

مقاله علمی-پژوهشی

شبیه‌سازی پیشروی آب شور در آبخوان‌های ساحلی (مطالعه موردی: سواحل جنوبی دریای خزر)

مینا نصیری^۱ - مهدی حمیدی^{۲*} - حمید کاردان مقدم^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۲۰

چکیده

استخراج بیش از حد از آب‌های زیرزمینی می‌تواند منجر به کمبود آب شیرین، نفوذ آب شور به آبخوان‌های ساحلی و در نتیجه شوری بیش از حد آن‌ها شود. مدل‌های شبیه‌سازی آب زیرزمینی ابزاری مفید جهت شناخت رفتار سیستم آبخوان‌های ساحلی هستند. سواحل جنوبی دریای خزر یکی از مناطقی است که با معضل پیشروی آب شور به آبخوان‌های ساحلی روبرو است. به منظور شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی و پیشروی آب شور در آبخوان ساحلی دریای خزر در منطقه ساری- نکا مدل‌های عددی MODFLOW، MT3DMS و SEAWAT در محیط نرم‌افزار GMS10.0 به کار گرفته شدند. پس از شبیه‌سازی برای ارزیابی مدل، واسنجی در مدل کمی برای تراز آب زیرزمینی و در مدل کیفی برای غلظت شوری به مدت ۴ سال از مهر ۱۳۸۹ تا شهریور ۱۳۹۳ به صورت ماهانه انجام گرفت. مدل واسنجی شده با استفاده از اطلاعات در دسترس برای یک سال آینده از مهر ۱۳۹۳ تا شهریور ۱۳۹۴ برای تراز آب زیرزمینی و غلظت شوری صحت‌سنجی شد. نتایج پهنه‌بندی مکانی مدل حاکی از کیفیت مطلوب آب زیرزمینی در نواحی مرکزی و جنوبی آبخوان ساری-نکا بود. پس از صحت‌سنجی مدل و با فرض ثابت ماندن شرایط هیدروژئولوژیکی آبخوان، نتایج پیش‌بینی مدل برای نواحی با TDS بیشتر از ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر برای ۶ سال آینده بیانگر هجوم آب شور در مناطق شمالی آبخوان بود.

واژه‌های کلیدی: آبخوان ساحلی، آبخوان ساری-نکا، تهاجم آب شور، غلظت شوری

مقدمه

آب شور از طرف دریا به ساحل به‌عنوان تداخل آب شور و شیرین یا نفوذ آب شور^۴ معرفی می‌شود. تهاجم جبهه‌های آب شور می‌تواند تأثیرات منفی زیست‌محیطی بر سیستم بهره‌برداری ساحلی بگذارد و بهره‌برداری از آن‌ها را به‌عنوان منبع تأمین آب با کیفیت مناسب به‌منظور تأمین آب شرب و انجام فعالیت‌های کشاورزی محدود کند. با توجه به افزایش جمعیت و افزایش نیاز از یک‌طرف و تنش‌های اقلیمی و محیطی از طرف دیگر مدیریت منابع آب شیرین آبخوان‌ها بسیار حائز اهمیت است؛ بنابراین با توجه به مشکلات تهاجم جبهه‌های آب شور در نوار ساحلی، توجه به مدیریت آبخوان‌های ساحلی جهت کاستن از حرکت گوه^۵ آب شور به آبخوان‌ها و بالازدگی مخروطی^۶ آب دریا نزدیک چاه‌های پمپاژ به‌عنوان یکی از اولویت‌های اصلی مدیریت منابع آب مطرح است.

پیشروی آب شور در آبخوان‌های ساحلی با توجه به حجم بالای برداشت از منابع آب زیرزمینی در این نواحی و با توجه به قابلیت‌ها و پتانسیل‌های بهره‌برداری به‌عنوان یکی از معضلات مدیریت منابع آب تبدیل شده است. در نواحی ساحلی آبخوان آب شیرین با آب شور ارتباط هیدرولیکی داشته و با توجه به میزان تراز آب زیرزمینی جهت جریان به سمت دریا یا اقیانوس برقرار است. تغییر در میزان تراز آب سبب معکوس شدن جریان آب زیرزمینی می‌شود و این موضوع سبب می‌گردد تا جبهه‌های آب شور وارد آبخوان شود. این تهاجم و انتقال

۱ و ۲- به ترتیب دانش آموخته کارشناسی ارشد و استادیار مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران
(Email: hamidi@nit.ac.ir)
* - نویسنده مسئول:

۳- استادیار پژوهشی مؤسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران، ایران
DOI: 10.22067/jsw.v34i2.79639

4- Saltwater intrusion
5- Wedge
6- Up-coning

به‌طور قابل‌اعتمادی شبیه‌سازی شده و مورد مطالعه قرار گیرند. مدل‌های ریاضی به کار گرفته شده برای یک منطقه خاص پس از واسنجی و صحت‌سنجی می‌تواند جهت شبیه‌سازی پاسخ سیستم آبخوان با در نظر گرفتن استراتژی‌های مختلف پمپاژ و تغذیه به کار گرفته شوند. در سالیان اخیر محققان بسیاری به بررسی نحوه پیشروی آب شور در آبخوان‌های ساحلی با استفاده از مدل‌های مختلف شبیه‌سازی پرداخته‌اند که از آن جمله می‌توان به مطالعات زیر اشاره داشت.

وفایی و همکاران (۲۶) با به‌کارگیری مدل SEAWAT به بررسی چگونگی پیشروی آب شور در اثر برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی در سواحل پرداختند. اعمال هفت نرخ افزایشی مختلف برای تراز آب نشان داد که این مسئله کاهش گرادیان هیدرولیکی آب زیرزمینی و افزایش نفوذ شوری به آبخوان ساحلی را به دنبال دارد. همچنین انجام پمپاژ با دبی دو و سه برابر و احداث مانع زیرزمینی به ترتیب منجر به افزایش و کاهش پیشروی شوری شده است. کتاپچی و همکاران (۱۵) در پژوهش خود با به‌کارگیری مدل عددی SUTRA به بررسی تأثیرات تغییرات اقلیم در میزان پیشروی آب شور در آبخوان‌های ساحلی شیب‌دار پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که تأثیر توأمان افزایش سطح آب دریا و تغییرات خط ساحلی موجب تشدید پیشروی آب شور می‌گردد که در مناطق ساحلی با شیب کم، پیشروی آب شور بیشتر است. رضاپور و همکاران (۲۲) در تحقیق خود چگونگی پیشروی آب شور را تحت شرایط کاهش سطح ایستابی آبخوان مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که دو عامل اختلاف چگالی بین آب شور و شیرین و شیب هیدرولیکی معکوس شده سبب پیشروی آب شور به داخل آبخوان می‌گردد. فتحی زاد و همکاران (۷) به‌وسیله مدل SHARP به بررسی موقعیت مرز مشترک آب شور و شیرین در زیر حوزه تالار پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که در مناطق غربی زیر حوزه تالار آب شور تا فاصله ۴/۵ کیلومتری از خط ساحلی به داخل آبخوان نفوذ کرده است. همچنین در نواحی مرکزی میزان پیشروی آب شور در حدود ۳/۵ کیلومتر از خط ساحلی می‌باشد. کاردان مقدم و همکاران (۱۳) در پژوهشی به بررسی اثرات زیست‌محیطی هجوم جبهه‌های آب شور به آبخوان سرایان واقع در استان خراسان جنوبی پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که مدیریت برداشت از آب زیرزمینی با استفاده از سناریو مدیریتی کاهش برداشت آب از منابع زیرزمینی به‌منظور بهبود کیفیت آب آبخوان‌های کویری و ممانعت از تهاجم آب شور کویری به آن‌ها با توجه به خشکسالی‌های اخیر ضروری است. کوبانر و همکاران (۶) در مطالعه خود به توسعه یک مدل برای کنترل و جلوگیری از نفوذ آب شور در آبخوان ساحلی دشت Silifke-Goksu با به‌کارگیری مدل SEAWAT در طول دریای مدیترانه در ترکیه پرداختند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که آبخوان دشت یادشده به افزایش بهره‌برداری

درجه نفوذ آب شور در مکان‌ها و شرایط هیدروژئولوژیکی مختلف، متفاوت است. در بسیاری از موارد، ناحیه آلوده‌شده توسط نفوذ آب شور به بخش‌های کوچکی از آبخوان محدود می‌شود و هیچ تأثیری بر روی چاه‌های پمپاژ که جهت تأمین آب مورد استفاده قرار می‌گیرد، نداشته و یا تأثیر بسیار کمی دارد. در سایر موارد، آلودگی به‌صورت منطقه‌ای بوده و تأثیر قابل‌توجهی بر منابع آب زیرزمینی دارد. گسترش آب شور به یک آبخوان به چندین عامل بستگی دارد. این عوامل شامل مجموع آب زیرزمینی تخلیه‌شده نسبت به مجموع آب شیرین تغذیه‌شده به آبخوان، فاصله تنش‌ها (چاه‌ها، کانال‌های زهکشی) از منبع^۱ (منابع) آب شور، ساختار زمین‌شناسی و توزیع خصوصیات هیدرولیکی آبخوان و حضور واحدهای محدودکننده‌ای که ممکن است مانع حرکت عمودی آب شور به سمت آبخوان یا درون آبخوان شوند، می‌باشد. علاوه بر این، زمان لازم برای جبهه آب شور جهت عبور از آبخوان و رسیدن به یک چاه پمپاژ می‌تواند بسیار طولانی باشد. این زمان بسته به محل و عرض جانبی ناحیه انتقالی دارد (۱۶). هجوم آب شور استفاده از آب‌های زیرزمینی را جهت مصارف شرب، کشاورزی یا صنعت محدود می‌کند. از این رو، ضرورت پیش‌بینی مکان و حرکت آلودگی در برابر خطرات احتمالی وجود دارد (۱۰). طی سه دهه اخیر، پژوهش‌های متعددی در ارتباط با جنبه‌های مختلف حرکت املاح در آبخوان‌ها صورت گرفته است. همچنین مدل‌سازی پیشروی آب شور به سیستم آب زیرزمینی توجه زیادی را به خود اختصاص داده است و چندین مدل ریاضی و عددی در این ارتباط توسعه یافته است. این مدل‌ها به‌منظور پیش‌بینی مرز مشترک یا ناحیه انتقالی بین آب زیرزمینی (آب شیرین) و آب دریا در مناطق ساحلی به کار گرفته می‌شوند (۱۹). توسعه این مدل‌ها عمدتاً به دلیل مسائل مختلف مربوط به آب‌های زیرزمینی، از جمله ارزیابی ذخایر آب زیرزمینی، پیش‌بینی نفوذ آب شور و حرکت روبه‌جلو یا رو به بالای مرز مشترک در پاسخ به شیوه‌های بهره‌برداری از آب زیرزمینی بوده است. مسئله پیشروی آب شور در سراسر جهان از جمله در مادر اس واقع در هند (۲۳)، آبخوان دلتای نیل در مصر (۲۴)، حوزه آبریز یون لین در جنوب غربی تایوان (۲۷)، مناطق جنوب غربی بنگلادش (۲۰)، همانند در فلوریدا (۹)، حوزه آبریز رودخانه جانه در شان‌دوگ چین (۴) و ساوانا در گرجستان (۱۴) گزارش شده است. در بیشتر این مطالعات عامل اصلی پیشروی آب شور به آبخوان‌های ساحلی، بهره‌برداری بیش‌ازحد و عدم مدیریت صحیح منابع آب زیرزمینی بوده است. لازمه مدیریت آبخوان‌های ساحلی، انتخاب استراتژی‌های مناسب جهت کنترل و کاهش نفوذ آب شور می‌باشد. این استراتژی‌ها تنها زمانی می‌توانند تکامل یابند که فرآیندهای فیزیکی موجود در آبخوان‌های ساحلی

محدوده مطالعاتی در شکل ۱ نشان داده شده است.

