

## ارزیابی اثر تأمین نیاز آبی شرب و کشاورزی آبخوان ساری-نکا بر حرکت جبهه شوری با بهره‌برداری از سد گلورد

مینا نصیری<sup>۱</sup>، مهدی حمیدی<sup>۲\*</sup> و حمید کاردان مقدم<sup>۳</sup>

۱) کارشناس ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

۲\*) استادیار آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

\* نویسنده مسئول مکاتبات: [hamidi@nit.ac.ir](mailto:hamidi@nit.ac.ir)

۳) استادیار پژوهشی مؤسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۱۹

### چکیده

با رشد سریع اقتصاد در مناطق ساحلی، تقاضا برای منابع آب و بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی افزایش یافته است و این امر موجب اختلال در تعادل بین آب‌شور و شیرین در آبخوان‌های ساحلی و در نتیجه منجر به نفوذ آب شور به آب‌های زیرزمینی خواهد شد. در پژوهش حاضر مدل عددی جریان و نفوذ شوری در آبخوان ساحلی ساری-نکا با استفاده از نرم‌افزار GMS شبیه‌سازی شده است. واسنجی مدل برای تراز آب زیرزمینی و غلظت شوری از مهر ۱۳۸۹ تا شهریور ۱۳۹۳ صورت پذیرفته است. مدل واسنجی‌شده با استفاده از اطلاعات در دسترس از مهر ۱۳۹۳ تا شهریور ۱۳۹۴ برای تراز آب زیرزمینی و غلظت شوری صحت‌سنجی گردیده است. ضریب همبستگی در مرحله واسنجی ماندگار، غیرماندگار و صحت‌سنجی در مدل کمی به ترتیب برابر ۰/۹۹، ۰/۹۸ و ۰/۹۷ به دست آمد. همچنین این ضریب در مدل انتقال در مرحله واسنجی غیرماندگار و صحت‌سنجی به ترتیب به میزان ۰/۸۳ و ۰/۸۷ برآورد شد. پس از صحت‌سنجی مدل و با فرض ثابت ماندن شرایط هیدروژئولوژیکی آبخوان، نتایج پیش‌بینی مدل طی شش سال آینده بیان‌گر هجوم بیش‌تر آب شور در آبخوان ساحلی مورد مطالعه است. در ادامه با توجه به احداث سد گلورد بر روی رودخانه نکارود، تأثیر سد بر آبخوان ساری-نکا در شرایط اقلیمی نرمال، خشکسالی و ترسالی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که در شرایط خشکسالی حرکت خط هم‌غلظت ۵۰ درصد شوری برای پارامتر TDS نسبت به انتهای دوره پیش‌بینی ۵/۹۸ درصد افزایش خواهد داشت. همچنین در شرایط ترسالی حرکت خط هم‌غلظت ۵۰ درصد شوری به میزان ۲/۹۴ درصد کاهش خواهد یافت.

**کلید واژه‌ها:** آبخوان ساری-نکا؛ آب زیرزمینی؛ پیشروی آب‌شور؛ سد گلورد

### مقدمه

کشاورزی افزایش یافته است. رشد تدریجی جمعیت، تغییر کاربری زمین و توسعه شهرنشینی تا حدودی موجب افزایش فشار بر این منابع آب شده است که در نتیجه بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی به‌عنوان جایگزینی برای آب

در قرن اخیر، استفاده از منابع آب سطحی به علت هزینه پایین و قابلیت دسترسی آسان به‌عنوان یک منبع مطلوب جهت تأمین آب در بخش‌های مختلف شرب، صنعت و

داد که نرخ از بین رفتن گوه شوری در دیوار حائل با ارتفاع کمتر، سریع‌تر خواهد بود. Abd-Elhamid و Javadi (۲۰۱۱) به توسعه یک مدل عددی اجزا محدود جهت شبیه‌سازی جریان سیال و انتقال نمک در خاک‌های اشباع و نیمه اشباع با هدف مطالعه نفوذ آب شور در آبخوان ساحلی پرداختند. فرایندهای مختلفی که موجب انتقال نمک در محیط متخلخل می‌شود از قبیل فرارفت، انتشار، پراکندگی، جذب، واکنش‌های شیمیایی و تجزیه بیولوژیکی، در مدل لحاظ شده است. مدل پس از اعتبارسنجی جهت پیش‌بینی نفوذ آب شور در یک آبخوان ساحلی به‌کار گرفته شد.

رضاپور و همکاران (۱۳۹۷) دینامیک گذرای گوه آب شور و ناحیه اختلاط را در آبخوانی آزاد با سیستم هد کنترل شده در مرزها بصورت آزمایشگاهی و عددی تحت بررسی قرار دادند. داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از فن پردازش تصویر برداشت شدند و شبیه‌سازی‌های عددی توسط کد SUTRA انجام گرفت. نتایج نشان دادند که الف) در هنگام پیشروی گوه، شاخص ارتفاع گوه به مراتب زودتر از شاخص طول پنجه گوه به شرایط دائمی می‌رسد، این در حالی است که در هنگام بازگشت گوه، هر دو شاخص بطور هم‌زمان به وضعیت پایدار می‌رسند. ب) برخلاف طول پنجه گوه که در وضعیت برگشت زودتر از وضعیت پیشروی به شرایط دائمی می‌رسد، شاخص ارتفاع گوه در هر دو وضعیت پیشروی و بازگشت تقریباً مدت زمان یکسانی را برای رسیدن به شرایط دائمی طی می‌کند. در پژوهش مهدی‌زاده محلی و وفایی (۱۳۹۷)، برای آبخوان‌های لایه‌بندی ساحلی، با استفاده از زبان برنامه‌نویسی فرتن، مدل عددی بر پایه رویکرد مرز مشترک (با نام SHI-SWIM) توسعه داده شد. نتایج مدل پس از صحت‌سنجی و اعتباربخشی با مشاهدات آزمایشگاهی و کد عددی SEAWAT (با رویکرد جریان اختلاطی) مقایسه شده است. شبیه‌سازی مدل آبخوان تحت پمپاژ نشان می‌دهد که مدل SHI-SWIM در حالات کاهش فاصله بین

سطحی جهت مقابله با کمبود آب در نظر گرفته شده است (Hussain et al., 2015).

مناطق ساحلی به دلیل شرایط مساعد، جهت بهره‌برداری از منابع آب سطحی و زیرزمینی از پرجمعیت‌ترین مناطق در جهان به شمار می‌آیند. با این حال، این مناطق با مشکلات بسیاری از قبیل کمبود آب شیرین به علت پیشروی آب شور مواجه هستند که بهره‌برداری از آب‌های شیرین در آبخوان ساحلی را مختل می‌کند. به هم خوردن تعادل طبیعی بین آب شور و آب شیرین در آبخوان‌های ساحلی توسط برداشت از آب زیرزمینی و سایر فعالیت‌های انسانی که موجب افت سطح آب زیرزمینی می‌شود، جریان آب زیرزمینی شیرین را در آب‌های ساحلی کاهش می‌دهد (Kumar, 2006).

پیشروی آب دریا استفاده از آب‌های زیرزمینی را جهت مصارف شرب، صنعت و کشاورزی محدود می‌کند. از این رو، ضرورت پیش‌بینی مکان و حرکت آلودگی در برابر خطرات احتمالی وجود دارد. از جمله مطالعاتی که به ارزیابی پدیده نفوذ آب شور در آبخوان‌های ساحلی پرداختند می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

Hamidi و Sabbagh Yazdi (۲۰۰۶) به ارزیابی نفوذ آب شور به آبخوان ساحلی با روش حجم محدود با شبکه بی‌ساختار مثلثی پرداختند. فرمول‌بندی مدل شامل معادلات جریان و انتقال نمک بود. پس از رضایت‌بخش بودن نتایج مدل با نتایج سایر محققان، مدل جهت شبیه‌سازی اثرات احداث سد زیرزمینی بر کنترل پیشروی شوری به کار گرفته شد. همچنین Hamidi و Sabbagh Yazdi (۲۰۰۸) در پژوهشی دیگر، به منظور تأیید نتایج کد عددی، به مقایسه نتایج به دست آمده از مدل خود با چندین مسئله نمونه از جمله الف) مسئله هنری ب) آبخوان آزاد با تغذیه از سطح ج) آبخوان تحت فشار دارای سه چاه پرداختند.

