

مقاله علمی-پژوهشی

## تأثیر نوسانات تراز آب دریاچه ارومیه بر روند تغییرات تراز آب زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان رشکان)

مهدی مطلبیان<sup>۱</sup> - حجت احمدی<sup>۲\*</sup> - امیر رئوف<sup>۳</sup> - نیک کارترایت<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۲۰

### چکیده

در سال‌های اخیر به دلایل مختلف، از حجم دریاچه ارومیه کاسته شده است. هدف از این تحقیق بررسی میزان تأثیر نوسانات تراز آب دریاچه ارومیه بر تراز آب زیرزمینی و میزان پیشروی و یا پسروی آب شور نسبت به سفره آب شیرین ساحلی محدود به غرب دریاچه می‌باشد. در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی رفتار متقابل آب زیرزمینی ساحلی و آب شور دریاچه از مدل SEAWAT استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که در سال‌های اخیر تغییر چشم‌گیری در جابه‌جایی گوه آب شور صورت نگرفته است و این تغییر کمتر از ۵۰ متر در عرض می‌باشد. قسمت بالای گوه که متصل به دریاچه می‌باشد بیشتر تحت تأثیر کاهش تراز دریاچه قرار گرفته است که دلیل آن پسروی شرایط مرزی اعمال شده در اثر پسروی آب دریاچه است. همچنین یافته‌های تحقیق نشان داد در صورتی که غلظت آب دریاچه ثابت در نظر گرفته شود میزان افزایش و یا کاهش تراز آب زیرزمینی برابر با افزایش و یا کاهش تراز سطح دریاچه در سراسر آبخوان خواهد بود. در زمانی که تأثیر تغییرات چگالی نادیده گرفته شود سطح آب زیرزمینی بیش از حدود ۲ برابر نسبت به زمانی که تغییرات چگالی در نظر گرفته شود تحت تأثیر تغییرات تراز دریاچه می‌باشد. نتایج بررسی نشان داد با وجود کاهش حدود ۷ متری تراز دریاچه ارومیه به دلیل افزایش چگالی قابل ملاحظه آب آن، گوهی آب شور پیشروی داشته است. بررسی‌ها نشان می‌دهد حتی در صورت افزایش تراز آب دریاچه و به تبع آن کاهش چگالی آب، گوه آب شور پسروی خواهد کرد.

واژه‌های کلیدی: آبخوان ساحلی، تداخل آب شور، تغییر غلظت، مدل SEAWAT

آب زیرزمینی می‌گردد (۷).

### مقدمه

دریاچه ارومیه به عنوان بزرگترین دریاچه داخلی ایران و بیستمین دریاچه جهان از نظر وسعت، اهمیت ویژه‌ای دارد (۲۳). این دریاچه به عنوان یکی از مهم‌ترین زیستگاه‌های طبیعی در سطح منطقه مطرح بوده و به عنوان مناسب‌ترین محیط زیست برای میگوی آرتیمیا محسوب می‌شود (۲۲). طی سال‌های گذشته بر اثر یک دوره خشک‌سالی و طرح‌های احداث سد که همزمان به وقوع پیوسته‌اند، زمینه تخریب بیش از پیش آب دریاچه ارومیه فراهم گردیده و تفاوت‌های قابل توجهی در سطوح آب این دریاچه به وجود آمده است (۲۷). آل شیخ و همکاران (۴) به بررسی تغییرات خطوط ساحلی دریاچه ارومیه بین سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۱ میلادی با تکنیک سنجش از دور پرداختند، نتایج کاهش ۱۰۴۰ کیلومتر مربعی خطوط ساحلی دریاچه ارومیه در این دوره را نشان می‌دهد. همچنین رسولی و عباسیان (۲۳) به تحلیل سری‌های زمانی تراز آب دریاچه ارومیه پرداختند که نتایج این تحقیق تغییرات و نوسانات معنی‌داری در تراز سطح آب دریاچه ارومیه را نشان می‌دهد. رسولی و همکاران (۲۱) به

آب شیرین مورد نیاز در مناطق ساحلی از آبخوان‌های ساحلی تأمین می‌شود که این آبخوان‌ها به دلیل پیشروی آب شور دریا به سمت آن‌ها در معرض شور شدن قرار گرفته‌اند به طوری که آب برداشتی از این آبخوان‌ها برای مدت طولانی قابل استفاده نیست (۱۲). به طور معمول، تداخل و نفوذ آب شور در آبخوان‌های ساحلی به دلیل افت سطح آب زیرزمینی و ایجاد امکان انتقال جانبی یا عمودی آب شور و لب شور رخ داده و این امر موجب تخریب کیفیت

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری سازه‌های آبی و دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه

\*- نویسنده مسئول: (Email: hojjat.a@gmail.com)

۳- استادیار دانشکده علوم زمین، دانشگاه اوتراخت، هلند

۴- استادیار دانشکده مهندسی و محیط زیست، دانشگاه گریفیث، کوئینزلند، استرالیا

توآمان و موضعی باشد. فرهودی و کتابچی (۹) اندرکنش دریاچه ارومیه و آبخوان ساحلی دشت عجب شیر را شبیه‌سازی نمودند. نتایج نشان داد که کاهش سطح تراز دریاچه با روند ۰/۴ متر در سال، تراز متوسط آبخوان را به اندازه ۱/۷ متر کاهش می‌دهد در حالی که افزایش تراز دریاچه به تراز اکولوژیک آن، باعث افزایش ۰/۷۵ متری تراز متوسط آبخوان در ۳۰ سال می‌گردد.

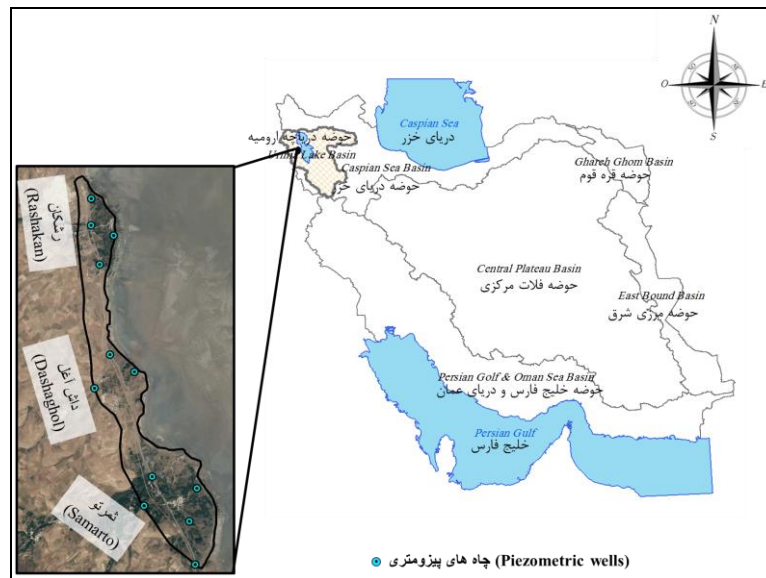
امروزه پیشروی و نفوذ آب شور به آبخوان‌های ساحلی، یکی از مشکلات مهم در خصوص حفاظت از آب‌های زیرزمینی در مناطق ساحلی است که محققان بسیاری با استفاده از مدل‌های عددی و تحلیلی به بررسی آن پرداخته‌اند (۲۵). مدل‌سازی عددی روشی کارآمد با کمترین هزینه امکان مطالعه پیچیدگی جریان آب‌های زیرزمینی را فراهم می‌کند (۱۸). ابدلانی و همکاران (۱) به بررسی بعضی از پارامترهای بالقوه و تأثیرشان بر تداخل آب شور در آبخوان دلتای نیل پرداختند. که در این مطالعه جهت شبیه‌سازی تأثیر پارامترها از مدل سه بعدی SEAWAT بهره گرفتند. نورآبادی و همکاران (۱۸) به بررسی آزمایشگاهی تأثیرات استخراج آب بر روی جابه‌جایی گوه آب شور پرداخت. که در این مطالعه از مدل SEAWAT جهت مطالعه عددی فرایند تحت سناریوهای مختلف استفاده گردید. احمدی و همکاران (۲) به پیش‌بینی گوهی آب شور تحت شرایط پیشروی و پسروی با استفاده از مدل‌های CTRAN/W و SEAWAT پرداختند. که نتایج نشان داد که مدل‌های CTRAN/W و SEAWAT دقت بالایی در شبیه‌سازی و پیش‌بینی موقعیت و حرکت گوهی آب شور را با متوسط میانگین مربعات خطا به ترتیب معادل ۰/۶۷ و ۰/۵۸ سانتی‌متر (کمتر از ۱۰ درصد متوسط داده‌های واقعی) دارا می‌باشند. افزایش سطح آب دریا باعث بالا آمدن سطح آب زیرزمینی در سرتاسر آبخوان ساحلی به میزان بالا آمدن تراز آب دریا می‌شود (۸).

بررسی منابع انجام شده نشان دهنده‌ی کاهش تراز دریاچه‌ی ارومیه و در نتیجه افزایش غلظت نمک دریاچه‌ی ارومیه می‌باشد. مطالعات صورت گرفته بر روی پسروی دریاچه ارومیه و ارتباط آن با آب‌های زیرزمینی، بیشتر بر تأثیر بهره‌برداری از سفره‌های آب زیرزمینی بر پیشروی گوه آب شور تمرکز کرده‌اند. بنابراین در این تحقیق سعی شده است که تأثیر تغییرات تراز سطح دریاچه بر تراز آب زیرزمینی و تغییرات گوه آب شور تعیین گردد و همچنین عملکرد توآمان تراز آب دریاچه و تراز آب زیرزمینی برای دوره ۱۴ ساله اخیر شبیه‌سازی شود. در این مطالعه نظر به مطالعات گذشته که مدل عددی SEAWAT دارای اعتبارسنجی بالایی می‌باشد جهت شبیه‌سازی مسئله استفاده گردید.

