تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال چهاردهم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۷
Volume 14, No. 1, Spring 2018 (IR-WRR)
۴۵-۵۸

شبیه‌سازی عددی اندرکنش دریاچه ارومیه و آبخوان ساحلی دشت عجب‌شیر

رضا فرهودی هفدران[۱] و حامد کتابچی[۲*]

چکیده

منابع آب زیرزمینی یکی از منابع اصلی تأمین‌کننده آب شیرین به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، مانند ایران بوده است. حوضه آبریز دریاچه ارومیه واقع در استان آذربایجان‌شرقی، یکی از مناطقی می‌باشد که بخش قابل توجهی از نیاز آبی با اتکا به آب زیرزمینی تأمین می‌شود. در مطالعه حاضر به شبیه‌سازی اندرکنش آبخوان ساحلی عجب‌شیر با دریاچه ارومیه پرداخته شده است. بدین منظور با استفاده از برنامه عددی سوترا(SUTRA)، یک مدل سه‌بعدی، ناهمگن و ناهمسان توسعه داده شده است. این مدل پس از واسنجی و صحت‌سنجی، مورد استفاده قرار گرفته است. اثرات کاهش تراز دریاچه ارومیه، افزایش آن به تراز اکولوژیک، افزایش یا کاهش تغذیه خالص آبخوان بر میزان تخلیه آب به آبخوان از دریاچه و برعکس ارزیابی شده است. نتایج نشان داده است کاهش سطح تراز دریاچه با روند ۰/۴ متر بر سال، تراز متوسط آبخوان را به اندازه ۱/۷ متر در طول ۱۰ سال کاهش می‌دهد؛ درحالی‌که افزایش تراز دریاچه به تراز اکولوژیک آن، باعث افزایش ۰/۷۵ متری تراز متوسط آبخوان در ۳۰ سال می‌گردد. همچنین ۱۰ درصد افزایش تغذیه خالص باعث افزایش تراز متوسط آب زیرزمینی به اندازه ۱/۸ متر در طول ۳۰ سال شده و کاهش ۱۰ درصدی تغذیه خالص باعث کاهشی در حدود ۱/۷ متری تراز متوسط آبخوان می‌شود.

کلمات کلیدی: آبخوان ساحلی، آبخوان عجب‌شیر، دریاچه ارومیه، شبیه‌سازی عددی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۲/۱۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۴/۳۰

Numerical Simulation of Urmia Lake and Ajabshir Coastal Aquifer Interaction

*R. Farhoudi-Hafdaran [1] and H. Ketabchi [2]**

Abstract

Groundwater resources have ever been one of the main freshwater suppliers in arid and semi-arid areas such as Iran. Urmia Lake's basin located in East-Azerbaijan province, Iran, is one of the areas where a significant portion of the water demands is provided by groundwater. The present study considers the interaction of Urmia Lake and Ajabshir coastal aquifer in this province. Hence, a three-dimensional, heterogeneous and anisotropic model has been developed using a numerical code of SUTRA. The model has been applied after the calibration and verification procedures. The effects of decreased level in Urmia Lake, increasing this level to the ecological level, and increase or decrease in the net recharge rate of the aquifer on discharge to the aquifer from the lake and vice versa have been assessed. The results showed that decrease in the level of the lake with the rate of 0.4 m/year would decrease the average aquifer level by 1.7 m over 10-years period. Increasing the level of the lake to its ecological level would however increase the level of the aquifer by 0.75 m in average in 30-years. Also, 10 percent increase in net recharge rate would resulted in 1.8 m increase in the average water table during 30-years while 10 percent reduction in net recharge rate would cause the reduction of 1.7 m in the average groundwater level.

Keywords: Ajabshir Aquifer, Coastal Aquifer, Numerical Simulation, Urmia Lake.

Received: May 7, 2017
Accepted: July 21, 2017

۱- کارشناس ارشد مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
۲- استادیار، دانشکده مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۳۹۷ امکانپذیر است.

1- M.Sc. Graduate, Water Resources Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2- Assistant Professor, Water Resources Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: h.ketabchi@modares.ac.ir
*- Corresponding Author

۱- مقدمه

ذخایر ارزشمند آب‌های زیرزمینی به عنوان منبعی راهبردی، نقش مهم و حیاتی در تأمین نیازهای آبی مختلف بشر از جمله شرب، صنعت و کشاورزی ایفا می‌نماید. بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی به‌واسطه ارزان بودن و دسترسی آسان، در مقایسه با منابع دیگر از دیرباز رواج گسترده‌ای یافته است، به‌طوری‌که حدود ۵۰ درصد جمعیت جهان از نظر آب شرب، متکی به آب‌های زیرزمینی می‌باشند. این رقم در ایران به مراتب بالاتر از ۵۰ درصد بوده و می‌توان گفت اکثر شهرها و روستاهای کشور، آب مورد نیاز شرب و حتی کشاورزی را از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌نمایند (Ketabchi and Ataie-Ashtiani, 2015a,b).

بررسی‌ها نشان می‌دهد، تنها حدود ۲/۵ درصد از آب‌های موجود در جهان شیرین هستند و آب‌های زیرزمینی با سهم حدود ۳۰/۱ درصد از آب‌های شیرین، بالاترین حجم آب قابل دسترس این آب‌ها محسوب می‌شوند. با وجود این در مناطق ساحلی که یکی از مهم‌ترین و حساس‌ترین نقاط جهان به لحاظ جمعیت فراوان ساکن، توسعه اقتصادی و اجتماعی روزافزون، صنعت گردشگری، محیط‌زیست و اکوسیستم خاص محسوب می‌شوند و ۶۰ درصد شهرهای جهان را در بر می‌گیرند، اگر آب مصرفی بوسیله آب سطحی تأمین نشود تقاضا برای تأمین آب از منابع آب زیرزمینی بیشتر شده و کمبود آن یک امر عادی می‌باشد (Post and Lundin, 2009; Ketabchi and Ataie-Ashtiani, 2011; Ketabchi, 2015).

محدودیت آب‌های زیرزمینی قابل برداشت در آبخوان‌های ساحلی[۱]، افزایش نیازهای آبی، ارتباط با دریا و استخراج آب زیرزمینی بیش از حد در چنین مناطقی باعث شده که این مناطق به عنوان محیطی بسیار حساس و آسیب‌پذیر تلقی شوند. در شرایط طبیعی، آب‌های زیرزمینی شیرین موجود در سفره‌های آب زیرزمینی آزاد و یا تحت‌فشار ساحلی به دریاها یا دریاچه‌ها تخلیه می‌شوند و ناحیه انتقالی متحرکی بین آب‌های زیرزمینی و آب دریا ایجاد می‌شود. بهره‌برداری سنگین و بی‌رویه از آبخوان‌های ساحلی بر روی گرادیان هیدرولیکی سفره تأثیر گذاشته و سبب می‌گردد تا آب دریا به سمت سفره‌های آب‌های زیرزمینی حرکت نموده و تبادل طبیعی آب بین آبخوان ساحلی و دریا بهم بخورد (Ketabchi, 2015; Werner et al., 2013; Mahmoodzadeh et al., 2014).

امروزه محققان بسیاری با استفاده از مدل‌های عددی به بررسی اندرکنش آب دریا و آبخوان‌های ساحلی پرداخته‌اند و مطالعات زیادی جهت شبیه‌سازی سیستم آب زیرزمینی در آبخوان‌های ساحلی در شرایط مختلف بهره‌برداری انجام شده است. مدل‌سازی عددی آب زیرزمینی آبخوان‌های ساحلی در چند دهه گذشته، موضوع پژوهش‌های متعددی بوده است که بیشتر این پژوهش‌ها به شبیه‌سازی دوبعدی سیستم آب زیرزمینی پرداخته‌اند و شبیه‌سازی سه‌بعدی فقط در کمتر از یک دهه گذشته به طور جدی در دستور کار قرار گرفته است. با استفاده از شبیه‌سازی عددی، به دلیل فراهم شدن امکان بررسی سناریوها و حالات مختلف در آینده و تحلیل آثار عوامل گوناگون، درک بهتری از فرآیند مورد نظر حاصل می‌گردد و در نهایت پیش‌بینی‌های نزدیک‌تر به واقعیت صورت می‌پذیرد (Werner et al., 2013; Ketabchi et al., 2014, 2016).

در مطالعه Ketabchi and Ataie-Ashtiani (2015b)، آبخوان آزاد جزیره کیش با مساحت ۹۰/۵ کیلومترمربع، به صورت اشباع/غیراشباع و نیز به صورت سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار سوترا[۲] مدل‌سازی شد. ابعاد شبکه در این مطالعه به صورت ۵۰۰ در ۵۰۰ متر در نظر گرفته شده و آبخوان تا عمق ۵۰۰ متری شبیه‌سازی گردید. برای واسنجی این مدل از الگوریتم خودکار پست[۳] بهره برده شد. بررسی سناریوی افزایش سطح آب دریا در این مطالعه نشان داد که به دلیل آبگرفتگی سطح زمین نزدیک ساحل، میزان استخراج آب زیرزمینی در مقایسه با شرایط بدون افزایش سطح آب دریا، در شرایط بهینه، ۲۰ درصد کاهش یافته است.

Mohanty et al. (2013) عملکرد مدل عددی مادفلو[۴] و شبکه عصبی مصنوعی[۵] توسعه یافته را در شبیه‌سازی سطح تراز آب زیرزمینی در سیستم آبخوان آبرفتی مورد ارزیابی قرار دادند. واسنجی[۶] و صحت‌سنجی[۷] مدل مادفلو با استفاده از داده‌های سطح آب‌زیرزمینی صورت گرفت که واسنجی به روش سعی و خطا و با استفاده از الگوریتم پست، با تعدیل سطح آب‌زیرزمینی در ۱۹ چاه مشاهده‌ای انجام شد. سطح آب پیش‌بینی شده با مدل مادفلو و شبکه عصبی مصنوعی با سطح آب مشاهداتی مقایسه شد. نتایج نشان داد که مدل عددی مادفلو برای پیش‌بینی بلندمدت و مدل ANN برای پیش‌بینی کوتاه‌مدت، نتایج مناسبی ارائه می‌دهد.