Luyun Jr و همکاران (۲۰۰۹) به بررسی آزمایشگاهی و عددی نحوه کنترل نفوذ شوری با نصب یک دیوار حائل در داخل آبخوان پرداختند. نتایج آزمایشگاهی و عددی نشان

آینده نشان داد که تحت سناریوی افزایش پمپاژ، آب شور در حدود ۴۲۰ متر به سمت آبخوان حرکت خواهد کرد، در حالی که در سناریوی تغییر اقلیم تغییرات سطح آب و غلظت TDS اندک خواهد بود. Siarkos و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهش خود به تدوین روشی که قادر به ارزیابی کارایی اقتصادی و زیست‌محیطی سناریوی ساخت موانع تزریق جهت کنترل نفوذ آب دریا در آبخوان ساحلی واقع در شمال یونان بود، پرداختند. به منظور آزمایش روش پیشنهادی، ابتدا مدل‌سازی عددی جهت ارزیابی تغییرات مکانی و زمانی نفوذ شوری قبل و بعد اجرای دو سناریوی تغذیه مصنوعی با حجم مختلف آب جهت تزریق صورت گرفت و پس از آن به بررسی اثرات زیست‌محیطی و روابط بین نفوذ شوری آب دریا و درآمد کشاورزان پرداخته شد. با توجه به نتایج به دست آمده، هر دو سناریو تأثیر مثبتی بر کیفیت آب‌های زیرزمینی و همچنین سود اقتصادی خالص برای جامعه دارند. در مطالعه Chun و همکاران (۲۰۱۸)، جهت ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر افزایش سطح آب دریا و میزان تغذیه آب شیرین و همچنین بر نحوه پیشروی آب شور در کشور کره از مدل SUTRA استفاده شد. با در نظر گرفتن ۱۵ سناریو و بررسی تغییرات شوری در چاه‌های کنترل، بیشترین افزایش شوری (۴۰/۳ درصد) در سناریوی افزایش تراز آب دریا به میزان ۰/۰۵۷ متر و تغذیه آب شیرین به میزان ۰/۰۵۸ کیلوگرم بر ثانیه مشاهده شده است.

بهره‌برداری از منابع آب با توجه به پیچیدگی وضعیت تأمین آب به‌عنوان یکی از دغدغه‌های مدیریتی برای متولیان آب محسوب می‌شود. کاهش آبدهی ناشی از اضافه برداشت از منابع آب زیرزمینی و عدم اطمینان از سری زمانی تأمین آب سبب شده تا استفاده از راهکارهای سازه‌ای جهت تأمین منابع آب اتخاذ گردد. این هدف سبب شده تا بهره‌برداری و استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی یکی از اولویت‌ها جهت برنامه‌ریزی کلان گردد. با توجه به تأثیر احداث سد بر منابع آب، به‌ویژه بر کمیت

چاه و دریا، نفوذ کامل چاه در آبخوان و دبی پمپاژ بالاتر پیش‌بینی دقیق‌تری از شکل گوه داشته است اما پیش‌بینی میزان شوری برداشت از چاه، چندان متناسب با نتایج به دست آمده در آزمایشگاه و مدل SEAWAT نبوده است. علاوه بر مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی، با توجه به قابلیت‌های مدیریتی و شبیه‌سازی مدل‌های عددی، استفاده از آن‌ها افزایش روزافزونی داشته است. مدل‌سازی عددی یک ابزار قدرتمند به‌منظور کمک به هیدرولوژیست‌ها برای درک وقوع نفوذ آب‌شور و همچنین پیش‌بینی آلودگی آب‌شور در آبخوان‌های ساحلی است. از انواع مدل‌های عددی که توانایی پیش‌بینی جریان آب‌های زیرزمینی و انتقال املاح را دارند می‌توان به مدل SUTRA، FEFLOW، MODFLOW، SEAWAT، MT3DMS اشاره نمود (Sappa and Coviello, 2012; Ekhmaj et al., 2014).

Hussain و همکاران (۲۰۱۵) در مطالعه خود به ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان وادی هانت واقع در امارات با استفاده از مدل FEFLOW پرداختند. شبیه‌سازی آبخوان برای ۱۰ سال آینده و با حفظ نرخ فعلی پمپاژ (در سال ۲۰۱۵)، بیانگر پیشرفت نفوذ آب شور در سال ۲۰۲۵ به همراه کاهش ذخیره آب شیرین بود. به‌منظور کنترل اثرات منفی نفوذ آب شور، سیستم مورد استفاده تحت سناریوی تغذیه مصنوعی با استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده در دو طرح مختلف قرار گرفت و نتایج آن با شرایطی که سناریوی اعمال نشده بود مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که کاربرد تغذیه مصنوعی سبب کاهش قابل توجه شوری آبخوان شده است و در نتیجه سطح بالاتری از کارایی و پایداری طولانی مدت سیستم با طراحی چندین حوضچه تغذیه مصنوعی در نقاط مختلف آبخوان حاصل خواهد شد.

در مطالعه Mansour و همکاران (۲۰۱۷)، پنج سناریو به منظور درک اثرات پمپاژ و تغییر اقلیم بر سطح آب‌های زیرزمینی و گسترش آب شور در ۱۰ سال آینده در آبخوان ساحلی karareis در بخش غربی ترکیه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی با مدل SEAWAT طی ۱۰ سال

قرار گرفته است و به واسطه همین محدودیت‌ها سه شهرستان بهشهر، نکا و گلوگاه همواره مشکلات آب شرب و کشاورزی داشته‌اند. لذا نخستین هدف اجرای سد گلودر تأمین آب شرب این مناطق و هدف بعدی تأمین آب زراعی برای بخشی از دشت نکا در کنار مهار سیلاب‌های رودخانه نکا و تولید برق است. طی دوره آماری ۴۵ ساله، میانگین حجم سالانه آب ورودی به مخزن سد ۱۰۸ میلیون مترمکعب، میانگین کل نیاز آبی سالانه ۱۰۶/۸ و میانگین حجم کل آب تأمین‌شده ۱۰۴/۷۷ میلیون مترمکعب در سال تعیین گردیده است. میانگین نیاز آبی سالانه شرب، کشاورزی و زیست‌محیطی از مخزن سد گلودر به ترتیب ۲۸/۳، ۷۵/۴ و ۳/۱ میلیون مترمکعب برآورد گردید. نیاز آبی در نظر گرفته شده برای اراضی محدوده شبکه پایاب سد برای سال‌های میانگین و ترسالی ۹۵/۸ میلیون مترمکعب در سال خواهد بود. موقعیت منطقه مورد مطالعه و سد گلودر در شکل ۱ نمایش داده شده است.

#### مدل شبیه‌سازی جریان و انتقال آلودگی

شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی توسط کد MODFLOW در محیط نرم‌افزار GMS صورت می‌گیرد. این نرم‌افزار به‌طور گسترده جهت بررسی تغییرات جریان زیرزمینی، تغییرات تراز ناشی از تغذیه طبیعی، برداشت مصنوعی و در شرایط هیدرولوژیکی متفاوت به‌کار رفته است (Al-Salamah et al., 2011; Jang et al., 2012; Mittelstet et al., 2011). همچنین در این پژوهش شبیه‌سازی انتقال آلودگی توسط کد MT3DMS در محیط نرم‌افزار GMS صورت می‌پذیرد.

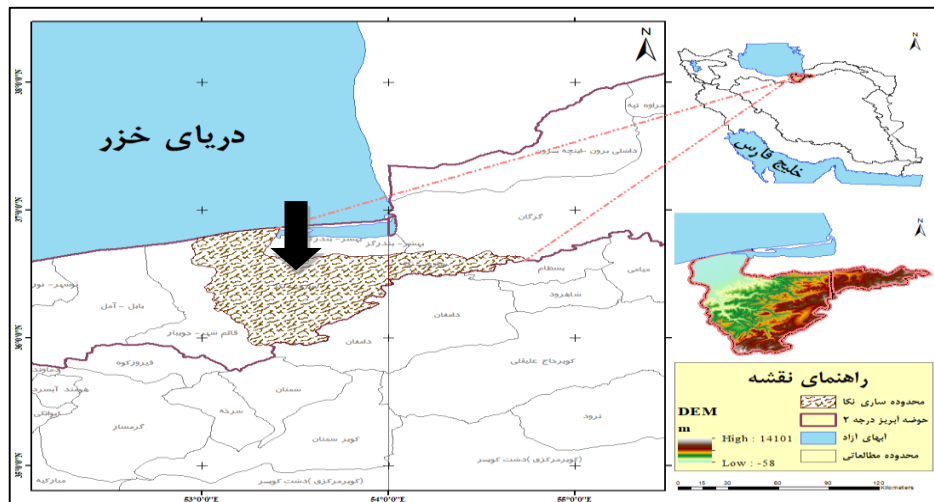
و کیفیت آب زیرزمینی که در مطالعات پیشین کمتر این امر مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار گرفته است، در این پژوهش سعی شده است تا با مدل‌سازی شرایط آبخوان، وضعیت آبی کیفی آبخوان ساری- نکا تحت سناریوهای مختلف اقلیمی جهت تأمین آب شرب و کشاورزی از سد گلودر مورد بررسی قرار گیرد.

#### مواد و روش‌ها

##### منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی ساری-نکا بین طول‌های جغرافیایی  $34^{\circ}52'$  تا  $44^{\circ}54'$  شرقی و  $56^{\circ}35'$  تا  $52^{\circ}36'$  شمالی در شمال کشور ایران قرار دارد. مساحت این محدوده  $6938/5$  کیلومترمربع است که  $970$  کیلومترمربع آن را دشت و بقیه ( $5877/8$  کیلومترمربع) اراضی ارتفاعات است. سه رودخانه اصلی تجن، نکارود و سیاهرود آبخوان ساحلی را تغذیه می‌کند. 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 است و به سمت شمال در اراضی میانی دشت و پایاب دشتی فواصل منحنی‌ها افزایش یافته و شیب هیدرولیکی آب زیرزمینی کاهش می‌یابد (شرکت مهندسین مشاور آب و خاک، ۱۳۹۳).