پایش نوسانات سطح آب دریاچه ارومیه با پردازش تصاویر ماهواره‌ای پرداختند. نتایج این مطالعه کاهش ۲۳ درصدی سطوح آب دریاچه در طی دوره مطالعه را نشان داد.

به دلیل اینکه دریاچه ارومیه هیچ خروجی به غیر از تبخیر ندارد، کاهش سطح آب و یا تراز آن موجب افزایش شوری خواهد شد. در این خصوص ضیائی‌ان فیروزآبادی و همکاران (۲۸) به ارزیابی تغییرات سطح آب و شوری جنوب شرق دریاچه ارومیه پرداختند. نتایج نشان داد که سطح آب دریاچه ارومیه کاهش یافته و شوری دریاچه افزایش یافته است. دریاچه ارومیه از نمک اشباع شده است تا حدی که کریستال‌های نمکی بر روی سطح دریاچه تشکیل می‌شوند به طوری که شوری دریاچه ارومیه از ۱۶۹ گرم در لیتر در سال ۱۹۹۵ به بیش از ۳۰۰ گرم در لیتر در سال ۲۰۰۳-۲۰۰۴ افزایش یافته است (۳ و ۲۴). مطالعه کرباسی و همکاران (۱۲) نشان دهنده افزایش غلظت شوری دریاچه در طی سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۷ دارد به طوری که در طی این سال‌ها میزان غلظت نمک‌های مختلف در دریاچه از ۲۱۴ گرم در لیتر به بیش از ۴۰۰ گرم در لیتر در انتهای دوره مطالعاتی رسیده است. به همین صورت میزان چگالی آب شور از ۱/۰۸ به ۱/۲۹ گرم در لیتر افزایش یافته است. در مطالعات صورت گرفته غلظت شوری آب دریاچه ارومیه در سال‌های قبل از ۲۰۰۱ معمولاً کمتر از ۱۵۰ گرم در لیتر و پس از آن تا کنون بیش از ۳۰۰ گرم گزارش شده است (۱۵ و ۲۱).

عموماً، تغییرات شیمیایی و هیدرودینامیکی که در دریاها و یا دریاچه‌ها رخ می‌دهد بر روی مشخصات هیدرودینامیکی و شیمیایی آب‌های زیرزمینی ساحلی تأثیرگذار است. مطالعات صورت گرفته بر روی دریاچه ارومیه و اندرکنش آن با سفره‌های ساحلی نشان‌دهنده اثرگذاری دریاچه ارومیه و تغییرات رخ داده بر آن بر روی برخی از سفره‌های ساحلی است (۹ و ۱۰). جوانمرد و همکاران (۱۱) به مدل‌سازی عدم قطعیت آسیب‌پذیری آبخوان پرداختند، نتایج نشان داد که آسیب‌پذیری سفره‌های آزاد دشت ارومیه در محدوده بدون خطر آلودگی تا آلودگی زیاد قرار می‌گیرد و این نشان از تغییرات نسبتاً شدید آسیب‌پذیری در سطح آبخوان دارد. جعفری و افتخاری (۱۰) به بررسی تبادلات آبی و نفوذ جبهه‌ی آب شور دریاچه ارومیه به آبخوان‌های همجوار پرداختند که نتایج نشان داد بر اساس نتایج ورودی آب زیرزمینی دریاچه‌ی ارومیه از آبخوان‌های همجوار در دهه گذشته در اثر بهره‌برداری بیش از حد کاهش یافته است. به این ترتیب که در آبخوان‌هایی مانند مهاباد، تبریز، آذرشهر، شستر، صوفیان و عجب شیر جهت جریان آب زیرزمینی تغییر کرده و ورودی زیرزمینی به دریاچه صفر شده است. همچنین مشخص شد توجه به مقادیر متوسط پارامترهایی مانند افزایش شوری و افت در تصمیم‌گیری و مدیریت آبخوان اثرهای نامطلوبی به همراه خواهد داشت و تحلیل صحیح تغییرات کمی و کیفی آبخوان باید به صورت



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و چاه‌های پیزومتری موجود  
Figure 1- Location of the study area and existing piezometric wells

شده در این تحقیق روند تغییرات تراز آب دریاچه ارومیه در طی سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۷ که از واحد مطالعات شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان غربی تهیه گردید در شکل ۲، ارائه شده است:

### نوسانات تراز آب آبخوان مجاور دریاچه ارومیه

به منظور مشاهده نوسانات سطح آب آبخوان در محل مورد مطالعه، نوسانات سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای واقع در محل روستاهای پیرعلی (رشکان)، داش آغل و ثمرتو که به ترتیب در فاصله ۱، ۱٫۷ و ۲٫۵ کیلومتری از دریاچه قرار دارند در طی سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۷ مورد مطالعه قرار گرفتند. شکل ۳، تغییرات تراز آب زیرزمینی را در این چاه‌ها نشان می‌دهد که اطلاعات موجود در این شکل از واحد مطالعات شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان غربی تهیه گردیده است که به صورت گزارش منتشر نشده است. با توجه به نمودار نشان داده شده در شکل ۳، میزان افت سطح آب چاه‌های پیرعلی، داش آغل و ثمرتو در طی بازه زمانی مذکور به ترتیب ۲/۵۴، ۳/۱۳ و ۳/۴۲ می‌باشد.

### تغییرات چگالی آب دریاچه

با توجه به اینکه افزایش و کاهش تراز آب دریاچه متناسب با ورودی و تبخیر از سطح دریاچه می‌باشد بنابراین میزان شوری متناسب با حجم آب دریاچه بسته به ارتفاع سطح آب دریاچه متغیر می‌باشد. به منظور اینکه بتوان به طور مؤثر میزان تأثیر کاهش و افزایش سطح دریاچه ارومیه بر پیشروی گوه شور و تراز آب زیرزمینی را بررسی نمود، داده‌های مربوط به تغییرات تراز دریاچه ارومیه و

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

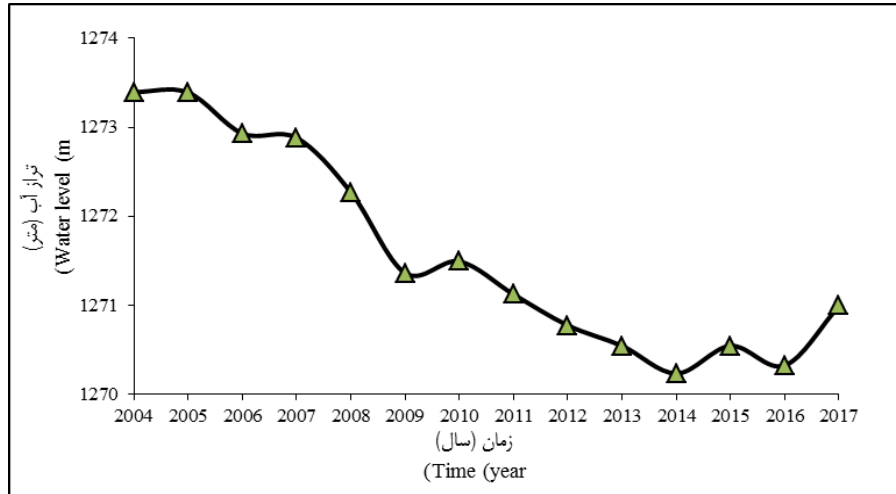
به منظور بررسی تأثیر نوسانات سطح آب دریاچه ارومیه بر میزان نوسانات سطح آب‌های زیرزمینی، آبخوان دشت رشکان واقع در ساحل غربی دریاچه ارومیه مورد بررسی قرار گرفت. محدوده مطالعاتی مورد نظر در جنوب شهر ارومیه و در فاصله ۳۵ کیلومتری آن واقع شده است. این محدوده از شمال به دشت ارومیه، از جنوب به دشت نقده و محمدیار، از غرب به روستاهای رشکان (پیرعلی)، داش آغل و ثمرتو و از شرق به دریاچه ارومیه محدود می‌شود. محدوده مطالعاتی از طریق جاده ارومیه-نقده قابل دسترسی است. از نظر مختصات جغرافیایی بین طول‌های  $45^{\circ}18'$  تا  $45^{\circ}20'$  شرقی و عرض‌های  $37^{\circ}12'$  تا  $37^{\circ}20'$  شمالی قرار گرفته است. متوسط ارتفاع محدوده ۱۲۹۰ متر از سطح دریاهای آزاد می‌باشد. شکل ۱، موقعیت محدوده مطالعاتی را روی نقشه کشور ایران نشان می‌دهد. در محدوده مطالعاتی تعداد ۱۲ حلقه چاه مشاهده‌ای موجود می‌باشد که توسط شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان غربی حفر گردیده است که در این مطالعه جهت بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی از آن بهره گرفته شده است.

