیت و بهره‌وری کشاورزی را به‌کار برده، دریافتند که نفوذ آب شور یک مشکل عمده در سفره نیمه‌خشک ساحلی است و می‌تواند به‌عنوان یک پدیده آلودگی آب‌های زیرزمینی که ممکن است برای آشامیدنی و آبیاری نامناسب باشد، ارائه دادند.

Mansour و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده مدل SEAWAT در منطقه کارریس (شبه جزیره کارابوروان ترکیه) با شبیه‌سازی نفوذ آب دریا در امتداد قسمت ساحلی به این نتیجه رسیدند که میزان نفوذ هدایت الکتریکی و کلرید طی ۱۰ سال آینده به حدود ۴۲۰ متر می‌رسد. همچنین، نتایج نشان داد که کاهش میزان پمپاژ از چاه‌های کارریس برای حفاظت از آب-های زیرزمینی تازه از آلودگی دریایی ضروری است.

Badu و Sarvarian (۲۰۰۸)، با استفاده از اطلاعات هیدروژئولوژیک دشت ارومیه، ناحیه حفاظتی چاه آب‌رسانی شماره ۱۱ ارومیه و پلوم آلودگی یک منبع آلاینده در شرایط مختلف با استفاده از کد رایانه‌ای Visual Mudflow محاسبه کرده و اندرکنش ناحیه حفاظتی با پلوم آلودگی تحت تاثیر پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار دادند. بر اساس شبیه‌سازی انجام شده راه‌کارهای مختلف برای سازگاری در این چاه را ارائه دادند.

Zamzam و همکاران (۲۰۱۲)، به بررسی وضعیت کیفی آبخوان رفسنجان که در معرض برداشت شدید آب زیرزمینی در بخش کشاورزی است پرداخته، با استفاده از سناریوهای مختلف برداشت آب اثرات سوء برداشت را بررسی کردند.

Abdolhamid و Javadi (۲۰۱۱)، شبیه‌سازی تداخل آب شور و شیرین را در دلتای نیل کشور مصر تحت سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه از مدل 2D-FEST استفاده و سه سناریو افزایش سطح آب دریای مدیترانه، کاهش سطح پیزومتریک رودخانه تحت تاثیر برداشت آب و این دو عامل توامان را مدل‌سازی کردند. نتایج نشان داد که بالا آمدن سطح آب دریا با توجه به موقعیت مناطق مختلف اثرات متفاوتی را داشته و سناریو سوم که تاثیر توامان کاهش تراز آب زیرزمینی و افزایش سطح آب دریا بود اثرات منفی بیشتری علاوه بر کاهش آب روی کیفیت منابع آب منطقه نیز دارد.

Banejad و همکاران (۲۰۱۳)، به شبیه‌سازی عددی انتقال آلودگی در سطح آبخوان نهاوند با استفاده از مدل MODPATH پرداخته و نتایج آن‌ها حاکی از انتقال آلودگی در جهت شیب از طرف جنوب‌شرقی به شمال غربی بوده و نتایج شبیه‌سازی حاکی از انتقال توده‌ای آلودگی می‌باشد.

بررسی نتایج استخراجی حاکی از این موضوع است که شبیه‌سازی تداخل آب شور و شیرین در نوار ساحلی با توجه به برداشت‌های بی‌رویه آب زیرزمینی، پدیده‌های اقلیمی، آلودگی زیست‌محیطی و ... یکی از ملزومات اصلی در پژوهش‌ها می‌باشد. مطالعات انجام شده در آبخوان‌های ساحلی نشان می‌دهد که بالازدگی جبهه‌های آب شور یکی از پدیده‌هایی است که امروزه طبیعت با آن مواجه است و رویکردهای مختلفی برای

[1] RBF

www.SID.ir

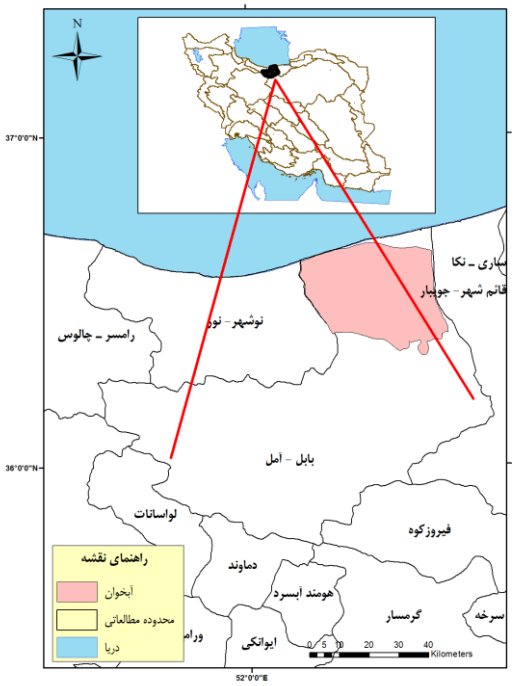
Archive of SID

مقابله با این پدیده وجود ندارد. لذا در این مطالعه، ضمن بررسی بالازدگی جبهه‌های آب شور از طرف دریا، راه‌کارهای برون‌رفت از این وضعیت و تعدیل اثر منفی جبهه‌های آب شور مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد.