سد مخزنی گلودر در استان مازندران،  $45$  کیلومتری جنوب شرقی شهر نکا، بر روی رودخانه نکارود واقع شده است. این سد در منطقه‌ای با مشکلات جدی آب قرار دارد؛ منطقه شرق مازندران منطقه‌ای کم آب و تنها دشت ممنوعه‌ی آب زیرزمینی شمال کشور در این منطقه



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه و موقعیت مکانی سد گلورد

می‌پردازد به شرح زیر بیان می‌شود ( Freeze and Cherry, 1979):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) - w = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

که در آن  $K_x$ ،  $K_y$  و  $K_z$  مقادیر هدایت هیدرولیکی در طول محورهای مختصات  $x$ ،  $y$ ، و  $z$  (m/s)،  $h$  بار پیزومتری (m)،  $w$  شار حجمی در واحد حجم آبخوان با توجه به تغذیه و تخلیه آب در واحد زمان (1/s)،  $S_s$  آبدهی ویژه مواد متخلخل،  $t$  زمان (s) هستند.

معادله دیفرانسیل جزئی جهت انتقال سه‌بعدی آلودگی در آب زیرزمینی به صورت زیر است ( Freeze and Cherry, 1979):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (v_i C) + \frac{q_s}{\theta} C_s + \sum_{k=1}^N R_k \quad (2)$$

که در آن  $C$  غلظت آلودگی محلول در آب زیرزمینی ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )،  $t$  زمان (s)،  $D_{ij}$  ضریب پراکندگی هیدرودینامیکی ( $\text{m}^2/\text{s}$ )،  $v_i$  تراوش یا سرعت خطی،  $q_s$  نرخ حجمی جریان بر واحد حجم با توجه به تغذیه (با علامت مثبت) و تخلیه (با علامت منفی) در واحد زمان (1/s)،  $C_s$  غلظت منبع تغذیه یا تخلیه ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )،  $\theta$  تخلخل مؤثر (بدون بعد)،  $R_k$  ترم واکنش شیمیایی ( $\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$ ) هستند.

MT3DMS یک برنامه سه‌بعدی مدولار برای شبیه‌سازی پخش، انتقال، انتشار مولکولی، واکنش‌های شیمیایی و جذب آلودگی‌های محلول در آب زیرزمینی است. این نرم‌افزار یک روش اولر-لاگرانژ را برای حل معادلات سه‌بعدی حاکم بر انتقال آلودگی به کار می‌برد. این برنامه بر این اساس است که تغییرات در غلظت اثری بر روی جریان نخواهد داشت. این خاصیت این امکان را به کاربر می‌دهد تا یک مدل جریان و انتقال آلودگی را به‌طور جداگانه ایجاد و واسنجی نماید ( Zheng and Wang, 1999).

به‌منظور شبیه‌سازی جریان با چگالی متغیر در محیط متخلخل از مدل SEAWAT استفاده می‌شود. مدل ذکر شده با تلفیق مدل‌های MODFLOW و MT3DMS به حل هم‌زمان معادلات جریان و انتقال املاح می‌پردازد. در این مدل از تغییرات دما بر روی چگالی سیال صرف‌نظر می‌شود و چگالی سیال تنها تابع غلظت املاح است.

#### معادلات حاکم بر جریان و انتقال آلودگی

فرم کلی معادلات حاکم که به توصیف حرکت سه‌بعدی جریان آب زیرزمینی با چگالی ثابت در محیط متخلخل

توسعه مدل

## شبکه‌بندی و شکل هندسی آبخوان

گام اول در مدل‌سازی جریان و انتقال آلودگی به روش تفاضل محدود شبکه‌بندی مربعی یا مستطیلی دامنه مورد بررسی است. لذا با توجه به وضعیت توپوگرافی و وسعت منطقه، آبخوان دشت ساری-نکا به شبکه‌ای شامل ۳۶۹۴ سلول فعال با ابعاد  $500^*500$  متر تقسیم‌بندی گردید. لایه‌های تراز ارتفاعی سطح زمین از داده‌های DEM در محیط نرم‌افزار ArcGis10.5 استخراج و سپس با استفاده از درون‌یابی، کلیه نقاط به‌طور مستقیم به شبکه مدل MODFLOW تخصیص داده شد. همچنین لایه ارتفاعی سنگ‌بستر آبخوان به کمک تفاضل داده‌های تراز سطح زمین و نقشه تغییرات ضخامت آبخوان ساخته و از طریق درون‌یابی وارد مدل گردید.

## تعیین شرایط مرزی

شرایط مرزی آبخوان با توجه به خطوط هم‌تراز جریان به‌صورت مرز با شدت جریان وابسته به بار هیدرولیکی 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 است مرز خروجی جریان در نظر گرفته شد. مقدار جریان ورودی به آبخوان برابر  $25/88$  میلیون مترمکعب در سال و مقدار جریان خروجی از آبخوان برابر  $2/61$  میلیون مترمکعب در سال محاسبه شده است (شرکت مهندسی مشاور آب و خاک، ۱۳۹۳).

## شرایط اولیه و انتخاب گام‌های زمانی

با استفاده از اطلاعات تراز آب زیرزمینی قرائت‌شده ۱۴ چاه مشاهده‌ای منتخب، خطوط هم‌پتانسیل آب زیرزمینی از طریق درون‌یابی تراز آب زیرزمینی در مهر ۱۳۸۹ (به دلیل

کم بودن نوسانات تراز آب در این ماه) در محیط ArcGis10.5 ترسیم شد و به‌عنوان شرایط اولیه مدل جریان ماندگار به سلول‌های مدل تخصیص داده شد. همچنین نتایج مدل واسنجی شده در شرایط ماندگار به‌عنوان شرایط اولیه در مدل غیر ماندگار در نظر گرفته شد.

در این پژوهش با توجه به داده‌های هیدروژئولوژیکی در دسترس، محدوده مورد مطالعه در شبیه‌سازی حالت غیر ماندگار به ۴۸ دوره تنش با گام زمانی ماهانه (۹۳-۱۳۸۹) تقسیم‌بندی گردید. صحت‌سنجی مدل نیز در یک دوره یک‌ساله شامل ۱۲ دوره تنش ماهانه (۹۴-۱۳۹۳) انجام گرفت.

## ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان

هدایت هیدرولیکی در محدوده آبخوان با توجه به نقشه هم‌قابلیت آبخوان و نقشه هم‌ضخامت لایه آبدار به مدل اعمال گردید. در این پژوهش متوسط ضریب هدایت هیدرولیکی ۱۰ متر در روز و حداکثر و حداقل آبدهی ویژه ۸ و ۱ درصد در نظر گرفته شد. 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 آبدهی ویژه تقسیم‌بندی گردید.

## تبادل آب رودخانه و آبخوان آبرفتی

رودخانه‌ها بخصوص در ناحیه ورودی به دشت تغذیه‌کننده آبخوان بوده و برخی از آن‌ها به‌ویژه در نواحی خروجی از دشت که سطح آب زیرزمینی نزدیک به سطح زمین است، زهکش آبخوان هستند. میزان نفوذ از جریان‌های سطحی ورودی به دشت ساری-نکا برابر با  $32/84$  میلیون مترمکعب در سال و میزان زهکشی آبخوان آبرفتی ساری-نکا توسط رودخانه‌های تجن و نکارود برابر  $13/91$  میلیون مترمکعب در سال می‌باشد (شرکت مهندسی مشاور آب و خاک، ۱۳۹۳).