### نوسانات سطح آب دریاچه ارومیه

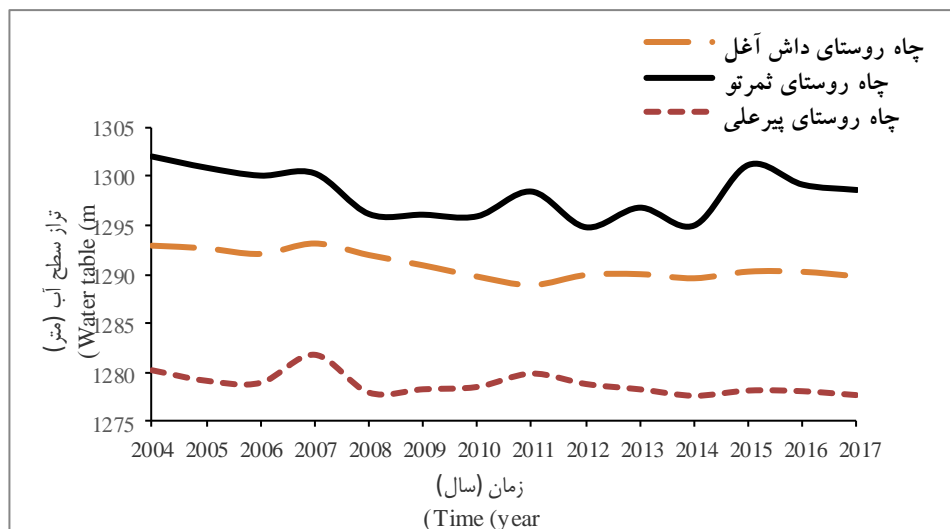
در طی سال‌های گذشته از حدود سال ۱۳۷۵ روند کاهشی تراز دریاچه ارومیه بطور پیوسته شروع شد. با توجه به بازه زمانی بررسی

غلظت شوری به همراه سال‌های اندازه‌گیری آن ارائه شده است. جهت تلفیق داده‌ها برای سال‌های مورد مطالعه در این تحقیق با توجه به تراز آب دریاچه میان‌یابی صورت گرفت.

غلظت آب شور تهیه گردید که این اطلاعات برگرفته از مطالعه کرباسی و همکاران (۱۱) و داده‌های شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان غربی می‌باشد. در جدول ۱، اطلاعات مربوط به تراز آب دریاچه و



شکل ۲- روند تغییرات تراز آب دریاچه ارومیه در بازه زمانی ۱۳۸۳-۱۳۹۶  
Figure 2- Trend of the water level changes of Lake Urmia over 2004-2017



شکل ۳- روند تغییرات تراز آب زیرزمینی در سال‌های مختلف  
Figure 3- Trend of groundwater level changes in different years

جدول ۱- تراز و غلظت آب دریاچه ارومیه در سال‌های مختلف  
Table 1- Water level and concentration of Lake Urmia in different years

سال	تراز دریاچه (متر)	غلظت نمک (گرم بر لیتر)	چگالی
Year	Lake level (m)	Salt concentration (g/L)	Density
1987	1276	230	1.16
1995	1277.8	166	1.11
2004	1274	260	1.19
2008	1272	340	1.25
2012	1270.6	400	1.29
2016	1270.3	426	1.3

## معادلات حاکم

پخش می‌باشد .

معادلات حاکم بر اندرکنش آب شور و شیرین به دو بخش معادلات جریان و معادلات انتقال جرم تقسیم می‌شود که این معادلات به صورت کوپل و هم‌زمان در حالت‌های غیرماندگار حل می‌گردند. بدین منظور در هر گام محاسباتی ابتدا با حل معادله جریان سرعت و جهت جریان در هر نقطه حاصل شده و به‌عنوان اطلاعات ورودی برای حل یک گام زمانی از معادلات انتقال جرم استفاده می‌شود و بر اساس شرایط جدید حاصله مجدداً برای گام بعدی سرعت و جهت جریان تعیین شده و حل مسئله ادامه می‌یابد (۲).

## معادلات جریان

معادله عمومی حاکم بر حرکت آب‌های زیرزمینی از ترکیب معادلات پیوستگی و داری به دست می‌آید و به صورت زیر بیان می‌شود که در مدل‌های ریاضی به منظور شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی به روش‌های عددی خاصی مانند اجزای محدود، اختلاف محدود، اجزای مرزی حجم محدود حل می‌شود (۱۴ و ۱۹).

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \pm q_s \quad (1)$$

که در آن  $(K_x, K_y, K_z)$  مقادیر هدایت هیدرولیکی در سه جهت مختصات می‌باشد،  $t$  زمان،  $h$  ارتفاع بار آبی،  $S_y$  آبدهی ویژه می‌باشد و  $q_s$  میزان تغذیه یا تخلیه در واحد حجم آبخوان است. به منظور دستیابی به مجهول  $h(x, y, z)$ ، معادلات دیفرانسیل حاکم بر جریان آب زیرزمینی از طریق معادله‌ی پیوستگی بسط داده می‌شود، بدین معنی که جمع جبری جریان-های ورودی و خروجی به یک بلوک باید برابر میزان تغییرات ذخیره‌ی آن بلوک باشد. در این تحقیق معادله‌ی (۱) از روش تفاضل محدود توسط کد MODFLOW حل گردید.

## جریان آب زیرزمینی با چگالی متغیر

در فرآیند مربوط به اختلاط آب شور و شیرین بدان علت که دو سیال با چگالی‌های متغیر با هم در ارتباط می‌باشند مکانیزم آن با زمانی که فقط یک سیال باشد متفاوت بوده و تغییر می‌کند. بنابراین زمانی که تأثیر چگالی در معادله جریان آب زیرزمینی (رابطه (۱)) وارد گردد، رابطه به صورت زیر تغییر خواهد کرد (۶ و ۱۷):

$$P_e = \frac{V|L}{D} \quad (2)$$

که در آن  $|v|$ : اندازه بردار سرعت نشت،  $L$ : طول مشخصه که معمولاً برابر عرض سلول شبکه در نظر گرفته می‌شود،  $D$ : ضریب

## معادلات انتقال

فرآیندهای انتقال، چگونگی انتقال و توزیع مواد حل شده را از نقطه‌ای به نقطه‌ای دیگر در آب زیرزمینی بیان می‌کنند. سامانه آب زیرزمینی، وسیله این انتقال و توزیع است. به علت اتفاقات زیادی که هم‌زمان با هم در محیط رخ می‌دهد، شرح این فرآیندها به شیوه‌ای ساده مشکل است. فعل و انفعالات شیمیایی و زیستی احتمالی، مقدار، کیفیت و توزیع مواد حل شده در سامانه آبی را تغییر می‌دهد. اگرچه ظاهراً ماده همراه با جریان آب زیرزمینی و سوار بر آن حرکت می‌کند، اما این ماده می‌تواند در حین حرکت، جذب ذرات جامد محیط شود و یا احياناً توسط باکتری‌های موجود در محیط مصرف گردد. فرآیندهای فیزیکی که شار ماده در یک حجم معیار از محیط متخلخل را کنترل می‌کنند، شامل فرآیندهای جابه‌جایی و پراکندگی هیدرودینامیکی است. در بسیاری از مسائل انتقال آلودگی، سهم جابه‌جایی، نسبت به سایر فرآیندهای انتقال غالب است. جهت اندازه‌گیری درجه غالب بودن جابه‌جایی نسبت به سایر پارامترهای معادله انتقال، از عدد بی بعد پکلت استفاده می‌شود که به صورت زیر تعریف می‌شود (۲):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \rho K_{fx} \left( \frac{\partial h_f}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \rho K_{fy} \left( \frac{\partial h_f}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \rho K_{fz} \left( \frac{\partial h_f}{\partial z} + \left( \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \right) \frac{\partial z}{\partial z} \right) \right] = \rho s_f \frac{\partial h_f}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial c} \frac{\partial c}{\partial t} - \rho_s q_s \quad (3)$$

که در آن  $h_f$ : بار آبی آب شیرین،  $k_{fx}$ ،  $k_{fy}$ ،  $k_{fz}$ : هدایت هیدرولیکی آب شیرین در سه جهت مختصات،  $\rho$ : چگالی آب آبخوان،  $\rho_f$ : چگالی آب شیرین،  $S_f$ : ذخیره ویژه،  $C$ : غلظت املاح،  $\theta$ : تخلخل مؤثر،  $\rho_s$ : چگالی آب ورودی از یک منبع و یا آب رهاشده از سینک،  $q_s$ : نرخ حجمی آب بر واحد حجم آبخوان می‌باشد.

در مسائلی که پدیده جابه‌جایی غالب است، عدد پکلت عدد بزرگی است و در مسائلی که جابه‌جایی صرف وجود دارد، عدد فوق به سمت بی‌نهایت میل می‌کند. حرکت املاح در محیط متخلخل توسط سه عامل جریان آب زیرزمینی (انتقال)، انتشار مولکولی، پخشیدگی مکانیکی اتفاق می‌افتد. معادله دیفرانسیل زیر بیان‌کننده تغییرات غلظت ماده نسبت به زمان و مکان یا حرکت املاح در آب زیرزمینی می‌باشد (۲۹):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (D \cdot \nabla C) - \nabla \cdot (vC) - \frac{q_s}{\theta} C_s + \sum_{k=1}^N R_k \quad (4)$$

(DEM) به مدل معرفی گردید، حدود ۶۰ متر از ضخامت آبخوان به علت موجود بودن پروفیل‌های خاک تا این عمق در مجاورت دریاچه و بر مبنای مطالعه شناسایی منابع آب محدوده رشکان (۱۶) به عنوان عمق متوسط انتخاب شده است. مدل با تعداد ۶۰۰۰ سلول شبکه‌بندی و ضخامت مدل واحد در نظر گرفته شد که تعداد سلول‌ها براساس استقلال محاسباتی به روش آزمون سعی و خطا تعیین گردید. مشخصات خاک مانند هدایت هیدرولیکی خاک از روی بافت خاک منطقه با توجه به پروفیل‌های خاک موجود ارائه شده در مطالعات شناسایی منابع آب محدوده رشکان (۱۶) تعیین گردید که مقدار آن بین ۰/۸ تا ۱ متر در روز تخمین زده شد.