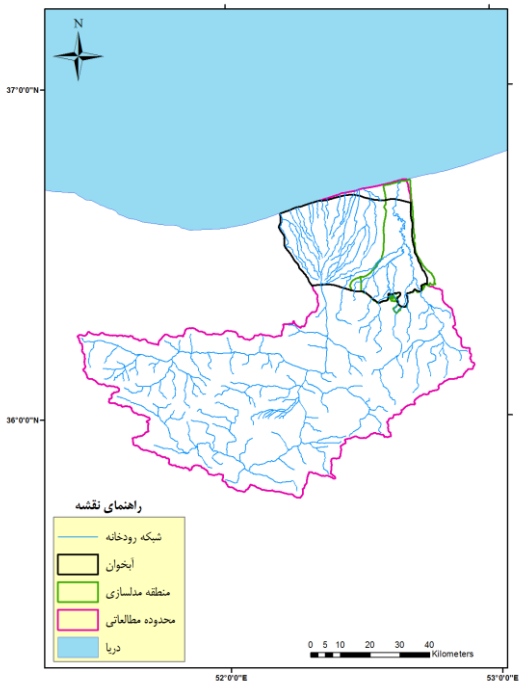
مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد پژوهش: محدوده بابل‌رود شامل حوزه آبخیز رودخانه‌های هراز و بابل و مرز مشترک بین آن‌ها یعنی جلگه بابل–آمل با مساحت حدود ۶۷۲۲/۹۸ کیلومتر مربع می‌باشد. شکل ۱، نمای محدوده پژوهشی را نشان می‌دهد. محدوده مورد مطالعه دارای دو آبخوان آزاد و تحت فشار (شکل ۲) است. این حوضه دارای جهت شمالی- جنوبی و در عرض جغرافیایی ′۲۵ °۵۲ تا ′۵۵ °۵۲ و در طول جغرافیایی ′۰۰ °۳۶ تا ′۴۳ °۳۶ قرار گرفته که دارای بیشینه ارتفاع در کوه ۳۶۸۵ متر و در دشت ۲۵ متر و کمینه ارتفاع در کوه ۳۸۵ متر و در دشت ۳۳- می‌باشد.

بیلان آب زیرزمینی دشت بابل-آمل بر اساس آخرین گزارش بیلان آب منطقه‌ای مازندران در جدول ۱ ارائه شده است (Water Balance Water Report of Babol، ۲۰۱۶).



شکل ۱– موقعیت محدوده مطالعاتی بابل-آمل



شکل ۲– موقعیت و وضعیت آبخوان محدوده مطالعاتی

جدول ۱– بیلان آب زیرزمینی دشت بابل-آمل

تغییرات حجم ذخیره آبخوان آبرفتی	عوامل خروجی						عوامل ورودی					مساحت ناحیه بیلان (Km^2)
	جمع	تبخیر از آبخوان	زهکشی آبخوان	جریان زیرزمینی خروجی	تخلیه و برداشت (چاه و چشمه)	جمع	نفوذ از پساب شرب و صنعت	نفوذ از پساب کشاورزی	نفوذ از جریان های سطحی	نفوذ از بارندگی	جریان زیرزمینی ورودی	
۰	۲۷۷/۹	۱۷/۳	۳۰/۶	۷/۵	۲۲۲/۵	۲۷۷/۹	۴۰/۷	۸۸/۳	۲۷/۹	۹۳/۶	۲۷/۴	۱۲۹۴

ارقام بر حسب میلیون متر مکعب در سال می‌باشد.

www.SID.ir

Archive of SID

بسته نرم‌افزاری GMS[1]: نرم‌افزار پیچیده و جامعی برای مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی می‌باشد. این نرم-افزار در حقیقت واسط گرافیکی و به‌عنوان پیش‌پرداز برای ۱۰ نوع مدل آب زیرزمینی است که عمدتاً به روش عددی تفاضل محدود و اجزای محدود به شبیه‌سازی کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی می‌پردازد. این مدل به‌وسیله آزمایشگاه تحقیقات محیط زیست دانشگاه بریگهام یانگ[2] و با مشارکت بخش مهندسی آب ارتش آمریکا[3] توسعه داده شده است.

صحت‌سنجی: یکی از مراحل مدل‌سازی بخش کیفی، تطبیق مدل با واقعیت است. هدف از انجام این مرحله به‌دست آوردن اعتماد بیشتر به نتایج مدل کیفی و کارآیی آن می‌باشد. تطبیق مدل با واقعیت نیاز به بررسی بیشتر مدل کیفی نسبت به زمان دارد. بر این اساس یک دوره پنج ساله برای صحت‌سنجی مدل کیفی در نظر گرفته شد و با توجه به آماربرداری کیفی که به‌صورت هر شش ماه انجام می‌گیرد ۱۰ گام شش ماهه برای مدل‌سازی تعریف شد.