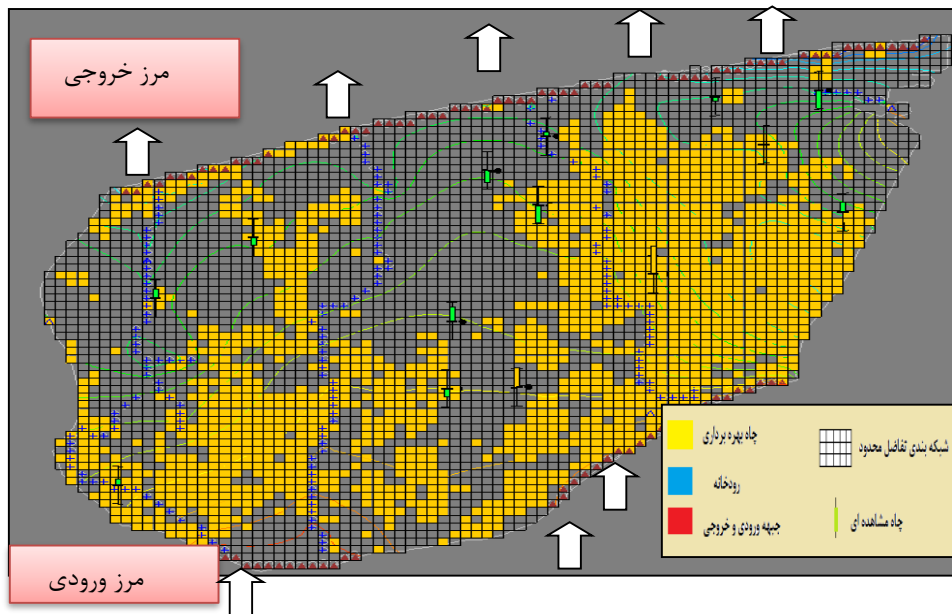
مقادیر تغذیه و تخلیه آبخوان

تخلیه و برداشت از آب زیرزمینی مهم‌ترین عامل خروجی آب بوده که شامل برداشت (پمپاژ) توسط چاه، چشمه و قنات است. در محدوده مطالعاتی ساری-نکا جمع تخلیه از آبخوان آبرفتی به وسیله چاه، قنات و چشمه آبرفتی برابر ۱۸۵/۸۳ میلیون مترمکعب در سال (طبق آمار) است که حدود ۸۷/۶ درصد مجموع عوامل خروجی بیلان آب زیرزمینی را شامل می‌شود.

تغذیه آبخوان از طریق آب برگشتی کشاورزی با توجه به بافت خاک و روش آبیاری ۲۰ درصد آب مصرفی کشاورزی در نظر گرفته شد و از نرخ پمپاژ چاه‌ها کسر شده است. همچنین از آنجا که دفع پساب در این محدوده عمدتاً از طریق چاه‌های جذبی صورت می‌گیرد میزان تغذیه آبخوان از مصارف شرب و صنعت برابر با ۶۰ درصد آب

مصرفی شرب و صنعت در نظر گرفته شد. نفوذ از بارش در سطح دشت ساری-نکا با توجه به نشریه شماره ۱۹ سازمان خواروبار جهانی FAO برابر ۶۵/۸۲ میلی‌متر محاسبه شده است که ۹/۹۱ درصد از میزان بارندگی سطح دشت را شامل می‌شود.

در دشت ساری-نکا به دلیل غرقابی بودن آبیاری و اشباع بودن خاک در فصول کشاورزی تبخیر از آب زیرزمینی صورت نمی‌گیرد؛ بنابراین از تبخیر و تعرق در این فصول صرف‌نظر می‌گردد. در سایر فصول به دلیل شرایط آب و هوایی منطقه، تخلیه ناشی از تبخیر نسبت به سایر عوامل تخلیه آبخوان کم بوده و در حدود ۹/۷۸ میلیون مترمکعب در سال است. در نهایت مدل مفهومی آبخوان جهت شبیه‌سازی وضعیت کمی آبخوان به صورت شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲. مدل مفهومی آبخوان ساری-نکا

مدل انتقال آلودگی

پس از اطمینان از دقت و صحت مدل جریان شبیه‌سازی شده، مدل انتقال آلودگی با به‌کارگیری نرم‌افزار MT3DMS ایجاد می‌شود. بسیاری از اطلاعات ورودی برای شبیه‌سازی

مدل انتقال آلودگی از قبیل توزیع بار هیدرولیکی، جهت جریان، حجم جریان انتقال یافته بین سلول‌ها از مدل جریان برداشت خواهد شد. همچنین شرایط هندسی و شبکه‌بندی سلول‌ها همانند مدل جریان است. سایر اطلاعات لازم جهت ساخت مدل انتقال جرم شامل شرایط مرزی، غلظت



به علت تغییرات کم متغیرهای کیفی در آب زیرزمینی، در هر سال تنها برای چند ماه داده‌های کیفی قرائت می‌شود لذا دوره تنش در مدل کیفی ۶ ماهه در نظر گرفته شده است. داده‌های متغیرهای کیفی در بازه‌های زمانی ۶ ماه، ماه اردیبهشت و ماه آبان به مدل اعمال شده‌اند. شبیه‌سازی کیفی آبخوان در شرایط ناپایدار در ۸ دوره تنش ۶ ماهه از مهر ۸۹ تا شهریور ۹۳ صورت پذیرفت. همچنین صحت‌سنجی مدل در دو دوره تنش ۶ ماهه از مهر ۱۳۹۳ تا شهریور ۱۳۹۴ اجرا شد.

#### مدل تداخل آب شور و شیرین

به منظور شبیه‌سازی انتقال آلودگی تحت تأثیر تغییرات چگالی و بررسی پاسخ سیستم به اعمال سناریوهای مدیریتی، مدل عددی SEAWAT در محیط نرم‌افزار GMS10.0 به کار گرفته شده است. در این مدل مرز جنوبی آبخوان که جریان آب زیرزمینی به سمت تخلیه به دریا وارد آن می‌گردد و مرز شمالی آبخوان که منطبق بر دریای خزر می‌باشد (خروجی آبخوان) به عنوان مرز با جریان وابسته به بار هیدرولیکی در نظر گرفته شده‌اند. همچنین در مرز خروجی آبخوان که منطبق بر دریای خزر است غلظت شوری ۳۵۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر اعمال شده است. میزان برداشت از چاه‌های واقع در محدوده در نظر گرفته شده طبق نتایج آماربرداری استخراج شده از شرکت آب منطقه‌ای مازندران به مدل SEAWAT اعمال گردید فرآیند مدل‌سازی با مدل ذکر شده در شکل ۳ نمایش داده شده است.

اولیه، تعیین تخلخل محیط و خصوصیات هیدرودینامیکی است که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود.

#### تعیین شرایط مرزی و شرایط اولیه غلظت

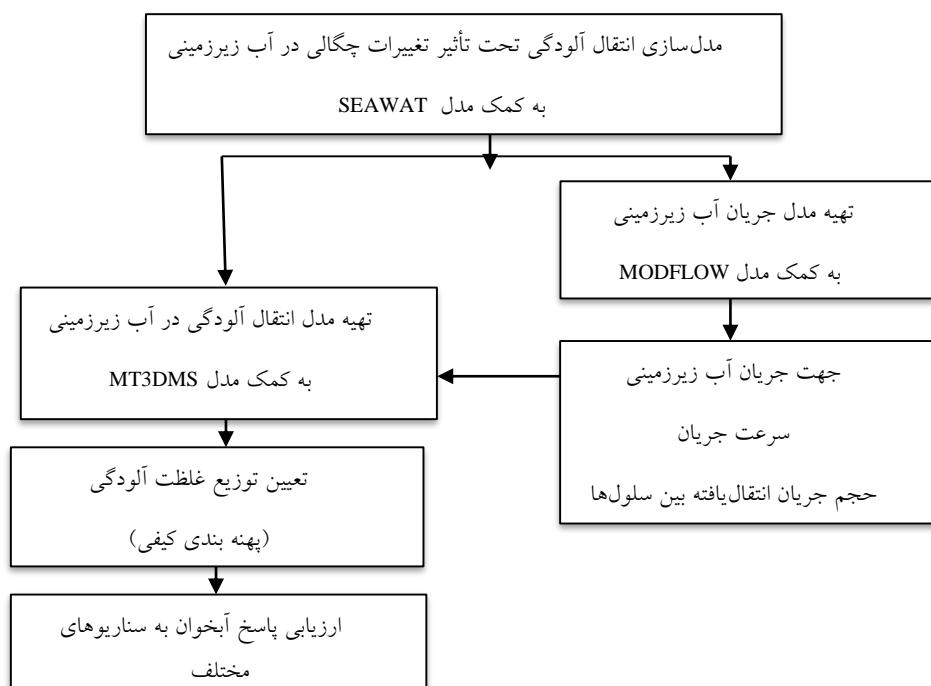
شرایط مرزی در نظر گرفته در مدل کیفی شامل مرز با توزیع غلظت اولیه که در تمام محدوده مدل اعمال شده است و مرز با غلظت معین در قسمت شمالی آبخوان و در مجاورت دریا است که مقدار آن در طول گام‌های زمانی مدل تغییر نمی‌کند. در این مطالعه فرآیند مدل‌سازی برای پارامتر کیفی TDS انجام گرفته است. مقادیر TDS در مجاورت آب دریا ۳۵۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر در نظر گرفته شده است. همچنین مقادیر غلظت اولیه با استفاده از درون‌یابی مقادیر غلظت TDS قرائت شده در چاه‌های مشاهده‌ای کیفی در آغاز شبیه‌سازی (مهر ۸۹) به مدل اعمال شده است.

#### اعمال خصوصیات هیدرودینامیکی

در پژوهش حاضر مقدار تخمینی اولیه پراکندگی طولی ( $\alpha_L$ ) بین ۳۰ تا ۵۰ متر و مقادیر تخمینی اولیه نسبت‌های پراکندگی جانبی افقی به پراکندگی طولی ( $\alpha_{TH}$ ) و پراکندگی جانبی عمودی به پراکندگی طولی ( $\alpha_{TV}$ ) به ترتیب ۰/۱ و ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است. مقدار تخلخل در آغاز شبیه‌سازی در تمامی محدوده مدل برابر ۰/۳ و ضریب انتشار ملکولی برابر  $10^{-9}$  مترمربع بر ثانیه اعمال گردید. این مقادیر طی فرآیند واسنجی تصحیح خواهند شد.