روش پژوهش

در این پژوهش ابتدا با به‌کارگیری مدل MODFLOW به ارزیابی کمی منابع آب زیرزمینی پرداخته می‌شود و نتایج حاصل از آن جهت شبیه‌سازی انتقال شوری با در نظر گرفتن فرآیند انتقال، پراکندگی، انتشار وارد مدل MT3DMS می‌شود و در نهایت خروجی‌های حاصل از مدل MT3DMS جهت شبیه‌سازی انتقال شوری با در نظر گرفتن تغییرات چگالی وارد مدل SEAWAT می‌شود.

معادلات حاکم

در این پژوهش، از مدل عددی SEAWAT که توانایی شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان آب زیرزمینی با در نظر گرفتن چگالی جریان در محیط متخلخل را دارد استفاده شده است. مفهوم اساسی این مدل عددی، ترکیب دو نرم‌افزار شبیه‌ساز جریان آب زیرزمینی MODFLOW (۱۱) و شبیه‌ساز انتقال آلاینده MT3DMS (۲۹) به یک برنامه واحد جهت حل معادلات جریان آب زیرزمینی وابسته به چگالی و انتقال آلاینده می‌باشد. MODFLOW یک مدل تفاضل محدود سه‌بعدی برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در شرایط ماندگار و غیر ماندگار می‌باشد. معادله حاکم برای جریان آب زیرزمینی تحت تأثیر چگالی که توسط MODFLOW در مدل SEAWAT حل می‌گردد به شرح زیر بیان می‌شود (۸):

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} \left\{ \rho K_{fa} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \alpha} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial \alpha} \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial \beta} \left\{ \rho K_{fb} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \beta} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial \beta} \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial \gamma} \left\{ \rho K_{fy} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \gamma} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial \gamma} \right] \right\} = \rho S_f \frac{\partial h_f}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} - \rho q_s \quad (1)$$

که در آن α ، β و γ محورهای مختصات عمود برهم در جهت‌های اصلی نفوذپذیری، K_{fa} ، K_{fb} و K_{fy} هدایت هیدرولیکی در سه جهت اصلی (m/s)، ρ چگالی سیال (kg/m^3)، ρ_f چگالی آب شیرین (kg/m^3)، h_f هد آب شیرین (m)، Z ارتفاع بالای مرکز سلول مدل (m)، S_f ضریب ذخیره (1/m)، θ تخلخل مؤثر (بدون بعد)، C غلظت املاح (kg/m^3)، ρ چگالی آب ورودی از منبع تغذیه یا خروجی از طریق منبع تخلیه (kg/m^3)، q_s نرخ حجمی جریان بر واحد حجم با توجه به تغذیه و تخلیه آب در واحد زمان (1/s) و t زمان (s) می‌باشد.

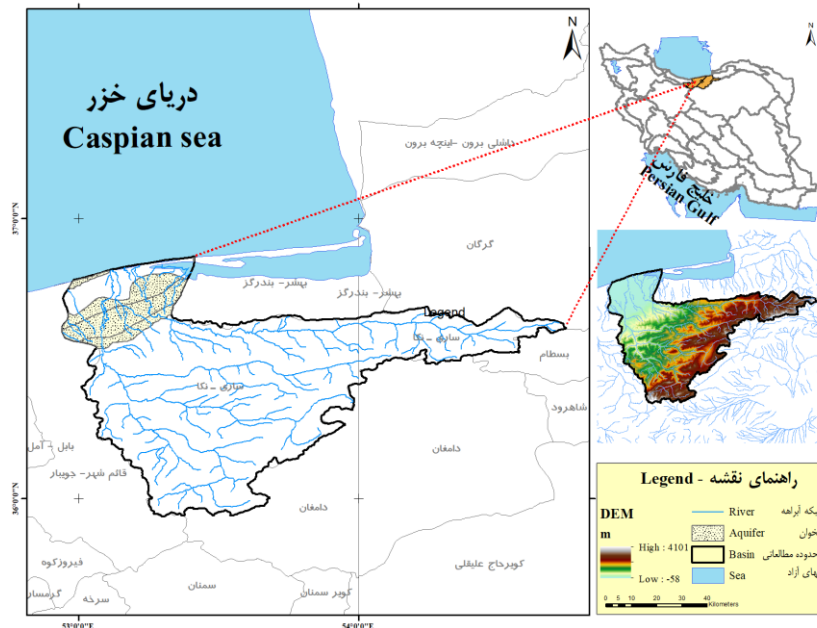
از آب زیرزمینی حساس است. چیتراکار و همکاران (۵) به بررسی الگوی نفوذ آب دریا در دشت ساحلی AlBatinah واقع در عمان پرداختند. مدل ساخته‌شده برای شبیه‌سازی دو سناریوی کاهش پمپاژ و تغذیه مصنوعی با پمپاژ ثابت برای کاهش نفوذ آب‌شور به کار گرفته شد. پیش‌بینی‌های مدل نشان داد که بهینه‌سازی نرخ پمپاژ و تغذیه مصنوعی موجب کاهش نفوذ آب دریا در دشت ساحلی AlBatinah می‌شود.

با مروری بر مطالعات صورت گرفته می‌توان به اهمیت بررسی مسئله تهاجم شوری در آبخوان‌های ساحلی به‌منظور مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح جهت کاهش اثرات زیان‌بار آن پی برد؛ بنابراین با توجه به اینکه در آبخوان‌های سواحل شمالی کشور، آب زیرزمینی به‌عنوان یک منبع اصلی تأمین آب شرب و کشاورزی به شمار می‌رود و به علت مجاورت این آبخوان‌ها با دریای خزر امکان تهاجم شوری به این مناطق ساحلی، نابودی منابع آب زیرزمینی و اثرات مخرب زیست‌محیطی و اقتصادی وجود خواهد داشت؛ لذا در پژوهش حاضر با به‌کارگیری مدل عددی GMS اقدام به ارزیابی کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی آبخوان ساحلی ساری- نکا واقع در استان مازندران، شبیه‌سازی غلظت کل جامدات محلول^۱ و کلراید، تعیین مرز مشترک آب شور و شیرین و پیش‌بینی نحوه پیشروی آب‌شور طی زمان در آبخوان ذکر شده پرداخته می‌شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه این تحقیق در محدوده ساری- نکا واقع می‌باشد که بین طول‌های جغرافیایی $52^{\circ}34'$ تا $54^{\circ}44'$ شرقی و $35^{\circ}56'$ تا $36^{\circ}52'$ شمالی در شمال کشور ایران قرار دارد. مساحت این محدوده $6938/5$ کیلومتر مربع می‌باشد که 970 کیلومتر مربع آن را دشت و مابقی اراضی در ارتفاعات است. سه رودخانه اصلی تجن، نکارود و سیاهرود آبخوان ساحلی را تغذیه می‌کند. روند عمومی منحنی‌های تراز آب زیرزمینی در این دشت شرقی- غربی بوده و فواصل منحنی‌های هم‌تراز سطح آب زیرزمینی در اراضی مخروط افکنه‌ای و جنوبی دشت کم بوده و شیب هیدرولیکی آب زیرزمینی بالا می‌باشد. با حرکت به سمت شمال در اراضی میانی دشت و پایاب دشتی فواصل منحنی‌ها افزایش یافته و شیب هیدرولیکی آب زیرزمینی کاهش می‌یابد. مقادیر توزیع سالانه بارندگی، تبخیر و دما طی دوره آماری ۴۵ ساله (۹۰-۱۳۴۵) به ترتیب برابر ۶۶۴ میلی‌متر، $1176/40$ میلی‌متر و $16/51$ سانتی‌گراد می‌باشد (۱۸). موقعیت



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه
Figure 1- Study area

مقدار $\frac{\partial \rho}{\partial C}$ در رابطه فوق بستگی به واحد انتخاب شده توسط کاربر طی شبیه سازی دارد. برای نمونه اگر واحد متر و کیلوگرم برای شبیه سازی استفاده شود، مقدار $\frac{\partial \rho}{\partial C}$ برابر ۰/۷۱۴۳ است که به صورت تقریبی معادل تغییرات چگالی سیال تقسیم بر غلظت املاح برای آب شیرین و آب شور می باشد.

مدل مفهومی و مدل سازی کمی آبخوان

مدل مفهومی جریان آب زیرزمینی یک چارچوب توصیفی و یکپارچه است که می توان با استفاده از آن داده ها و اطلاعات مربوط به هیدرولوژی آب های زیرزمینی را تفسیر نمود. تهیه مدل مفهومی مستلزم تلفیق دقیق داده ها، اطلاعات و گزارش های مربوط به آبخوان و جریان آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی است (۲۱).

پارامترهای لازم برای مدل مفهومی شامل تراز آب چاه های مشاهده ای، موقعیت و دبی چاه های بهره برداری، دبی رودخانه ها، توپوگرافی سطح زمین، سنگ کف، محدوده مدل سازی و هندسه آبخوان است. تخمین ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان (هدایت هیدرولیکی و آبدی ویژه برای مدل کمی و پراکنندگی طولی برای مدل کیفی) و تعیین میزان جریان های ورودی و خروجی آب زیرزمینی و تعیین هرگونه منابع تغذیه و تخلیه آبخوان از دیگر پارامترهای مورد نیاز جهت تهیه مدل مفهومی است.

MT3DMS ساختاری مشابه مدل MODFLOW دارد و به منظور شبیه سازی تغییرات غلظت آلاینده های محلول با در نظر گرفتن فرآیند انتقال، پراکنندگی، انتشار و واکنش های شیمیایی به کار می رود. بعد از توسعه و واسنجی مدل جریان، اطلاعات مورد نیاز برای شبیه سازی انتقال آلودگی (مانند حجم جریان انتقال یافته بین سلول ها) به این مدل داده می شود (۲۱). کد SEAWAT با به کارگیری مدل عددی MT3DMS به حل معادلات حاکم بر انتقال املاح که به صورت زیر بیان می شود، می پردازد (۲۸):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (D \cdot \nabla C) - \nabla \cdot (\bar{v} C) - \frac{q_s}{\theta} C_s + \sum_{k=1}^N R_k \quad (2)$$

که در آن D ضریب پراکنندگی هیدرودینامیکی (m^2/s)، C_s غلظت املاح ورودی از منبع تغذیه یا خروجی از طریق منبع تخلیه (kg/m^3) و R_k ($k=1, \dots, N$) نرخ تولید یا تجزیه در واکنش K از N واکنش متفاوت (kg/m^3s) هستند.

در شبیه سازی جریان وابسته به چگالی و انتقال املاح فرض می شود که چگالی سیال تنها تابعی از غلظت املاح است و از اثرات تغییرات فشار و دما بر چگالی سیال صرف نظر می گردد (۱۷). معادله خطی جهت تبدیل غلظت املاح به چگالی سیال در کد SEAWAT به صورت رابطه (۳) بیان می شود:

$$\rho = \rho_f \frac{\partial \rho}{\partial C} C \quad (3)$$

آبیاری ۲۰ درصد از نرخ برداشت چاه‌های کشاورزی کاهش داده شد و تحت عنوان تغذیه از طریق آب برگشتی کشاورزی به مدل اعمال شد (۱۸). با توجه به متغیر بودن مؤلفه‌های تغذیه و تخلیه آبخوان در دوره‌های تنش مختلف، در شبیه‌سازی حالت غیر ماندگار این مقادیر برای هر دوره تنش متفاوت خواهد بود.

