مجله علمی - پژوهشی
دوره 10، شماره 4، زمستان 1394

بررسی اثر افزایش سطح آب دریا و تغییرات نرخ تغذیه بر پیشروی آب شور در آبخوان محصور

داود محمودزاده[1]، حامد کتابچی[2*]، بهزاد عطائی آشتیانی[3]

1- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
2- استادیار، مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
3- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

[*] **h.ketabchi@modares.ac.ir**

چکیده- حدود 60 درصد از جمعیت جهان در فاصله 60 کیلومتری از سواحل زندگی می‌کنند. در مناطق ساحلی، آبخوان‌های ساحلی از مهمترین منابع تأمین آب شیرین زیرزمینی می‌باشند و انتظار می‌رود که تأثیرات تغییرات اقلیم در کوتاه مدت و یا در بلند مدت از عوامل تهدید کننده این آبخوان‌ها باشند. به طور کلی پیش‌بینی می‌شود که تغییرات اقلیم از جمله افزایش سطح آب دریاها باعث افزایش پیشروی آب شور در آبخوان‌های ساحلی شود. مطالعه حاضر بر روی یک آبخوان محصور صورت گرفته است و هدف اصلی، بررسی رفتار پیشروی آب شور در آبخوان‌های ساحلی به دلیل اثرات تغییرات اقلیم و مشخصه‌های آبخوان است. برای مدل‌سازی دوبعدی سیستم آب زیرزمینی و تعیین مقدار پیشروی آب شور از برنامه عددی سوترا استفاده شده است. اثر افزایش سطح آب دریا بر اساس پیش‌بینی انجمن بین دولتی تغییرات اقلیم در سال 2013 در حالت‌های دائمی و غیردائمی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که اثر دائمی افزایش سطح آب دریا در آبخوان محصور، تأثیر ناچیزی بر مقدار پیشروی آب شور دارد. در حالت غیردائمی، مکانیزم برگشت پیشروی آب شور به دلیل پاسخ سیستم آب زیرزمینی به افزایش سطح آب دریا قابل مشاهده می‌باشد. بررسی این مکانیزم نشان می‌دهد که در بازه‌ای از زمان‌ها، پیشروی به بیشترین مقدار می‌رسد و پس از آن به تدریج به حالت اولیه خود باز می‌گردد. نتایج این مطالعه می‌تواند در نمونه‌های واقعی آبخوان‌های ساحلی نیز به کار گرفته شده و در تحلیل رفتار آنها کمک کننده و راه‌گشا باشد.

کلیدواژگان: آبخوان ساحلی محصور، آب زیرزمینی، افزایش سطح آب دریا، پیشروی آب شور، تغییرات نرخ تغذیه.

1- مقدمه

آب شیرین زیرزمینی در مناطق ساحلی از آبخوان‌های ساحلی برداشت می شود. امروزه این آبخوان‌ها به دلیل پیشروی آب شور دریا به سمت آنها بسیار در معرض خطر قرار گرفته‌اند، بطوری که این پیشروی باعث شده است که آب برداشتی از آبخوان‌ها برای مدتی طولانی به دلیل شوری قابل استفاده نباشد (Ketabchi et al. 2014).

پیشروی آب شور در آبخوان‌های ساحلی یک فرایند طبیعی است که به دلیل تفاوت در چگالی آب شور و آب شیرین اتفاق می‌افتد. این پیشروی از سمت آب دریا که حاوی آب شور است به سمت آبخوان‌های ساحلی که دارای آب شیرین است انجام می‌شود و یک پنجه پیشروی را ایجاد می‌نماید. وسعت پیشروی می‌تواند بصورت متغیر از چند متر تا چند کیلومتر ادامه یابد (کتابچی و همکاران، 1392، محمودزاده و همکاران، 1392 و Laattoe et al.,

2013). در آبخوان‌های ساحلی به دلیل برداشت بیش از حد و کنترل نشده آب از چاه‌ها، نوسانات جزر و مدی، اثرات تغییر اقلیم که امروزه بیشتر مورد توجه قرار گرفته است، پدیده پیشروی آب شور تشدید می‌شود (Ketabchi and Ataie-Ashtiani, 2015b,c و رجبی و همکاران، 1390).

تغییرات اقلیم یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار بر روی پدیده پیشروی آب شور است. بر اساس آخرین گزارش انجمن بین دولتی تغییرات اقلیم[1] (IPCC, 2013)، می‌توان دریافت که آبخوان‌های ساحلی بر اثر عوامل تغییرات اقلیم از جمله افزایش تراز آب دریا[2]، تغییرات خط ساحلی[3] و تغییرات نرخ تغذیه[4] بیشتر آسیب‌پذیر می‌باشند و همین موضوع باعث اهمیت بررسی و مطالعه میزان پیشروی آب شور در آبخوان‌های ساحلی می‌شود که در مطالعه مروری اخیر انجام شده توسط Ketabchi and Ataie-Ashtiani در سال 2015a,c و Ketabchi و همکاران در سال 2016(a) به چالش‌های موجود در زمینه تغییرات اقلیم و در نظر گرفتن اثرات تغییرات اقلیم در مباحث مدیریت منابع آب زیرزمینی تأکید شده است. در مطالعات انجام گرفته، 0/5 تا 4 متر افزایش سطح آب دریا تا انتهای قرن 21 پیش‌بینی شده است (Vermeer and Rahmstorf, 2009 و IPCC, 2013).

بررسی و مرور مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که در ابتدا بیشتر محققان بر روی شبیه‌سازی پدیده پیشروی آب شور و بررسی عوامل تشدید کننده آن مطالعه نموده‌اند و اثر تغییرات تراز آب دریا بر روی آن کمتر در نظر گرفته شده است، اما در سال‌های اخیر این موضوع اهمیت یافته است.

Sherif و Singh در سال 1999 برای اولین بار تأثیرات تغییر اقلیم از جمله افزایش تراز آب دریا بر روی آبخوان دلتای نیل در مصر و آبخوان مدرس در هند را مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که در صورتی که تراز آب دریا افزایش یابد، آسیب پذیری این آبخوان‌ها به دلیل پیشروی آب شور افزایش می‌یابد. Oude-Essink و Schaars در سال 2002 با استفاده از مدل عددی MOCDENS3D شبیه‌سازی پیشروی آب شور به دلیل تغییرات تراز آب دریا که ناشی از عوامل طبیعی و غیرطبیعی می‌شود را بررسی نمودند و سپس به تأثیرات برداشت آب از آبخوان‌ها و آسیب پذیری آنها پرداختند.