#### تقسیم‌بندی زمانی





شکل ۳. فلوچارت مدل‌سازی با مدل SEAWAT

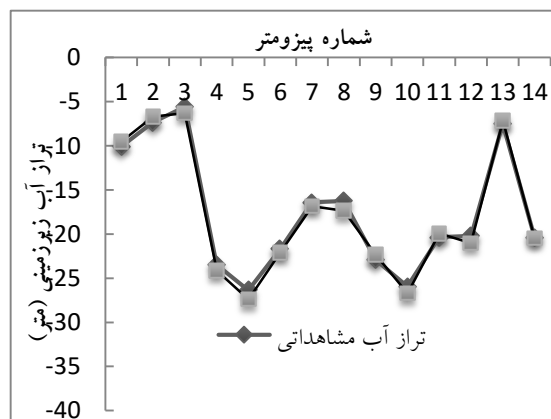
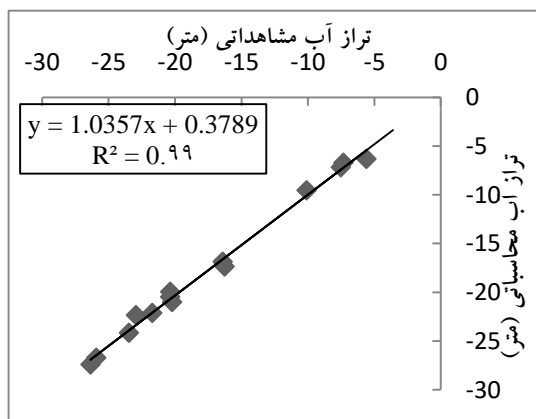
### نتایج و بحث

#### واسنجی و صحت سنجی مدل کمی

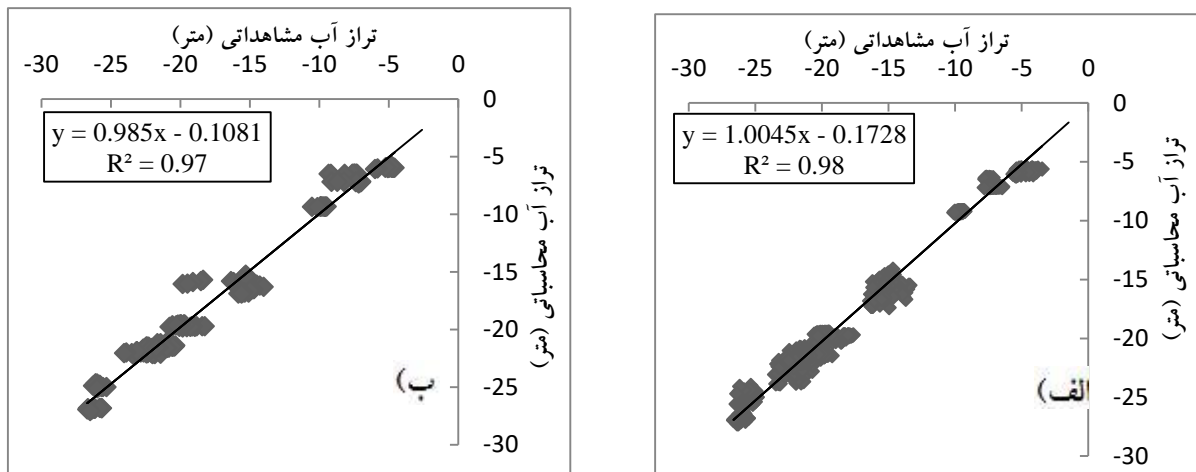
مدل ابتدا در شرایط ماندگار در مهر ماه ۱۳۸۹ شبیه‌سازی و اجرا شد. سپس واسنجی مدل ماندگار با تغییر در پارامتر هدایت هیدرولیکی در دامنه قابل قبول به روش سعی و خطا انجام شد. جهت ارزیابی مدل در واسنجی ماندگار، مقادیر تراز آب شبیه‌سازی شده در مقابل

اندازه‌گیری شده (در صحرا) در چاه‌های مشاهده‌ای محدوده در شکل ۴ ترسیم شده است.

پس از واسنجی مدل در شرایط ماندگار، مدل غیرماندگار (با شرط اولیه سطح آب شبیه‌سازی شده در در مهرماه ۱۳۸۹) ساخته و اجرا شد و با تغییر در ضریب آبدهی ویژه، واسنجی گردید. شکل ۵ (الف) پراکندگی تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و محاسباتی را پس از واسنجی مدل در شرایط غیرماندگار نشان می‌دهد.



شکل ۴. مقایسه تراز آب محاسباتی توسط مدل و تراز آب مشاهداتی صحرائی در واسنجی مدل کمی ماندگار



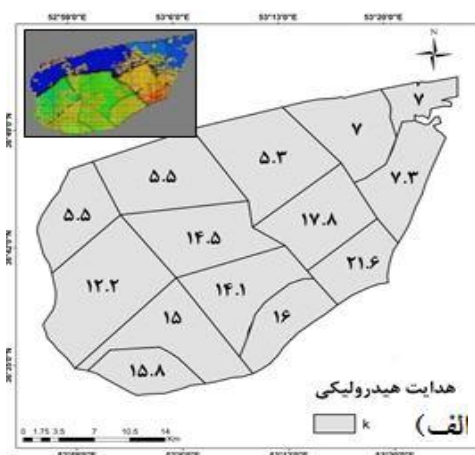
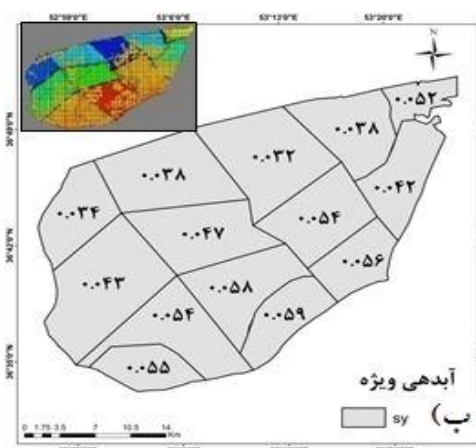
شکل ۵. نتایج الف) واسنجی مدل کمی در شرایط غیرماندگار، ب) صحت‌سنجی مدل کمی

مطابق شکل ۶ بخش‌های جنوبی آبخوان بیشترین هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه را داراست. این امر می‌تواند به دلیل درشت دانه‌تر بودن ذرات خاک و در نتیجه نفوذپذیری بیشتر آن باشد.

با توجه به میزان خطای مدل کمی در جدول ۱، میانگین مجذور خطا در کلیه ۱۴ پیزومتر مدل در شرایط ماندگار و غیرماندگار به ترتیب کمتر از ۶۲ و ۹۲ سانتی‌متر برآورد شده است. همچنین مقدار میانگین مجذور خطا در مرحله صحت‌سنجی برابر ۹۵ سانتی‌متر به دست آمده است.

میزان ضریب تبیین برابر ۰/۹۸ به دست آمد که نشان می‌دهد انطباق تراز آب شبیه‌سازی شده با تراز آب زیرزمینی صحرائی در محل چاه‌های مشاهده‌ای قابل قبول به نظر می‌رسد. در بررسی صحت مدل کمی، مقادیر تراز آب شبیه‌سازی شده برای ۱۲ دوره تنش از مهر ۱۳۹۳ تا شهریور ۱۳۹۴، با مقادیر تراز آب مشاهده‌ای مقایسه گردید. نتایج حاصل از صحت‌سنجی در شکل ۵ (ب) ارائه شده است که بیانگر برازش خوب بین مقادیر محاسباتی و مشاهده‌ای است.

پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه پس از واسنجی مدل در شکل ۶ آورده شده است. تغییرات ضرایب هدایت هیدرولیکی بین ۵/۳ و ۱۹ متر در روز و آبدهی ویژه بین ۰/۳۲ و ۰/۵۴ برآورد شده است.