در دشت ساری- نکا به دلیل غرقابی بودن آبیاری در فصول کشاورزی (کشت غالب منطقه برنج است) تبخیر از آب زیرزمینی صورت نمی‌گیرد؛ بنابراین در فصول کشاورزی از تبخیر و تفرق صرف‌نظر می‌گردد و در سایر فصول مقدار تبخیر از آب زیرزمینی برابر ۹/۷۸ میلیون متر مکعب در نظر گرفته شد (۱۸). خصوصیات رودخانه‌ها جهت ورود به مدل عددی با توجه به نقشه‌های حد حریم و بستر رودخانه‌ها و مقادیر آبدی در گزارشات بیلان منابع آب منطقه استخراج و در مدل اعمال شد. در شکل ۲ موقعیت چاه‌های بهره‌برداری و مشاهده‌ای کمی، سلول‌های فعال و غیرفعال، مرزها و سلول‌های مربوط به رودخانه آورده شده است.

مدل‌سازی کیفی آبخوان

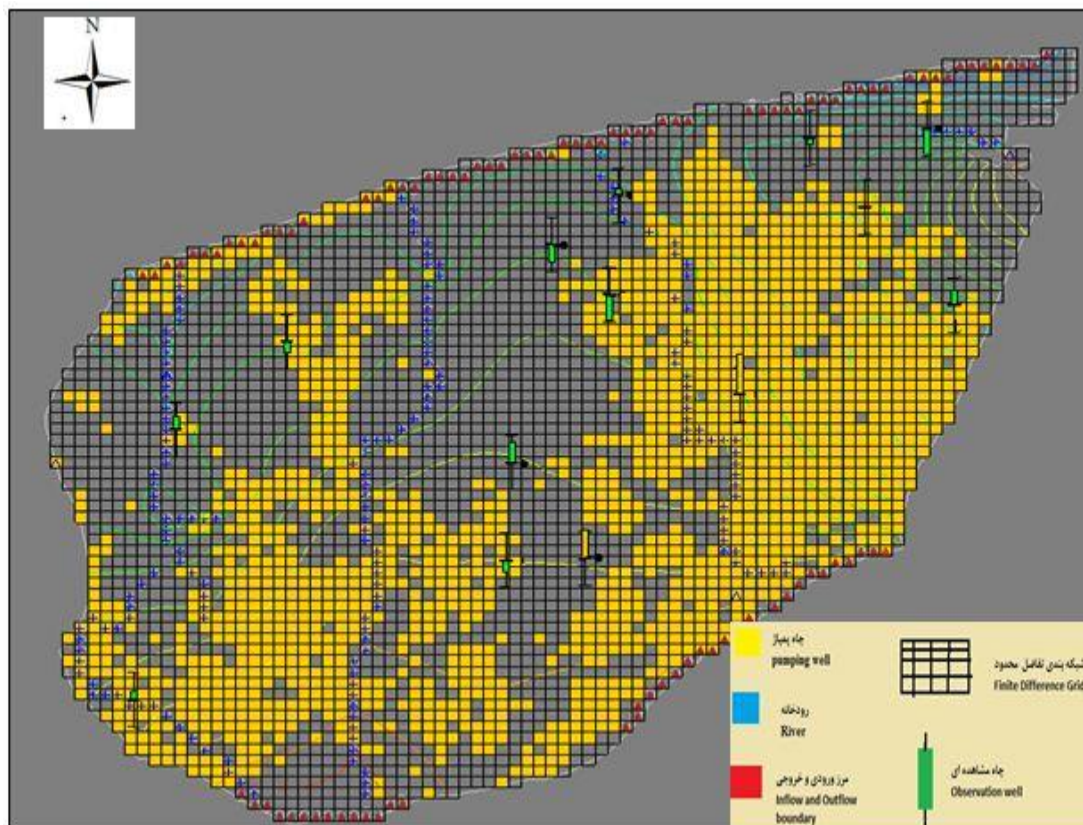
پس از ساخت، واسنجی و صحت‌سنجی مدل کمی جریان، مدل کیفی آب زیرزمینی در نرم‌افزار MT3DMS تهیه گردید. در مدل کیفی که به بررسی پدیده انتقال املاح در آب زیرزمینی می‌پردازد مانند مدل جریان زیرزمینی نیاز به تعریف شرایط مرزی است. شرایط مرزی در نظر گرفته در این مدل شامل مرز با غلظت اولیه معین که در تمام محدوده مدل اعمال شده و مربوط به زمان شروع مدل‌سازی است، می‌باشد. مرز با غلظت معین برابر با ۳۵۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در قسمت شمالی آبخوان برای پارامتر TDS و ۲۸۲/۲ میلی‌اکی‌والان بر لیتر (در حدود ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) برای پارامتر کلراید در مجاورت دریای خزر است. غلظت اولیه مدل از طریق درون‌یابی مقادیر غلظت TDS و کلراید قرائت‌شده در چاه‌های مشاهده‌ای کیفی (۱۸ حلقه چاه کیفی) در آغاز شبیه‌سازی (مهر ۸۹) به مدل اعمال شده است. مقادیر پخشیدگی طولی اولیه، نسبت‌های پراکندگی جانبی افقی به پراکندگی طولی و پراکندگی جانبی قائم به پراکندگی طولی به ترتیب برابر ۵۰ متر و ۰/۱ و ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است (۲ و ۳). مقدار تخلخل در آغاز شبیه‌سازی در تمامی محدوده مدل برابر ۰/۳۵ و ضریب انتشار ملکولی برابر 10^{-9} متر مربع بر ثانیه منظور گردید. این مقادیر طی فرآیند واسنجی تصحیح خواهند شد. همچنین اطلاعاتی از قبیل محدوده اجرای مدل، شبکه‌بندی و توپوگرافی سطح زمین و سنگ‌بستر همانند مدل کمی است. تقسیم‌بندی زمانی کیفی آبخوان با گام‌های زمانی ۶ ماهه و با توجه به داده‌های ماه‌های آب‌ان اردیبهشت در ۸ دوره تنش از مهر ۸۹ تا شهریور ۹۳ صورت پذیرفت. صحت‌سنجی مدل کیفی به مدت یک سال شامل دو دوره تنش ۶ ماهه از مهر ۹۳ تا شهریور ۹۴ اجرا شد.

پس از تهیه مدل مفهومی، برای انجام مدل‌سازی عددی شبکه تفاضل محدود با سلول‌هایی به ابعاد $500 * 500$ متر مورد استفاده قرار گرفت. در گام بعدی هندسه آبخوان که شامل مرزهای مدل و توپوگرافی سنگ کف و سطح آبخوان است با استفاده از روش‌های درون‌یابی در مدل اعمال گردید. لایه‌های تراز ارتفاعی سطح زمین از داده‌های DEM^۱ استخراج و با استفاده از درون‌یابی، کلیه نقاط به‌طور مستقیم به شبکه مدل تعمیم داده شد. لایه ارتفاعی سنگ‌بستر آبخوان نیز به کمک تفاضل داده‌های تراز سطح زمین و نقشه تغییرات ضخامت آبخوان ساخته شده و از طریق درون‌یابی وارد مدل گردید. مدل‌سازی آبخوان در حالت ماندگار برای مهر ۱۳۸۹ و در حالت غیر ماندگار برای یک دوره ۴ ساله شامل ۴۸ دوره تنش از مهر ۱۳۸۹ تا شهریور ۱۳۹۳ در نظر گرفته شد. به دلیل کمتر بودن نوسان تراز آب زیرزمینی و توازن بین تغذیه و تخلیه آبخوان در ماه اول سال آبی، مه‌ماه برای شروع مدل‌سازی انتخاب گردید. در طی این دوره مدل واسنجی شد و صحت‌سنجی نیز برای یک دوره یک‌ساله از مهر ۱۳۹۳ تا شهریور ۱۳۹۴ انجام گرفت.

با ترسیم نقشه هم‌پتانسیل آب زیرزمینی در نرم‌افزار ArcGIS 10.5 با استفاده از آمار تراز آب زیرزمینی ۱۴ حلقه چاه مشاهده‌ای در مه‌ماه ۱۳۸۹ و اعمال آن به سلول‌های مدل از طریق درون‌یابی، شرایط اولیه مدل تعیین شد. مرز ورودی و خروجی آبخوان شدت جریان وابسته به بار هیدرولیکی^۲ GHB در نظر گرفته شد. بخش‌های جنوبی آبخوان به‌عنوان مرز ورودی و بخش شمالی آبخوان که محل تخلیه جریان‌های سطحی رودخانه‌های واقع در محدوده مطالعاتی به دریا می‌باشند مرز خروجی جریان در نظر گرفته شد. هدایت هیدرولیکی در محدوده آبخوان با توجه به نقشه هم‌قابلیت آبخوان و نقشه هم‌ضخامت لایه آبدار به مدل اعمال گردید. با توجه به ناهمگنی آبخوان و متفاوت بودن بافت زمین‌شناسی منطقه در نقاط مختلف، محدوده مطالعاتی موردنظر به چندین ناحیه جهت اعمال هدایت هیدرولیکی و آبدی ویژه تقسیم‌بندی گردید.

در شرایط غیر ماندگار، مقادیر آبدی ویژه براساس نتایج ۱۴ آزمایش پمپاژ و باتوجه به مطالعات جباری و همکاران (۱۲) برآورد شده است. متوسط ضریب هدایت هیدرولیکی در آبخوان ۱۰ متر بر روز برآورد گردید. مقدار حداکثر، حداقل و متوسط آبدی ویژه به ترتیب ۸، ۱ و ۳/۴ درصد در نظر گرفته شد. مقادیر این دو پارامتر در مرحله واسنجی تصحیح خواهند شد. میزان نفوذ از بارندگی در سطح ناحیه دشتی ساری- نکا نیز ۶۵/۸۲ میلی‌متر محاسبه شده است که ۹/۹۱ درصد از میزان بارندگی سطح دشت را شامل می‌شود (۱۸). همچنین با توجه به بافت خاک دشت، وضعیت کرت بندی و شیوه

1- Digital elevation model
2- General Head Boundary



شکل ۲- مدل مفهومی آبخوان ساری- نکا
Figure 2- Conceptual model of Sari-Neka

اشکال ۳ و ۴ پهنه‌بندی مقادیر هدایت هیدرولیکی در واسنجی ماندگار و آبدهی ویژه در ابتدا و انتهای واسنجی غیر ماندگار ارائه شده است. با توجه به اشکال ۳ و ۴ مشخص می‌گردد مقادیر این پارامترها در نواحی شمالی کمتر و در نواحی جنوبی بیشتر است که این امر نشان‌دهنده نفوذپذیری کمتر و ریزدانه‌تر بودن اندازه ذرات خاک در بخش‌های شمالی آبخوان است.

مقایسه مقادیر مشاهداتی در مقابل مقادیر محاسباتی تراز آب زیرزمینی در دوره واسنجی در شکل ۵ ارائه شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده تطابق قابل قبول بین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی است.

همچنین در شکل ۶ تراز سطح آب مشاهداتی و محاسباتی در طول زمان واسنجی غیرماندگار در محل دو چاه مشاهده‌ای به عنوان نمونه ارائه شده است.