Melloul و Collin در سال 2006 پتانسیل افزایش تراز آب دریا که منجر به آسیب‌پذیری آب شیرین در یک آبخوان ساحلی می‌گردد را ارزیابی نمودند. در مطالعه آنها میزان پیشروی آب شور به دلیل افزایش تراز آب دریا و تغییرات هد آب زیرزمینی اندازه‌گیری شد و نتایج مطالعه نشان داد که تلفات آب شیرین ذخیره شده حدود 77 درصد به دلیل 0/5 متر افزایش تراز آب دریا و فقط حدود 23 درصد به علت تغییرات هد سطح آب زیرزمینی است. در مطالعه Payne در سال 2010 تأثیر تغییرات نرخ تغذیه و افزایش تراز آب دریا برای آبخوان هیلتون هد در جنوب کالیفرنیا مورد بررسی قرار گرفته است، نتایج مطالعه Payne نشان می‌دهد که تأثیر قابل توجهی بر رفتار آب شور در این حالت اتفاق می‌افتد. نرخ تغذیه ممکن است نسبت به نرخ افزایش تراز آب تأثیر مهمی در پیشروی آب شور داشته باشد.

Chang و همکاران در سال 2011 بر روی یک آبخوان (محصور و نامحصور) در استرالیا مطالعه‌ای را انجام دادند. آنها یک مکانیزم طبیعی پاسخ‌دهی سیستم آب زیرزمینی به افزایش تراز آب دریا معرفی کردند. شبیه‌سازی‌های جریان در آبخوان محصور یک مکانیزم برگشت را نشان می‌دهد که گوه پیشروی را به نقطه ابتدایی خود باز می‌گرداند، اما در آبخوان نامحصور این مکانیزم ناچیز است. مطالعه Ataie-Ashtiani و همکاران در سال 2013 نشان می‌دهد که در بسیاری از مطالعات از تأثیر توأمان افزایش تراز آب دریا و تغییرات خط ساحلی صرف‌نظر شده است، همچنین در آبخوان‌های ساحلی کم عمق و نامحصور، در نظر گرفتن تغییرات خط ساحلی به طور قابل توجهی پیشروی آب شور را گسترده‌تر می‌نماید. این موضوع در مقایسه با سایر تأثیرات بسیار مهم‌تر می‌باشد. همچنین نتایج مطالعه نشان می‌دهد که در برخی موارد اثر تغییرات خط ساحلی بسیار مهم‌تر و بیشتر از عوامل دیگر است.

1. Intergovernmental panel on climate change
2. Sea level rise
3. Land surface inundation
4. Variations in recharge rate

Sefelnasr و Sherif در سال 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 گرفته است و به عنوان عامل مهمی به جهت به زیر آب رفتن منطقه مورد مطالعه معرفی شده است. تغییرات خط ساحلی در مطالعه آنها با افزایش تراز آب دریا به میزان 0/5 و 1 متر سبب افزایش 19 و 32 درصدی پیشروی آب در سطح زمین می‌شود. در این مطالعه کاهش 50 درصدی و افزایش 200 درصدی شرایط پمپاژ نسبت به وضع موجود نیز در سناریوها مورد بررسی قرار گرفته است.

در مطالعه محمودزاده و همکاران در سال 1395 نیز به بررسی مشخصه‌های تغییرات محیطی که متأثر از تغییرات اقلیم می‌باشد، اشاره شده است و در نظر گرفتن سناریوهای افزایش تراز آب دریا و تغییرات نرخ تغذیه در مباحث مدیریت آب زیرزمینی تأکید شده است. نتیجه مطالعه آنها نشان می‌دهد که ملحوظ نمودن آثار تغییرات اقلیم در مدیریت بهینه آبخوان جزیره کیش منجر به کاهش بیش از 20 درصدی مقدار مجاز برداشت شده است. این موضوع در مطالعه Mahmoodzadeh و همکاران در سال 2014 نیز مورد بررسی قرار گرفته است و نشان دهنده اهمیت در نظر گرفتن این آثار در مدیریت منابع آب زیرزمینی است.

در مطالعه اخیر Ketabchi و همکاران در سال 2016(a) برای اولین بار یک بررسی سیستماتیک و جامع از مطالعات اخیر 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 ارائه شده است. 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. همچنین این مطالعه به چالش‌های موجود در این زمینه پرداخته است. از جمله این چالش‌ها می‌توان به در نظرگرفتن تأثیرات واقعی پدیده‌های تغییرات اقلیم از جمله افزایش تدریجی تراز آب دریا، عدم قطعیت‌ها و تاثیرات آن در مدل‌های تصمیم‌گیری اشاره نمود.

بر اساس جمع‌بندی مطالعات اخیر انجام شده می‌توان گفت، برای مدیریت منابع آب زیرزمینی و آگاهی از نحوه تأثیرپذیری این منابع ارزشمند و حیاتی تحت عوامل مختلفی از جمله پدیده تغییر اقلیم و مشخصه‌های آبخوان، در نظر گرفتن این عوامل و تأثیرات توأمان آنها، مهم و ضروری است و می‌تواند مدل‌سازی مسأله را به شرایط واقعی‌تر نزدیک کند. در نظر گرفتن این موضوع درک مناسبی از رفتار سیستم آب زیرزمینی تحت شرایط مختلف را به تصمیم گیرندگان در این حوزه می‌دهد. هدف اصلی این مطالعه، مدل‌سازی دوبعدی و عددی آبخوان محصور، اقتباس شده از مطالعه Chang و همکاران در سال 2011 می‌باشد که بر اساس نمونه‌ای واقعی در استرالیا است. در این مطالعه، بررسی توأمان عوامل مؤثر بر پیشروی آب شور انجام خواهد شد و تحت سناریوهای مختلفی این عوامل و تأثیرگذاری آنها مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت. از این‌رو نوآوری این مطالعه شامل یک بررسی جامع از عوامل مختلف از جمله :

- افزایش تراز آب دریا، به عنوان تأثیرات تغییر اقلیم
- تغییرات نرخ تغذیه، به عنوان تأثیرات تغییر اقلیم
- تغییرات ذخیره مخصوص، تغییرات مقدار پراکندگی، تغییرات هدایت هیدرولیکی و تغییرات مقدار جریان منطقه‌ای به عنوان مشخصه‌های آبخوان
- و بررسی مکانیزم برگشت و پاسخ‌دهی سیستم آب زیرزمینی تحت سناریوهای مختلف

بر روی آبخوان محصور می‌باشد که به صورت جداگانه و توأمان و همچنین با در نظر گرفتن شرایط زمانی دائمی و غیر دائمی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

