DOI: 10.22059/ijswr.2019.273887.668100 تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۰، شماره ۹، بهمن ۱۳۹۸ (ص ۲۱۵۳-۲۱۳۹)

Numerical Simulation of Lahijan-Chaboksar Coastal Aquifer: Investigating the Possible Future Scenarios

HADITHEH KAZEMI[1], HAMED KETABCHI[2*], JAMAL MOHAMMAD-VALI-SAMANI[1]

1. Water Structures Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
2. Water Resources Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

(Received: January. 19, 2019- Revised: June. 13, 2019- Accepted: June. 16, 2019)

ABSTRACT

Groundwater resources have been one of the main freshwater suppliers in arid and semi-arid areas of Iran. Due to population congestion in coastal areas, these resources have been threatened by both natural events and human activities. The present study considers the simulation of Lahijan-Chaboksar coastal aquifer in Guilan province, Iran. Hence, a three-dimensional, heterogeneous and anisotropic numerical model has been developed using SUTRA. The model has been applied after the calibration and verification procedures. Different possible future scenarios including the water level reduction in land boundary with/without increment net exploitation of aquifer, desalination plant wastewater disposal into aquifer/sea and their effects have been simulated and evaluated. Results showed that 10 m reduction of water level in land boundary, led to about 6 m reduction of average groundwater level within 30 years but it has no remarkable effect on aquifer's quality. At the same period, 10 m reduction of water level in dry border beside the increase of net exploitation of aquifer (5 times), led to 13 m reduction of average groundwater level and the quality of groundwater decreases. However, injecting the wastewater of desalination plant into the aquifer increases the groundwater level about 1.4 m, but the quality of groundwater extremely decreases, while discharge to the sea has no effect on the aquifer groundwater level and the quality.

Keywords: Groundwater, Caspian sea, Lahijan-Chaboksar coastal aquifer, Quantitative and qualitative conditions, SUTRA

* Corresponding Author's Email: h.ketabchi@modares.ac.ir

شبیه‌سازی عددی آبخوان ساحلی لاهیجان-چابکسر: بررسی گزینه‌های محتمل آینده

حدیثه کاظمی[۱]، حامد کتابچی*[۲]، جمال محمدولی‌سامانی[۱]

۱. گروه مهندسی سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲. گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۱- تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۳/۲۳- تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۳/۲۶)

چکیده

منابع آب زیرزمینی یکی از منابع اصلی تأمین‌کننده آب شیرین به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، مانند ایران بوده است. به دلیل تراکم جمعیت در نواحی ساحلی، این منابع هم از سوی عوامل طبیعی و هم انسانی مورد تهدید قرار می‌گیرد. در مطالعه حاضر، به شبیه‌سازی عددی آبخوان ساحلی لاهیجان-چابکسر پرداخته شده است. بدین منظور با استفاده از SUTRA، مدلی عددی سه‌بعدی، ناهمگن و ناهمسان توسعه داده شده و پس از واسنجی و صحت‌سنجی، مورد استفاده قرار گرفته است. اثرات کاهش تراز آبخوان در مرز خشکی، کاهش تراز آبخوان در مرز خشکی توأم با افزایش تخلیه خالص از آبخوان، تخلیه پساب دستگاه آب‌شیرین‌کن به آبخوان و دریا از نمونه گزینه‌های مختلف محتملِ آینده در منطقه بوده که شبیه‌سازی و ارزیابی شده است. نتایج نشان داد که کاهش ۱۰ متری تراز آب زیرزمینی در مرز خشکی، تراز متوسط آن در آبخوان را به اندازه ۶ متر در طول ۳۰ سال کاهش می‌دهد ولی تغییر محسوسی در وضعیت کیفی آبخوان به لحاظ شوری ایجاد نمی‌کند. همچنین کاهش ۱۰ متری تراز آب زیرزمینی در مرز خشکی توأم با افزایش ۵ برابری تخلیه خالص آبخوان منجر به افت ۱۳ متری تراز متوسط آب زیرزمینی در طول ۳۰ سال می‌گردد و کیفیت آب را هم کاهش می‌دهد. از طرفی تخلیه پساب آب‌شیرین‌کن به داخل آبخوان، ۱/۴ متر تراز متوسط آب زیرزمینی را در طول ۳۰ سال افزایش و کیفیت آن را به شدت کاهش داده ولی تخلیه آن به داخل دریا تغییری در تراز و وضعیت کیفی آب زیرزمینی ایجاد نکرده است.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، دریای خزر، آبخوان ساحلی لاهیجان-چابکسر، وضعیت کمیت و کیفیت، SUTRA

مقدمه

آب به عنوان عنصری مهم و تأثیرگذار در زندگی بشر تلقی می‌شود. رشد روزافزون جمعیت و به تبع آن افزایش نیاز به آب منجر به افزایش تقاضا و در نتیجه کاهش کیفیت منابع آب سطحی و زیرزمینی شده است. 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 قابل دسترس از 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، اگر آب مصرفی به وسیله آب سطحی تأمین نشود تقاضا برای تأمین آب از منابع آب زیرزمینی بیشتر می‌گردد (Ketabchi and Ataie-Ashtiani, 2011; Ketabchi, 2015). در مناطق ساحلی تراکم جمعیت بیشتر بوده و عوامل طبیعی و انسانی به صورت ترکیبی عمل می‌کنند (Post and Werner, 2017). آبخوان‌های ساحلی بیشتر در معرض آلودگی ناشی از فرآیندهای پیشروی آب شور[۱] قرار دارند که متأثر از برداشت‌های بی‌رویه آب زیرزمینی نیز است (Dokou and Karatzas, 2012).

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

* نویسنده مسئول: h.ketabchi@modares.ac.ir

1. Seawater intrusion

بهتری از فرآیندها حاصل می‌گردد و در نهایت پیش‌بینی‌های نزدیک‌تر به واقعیت صورت می‌پذیرد (Werner *et al*., 2013).

Navari and Ataie-Ashtiani (2006) اثر تغییرات سطح آب دریا بر پیشروی آب شور را در نوار ساحلی دریای خزر در محدوده رودخانه‌های سیاه‌رود تا آلش‌رود و با استفاده از مدل FEMWATER مورد مطالعه قرار دادند؛ در این مطالعه، ابتدا تغییرات بر روی یک مساله فرضی و سپس تغییرات به آبخوان واقعی اعمال گردید. بر اساس نتایج شبیه‌سازی آنها، در آبخوان واقعی تغییرات سطح آب دریا، تغییرات محسوسی را بر روی کیفیت آب زیرزمینی نشان نداد. Mahmoodzadeh *et al*. (2016) با استفاده از مدل SUTRA به بررسی رفتار پیشروی آب شور در آبخوان‌های ساحلی محصور پرداختند. مدل‌سازی دوبعدی سیستم آب زیرزمینی و تعیین مقدار پیشروی آب شور بر اثر افزایش تراز آب دریا و تغییرات نرخ تغذیه از اهداف کار آنها بود. نتایج آنها نشان داد اثر بلندمدت افزایش سطح آب دریا در آبخوان محصور، تأثیر ناچیزی بر مقدار پیشروی آب شور دارد اما با کاهش مقدار تغذیه در صورتی که تراز آب دریا افزایش نیافته باشد، میزان پیشروی آب شور بیشتر شده و با افزایش تغذیه مقدار پیشروی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. Farhoudi-Hafdaran and Ketabchi (2018) به شبیه‌سازی اندرکنش آبخوان ساحلی عجب‌شیر با دریاچه ارومیه با استفاده از مدل عددی SUTRA و به صورت سه‌بعدی، ناهمگن و ناهمسان پرداختند. پس از واسنجی و صحت‌سنجی، سناریوهایی برای بررسی اثر کاهش تراز دریاچه، افزایش آن به تراز اکولوژیک، افزایش یا کاهش تغذیه خالص آبخوان بر میزان تخلیه آب به آبخوان و برعکس در نظر گرفته شد و روی آثار آنها بررسی‌های لازم ارائه شد. Mostafaei-Avandari and Ketabchi (2019) از مدل تصمیم شبیه‌سازی -بهینه‌سازی آبخوان ساحلی دشت عجب‌شیر با بهره‌گیری از مدل عددی SUTRA و الگوریتم بهینه‌سازی فراکاوشی جامعه مورچه‌ها برای اتخاذ تصمیمات مدیریتی مدنظر استفاده کردند. دو مساله مدیریتی مورد بررسی در این مطالعه شامل توابع هدف و قیودی با رفتار متضاد بوده است که حداکثر کردن برداشت از آبخوان و کنترل پیشروی آب شور را سبب می‌شود. نتایج حاصل از اجرای مدل تصمیم آنها نشان داد که با تغییر الگوی برداشت از نواحی مختلف آبخوان در طول سال می‌توان به شرایط بهتری رسید.