مقایسه مقادیر مشاهداتی در مقابل مقادیر محاسباتی تراز آب زیرزمینی در دوره صحت‌سنجی در شکل ۷ ارائه شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده برازش قابل قبول بین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی است. میزان خطای آماری مدل در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی در جدول ۱ آورده شده است. میزان خطاهای آماری

نتایج و بحث

نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل کمی

اصولاً یک مدل آب زیرزمینی با عدم قطعیت‌های مختلفی روبه‌رو است. یکی از بارزترین پارامترهای ایجادکننده عدم قطعیت در شبیه‌سازی، پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان (هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه) می‌باشند که باید به نحوی مطلوب ناحیه‌بندی و مقادیر مناسبی برای آن‌ها در نظر گرفته شود (۱). بر این اساس مدل ابتدا در حالت ماندگار برای گام زمانی مهر ۱۳۸۹ با استفاده از داده‌های تراز آب مربوط به این ماه و سپس در حالت غیر ماندگار در دوره زمانی مهر ۱۳۸۹ تا شهریور ۱۳۹۳ اجرا و واسنجی شد. این واسنجی با استفاده از داده‌های تراز آب مربوط به این دوره آماری به‌منظور به حداقل رساندن اختلاف تراز آب مشاهداتی و محاسباتی در محل چاه‌های مشاهده‌ای به روش سعی و خطا به ترتیب با تغییر محدود در پارامترهای هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه انجام شد. لازم به ذکر است که نتایج مدل واسنجی شده در حالت ماندگار به‌عنوان شرایط اولیه در شبیه‌سازی حالت غیر ماندگار در نظر گرفته می‌شود. در

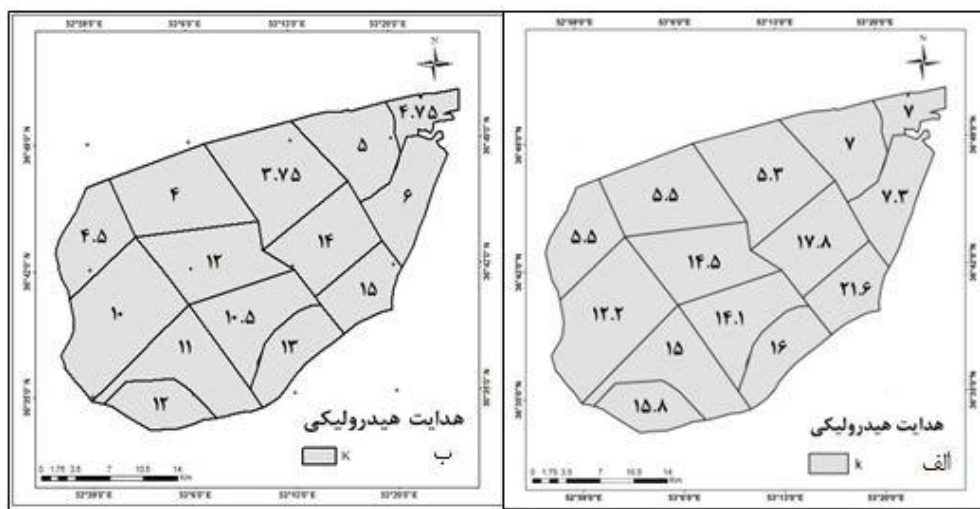
بین مقادیر غلظت TDS و کلراید قرائت‌شده در چاه‌های مشاهده‌ای در مقابل مقادیر غلظت TDS و کلراید شبه‌سازی‌شده توسط مدل در شکل ۸ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود غلظت آب زیرزمینی با ضریب تبیین کمتر از ۰/۸۵ همبستگی کمتری نسبت به مقادیر تراز آب زیرزمینی دارند. دلیل این امر تأثیر کم تغییرات پارامترهای مؤثر بر پخش به‌عنوان تنها عامل ورودی مدل، بر کاهش خطای آماری مدل در فرآیند واسنجی است.

اشکال ۹ و ۱۰ نیز مقایسه بین غلظت‌های مشاهده‌ای و محاسباتی را در محل دو چاه‌های مشاهده‌ای طی واسنجی مدل کیفی نشان می‌دهد.

برآورد شده در شبه‌سازی مدل کمی حاکی از صحت مدل ساخته‌شده می‌باشد.

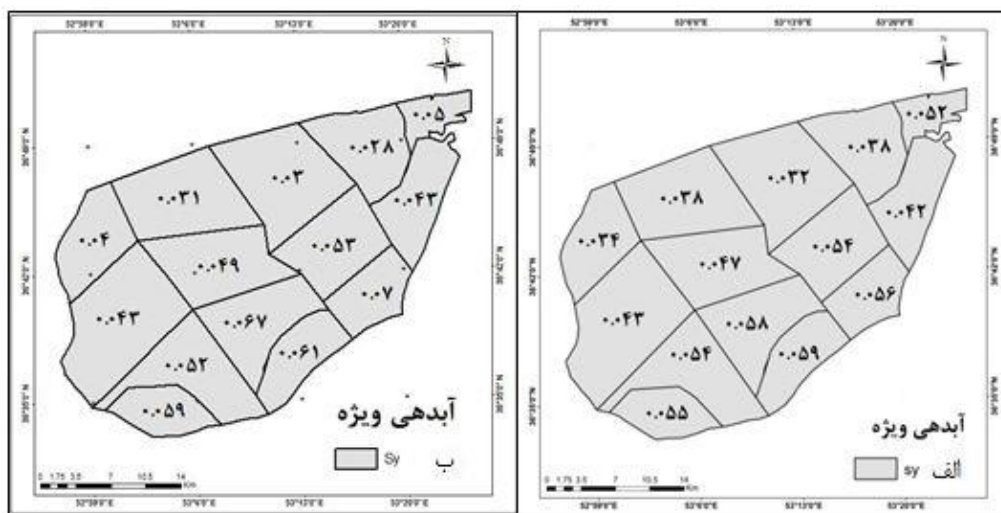
ارزیابی مدل کیفی

فرآیند واسنجی در مدل کیفی همانند مدل کمی به روش سعی و خطا و با تغییر پارامترهای پراکندگی افقی، نسبت‌های پراکندگی جانبی افقی به پراکندگی طولی و پراکندگی جانبی قائم به پراکندگی طولی صورت پذیرفت. در طی مرحله واسنجی مقادیر غلظت TDS و کلراید قرائت‌شده در چاه‌های مشاهده‌ای منتخب با مقادیر غلظت شبه‌سازی‌شده توسط مدل طی دوره آماری مهر ۱۳۸۹ تا شهریور ۱۳۹۳ مقایسه گردید تا میزان خطای آماری مدل به سطح قابل قبولی از دقت برسد. جهت کنترل روند فرآیند واسنجی مدل کیفی مقایسه



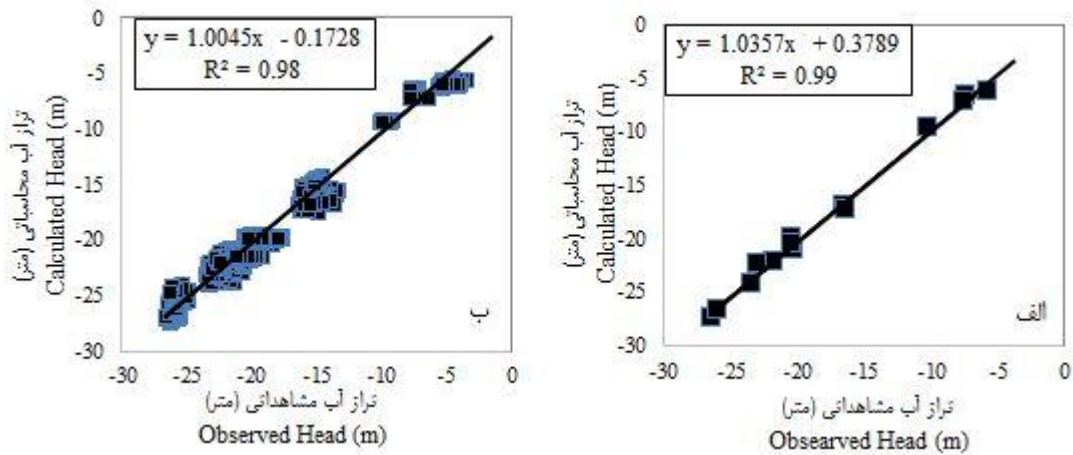
شکل ۳- مقادیر هدایت هیدرولیکی آبخوان (متر بر روز) (الف) بعد از واسنجی، (ب) قبل از واسنجی

Figure 3- The value of Hydraulic conductivity in aquifer (m/day), (A) after calibration, (B) before calibration



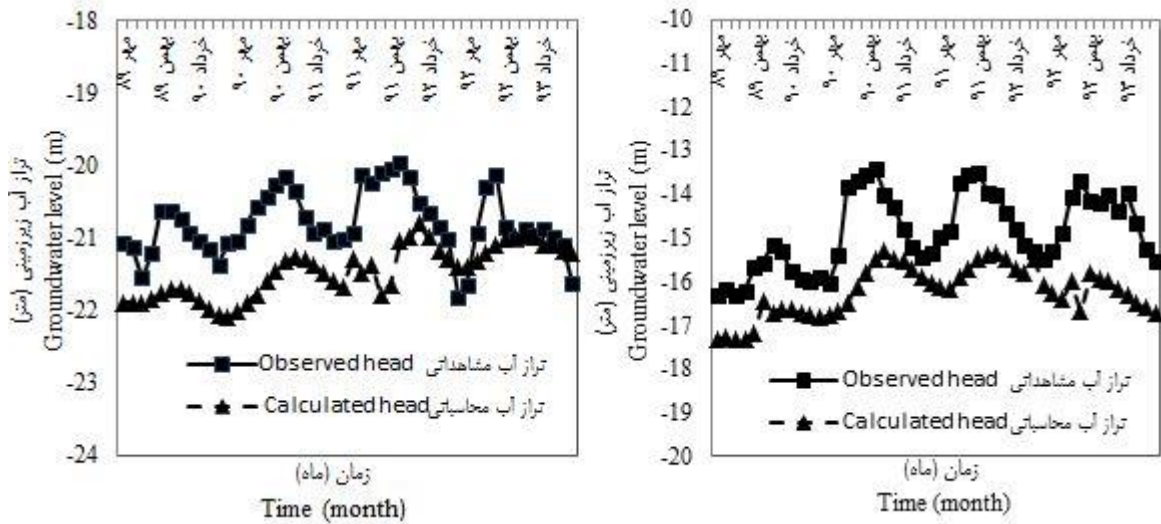
شکل ۴- مقادیر آبدهی ویژه آبخوان (الف) بعد از واسنجی، (ب) قبل از واسنجی

Figure 4- The value of Specific yield in aquifer, (A) after calibration, (B) before calibration



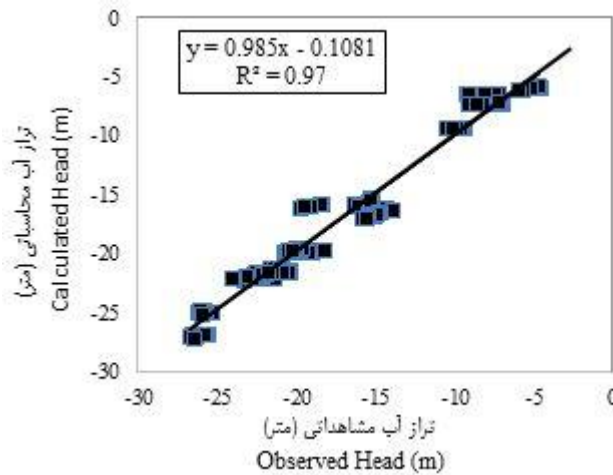
شکل ۵- مقایسه تراز آب مشاهداتی و محاسباتی در واسنجی (الف) مدل جریان ماندگار، (ب) مدل جریان غیر ماندگار

Figure 5- Comparison of observed and calculated head in the calibration (A) steady state flow model, (B) transient flow model