Cobaner et al. (2012) از مدل جریان سه‌بعدی سیوات[۸] برای مدل‌سازی سیستم آب زیرزمینی آبخوان ساحلی در دشت گوکسو واقع در سواحل مدیترانه‌ای ترکیه بهره بردند. تحلیل واسنجی مدل توسعه یافته با استفاده از داده‌های میدانی شامل هد استاتیک آب‌زیرزمینی، هدایت الکتریکی، کل جامدات محلول[۹] و غلظت کلرید بر اساس ۲۳ چاه مشاهداتی در سال آبی ۲۰۰۸ انجام شد. نتایج نشان داد که مدل

انتقال و جریان آب‌زیرزمینی توسعه یافته با استفاده از سیوات، به افزایش پمپاژ آب‌زیرزمینی حساسیت بالایی دارد و مدل می‌تواند برای بررسی بسیاری از سیاست‌های مدیریتی به عنوان تابعی از سناریوی تغییر اقلیم و الگوی کشت در استخراج آب‌زیرزمینی استفاده شود.

در مطالعه‌ای که توسط Narayan et al. (2007) انجام شد، از مدل سوترا در حالت دوبعدی برای آبخوان آزاد، برای تعیین تبادل آب دریاچه و آبخوان در شرایط پایدار در دلتای بوردکین واقع در استرالیا تحت شرایط تغذیه و پمپاژ مختلف استفاده شد. شبیه‌سازی برای دامنه‌ای از تغذیه، نرخ پمپاژ و مقدار هدایت هیدرولیکی انجام شد. نتایج نشان داد که حساسیت تبادل آبی به نرخ پمپاژ و تغذیه، به مراتب بیشتر از خصوصیات آبخوان مانند هدایت هیدرولیکی می‌باشد. پمپاژ بیش از حد آب‌های زیرزمینی منجر به ورود حجم زیاد آب به آبخوان شده و نرخ تغذیه بالا، باعث کاهش آن می‌شود. همچنین تجزیه و تحلیل نشان داد که تأثیر نوسانات جزر و مدی در سطح آب‌های زیرزمینی، محدود به مناطق بسیار نزدیک به ساحل است.

در بررسی عددی آبخوان ساحلی ۳۶۵ کیلومتری غزه واقع در فلسطین اشغالی، مدل جریان سه‌بعدی وابسته به چگالی سیوات بکار برده شد. این مدل عددی برای شبیه‌سازی زمانی و مکانی هد هیدرولیکی و غلظت امـــلاح آب‌زیرزمینی استفاده شد و تحت شرایط دائمی و غیردائمی، واسنجی شـــد. نتایج نشان دهنده ایـــن بود که با ادامه پمپاژ با نرخ فعلی، تبادل دریاچه و آبخوان شدیدتر خواهد شد (Qahman and Larabi, 2005).

در ایران، آبخوان‌های ساحلی، بیشتر در کناره‌های دریـــای خزر، خلیج‌فارس و دریاچه‌های بزرگ داخلی نظیر دریاچه ارومیه وجود دارند. بررسی و مطالعات آبخوان‌های مجاور دریاچه‌هایی مانند دریاچه ارومیه که تغییرات تراز آن، متفاوت از روند جهانی می‌باشد، با ملاحظات متفاوتی است.

نتایج مطالعات و تحلیل‌های اخیر در مورد تبادل آب زیرزمینی آبخوان ساحلی و دریا و تأثیر عواملی همچون افزایش سطح آب و سایر جزییات مؤثر در مدل‌سازی و عوامل ساده‌کننده در مدل، نشان می‌دهد که با وجود اینکه پیشرفت‌های زیادی جهت درک این موضوع شده است؛ اما هنوز ابهامات زیادی برای آینده در این زمینه وجود دارد که ضرورت بررسی‌های بیشتر بخصوص در محدوده‌هایی با ویژگی‌هایی خاص مانند دریاچه ارومیه و آبخوان‌های ساحلی مجاور، بیش از پیش روشن می‌نماید (Ketabchi, 2015). هدف این مطالعه، شبیه‌سازی سیستم آب زیرزمینی آبخوان ساحلی عجب‌شیر با استفاده از مدل عددی سوترا و پیش‌بینی وضعیت آبخوان ساحلی مدنظر در سناریوهای مختلف با هدف بررسی اندرکنش میان دریاچه ارومیه و آبخوان مورد مطالعه می‌باشد. این دشت در زمره معدود دشت‌هایی در مجاورت دریاچه ارومیه است که ارتباط هیدرولیکی آن با دریاچه ارومیه مشاهده شده است (مانند Darvishi-Khatooni et al., 2013) و بنابراین بررسی اندرکنش میان این دشت و دریاچه ارومیه در این مطالعه مورد نظر است. جنبه نوآوری مطالعه حاضر، انجام مطالعات اندرکنش آب دریاچه و آبخوان ساحلی واقعی بصورت یک سیستم سه‌بعدی، ناهمگن و ناهمسان با مشخصات منحصربفرد در حوضه دریاچه ارومیه با تغییرات نامتعارف تراز آن و بررسی کمّی و تفصیلی اثرات متقابل تغییرات تراز آب دریاچه ارومیه و تغییرات مربوط به آبخوان ساحلی مورد مطالعه می‌باشد. در این مطالعه پس از نهایی‌سازی مدل تهیه شده، مدل در دو دوره واسنجی (۱۳۸۶-۱۳۹۰) و صحت‌سنجی (۱۳۹۱-۱۳۹۳) مورد ارزیابی قرار گرفته و ضمن تعریف سناریوهای محتمل، اثر هر کدام از آنها بر تغییرات تراز آب زیرزمینی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

محدوده مطالعاتی عجب‌شیر در استان آذربایجان‌شرقی واقع شده است. این محدوده مطالعاتی با مساحت ۶۹۹/۴ کیلومترمربع، حدود ۱/۳ درصد از کل حوضه آبریز دریاچه ارومیه را در بر می‌گیرد. از این میزان ۱۲۱ کیلومترمربع مربوط به وسعت دشت و ۵۷۸/۴ کیلومترمربع را ارتفاعات محدوده تشکیل می‌دهد. در شکل ۱، موقعیت جغرافیایی دریاچه ارومیه و دشت عجب‌شیر نشان داده شده است که در ۹۰ کیلومتری جنوب‌غربی شهرستان تبریز، واقع شده است.

آب و هوای منطقه عجب‌شیر از نوع نیمه‌خشک بوده و بر اساس اطلاعات هواشناسی موجود، متوسط سالانه بارندگی منطقه حدود ۲۶۵ میلی‌متر و متوسط بلندمدت سالانه تبخیر از سطح تشتک ۱۷۰۰ میلی‌متر می‌باشد. متوسط سالانه دمای منطقه در بلندمدت برابر ۱۲ درجه‌سانتی‌گراد می‌باشد.

در شکل ۲، موقعیت محدوده مطالعاتی دشت عجب‌شیر در محدوده طول جغرافیایی ۴۵ درجه و ۴۹ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۸ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۲۳ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۳۳ دقیقه، دشت‌های مجاور، محل قرارگیری رودخانه قلعه‌چای به عنوان مهم‌ترین رودخانه منطقه، موقعیت شهرها و دریاچه ارومیه آورده شده است. همچنین، شبکه چاه‌های مشاهده‌ای نیز در شکل مذکور قابل مشاهده می‌باشد که این چاه‌های مشاهده‌ای بمنظور اندازه‌گیری تغییـــــرات سطح آب