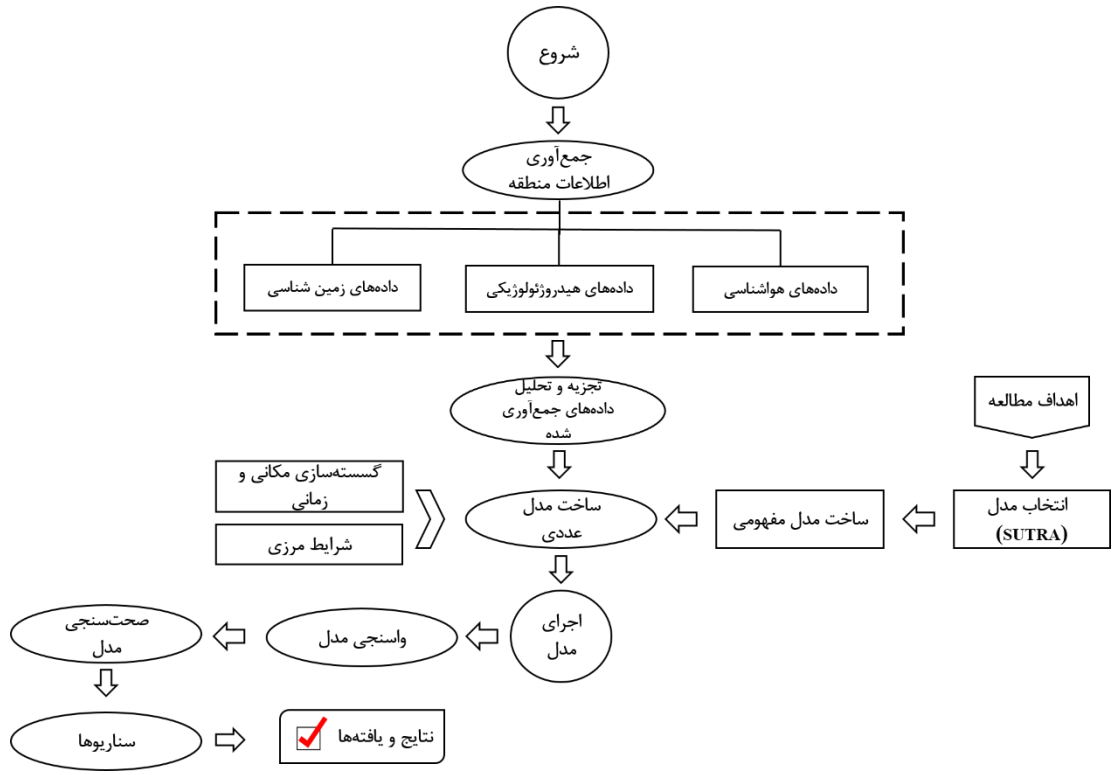
Qahman and Larabi (2006) به بررسی عددی آبخوانی به وسعت ۳۶۵ کیلومترمربع در نوار غزه فلسطین اشغالی به صورت سه‌بعدی و با مدل SEAWAT پرداختند. تراز آبخوان و کیفیت آب زیرزمینی در این مطالعه به صورت زمانی و مکانی، شبیه‌سازی شد و مدل هم در شرایط دائمی و هم در شرایط غیردائمی واسنجی گردید. نتایج آنها نشان داد با ادامه پمپاژ با نرخ فعلی، پیشروی آب دریا به داخل آبخوان شدیدتر خواهد شد. در مطالعه‌ای که توسط Narayan *et al*. (2007) انجام شد، آبخوانی در دلتای بوردکین استرالیا به صورت دوبعدی و با مدل SUTRA مدلسازی شد. شبیه‌سازی برای گستره‌ای از تغییرات مقادیر تغذیه، نرخ پمپاژ و هدایت هیدرولیکی انجام شد. نتایج حاصل از مدلسازی نشان از حساسیت بیشتر آبخوان به نرخ پمپاژ و تغذیه، در مقایسه با ویژگی‌های آبخوان از قبیل هدایت هیدرولیکی داشت. نتایج بررسی‌های آنها همچنین نشان داد که تأثیر نوسانات جزرومدی در سطح آب‌های زیرزمینی تنها محدود به مناطق بسیار نزدیک به ساحل است. Rozell and Wong (2010) اثرات تغییر اقلیم را در جزیره شلتر ایالات متحده آمریکا با استفاده از SEAWAT بررسی نمودند. دو سناریوی آینده اقلیمی با استفاده از پیش‌بینی تغییرات در بارش در محدوده ۲ درصد کاهش تا ۱۵ درصد افزایش و بالا آمدن سطح دریا از ۰/۱۸ متر تا ۰/۶۱ متر در طول قرن بعدی در نظر گرفته شد و روی آثار این تغییرات بر روی پیشروی آب شور دریا بحث گردید. Cobaner *et al*. (2012) به منظور مدلسازی سیستم آب زیرزمینی آبخوان ساحلی در دشت گوکسو واقع در سواحل مدیترانه‌ای ترکیه، از مدل سه بعدیSEAWAT بهره بردند. واسنجی مدل با استفاده از داده‌های میدانی اندازه‌گیری شده تراز آب زیرزمینی، هدایت الکتریکی، کل جامدات محلول و غلظت کلرید در ۲۳ چاه مشاهداتی در سال ۲۰۰۸ انجام گردید و نتایج مدلسازی نشان داد که حساسیت آبخوان به افزایش پمپاژ آب زیرزمینی زیاد بوده و مدل قابلیت استفاده جهت بررسی سیاست‌های مدیریتی بر اساس سناریوهای تغییر اقلیم و الگوی کشت را دارا می‌باشد. Sefelnasr and Sherif (2014) اثر افزایش تراز آب دریای مدیترانه بر روی پیشروی آب شور را با به کارگیری مدل FEFLOW در آبخوان دلتای نیل بررسی نمودند. در مطالعه آنها اثر تغییرات خط ساحلی مدنظر قرار گرفت و به عنوان عامل مهمی به جهت به زیر آب رفتن منطقه مورد مطالعه معرفی گردید. Ketabchi *et al*. (2016) یک بررسی سیستماتیک و جامع از مطالعات انجام شده در رابطه با بررسی اثرات تغییرات اقلیم از جمله افزایش تراز آب دریا، تغییرات نرخ تغذیه و تأثیر توأمان آنها بر روی منابع آب زیرزمینی ساحلی ارائه نمودند. در این مطالعه، علاوه بر بررسی جامع عوامل تأثیرگذار از جمله شرایط محیطی و فیزیکی آبخوان در مسائل آب زیرزمینی، به در نظر گرفتن تأثیرات توأمان این عوامل برای مدل‌سازی مسأله و نزدیکتر شدن به واقعیت تأکید شده است. *et* Aswed *al*. (2018) به دلیل برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی در آبخوان ساحلی طرابلس واقع در کشور لیبی و کاهش تراز آب

زیرزمینی در چاه‌های منطقه و در نتیجه شور شدن آب چاه‌ها به دلیل نفوذ آب شور دریا به داخل آبخوان، با استفاده از MODFLOW به مدل‌سازی عددی این آبخوان برای ۸۰ سال آینده (از سال ۲۰۲۰ تا ۲۱۰۰) تحت سه سناریوی پمپاژ پرداختند. مقایسه نتایج مدل‌سازی با داده‌های تراز سطح آب زیرزمینی برداشت شده از ۳۳ چاه انتخابی با خطای متوسط ۱۲ درصد برای پیش‌بینی مدل، نشان از دقت قابل قبول مدل مربوطه داشت.

اگر چه مطالعات زیادی در مورد تبادل آب زیرزمینی آبخوان ساحلی و دریا تحت تأثیر عوامل مختلف اقلیمی و انسانی انجام شده است. با این وجود علیرغم پیشرفت‌های زیادی که در این زمینه بدست آمده، هنوز ابهامات زیادی برای آینده در این خصوص وجود دارد. در ایران، آبخوان‌های ساحلی، بیشتر در کناره‌های دریای خزر، خلیج فارس و دریاچه‌های بزرگ داخلی نظیر دریاچه ارومیه وجود دارند و بررسی‌های بیشتر در این نواحی امری مهم و الزامی است. هدف این مطالعه، شبیه‌سازی وضعیت کمی و کیفی سیستم آب زیرزمینی آبخوان ساحلی در قسمتی از حوضه لاهیجان-چابکسر با استفاده از مدل عددی SUTRA و پیش‌بینی وضعیت آبخوان ساحلی مورد مطالعه تحت تأثیر گزینه‌های مختلف محتمل در آینده می‌باشد. این مطالعه به صورت یک سیستم سه‌بعدی، ناهمگن و ناهمسان و به منظور بررسی تغییرات میزان پیشروی آب دریا، تغییرات غلظت آلایندگی آبخوان (شوری) و تغییرات تراز آب زیرزمینی در آبخوان مطالعاتی تحت تأثیر سناریوهای اعمالی انجام شده است. در این مطالعه، پس از توسعه مدل عددی، مدل در دو دوره واسنجی (۱۳۹۰-۱۳۸۲) و صحت‌سنجی (۱۳۹۰-۱۳۹۳) مورد ارزیابی قرار گرفته و ضمن تعریف گزینه‌های محتمل مشتمل بر کاهش تراز آب زیرزمینی در مرز خشکی، کاهش تراز آب زیرزمینی در مرز خشکی توأم با افزایش تخلیه خالص از آبخوان، تخلیه پساب حاصل از شیرین‌سازی آب دریا به آبخوان از طریق چاه تزریقی و تخلیه آن به دریا در قسمت میانی خط ساحلی، اثر هر کدام از آنها بر وضعیت کمی و کیفی آبخوان مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