شکل ۶- تراز آب مشاهداتی و محاسباتی در دو چاه مشاهده‌ای نمونه

Figure 6- Calculated and Observed groundwater level of two sample observation wells

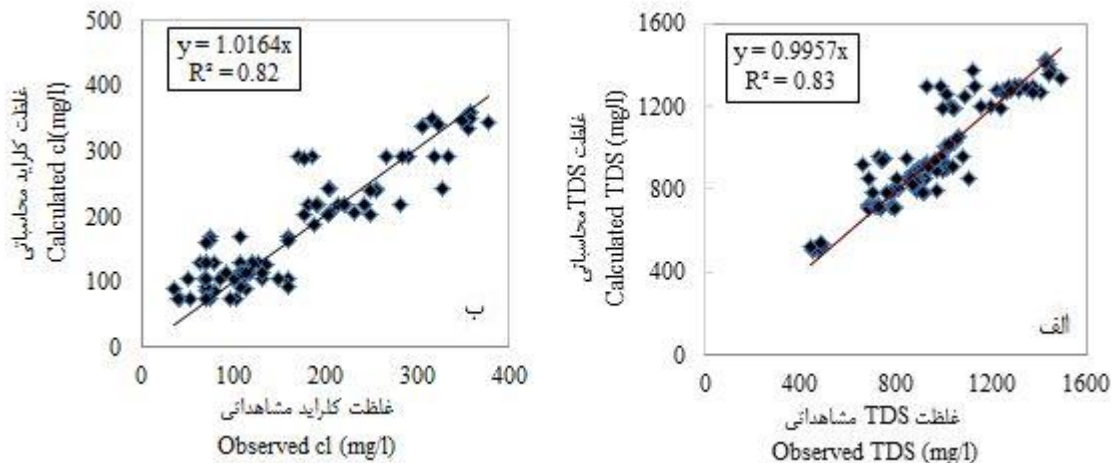


شکل ۷- مقایسه تراز آب مشاهداتی و محاسباتی در صحت‌سنجی مدل جریان

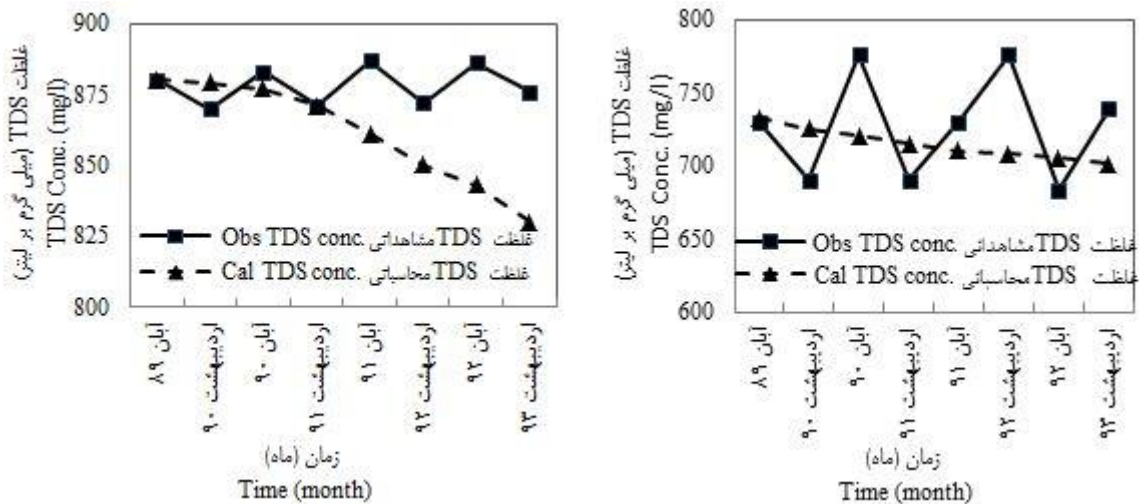
Figure 7- Comparison of observed and calculated head in the validation flow model

جدول ۱- میزان خطای مدل کمی
Table 1- Error in quantitative model

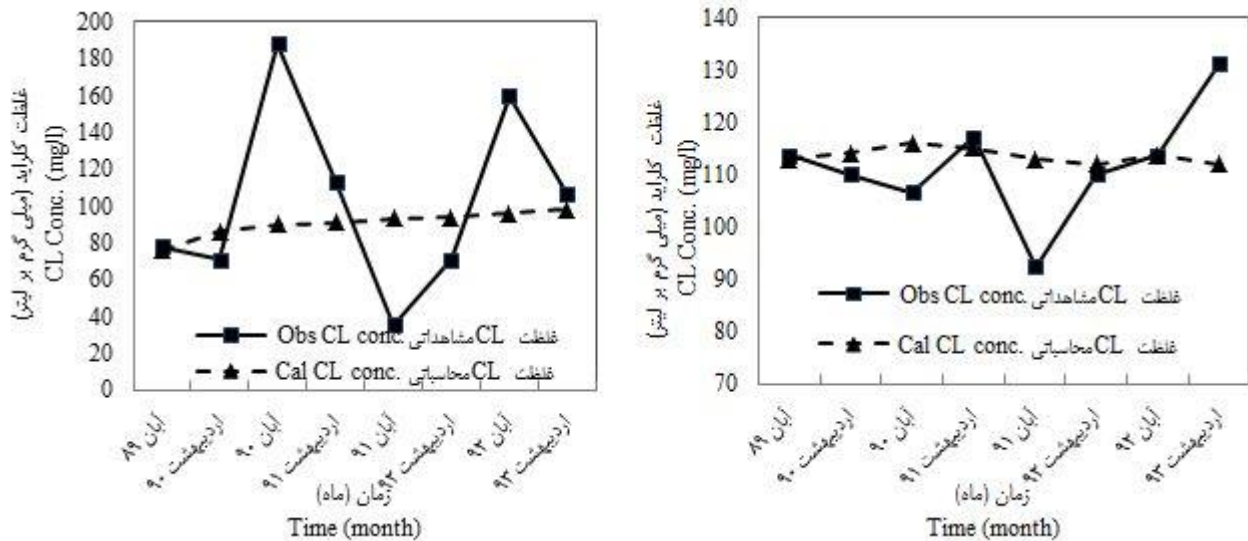
پارامتر Parameter	شرایط ماندگار Steady state (m)	شرایط غیر ماندگار Transient state (m)	صحت‌سنجی Validation (m)
میانگین خطا (Mean error)	0.359	-0.244	-0.162
میانگین مطلق خطا (Mean absolute error)	0.553	0.751	0.772
میانگین مجذور خطا (Root mean squared error)	0.621	0.922	0.958



شکل ۸- مقایسه غلظت مشاهداتی و محاسباتی برای (الف) TDS، (ب) Cl بعد از واسنجی مدل
Figure 8- Comparison of observed and calculated (A) TDS, (B) Cl after calibration model

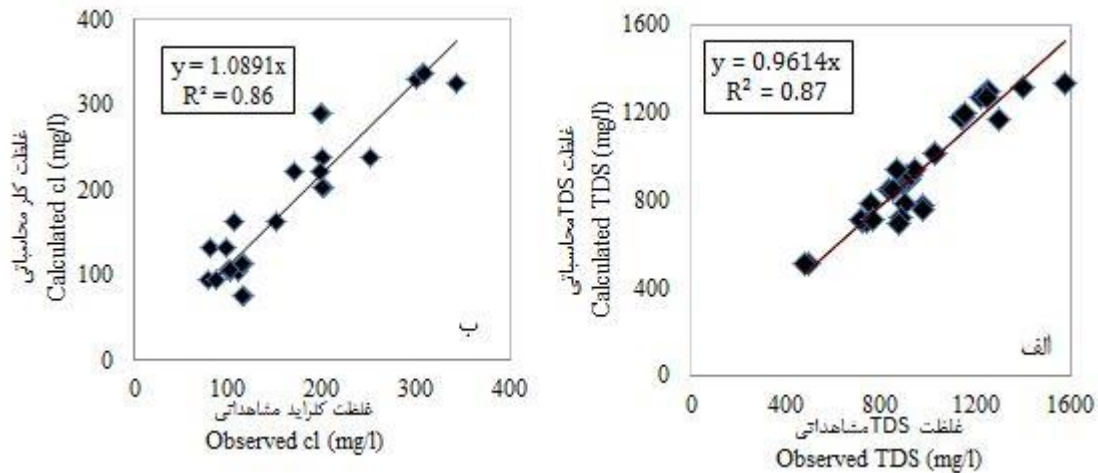


شکل ۹- غلظت TDS مشاهداتی و محاسباتی در دو چاه مشاهده‌ای نمونه
Figure 9- Calculated and Observed TDS concentration of two sample observation wells



شکل ۱۰- غلظت کلراید مشاهده‌ای و محاسباتی در دو چاه مشاهده‌ای نمونه

Figure 10- Calculated and Observed CL concentration of two sample observation wells



شکل ۱۱- مقایسه غلظت مشاهده‌ای و محاسباتی برای (الف) TDS، (ب) Cl بعد از صحت‌سنجی مدل
Figure 11- Comparison of observed and calculated (A) TDS, (B) Cl after validation model

میانگین خطا برحسب میلی‌گرم بر لیتر به ترتیب برای پارامتر کلراید در واسنجی غیر ماندگار برابر با ۸۱، ۶۰، ۱۵- و در مرحله صحت‌سنجی مدل برابر با ۶۵، ۴۹، ۱۳ محاسبه شد. نتایج مدل کمی و کیفی نشان‌دهنده دقت قابل قبول شبیه‌سازی است؛ بنابراین از مدل می‌توان جهت پیش‌بینی‌های آبی استفاده نمود.

نتایج حاصل از پهنه‌بندی TDS در شکل ۱۲ ارائه داده شده است. نتایج نشان می‌دهد این پارامتر در نواحی نزدیک به ساحل در شمال آبخوان دارای بیشترین غلظت و کیفیت نامناسب جهت بهره‌برداری به دلیل مجاورت با دریای خزر است و از میزان آن در آب زیرزمینی به سمت جنوب محدوده مطالعاتی کاسته می‌شود. مناطق جنوبی آبخوان وضعیت مطلوبی در نفوذ آب شور دارند، به نحوی که TDS کمتر از ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بخش اعظمی از آبخوان را

صحت‌سنجی مدل کیفی جهت تأیید مدل در بازه زمانی مهر ۱۳۹۳ تا شهریور ۱۳۹۴ شامل دو دوره تنش ۶ ماهه صورت گرفته است. همبستگی بین غلظت‌های TDS و کلراید شبیه‌سازی شده در محل چاه‌های مشاهده‌ای و غلظت اندازه‌گیری شده صحرائی در شکل ۱۱ ارائه شده است. با توجه به مقادیر ضریب تبیین مقادیر مشاهده‌ای و محاسباتی همبستگی قابل قبولی دارند.