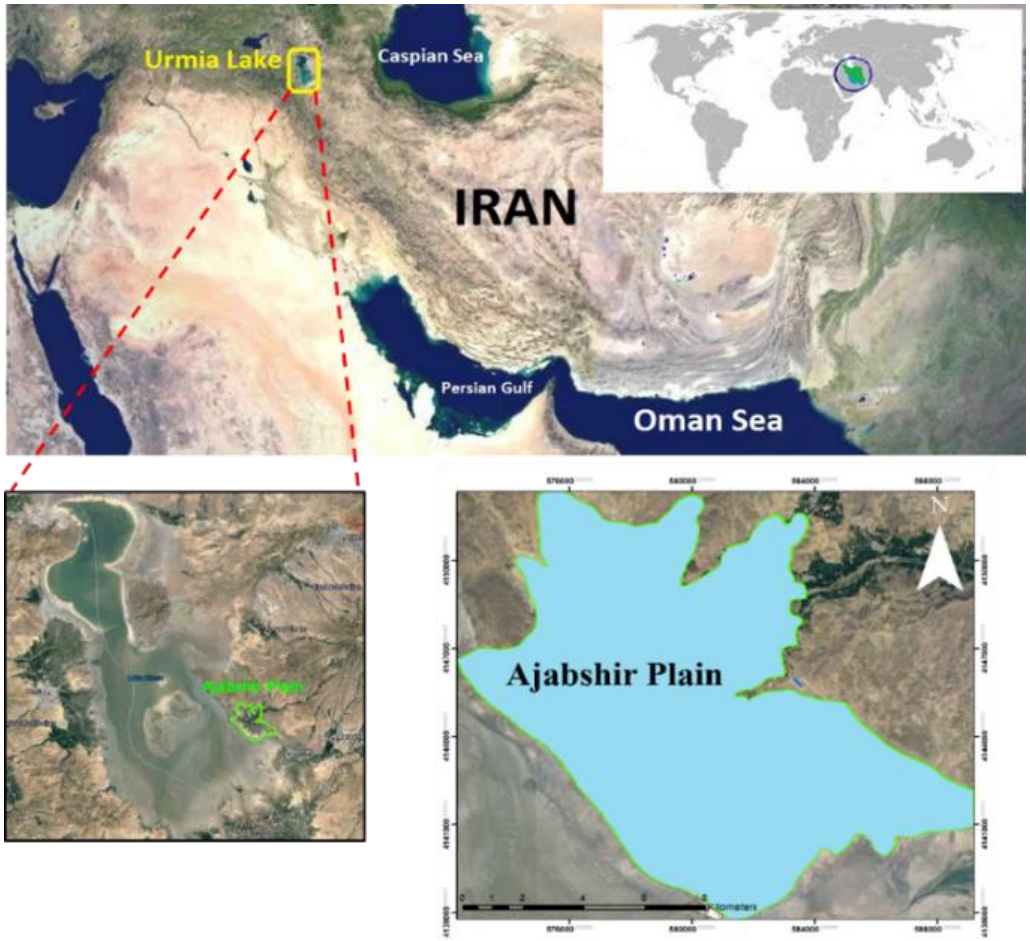


Fig. 1- Urmia Lake and Ajabshir coastal aquifer, East-Azerbaijan province, Iran
شکل ۱- دریاچه ارومیه و آبخوان ساحلی دشت عجب‌شیر، استان آذربایجان‌شرقی، ایران

زیرزمینی آبخوان آبرفتی از سال ۱۳۶۳ در این محدوده مطالعاتی ایجاد شده است. سطح آب زیرزمینی تحت تأثیر میزان تغذیه و تخلیه از طریق منابع آبی و شرایط آب‌وهوایی همواره در طول ماه‌ها و سال‌ها، یک سطح ثابتی نبوده و دائماً در حال نوسان است. بررسی تراز متوسط بلندمدت ۸ ساله (۱۳۸۶-۱۳۹۳) آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی دشت عجب‌شیر نشان داده است که بیشترین تراز با مقدار ۱۳۰۸/۹۳ متر مربوط به شمال‌شرقی دشت و کمترین تراز با مقدار ۱۲۶۹/۶۴ متر مربوط به جنوب‌غربی دشت در نواحی ساحلی دریاچه ارومیه بوده است (Iran Water Resources Management Company, 2014). براساس اطلاعات Iran Water Resources Management Company (2014)، برای برآورد ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان از اطلاعات چاه‌های اکتشافی موجود در سطح حوضه آبریز و نتایج آزمایش‌های پمپاژ استفاده شده است. به طور کلی میزان تغییرات ضریب قابلیت انتقال[10] در محدوده دشت عجب‌شیر بین ۵۷/۶ تا ۱۴۸۳ مترمربع بر روز بوده و متوسط ضریب ذخیره[11] آبخوان‌های آبرفتی حوضه آبریز بین ۱ تا ۶ درصد متغیر می‌باشد. با استفاده از بررسی لوگ حفاری چاه‌های اکتشافی، نحوه لایه‌بندی طبقات آبخوان بدست آمده است. بدین صورت که زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی دشت عجب‌شیر از ۱۰ لایه اصلی از ترکیب سه نوع خاک رس، ماسه و شن تشکیل شده است که نمونه برش زده شده‌ای از لایه‌بندی محدوده مطالعاتی دشت عجب‌شیر در شکل ۳ نمایش داده شده است.

۲-۲- مدل شبیه‌سازی عددی

در این بخش، روش‌شناسی تحقیق شرح داده می‌شود. در این راستا مراحل مدل‌سازی آب زیرزمینی آبخوان ساحلی عجب‌شیر در شکل ۴ ارائه شده است.

بر اساس این روند؛ مدل مفهومی، در مدل‌سازی سیستم آب زیرزمینی آبخوان ساحلی و شناخت سیستم آن، نقشی اساسی دارد که در واقع نمایانگر طبیعت سیستم آب زیرزمینی، ورودی و خروجی‌های آبخوان، شرایط زمین‌شناسی، هیدروژئولوژیکی و اقلیمی آن می‌باشد و از مراحل اصلی در روش‌شناسی این مطالعه با توجه به اهداف تحقیق بوده است.

برای پیش‌بینی وضعیت سیستم آب زیرزمینی در آبخوان ساحلی، مدل شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی سوترا (Voss and Provost, 2010)، مورد استفاده قرار گرفت. این مدل به صورت رایگان توسط سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده[۱۲] ارائه شده است. در این مدل برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی، معادله بقای جرم سیال در محیط متخلخل خاک حل می‌شود که به صورت رابطه ۱ آورده شده است (Voss and Provost, 2010):

$$(\rho S_{op})\frac{\partial p}{\partial t} - \nabla\left(\frac{k\rho}{\mu}(\nabla p - \rho g)\right) = Q_p \qquad (۱)$$

در این رابطه ρ $[M.L^{-3}]$ چگالی سیال، S_{op} $[L.T^2.M^{-1}]$ ضریب ذخیره مخصوص فشاری، p $[M.L^{-1}.T^{-2}]$ فشار سیال، t $[T]$ زمان، k $[L^2]$ ضریب نفوذپذیری ذاتی خاک، μ $[M.L^{-1}.T^{-1}]$ لزجت دینامیکی سیال، g $[L^2.T^{-1}]$ شتاب ثقل زمین، Q_p $[M.L^{-3}.T^{-1}]$ مقدار برداشت یا تغذیه جرم سیال به محیط است.

۲-۲-۱- دامنه مدل‌سازی و شرایط مرزی

مدل‌سازی آب زیرزمینی آبخوان عجب‌شیر به صورت سه‌بعدی مدنظر است. دامنه مدل‌سازی آبخوان عجب‌شیر در شکل ۵ آورده شده است. مشخصه‌های مدل بر اساس داده‌های محدوده مطالعاتی و نیز انجام فرآیند واسنجی با برنامه پست (Pest) تعیین می‌شود. در ادامه به انجام این روند پرداخته می‌شود.