مدل‌سازی تداخل آب شور و شیرین: به‌منظور شبیه‌سازی تداخل آب شور و شیرین و وضعیت تهاجم جبهه‌های آب شور به طرف ساحل دریا وضعیت تهاجم جبهه‌های آب شور از دو دیدگاه مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. اول تهاجم جبهه‌های آب شور از طرف ساحل و در بعد Z مدل‌سازی یعنی جبهه‌های آب شور تا چه عمقی از ساحل را در بر می‌گیرند و دوم جبهه-های آب شور چه سطحی از ساحل را تحت پوشش خود قرار می‌دهد. بدین منظور با استفاده از مدل SEAWAT در نرم‌افزار GMSv10 شبیه‌سازی در دو حالت دوبعدی و سه‌بعدی به‌منظور بررسی وضعیت جبهه‌های آب شور انجام شد (Strickland و Parsons، ۱۹۷۲). SEAWAT کد کامپیوتری تفاضل محدود برای شبیه‌سازی سه‌بعدی تغییر چگالی جریان آب زیرزمینی با توجه به تغییر غلظت و حرارت است. این برنامه برای طیف وسیعی از مطالعات آب‌های زیرزمینی استفاده می‌شود که در برگیرنده، ۱) انتقال آب شور در سفره آبخوان‌های ساحلی و ۲) ورود آب شور در آبخوان‌های ساحلی است.

معادلات حاکم: این پژوهش با استفاده از SEAWAT که بر اساس معادلات انتقال حرارت و چگالی به‌صورت هم‌زمان است، مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از عوامل موثر در تغییرات چگالی مایع، دما است که باید مورد بررسی قرار گیرد. با در نظر گرفتن تغییرات دما و غلظت به‌عنوان متغیر به‌صورت معادله (۱) است که در آن اثر تغییرات حرارت و جرم به‌صورت همزمان شبیه‌سازی شده است.

$$\rho(C,T) = \rho f + \frac{\partial \rho}{\partial C}C + \frac{\partial \rho}{\partial T}T \qquad (۱)$$

که در آن، pf چگالی آب شیرین، تغییرات چگالی نسبت به غلظت و دما $\frac{\partial \rho}{\partial T}$، $\frac{\partial \rho}{\partial C}$، C غلظت محلول (جرم محلول به جرم کل سیال msm^{-1}) و T دماست. در این مدل اجزای شبیه‌سازی انتقال جرم، شبیه‌سازی انتقال انرژی و نمایش تغییرات گرانروی سیال مورد بررسی می‌گیرد. همچنین، تاثیر تغییرات لزجت برروی مقاومت جریان آب در جریان آب زیرزمینی با استفاده از رابطه بین نفوذپذیری، گرانروی و هدایت هیدرولیکی اضافه می‌شود. گرانروی به‌عنوان یک تابعی از دما و انتقال جرم وارد معادله می‌شوند (به دلخواه یا یکی از آن‌ها یا هردو).

پارامترهای مدل‌سازی: مدل‌سازی در آبخوان بابل بر این پایه طرح‌ریزی شد، تا شرایط به‌کار رفته در محدوده به‌گونه‌ای باشد که غلظت آغشته کننده به میزانی برسد که آب را به لحاظ کیفی غیرقابل شرب کند. بر این اساس، با ورود شرایط اولیه کیفی و شرایط اولیه تعریف شده در مدل کمی ساختار شبیه‌سازی را برای مدل MT3D و SEAWAT تعریف می‌شود. غلظت اولیه TDS در سطح آبخوان، مقدار غلظت در جبهه‌های ورودی به آبخوان، میزان غلظت TDS در جبهه‌ی خروجی آبخوان (دریا)، تعیین مقادیر پخشیدگی و هم‌رفت در فرایند انتقال املاح، شیب غلظت شوری در آبخوان، چگالی آب شور و شیرین به عنوان پارامترهای مدل کیفی در آبخوان برای مدل‌سازی تعریف شد.

سناریوهای تعادل‌بخشی آبخوان: استفاده از راه‌کارهای مختلف در آبخوان‌ها به‌منظور افزایش تراز آب زیرزمینی و احیاء آبخوان‌ها استفاده می‌شود. این

[1] Groundwater Modeling System
[2] Brigham Young
[3] U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station

www.SID.ir

Archive of SID

راه‌کارها می‌تواند علاوه بر بهبود وضعیت کمی، وضعیت کیفی آبخوان را نیز بهبود دهد. به‌طور کلی دو حالت تغذیه آبخوان و کاهش برداشت از آبخوان به روش‌های مدیریتی و سازه‌ای به‌عنوان رویکردهای مختلف تعادل‌بخشی معرفی می‌شود. در این مطالعه از سه سناریوی کاهش برداشت آب، تغذیه آبخوان و ایجاد سد زیرزمینی استفاده شد.

راه‌کارهای مختلف از جمله پلمپ چاه‌های غیر مجاز، بررسی پروانه چاه‌های مورد بهره‌برداری و تاکید روی عدم اضافه برداشت، کاهش سرتاسری چند درصد برداشت آب و از این نوع عوامل، گزینه‌هایی برای کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی است. در این مطالعه با توجه به وضعیت بیلان آب زیرزمینی منطقه راه‌کار کاهش پنج درصد برداشت آب با توجه به میزان کسری مخزن آبخوان به‌عنوان یک سناریو تعریف شد. میزان کاهش پنج درصد از دو دیدگاه کاهش برداشت آب و کاهش آب برگشتی مورد استفاده قرار گرفت.