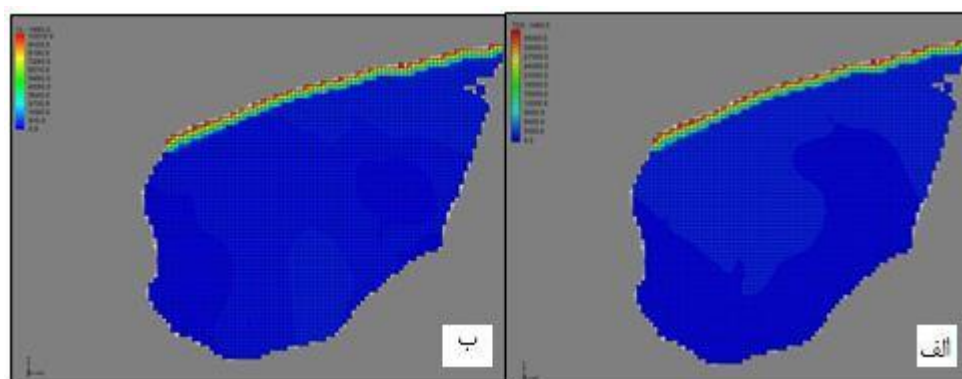
پس از اجرای نهایی مدل کیفی، برای ارزیابی نتایج مدل از شاخص‌های آماری میانگین مجذور خطا، میانگین مطلق خطا و میانگین خطا استفاده گردید که به ترتیب برای پارامتر TDS در دوره واسنجی مدل غیرماندگار برابر با ۱۰۰، ۷۴، ۱ میلی‌گرم بر لیتر و در دوره صحت‌سنجی برابر با ۸۹، ۶۶، ۱۸- میلی‌گرم بر لیتر محاسبه گردید. همچنین مقادیر میانگین مجذور خطا، میانگین مطلق خطا و

تغییرات چگالی از مدل عددی SEAWAT در محیط نرم‌افزار GMS10.0 استفاده شده است. گسسته‌سازی منطقه موردنظر شامل شبکه‌هایی با ابعاد ۲۵۰ * ۲۵۰ متر در راستای طول و عرض، مشتمل بر ۸۰۸ سلول فعال و در ۵ لایه با توجه به خصوصیات منطقه و ضخامت آبخوان در نظر گرفته شده است. ضخامت آبخوان به دلیل وضوح در نمایش ۲۵۰ متر در نظر گرفته شده است. هندسه مدل و شرایط مرزی مدل در شکل ۱۳ ارائه شده است. مرز جنوبی آبخوان که جریان آب زیرزمینی برای تخلیه به سمت دریا وارد آن می‌گردد و همچنین مرز شمالی آبخوان که منطبق بر دریای خزر است (خروجی آبخوان) به عنوان مرز با جریان وابسته به بار هیدرولیکی در نظر گرفته شده‌اند. همچنین غلظت ۳۵۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر برای پارامتر TDS و غلظت ۲۸۲/۲ میلی‌اکی‌والان بر لیتر (حدود ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) برای پارامتر کلراید به دلیل مجاورت با دریای خزر به مرز شمالی مدل اعمال شد. میزان برداشت از چاه‌های واقع در محدوده در نظر گرفته شده نیز طبق نتایج آمار استخراج شده از شرکت آب منطقه‌ای مازندران به مدل اعمال گردید.

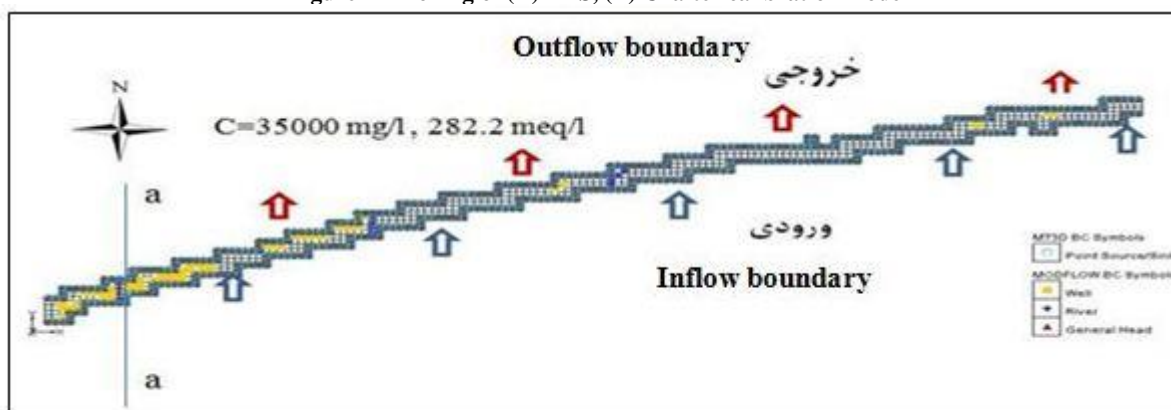
پوشش داده است که این مناطق حاوی آب زیرزمینی با اندکی شور می‌باشد که برای کشاورزی مناسب هستند. مقادیر TDS به سمت شمال آبخوان روند افزایشی دارد و در بخش‌های میانی آبخوان که عمده چاه‌های بهره‌برداری در این مناطق قرار دارند، مقادیر آن از ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر تا ۲۰۰۰ میلی‌گرم متغیر است. همچنین بررسی نقشه مربوط به غلظت کلراید نشان می‌دهد که غلظت این متغیر همانند غلظت TDS در بخش‌های شمالی آبخوان و در نواحی ساحلی به‌طور چشمگیری افزایش داشته است به‌طوری‌که غلظت کلراید این مناطق از آب زیرزمینی نسبتاً شور تا آب دریا متغیر است. در ادامه به‌منظور مدل‌سازی پیشروی شور به‌جای در نظر گرفتن تمامی محدوده مطالعاتی، مناطقی که غلظت TDS آن‌ها بیشتر از مقدار ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر است در نظر گرفته شده است. این انتخاب با توجه به توصیه نشریه FAO مبنی بر درنظرگیری حداکثر TDS مجاز جهت مصارف کشاورزی انجام شده است.

شبه‌سازی با مدل SEAWAT و پیش‌بینی وضعیت آبخوان

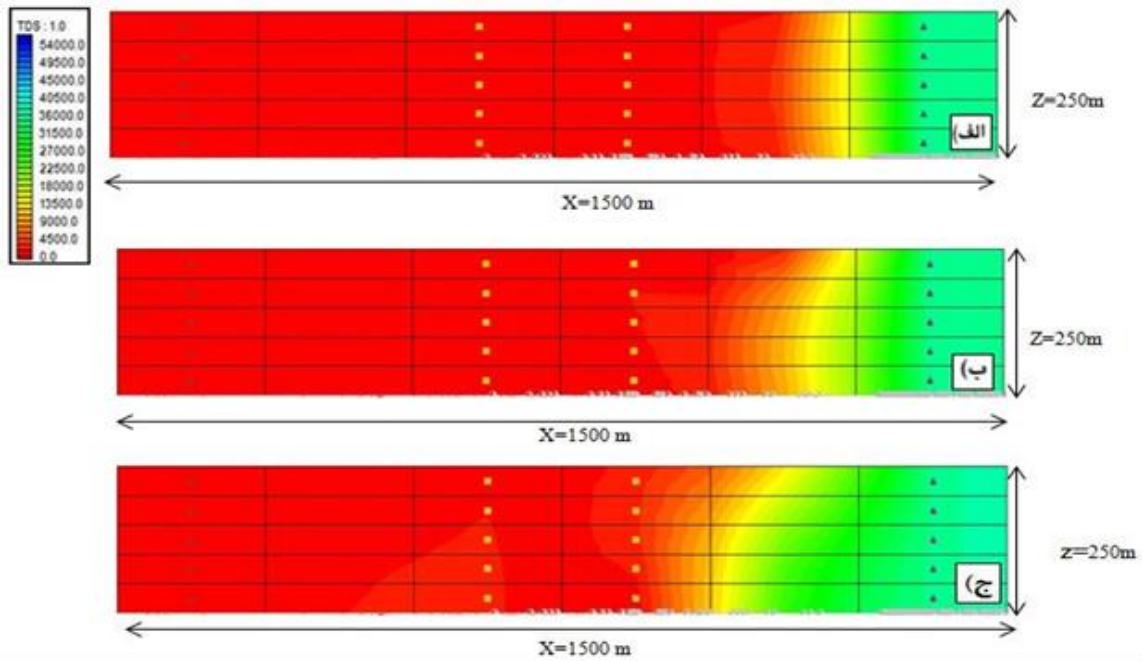
در این قسمت به‌منظور شبه‌سازی انتقال آلودگی تحت تأثیر



شکل ۱۲- پهنه‌بندی (الف) کل جامدات محلول، (ب) کلر بعد از واسنجی مدل
Figure 12- Zoning of (A) TDS, (B) Cl after calibration model

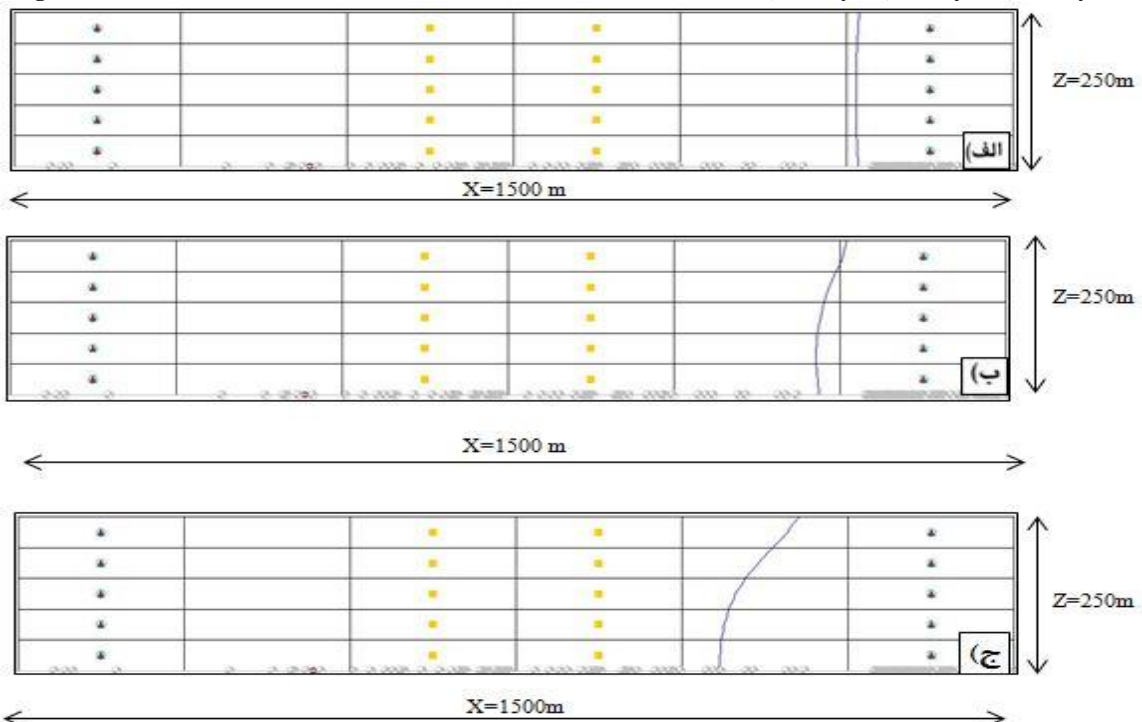


شکل ۱۳- شرایط مرزی مدل، دامنه مدل و شبکه‌بندی مدل
Figure 13- Boundary condition, Model domain and Model discretization