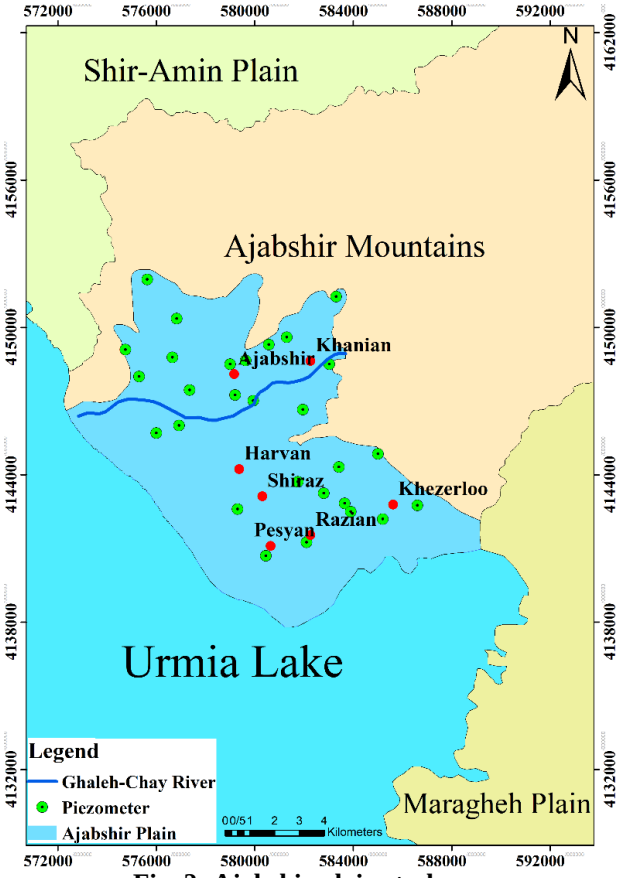


Fig. 2- Ajabshir plain study area

شکل ۲- محدوده مطالعاتی دشت عجب‌شیر

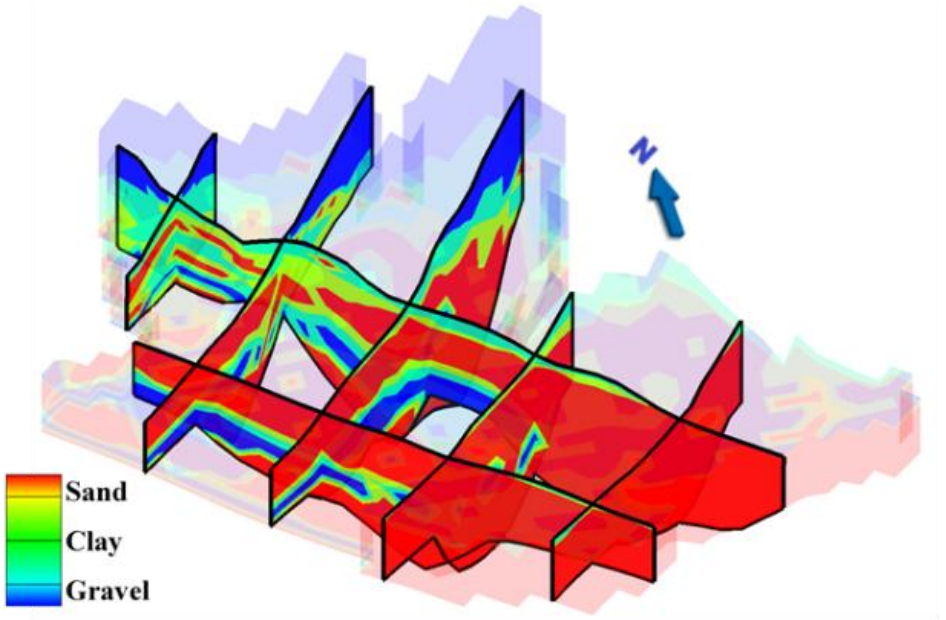


Fig. 3- Schematic of Ajabshir plain layering

شکل ۳- نمایی از لایه‌بندی دشت عجب‌شیر

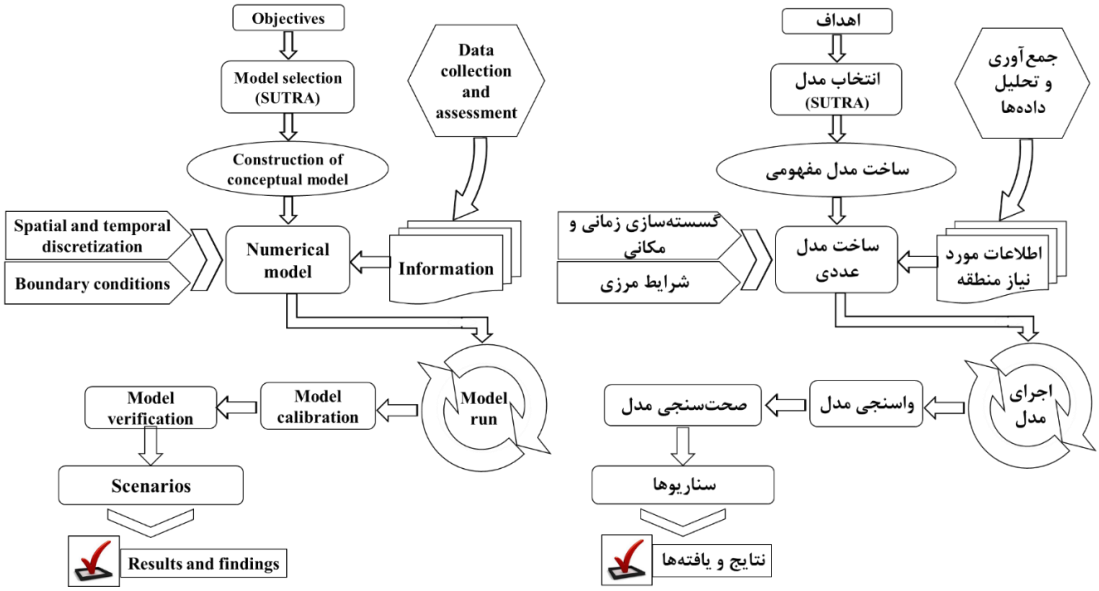


Fig. 4- Groundwater modeling steps for Ajabshir plain

شکل ۴- مراحل مدل‌سازی آب زیرزمینی دشت عجب‌شیر

در گسسته‌سازی مدل سه‌بعدی آبخوان عجب‌شیر، دامنه مدل‌سازی از ۴۸۴۰ جزء و ۶۱۴۹ گره محاسباتی با ابعاد مساوی ۵۰۰ متر در صفحه افقی و ابعاد متغیر ۰/۵۰ تا ۱۶/۹۷ متر در جهت قائم تشکیل شده است که از سطح زمین تا کف آبخوان، ابعاد درشت‌تر می‌شوند. دلیل متغیر در نظر گرفتن گسسته‌سازی در عمق، وقوع تغییرات شدیدتر در نزدیکی سطح زمین است که ابعاد ریزتری برای آن ملحوظ شده است.

برای دامنه مدل‌سازی مورد نظر، مرز فشار هیدرواستاتیک به تمامی گره‌های محاسباتی پایین‌تر از تراز آب دریاچه و همچنین بخش‌هایی از مرزهای در تماس با آبخوان‌های مجاور وارد می‌شود. بر اساس داده‌های تاریخی موجود از تراز آب دریاچه، مرز دریاچه به صورت فشار برآورد شده متغیر با زمان ملحوظ گردیده است. جریان ورودی از این گره‌ها به داخل آبخوان، در بخش ساحلی مربوط به آب دریاچه ارومیه و در مرز خشکی مربوط به ورودی از آبخوان‌های دشت مراغه، ارتفاعات عجب‌شیر و دشت شیرآمین می‌باشد. شرایط مرزی سطح زمین در مرز فوقانی به عنوان مرز تغذیه آبخوان است که شامل آب بارش و آب برگشتی حاصل از کاربری‌های کشاورزی، شرب و صنعت می‌باشد. شرط مرزی بدون جریان در مرز تحتانی کف مدنظر قرار گرفته و این مرز نفوذ ناپذیر در نظر گرفته شده است. همچنین رودخانه قلعه‌چای به صورت شرط مرزی تغذیه مد نظر است.

۲-۲-۲- واسنجی مدل

واسنجی مدل سوتزای آماده شده برای آبخوان عجب‌شیر به جهت تنظیم داده‌های عدم‌قطعیت‌دار مورد استفاده در راستای نزدیک کردن مقادیر تراز محاسباتی و مشاهده‌ای در دو حالت شبیه‌سازی دائمی و غیردائمی در این مطالعه مد نظر قرار گرفته است.

۲-۲-۳- واسنجی مدل در شبیه‌سازی دائمی

بر اساس فرآیند واسنجی دائمی، مشخصه‌های واسنجی به مقدار هدایت هیدرولیکی لایه‌های مختلف آبخوان، تغذیه ناشی از رودخانه، تغذیه ناشی از بارش و آب برگشتی چاه‌ها محدود گردید و با استفاده از الگوریتم پست، عملیات تنظیم این مشخصه‌ها با هدف نزدیک شدن سطح آب زیرزمینی محاسبه شده در چاه‌های مشاهده‌ای (شکل ۲) و مقادیر مشاهده‌ای متوسط دراز مدت (۱۳۸۶-۱۳۹۳) انجام پذیرفت. با توجه به نتایج به دست آمده در شکل ۶، مقدار ضریب تبیین برابر ۰/۹۳ و مقدار جذر میانگین مربعات خطا در این مدل، ۱/۱۲ متر برآورد گردید که بیانگر عملکرد مطلوب مدل در کل آبخوان عجب‌شیر و همچنین تطابق مطلوب سطح آب زیرزمینی مشاهده‌ای و محاسباتی می‌باشد.

۲-۲-۴- واسنجی مدل در شبیه‌سازی غیردائمی

واسنجی مدل آب زیرزمینی آبخوان عجب‌شیر در حالت شبیه‌سازی غیردائمی، با بهره‌گیری از مدل دائمی واسنجی شده و با تعدیل مقادیر تغذیه و تخلیه از آبخوان با استفاده از الگوریتم پست، از سال ۱۳۸۶ تا سال ۱۳۹۰ صورت گرفت. هیدروگراف سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در مقابل اندازه‌گیری شده در شکل ۷ ارائه شده است.

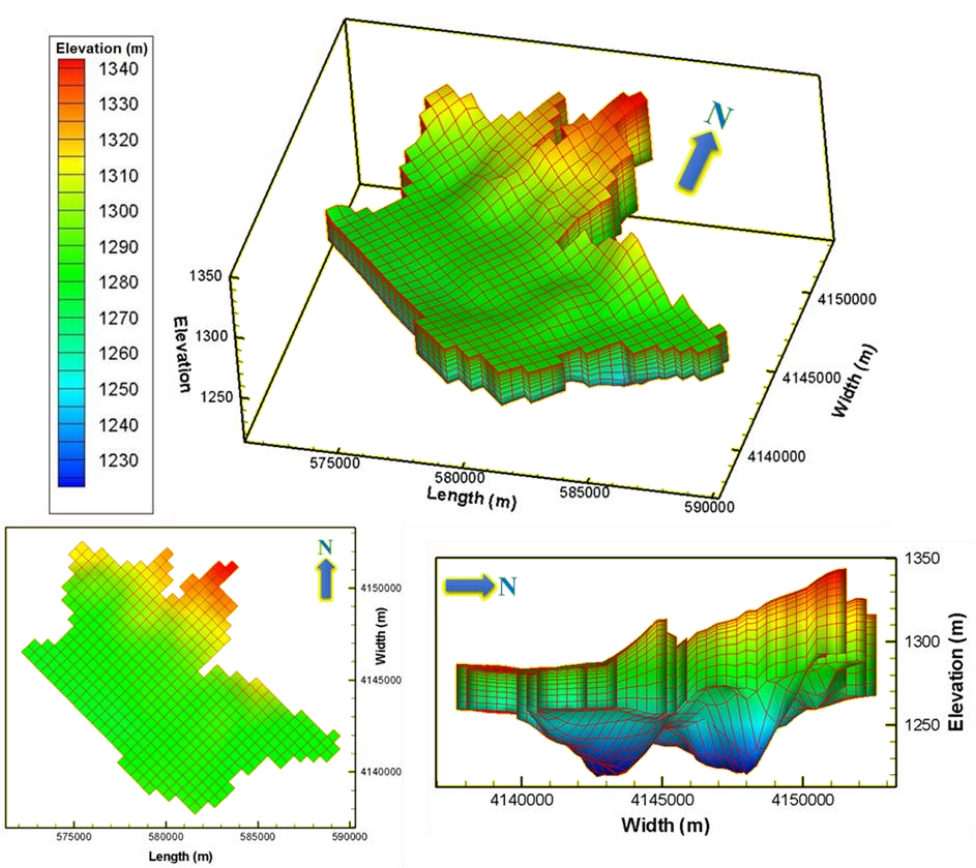


Fig. 5- Modeling domain for groundwater system of Ajabshir aquifer and the implemented discretization