2- شرح مسأله

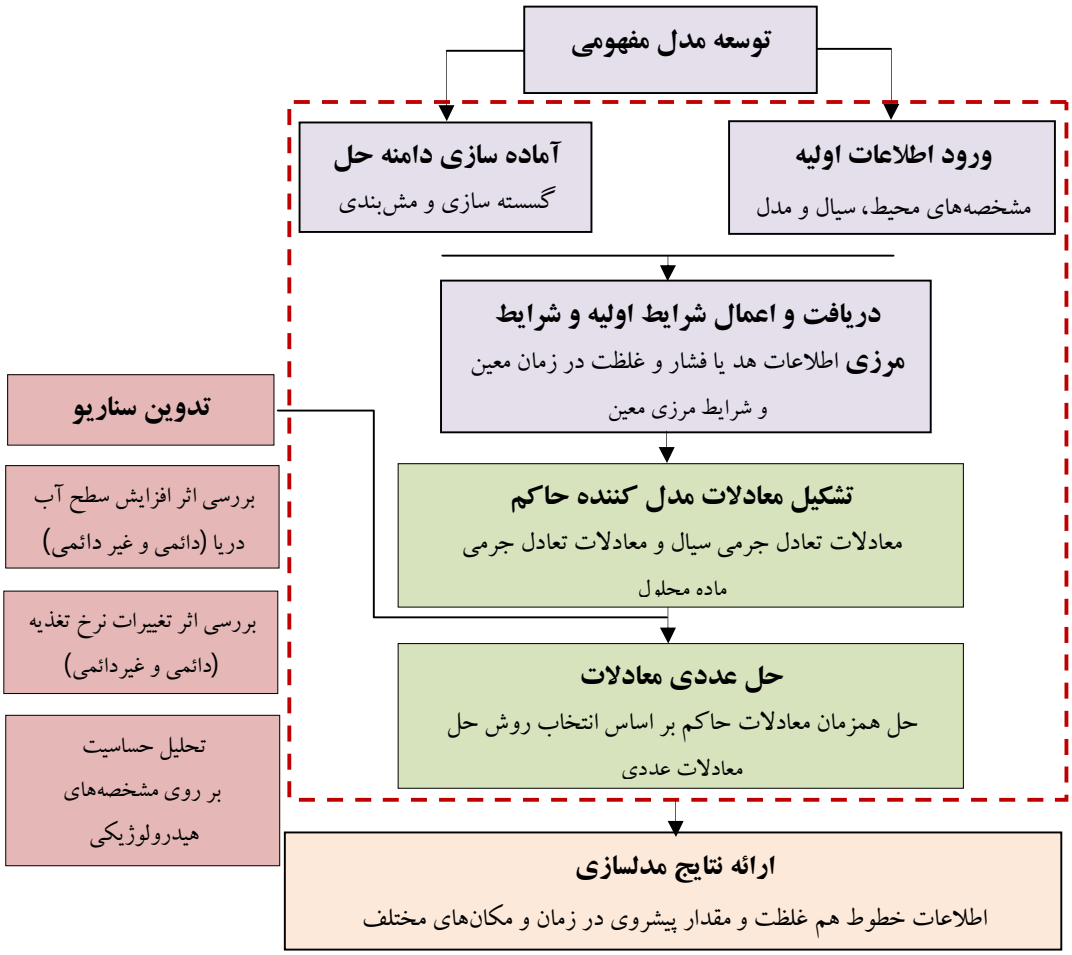
مطالعه صورت گرفته بر روی یک آبخوان محصور دوبعدی با طول 1000 متر و عرض 30 متر می‌باشد. دامنه مسأله مورد مطالعه با مطالعه صورت گرفته توسط Chang و همکاران در سال 2011 مطابقت دارد. نوع شبکه بکار رفته در این مدل به صورت مستطیلی است. برای گسسته‌سازی دامنه مورد مطالعه، در راستای طول به میزان 4 متر و در

راستای عرض 0/4 متر شبکه‌بندی شده است که تعداد کل المان‌ها 18750 و تعداد گره‌ها 19076 را سبب شده است. تراز اولیه آب دریا قبل از افزایش، 30 متر فرض شده است. روند انجام مطالعه در شکل 1 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود به منظور مدل‌سازی آبخوان محصور در این مطالعه، بر اساس دامنه مسأله گسسته شده، اطلاعات اولیه آبخوان و سپس شرایط اولیه و مرزی اعمال می‌شود. در ادامه پس از تشکیل معادلات حاکم در ابتدا مسأله برای رسیدن به وضعیت کنونی تحلیل شده و سپس با تعریف سناریوهای مدنظر نتایج ارائه می‌گردد و سپس بر روی نتایج بحث، تجزیه و تحلیل صورت می‌پذیرد. در جدول 1 مشخصه‌های هیدرولوژیکی و خصوصیات آبخوان برای مدل‌سازی ارائه شده است.

2-1- مدل مفهومی

مدل مفهومی توسعه یافته شده در این مطالعه بر اساس افزایش تراز آب دریا و تغییرات نرخ تغذیه بر پیشروی آب شور در آبخوان ساحلی می‌باشد. شکل 2 مدل مفهومی این تأثیر را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود انتظار می‌رود که بالا رفتن تراز آب دریا باعث پیشروی بیشتر آب شور گردد و با افزایش مقدار تغذیه مقدار پیشروی کمتر شود.

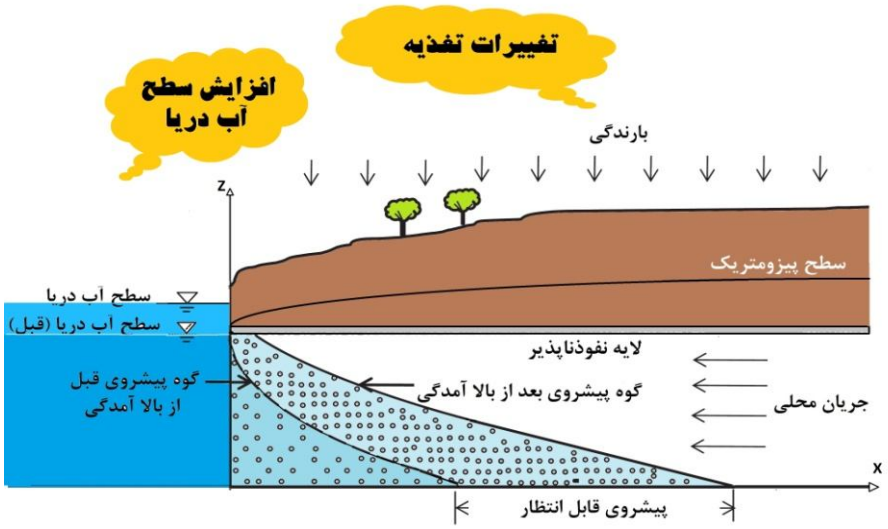
سناریوی افزایش تراز آب دریا در این مطالعه، به میزان 1 و 4 متر بر اساس آخرین گزارش IPCC در سال 2013 و محققانی مانند Vermeer and Rahmstorf (2009)، Chang و همکاران (2011) در نظر گرفته شده است.