شکل ۶. پهنه‌بندی نهایی پارامترهای الف) هدایت هیدرولیکی (متر بر روز)، ب) آبدهی ویژه

جدول ۱. میزان خطای مدل کمی (متر)

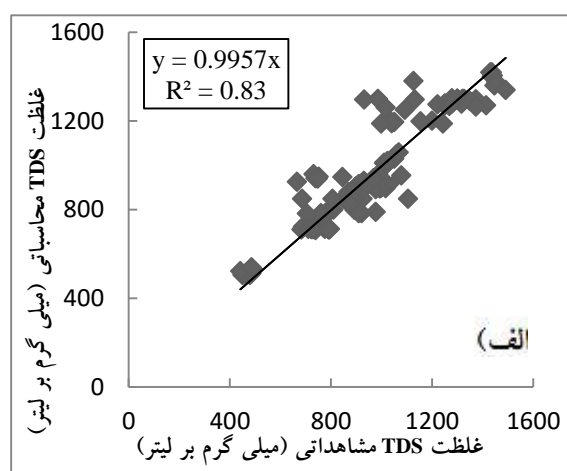
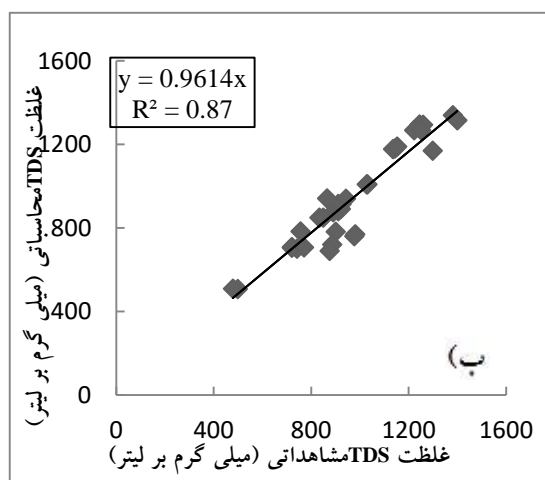
پارامتر	مدل ماندگار	مدل غیرماندگار	صحت‌سنجی
میانگین خطا	۰/۳۵۹	-۰/۲۴۴	-۰/۱۶۲
میانگین مطلق خطا	۰/۵۵۳	۰/۷۵۱	۰/۷۷۲
میانگین مجذور خطا	۰/۶۲۱	۰/۹۲۲	۰/۹۵۸

### واسنجی و صحت‌سنجی مدل کیفی

مرحله واسنجی در مدل کیفی با تغییر پارامترهایی که بر فرآیند پخش مؤثر می‌باشند، صورت پذیرفت. در طی مرحله واسنجی مقادیر غلظت TDS قرائت‌شده در چاه‌های مشاهده‌ای منتخب با مقادیر غلظت شبیه‌سازی شده توسط مدل طی دوره آماری مهر ۱۳۸۹ تا شهریور ۱۳۹۳ مقایسه گردید تا میزان خطای آماری به سطح قابل قبولی از دقت برسد. جهت کنترل روند فرآیند واسنجی مدل کیفی مقایسه بین مقادیر غلظت TDS قرائت‌شده در چاه‌های مشاهده‌ای در مقابل مقادیر غلظت TDS

شبیه‌سازی شده توسط مدل در شکل ۷ (الف) ارائه شده است.

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 شبیه‌سازی شده در محل چاه‌های مشاهده‌ای و غلظت محاسباتی اندازه‌گیری شده صحرائی در شکل ۷ (ب) نشان داده شده است. با توجه به مقادیر ضریب تبیین به دست آمده، مقادیر غلظت مشاهده‌ای و محاسباتی همبستگی قابل قبولی دارند.



شکل ۷. نتایج الف) واسنجی مدل کیفی در شرایط غیرماندگار، ب) صحت‌سنجی مدل کیفی

آن در آب زیرزمینی به سمت جنوب محدوده مطالعاتی کاسته می‌شود. سیر افزایشی مقدار املاح محلول در آب در جهت جریان حرکت آب زیرزمینی و به سمت انتهای آبخوان است.

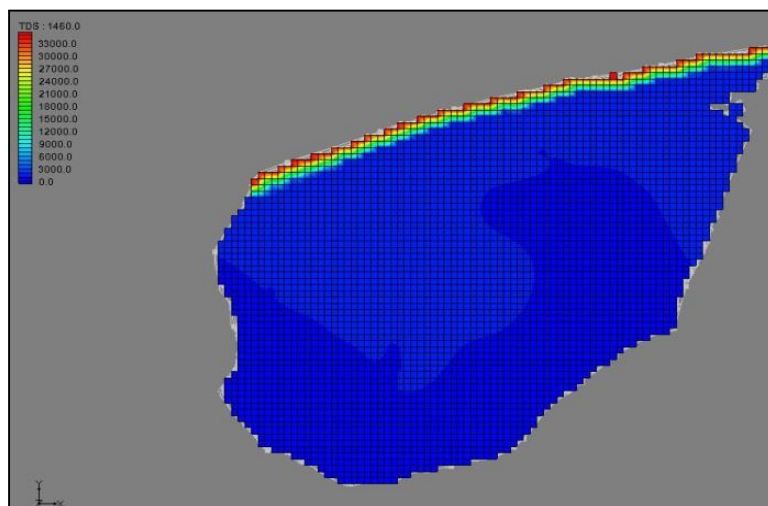
در مناطق شمالی آبخوان تشکیل شوره‌زار و امکان پیشروی آن به سمت آبخوان به دلیل فرآیندهای حاکم بر انتقال جرم (فرارفت، انتشار ملکولی و پراکندگی) در آب

### پهنه‌بندی شوری

در شکل ۸ پهنه‌بندی پارامتر TDS در محدوده مورد مطالعه در محیط نرم‌افزار MT3DMS ارائه شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که این پارامتر در نواحی نزدیک به ساحل دارای بیشترین مقدار و کیفیت نامناسب جهت بهره‌برداری به دلیل مجاورت با دریای خزر است و از میزان

بر لیتر بخش اعظمی از آبخوان را پوشش داده است و عمده چاه‌های بهره‌برداری در این مناطق واقع است.

زیرزمینی، به عنوان تهدیدی مخرب برای اراضی کشاورزی می‌باشد. مناطق جنوبی آبخوان وضعیت مطلوبی در نفوذ آب شور دارند، به نحوی که TDS کمتر از ۱۰۰۰ میلی‌گرم

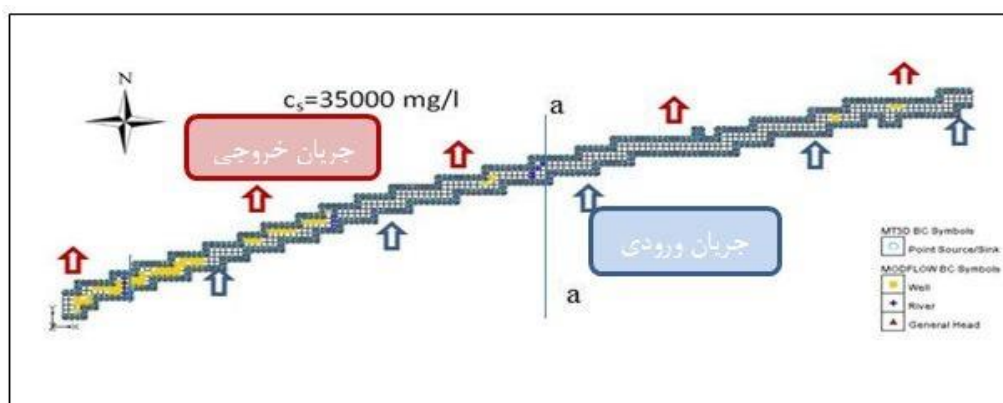


شکل ۸. پهنه‌بندی غلظت TDS آبخوان در محیط نرم‌افزار MT3DMS

نشریه (FAO) در نظر گرفته شده است. گسسته‌سازی مدل SEAWAT شامل شبکه‌های تفاضل محدود با ابعاد ۲۵۰\*۲۵۰ متر، مشتمل بر ۸۰۸ سلول فعال و در ۵ لایه است. ضخامت آبخوان به دلیل وضوح در نمایش ۲۵۰ متر در نظر گرفته شده است. همچنین در این مدل دریا در سمت راست واقع است. هندسه و شرایط مرزی مدل در شکل ۹ ارائه شده است.

تهیه مدل SEAWAT

پس از اطمینان از صحت مدل کمی و کیفی، مدل SEAWAT جهت اعمال سناریوهای مدیریتی به کار رفته است. در این مدل به جای در نظر گرفتن تمامی محدوده مطالعاتی، مناطقی با غلظت TDS بیشتر از ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر (حداکثر TDS مجاز جهت مصارف کشاورزی طبق