### شرایط مرزی و اولیه

به منظور تعریف شرایط مرزی به مدل، تراز آب دریاچه به عنوان شرط مرزی سمت شرق آبخوان که منتهی به دریاچه ارومیه می‌باشد معرفی شد و تراز سطح آب در چاه‌های انتهایی سمت چپ محدوده آبخوان به عنوان شرط مرزی سمت غرب آبخوان معرفی گردید. شرایط مرزی معرفی شده به مدل در شکل ۴، نشان داده شده است.

به منظور تعریف شرایط اولیه در شروع شبیه‌سازی از درون‌یابی تراز سطح آب ۱۲ چاه موجود در تاریخ ۲۰۰۳/۰۸/۲۳ به روش IDW که در مدل GMS صورت گرفت استفاده شد.

### ارزیابی مدل

جهت ارزیابی مدل در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی از شاخص‌های آماری نظیر ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE)، طبق روابط ۶ و ۷ استفاده شده است (۲).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i (O_i - P_i)^2} \quad (۶)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \quad (۷)$$

در رابطه‌های فوق،  $O_i$  مقدار واقعی،  $P_i$  مقدار تخمینی مدل،  $\bar{O}$  میانگین مقادیر مشاهده شده،  $\bar{P}$  میانگین مقادیر برآورده شده می‌باشد. مقدار بهینه شاخص‌های RMSE و MAE برابر صفر است.

### واسنجی و صحت‌سنجی مدل

واسنجی مدل با تغییر پارامترهای حساس که با عدم قطعیت همراه است صورت گرفت، که در این تحقیق جهت کالیبراسیون جریان مدل از پارامترهای هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه استفاده

که در آن  $D$ : ضریب پخشیدگی هیدرودینامیکی،  $\theta$ : سرعت جریان،  $C_E$ : غلظت آب ورودی یا خروجی از چشمه یا چاه،  $R_k$ : نرخ تولید یا زوال در واکنش  $k$  از  $N$  واکنش مختلف می‌باشند. در رابطه (۴) ضریب پخشیدگی هیدرودینامیکی با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$D = \alpha_L \times \frac{V_L^2}{|v|} + \alpha_H \times \frac{V_H^2}{|v|} + \alpha_V \times \frac{V_V^2}{|v|} + D^* \quad (۵)$$

که در آن  $D$ : ضریب پخشیدگی هیدرودینامیکی،  $\alpha_L$ : پخشیدگی طولی،  $V_L$ : سرعت طولی جریان،  $\alpha_H$ : پخشیدگی افقی،  $V_H$ : سرعت افقی جریان،  $\alpha_V$ : پخشیدگی عمودی،  $V_V$ : سرعت عمودی جریان،  $D^*$ : ضریب انتشار مولکولی،  $|v|$ : مقدار سرعت نفوذ می‌باشد.

### انتقال املاح تحت تأثیر چگالی

برای جریان آب زیرزمینی با تغییرات چگالی زیاد در املاح منتقل شده، توزیع غلظت املاح چگالی را تغییر می‌دهد که در نتیجه بر روی جریان آب زیرزمینی تأثیر می‌گذارد. بنابراین، جریان آب زیرزمینی و انتقال املاح در آبخوان در چنین وضعیتی فرآیندهایی مرتبط باهم هستند به طوری که معادله (۲) و معادله (۴) باید به طور پیوسته و هم‌زمان حل شوند (۲).

### مدل SEAWAT

مدل SEAWAT توسط سازمان تحقیقات زمین شناسی آمریکا (۲۶) تهیه شده است. این مدل توانایی شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان آب زیرزمینی و انتقال املاح با شرایط چگالی متغیر با تلفیق مدل‌های MODFLOW و MT3DMS به روش تفاضل محدود را داراست. در این مدل ابتدا توسط MODFLOW شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی انجام شده و سپس خروجی آن جهت شبیه‌سازی انتقال املاح به صورت همرفت-پراکندگی در اختیار مدل MT3DMS قرار گرفته و نتایج حاصله از مدل MT3DMS نیز به مدل SEAWAT وارد شده تا شبیه‌سازی انتقال املاح تحت تأثیر چگالی صورت پذیرد (۲).

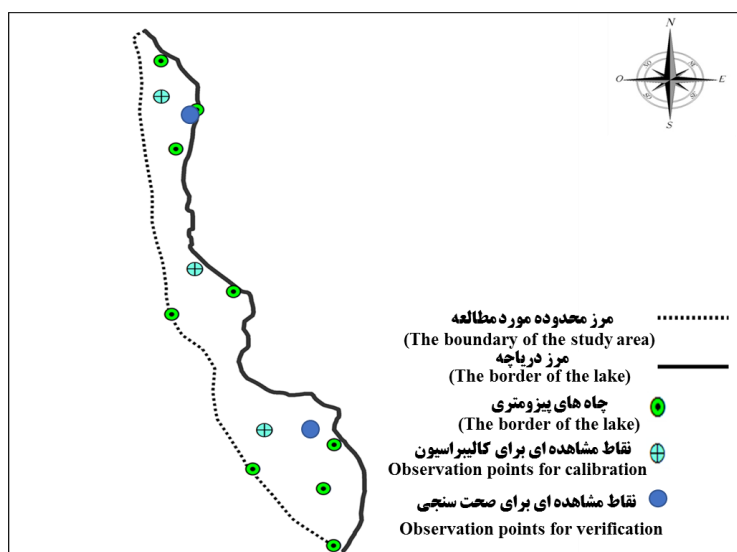
در این مطالعه جهت استفاده از مدل SEAWAT، از بسته‌ی نرم‌افزاری GMS که واسط گرافیکی و به عنوان پیش‌پرداز و پس‌پرداز چندین مدل آب زیرزمینی است، بهره گرفته شد.

### ورود اطلاعات به مدل SEAWAT

اطلاعات توپوگرافی سطح زمین با فراخوانی رقوم ارتفاعی منطقه

پس از کالیبراسیون مدل مقایسه شده است. متوسط مقادیر شاخص آماری مربوط به مراحل کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل در جدول ۳، آمده است. مقدار RMSE و MAE بین مقادیر مشاهداتی و مقادیر محاسبه شده برای هر یک از چاه‌های مشاهداتی برای مرحله کالیبراسیون و صحت‌سنجی کمتر از ۱۰ درصد ماکزیمم تغییرات سطح آب هر یک از چاه‌ها می‌باشد که دقت بالای مدل را نشان می‌دهد.

گردید. به منظور کالیبراسیون مدل از گزینه Parameter Estimation مدل MODFLOW استفاده شد. پس از کالیبراسیون و برآورد مقادیر پارامترهای مذکور، صحت‌سنجی مدل انجام شد. در شکل ۵، هندسه و محدوده مورد مطالعه به همراه نقاط مشاهداتی در نظر گرفته شده به منظور کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل نشان داده شده است. در جدول ۲ پارامترهای تخمین زده شده پس از کالیبراسیون به اختصار آمده است. در شکل ۵، ارتفاع آب در نقاط مشاهده‌ای و مقادیر محاسبه شده



شکل ۴- هندسه و محدوده منطقه مورد مطالعه و شرایط مرزی

Figure 4- Geometry and domain of the study area and boundary conditions

جدول ۲- مقادیر پارامترهای آبخوان پس از کالیبراسیون

Table 2- Values of aquifer parameters after calibration

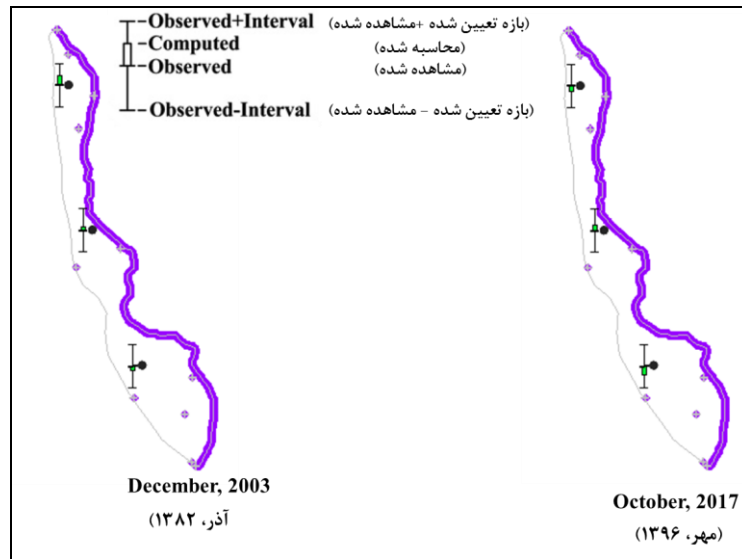
پارامتر Parameter	مقدار Value
هدایت هیدرولیکی Hydraulic conductivity	1 m/day
آبدهی مخصوص Specific yield	0.15

جدول ۳- متوسط مقادیر شاخص آماری پس از واسنجی و صحت‌سنجی

Table 3- Average of statistical parameters after calibration and verification

	RMSE	MAE
واسنجی Calibration	0.33	0.25
صحت‌سنجی Verification	0.41	0.32





شکل ۵- مقایسه ارتفاع آب در نقاط مشاهده‌ای و مقادیر محاسبه شده  
Figure 5- Comparison between observed heads and simulated heads