شکل 1 روند انجام مطالعه و فرایند مدل‌سازی عددی آبخوان محصور (کتابچی، 1393)

جدول 1 مشخصه‌های هیدرولوژیکی و خصوصیات آبخوان برای مدل‌سازی اولیه

معرفی مشخصه‌ها	مقدار	واحد
نرخ جریان آب زیرزمینی منطقه‌ای	0/15	مترمکعب بر روز
نرخ تغذیه	0/05	میلی‌متر بر روز
هدایت هیدرولیکی	10	متر بر روز
ذخیره مخصوص	0/008	بر متر
ضریب پراکندگی طولی	1	متر
ضریب پراکندگی عرضی	0/1	متر
غلظت آب شور	35	کیلوگرم بر مترمکعب
چگالی آب شور	1025	کیلوگرم بر مترمکعب
چگالی آب شیرین	1000	کیلوگرم بر مترمکعب



شکل 2 مدل مفهومی تأثیر افزایش سطح آب دریا و تغییرات نرخ تغذیه بر پیشروی آب شور (محمودزاده، 1392)

نحوه اعمال این اثر به مدل به صورت ناگهانی (بدترین حالت) مانند دیدگاه بکار گرفته شده در مطالعه Watson و همکاران (2010)، Ketabchi و همکاران (2016 a,b) و Mahmoodzadeh و همکاران (2014) اعمال می‌شود. سناریوهای تغییرات نرخ تغذیه نیز در 5 حالت از 0/0005 تا 5 میلی‌متر بر روز در نظر گرفته شده است.

3- روش تحقیق

برای شبیه‌سازی سیستم آبخوان محصور با رویکرد شبیه‌سازی جریان‌های وابسته به چگالی در این مطالعه، از مدل عددی سوترا[1] (SUTRA) استفاده می‌شود. این مدل نخستین بار در سال 1984 توسط Voss ارائه شد و سپس توسط Voss و Provost در سال 2010 بازبینی شد. این مدل قابلیت مدل‌سازی با رویکرد شبیه‌سازی جریان‌های وابسته به چگالی و انتقال آلاینده محلول به صورت یک بعدی، دوبعدی و سه بعدی را دارا است و می‌تواند ناحیه اشباع و غیراشباع محیط متخلخل خاک را نیز مدل نماید. محققان مختلفی از جمله رجبی و همکاران (1390)، Ataie-Ashtiani و همکاران (1999) و Ketabchi و همکاران (2014 و 2016 a) تاکنون از این مدل برای

1. Saturated-Unsaturated Variable-Density Ground-Water Flow with Solute or Energy Transport

شبیه‌سازی جریان‌های وابسته به چگالی در آبخوان‌های ساحلی بهره جسته‌اند. محاسبات جریان وابسته به چگالی در محیط متخلخل در این مدل به روش المان محدود و محاسبات در گام‌های زمانی به روش تفاضل محدود انجام می‌شود. یکی از ویژگی‌های مهم این مدل که انتخاب آن در پژوهش حاضر نقش اساسی داشته است قابلیت در نظر گرفتن ناحیه انتقالی است (Voss and Provost, 2010).

معادله اصلی حاکم بر جریان سیال در محیط اشباع در این مدل عددی به‌صورت رابطه (1) است (Voss and Provost, 2010):

$$\left(\rho S_{op}\right)\frac{p}{t}+\left(\varepsilon\frac{\rho}{C}\right)\frac{C}{t}-\tilde{N}\left[\left(\frac{k\rho}{\mu}\right).\left(\tilde{N}p-\rho g\right)\right]=Q_p \quad (1)$$

در این رابطه ρ چگالی سیال، S_{op} فشار مخصوص، p فشار سیال، ε تخلخل خاک، k نفوذپذیری ماتریس خاک، μ لزجت دینامیکی سیال، g شتاب ثقل و Q_p منبع سیال است. معادله حاکم بر انتقال ماده محلول در مدل به‌صورت رابطه (2) تعریف می‌شود (Voss and Provost, 2010):

$$\frac{(\varepsilon\rho c)}{t}+\tilde{N}.(\varepsilon\rho vc)-\tilde{N}.\left[\varepsilon\rho(D_m I+D).\tilde{N}c\right]=Q_p(c^*) \quad (2)$$

که در آن v میانگین سرعت سیال، D_m ضریب پخش مولکولی، I ماتریس همانی، D ماتریس پراکندگی مکانیکی، c غلظت سیال (نسبت وزن ماده محلول به وزن سیال) و c^* غلظت ماده محلول در منبع سیال است. روابط بالا از نوشتن معادلات بقای جرم برای سیال و ماده محلول به‌دست آمده است. حل معادلات دیفرانسیل مشتقات جزئی در مدل سوترا با روش‌های عددی المان محدود و تفاضل محدود با فرض جداپذیر بودن فضا و مکان انجام می‌شود. گسسته‌سازی زمانی و مکانی منجر به سیستم معادلات جبری غیرخطی می شود که لازم است با استفاده از روش‌های تکراری حل شوند.

4- شرایط اولیه و مرزی

در این مطالعه، ابتدا برای تخمین پنجه پیشروی آب شور در حالت اولیه یعنی قبل از افزایش تراز آب دریا، در یک زمان طولانی شبیه‌سازی صورت می‌گیرد تا شرایط به تعادل رسیده دائمی برقرار شود. شرایط اولیه مطابق با مطالعات Mahmoodzadeh و همکاران (2014) و Ketabchi و همکاران (a 2016) به صورت فشار و غلظت آب شور در تمام دامنه مسأله اعمال شده است. غلظت و فشار به دست آمده تحت شرایط فعلی و در حالت پس از اجرای مدل به دست می‌آید و به عنوان شرط اولیه سناریوهای تعریف شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این سناریوها، مسأله تا زمان رسیدن به حالت دائمی حل می‌شود تا امکان بررسی رفتار سیستم از زمان اعمال تغییرات تا زمان پاسخ‌دهی کامل آبخوان به آن فراهم شود. شرایط مرزی اعمال شده به این صورت است که، مرز پایین بصورت مرزی نفوذ ناپذیر می‌باشد و مرزهای سمت راست و چپ به ترتیب مرز جریان منطقه ای و مرز فشار هیدرواستاتیکی است. مرز بالا نیز به صورت مرز تغذیه در نظر گرفته شده است (Ketabchi et al., 2016a, Mahmoodzadeh et al., 2015). جریان منطقه‌ای که به گره‌های مرز سمت راست مدل اعمال می‌شود برابر با 0/005 مترمربع بر روز (جریان بر واحد عرض) و یا مقدار کل نرخ جریان 0/15 مترمکعب بر روز در سرتاسر عرض آبخوان می‌باشد. مقدار تغذیه خالص که در مرز بالا وارد می‌شود 5×10^{-5} متر بر روز است.