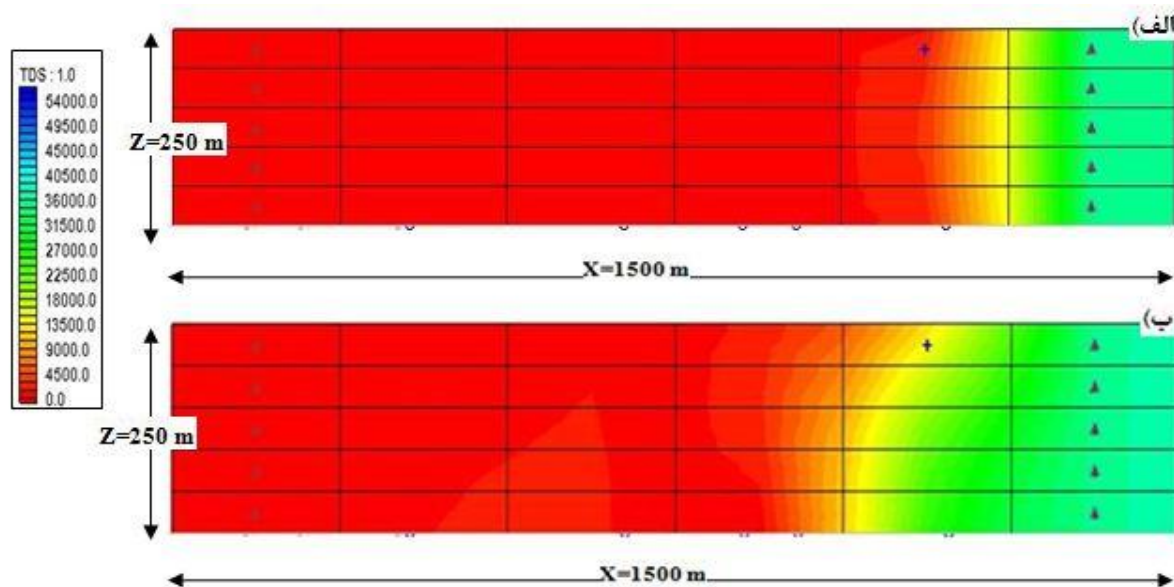


شکل ۹. هندسه و شرایط مرزی آبخوان در مدل SEAWAT

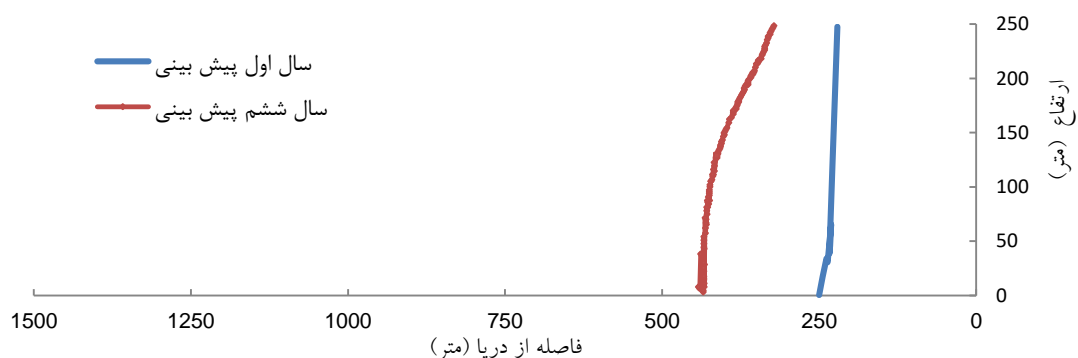
نتایج پیش‌بینی وضعیت آبخوان

آبخوان ساحلی ساری- نکا دارد و به مقدار ۴۴۲ متر در کف آبخوان خواهد رسید که بیانگر روند نزولی کیفیت آب زیرزمینی است.

براساس پیش‌بینی مدل در اشکال ۱۰ و ۱۱ و با در نظر گرفتن مقطع عرضی a-a مشخص می‌گردد که با ثابت نگه‌داشتن تمام شرایط حاکم بر آبخوان و عدم تغییر در روند کنونی برداشت آب از آبخوان برای شش سال آینده (تا شهریور ۱۴۰۰)، جبهه شوری نفوذ بیشتری به سمت



شکل ۱۰. تغییر موقعیت جبهه شوری طی دوره پیش‌بینی مدل در مقطع a-a در انتهای سال الف) اول، ب) ششم پیش‌بینی



شکل ۱۱. تغییر موقعیت خط هم‌غلظت ۵۰ درصد طی دوره پیش‌بینی مدل در مقطع a-a در انتهای سال اول و ششم پیش‌بینی

سدها با هدف نگهداری و بهره‌برداری از آب‌های سطحی، تأمین و عرضه هر چه بیشتر منابع آب، می‌تواند به‌عنوان یک گزینه جهت بهبود وضعیت آبخوان و کاهش اثرات نامطلوب اضافه برداشت از آب‌های زیرزمینی در نظر گرفته شود.

با توجه به روند رو به رشد جمعیت و افزایش تقاضا برای آب شیرین و به تبع آن تشدید برداشت از آب‌های زیرزمینی، انتظار می‌رود میزان حقیقی نفوذ آب شور نسبت به دوره پیش‌بینی مدل بیشتر شود. جهت محافظت از منابع آب شیرین در آبخوان‌های ساحلی، مدیریت برداشت از آب‌های زیرزمینی ضرورت می‌یابد. در این راستا احداث

## اعمال سناریو

بارندگی ثبت شده با توجه به آمار بارندگی ۴۵ ساله دشت ساری- نکا به عنوان تغذیه آبخوان به مدل اعمال شد. لازم به ذکر است با توجه به اهمیت تأمین آب شرب، در شرایط متفاوت اقلیمی نیاز آبی شرب تغییر نخواهد کرد و همچنین در شرایط خشکسالی از وسعت اراضی قابل کشت توسط سد گلورد و حجم آب در نظر گرفته جهت تأمین نیاز آبی کشاورزی کاسته خواهد شد. با توجه نتایج به دست آمده در شکل ۱۲ در مقطع عرضی a-a در مجاورت رودخانه نکارود مشاهده می شود که در شرایط نرمال و با احداث سد، حرکت جبهه شوری به سمت آبخوان نسبت به عدم احداث سد در دوره پیش‌بینی به میزان  $0.68\%$  (۳ متر کاهش پیشروی) کاهش خواهد یافت. با توجه به نتایج استخراج شده می توان بیان نمود که آب رها شده از سد به رودخانه نکارود به منظور انتقال آب به محدوده شبکه پایاب سد و تأمین نیاز اراضی طرح توسعه و آب‌های برگشتی کشاورزی و شرب در تغذیه بیشتر رودخانه نکارود و بهبود شرایط کیفی منطقه تأثیرگذار بوده است.

وضعیت آبی آبخوان از نظر کیفی با در نظر گرفتن سه سناریو به شرح تأثیر احداث سد گلورد در شرایط نرمال اقلیمی، خشکسالی و ترسالی بر حرکت جبهه شوری مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور ابتدا به تعیین میزان تغذیه سالانه آبخوان از طریق سد در دوره پیش‌بینی ۶ ساله مدل پرداخته شد. لذا در سناریوی اول حجم آب در نظر گرفته شده جهت تأمین نیاز آبی شرب و نیاز آبی کشاورزی دشت نکا را با احتساب میزان نفوذ ۶۰ درصد به عنوان تغذیه ناشی از آب برگشتی شرب و ۲۰ درصد تغذیه ناشی از آب برگشتی کشاورزی به بخش‌های شرقی دشت مذکور شامل نکا اعمال شد. همچنین مدل در کنار منابع آبی که قبل از بهره‌برداری از سد مورد استفاده قرار می‌گرفت اجرا شد.

در سناریوی دوم و سوم به ارزیابی اثرات سد گلورد در دو شرایط اقلیمی خشکسالی و ترسالی بر میزان پیشروی جبهه شوری در آبخوان مورد مطالعه پرداخته شد. بنابراین جهت در نظر گرفتن این دو سناریو در شرایط خشکسالی و ترسالی به ترتیب کمترین و بیشترین



شکل ۱۲. خط هم‌غلظت ۵۰ درصد شوری با اعمال سناریوهای مختلف

پیشروی) بیشتر در داخل آبخوان نفوذ می‌کند. همچنین در شرایط ترسالی نسبت به شرایط عدم احداث سد، پیشروی شوری به میزان  $2.94\%$  (۱۳ متر کاهش طول پیشروی) کاهش خواهد یافت.

همچنین با توجه به نتایج جدول ۲ مشاهده می‌شود که در شرایط خشکسالی نسبت به شرایط عدم احداث سد (در انتهای دوره پیش‌بینی مدل)، خط هم‌غلظت ۵۰ درصد شوری برای پارامتر TDS  $5/98\%$  (۲۶ متر افزایش طول

جدول ۲. درصد تغییرات پیشروی شوری به تفکیک سناریوهای مختلف

سناریو		
تأثیر سد در شرایط ترسالی	تأثیر سد در شرایط خشکسالی	تأثیر سد در شرایط نرمال
نسبت به انتهای پیش‌بینی مدل	نسبت به انتهای پیش‌بینی مدل	نسبت به انتهای پیش‌بینی مدل
٪ -۲/۹۴	٪ +۵/۹۸	٪ -۰/۶۸

این پژوهش پس از گردآوری اطلاعات لازم و تهیه مدل مفهومی کمی و کیفی، اقدام به شبیه‌سازی و واسنجی مدل طی دوره آماری ۹۳-۱۳۸۹ شد. جهت حصول اطمینان از نتایج مدل‌های کمی و کیفی، مدل‌ها برای یک دوره یک ساله از ۹۴-۱۳۹۳ تحت صحت‌سنجی قرار گرفتند. پس از اطمینان از صحت و دقت مدل کمی و کیفی تهیه شده، مدل SEAWAT جهت پیش‌بینی و بررسی اثرات سناریوهای در نظر گرفته طی ۶ سال آینده (تا شهریور ۱۴۰۰) ساخته شد. استمرار روند کنونی برداشت از منابع آب زیرزمینی، پیشروی آب شور و آسیب‌پذیری بیشتر آبخوان را در مناطق مجاور دریای خزر نتیجه می‌دهد. در ادامه تأثیر احداث سد گلورد بر آبخوان مورد مطالعه بررسی شد. نتایج مدل نشان‌دهنده تأثیر مثبت سد بر کاهش حرکت شوری نسبت به دوره پیش‌بینی مدل و در حالت بدون اعمال سد می‌باشد. همچنین چگونگی پاسخ آبخوان در شرایط خشکسالی و ترسالی با وجود احداث سد به کمک مدل SEAWAT بررسی گردید. مقایسه نتایج حاصل از اجرای این دو مدل بیانگر حساسیت آبخوان به شرایط خشکسالی است. از آنجاکه در شرایط خشکسالی نیاز به منابع آب زیرزمینی جهت تأمین مصارف خانگی و آبیاری اراضی کشاورزی افزایش خواهد یافت، در نتیجه این عامل موجب نفوذ بیشتر آب دریا حتی در شرایط بهره‌برداری از سد می‌گردد. این امر موجب خواهد شد از مساحت مناطق قابل‌استفاده جهت کشت به دلیل پدیده پیشروی آب شور کاهش یابد.