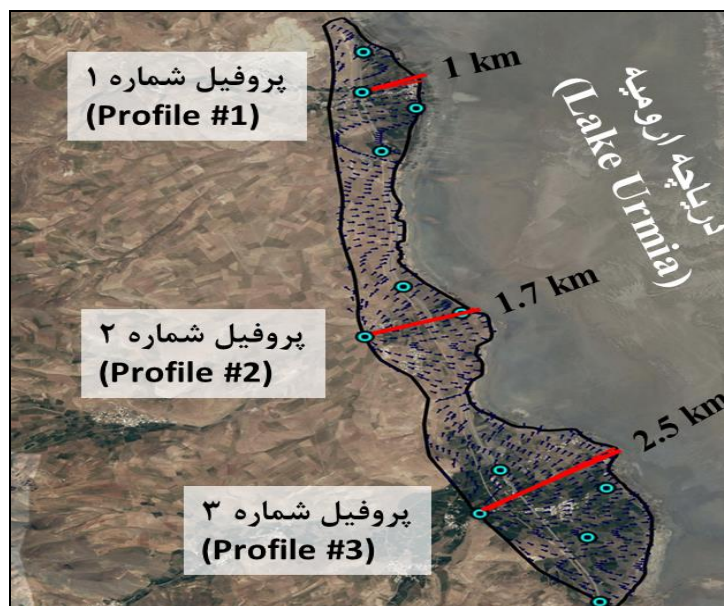
### نتایج و بحث

در این مطالعه به منظور ارزیابی تأثیر نوسانات سطح آب دریاچه ارومیه بر تراز آب زیرزمینی آبخوان‌های همجوار ابتدا مدل واسنجی گردید و سپس شبیه‌سازی‌ها در قالب چهار سناریو به صورت زیر تعریف گردید:

- میزان پیشروی گوهی آب شور در سال‌های اخیر
- تأثیر میزان افت سطح آب دریاچه ارومیه بدون در نظر گرفتن تغییر چگالی آب دریاچه

### پروفیل‌های انتخابی جهت شبیه‌سازی

به منظور مشاهده میزان پیشروی گوه آب شور در سال‌های اخیر، سه پروفیل در شمال و مرکز و جنوب منطقه مورد مطالعه با توجه به جهت‌های جریان انتخاب گردید. در شکل ۶، موقعیت پروفیل‌های انتخابی نشان داده شده است.



شکل ۶- جهت جریان در محدوده مطالعاتی و پروفیل‌های انتخابی  
Figure 6- The direction of flow in the study area and selected profiles

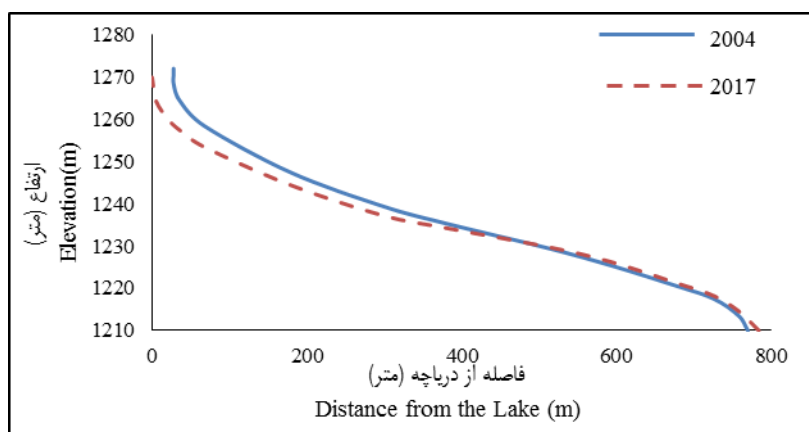


در طی سال‌های مذکور در نظر گرفته شد. پس از اینکه گوه آب شور به تعادل رسید شرایط گذرا بر مدل اعمال گردید. که در این حالت نیز تغییرات چگالی با تغییرات تراز سطح دریاچه نیز اعمال گردید. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل‌های ۷، ۸ و ۹ می‌توان دریافت که در سال‌های اخیر تغییرات چشم‌گیری در جابه‌جایی گوهی آب شور ایجاد نشده است. همانطور که از شکل‌های مذکور بر می‌آید بیشترین تغییرات در فواصل نزدیک به دریاچه ایجاد شده که دلیل آن تغییرات شرایط مرزی در ساحل بوده که به علت کاهش سطح آب دریاچه، ساحل نیز عقب‌نشینی کرده است.

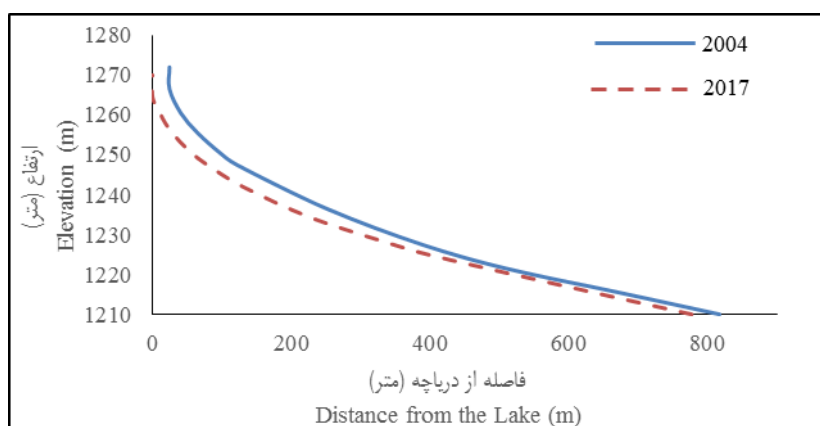
- تأثیر میزان افت سطح آب دریاچه ارومیه با در نظر گرفتن تغییر چگالی آب دریاچه
- تأثیر میزان افت سطح آب دریاچه ارومیه بر روی میزان پیشروی گوهی آب شور

#### میزان پیشروی گوه آب شور در سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۷

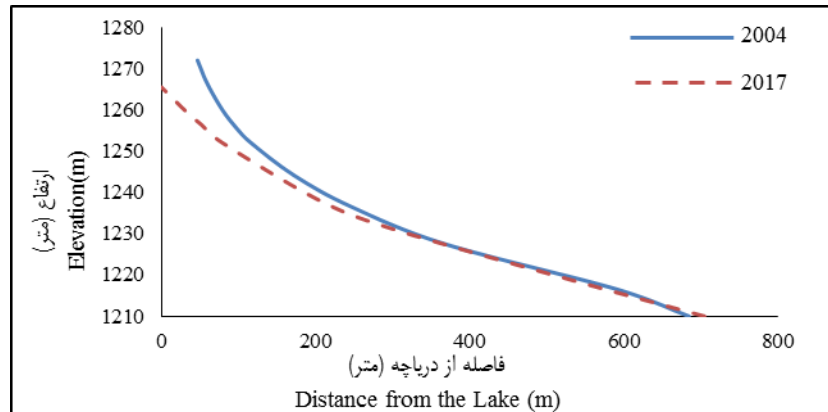
در این سناریو جهت مشاهده میزان پیشروی گوه آب شور در سال‌های اخیر، شبیه‌سازی برای سه پروفیل نشان داده شده در شکل ۶، انجام شد. در این سناریو ابتدا به منظور ایجاد شرایط اولیه برای شبیه‌سازی حالت گذرای ۱۴ سال اخیر، شرایط مرزی دریاچه و آبخوان به ترتیب معادل متوسط تراز سطح آب دریاچه و متوسط تراز آبخوان



شکل ۷- نحوه تغییرات گوه آب شور در پروفیل شماره ۱  
Figure 7- Saltwater-wedge variations in profile #1



شکل ۸- نحوه تغییرات گوه آب شور در پروفیل شماره ۲  
Figure 8- Saltwater-wedge variations in profile #2

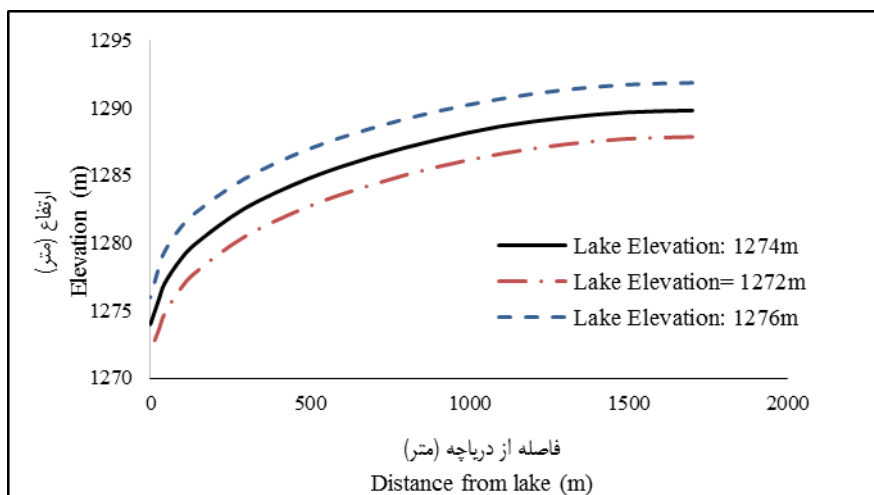


شکل ۹- نحوه تغییرات گوه آب شور در پروفیل شماره ۳  
Figure 9- Saltwater-wedge variations in profile #3