به‌منظور اجرای طرح افزایش تغذیه آبخوان از دو رویکرد تغذیه در محدوده آبخوان و بالادست آبخوان می‌توان استفاده کرد. این دو رویکرد برای مدل‌سازی به دو صورت مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در رویکرد تغذیه آبخوان در محدوده آبخوان میزان تغذیه آبخوان در مناطق مستعد افزایش داده شده، این موضوع در پکیج تغذیه مدل دیده می‌شود. در رویکرد افزایش تغذیه آبخوان در بالادست میزان آب ورودی به‌صورت جبهه‌های ورودی زیرزمینی افزایش داده می‌شود.

حجم تغذیه بستگی به پارامترهای هواشناسی و هیدرولوژی منطقه داشته که در این تحقیق بر اساس میزان آب برگشتی از مصارف کشاورزی و میزان جریانات سطحی میزان تغذیه مشخص شده است. همچنین، دو رویکرد معرفی شده برای تغذیه آبخوان عملاً در مدل دارای یک حجم برابر برای تغذیه است که از رویکرد اول استفاده شد.

نتایج و بحث

تحلیل حساسیت، واسنجی و صحت‌سنجی مدل کیفی: اساس اجرای مدل کیفی بر اساس نتایج مدل کمی در آبخوان می‌باشد. با توجه به نقش هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره به‌عنوان دو عامل مهم و حساس، این دو پارامتر را می‌توان به‌عنوان عوامل حساس در اجرای مدل کیفی نیز دانست. زیرا مدل کمی پیش زمینه‌ای برای اجرای مدل کیفی می‌باشد و اجرای ناصحیح آن می‌تواند اثربخشی مدل کیفی را نیز زیر سوال ببرد.

در اجرای مدل کیفی نقش پدیده پخشیدگی بسیار شدیدتر از پدیده هم‌رفتی می‌باشد. تغییرات در پارامترهای ورودی هم‌رفت در شبیه‌سازی بسیار نامشهود است و میزان خطا تنها تغییرات پنج میلی-گرم را در برنامه نشان داد. اما تغییرات ضریب پخشیدگی به گونه‌ای بوده است که میزان خطای اجرای مدل را در مرحله واسنجی به میزان ۱۵۳- میلی‌گرم در لیتر رساند که میزان قابل‌قبولی در آبخوان بابل می‌باشد. البته مدل کیفی قابلیت تغییرپذیری بالایی چون مدل کمی ندارد. تحلیل حساسیت و واسنجی مدل کیفی نشان داد که مدل کیفی حساسیت بسیار اندکی به ضرایب ورودی دارد و تغییرات این ضرایب بسیار اثر کمی در کاهش میزان خطای مدل دارد. واسنجی ضریب پخشیدگی طولی با توجه به نبود داده‌های مربوط به انتقال آلودگی بر اساس میزان هدایت هیدرولیکی و نوع سازندهای زمین‌شناسی منطقه، شیب منطقه، کاربری اراضی و استفاده از نتایج مدل کیفی به‌دست آمده است. بر اساس نتایج ضرایب در جدول ۳ معادله انتقال آلودگی آبخوان واسنجی شد.

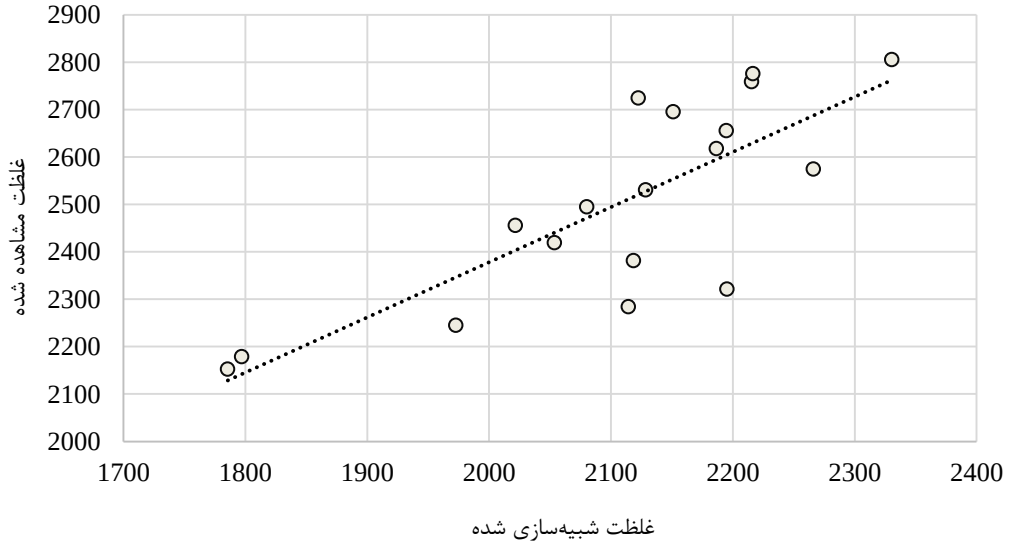
جدول ۳- ضرایب در نظر گرفته در شده معادله پخشیدگی