نتایج شبیه‌سازی دائمی شده برای تخمین میزان پیشروی آب شور نشان می‌دهد که بیشترین مقدار پیشروی آب شور در حالت اولیه برابر 380 متر می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی در این بخش در شکل 3 و با رسم خطوط هم غلظت 50 درصد نشان داده شده است.

5- تجزیه و تحلیل نتایج

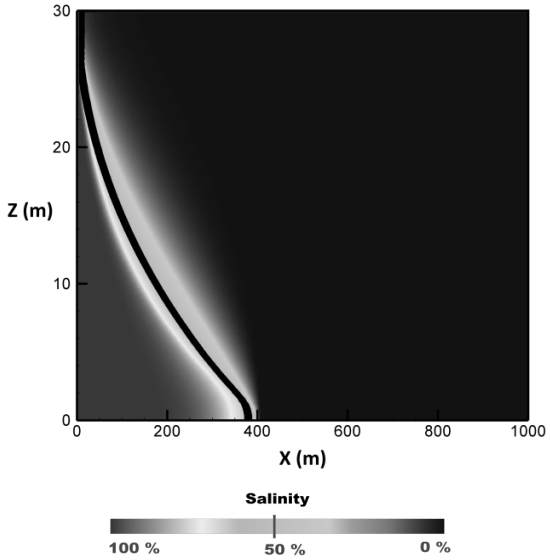
5-1- اثر دائمی افزایش تراز آب دریا

به منظور بررسی اثر افزایش تراز آب دریا، غلظت و فشار بدست آمده در حالت اولیه، به عنوان شرط اولیه سناریوی افزایش تراز آب دریا در نظر گرفته می‌شود. خطوط هم غلظت 50 درصد میزان پیشروی آب شور در آبخوان با افزایش تراز آب دریا به میزان 4 متر در شکل 4 نشان داده شده است. با تغییر سطح آب دریا، مسأله تا زمان رسیدن به حالت دائمی حل می‌شود که این زمان 500 سال

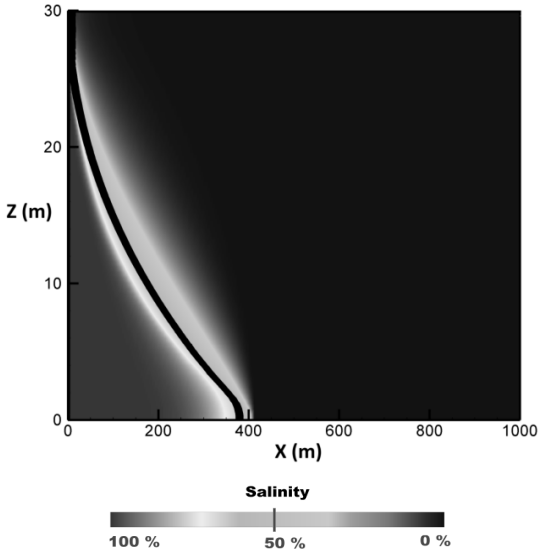
می‌باشد. همان‌طور که در شکل 4 مشاهده می‌شود، در حالت دائمی افزایش تراز آب دریا بر پیشروی آب شور در آبخوان محصور تأثیری ندارد و مقدار پیشروی تقریباً 380 متر می‌باشد. نتیجه فوق نشان می‌دهد که در آبخوان محصور افزایش تراز آب دریا تأثیری بر میزان پیشروی آب شور ندارد و با مطالعات صورت گرفته توسط Michael و همکاران (2013)، Chang و همکاران (2011)، Ketabchi و همکاران (a 2016) مطابقت دارد.

2-5- اثر دائمی تغییرات نرخ تغذیه

برای بررسی تغییرات دائمی نرخ تغذیه بر میزان پیشروی آب شور در آبخوان فوق، 5 حالت درنظر گرفته شده است. در سناریوهای 1 و 2 نرخ تغذیه به ترتیب 10 و 100 برابر و در سناریوهای 3 و 4 این مقدار 0/1 و 0/01 برابر شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با کاهش مقدار نرخ تغذیه در صورتی که تراز آب دریا افزایش نیافته باشد، میزان پیشروی آب شور بیشتر می‌گردد.