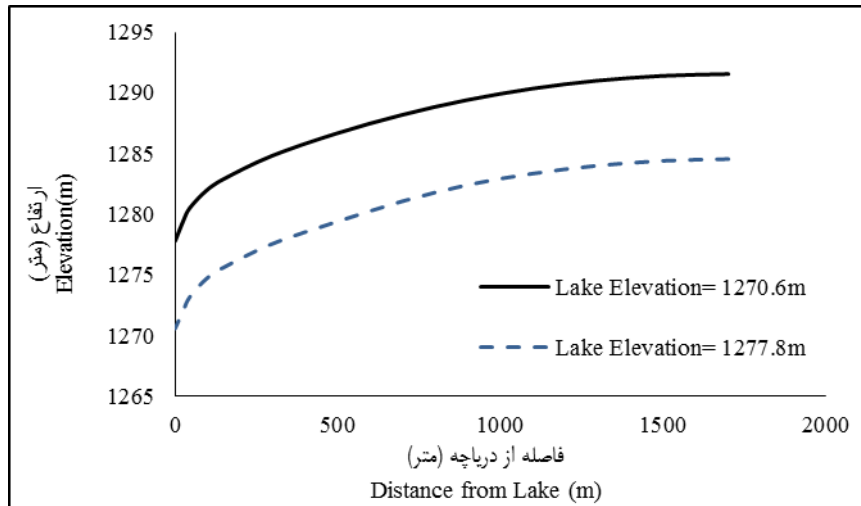
آب زیرزمینی معادل ۷۵ میلیمتر در سال که حدوداً معادل ۳۰ درصد متوسط بارش سالانه ارومیه می‌باشد منظور گردید. جهت بررسی این سناریو پروفیل شماره ۲ در نظر گرفته شد. همانطور که در شکل ۱۰، مشاهده می‌شود سطح آب زیرزمینی در ترازهای مختلف آب دریاچه تقریباً موازی یکدیگر می‌باشد. با افزایش تراز آب دریاچه به میزان ۲ متر سطح آب زیرزمینی نیز در سراسر سفره به میزان حدوداً ۲ متر افزایش یافته و با کاهش سطح آب دریاچه به میزان ۲ متر، تراز آب زیرزمینی نیز حدود ۲ تا ۲/۳۳ متر کاهش یافته است. شکل ۱۱، نیز نشان می‌دهد که با کاهش تراز دریاچه به میزان ۷/۲ متر تراز آب زیرزمینی نیز حدود ۷/۲ متر کاهش یافته است. نتایج ارائه شده در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به طور کلی نشان می‌دهد در صورتی که غلظت آب دریاچه ثابت در نظر گرفته شود میزان افزایش و کاهش تراز آب زیرزمینی معادل با افزایش و کاهش تراز سطح دریاچه خواهد بود که این میزان در سراسر آبخوان حدوداً برابر می‌باشد.

### تأثیر میزان افت سطح آب دریاچه ارومیه بر افت تراز آب زیرزمینی بدون در نظر گرفتن تغییر چگالی

با توجه به اینکه در سال‌های اخیر تراز آب دریاچه ارومیه بنا به دلایلی کاهش یافته است بنابراین در این سناریو نحوه تغییرات سطح آب زیرزمینی تحت تاثیر تغییرات تراز آب دریاچه بررسی شده است که در این بخش تغییرات چگالی مؤثر از تغییرات تراز دریاچه در نظر گرفته نشده است تا به طور واضح‌تر بتوان متوجه شد که تأثیر تراز به تنهایی به چه میزان می‌تواند موثر واقع گردد که بدین منظور نحوه تغییرات در سه تراز سطح آب دریاچه ۱۲۷۲، ۱۲۷۴، ۱۲۷۶ مقایسه گردید و همچنین مقایسه‌ای بین حداکثر تراز دریاچه ارومیه ۱۲۷۷/۸ و حداقل تراز دریاچه ارومیه ۱۲۷۰/۶ تا سال ۱۳۹۶ صورت گرفت. در مقایسه اول شرایط اولیه با تراز ۱۲۷۴ و در مقایسه دوم شرایط اولیه برای تراز ۱۲۷۷/۸ برقرار گردید. در حالت اول غلظت شوری آب دریاچه ۳۴۰ گرم در لیتر و در حالت دوم غلظت شوری دریاچه ۱۶۶ گرم در لیتر ثابت در نظر گرفته شد. در طول کل شبیه‌سازی‌ها تغذیه



شکل ۱۰- پروفیل‌های سطح آب زیرزمینی بدون تأثیر تغییرات چگالی  
Figure 10- Groundwater level profiles without density changes



شکل ۱۱- پروفیل‌های سطح آب زیرزمینی در حداکثر و حداقل تراز دریاچه بدون تأثیر تغییرات چگالی  
Figure 11- Groundwater level profiles in maximum and minimum Lake levels without density changes

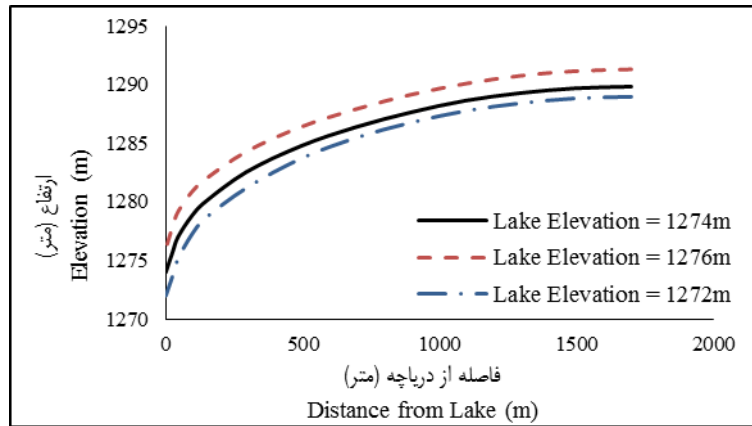
داد که با کاهش ۷/۲ متری تراز دریاچه بسته به فاصله از دریاچه تراز آب زیرزمینی بین ۳ تا ۷/۲ متر کاهش یافت. نتایج ارائه شده در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ بیانگر این است که میزان کاهش و افزایش آب زیرزمینی در آبخوان تحت تأثیر فاصله از دریاچه بوده و در فواصل نزدیک دریاچه میزان تأثیر بیشتر بوده و با فاصله گرفتن از دریاچه کاهش یافته و به میزان ثابتی می‌رسد. در شکل ۱۴، مقایسه‌ای بین پروفیل‌های سطح آب زیرزمینی در حداقل تراز دریاچه ارومیه با و بدون در نظر گرفتن تغییر چگالی انجام شده است که می‌توان نتیجه گرفت زمانی که تأثیر تغییرات چگالی نادیده گرفته شود سطح آب زیرزمینی بیش از حدود ۲ برابر نسبت به زمانی که تغییرات چگالی تحت تأثیر تغییرات تراز دریاچه است کاهش می‌یابد. پس با این وجود افزایش و کاهش غلظت و در نتیجه افزایش و کاهش چگالی می‌تواند تأثیر زیادی در کاهش و افزایش تراز آب زیرزمینی داشته باشد.

#### تأثیر میزان افت سطح آب دریاچه ارومیه بر روی میزان پیشروی گوه آب شور

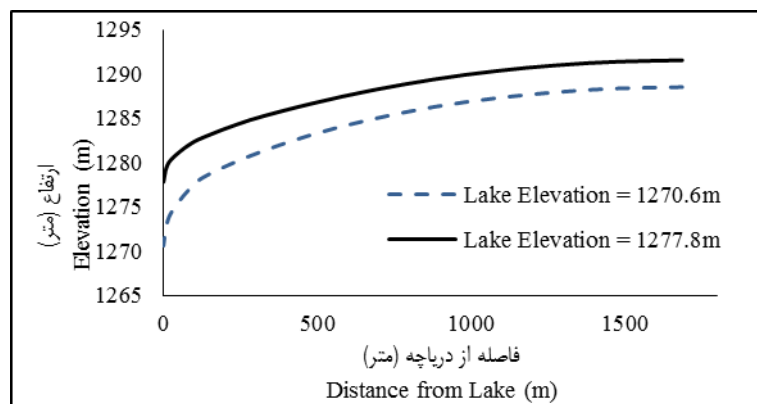
به منظور تعیین تأثیر میزان پسروی آب دریاچه بر گوه آب شور پروفیل شماره ۲ از شکل ۳، در نظر گرفته شد. برای این شبیه‌سازی دو حالت در نظر گرفته شد: الف: کاهش سطح آب دریاچه در شرایط غلظت ثابت، ب: کاهش سطح آب دریاچه همراه با افزایش غلظت و افزایش چگالی. ابتدا به منظور ایجاد شرایط پایدار اولیه سطح آب دریاچه در تراز ۱۲۷۷/۸ متر ثابت فرض شد. در حالت (الف) پس از رسیدن به شرایط پایدار، تراز دریاچه بدون تغییر غلظت به ۱۲۷۰/۶ کاهش داده شد و در حالت (ب) پس از رسیدن به شرایط پایدار، تراز دریاچه با تغییر غلظت به ۱۲۷۰/۶ کاهش یافت.