شکل ۵- دامنه مدل‌سازی سیستم آب زیرزمینی آبخوان عجب‌شیر و گسسته‌سازی اعمال شده

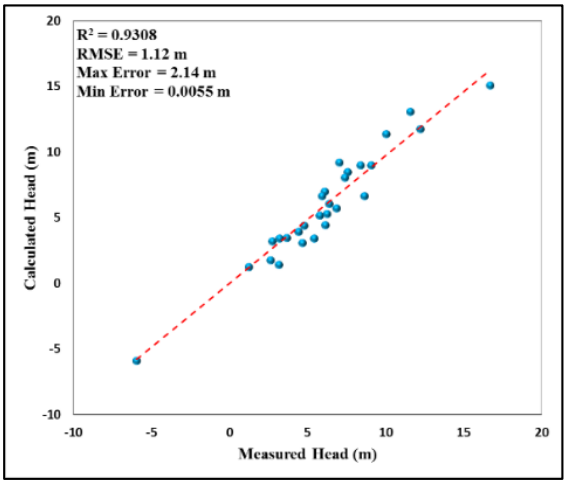


Fig. 6- Distribution of observed and computed data for groundwater level

شکل ۶- نمودار پراکندگی سطح آب زیرزمینی مشاهده‌ای و محاسباتی

تطابق مطلوبی بین سطح آب زیرزمینی محاسباتی و مشاهده‌ای در تمام حلقه‌های چاه‌های مشاهده‌ای به دست آمده است. اختلاف کوچک در برخی از مقادیر اوج، ممکن است بخاطر این واقعیت باشد که سطح آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده، یکبار در ماه اندازه‌گیری می‌شود و لزوماً این اندازه‌گیری در هر ماه، در روزهای مشابه صورت نمی‌گیرد. مقدار ضریب تبیین برابر ۰/۸۶، جذر میانگین مربعات خطا برابر ۰/۴۵ متر، حداکثر خطا برابر ۱/۱۵ متر و حداقل خطا برابر ۰/۰۱۸ متر در واسنجی مدل در شرایط غیردائمی، نشان دهنده تطابق مطلوبی بین سطح آب مشاهده‌ای و محاسباتی می‌باشد.

۲-۲-۵- صحت‌سنجی مدل

برای صحت‌سنجی مدل آب زیرزمینی آبخوان عجب‌شیر، ابتدا برای سال ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۳ پیش‌بینی توسط مدل صورت گرفت و سپس نتایج بدست آمده با آمار مشاهده‌ای واقعی مقایسه گردید. مطابق با دوره واسنجی، مقدار تغذیه خالص واسنجی شده بر حسب بارش، میزان تخلیه و آب برگشتی به آبخوان در دوره موردنظر در نظر گرفته شد و دیگر پارامترهای ورودی به مدل، مشابه دوره واسنجی فرض شدند.

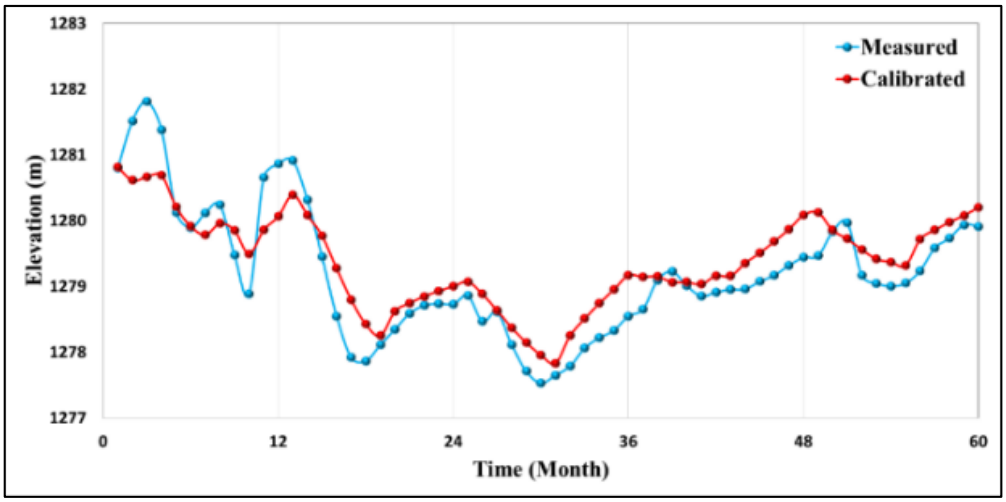


Fig. 7- Groundwater hydrograph of Ajabshir aquifer under transient calibration condition

شکل ۷- هیدروگراف آب زیرزمینی آبخوان عجب‌شیر در شرایط واسنجی شده غیردائمی

در شکل ۸، هیدروگراف شبیه‌سازی در مقابل اندازه‌گیری شده در طول ۳ سال دوره صحت‌سنجی (۱۳۹۱-۱۳۹۳) ارائه شده است. هیدروگراف شبیه‌سازی شده، تطابق خوبی با هیدروگراف اندازه‌گیری شده متناظر آن به نمایش گذاشته است. با توجه به نتایج به دست آمده، مقدار ضریب تبیین برابر ۰/۶۳، جذر میانگین مربعات خطا برابر ۰/۴۸ متر، حداکثر خطا برابر ۱/۰۵ متر و حداقل خطا برابر ۰/۰۱۷ متر به‌دست آمد که نشان دهنده تطابق نسبتاً خوب بین سطح آب اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده می‌باشد.

۳- سناریوهای مورد بررسی و تحلیل نتایج

در بخش حاضر، با استفاده از مدل واسنجی و صحت‌سنجی شده، به جهت بررسی وضعیت سیستم، سناریوهایی مطابق با جدول ۱ تدوین شده و به بررسی آنها پرداخته می‌شود. هدف از بررسی این سناریوها، بررسی و تحلیل رفتار آبخوان و نحوه پاسخ‌دهی آن به تغییرات اعمالی است. آخرین سال صحت‌سنجی (۱۳۹۳) به عنوان سناریو پایه در نظر گرفته شده و به تحلیل نتایج سناریوها پرداخته می‌شود.

سناریو ۱: کاهش سطح تراز دریاچه با روند ۰/۴ متر بر سال

در این سناریو، با توجه به روند تغییرات تراز دریاچه ارومیه در طول دوره ۱۳۹۴-۱۳۸۳ و همچنین با توجه به گزارش Urmia Lake Restoration Program (2016)، کاهش سطح تراز دریاچه ارومیه با روند ۰/۴ متر بر سال در نظر گرفته شده است. در این سناریو فرض می‌شود که روند کاهشی تاریخی رخ داده، در طول ۱۰ سال آینده نیز تکرار شود.

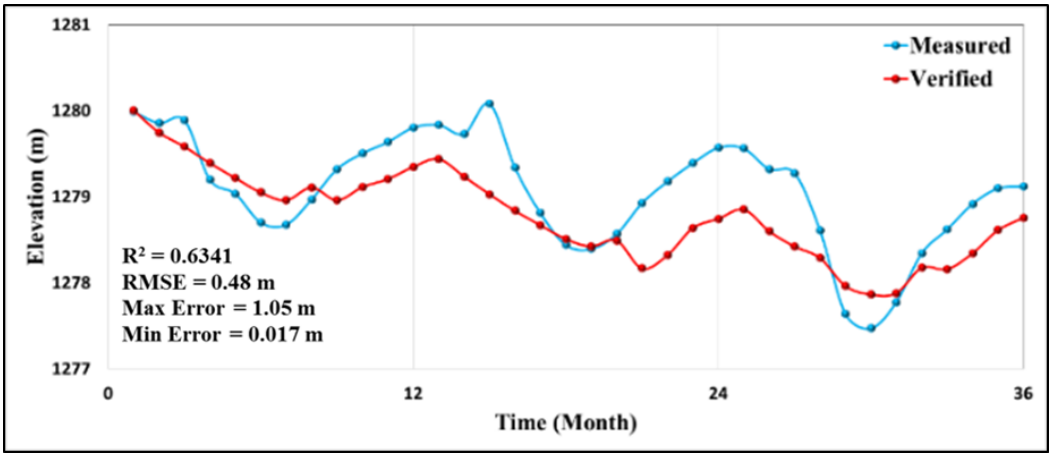


Fig. 8- Groundwater hydrograph of Ajabshir aquifer for verification period

شکل ۸- هیدروگراف آب زیرزمینی آبخوان عجب‌شیر برای دوره صحت‌سنجی

عواملی مانند کاهش ورودی آب سطحی و زیرزمینی و افزایش دما در اثر تغییر اقلیم و تبخیر زیاد ناشی از آن می‌تواند چنین تغییری را باعث شود. هیدروگراف آب زیرزمینی آبخوان ساحلی عجب‌شیر بر اساس سناریوی پایه و سناریوی حاضر در شکل ۹ ارائه شده است.

با توجه به هیدروگراف مورد نظر، کاهش سطح تراز دریاچه ارومیه با روند ۰/۴ متر در هر سال، باعث کاهش تراز آب زیرزمینی در آبخوان شده است که کاهشی حدود ۱/۷ متری در انتهای ۱۰ سال را نشان می‌دهد. همچنین ملاحظه می‌گردد که تراز متوسط آب زیرزمینی از ۱۲۷۷/۲۹ متر (سناریو پایه) به ۱۲۷۷/۰۴ متر (سناریو حاضر) افت کرده است که این ناشی از کاهش سطح دریاچه ارومیه می‌باشد.