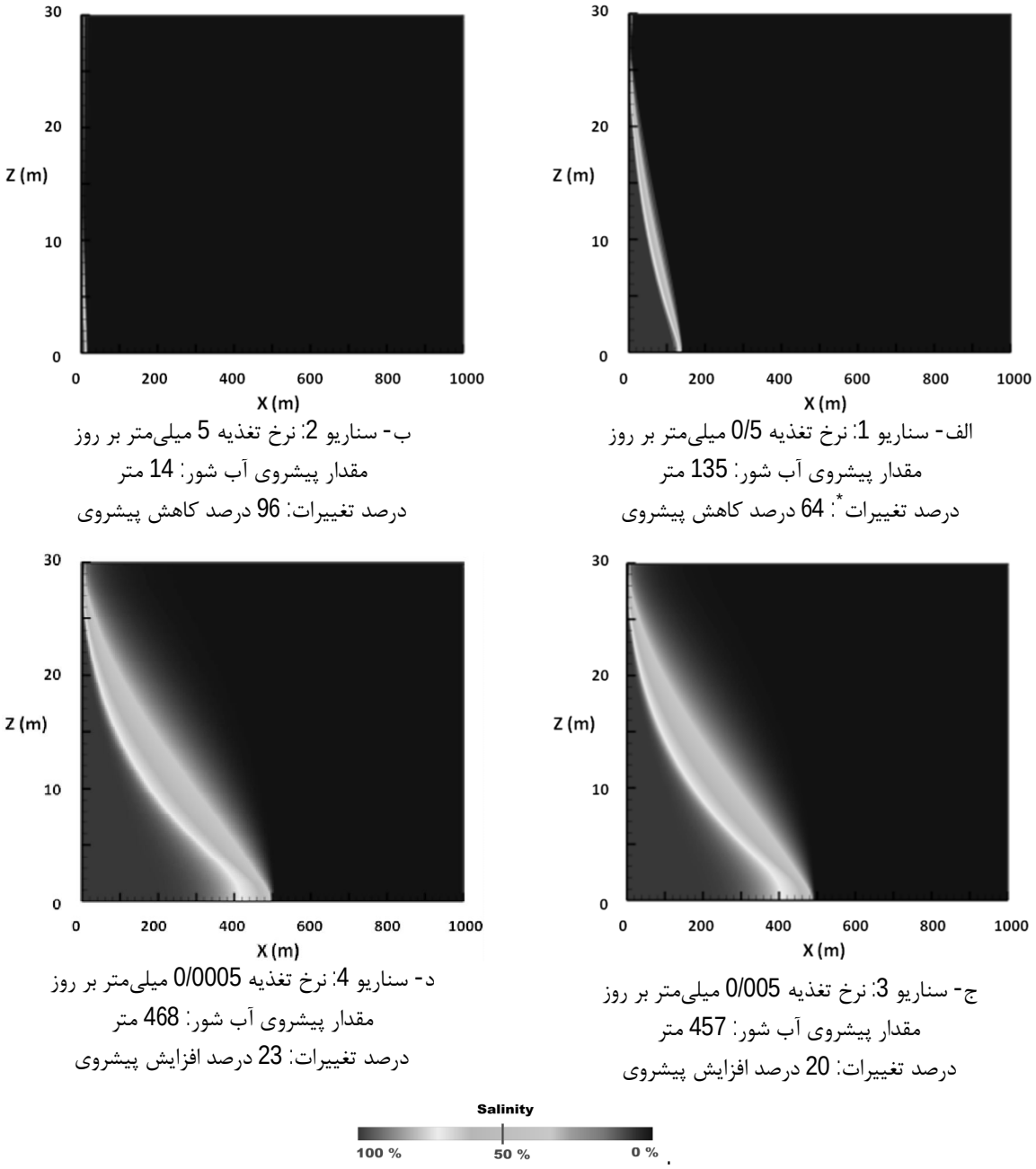


شکل 3 خطوط هم غلظت 50 درصد پیشروی آب شور در حالت دائمی و برای حالت اولیه



شکل 4 خطوط هم غلظت 50 درصد پیشروی آب شور در حالت دائمی پس از افزایش تراز آب دریا

همان‌طور که در شکل 5 نشان داده شده در صورتی که مقدار تغذیه 0/5 میلی‌متر بر روز باشد (10 برابر افزایش نسبت به حالت اولیه) مقدار پیشروی 135 متر بدست آمده است که 64 درصد مقدار پیشروی نسبت به حالت اولیه کاهش یافته است. با کاهش مقدار تغذیه تا 0/0005 میلی‌متر بر روز، میزان پیشروی 468 متر شده است و بیانگر افزایش مقدار پیشروی تا میزان 23 درصد است. در شکل 4 میزان افزایش و کاهش پیشروی آب شور با درصد تغییرات نشان داده شده است.



الف- سناریو 1: نرخ تغذیه 0/5 میلی‌متر بر روز
مقدار پیشروی آب شور: 135 متر
درصد تغییرات*: 64 درصد کاهش پیشروی

ب- سناریو 2: نرخ تغذیه 5 میلی‌متر بر روز
مقدار پیشروی آب شور: 14 متر
درصد تغییرات: 96 درصد کاهش پیشروی

ج- سناریو 3: نرخ تغذیه 0/005 میلی‌متر بر روز
مقدار پیشروی آب شور: 457 متر
درصد تغییرات: 20 درصد افزایش پیشروی

د- سناریو 4: نرخ تغذیه 0/0005 میلی‌متر بر روز
مقدار پیشروی آب شور: 468 متر
درصد تغییرات: 23 درصد افزایش پیشروی

* درصد تغییرات نسبت به حالت اولیه می باشد

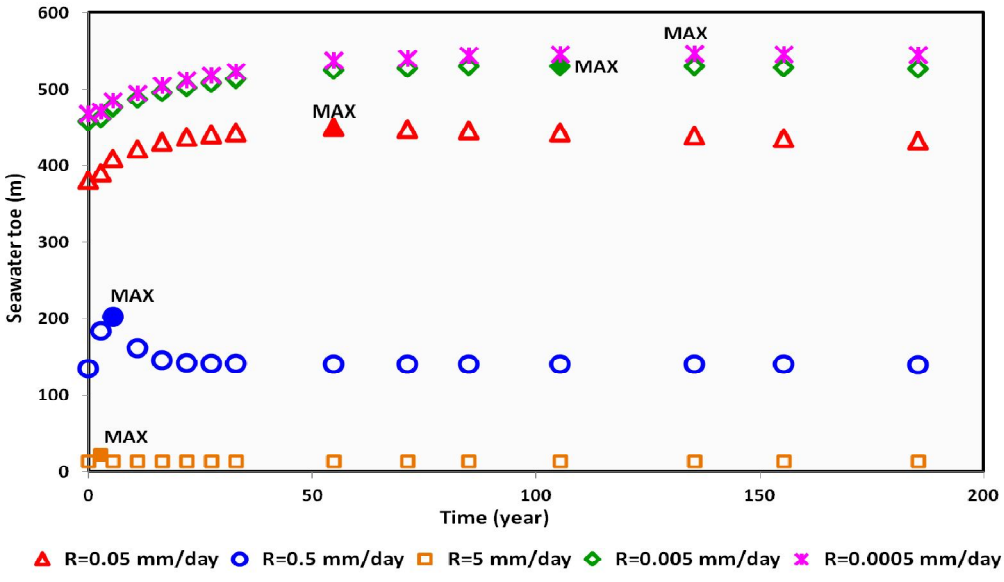
شکل 5 تأثیر دائمی نرخ تغذیه بر میزان پیشروی آب شور

3-5- اثر غیردائمی افزایش تراز آب دریا و تغییر نرخ تغذیه

شکل 6 بررسی تغییرات غیردائمی تأثیر توأمان تغییرات نرخ تغذیه و افزایش تراز آب دریا به مقدار 4 متر به دلیل تغییرات اقلیم و برای مدت زمان 200 سال را ارائه می‌دهد. با ارائه نتایجِ مقادیر پیشروی نسبت به زمان، همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار پیشروی در یک زمان به بیشترین مقدار خود می‌رسد و با گذشت زمان مقدار آن کاهش می‌یابد.