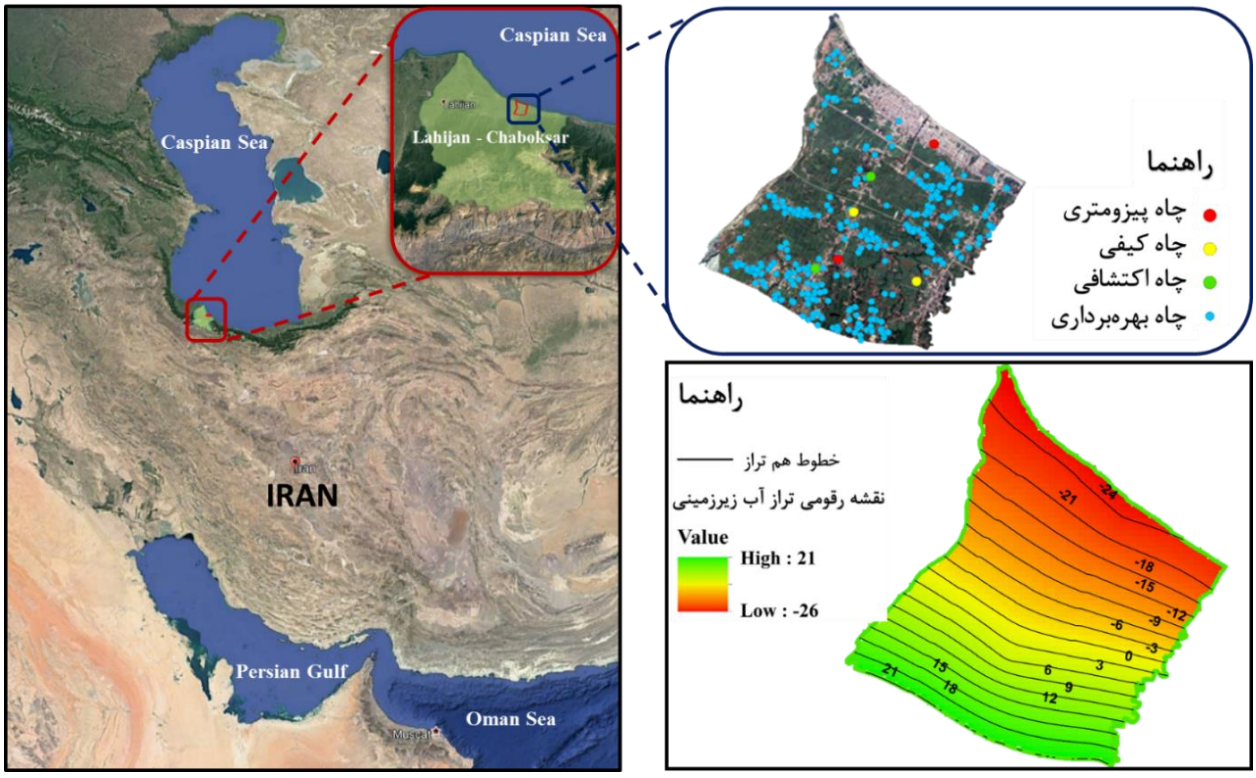
در شکل (۱) مراحل مدلسازی نشان داده شده است. اطلاعات مورد نیاز منطقه، پس از تجزیه و تحلیل، برای مدلسازی آبخوان با مدل SUTRA مورد استفاده قرار گرفته و پس از آن برای واسنجی مدل از الگوریتم PEST که یک الگوریتم خودکار واسنجی بر مبنای کاهش گرادیان خطای ایجاد شده در مدل می‌باشد، استفاده شده است. در نهایت پس از صحت‌سنجی پارامترهای تحت واسنجی، به بررسی سناریوهای مدنظر پرداخته شده است.



شکل ۱. روند مدل‌سازی آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی

محدوده مطالعاتی

محدوده مطالعاتی در نظر گرفته شده در این مطالعه، بخشی از حوضه آبریز لاهیجان-چابکسر (شرق گیلان) به مساحت ۳۰ کیلومترمربع است که بین طول‌های شرقی ۵۰ درجه و ۲۱ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۲۶ دقیقه و بین عرض‌های شمالی ۳۷ درجه و ۲ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۶ دقیقه قرار گرفته است. در شکل (۲) موقعیت قرارگیری محدوده مطالعاتی، چاه‌های موجود در منطقه و خطوط هم‌تراز آب زیرزمینی به صورت میانگین (۱۳۸۲-۱۳۹۳) نشان داده شده است. مرزهای محدوده در نظر گرفته شده برای مدلسازی از سمت شمال به دریای خزر، از شرق و غرب به ترتیب به رودخانه‌های پلرود و خشکه‌رود و از جنوب، به خشکی‌های بالادست محدود گردید. میزان دمای سالانه درازمدت در این محدوده ۱۶/۴ درجه سانتیگراد و میزان تبخیر سالانه ۱۰۷۵/۳ میلی‌متر است. همچنین میزان بارندگی سالانه ۱۳۲۹/۸ میلی‌متر می‌باشد (Iran Water Resources Management Company, 2016). از نظر کاربری اراضی، ۶۰ درصد از اراضی موجود در این محدوده، اراضی زراعی و شالیزار و ۴۰ درصد باقیمانده دارای بافت شهری و روستایی است که شهر کلاچای هم در بخش شمالی منطقه واقع می‌باشد. جنوب دشت مطالعاتی با ارتفاع ۲۸ متر از سطح دریاهای آزاد بالاترین نقطه ارتفاعی بوده و ساحل دریای خزر با ارتفاع ۲۶- متری از سطح دریاهای آزاد پایین‌ترین ارتفاع را دارا می‌باشد. سطح آب زیرزمینی در این ناحیه دارای نوسانات فصلی بوده و روند کلی هیدروگراف‌ها حالت تعادل را نشان می‌دهند و با توجه به نقشه خطوط میانگین هم‌تراز آب زیرزمینی، وضعیت آبخوان تقریباً ثابت بوده و شرایط آب زیرزمینی در این منطقه بحرانی نمی‌باشد. مطابق نقشه هم‌عمق آب زیرزمینی منطقه، بیشترین عمق آب زیرزمینی در محدوده مدل‌سازی مربوط به نواحی جنوب غربی با عمق ۵/۵ تا ۶ متر است. جهت جریان آب زیرزمینی در این محدوده تابع شیب توپوگرافی سطح زمین از جنوب به شمال می‌باشد و خروجی سفره بطور مستقیم وارد دریای خزر می‌شود. تراز آب زیرزمینی در جنوب منطقه ۲۱ متر (مرز خشکی) و در نواحی ساحلی ۲۶- متر است.

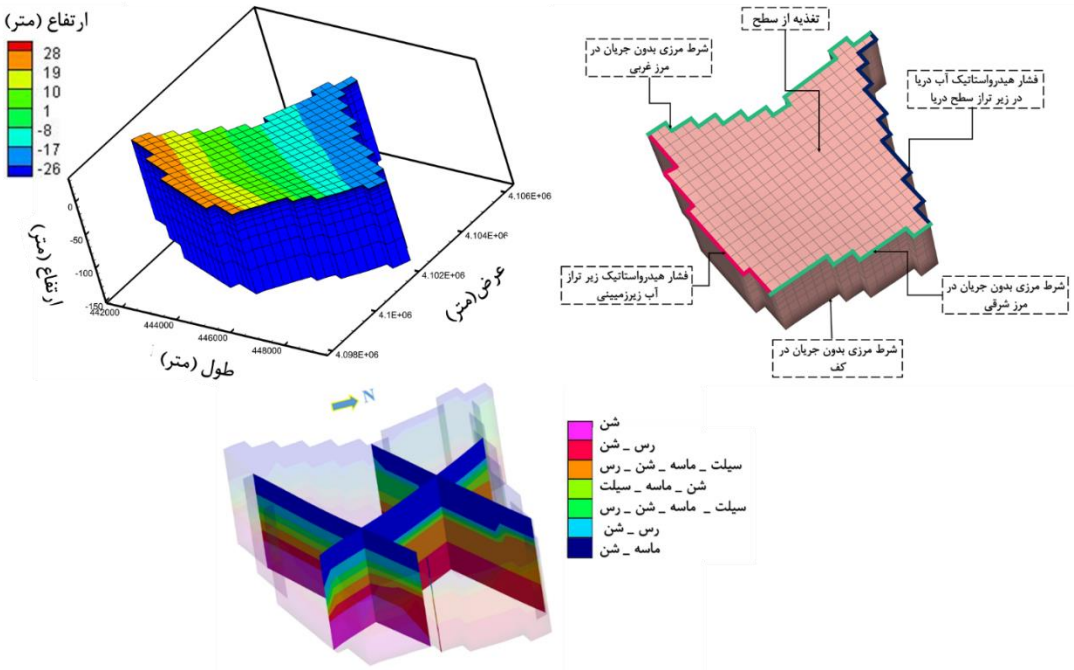


شکل ۲. محدوده مطالعاتی، چاه‌های موجود و نقشه متوسط (دوره ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۳) تراز آب زیرزمینی

همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است، تنها دو چاه پیزومتری در منطقه مورد مطالعه وجود دارد. به همین دلیل برای تعیین مرزهای محدوده و همچنین درون‌یابی جهت ترسیم خطوط هم‌مقدار تراز، عمق و غیره از اطلاعات مربوط به چاه‌های خارج از منطقه (حدوداً ۴۰ چاه) نیز استفاده شده است.