یکی از عوامل مهم بیلان آب زیرزمینی در آبخوان ساحلی مورد مطالعه، تخلیه از دریاچه ارومیه به آبخوان و برعکس می‌باشد. در این راستا بر اساس نتایج حاصل، در سال‌های ۱ و ۱۰، میزان تخلیه از دریاچه به آبخوان (شکل ۱۰، الف) و میزان تخلیه از آبخوان به دریاچه (شکل ۱۰، ب) آورده شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد در سال ۱۰ نسبت به سال اول، افزایش تخلیه به آبخوان به اندازه ۸ درصد اتفاق افتاده و حجم آبی به اندازه ۱/۴۷۸ میلیون مترمکعب به آبخوان وارد شده است. همچنین با بررسی تغییرات تخلیه از آبخوان به دریاچه در طول ۱۰ سال، نتایج گویای این است که در سال ۱۰ نسبت به سال اول، افزایش تخلیه به دریاچه به اندازه ۱۵ درصد اتفاق افتاده و حجم آبی به اندازه ۱/۰۴۳ میلیون مترمکعب از آبخوان خارج شده است.

سناریو ۲: افزایش سطح دریاچه به تراز اکولوژیک

در این سناریو، افزایش سطح تراز دریاچه ارومیه به تراز اکولوژیک ۱۲۷۴/۱ متری دریاچه ارومیه مدنظر می‌باشد. با توجه به هیدروگراف آب زیرزمینی آبخوان عجب‌شیر که در شکل ۱۱ آورده شده است، افزایش سطح تراز دریاچه ارومیه به تراز اکولوژیک آن، تراز آب زیرزمینی آبخوان را در انتهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سال، به ترتیب به اندازه ۰/۷۵۲، ۰/۹۰۲ و ۰/۹۲۶ متر افزایش داده است. همچنین، ملاحظه می‌گردد که تراز متوسط آب زیرزمینی از ۱۲۷۷/۲۹ متر (سناریو پایه) به ۱۲۷۸/۰۴ متر (سناریو حاضر) در سال ۳۰ افزایش یافته است.

بر اساس نتایج حاصل، در سال‌های ۱، ۱۰، ۲۰ و ۳۰، میزان تخلیه از دریاچه به آبخوان (شکل ۱۲، الف) و تخلیه از آبخوان به دریاچه (شکل ۱۲، ب) برآورد شده است.

Table 1- Summary of investigated scenarios

جدول ۱- خلاصه سناریوهای مورد بررسی

Scenario Number	Lake level (m)	Lake level changes (m)	Net recharge (Mm^3/year)	Net recharge change (%)
Base scenario	1270.49	0	-0.75	0
1	1270.49*	0.4 /year-	-0.75	0
2	1274.1	3.61**	-0.75	0
3	1270.49	0	-0.68	+10
4	1270.49	0	-0.83	-10

* تراز اولیه

** اعمال شده در ابتدای دوره شبیه‌سازی

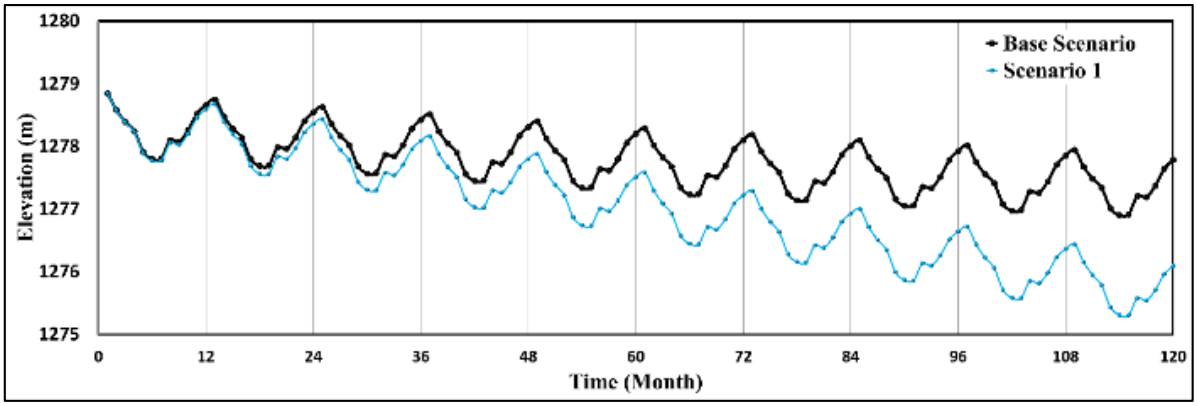


Fig. 9- Groundwater hydrograph of Ajabshir aquifer over 10-years period for scenario 1

شکل ۹- هیدروگراف آب زیرزمینی آبخوان عجب‌شیر در طول ۱۰ سال در سناریو ۱

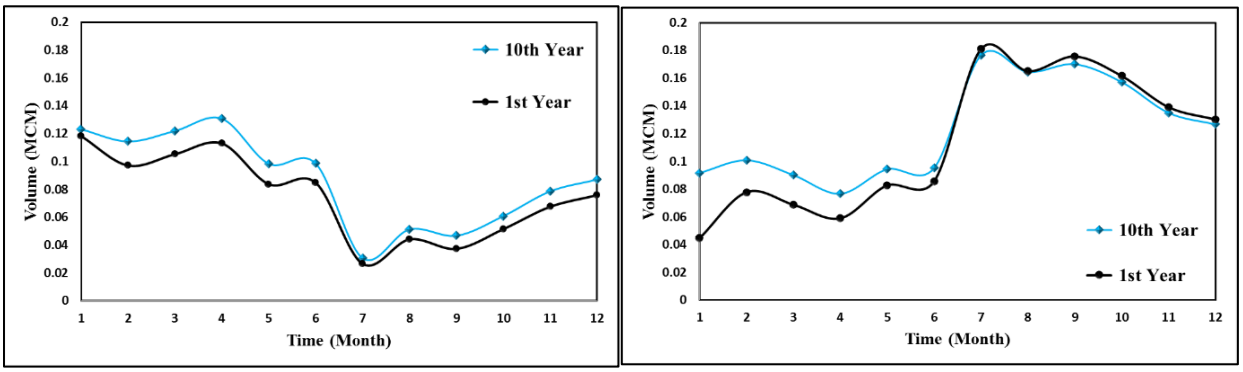


Fig. 10- Discharge for Scenario 1: (a) from the lake to the aquifer, and (b) from the aquifer to the lake

شکل ۱۰- تخلیه در سناریو ۱: (الف) از دریاچه به آبخوان و (ب) از آبخوان به دریاچه

بررسی‌ها نشان می‌دهد که در سال‌های ۱۰ و ۲۰ نسبت به سال اول، افزایش تخلیه به آبخوان به ترتیب به اندازه ۱۷ و ۶/۵ درصد اتفاق افتاده و این میزان در سال ۳۰ به اندازه ۳ درصد کاهش داشته است. در این سال‌ها به ترتیب حجم آبی به اندازه ۵/۱۳۳، ۴/۶۷۲ و ۴/۲۶۴ میلیون مترمکعب به آبخوان از دریاچه وارد شده است. همچنین، نتایج بررسی تغییرات تخلیه از آبخوان به دریاچه در طول ۳۰ سال نشان داد تخلیه به دریاچه در سال‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ نسبت به سال اول، به ترتیب به اندازه ۴۵، ۲۵/۵ و ۹ درصد افزایش یافته است. در این سال‌ها به ترتیب حجم آبی به اندازه ۳/۴۴۷، ۲/۹۸۴ و ۲/۵۸۸ میلیون مترمکعب از آبخوان خارج شده است. روند کاهشی این مقادیر مشهود است به طوری که با گذشت زمان و افزایش تراز آب زیرزمینی در آبخوان، اختلاف گرادیان دریاچه و آبخوان کمتر شده و تبادلات کاهش پیدا می‌کند.

سناریو ۳: اعمال ۱۰ درصد افزایش تغذیه خالص

در این سناریو، مقادیر تغذیه‌های خالص آبخوان عجب‌شیر در طول دوره شبیه‌سازی به اندازه ۱۰ درصد افزایش داده می‌شود. عوامل مختلفی مانند ترسالی، تغییر الگوی کشت، سیاست‌های یکباره نکاشت و مواردی مشابه می‌توانند چنین تغییری را باعث شوند. هیدروگراف آب زیرزمینی آبخوان ساحلی عجب‌شیر بر اساس سناریوی پایه و سناریوی حاضر در شکل ۱۳ آمده است. با توجه به این هیدروگراف، افزایش ۱۰ درصدی تغذیه خالص، باعث افزایش تراز آب زیرزمینی شده و افزایشی حدود ۱/۷۳۹، ۲/۰۸۳ و ۲/۱۵۴ متری به ترتیب در انتهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سال را باعث شده است. همچنین تراز متوسط آب زیرزمینی را از ۱۲۷۷/۲۹ متر (سناریو پایه) به ۱۲۷۹/۰۶۲ متر (سناریو حاضر) در ۳۰ سال افزایش داده است. بر اساس نتایج حاصل، در سال‌های ۱، ۱۰، ۲۰ و ۳۰، میزان تخلیه از دریاچه به آبخوان (شکل ۱۴، الف) و میزان تخلیه از آبخوان به دریاچه (شکل ۱۴، ب) محاسبه شده است.