دلیل این رفتار را می‌توان به این صورت تحلیل نمود که در این حالت مقدار پیشروی آب شور با توجه به افزایش 4 متری تراز آب دریا بسیار گسترده می‌شود که عامل آن اختلاف فشار ناگهانی بین سمت دریا و خشکی است. در نتیجه در زمان‌های اولیه پیشروی به بیشترین مقدار خود می‌رسد. با گذشت زمان طولانی مدت، با برقراری تعادل فشاری سیستم آب زیرزمینی پیشروی به حالت اولیه خود بر می‌گردد. زمانی که تراز آب دریا به میزان 4 متر افزایش می‌یابد، با گذشت زمان سیستم آب زیرزمینی برای رسیدن به حالت تعادل به این افزایش پاسخ می‌دهد، این پاسخ با افزایش فشار سمت خشکی و ایجاد اختلاف هد 1 متری بین مرز سمت آب دریا و مرز سمت خشکی رخ می‌دهد. این نتایج منطبق با مطالعات Chang و همکاران (2011)، Michael و همکاران (2013)، محمودزاده (1392) و Ketabchi و همکاران (2016 a) است. می‌توان نتیجه گرفت که مکانیزم برگشت (برگشت مقدار پیشروی به مقدار اولیه خود، با گذشت زمان) به دلیل پاسخ سیستم آب زیرزمینی به افزایش تراز آب دریا در آبخوان محصور قابل مشاهده می‌باشد.

تحلیل و نتایج این مکانیزم در جدول 2 آمده است. همان‌طور که در جدول 2 نشان داده شده است، برای حالتی که مقدار تغذیه 0/05 میلی‌متر بر روز می‌باشد، مقدار پیشروی آب شور در بیشترین حالت 448 متر است و پاسخ دهی سیستم آب زیرزمینی به افزایش تراز آب دریا در 20000 روز اتفاق می‌افتد. اگر مقدار تغذیه به 0/0005 میلی‌متر بر روز کاهش یابد و در واقع مقدار تغذیه 0/01 برابر حالت اولیه باشد، در این حالت بیشترین مقدار پیشروی 546 متر می‌باشد و مدت زمان پاسخ دهی سیستم آب زیرزمینی به افزایش تراز آب دریا 49420 روز خواهد شد که نشان می‌دهد مکانیزم برگشت و پاسخ دهی سیستم آب زیرزمینی نسبت به سایر حالت‌ها در زمان طولانی‌تری اتفاق می‌افتد.



شکل 6 تأثیر غیردائمی نرخ تغذیه بر میزان پیشروی آب شور

جدول 2 نتایج سناریوهای تغییرات نرخ تغذیه به همراه افزایش تراز آب به میزان 4 متر و تغییرات پیشروی آب شور

زمان وقوع حداکثر پیشروی آب شور (روز)	تغییرات پیشروی آب شور (درصد)	حداکثر پیشروی آب شور (متر)	پیشروی آب شور در حالت اولیه (متر)	تغییرات میزان تغذیه با افزایش سطح آب دریا (میلیمتر بر روز)
20000	17/89	448	380	0/05
2000	50/37	203	135	0/5
1000	57/14	22	14	5/0
38470	15/97	530	457	0/005
49420	16/66	546	468	0/0005

4-5- تحلیل حساسیت مشخصه‌های هیدرولوژیکی به پاسخ دهی سیستم آب زیرزمینی

5-4-1- تحلیل حساسیت نرخ تغییرات افزایش تراز آب دریا

بررسی مطالعات پیشین بیانگر این بود که تغییرات تراز آب دریا می‌تواند از 0/5 تا 4 متر افزایش یابد. برای بررسی حساسیت این مشخصه بر مقدار پیشروی آب شور، افزایش تراز آب دریا در دو حالت بررسی شده است.

مطابق شکل 7 در حالتی که تراز آب دریا 4 متر افزایش یافته است، مقدار پیشروی در بیشترین حالت خود 447/7 متر می‌باشد. در صورتی که برای حالت افزایش تراز آب دریا به میزان 1 متر این عدد 409 متر است. رفتار برگشت پذیری به دلیل پاسخ سیستم آب زیرزمینی به افزایش تراز آب دریا، در این دو حالت نیز در شکل قابل مشاهده است، با توجه به شکل می‌توان گفت که این رفتار برای نرخ افزایش کم تراز آب دریا، در مدت زمان بزرگتری اتفاق می‌افتد و بیشترین مقدر پیشروی با کاهش نرخ تراز آب کم می‌شود. مدت زمان سپری شده برای رسیدن پیشروی حداکثر، برای تراز آب دریا معادل 4 متر، برابر 20000 روز و برای تراز آب دریا 1 متر معادل 31000 روز می‌باشد. پس از زمان‌های فوق مقدار پیشروی کم می‌شود و در 500 سال به حالت اولیه خود یعنی مقدار 380 متر می‌رسد. نتایج این بخش مطابق مطالعه Chang و همکاران (2011) و محمودزاده (1392)، Ketabchi و همکاران (a 2016) می‌باشد.

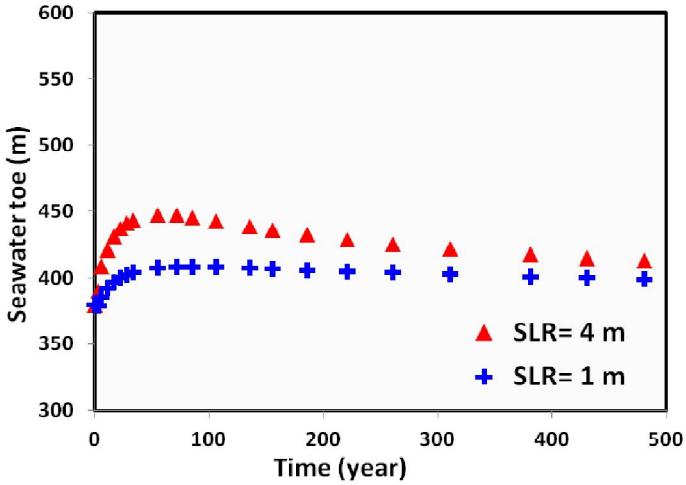
5-4-2- تحلیل حساسیت تغییرات ذخیره مخصوص و تغییرات مقدار پراکندگی

برای بررسی مقدار حساسیت ذخیره مخصوص دو مقدار 0/002 و 0/008 در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل 8 نتایج نشان می‌دهد که زمانی که مقدار ذخیره مخصوص کوچکتر می‌شود، سیستم آب زیرزمینی خیلی سریعتر به افزایش تراز آب دریا پاسخ می‌دهد و بنابراین مکانیزم برگشت سریعتر اتفاق می‌افتد. بیشترین مقدار پیشروی در این حالت برای ذخیره مخصوص 0/008 و 0/002 به ترتیب 447/7 و 410/5 متر می‌باشد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است برای مقدار کوچکتر ذخیره مخصوص (0/002) مقدار پیشروی آب شور کم است. مدت زمان مورد نیاز برای پاسخ سیستم آب زیرزمینی برای این دو حالت بین 20000 تا 38470 روز می‌باشد.