پارامتر	میزان
نسبت پخش افقی به پخش طولی	۰/۵
نسبت پخش عمودی به پخش طولی	۰/۲
ضریب پخش مولکولی مؤثر	۱ متر

www.SID.ir

Archive of SID

یکی از مراحل مدل کیفی تطبیق مدل کیفی با واقعیت می‌باشد. هدف از انجام این مرحله، به‌دست آوردن اعتماد بیشتر به نتایج مدل کیفی و کارآیی آن است. تطبیق مدل با واقعیت نیاز به بررسی بیشتر مدل کیفی نسبت به زمان دارد که بر اساس طول دوره مدل کمی صحت‌سنجی مدل کیفی انجام و نتایج حاکی از دقت مناسب غلظت شبیه‌سازی شده نسبت به غلظت مشاهده شده در سطح چاه‌های کیفی آبخوان دارد. در شکل ۳ نمودار همبستگی بین غلظت شبیه‌سازی و مشاهداتی را در انتهای دوره نشان می‌دهد. بر اساس نتایج فوق ضریب همبستگی ۸۳ درصد، ضریب نش-ساتکلیف، ۰/۷۲ و میانگین مجذور خطای ۰/۳ حاصل شد.



شکل ۳- نمودار صحت‌سنجی کیفی

پیش‌بینی مدل کیفی SEAWAT: پس از تعیین مرز جبهه‌های آب‌شور، لب‌شور و شیرین با استفاده از تحلیل مدل کیفی MT3D بر اساس غلظت TDS در آبخوان بابل، به‌منظور شبیه‌سازی اثر آب شور دریا مدل‌سازی با استفاده از مدل SEAWAT انجام شد. بدین منظور با تعریف شبکه ۵۰۰×۵۰۰ متری مشابه مدل کمی، در نوار ساحلی و در نظر گرفتن شبکه جریان در عمق در نوار ساحلی شبیه‌سازی انجام گرفت.

با توجه به مطالعات انجام شده و اندازه‌گیری به‌عمل آمده به‌وسیله شرکت آب منطقه‌ای، متوسط چگالی آب شور در نوار ساحلی بابل ۱۰۲۴ کیلوگرم بر متر مکعب و میزان غلظت نمک ۳۵ کیلوگرم در هر متر مکعب مشخص شده است. بر این اساس مقدار پارامتر DRHODC بر اساس معادله زیر به‌دست آمد.

$$\text{شیب غلظت } (DRHODG) \frac{1024(kg/m3G)-1000(kg/m3)}{35(kg/m3()-0(kg/m3)} = 0.7 \quad (۲)$$

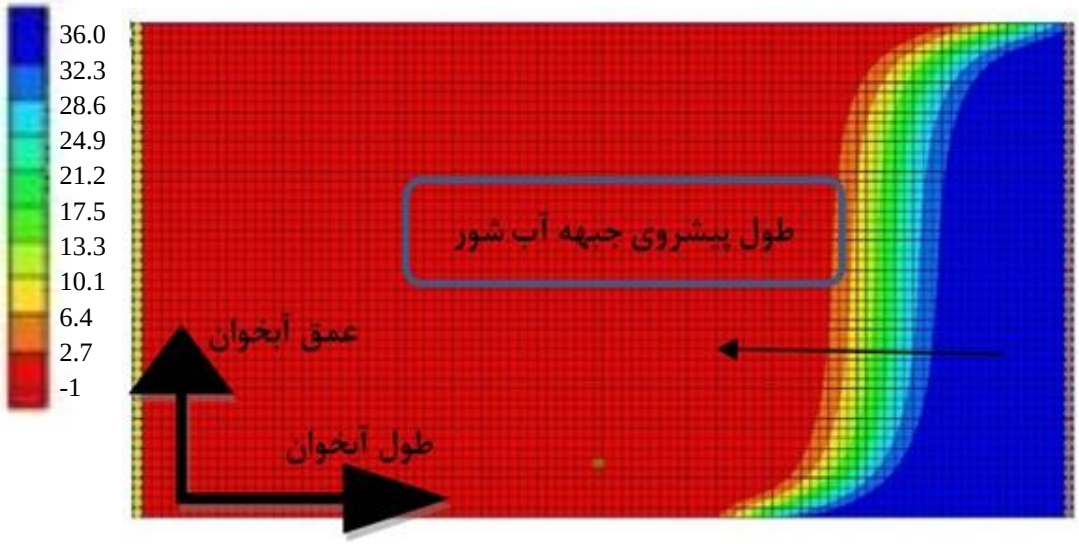
پس از ورود متغیرهای کیفی به مدل، شبیه‌سازی اولیه مدل انجام و شکل ۴ مرزبندی آب شور و شیرین در آبخوان بابل را در عمق ارائه می‌دهد. دوره شبیه-سازی برای تعیین عمق پیشروی آب شور مشابه مدل کمی MODFLOW و مدل کیفی MT3D دوره ۱۰ ساله انتخاب شد.

وضعیت تهاجم جبهه‌های آب شور به‌طرف ساحل حاکی از افزایش غلظت بیش از ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در طی دوره پیش‌بینی می‌باشد.