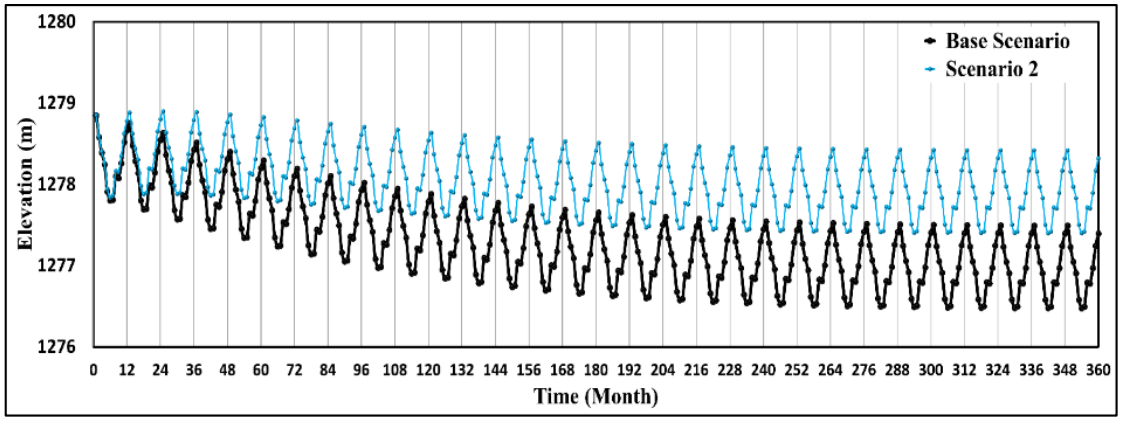
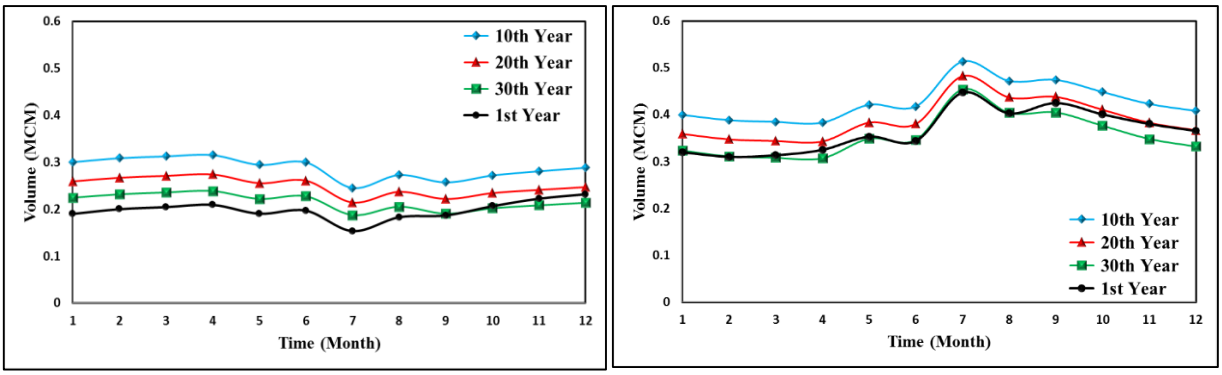


Fig. 11- Groundwater hydrograph of Ajabshir aquifer over 30-years period for scenario 2

شکل ۱۱- هیدروگراف آب زیرزمینی آبخوان عجب‌شیر در طول ۳۰ سال در سناریو ۲



(ب) (الف)

Fig. 12- Discharge for Scenario 2: (a) from the lake to the aquifer, and (b) from the aquifer to the lake

شکل ۱۲- تخلیه در سناریو ۲: (الف) از دریاچه به آبخوان و (ب) از آبخوان به دریاچه

در محاسبه میزان تغییرات تخلیه از دریاچه به آبخوان در طول ۳۰ سال، بررسی‌ها نشان می‌دهد که در سال ۱۰، ۲۰ و ۳۰، به ترتیب حجم آبی به اندازه ۵/۲۱، ۵/۶۵۷ و ۵/۴۹ میلیون مترمکعب به آبخوان وارد شده است. همچنین با بررسی تغییرات تخلیه از آبخوان به دریاچه در طول ۳۰ سال، مشاهده گردید که در سال ۱۰ نسبت به سال اول، تخلیه به دریاچه به اندازه ۵ درصد کاهش یافته که این میزان در سال‌های ۲۰ و ۳۰ به ترتیب به اندازه ۷ و ۳/۵ درصد افزایش داشته است. در این سال‌ها به ترتیب حجم آبی به اندازه ۴/۲۰۷، ۴/۷۱۸ و ۴/۵۷۴ میلیون مترمکعب از آبخوان خارج شده است.

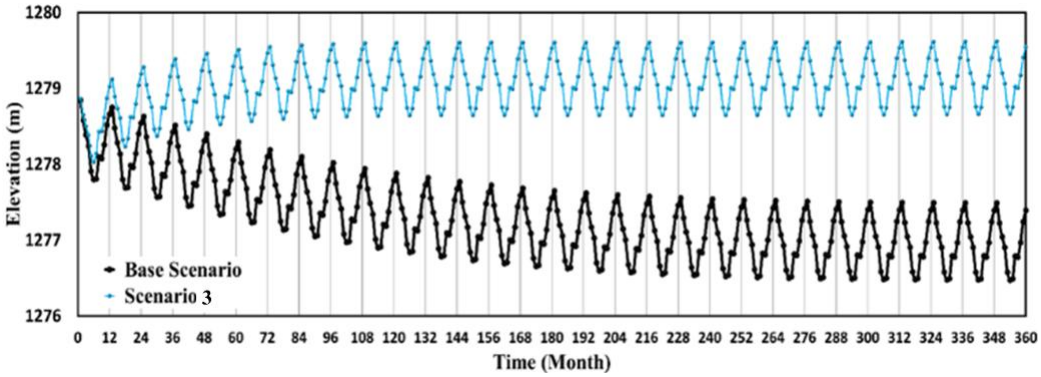
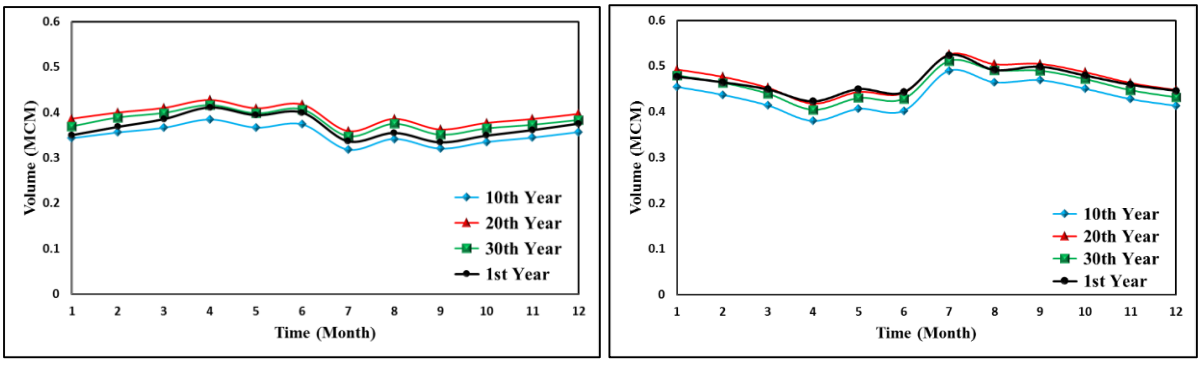


Fig. 13- Groundwater hydrograph of Ajabshir aquifer over 30-years period for scenario 3

شکل ۱۳- هیدروگراف آب زیرزمینی آبخوان عجب‌شیر در طول ۳۰ سال در سناریو ۳



(ب) (الف)

Fig. 14- Discharge for Scenario 3: (a) from the lake to the aquifer, and (b) from the aquifer to the lake

شکل ۱۴- تخلیه در سناریو ۳: (الف) از دریاچه به آبخوان و (ب) از آبخوان به دریاچه

سناریو ۴: اعمال ۱۰ درصد کاهش تغذیه خالص

در این سناریو، مقادیر تغذیه خالص آبخوان عجب‌شیر در طول دوره شبیه‌سازی به اندازه ۱۰ درصد کاهش داده می‌شود. هیدروگراف آب زیرزمینی آبخوان بر اساس کاهش ۱۰ درصدی تغذیه خالص در شکل ۱۵، نمایانگر کاهش تراز آب زیرزمینی در آبخوان می‌باشد که کاهشی حدود ۱/۷۳۸، ۲/۰۸ و ۲/۱۴۷ متری به ترتیب در انتهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سال تحت این سناریو را نشان می‌دهد. همچنین کاهش تراز متوسط آب زیرزمینی از ۱۲۷۷/۲۹ متر (سناریو پایه) به ۱۲۷۵/۵۲۷ متر (سناریو حاضر) قابل مشاهده است.

با توجه به شکل ۱۶ که میزان تبادل دریاچه و آبخوان را نشان می‌دهد، در سال‌های ۱۰، ۲۰ و۳۰، به ترتیب حجم آبی به اندازه ۶/۱۳۳، ۶/۲۸۲ و ۵/۶۴۴ میلیون مترمکعب به آبخوان وارد شده است. همچنین در این سال‌ها، نسبت به سال اول، کاهش تخلیه به دریاچه به ترتیب به اندازه ۲/۵، ۱ و ۱۶ درصد اتفاق افتاده است و به ترتیب حجم آبی به اندازه ۳/۹۴۸، ۴/۰۱۲ و ۳/۳۸۸ میلیون مترمکعب از آبخوان خارج شده است.

در این بخش با توجه به اهداف مطالعه حاضر، سناریوهای قابل طرح به صورت سناریوهای تغذیه از سطح و سناریوهای تغییر تراز دریاچه ارومیه مورد بررسی قرار گرفت و میزان تغییرات تراز آبخوان و اندرکنش صورت گرفته بین آبخوان و دریاچه به نمایش گذاشته شد که بررسی نتایج مربوط به این سناریوها با توجه به شکل‌ها اثبات می‌کند که سطح آب زیرزمینی آبخوان عجب‌شیر ارتباط مستقیمی با میزان تغذیه و تغییر تراز دریاچه دارد.