#### تأثیر میزان افت سطح آب دریاچه ارومیه بر افت تراز آب زیرزمینی با در نظر گرفتن تغییر چگالی

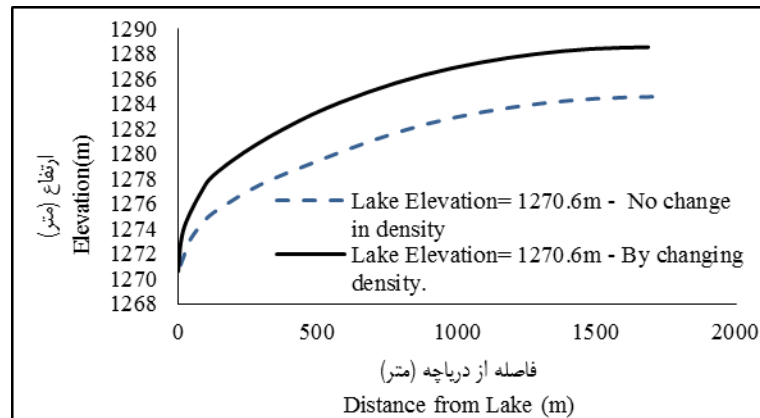
این سناریو مشابه با سناریوی قبل می‌باشد با این تفاوت که در این حالت تأثیرات تغییر غلظت آب دریاچه با افزایش و کاهش تراز آب با توجه به جدول ۱، نیز در نظر گرفته شده است. بدین منظور نحوه تغییرات در سه تراز سطح آب دریاچه ۱۲۷۲، ۱۲۷۴، ۱۲۷۶ مقایسه گردید و همچنین مقایسه‌ای بین حداکثر تراز دریاچه ارومیه ۱۲۷۷/۸ و حداقل تراز دریاچه ارومیه ۱۲۷۰/۶ تا سال ۱۳۹۶ صورت گرفت. در مقایسه اول ابتدا به منظور ایجاد شرایط اولیه سطح آب دریاچه در تراز ۱۲۷۴ ثابت شد تا حالت پایدار ایجاد شود و پس از آن سطح آب دریاچه به تراز ۱۲۷۶ افزایش داده شد تا شرایط به حالت پایدار رسیده و سپس تراز آب دریاچه به ۱۲۷۲ کاهش داده شد. نتایج نشان داد که افزایش تراز آب دریاچه به میزان ۲ متر موجب افزایش تراز آب زیرزمینی بسته به فاصله از دریاچه بین ۱/۵ تا ۲ متر شد. با کاهش تراز دریاچه به میزان ۲ متر نیز سطح آب زیرزمینی بسته به فاصله از دریاچه بین ۰/۸۶ تا ۲ متر کاهش یافت. در شکل ۱۲، مشاهده می‌شود که میزان افزایش تراز آب زیرزمینی وقتی که تراز دریاچه از ۱۲۷۴ به ۱۲۷۶ می‌رسد بیشتر از میزان کاهش سطح آب زیرزمینی در زمانی است که تراز آب دریاچه از ۱۲۷۴ به ۱۲۷۲ می‌رسد که این بدین علت است که وقتی تراز دریاچه ۲ متر افزایش یافته است غلظت نمک در آن ۳۰ گرم کاهش یافته است و زمانی که تراز آب دریاچه ۲ متر کاهش پیدا کرده است غلظت نمک ۸۰ گرم افزایش یافته است. در مقایسه دوم نیز به منظور ایجاد شرایط پایدار اولیه سطح آب دریاچه در تراز ۱۲۷۷/۸ متر ثابت شد. پس از رسیدن به شرایط پایدار تراز دریاچه به ۱۲۷۰/۶ کاهش داده شد و نتایج نشان



شکل ۱۲- پروفیل‌های سطح آب زیرزمینی با تأثیر تغییرات چگالی  
Figure 12- Groundwater level profiles with density changes



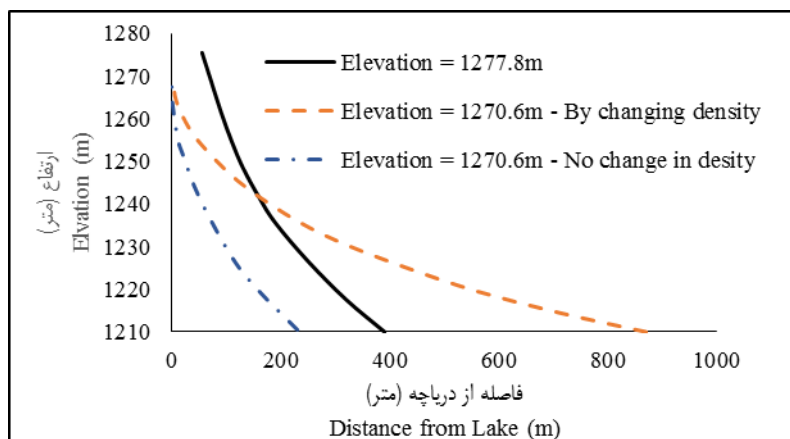
شکل ۱۳- پروفیل‌های سطح آب زیرزمینی در حداکثر و حداقل تراز دریاچه با تأثیر تغییرات چگالی  
Figure 13- Groundwater level profiles in maximum and minimum Lake levels with density changes



شکل ۱۴- پروفیل‌های سطح آب زیرزمینی با و بدون تغییر چگالی در حداقل تراز دریاچه  
Figure 14- Groundwater level profiles with and without the density variation in the minimum level of Lake

تراز دریاچه، گوهی آب شور پیشروی می‌کند که در این مطالعه پس از ایجاد شرایط پایدار گوهی آب شور حدود ۴۸۰ متر پیشروی کرد و در زمانی که تغییرات غلظت تأثیر داده نشود گوه آب شور پیشروی می‌کند که در این شبیه‌سازی گوه آب شور حدود ۱۶۰ متر پیشروی نمود.

نتایج نشان می‌دهد که در هر دو حالت به علت پسروی ساحل زمانی که تراز کاهش می‌یابد، قسمت فوقانی گوه نیز به سمت دریاچه پیشروی می‌کند. با توجه به شکل ۱۵، واضح است زمانی که تغییرات غلظت و در نتیجه تغییرات چگالی تأثیر داده می‌شود با کاهش سطح



شکل ۱۵- گوه آب شور در حداکثر و حداقل تراز دریاچه با و بدون در نظر گرفتن تغییر چگالی

Figure 15- Saltwater wedge in the maximum and minimum lake levels with and without density variation

در سراسر سفره خواهد بود که با نتایج چانگ و همکاران (۸) مطابقت دارد. در سناریوی سوم تأثیر پسروری دریاچه ارومیه بر تراز آب زیرزمینی در تأثیر تغییرات چگالی بررسی گردید و مقایسه نیز با سناریوی دوم صورت گرفت که نتایج بدین صورت بود که وقتی تأثیر تغییرات چگالی نادیده گرفته شود سطح آب زیرزمینی بیش از حدود ۲ برابر نسبت به زمانی که تغییرات چگالی در نظر گرفته شود تحت تأثیر تغییرات تراز دریاچه می‌باشد. پس با این وجود افزایش و کاهش غلظت و در نتیجه افزایش و کاهش چگالی می‌تواند تأثیر زیادی در کاهش و افزایش تراز آب زیرزمینی داشته باشد. در سناریوی چهارم نیز تأثیر پسروری دریاچه بر گوه آب شور بررسی شد که می‌توان به این نتیجه رسید، زمانی که تغییرات غلظت و در نتیجه تغییرات چگالی تأثیر داده می‌شود با کاهش سطح تراز دریاچه، گوه آب شور پسروری و در زمانی که تغییرات غلظت تأثیر داده نشود گوه آب شور پسروری می‌کند.

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر پسروری آب دریاچه ارومیه بر میزان افت تراز آب و میزان پیشروی و پسروری گوه آب شور در آبخوان‌های مجاور، شبیه‌سازی‌ها در چهار سناریو صورت گرفت. در سناریوی اول به منظور بررسی میزان پیشروی گوهی آب شور در سال‌های اخیر سه پروفیل در شمال و مرکز و جنوب منطقه مورد مطالعه بررسی گردید که نتایج نشان داد در سال‌های اخیر تغییر چشم‌گیری در جابه‌جایی گوه آب شور صورت نگرفته است و این تغییر عرضی کمتر از ۵۰ متر می‌باشد و تنها قسمت ابتدایی گوه بیشتر تحت تأثیر کاهش تراز دریاچه قرار گرفته که دلیل آن عقب‌نشینی ساحل دریاچه و در نتیجه پسروری شرایط مرزی اعمال شده می‌باشد. در سناریوی دوم تأثیر پسروری دریاچه ارومیه بر تراز آب زیرزمینی در تأثیر تغییرات چگالی بررسی گردید که یافته‌ها نشان می‌دهد در صورتی که غلظت آب دریاچه ثابت در نظر گرفته شود میزان افزایش و کاهش تراز آب زیرزمینی برابر با افزایش و کاهش تراز دریاچه

## منابع

- 1- Abdelaty I.M., Abd-Elhamid H.F., Fahmy M.R., and Abdelaal G.M. 2014. Investigation of some potential parameters and its impacts on saltwater intrusion in Nile Delta aquifer. J Eng Sci Assiut Univ Fac Eng 42(4): 931-955.
- 2- Ahmadi H., Hemmati M., and Motallebian M. 2018. Assessment of Accuracy of CTRAN/W and SEAWAT Models for Prediction of Saltwater Wedge Under Intruding and Receding Conditions. Journal of Water and Soil 32: 13-27. (In Persian)
- 3- Ahmadi R., Negarestan H., Peikaranmana N., Esmailly L., Hosseinpour R., Shoahasany A., Ganji S., Mehrannejad R., and Mostfazadeh B. 2007. Artemia population changes on Orumieh Lake. (In Persian)
- 4- Ale Sheikh A.A., Mohammadi A.A., and Ghorbanali A. 2005. Monitoring of coastline using remote sensing. International Journal of Applied Geosciences Research 4: 9-25. (In Persian)
- 5- Arlai P., and Koch M. 2009. The importance of density-dependent flow and solute transport modeling to simulate seawater intrusion into a coastal aquifer system. In International Symposium on Efficient Groundwater Resources Management (IGSTH 2009), Bangkok, Thailand, February 2009 Feb 16 (pp. 16-21).