تحلیل سناریوهای کاهش تهاجم جبهه‌های آب شور: جمعیت کشورهای در حال توسعه رو به افزایش است و هم‌زمان، میزان سرانه مصرف نیز افزایش می‌یابد. مصرف آب در بخش‌های صنعت، کشاورزی و آب شهری هر روز افزایش می‌یابد. آلودگی منابع آب موجود نیز مزید بر علت شده و کیفیت آب‌های قابل استفاده را هر روز بیش از پیش کاهش می‌دهد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۴- مرزبندی آب شور و شیرین اولیه با استفاده از مدل SEAWAT

مدیریت منابع آب زیرزمینی بخش مهمی از مدیریت منابع آب به‌شمار می‌رود و پیش نیاز آن در مرحله اول، شناخت عملکرد آبخوان در شرایط طبیعی و سپس پیش‌بینی اثرات برداشت و تغذیه می‌باشد. در این پژوهش، به‌منظور ارائه راه‌کار و تصمیم‌گیری در خصوص عوامل موثر بر افزایش و کاهش پیشروی جبهه‌های آب شور ساحلی سه راه‌کار مورد تحلیل و مدل‌سازی قرار گرفت.

کاهش برداشت آب از منابع آب زیرزمینی: تعیین سناریوی کاهش برداشت آب بر اساس بیلان عمومی آب زیرزمینی منطقه تعیین می‌شود. با توجه به بیلان آبخوان و اضافه برداشت که سبب افت در آبخوان می‌شود، سناریوهای مختلف کاهش برداشت از آب زیرزمینی تعریف می‌شود. در این پژوهش، با توجه به وضعیت دوره پیش‌بینی آبخوان با استفاده از مدل کمی که افت سطح آب زیرزمینی را نشان می‌دهد، میزان پنج درصد کاهش برداشت از آب زیرزمینی در طی دوره ۱۰ ساله شبیه‌سازی شد. بر این اساس، در شکل ۵، هیدروگراف آبخوان با اعمال این سناریو نشان داده شده است. نتایج تغییرات تراز آب زیرزمینی نشان می‌دهد که تراز آب در این سناریو به‌طور متوسط ۴۰ سانتی‌متر بالاتر می‌آید. همچنین، اعمال این سناریو در مدل کیفی MT3D نیز حاکی از کاهش سطح جبهه‌های آب شور و لب شور بوده است. اما تغییرات تراز مرز جبهه آب شور در عمق با استفاده از مدل SEAWAT مشابه مدل کمی و کیفی خیلی قابل مشهود نبوده، این عدم تغییر حاکی از این موضوع است که با پیشروی آب شور به‌طرف آبخوان در نوار ساحلی برگشت آن زمان‌بر بوده، به سرعت قابل جبران نیست. شکل ۶، مرزبندی جبهه آب شور و شیرین را در آبخوان نشان می‌دهد.

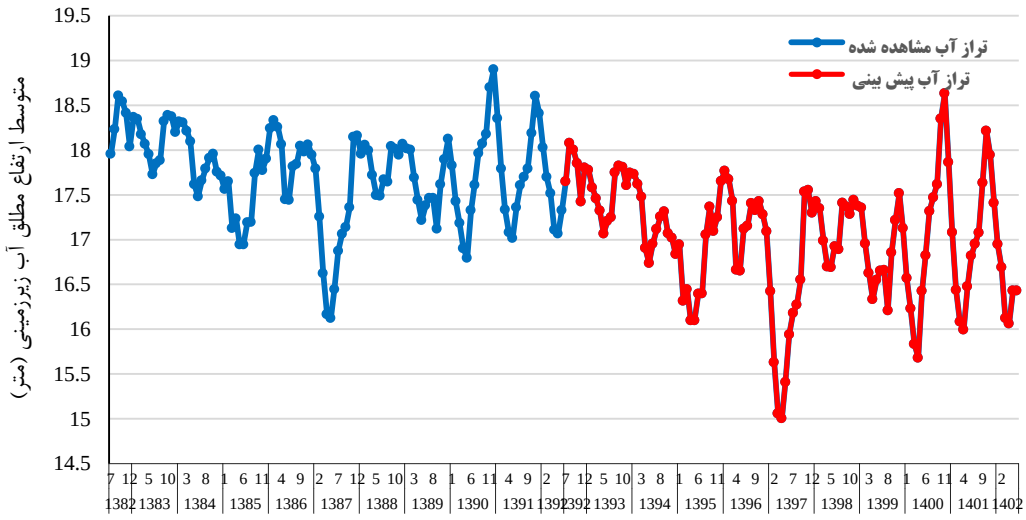
سناریوی طرح‌های افزایش تغذیه آبخوان: اعمال سناریوی تغذیه مصنوعی در مدل کیفی MT3D با توجه به فاصله زیاد مناطق تغذیه نسبت به خروجی آبخوان که نوار ساحلی است تغییراتی نشان نداد و میزان عمق تهاجم نیز تغییری نداشته است. اعمال تغذیه آبخوان در مناطق نزدیک ساحلی نیز به‌دلیل هدررفت آب و همچنین، کیفیت نامناسب‌تر آب سطحی در نزدیکی ساحل توصیه نمی‌شود. جریانات سطحی در این منطقه هرچه به‌طرف ساحل پیش می‌رود، دارای افزایش بارآلودگی بوده، تغذیه آبخوان با این حجم آب با توجه به بالابودن سطح آب زیرزمینی سبب انتقال آلودگی آبخوان می‌شود.