بر اساس اطلاعات Iran Water Resources Management Company (2016)، در منطقه مورد مطالعه منحنی‌های هم-قابلیت انتقال رسوبات آبرفتی بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ مترمربع بر روز

متغیر می‌باشد. همچنین با توجه به اطلاعات چاه‌های اکتشافی موجود، بیشترین مقدار ضریب ذخیره ۰/۶۷ درصد در نواحی غربی و کمترین مقدار آن ۰/۰۳ درصد مربوط نواحی جنوبی است. این ضریب در نواحی مرکزی و شرقی نیز به طور متوسط برابر ۰/۲ درصد می‌باشد. با استفاده از لوگ حفاری چاه‌های اکتشافی موجود در منطقه و اطراف آن و بررسی ضخامت خاک‌ها، نحوه لایه‌بندی آبخوان بدست آمده است. زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی از ۷ لایه اصلی از ترکیب چهار نوع رس، سیلت، ماسه و شن تشکیل شده است. نمای سه‌بعدی از لایه‌بندی محدوده مطالعاتی در شکل (۳) نمایش داده شده است.



شکل ۳. نمای سه‌بعدی سیستم آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی، مرزهای محدوده و لایه‌بندی خاک منطقه

مدل عددی مورد استفاده

برای پیش‌بینی وضعیت آب شور و شیرین در آبخوان ساحلی در پاسخ به عوامل گوناگون مؤثر بر آن و نیز تحلیل و بررسی سناریوهای مختلف به منظور پیشگیری از پیشروی آب شور و اتخاذ راهبردهای لازم برای حفاظت و بهبود کیفیت آب زیرزمینی، از ابزار مدلسازی عددی استفاده می‌شود.

در این راستا، مدل شبیه‌سازی انتقال املاح آلاینده (شوری) و جریان اختلاط‌پذیر اشباع/غیراشباع و سه‌بعدی SUTRA (Voss and Provost, 2010)، برای شبیه‌سازی عددی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل توسط USGS[2] ارائه شده است. SUTRA با استفاده از حل عددی معادله موازنه جرم با در نظر گرفتن اثرات چگالی سیال جریان آب زیرزمینی و انتقال املاح آلاینده را شبیه‌سازی می‌کند.

توسعه مدل عددی

در گسسته‌سازی مدل سه‌بعدی دشت مطالعاتی، دامنه مدل‌سازی از ۳۵۶۴ جزء و ۴۴۷۶ گره محاسباتی با ابعاد مساوی ۳۰۰ متر در صفحه افقی و ابعاد متغیر ۰/۵ تا ۳۵/۴ 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 لحاظ شده است. شکل (۳) نمای سه‌بعدی از محدوده مطالعاتی و مرزهای محدوده را نشان می‌دهد. برای دامنه مدل-سازی موردنظر، مرز فشار هیدرواستاتیک به تمامی گره‌های محاسباتی پایین‌تر از تراز آب دریا و در تماس با این آب و همچنین بخش‌هایی از مرز خشکی بر اساس تراز آب زیرزمینی مشاهده شده، وارد می‌شود.

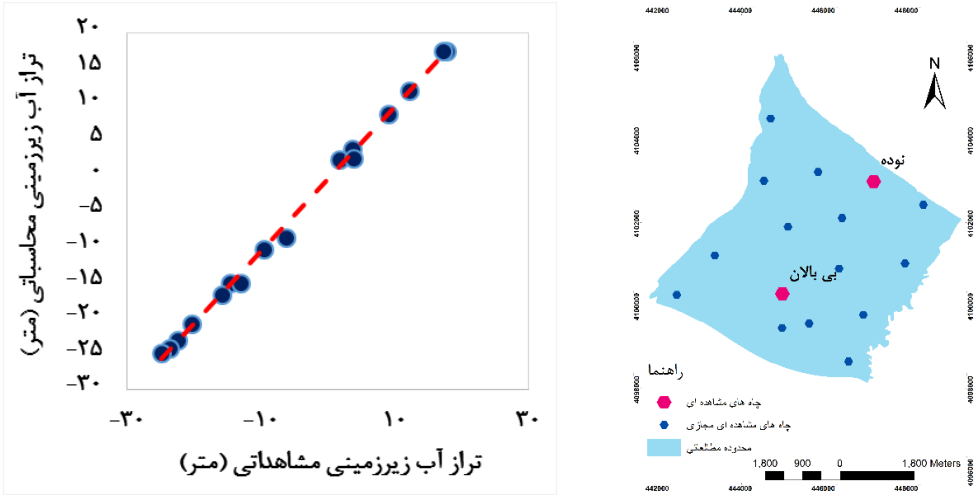
جریان ورودی از این گره‌ها به داخل آبخوان، در بخش ساحلی دارای غلظت شوری آب دریای خزر معادل ۰/۰۱۳ کیلوگرم بر کیلوگرم (معادل حدود ۱۳۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر که برابر یک سوم مقدار شوری دریاهای آزاد است) و در مرز خشکی دارای غلظت آلاینده ورودی از بالادست و ارتفاعات محدوده می باشد که از روی خطوط هم‌غلظت شوری سالانه تنظیم و به مدل

1. United States Geological Survey

اعمال گردید. شرایط مرزی سطح زمین در مرز فوقانی به عنوان مرز تغذیه/تخلیه آبخوان است. آب تغذیه/تخلیه شده از این مرز، آب با چگالی‌های متفاوت به دلیل غلظت‌ها و درصدهای متفاوت آلایندگی موجود در آب بارش و آب برگشتی حاصل از کاربری-های کشاورزی، شرب و صنعت می‌باشد. در مرز تحتانی کف و در مرزهای شرقی (رودخانه پلرود) و غربی (رودخانه خشکه‌رود) با توجه به تحلیل بردارهای جریان و نقشه خطوط هم‌تراز آب زیرزمینی شرط مرزی بدون جریان مدنظر قرار می‌گیرد و این مرزها نفوذناپذیر فرض شده‌اند.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل عددی

در شبیه‌سازی به صورت دائمی، مدل بر اساس اطلاعات متوسط سالانه پارامترهای تغذیه و تخلیه و متوسط تراز آب زیرزمینی در طول دوره ۱۱ ساله (۱۳۸۲-۱۳۹۳)، اجرا می‌شود. در مرحله اجرای مدل، اطلاعات تخلیه و تغذیه در مدل لحاظ می‌شوند که برای این منظور میزان تغذیه ناشی از بارش، تخلیه ناشی از چاه-های بهره‌برداری و آب برگشتی اعمالی در نظر گرفته می‌شود. برای تسهیل در روند واسنجی مدل، از الگوریتم PEST استفاده شده است. بر اساس فرآیند واسنجی، مشخصه‌های واسنجی به مقدار هدایت هیدرولیکی افقی لایه‌های مختلف آبخوان و تخلیه خالص منطقه (مجموع تغذیه ناشی از بارش، آب برگشتی از چاه‌ها و تخلیه از چاه‌ها) محدود است. مقادیر هدایت هیدرولیکی قائم لایه‌ها، یک مرتبه کوچک‌تر از مقادیر افقی لحاظ شده است (Voss and Provost, 2010). با توجه به اینکه نمی‌توان تنها به اطلاعات دو چاه موجود اکتفا کرد، جهت کنترل و مقایسه نتایج محاسباتی و مشاهدات، علاوه بر دو چاه موجود، ۱۴ نقطه کنترلی به عنوان چاه مشاهده‌ای مجازی در منطقه مطالعاتی در نظر گرفته شد. این ۱۶ نقطه در شکل (۴- الف) نشان داده شده است. مطابق با شکل (۴- ب) مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) ۰/۷۸ متر بدست آمد. همچنین اختلاف مقدار اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در دو چاه مشاهداتی واقع در منطقه (موقعیت آنها در شکل ۲ نشان داده شده است) به طور متوسط ۰/۵ متر برآورد شده است. با توجه به خروجی مدل دائمی آبخوان ساحلی مورد مطالعه که در جدول (۱) نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که میزان ورودی و خروجی دشت برابر بوده و بیلان در حالت تعادل قرار دارد. برای شبیه‌سازی غیردائمی اطلاعات مربوط به تغذیه و تخلیه از آبخوان به صورت ماهانه برای هر ماه در دوره موردنظر وارد مدل شد. مدل مورد نظر در طول دوره ۸ساله (از سال آبی ۱۳۸۳-۱۳۸۲ تا سال آبی ۱۳۹۱-۱۳۹۰) به صورت ماهانه اجرا شده و به صورت کمی و کیفی، مورد واسنجی قرار گرفت و در طول دوره ۳ساله (از سال آبی ۱۳۹۱-۱۳۹۰ تا سال آبی ۱۳۹۳-۱۳۹۲) صحت‌سنجی شد.