- 6- Artemia cysts and biomass. Faculty of Agriculture and Applied Biological Science, Laboratory of Aquaculture and Artemia Reference Center, Ghent University, Belgium.
- 7- Barlow P.M., and Reichard E.G. 2010. Saltwater intrusion in coastal regions of North America. *Hydrogeology Journal* 18: 247-260.
- 8- Chang S.W., Clement T.P., Simpson M.J., and Lee K.K. 2011. Does sea-level rise have an impact on saltwater intrusion? *Advances in Water Resources* 34(10): 1283-91.
- 9- Farhoudi H.R., and Ketabchi H. 2018. Numerical Simulation of Urmia Lake and Ajabshir Coastal Aquifer Interaction, *Iran-Water Resources Research* 1: 45-58. (In Persian)
- 10- Jafari F., and Eftekhari M. 2013. Investigation of water exchange and penetration of the saltwater of Lake Urmia to adjoining aquifers, *Water and irrigation management (Journal of Agricultural)* 3: 29-47. (In Persian)
- 11- Javanmard F.Z., Mahdavi M., Malek M.R., and Keirkhah Zarkesh M.M. 2013. Modeling of Groundwater Vulnerabilities Uncertainty Using GIS & Rough Set. *Iran-Water Resources Research* 1: 26-38. (In Persian)
- 12- Karbassi A., Bidhendi G.N., Pejman A., and Bidhendi M.E. 2010. Environmental impacts of desalination on the ecology of Lake Urmia, *Journal of Great Lakes Research* 3: 419-24.
- 13- Ketabchi H., Mahmoodzadeh D., Ataie Ashtiani B., Werner A.D., and Simmons C.T. 2014. Sea level rise impact on fresh groundwater lenses in two-layer small islands. *Hydrological Processes* 28(24): 5938-5953.
- 14- Kresic N. 2006. *Hydrogeology and Groundwater Modelling*.
- 15- Manaffar R. 2012. Genetic diversity of Artemia populations in Lake Urmia, Iran. PhD thesis, Ghent University, Belgium. P.160.
- 16- Montaseri M. 2007. *Water Resources Identification Studies*. (In Persian)
- 17- Motallebian M., Ahmadi H., Raof A., and Cartwright N. 2019. An alternative approach to control saltwater intrusion in coastal aquifers using a freshwater surface recharge canal. *Journal of Contaminant Hydrology* 222: 56-64.
- 18- Nakhaei M., Mohammadi M., and Rezaei M. 2014. Optimizing of Aquifer Withdrawal Numerical Model Using Genetic Algorithm (Case Study: Uromiyeh Coastal Aquifer), *Iran-Water Resources Research* 2: 94-97. (In Persian)
- 19- National Research Council. 1990. *GroundWater Models: Scientific and Regulatory Applications*, National Academy Press, Washington, D.C.
- 20- Noorabadi S., Nazemi A.H., Sadraddini A.A., and Delirhasannia R. 2017. Laboratory investigation of water extraction effects on saltwater wedge displacement. *Global Journal of Environmental Science and Management* 3(1): 21-32.
- 21- Rad F.A., Aksoz N., and Hejazi M.A. 2011. Effect of salinity on cell growth and  $\beta$ -carotene production in *Dunaliella* sp. isolates from Urmia Lake in northwest of Iran. *African Journal of Biotechnology* 10(12): 2282-2289.
- 22- Rasouli A.A., Abbasian S., and Jahanbakhsh S. 2008. Monitoring lake Urmia water level fluctuations by processing multi-sensory satellite imagery. *Quarterly journal of humanities* 2: 53-71. (In Persian)
- 23- Rasouli A.A., and Abbasian S. 2007. Preliminary analysis of time series of water level of Lake Urmia, *Journal of Geography and Planning* 28: 137-165. (In Persian)
- 24- Sorgeloos P. 1997. Lake Urmia cooperation project – contract item A, Report on the ‘Resource assessment of Urmia Lake
- 25- Todd K.D., and Mays L.W. 2005. *Groundwater Hydrology*. John Wiley & Sons, 508 p.
- 26- U.S. Geological Survey (USGS). 2000. *Groundwater resources for the future—Atlantic Coastal Zone*, Fact Sheet 085-00, Reston, VA.
- 27- Zamaniakbari A., and Maleki S. 2010. Assessment of changes in the coastline of Lake Urmia during the period of 1989-2005 using RS and GIS data, *National Geomatics Conference 2010*, National Cartographic Center. (In Persian)
- 28- Zeaieanfiroozabadi P., Karimi K., and Darouei P. 2014. Evaluation of changes in the southeast of Lake Urmia during 1984 and 2004 using GIS, *First National Environmental Conference*, Dehaghan, Payame Noor University of Dehaghan. (In Persian)
- 29- Zheng C., and Bennett G.D. 1995. *Applied contaminant transport modeling: Theory and practice*, Van Nostrand Reinhold New York, v. 5.

## Investigating the Effect of Urmia Lake Water-level Fluctuations on Groundwater Level Changes Trend

M. Motallebian<sup>1</sup> - H. Ahmadi<sup>2\*</sup> - A. Raouf<sup>3</sup> - N. Cartwright<sup>4</sup>

Received: 23-06-2019

Accepted: 09-02-2020

**Introduction:** Aquifers are the major source of freshwater in many parts of the world. Saltwater intrusion (SWI) is a serious environmental issue since 80% of the world's population live along the coast and utilize local aquifers for their water supply. Globally, coastal aquifers are under threat from saltwater intrusion (SWI). SWI is caused by changes in coastal aquifer conditions resulting from ground water extraction, climate drivers, sea-level rise, oceanic over topping events, and land use change. Under natural conditions, these coastal aquifers are recharged by rainfall events, and the regional groundwater flow towards the ocean counters the intrusion of saltwater into the freshwater region. However, over-exploitation of coastal aquifers in some regions has resulted in a reduction in fresh groundwater levels (and hence reduced natural flow) and this has led to an increase in saltwater intrusion. Saltwater intrusion degrades the quality of coastal aquifer groundwater resource which can lead to a reduction in crop yield efficiency, limitation on the drinking water resource as well as soil fertility and salinity of operated wells. Such problems are more crucial where groundwater aquifers are shallow.

**Materials and Methods:** The aim of this study is to investigate the effect of Lake Urmia water-level fluctuations on groundwater table and rate of the intruding or receding of salt water to the coastal aquifer. In order to achieve this purpose, Rashakan coastal aquifer in the vicinity of Lake Urmia in the northwest of Iran was simulated. In this study, SEAWAT model was used to simulate the problem. SEAWAT was specifically designed for the simulation of SI, although it has many other applications as well, notably the combined simulation of groundwater flow and heat transfer. SEAWAT as a widely used, three-dimensional variable-density groundwater flow and transport model has been developed by the USGS based on MODFLOW and MT3DMS and includes two additional packages: Variable-Density Flow (VDF) and Viscosity (VSC). First, the model was calibrated and then the simulations were defined in four scenarios as follows: a) The rate of the intruding or receding of salt water to the coastal aquifer during recent years b) The effect of the drop-in lake water level on groundwater level changes trend regardless of changes in lake water density c) The effect of the drop-in lake water level on groundwater level changes trend in view of changes in lake water density d) The effect of the drop-in lake water level on the rate of the intruding or receding of salt water.

**Results and Discussion:** In this study, simulations were carried out under four scenarios in order to investigate the effect of Lake Urmia water-level fluctuations on groundwater table and rate of the intruding or receding of salt water to the coastal aquifer. In the first scenario, in order to assess the rate of the intruding or receding of salt water to the coastal aquifer in recent years, three profiles have been investigated in the north and the center and south of the study area, and the results showed that in recent years there has been no significant change in the displacement of the salt-water wedge and this change was less than 50 meters and only the upper part of wedge connected to the lake was more affected by dropping water level of lake, which was due to retreat of the boundary imposed by lake water recession. In the second scenario, the effect of the drop-in lake water level on groundwater level changes trend, regardless of changes in lake water density, was investigated. The findings of the study showed that if the concentration of lake water is considered constant, the increase and decrease in groundwater level across the aquifer would be almost equal to the increase and decrease the lake water level. In the third scenario, the effect of the drop-in lake water level on groundwater level changes trend in view of changes in lake water density was investigated and the findings was also made with the second scenario,

1 and 2- Ph.D. Student of Hydraulic Structures and Associate Professor, Department of Water Engineering, Urmia University, Urmia, respectively.

(\*- Corresponding Author Email: hojjat.a@gmail.com)

3- Assistant Professor, Department of Earth Sciences, Utrecht University, Utrecht, The Netherlands

4- Assistant Professor, School of Built Environment and Engineering, Griffith University, Southport, Queensland, Australia

DOI: 10.22067/jsw.v34i2.81370



where the results showed that when the effect of the density changes is neglected, the groundwater level is affected by the lake water level changes more than about 2 times that when the density changes are considered. However, increasing and decreasing concentrations, and consequently increasing and decreasing the density, may have a great effect on the reduction and increase of groundwater levels. In the fourth scenario, the effect of the drop-in lake water level on the rate of the intruding or receding of salt water was also investigated. It can be concluded that when concentration changes and as a result of variations in density are affected, by decreasing the level of the lake, saltwater wedge would be intruded and when the effect of the density changes is neglected, saltwater wedge would be receded.

**Conclusion:** The results of this study indicated that during recent years there has been no significant change in the location of the salt water wedge, and this change is less than 50 meters. The upper part of wedge connected to the lake is more affected by dropping water level of lake, which is due to retreat of the boundary imposed by lake water recession. Also, the findings of the study showed that if the concentration of lake water is considered constant, the increase and decrease in groundwater level across the aquifer will be almost equal to the increase and decrease of the lake water level. When the effect of the density changes is neglected, the groundwater level is affected by the lake water level changes more than by about 2 times that when the density changes are considered. Despite the decreasing of about 7 meters of lake Urmia water level, due to increase the density of water, the wedge has intruded. This research shows that in the event of an increase in the water level of Lake and consequently a decrease in water density, Saltwater wedge would be receded.

**Keywords:** Coastal aquifer, Lake Urmia, Saltwater intrusion, SEAWAT model