احداث سد زیرزمینی: ایجاد یک مانع فیزیکی برای کاهش ارتباط بین جبهه‌های آب شور و شیرین نیز می‌تواند یکی از راه‌کارهای کاهش تهاجم جبهه‌های آب شور باشد. احداث سد زیرزمینی در صورت امکان ایجاد در یک آبخوان، به‌خصوص در خروجی آبخوان می‌تواند از نظر فیزیکی عمق گسترش تهاجم جبهه‌های آب شور را کاهش دهد و مانعی برای انتقال

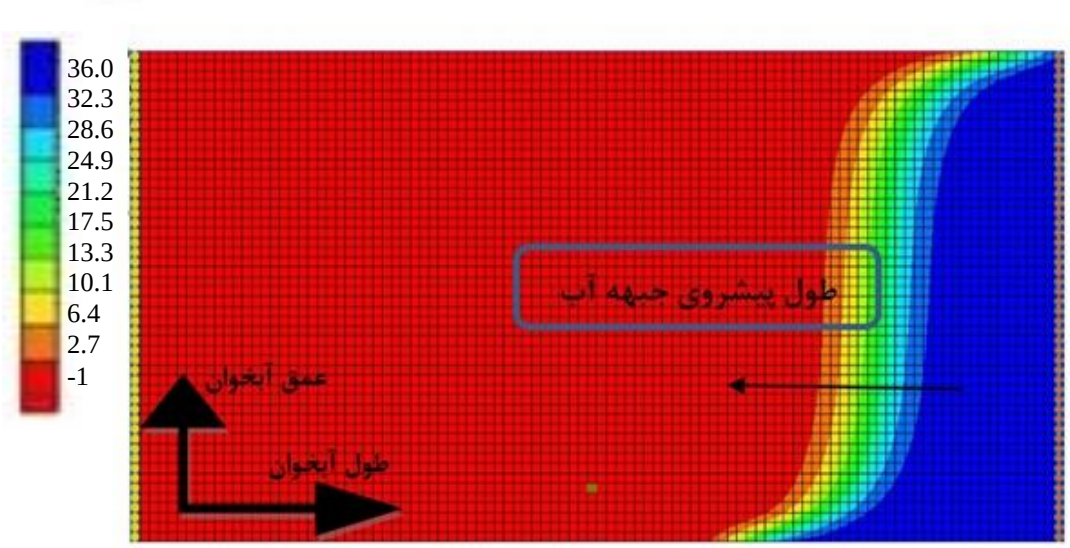
www.SID.ir

Archive of SID

املاح باشد. اما این راه‌کار از نظر هزینه‌ای و احداث شرایط ویژه‌ای داشته، یکی از اصلی‌ترین شرایط احداث مالکیت اراضی و عمق کم تا سنگ بستر است. با استفاده از پکیج Barrier در مدل MODFLOW سد زیرزمینی در انتهای آبخوان در منطقه‌ای که میزان غلظت TDS بالاست شبیه‌سازی شد. در این مطالعه دو مکان برای احداث سد زیرزمینی در نظر گرفته شد. مکان اول نزدیک چاه مشاهده‌ای دریاکنار که بیشترین اثر تهاجم جبهه‌های آب شور را دارد و مکان دوم بر روی رودخانه اصلی و خروجی آبخوان به‌طرف دریا و نزدیک چاه مشاهده‌ای قاضی‌محله واقع شده است. از نظر تغییرات سطح آب زیرزمینی، هیدروگراف آبخوان مشابه وضعیت رفتار آبخوان بدون اعمال سناریو می‌باشد.



شکل ۵- هیدروگراف آبخوان تحت اعمال سناریوی کاهش برداشت آب زیرزمینی



شکل ۶- مرزبندی تهاجم جبهه‌های آب شور و شیرین تحت سناریوی کاهش برداشت

تحلیل وضعیت کیفی آبخوان بابل نشان داد که با توجه به افزایش برداشت آب نیاز به تدوین سناریوهای کاهش تهاجم جبهه‌های آب شور به‌طرف ساحل است. بر این اساس، تحلیل نتایج سه سناریوی تدوین شده نشان می‌دهد که پارامترهای مختلفی بر میزان تهاجم جبهه‌های آب شور اثر داشته، کاهش برداشت آب اگرچه تراز آب زیرزمینی را می‌تواند طی چند سال به تراز مطلوب برگرداند اما بهبود وضعیت کیفی آبخوان

www.SID.ir

Archive of SID

نیاز به زمان دارد. همچنین، تغذیه مصنوعی در آبخوان با توجه به تغذیه در بخشی از آبخوان به هیچ وجه نمی‌تواند برای کاهش تهاجم مورد استفاده قرار گیرد. احداث سد زیرزمینی در نوار ساحلی قادر به جلوگیری از تبادلات آب شور و شیرین می‌شود. این وضعیت می‌تواند با تلفیق کاهش برداشت آب راندمان رسیدن به وضعیت مطلوب را بهتر نشان دهد.

نتیجه‌گیری

استفاده از مدل‌های کمی و کیفی برای بررسی و شبیه‌سازی وضعیت منابع آب زیرزمینی در دوره‌های آتی بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مطالعه، اثربخشی سناریوهای تعادل‌بخشی کمی آبخوان برای هجوم جبهه‌های آب شور و کاهش تهاجم مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور، با شبیه‌سازی کیفی آبخوان برای یک دوره ۱۰ ساله با استفاده از مدل MT3D و SEAWAT وضعیت کنونی و آتی آبخوان پیش‌بینی شد. نتایج کلی نشان داد که با ادامه روند کنونی بهره‌برداری از آبخوان، غلظت TDS در آبخوان نیز روند افزایشی دارد.