(الف) (ب)

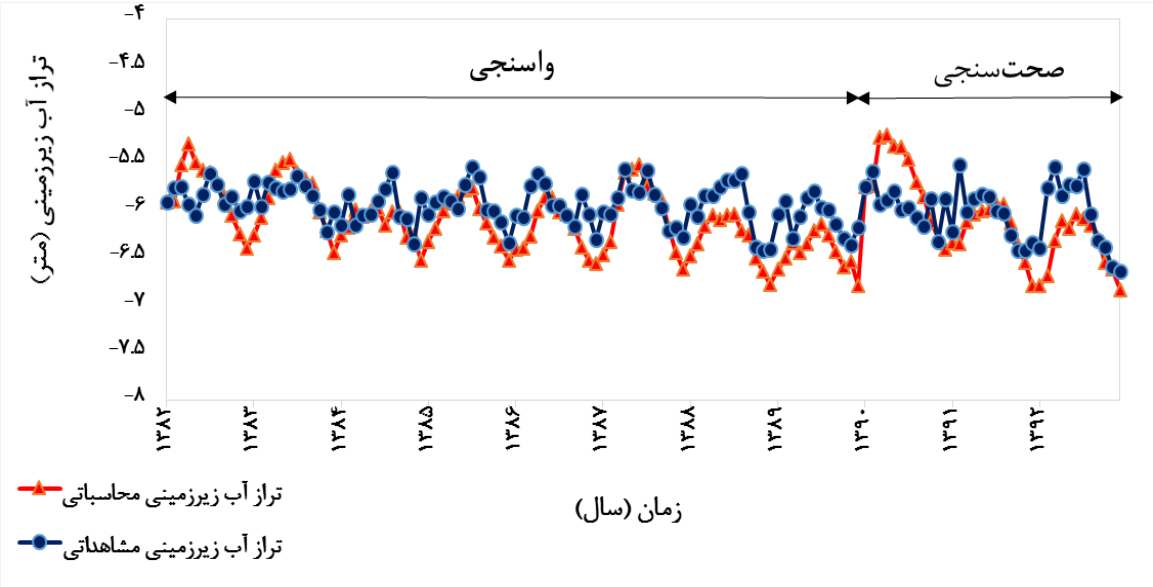
شکل ۴ – الف. چاه‌های مشاهده‌ای در منطقه و ب. نمودار پراکندگی سطح آب زیرزمینی مشاهده‌ای و محاسباتی

در این مطالعه، واسنجی مدل کمی با به کارگیری مقادیر هدایت هیدرولیکی واسنجی شده در مرحله قبلی و تعدیل مقادیر تغذیه و تخلیه آبخوان با استفاده از الگوریتم PEST صورت گرفت. بر اساس هیدروگراف واسنجی کمی در شکل (۵)، تطابق مطلوبی بین سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده بدست آمد. به طور میانگین خطای میان مقادیر سطح آب زیرزمینی مشاهده‌ای و محاسبه شده برابر ۰/۱۸ متر می‌باشد. همچنین حداکثر خطای مشاهده شده مربوط به دی ماه سال ۱۳۸۲ برابر

۰/۵ متر است که مقدار محاسبه شده بیشتر از مقدار مشاهده‌ای است. برای صحت‌سنجی غیردائمی، مطابق با دوره واسنجی، مقدار تخلیه 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 دائمی فرض شدند. مطابق با شکل (۵) هیدروگراف شبیه‌سازی شده، تطابق مطلوبی با هیدروگراف اندازه‌گیری شده متناظر آن داشته است. به طور میانگین خطای میان مقادیر سطح آب زیرزمینی مشاهده‌ای و محاسبه شده برابر ۰/۲۹ متر می‌باشد. همچنین حداکثر خطای مشاهده شده مربوط به ماه آبان سال ۱۳۹۲ برابر ۰/۷۸ متر است که مقدار محاسبه شده کمتر از مقدار مشاهده‌ای است.

جدول ۱. بیلان آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده توسط مدل در حالت دائمی

تعادل سالانه آب زیرزمینی					
حجم آب خروجی (میلیون مترمکعب)			حجم آب ورودی (میلیون مترمکعب)		
۶/۰۷	مرز دریا	خروج از جریان زیرزمینی	۴/۲۶	تغذیه ناشی از بارندگی	
۰	مرز خشکی		۰/۹۳	مرز دریا	ورود به آب زیرزمینی
۷/۷۹	برداشت چاه‌ها پس از کسر سهم برگشتی به آبخوان		۸/۶۸	مرز خشکی	



شکل ۵. هیدروگراف آب زیرزمینی آبخوان لاهیجان-چابکسر در شرایط واسنجی و صحت‌سنجی

واسنجی مدل کیفی آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی، با تنظیم مقادیر غلظت دارای عدم قطعیت در مرزهای خشکی، مقادیر غلظت آب تخلیه شده توسط چاه‌های بهره‌برداری و ورودی توسط آب برگشتی و آب بارش با استفاده از الگوریتم PEST، صورت گرفت. مقدار جذر میانگین مربعات خطا برابر با ۵۹ میلی‌گرم بر لیتر و حداکثر خطا ۲۵۲ میلی‌گرم بر لیتر برآورد گردید.

در جدول (۲) مقادیر واسنجی شده هدایت هیدرولیکی در جهت افقی و قائم نشان داده شده است. همچنین برای واسنجی تخلیه خالص منطقه، سطح محدوده به ۱۸ ناحیه تقسیم شده که عوامل مؤثر بر ناحیه‌بندی، زمین‌شناسی و نوع خاک منطقه، نوع کاربری و شیب اراضی می‌باشند. در شکل (۶) محدوده مطالعاتی و مقدار تخلیه خالص مربوط به هر یک از نواحی بر حسب مترمکعب در سال نشان داده شده است.

جدول ۲. مقادیر واسنجی شده هدایت هیدرولیکی لایه‌های مختلف آبخوان

شماره لایه خاک	جنس لایه‌های خاک	هدایت هیدرولیکی واسنجی شده (متربر روز)	
		هدایت هیدرولیکی افقی	هدایت هیدرولیکی قائم
۱	شن	۱۹/۹۵۸	۱/۹۹۵۸
۲	رس - شن	۰/۷۱۴	۰/۰۷۱۴
۳	سیلت – ماسه –شن - رس	۰/۷۷۸	۰/۰۷۷۸
۴	شن – ماسه - سیلت	۱۵/۰۳۴	۱/۵۰۳۴
۵	سیلت – ماسه – شن - رس	۱/۷۰۲	۰/۱۷۰۲
۶	رس – شن	۰/۳۵۳	۰/۰۳۵۳
۷	ماسه - شن	۱۰/۸	۱/۰۸

شکل ۶. ناحیه‌بندی محدوده مطالعاتی و مقدار تخلیه خالص مربوط به هر ناحیه بر حسب مترمکعب در سال

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 (۳) 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 ناشی از گزینه‌های محتمل در مدت ۳۰ سال آتی است. این سناریوها بر اساس تغییرات حداکثری محتمل بر اساس بررسی گزارش‌های موجود مانند Iran Water Resources Management Company (2016) تدوین شده‌اند. از این رو آخرین سال صحت‌سنجی (۱۳۹۳) به عنوان سناریو پایه در نظر گرفته شده است. در ادامه به بیان و تحلیل سناریوها و نتایج حاصل از آنها پرداخته می‌شود. برای این امر، حجم آب و جرم آلاینده وارد شده به منطقه و خارج شده از آن از مرزها ارائه شده و نتایج سناریوها در قالب حجم آب ورودی و خروجی آبخوان از مجموع مرزهای دریا و خشکی و همچنین جرم آلاینده ورودی به آبخوان از مرز خشکی و دریا و خروجی آبخوان از مرز دریا بیان شده است.

سناریو ۱ : کاهش تراز سطح آب زیرزمینی در مرز خشکی به اندازه ۱۰ متر

در این سناریو فرض شده تراز سطح آب زیرزمینی در مرز خشکی تحت تأثیر عواملی مانند افزایش بهره‌برداری و برداشت از چاه‌ها در بالادست منطقه مطالعاتی و یا افزایش تعداد کشت در سال، به اندازه ۱۰ متر افت کند. یکی از عوامل مهم بیلان آب زیرزمینی، حجم آب ورودی به آبخوان و خروجی از آن می‌باشد. با توجه به شکل (۷)، مشاهده می‌شود که در سال سی‌ام، کاهش ۱۰متری تراز مرز خشکی منجر به افزایش حجم آب ورودی به آبخوان از مجموع هر دو مرز دریا و خشکی به میزان ۳۶ درصد و افزایش ۲۶/۲ درصدی حجم آب خروجی از آن شده است. همچنین.