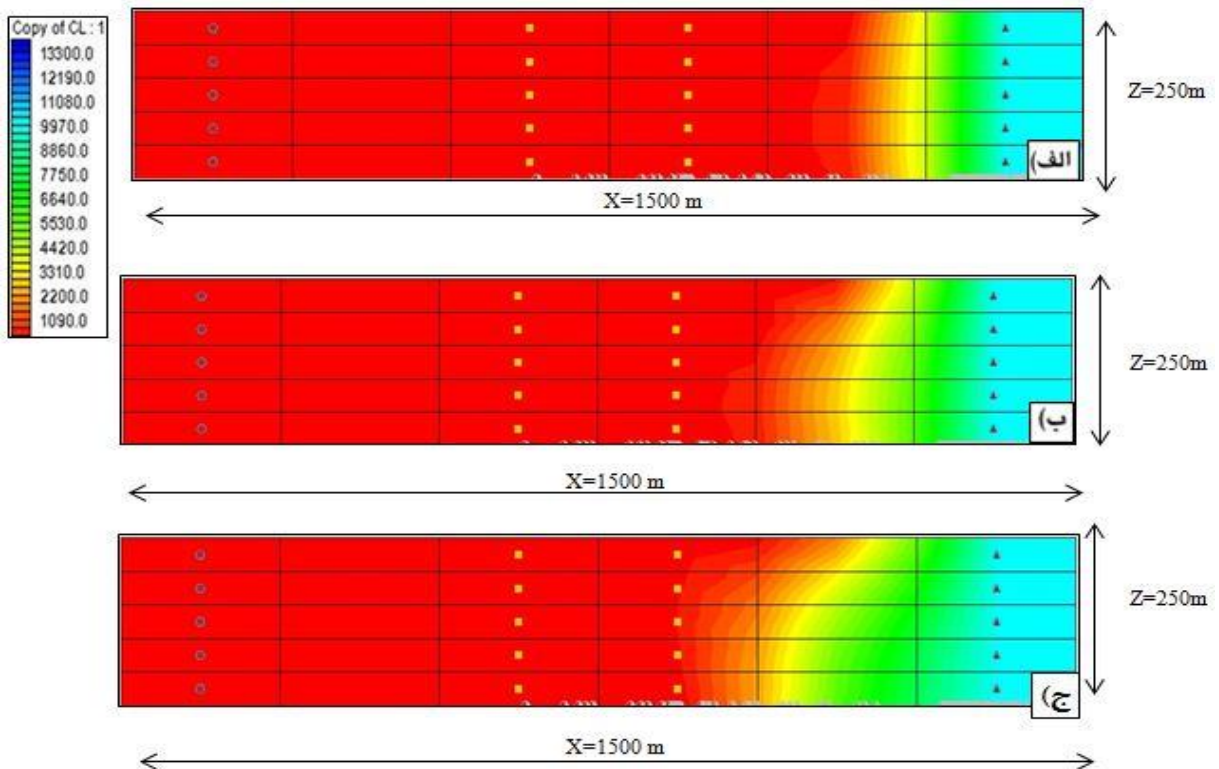
شکل ۱۴- توزیع شوری TDS در مقطع عرضی a-a پس از (الف) یک سال، (ب) سه سال، (ج) شش سال

Figure 14- Concentration distribution of TDS in the cross section a-a after, (A) 1 year, (B) 3 years, (C) 6 years

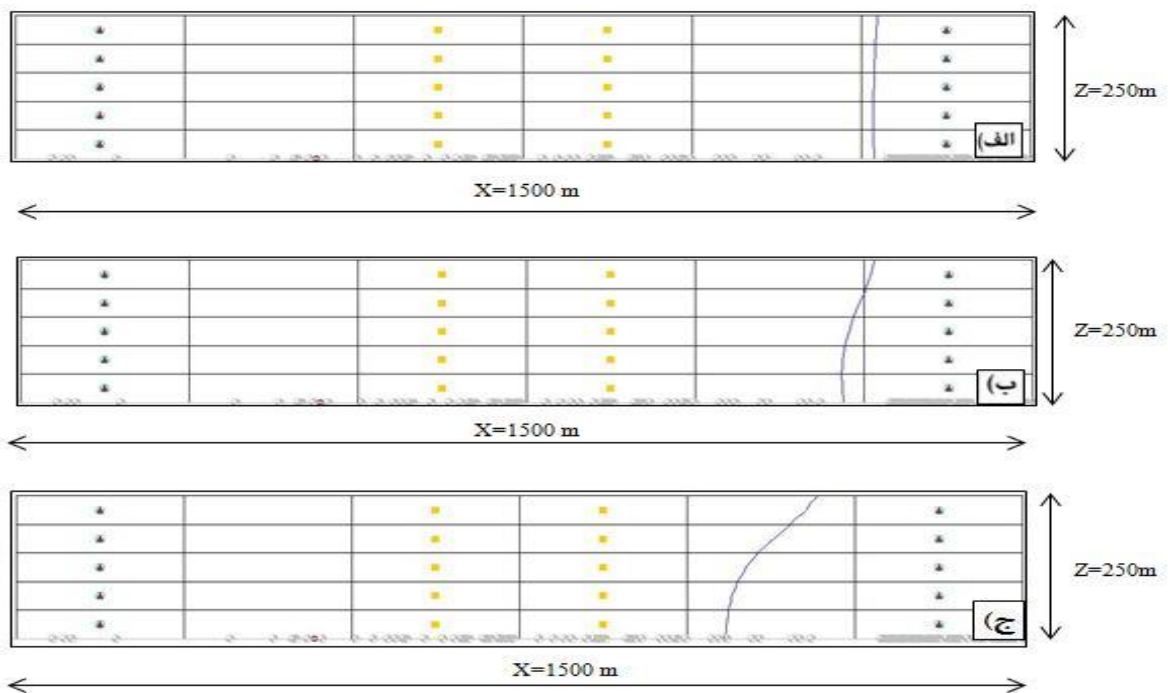


شکل ۱۵- تغییر موقعیت خط هم غلظت ۵۰ درصد TDS در مقطع عرضی a-a پس از (الف) یک سال، (ب) سه سال، (ج) شش سال

Figure 15- The 50% iso-concentration contour movement for TDS in the cross section a-a after, (A) 1 year, (B) 3 years, (C) 6 years



شکل ۱۶- توزیع شوری CL در مقطع عرضی a-a پس از (الف) یک سال، (ب) سه سال، (ج) شش سال
 Figure 16- Concentration distribution of CL in the cross section a-a after, (A) 1 year, (B) 3 years, (C) 6 years



شکل ۱۷- تغییر موقعیت خط هم غلظت ۵۰ درصد CL در مقطع عرضی a-a پس از (الف) یک سال، (ب) سه سال، (ج) شش سال
 Figure 17- The 50% iso-concentration contour movement for CL in the cross section a-a after, (A) 1 year, (B) 3 years, (C) 6 years

زیرزمینی و انتقال شوری انجام گرفت. پس از ساخت و اجرای مدل جریان آب زیرزمینی، مدل کیفی آبخوان جهت شبیه‌سازی انتقال شوری با استفاده از غلظت TDS و CL و با به‌کارگیری مدل MT3DMS تهیه و در همان دوره شبیه‌سازی مدل جریان آب زیرزمینی و با گام زمانی ۶ ماهه اجرا گردیده و پس از آن پارامترهای مؤثر بر پراکندگی و اسنجی شد. نتایج مدل کمی و کیفی بیانگر دقت بالای مدل شبیه‌سازی شده است. در ادامه جهت بررسی هجوم جبهه آب شور به آبخوان دشت ساری-نکا با استفاده از مدل SEAWAT به‌جای در نظر گرفتن تمامی محدوده مطالعاتی، مناطقی که دارای TDS با غلظت بیشتر از ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بوده‌اند در نظر گرفته شد. از مدل ساخته شده در محیط نرم‌افزار SEAWAT برای پیش‌بینی وضعیت پیشروی آب شور در ۶ سال آینده با فرض استمرار روند کنونی در تغذیه و تخلیه آبخوان، استفاده گردید. تهاجم شوری برای غلظت TDS و کلراید رفتاری مشابه داشته است به طوری که در سال سوم و ششم پیش‌بینی میزان تهاجم شوری به ترتیب حدود ۱۰ درصد و ۸۰ درصد نسبت به سال اول پیش‌بینی افزایش یافت. همچنین حرکت مرز مشترک آب شور و شیرین به سمت آبخوان از ۲۴۰ متر در ابتدای شبیه‌سازی به حدود ۴۴۰ متر در انتهای شبیه‌سازی رسید. نتایج پیش‌بینی مدل حاکی از آن است که با ادامه روند کنونی آبخوان و عدم تغییر در شرایط فعلی حاکم و بدون در نظر گرفتن افزایش یا کاهش برداشت از آبخوان، امکان بهم خوردن تعادل بین آب شور و شیرین، پیشروی بیشتر آب شور به سمت آبخوان دشت وجود دارد. نتایج به دست آمده از تهاجم جبهه‌های آب شور دریا به طرف آبخوان نشان می‌دهد که این موضوع مطابق مطالعات سایر محققین است. نقش بهره‌برداری و افزایش آن در پیشروی جبهه‌های آب شور تأثیر زیادی داشته که نتایج این مطالعه با نتایج استین و همکاران در سال ۲۰۱۹ (۲۵) که به بررسی و نقش تهاجم و اینترفاز آب شور و شیرین پرداخته بود همخوانی دارد. حفر چاه‌های غیرمجاز و اضافه برداشت از چاه‌های آب مهم‌ترین عاملی است که منابع آب شیرین زیرزمینی در دشت ساری-نکا را مورد تهدید قرار می‌دهد و موجب افت تراز آب زیرزمینی و به‌تبع آن تسریع روند پیشروی آب شور خواهد شد. با توجه به اینکه با پیشروی آب شور در آبخوان‌های ساحلی برگشت آن زمان‌بر و مشکل است لذا لزوم مدیریت و تصمیمات صحیح به‌منظور جلوگیری از اثرات مخرب زیست‌محیطی و نابودی آبخوان ضرورت می‌یابد.

پس از اعمال شرایط فوق‌الذکر در مدل SEAWAT، به‌منظور بررسی تأثیر سیاست فعلی روند برداشت از آبخوان بر نحوه پیشروی شوری، مدل برای ۶ سال آینده با گام زمانی سالیانه (مهر ۱۳۹۳ تا شهریور ۱۴۰۰) با فرض ثابت ماندن استرس‌های وارد بر سیستم اجرا و نتایج آن در مقطع عرضی a-a استخراج گردید. لازم به ذکر است در تمامی اشکال ارائه‌شده محور افقی برابر $x=1500m$ و محور عمودی $z=250m$ است و دریا در سمت راست واقع گردیده است. همچنین خط هم‌غلظت ۵۰ درصد شوری به‌عنوان مرز مشترک بین آب شور و شیرین در نظر گرفته شد.

شکل‌های ۱۴ و ۱۵ به ترتیب روند پیشروی شوری و حرکت خط هم‌غلظت ۵۰ درصد شوری برای پارامتر TDS را در طی زمان نشان می‌دهد. نتایج حاصل از پیش‌بینی مدل برای پارامتر TDS نشان می‌دهد که در سال اول پیش‌بینی مقدار پیشروی خط هم‌غلظت ۵۰ درصد شوری به میزان ۲۴۰ متر به‌دست‌آمده است. در سال سوم پیش‌بینی، میزان پیشروی ۲۶۵ متر شده است که بیانگر افزایش ۱۰ درصدی پیشروی شوری نسبت به ابتدای دوره پیش‌بینی می‌باشد و در نهایت در انتهای دوره پیش‌بینی میزان پیشروی به مقدار ۴۴۰ متر است که نسبت به ابتدای دوره پیش‌بینی حدود ۸۰ درصد افزایش نفوذ شوری را شاهد خواهیم بود.

شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نشان‌دهنده نحوه تهاجم شوری و حرکت خط هم‌غلظت ۵۰ درصد کلراید به سمت آبخوان است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روند تهاجم شوری غلظت کلراید در طی زمان مشابه غلظت TDS است به نحوی که در سال سوم و ششم پیش‌بینی خط هم‌غلظت شوری نسبت به ابتدای پیش‌بینی به ترتیب به میزان ۲۵ متر و ۲۰۰ متر بیشتر در داخل آبخوان نفوذ می‌کند. این میزان نفوذ بیشتر ناشی از بهره‌برداری بدون برنامه‌ریزی بوده و سبب هجوم جبهه‌های آب شور از طرف دریا به ساحل می‌شود.