بررسی‌ها نشان داد که در خروجی آبخوان و در بخش شمال غرب آبخوان (چاه دریاکنار) میزان غلظت TDS افزایش زیادی داشته که سناریوی تهاجم جبهه‌های آب شور به‌طرف ساحل مطرح شد. بدین منظور، شبیه‌سازی تداخل آب شور و شیرین نوار ساحلی با استفاده از مدل SEAWAT انجام گرفت. با شبیه‌سازی اولیه، نتایج نشان داد که علاوه بر سطح که افزایش TDS مشاهده شد، مرز جریان آب شور دریا نیز به‌صورت منحنی با استفاده از اختلاف چگالی آب شور و شیرین و میزان نمک موجود به‌دست آمد.

شبیه‌سازی سناریوهای تعادل‌بخشی در آبخوان نشان داد که سناریوی کاهش برداشت آب زیرزمینی، اولاً افت آبخوان کاهش داشته، این کاهش افت سبب عقب‌زدگی جبهه آب شور می‌شود. اما میزان عقب‌زدگی بسیار کم بوده و اثر منفی نمک باقی‌مانده در آبخوان نیاز به زمان طولانی‌تری دارد. نتایج سناریوی افزایش تغذیه آبخوان نشان می‌دهد که با توجه به فاصله محل تغذیه آبخوان، تغییری در وضعیت بهبود مرز جبهه‌های آب شور و شیرین ایجاد نمی‌شود. در اجرای سناریوی سوم، نتایج نشان داد که اگرچه احداث سد زیرزمینی، تاثیری روی تراز آب سد زیرزمینی ندارد اما سبب عقب‌زدگی جبهه‌های آب شور را در نزدیکی پیزومتر دریاکنار دارد.

نتایج این پژوهش می‌تواند با اعمال مکان‌یابی دقیق راه‌کارهای علاج‌بخشی، برای برنامه‌ریزی قوی در اختیار متولیان آب منطقه و کشور گذاشته، این مشکل زیست‌محیطی در آبخوان‌های ساحلی را کاهش و بهره‌برداری مناسب را در آبخوان ارائه دهد.

منابع مورد استفاده

1. Banejad, H., H. Mohebzadeh, M. Ghobadi and M. Heydari. 2013. Mathematical simulation of pollution transfer in groundwater, case study: Nahavand Plain aquifer. Land and Water Science Publication, 23 (2): 5-43.
2. Badu, K. and M.R. Sarvarian. 2008. Action of protection zone of the wells toward pollution of the pollutants. Conference of Iran Water Resource Management.
3. Zamzam, A. and M.B. Rahnama. 2012. Assessment of ground water quality by MT3DMS Model, case study: Rafsanjan Plain. Iranian Water Researches Journal, 6(10): 18-32.
4. Abdolhamid, H.F. and A.A. Javadi. 2011. A density-dependent finite element model for analysis of saltwater intrusion in coastal aquifers. Journal of Hydrology, (401): 259-271.
5. Chiang, W.H., W. Kinzelbach and R. Rausch. 1998. Aquifer simulation model for windows: groundwater flow and transport modeling, an integrated program. Gebrüder Borntraeger, Wen-Hsing Chiang, Berlin Stuttgart.
6. Kasapaki, M., D. Latinopoulos, I. Siarkos and P.A. Latinopoulos. 2015. A methodological framework to explore the long-term effects of seawater intrusion on groundwater quality and agricultural productivity. Proceedings of the 14th International Conference on Environmental Science and Technology, Rhodes, Greece, 3-5 September 2015.
7. Chang, S.W., T.P. Clement, M.J. Simpson and K.K. Lee. 2011. Does sea-level rise have an impact on saltwater intrusion? Advances in Water Resources, (34): 1283–1291.
8. Arslan, H. 2014. Estimation of spatial distribution of groundwater level and risky areas of seawater intrusion on the coastal region in Çarşamba Plain, Turkey, using different interpolation methods.

www.SID.ir

Archive of SID

Environmental Monitoring and Assessment, (186): 5123–5134.
9. Lee, K.S. 2010. A review on concepts, applications and models of aquifer thermal energy storage systems. Energies, (3): 1320–1334.
10. Green, N.R. and K.T.B. Macquarie. 2014. An evaluation of the relative importance of the effects of climate change and groundwater extraction on seawater intrusion in coastal aquifers in Atlantic Canada. Hydrogeology Journal, (22): 609–623.
11. Simpson. M.J. and T.P. Clement. 2003. Theoretical analysis of the worthiness of Henry and Elder problem as benchmarks of density-dependent ground water flow models. Advances in Water Resources, (26): 17-31.
12. Wallis, I., H. Prommer, V.E.A. Post, A. Vandenbohede and C.T. Simmons. 2013. Simulating MODFLOW-based reactive transport under radial-symmetric flow conditions. Ground Water, 51(3): 398–413.
13. Strickland, J.D. and T.R. Parsons. 1972. A practical handbook of seawater analysis. Supply and Services Canada, Ottawa, Canada, 328 pages.

www.SID.ir