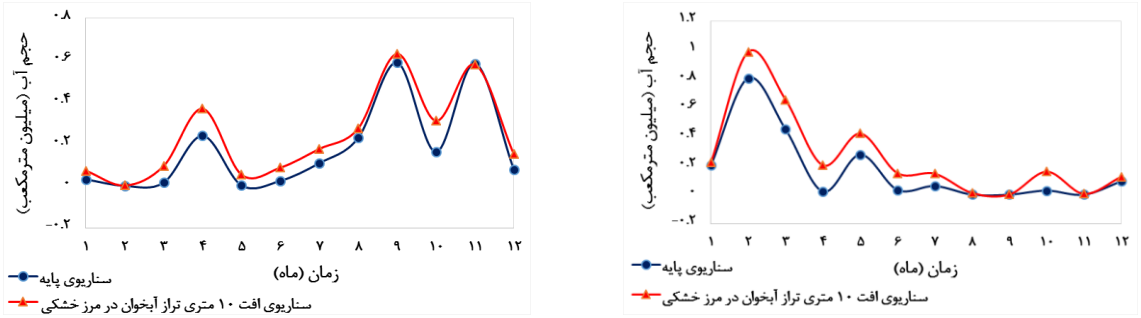
تغییرات غلظت در آبخوان موردنظر، تحت تأثیر جرم آلاینده ورودی و خروجی از مرز دریا و ورودی از مرز خشکی می‌باشد. مطابق با شکل (۸) میزان آلاینده ورودی به آبخوان در سال سی‌ام نسبت به سناریوی پایه افزایش ۳۷/۲ درصدی و میزان آلاینده خروجی از آن نسبت به سناریوی پایه افزایش ۱۴/۱درصدی داشت.

جدول ۳. خلاصه سناریوهای مورد بررسی

شماره سناریو	تعریف سناریو	توضیح
۱	کاهش تراز سطح آب زیرزمینی در مرز خشکی به اندازه ۱۰متر	افزایش بهره برداری از آب زیرزمینی در بالادست به دلیل برنامه‌های توسعه‌ای
۲	کاهش تراز سطح آب زیرزمینی در مرز خشکی به اندازه ۱۰ متر و ۵ برابر شدن تخلیه خالص آبخوان	افزایش بهره برداری از آب زیرزمینی هم در محدوده مطالعه و هم در بالادست به دلیل برنامه‌های توسعه‌ای
۳	سناریوی تزریق پساب دستگاه آب شیرین‌کن توسط یک چاه تزریقی در منطقه شهری	تأمین نیاز آبی شهر کلاچای از طریق آب دریا
۴	تخلیه پساب دستگاه آب شیرین‌کن به دریا در قسمت میانی خط ساحلی	تأمین نیاز آبی شهر کلاچای از طریق آب دریا

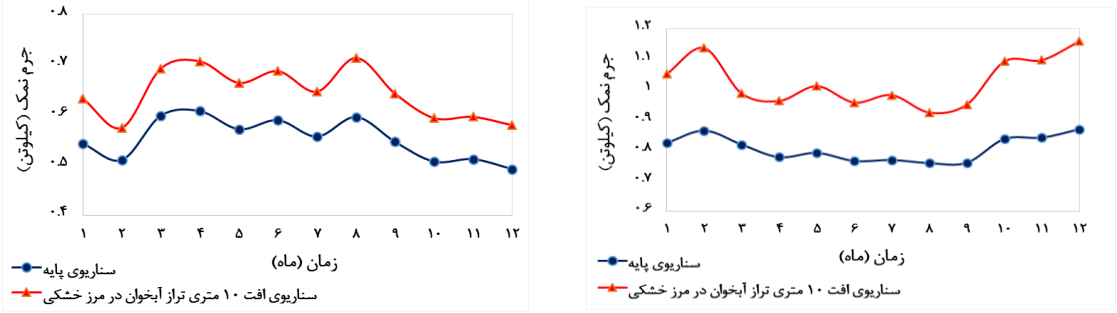
سناریو ۲ : کاهش تراز سطح آب زیرزمینی در مرز خشکی به اندازه ۱۰ متر و پنج برابر شدن تخلیه خالص آبخوان

با گذشت زمان افزایش نیاز و تقاضا در خصوص بهره‌برداری از آب برای مصارف مختلف از جمله کشاورزی، منجر به افزایش میزان برداشت آب زیرزمینی برای مصارف مختلف منطقه مورد نظر و یا نواحی بالادست آن می‌گردد. در این سناریو فرض شده است که میزان تخلیه خالص از آبخوان ساحلی منطقه مطالعاتی پنج برابر شده و از طرفی تراز آب زیرزمینی در مرز خشکی نیز ۱۰ متر کاهش یابد. مطابق با شکل (۹) حجم آب ورودی به آبخوان از مجموع هر دو مرز دریا و خشکی افزایش ۵۶/۳ درصدی و حجم آب خروجی از این مرزها افزایش ۹۲/۲ درصدی نسبت به سناریوی پایه داشت. از طرفی با توجه به میزان پیشروی آب شور و افزایش غلظت در نواحی نزدیک ساحل، افزایش غلظت در منطقه در طول ۳۰ سال رخ می‌دهد. با توجه به شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که جرم آلاینده ورودی به آبخوان افزایش ۹۳/۹ درصدی و جرم آلاینده خروجی از آن کاهش ۹۲/۷ درصدی داشته است. شکل (۱۱) مقطع سه‌بعدی شوری مربوط به سناریوی حاضر را نشان می‌دهد.



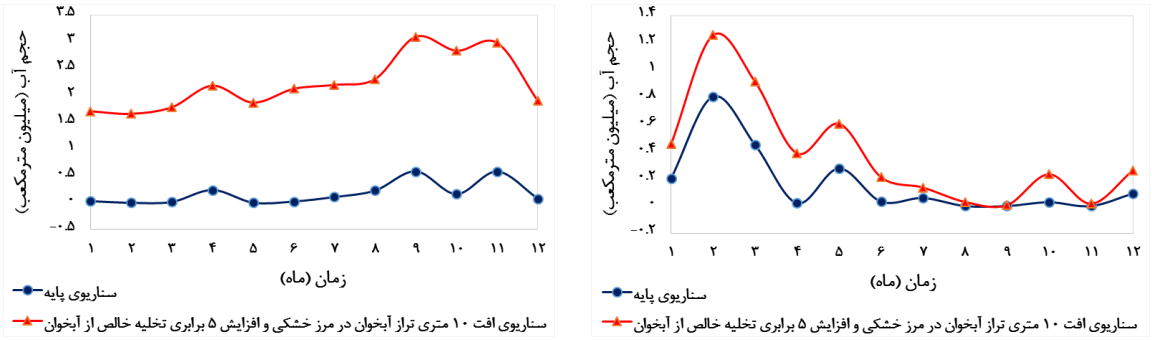
(الف) (ب)

شکل ۷. بیلان حجم آب سناریو ۱ : (الف) ورودی به آبخوان و (ب) خروجی از آبخوان



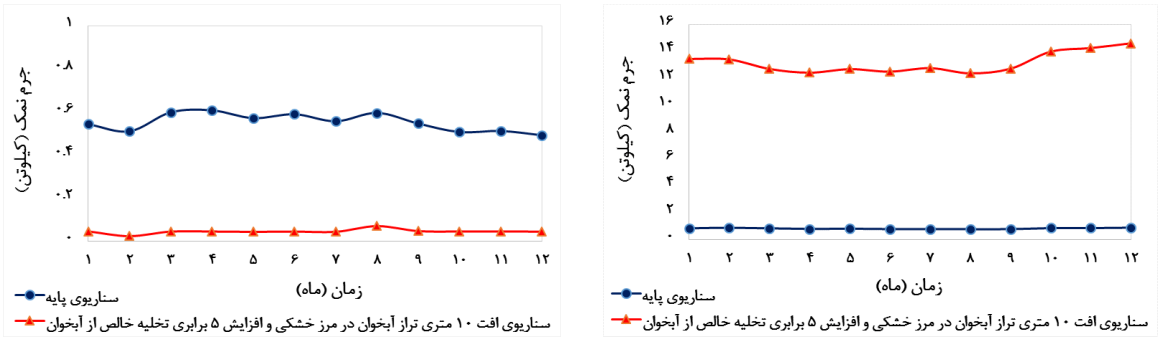
(الف) (ب)

شکل ۸. بیلان جرم آلاینده سناریو ۱ : (الف) ورودی به آبخوان و (ب) خروجی از آبخوان



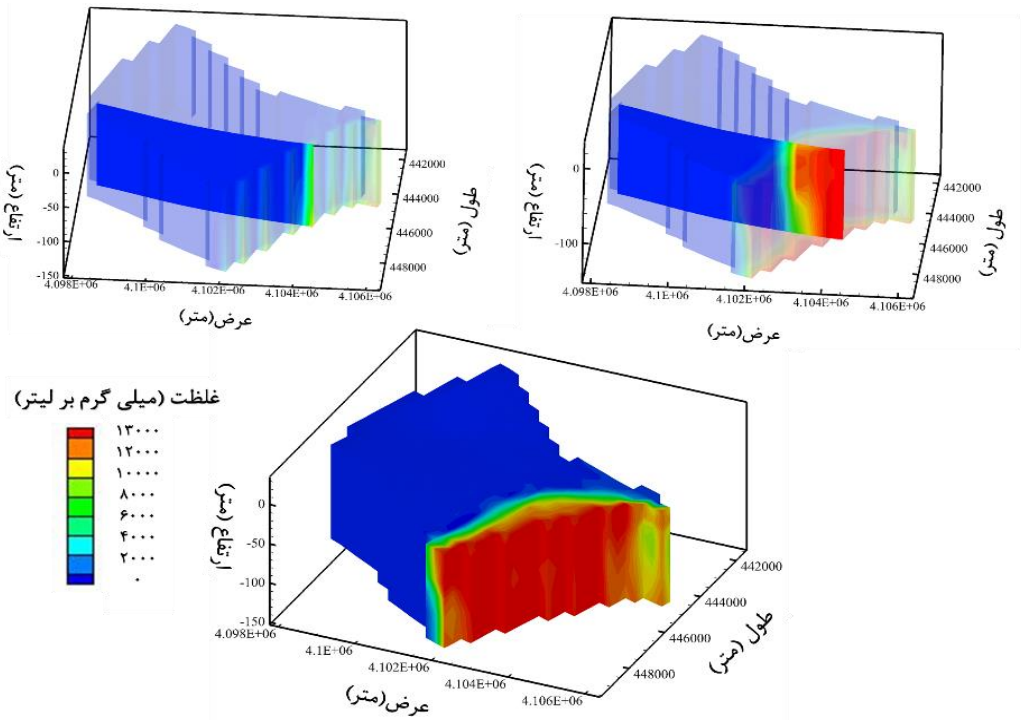
(الف) (ب)