نتیجه‌گیری

بحث بهره‌برداری مناسب با کمترین اثرات سوء یکی از مهمترین موضوعات در مدیریت منابع آب است. بحث کاهش سطح آب زیرزمینی و شور شدن آبخوان‌ها بخصوص در آبخوان‌های شمالی که در معرض تهاجم جبهه‌های آب شور قرار دارند بسیار مهم و حائز اهمیت است. در پژوهش حاضر آبخوان دشت ساری-نکا با استفاده از مدل عددی MODFLOW و MT3DMS شبیه‌سازی جریان آب

منابع

- 1- Abedi Koupai J., Golabchian M. 2015. Estimation of Hydrodynamic Parameters of Groundwater Resources in Kouhpayeh- Segzi Watershed Using MODFLOW. Journal of Water and Soil Science 19(72): 281-293. (In Persian with English abstract)

- 2- Anderson M.P., and Cherry J.A. 1979. Using models to simulate the movement of contaminants through groundwater flow systems. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 9(2): 97-156.
- 3- Benjakul R. 2010. Simulating dioxane transport in a heterogeneous glacial aquifer system (Washtenaw County, Michigan) using publicly available models and data.
- 4- Cheng Jian M., and Chong Chen X. 2001. Three-Dimensional Modeling of Density- Dependent Salt Water Intrusion in Multilayered Coastal Aquifers in Jahe River Baisn, Shandong Province, China. *Groundwater* 39(1): 137-143.
- 5- Chitrakar P., and Sana A. 2015. Groundwater flow and solute transport simulation in Eastern Al Batinah coastal plain, Oman: Case study. *Journal of Hydrologic Engineering* 21(2): 05015020.
- 6- Cobaner M., Yurtal R., Dogan A., and Motz L.H. 2012. Three dimensional simulation of seawater intrusion in coastal aquifers: A case study in the Goksu Deltaic Plain. *Journal of Hydrology* 464: 262-280.
- 7- Fathi Zaad A., Shahnazari A., Ziatabar Ahmadi M., and Fazloulou R. 2017. Investigating of saltwater intrusion in Talar area using the numerical model SHARP. 6th National Symposium on Sustainable Agriculture and Natural Resources, Tehran. (In Persian)
- 8- Guo W., and Langevin C.D. 2002. User's guide to SEAWAT; a computer program for simulation of three-dimensional variable-density ground-water flow (No. 06-A7).
- 9- GuvanasenV., Wade S.C., and Barcelo M.D. 2000. Simulation of regional ground water flow and salt water intrusion in Hernando County, Florida. *Groundwater* 38(5): 772-783.
- 10- Hamidi M., and SabbaghYazdi S.R. 2006. Numerical modeling of seawater intrusion in coastal aquifer using finite volume unstructured mesh method. *WSEAS Transactions on Mathematics* 5(6): 648.
- 11- Harbaugh A.W., Banta E.R., Hill M.C., and McDonald M.G. 2000. MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model-User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process. Open-file Report. U. S. Geological Survey (92): 134.
- 12- Jabari P., Ghanbarpour M., and Ashbeh A. 2009. Evaluation and determination of groundwater balance in Sari-Neka unconfined Plain. 5th National Conference on Watershed Management Sciences and Engineering of Iran, Karaj. (In Persian)
- 13- Kardan Moghadam H., and Banihabib M.E. 2017. Investigation of Interference of Salt water in Desert Aquifers (Case study: South Khorasan, Sarayan Aquifer). *Journal of Water and Soil* 31(3): 673-688. (In Persian with English abstract)
- 14- Kentel E., Gill H., Aral M.M. 2005. Evaluation of groundwater resources potential of Savannah Georgia region, Multimedia Environmental Simulations Laboratory, Report No. MESL-01-05.
- 15- Ketabchi H., Mahmoodzadeh D., and Ataie-Ashtiani B. 2014. Effects of climate change on saltwater intrusion in sloping coastal aquifers. 13th Iranian Hydraulic Conference, University of Tabriz, Tabriz. (In Persian)
- 16- Kumar C.P. 2006. Management of groundwater in salt water ingress coastal aquifers. *Groundwater Modelling and Management* 540-560.
- 17- Langevin C.D., Shoemaker W.B., and Guo W. 2003. MODFLOW-2000, the US Geological Survey Modular Ground-Water Model-Documentation of the SEAWAT-2000 Version with the Variable-Density Flow Process (VDF) and the Integrated MT3DMS Transport Process (IMT) (No. 2003-426).
- 18- Ministry of Energy, Regional Water Company of Mazandaran, Report of the water resources Balance of the study area sari-neka (code 1503), Tehran Water and Soil Consulting Engineers, 2014. (In Persian)
- 19- Narayan K. A., Schleeberger C., and Bristow K. L. 2007. Modelling seawater intrusion in the Burdekin Delta irrigation area, North Queensland, Australia. *Agricultural Water Mngament* 89(3): 217-228.
- 20- Nobi N., and Das Gupta A. 1997. Simulation of regional flow and salinity intrusion in an integrated stream-aquifer system in coastal region: Southwest region of Bangladesh.
- 21- Nazari R., and Joodavi A. 1979. Applied flow and contaminant transport modeling in aquifers. (In Persian)
- 22- Reza pour A., and Saghravani F. 2016. Numerical study of saltwater intrusion in condition of Water table drawdown. The 1st National Conference on Environment, Energy and Biodefense, Tehran. (In Persian)
- 23- Rove G., and Stoessinger W. 1980. Simulation of the transient position of the saltwater intrusion in the coastal aquifer near Madras coast. *Finite Elements in Water Resources* 1.
- 24- Sherif Mohsen M., Vijay Singh P., and Abdelwahab Amer M. 1988. A two-dimensional finite element model for dispersion (2D-FED) in coastal aquifers. *Journal of Hydrology* 103.1-2: 11-36.
- 25- Stein S., Yechieli Y., Shalev E., Kasher R., and Sivan O. 2019. The effect of pumping saline groundwater for desalination on the fresh-saline water interface dynamics. *Water Research* 156: 46-57.
- 26- Vafaei F., and Abolghasemi H. 2013. Investigating the change of sea level and groundwater level on seawater intrusion in unconfined aquifers. The 1st National Conference on Environment, Energy and Biodefense, Tehran. (In Persian)
- 27- Willis R., and Brad Finney A. 1988. Planning model for optimal control of saltwater intrusion. *Journal of Water Resources Planning and Management* 114.2: 163-178.
- 28- Zheng C., and Bennett G.D. 2002. Applied contaminant transport modeling (Vol. 2, p. 353). New York: Wiley-

Interscience

- 29- Zheng C., and Wang P.P. 1999. MT3DMS: a modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reactions of contaminants in groundwater systems; documentation and user's guide. Alabama Univ University.

Simulation of Seawater Intrusion in Coastal Aquifers (Case Study: the Southern Shores of the Caspian Sea)

M. Nasiri¹ - M. Hamidi^{2*} - H. Kardan Moghaddam³

Received: 15-04-2019

Accepted: 09-02-2020

Introduction: The issue of seawater intrusion has become an environmental problem considering the increasing trend in groundwater extraction from coastal aquifers. Increased groundwater exploitation and lack of coastal aquifers management have caused seawater intrusion into coastal aquifer. The intrusion has led to the salinization of aquifers, causing many problems in the exploitation of water resources. This pumping has continually increased the risk of seawater intrusion and deterioration of freshwater quality in the Sari-Neka aquifer. Seawater intrusion limits the usage of groundwater for agriculture, industry, and public water supply.

Materials and Methods: For the present study, Sari-Neka aquifer was selected. The study area is located in the southern shores of the Caspian Sea, in the northern part of Iran. The MODFLOW version 2000 is used to simulate a steady-state and transient groundwater flow system in Sari-Neka aquifer. To simulate solute transport, MT3DMS and SEAWAT are used. In MT3DMS, advection package, dispersion, and source/sink mixing packages are used. The numerical code MT3DMS does not consider the effect of the density. Thus, SEAWAT--Variable Density Flow package was initialized. The necessary data for modeling of groundwater flow can be categorized into water resources data, meteorological data, hydrodynamic characterization, topography map, and geological information. To build the flow model, flow type (steady-state and transient state), initial conditions (groundwater level in September 2010 for the steady-state) and type of boundary conditions (general head boundary), flow package (LPF package), temporal discretization (48 monthly stress periods from September 2010 to August 2014 in transient condition) and monthly time steps were assigned to the model. To prepare the flow and transport model grid, the study area was discretized horizontally into 3694 active square cells (500×500 m). The MT3DMS model was used to simulate the qualitative changes on the aquifer surface and the SEAWAT model to simulate the depth of the aquifer. Therefore, the conceptual model of solute transport was prepared by making the necessary changes in the conceptual flow model. September 2010 groundwater level data and TDS and Cl data are taken as the initial conditions in the flow and transport model, respectively. The Caspian Sea bordering the study area in the north is represented by a constant TDS concentration of 35000 mg/l and constant CL282.2 meq/l. In this model, we entered the water heads of the observation wells, hydraulic conductivity, storage coefficient, effective porosity, aquifer discharge, and aquifer recharge, porosity, Coefficient of molecular water diffusion, Longitudinal dispersivity, Horizontal transverse dispersivity, vertical transverse dispersivity.

Results and Discussion: The calibration of the flow model was carried out for both steady and transient conditions using the trial and error approach. Monthly groundwater levels of data from 14 observation wells were used for calibration purposes. Steady-state calibration for the flow model was performed by comparing the observed groundwater levels and calculated values of groundwater levels in September 2010. During calibration, hydraulic conductivity values were adjusted, until groundwater level values calculated by MODFLOW were matched the observed values within an acceptable level of accuracy ($\pm 1\text{m}$). After steady-state calibration, the transient model was simulated for the four year period between September 2010 and August 2014 that was divided into 48 stress periods with monthly time steps. At the end of flow model calibration, the resulting hydraulic conductivity ranged from 5.3 to 21.6 m/day, while the resulting specific yield values were from %3.4 to % 5.9. The validation flow model was simulated for the period between September 2010 and August 2014 (12 stress periods). The values of the correlation coefficient in the steady-state model, transient model and validation model in the flow model were obtained 0.99, 0.98, and 0.97, respectively. The results illustrate a good agreement between the observed and calculated groundwater levels. The transport model was calibrated using TDS and CL concentration data from September 2010 to August 2014 (8 stress periods) by adjusting parameters affecting the dispersion process. To confirm the accuracy of the model, TDS and CL concentration data from August 2014 to

1 and 2- M.Sc. Graduated and Assistant Professor of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
(*- Corresponding Author Email: hamidi@nit.ac.ir)

3- Department of Water Resources Research, Water Research Institute, Ministry of Energy, Tehran, Iran

DOI: 10.22067/jsw.v34i2.79639

September 2015 were used for validation purposes. By considering the TDS and Cl concentration in September 2010 as the initial condition, the transient model was run. Transport model calibration was achieved through a trial-and-error. The values of the correlation coefficient in the transport model for TDS are obtained 0.83 and 0.87 in the transient model and validation model, respectively. The values of the correlation coefficient in the transport model for CL were obtained 0.82 and 0.86 in the transient model and validation model, respectively.

Conclusion: After the validation of transport model and assuming all the hydrogeologic conditions remain, a predictive 6-year simulation run using SEAWAT model indicates that further seawater intrusion into the coastal aquifers can occur in the study area.

Keywords: Coastal aquifer, Salt concentration, Sari-Neka aquifer, Seawater intrusion