اگرچه آبخوان ساحلی مذکور نسبت به افزایش و یا کاهش تغذیه سطحی ناشی از نفوذ بارندگی حساس است اما در شرایط خشکسالی و به دنبال آن کاهش تغذیه سطحی، واکنش آبخوان شدیدتر است. این امر لزوم اقدامات حیاتی قبل از آلوده شدن آبخوان ساحلی را نشان می‌دهد. نتایج بیانگر این است که چنانچه آبخوان مذکور آلوده شود پاک‌سازی نوار ساحلی و برگشت جبهه شوری از طریق افزایش تغذیه، کاهش پمپاژ و به‌طورکلی هر عاملی که موجب بهبود وضعیت کیفی آبخوان شود زمان‌بر خواهد بود.

#### نتیجه‌گیری

نفوذ آب دریا به‌عنوان یک تهدید زیست‌محیطی و یک چالش مدیریتی به‌ویژه در آبخوان‌های ساحلی به جهت جمعیت زیاد و اراضی کشاورزی حاصلخیز محسوب می‌شود. لذا پیش‌بینی و ارزیابی حرکت آلودگی شوری یک امر حیاتی در زمینه بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی و جلوگیری از آلودگی اراضی کشاورزی است. در پژوهش حاضر، شبیه‌سازی کمی و کیفی آبخوان ساری-نکا با استفاده از مدل‌های MODFLOW، MT3DMS و SEAWAT جهت بررسی تأثیر سد گلورد احداث شده بر روی رودخانه نکارود بر حرکت جبهه شوری در آبخوان فوق‌الذکر صورت گرفته است. جهت دستیابی به اهداف

منابع مورد استفاده



- رضاپور، ع.، ساغروانی، ف. و احمدی فرد، ع. ۱۳۹۷. مطالعه پدیده هجوم آب شور به آبخوان‌های ساحلی در شرایط گذرا با استفاده از پردازش تصویر و مدل‌سازی عددی، نشریه هیدرولیک. ۱۳(۲): ۶۹-۸۲.
- شرکت مهندسی مشاور آب و خاک، گزارش بیلان منابع آب محدوده مطالعاتی ساری- نکا. ۱۳۹۳.
- مهدی‌زاده محلی، س. و وفایی، ف. ۱۳۹۷. ارزیابی شبیه‌سازی با رویکرد مرز مشترک در پیش‌بینی نفوذ شوری در آبخوان‌های لایه‌بندی ساحلی تحت پمپاژ، فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، ۲۰ (۴): ۲۹-۴۹.
- Abd-Elhamid, H. F. and Javadi, A. A. 2011. A density-dependant finite element model for analysis of saltwater intrusion in coastal aquifers. *Journal of Hydrology*, 401(3-4): 259-271.
- Al-Salamah, I. S., Ghazaw, Y. M. and Ghumman, A. R. 2011. Groundwater modeling of Saq Aquifer Buraydah Al Qassim for better water management strategies. *Environmental monitoring and assessment*, 173(1-4): 851-860.
- Chun, J., Lim, C., Kim, D. and Kim, J. 2018. Assessing impacts of climate change and sea-level rise on seawater intrusion in a coastal aquifer. *Water*, 10(4):357.
- Ekhmaj, A., Ezlit, Y. and Elaalem, M. 2014. The situation of seawater intrusion in Tripoli, Libya. In *International conference on biological, chemical and environmental sciences*, (BCES-2014). Penang.
- Freeze, R. A. and Cherry, J.A. 1979. *Groundwater*: Englewood Cliffs. New Jersey.
- Hamidi, M. and Sabbagh Yazdi, S.R. 2006. Numerical modeling of seawater intrusion in coastal aquifer using finite volume unstructured mesh method. *WSEAS Transactions on Mathematics*, 5(6): 648.
- Hamidi, M., & Sabbagh Yazdi, S. R. 2008. Modeling of 2D density-dependent flow and transport in porous media using finite volume method. *Computers & Fluids*, 37(8): 1047-1055.
- Hussain, M. S., Javadi, A. A. and Sherif, M. M. 2015. Three dimensional simulation of seawater intrusion in a regional coastal aquifer in UAE. *Procedia Engineering*, 119: 1153-1160.
- Jang, C. S., Liu, C. W. and Chou, Y. L. 2012. Assessment of groundwater emergency utilization in Taipei Basin during drought. *Journal of hydrology*, 414: 405-412.
- Kumar, C. P. 2006. Management of groundwater in salt water ingress coastal aquifers. *Groundwater Modelling and Management*, 540-560.
- Luyun Jr, R., Momii, K. and Nakagawa, K. 2009. Laboratory-scale saltwater behavior due to subsurface cutoff wall. *Journal of Hydrology*, 377(3-4): 227-236.
- Mansour, A.Y., Baba, A., Gunduz, O., Şimşek, C., Elçi, A., Murathan, A. and Sözbilir, H. 2017. Modeling of seawater intrusion in a coastal aquifer of Karaburun Peninsula, western Turkey. *Environmental earth sciences*, 76(22):775.
- Mittelstet, A. R., Smolen, M. D., Fox, G. A. and Adams, D. C. 2011. Comparison of Aquifer Sustainability under Groundwater Administrations in Oklahoma and Texas 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 47(2): 424-431.
- Siarkos, I., Latinopoulos, D., Mallios, Z. and Latinopoulos, P. 2017. A methodological framework to assess the environmental and economic effects of injection barriers against seawater intrusion. *Journal of environmental management*, 193:532-40.
- Sappa, G. and Coviello, M. T. 2012. Seawater Intrusion and Salinization Processes Assessment in a Multistrata Coastal Aquifer in Italy. *Journal of Water Resource and Protection*, 4(11): 954.
- 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.



## Evaluating the effect of supplying drinking water and agriculture water of Sari-Neka aquifer on the salinity movement with the utilization of Gelvard dam

Mina Nasiri<sup>1</sup>, Mehdi Hamidi<sup>2\*</sup>, and Hamid Kardan Moghaddam<sup>3</sup>

1) Msc of Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

2\*) Assistant Professor of Water and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

\*Corresponding author email: [hamidi@nit.ac.ir](mailto:hamidi@nit.ac.ir)

3) PhD of Water Resources, Dep. of Water Resources Research, Ministry of Energy, Tehran, Iran.

Received 26/07/2019:

Accepted: 10/12/2019

### Abstract

With the fast-growing economy in the coastal regions, the demands for water resources and the exploitation of groundwater have been increased. Consequently, the established balance between freshwater and seawater has been disturbed and hence resulted in extensive seawater intrusion into groundwater. In this paper, the flow model and saltwater intrusion in the Sari-Neka aquifer is simulated using the GMS model. The model is calibrated for four years Between October 2010 and September 2014, both in terms of groundwater levels and TDS concentration. The calibrated model is validated for the next year in terms of groundwater levels and TDS concentration with the available data for October 2014 and September 2015. The values of the correlation coefficient in the steady-state model, transient model and validation model in the flow model are obtained 0/99, 0/98 and 0/97 respectively. The values of the correlation coefficient in the transport model are obtained 0/83 and 0/87 in the transient model and validation model, respectively. After the validated model and assuming all the hydrogeologic conditions remain, a predictive 6-year simulation run indicates that further seawater intrusion into the coastal aquifer can occur in the study area. The effects of the Gelvard dam on the quality of groundwater in the Sari-Neka aquifer in normal, drought and wet conditions also were investigated. The results show that under drought conditions the 50% iso-concentration contour movement for TDS will increase by 5/98 %. In wet conditions, the 50% iso-concentration contour movement will be reduced by 2/94%.

**Keywords:** Gelvard dam; Groundwater; Sari-Neka aquifer; Seawater intrusion