شکل ۹. بیلان حجم آب سناریو ۲ : (الف) ورودی به آبخوان و (ب) خروجی از آبخوان



(الف) (ب)

شکل ۱۰. بیلان جرم آلاینده سناریو ۲ : (الف) ورودی به آبخوان و (ب) خروجی از آبخوان

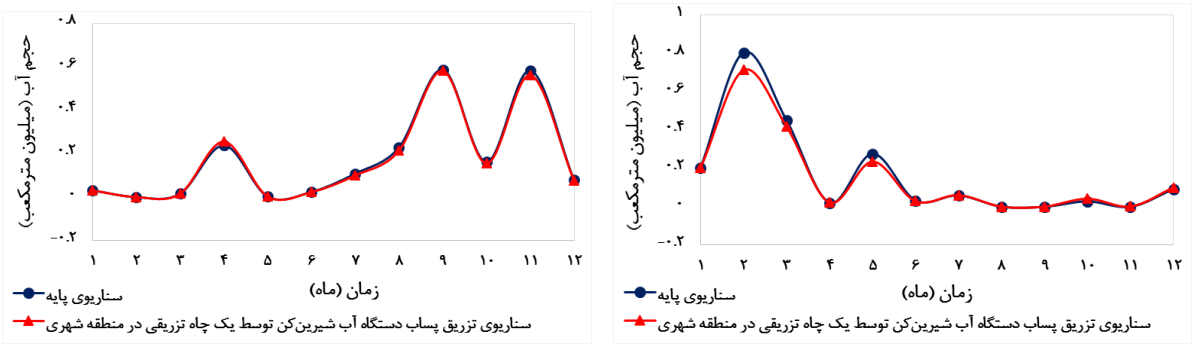


شکل ۱۱. نمای سه‌بعدی میزان شوری سناریوی ۲ در مقایسه با سناریوی پایه (شکل چپ)

سناریو ۳: سناریوی تزریق پساب دستگاه آب شیرین‌کن توسط یک چاه تزریقی در منطقه شهری

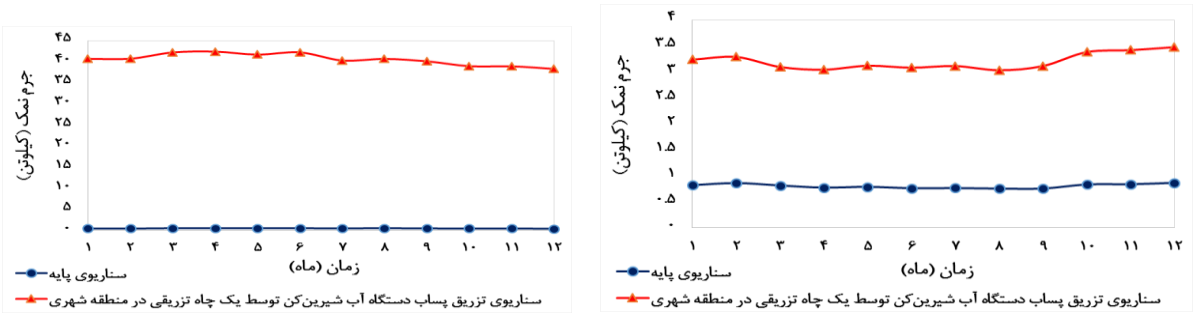
در این سناریو فرض شده است در منطقه مورد مطالعه دستگاه آب شیرین‌کن به منظور تأمین نیاز آبی منطقه از طریق شیرین‌سازی آب دریا احداث شود و پساب حاصل از این فرآیند به کمک یک چاه تزریقی در منطقه شهری تخلیه شود. برای این

منظور نیاز آبی شهر کلاچای بر اساس میزان جمعیت و نیاز آبی هر فرد تعیین شد. بعد از محاسبه مقدار آب مورد نیاز برای این شهر، حجم پساب حاصل از فرآیند شیرین‌سازی برآورد شده و با غلظت ۷۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر با توجه به مطالعه Odu *et al.* (2015) در مدل اعمال گردید. با توجه به بیلان حجم آب آبخوان در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود میزان آب ورودی به آبخوان ۷/۲ درصد و میزان خروجی از آن ۲/۱ درصد کاهش می‌یابد و به طور کلی تغییر محسوسی در ورودی و خروجی آبخوان مشاهده نمی‌شود. همچنین با توجه به بیلان جرم آلاینده ورودی و خروجی آبخوان در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود که تحت تأثیر این سناریو، جرم آلاینده ورودی به آبخوان افزایش ۷۴/۸ درصد و جرم آلاینده خروجی از آبخوان افزایش ۹۸/۶ درصدی داشته است. در شکل (۱۴) نمای سه‌بعدی پیشروی آب شور نشان داده شده است. به دلیل تزریق پساب، در بخشی از اطراف محل تزریق، غلظت شوری به بیش از شوری آب دریای خزر رسیده است که محدوده آن در شکل (۱۴) مشخص شده است.



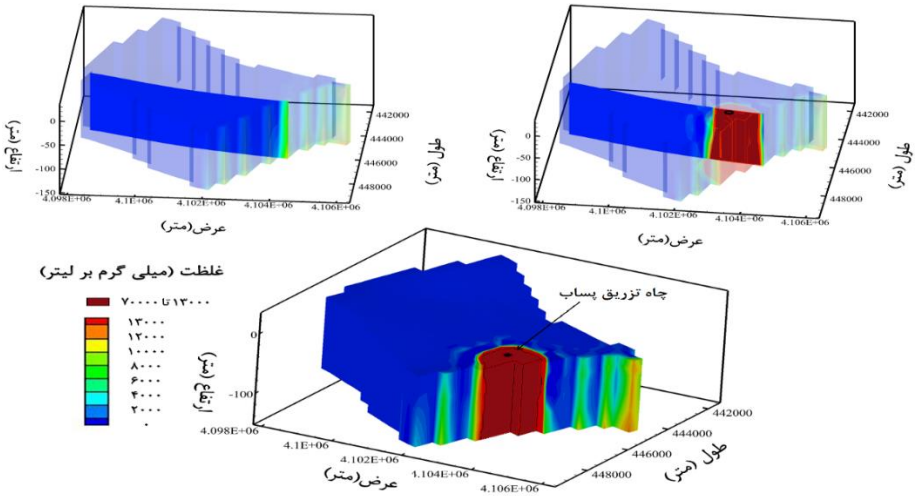
(ب) (الف)

شکل ۱۲. بیلان حجم آب سناریو ۳ : (الف) ورودی به آبخوان و (ب) خروجی از آبخوان



(ب) (الف)

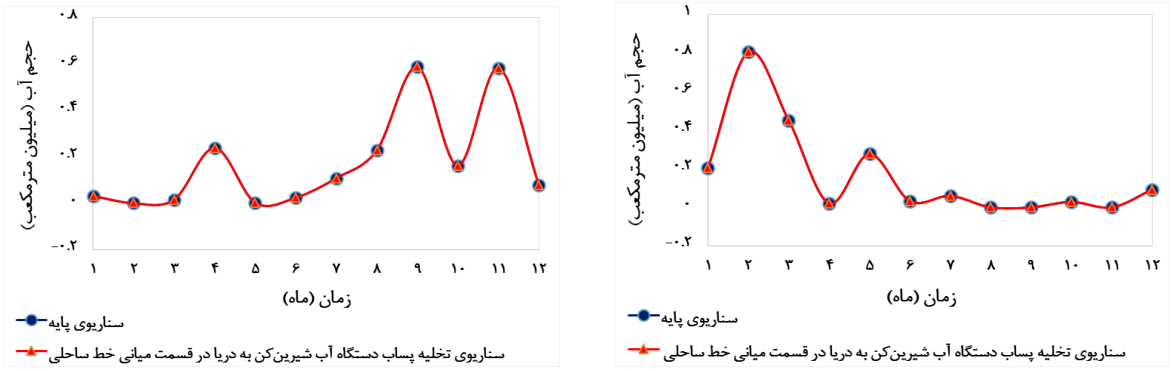
شکل ۱۳. بیلان جرم آلاینده سناریو ۳ : (الف) ورودی به آبخوان و (ب) خروجی از آبخوان



شکل ۱۴. نمای سه‌بعدی میزان شوری سناریوی ۳ در مقایسه با سناریوی پایه (شکل چپ)