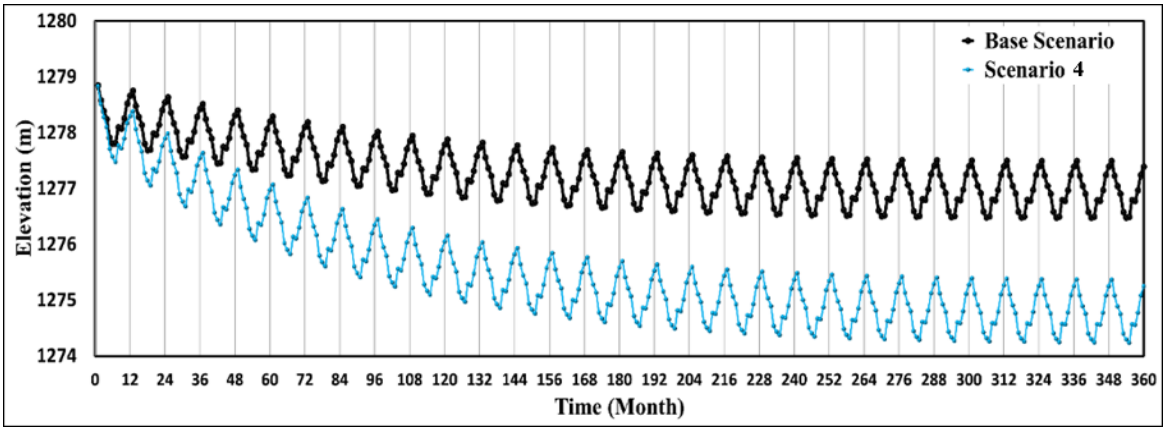
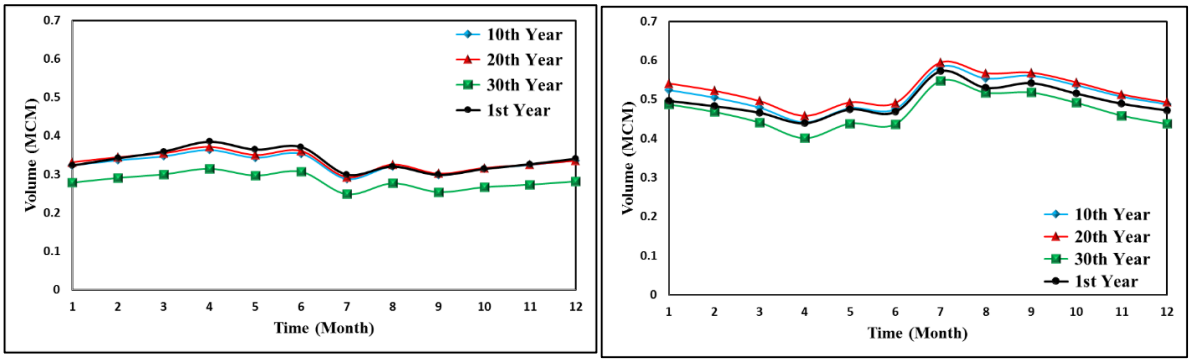


Fig. 15- Groundwater hydrograph of Ajabshir aquifer over 30-years period for scenario 4

شکل ۱۵- هیدروگراف آب زیرزمینی آبخوان عجب‌شیر در طول ۳۰ سال در سناریو ۴



(ب) (الف)

Fig. 16- Discharge for Scenario 4: (a) from the lake to the aquifer, and (b) from the aquifer to the lake

شکل ۱۶- تخلیه در سناریو ۴: (الف) از دریاچه به آبخوان و (ب) از آبخوان به دریاچه

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

برای ارزیابی میزان فعلی اندرکنش و پیش‌بینی وضعیت آینده آن در منطقه مطالعاتی عجب‌شیر، مدل عددی سه‌بعدی، ناهمگن، ناهمسان و لایه‌بندی شده سوترا در این مطالعه به کار گرفته شد. این مدل در دو حالت دائمی و غیردائمی در طول دوره ۸ ساله ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۳ اجرا، واسنجی و صحت‌سنجی شد. بررسی سناریوهای تغییرات تراز دریاچه ارومیه و تغذیه ناشی از سطح، نشان داد که کاهش سطح تراز دریاچه ارومیه با روند ۰/۴ متر بر سال، تراز متوسط آبخوان را به اندازه ۰/۲۵ متر پایین انداخته است و بررسی بیلان آب زیرزمینی در این سناریو در سال ۱۰ نسبت به سال اول گواه این مطلب بوده که کاهش این تراز، افزایش ۸ درصدی تخلیه از دریاچه به آبخوان و افزایش ۱۵ درصدی تخلیه به دریاچه را باعث شده است. از طرف دیگر، افزایش تراز دریاچه ارومیه به تراز اکولوژیک آن، باعث افزایش ۰/۷۵ متری تراز متوسط آبخوان شده و کاهش ۳ درصدی تخلیه به آبخوان و افزایش ۹ درصدی تخلیه به دریاچه را در طول ۳۰ سال سبب گردیده است. همچنین در سناریوی ۱۰ درصد افزایش تغذیه خالص، تراز متوسط آب زیرزمینی در طول ۳۰ سال به اندازه ۱/۸ متر افزایش داشته و بیلان آب زیرزمینی در این سناریو شاهد کاهش ۲ درصدی تخلیه به آبخوان و افزایش ۳/۵ درصدی تخلیه به دریاچه در سال ۳۰ نسبت به سال اول بوده است. از طرف دیگر، کاهش ۱۰ درصدی تغذیه خالص باعث کاهش ۱/۷ متری تراز متوسط آبخوان شده و کاهش ۵ درصدی تخلیه به آبخوان و کاهش ۱۶ درصدی تخلیه به دریاچه را سبب گردیده است.

۵- تشکر

از دانشگاه تربیت مدرس به خاطر حمایت مالی و از شرکت مدیریت منابع آب ایران، شرکت آب‌منطقه‌ای آذربایجان‌شرقی و شرکت مهندسین مشاور آب و توسعه پایدار به جهت همکاری در تأمین بخشی از داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز این مطالعه، تشکر و سپاسگزاری می‌شود.

پی‌نوشت‌ها

1-Coastal Aquifer
2-SUTRA
3-Parameter Estimation (PEST)
4-MODFLOW
5-Artificial Neural Network
6-Calibration
7-Verification
8-SEAWAT
9-Total Dissolved Solid
10-Transmissivity
11-Storage Coefficient
12-United States Geological Survey

۶- مراجع

Cobaner M, Yurtal R, Dogan A, and Motz LH (2012) Three dimensional simulation of seawater intrusion in coastal aquifers: A case study in the Goksu Deltaic Plain. Journal of Hydrology 464–465:262-280

Darvishi-Khatooni J, Lak R, and Mohammadi A (2013) Hydro-geochemical investigation of Urmia Lake water for 2007-2012. Earth Science, 24(95):239-252 (In Persian)

Iran Water Resources Management Company (2014) Updating water resources studies report of Urmia Lake basin, Ministry of Energy, East-Azerbaijan Regional Water Authority. Technical Report (In Persian)

Ketabchi H, and Ataie-Ashtiani B (2011) Development of combined ant colony optimization algorithm and numerical simulation for optimal management of coastal aquifers. Iran-Water Resources Research, 7(1):1-12 (In Persian)

Ketabchi H, Mahmoodzadeh D, Ataie-Ashtiani B, Werner AD, and Simmons CT (2014) Sea-level rise impact on fresh groundwater lenses in two-layer small islands. Hydrological Processes 28:5938-5953

Ketabchi H, Mahmoodzadeh D, Ataie-Ashtiani B, and Simmons CT (2016) Sea-level rise impacts on seawater intrusion in coastal aquifers: Review and integration. Journal of Hydrology 535:235-255

Ketabchi H, and Ataie-Ashtiani B (2015a) Review: Coastal groundwater optimization-advances, challenges, and practical solutions. Hydrogeology Journal 23:1129-1154

Ketabchi H, and Ataie-Ashtiani B (2015b) Assessment of a parallel evolutionary optimization approach for efficient management of coastal aquifers. Environmental Modelling & Software 74:21-38

Ketabchi H, and Ataie-Ashtiani B (2015c) Evolutionary algorithms for the optimal management of coastal groundwater: A comparative study toward future challenges. Journal of Hydrology 520:193-213

Ketabchi H (2015) Efficient simulation - optimization model for managing coastal groundwater. PhD Thesis, Sharif University of Technology, Tehran, Iran (In Persian)

Mahmoodzadeh D, Ketabchi H, Ataie-Ashtiani B, and Simmons CT (2014) Conceptualization of a fresh groundwater lens influenced by climate change: A modeling study of an arid-region island in the Persian Gulf, Iran. Journal of Hydrology 519:399-413

Gaza aquifer (Palestine). Hydrogeology Journal 14:713-728

Urmia Lake Restoration Program (2016) Drought and risks causes and necessity of Urmia Lake restoration (In Persian)

Voss CI, and Provost AM (2010) SUTRA: A model for saturated-unsaturated, variable-density groundwater flow with solute or energy transport. USGS Water-Resources Investigations Report, 02-4231

Werner AD, Bakker M, Post VE, Vandenbohede A, Lu C, Ataie-Ashtiani B, Simmons CT, and Barry DA (2013) Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges. Advances in Water Resources 51:3-26

Mohanty S, Jha MK, Kumar A, and Panda DK (2013) Comparative evaluation of numerical model and artificial neural network for simulating groundwater flow in Kathajodi–Surua Inter-basin of Odisha, India. Journal of Hydrology 495:38–51

Narayan KA, Schleeberger C, and Bristow KL (2007) Modelling seawater intrusion in the Burdekin Delta irrigation area, North Queensland, Australia. Agricultural Water Management 89:217-228

Post JC, and Lundin CG (2009) ICZM Guidelines for integrated coastal zone management. Environmentally Sustainable Development Studies and Monographs Series No. 9, The World Bank, Washington DC

Qahman K, and Larabi A (2005) Evaluation and numerical modeling of seawater intrusion in the