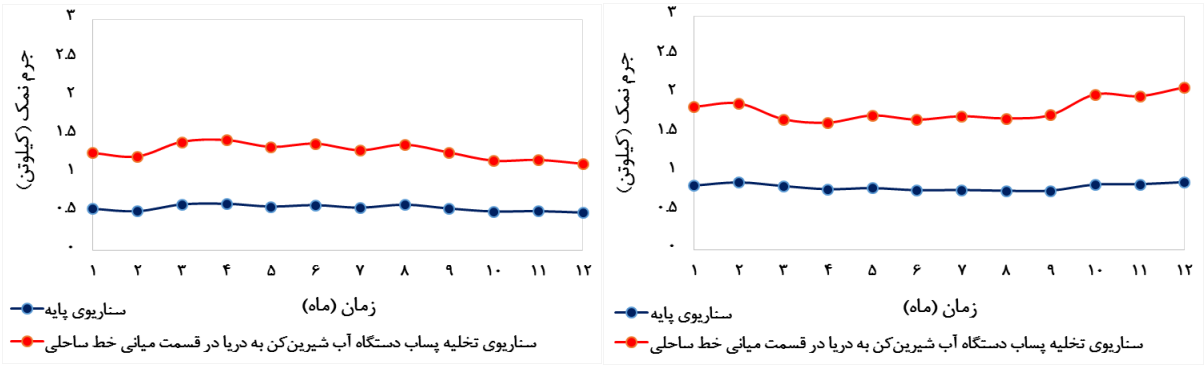
سناریو ۴: تخلیه پساب دستگاه آب شیرین‌کن به دریا در قسمت میانی خط ساحلی

در این سناریو فرض شده که پساب دستگاه آب شیرین‌کن فرضی، در قسمت میانی خط ساحلی به دریا تخلیه شود و بصورت موضعی غلظت آب دریا در این ناحیه را تغییر دهد. با توجه به بیلان جرم آب ورودی و خروجی آبخوان شکل (۱۵) مشاهده می‌شود که تخلیه پساب به داخل دریا تأثیری در تراز آبخوان و میزان ورود و خروج آب آبخوان ندارد. همچنین بر اساس بیلان جرم آلاینده در شکل (۱۶)، مشاهده می‌شود که به دلیل افزایش غلظت دریا ناشی از تخلیه پساب دستگاه آب شیرین‌کن به داخل آن، جرم آلاینده ورودی به آبخوان افزایش ۵۵/۲ درصدی و جرم آلاینده خروجی از آن ۵۷/۴ درصد نسبت به شرایط پایه افزایش داشت که به دلیل ورود و خروج آب دریا در ضلع دریا است.



(الف) (ب)

شکل ۱۵. بیلان حجم آب سناریو ۴ : (الف) ورودی به آبخوان و (ب) خروجی از آبخوان



(الف) (ب)

شکل ۱۶. بیلان جرم آلاینده سناریو ۴ : (الف) ورودی به آبخوان و (ب) خروجی از آبخوان

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مطالعه به منظور ارزیابی وضعیت آبخوان مطالعاتی در ناحیه لاهیجان-چابکسر تحت تأثیر سناریوهای محتمل آینده و پیش‌بینی وضعیت آن، مدل عددی SUTRA به دلیل داشتن قابلیت مدل‌سازی سه‌بعدی در شرایط ناهمگن، ناهمسان و لایه-بندی شده به کار گرفته شد. این مدل در دو حالت دائمی و غیردائمی در طول دوره ۱۱ ساله ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۳ اجرا، واسنجی و صحت‌سنجی شد. سناریوهای مورد بررسی در این مطالعه شامل سناریو ۱: کاهش تراز آب زیرزمینی در مرز خشکی، سناریو ۲: افزایش تخلیه خالص از آبخوان همزمان با کاهش تراز آب زیرزمینی در مرز خشکی، سناریو ۳: تخلیه پساب حاصل از شیرین‌سازی آب دریا به آبخوان از طریق چاه تزریقی و سناریو ۴: تخلیه پساب حاصل از دستگاه آب شیرین‌کن به دریا در قسمت میانی خط ساحلی می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی، در سناریو ۱ حجم آب و جرم آلاینده ورودی به آبخوان بیشتر از مقدار آب و آلاینده خروجی از آن می‌باشد. در سناریو ۲ حجم آب خروجی از آبخوان ۴۰ درصد بیشتر از حجم آب ورودی به آن است در حالی‌که جرم آلاینده ورودی به آبخوان در این سناریو نسبت به شرایط پایه افزایش بالای ۹۰ درصد داشته است؛ بنابراین

همان‌طور که انتظار می‌رفت حجم آب زیرزمینی منطقه در این سناریو کاهش و میزان غلظت آلاینده افزایش یافته است. در سناریوی ۳ حجم آب ورودی و خروجی آبخوان نسبت به شرایط پایه کاهشی کمتر از ۱۰ درصد داشته و تغییر محسوسی در وضعیت کمی آبخوان ایجاد نمی‌شود. همچنین جرم آلاینده ورودی از مرزها در این سناریو نسبت به شرایط پایه افزایش بالای ۷۰ درصد و جرم آلاینده خروجی از آن افزایش بالای ۹۵ درصد داشته است. در سناریو ۴ حجم آب ورودی و خروجی آبخوان نسبت به سناریو پایه بدون تغییر بوده ولی جرم آلاینده ورودی و خروجی آبخوان در مقایسه با شرایط پایه بالای ۵۰ درصد افزایش داشته است که بیشتر مربوط به ورود و خروج از دریا است. بنابراین با توجه به افزایش غلظت ناشی از تخلیه پساب در نواحی نزدیک ساحل، پیشنهاد می‌شود از سیستم‌هایی مانند outfall استفاده گردد و پساب در مناطقی دور از ساحل تخلیه شود.

سپاسگزاری

از شرکت مدیریت منابع آب ایران و سازمان آب منطقه‌ای استان‌های گیلان و مازندران به جهت همکاری در تأمین بخشی از داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز این مطالعه، تشکر و سپاسگزاری می‌شود.

REFERENCES

Aswed, E., Ahmed, N., Ali, T. A. M., Bin Ghazali, A. H., and Yusoff, Z. B. M. (2018). Simulation of different pumping scenarios on the groundwater-sea water intrusion into the tripoli aquifer, Libya. *Journal of engineering science and technology*, 13(10), 3419-3431.

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.

Dokou, Z., and Karatzas, G. P. (2012). Saltwater intrusion estimation in a karstified coastal system using density-dependent modelling and comparison with the sharp-interface approach. *Hydrological Sciences Journal*, 57(5), 985-999.

Farhoudi-Hafdaran, R., and Ketabchi, J. (2018). Numerical simulation of Urmia Lake and Ajabshir coastal aquifer interaction. *Journal of Iran-Water Resources Research*, 14(1), 45-58. (In Persian)

Iran Water Resources Management Company (2016) Updating water resources studies report of Lahijan-Chaboksar subbasin, Ministry of Energy, Mazandaran Regional Water Authority, Technical Report. (In Persian)

Ketabchi, H. (2015). *Efficient simulation–optimization model for managing coastal groundwater*. PhD dissertation, Sharif University of Technology, Tehran. (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. *Journal of* Iran-Water Resources Research, 7(1), 1-12. (In Persian)

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

Mahmoodzadeh, D., Ketabchi, H., and Ataie-Ashtiani, B. (2016). Effects of sea level rise and recharge rate variations on seawater intrusion in confined aquifer, *Journal of Hydraulics*, 10(4), 1-15. (In Persian)

Mostafaei-Avandari, M., and Ketabchi, H. (2019). Optimal extraction from coastal groundwater resources using parallel processing based simulation - optimization decision model (case study of Ajabshir coastal aquifer, Iran). *Journal of Iran-Water Resources Research*, 15(3), 33-48. (In Persian)

Narayan, K. A., Schleeberger, C., and Bristow, K. L. (2007). Modelling seawater intrusion in the Burdekin Delta irrigation area, North Queensland, Australia. *Agricultural water management*, 89(3), 217-228.

Navari, M., and Ataie-Ashtiani, B. (2006). Investigation on the effects of sea level rise in coastal aquifers (case study of Talar-Babol-Haraz aquifer), 7th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures, Tehran, Iran. (In Persian)

Odu, S. O., Van Der Ham, A. G., Metz, S., and Kersten, S. R. (2015). Design of a process for supercritical water desalination with zero liquid discharge. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 54(20), 5527-5535.

Post, V. E., and Werner, A. D. (2017). Coastal aquifers: scientific advances in the face of global environmental challenges. *Journal of Hydrology*, 551, 1–3.

Qahman, K., and Larabi, A. (2006). Evaluation and numerical modeling of seawater intrusion in the Gaza aquifer (Palestine). *Hydrogeology Journal*, 14(5), 713-728.

Rozell, D. J., and Wong, T. F. (2010). Effects of climate change on groundwater resources at Shelter Island, New York State, USA. Hydrogeology Journal, 18(7), 1657-1665.

Sefelnasr, A., and Sherif, M. (2014). Impacts of seawater rise on seawater intrusion in the Nile Delta aquifer, Egypt. *Groundwater*, 52(2), 264-276.

Voss, C.I., and Provost, A.M. (2010). SUTRA: A model for saturated-unsaturated, variable-density groundwater flow with solute or energy transport. USGS Water Resources Investigations Report, 2002-4231.

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