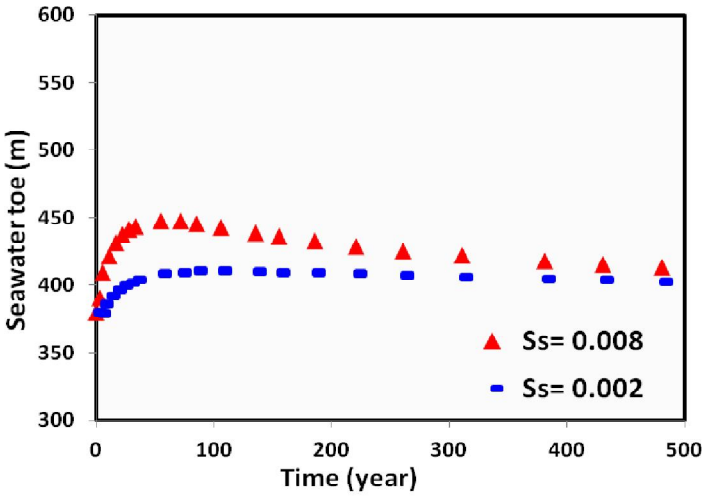
حساسیت مقدار پراکندگی طولی و عرضی بر مقدار پیشروی آب شور در اثر افزایش تراز آب دریا در شکل 9 نشان داده شده است. برای تحلیل رفتار برگشت‌پذیری به علت پاسخ سیستم آب زیرزمینی مقادیر پراکندگی به ترتیب 1 و 0/1 و همچنین 2 و 0/2 در نظر گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد که مقدار پیشروی کمتری برای مقادیر پراکندگی کمتر انتظار می‌رود.

5-4-3- تحلیل حساسیت هدایت هیدرولیکی و جریان محلی

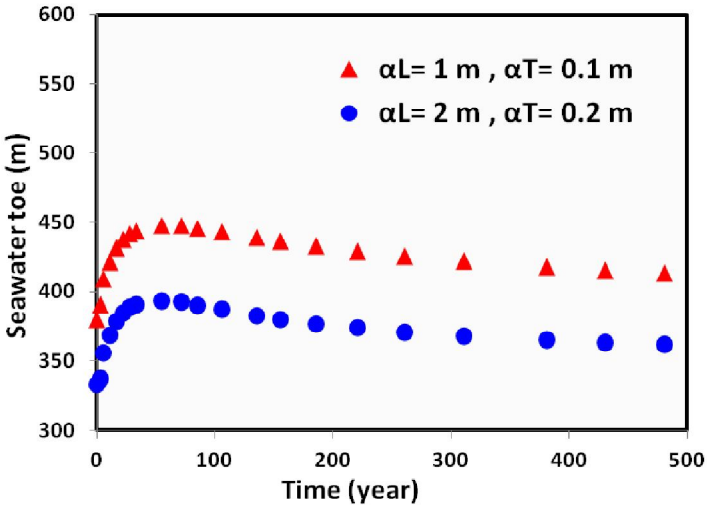
نتایج تحلیل حساسیت بر مقدار هدایت هیدرولیکی و جریان محلی در شکل‌های 10 و 11 نشان می‌دهد. در حالتی که هدایت هیدرولیکی 10 و 15 متر بر روز اختیار شود، در این صورت مقدار پیشروی آب شور نتیجه قابل توجهی دارد.



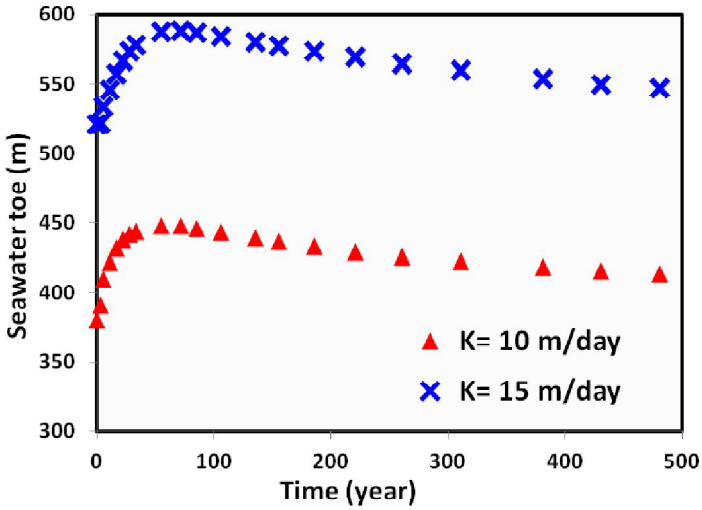
شکل 7 تحلیل حساسیت مقدار افزایش تراز آب دریا بر پیشروی آب شور



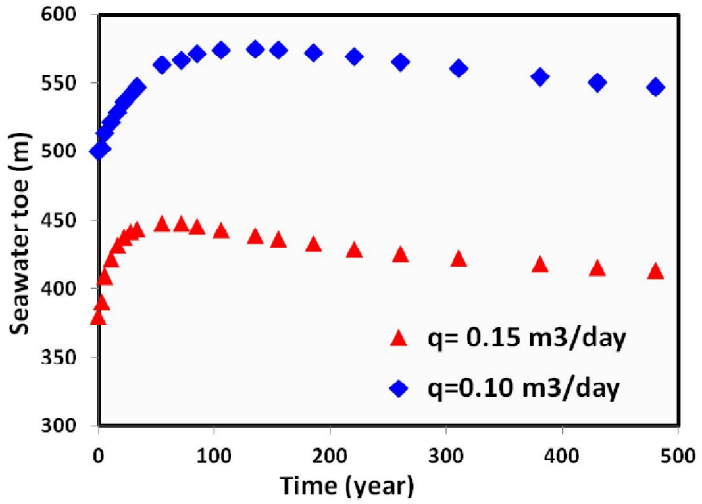
شکل 8 تحلیل حساسیت تغییرات ذخیره مخصوص بر پیشروی آب شور



شکل 9 تحلیل حساسیت تغییرات مقدار پراکندگی بر پیشروی آب شور



شکل 10 تحلیل حساسیت تغییرات هدایت هیدرولیکی بر پیشروی آب شور



شکل 11 تحلیل حساسیت تغییرات مقدار جریان منطقه ای بر پیشروی آب شور

اگر مقدار هدایت هیدرولیکی 15 متر بر روز باشد، مقدار پیشروی 587/7 متر است که خیلی بیشتر از مقدار پیشروی 447/7 متر برای هدایت هیدرولیکی 10 متر بر روز است. زمان مورد نیاز برای پاسخ سیستم آب زیرزمینی برای این دو حالت بین 20000 تا 26000 روز است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که مدت زمان برگشت‌پذیری برای مقدار هدایت هیدرولیکی بزرگتر، بیشتر است.

برای بررسی مقدار حساسیت جریان محلی دو مقدار 0/15 و 0/1 متر مکعب بر روز در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که زمانی که مقدار جریان محلی کوچکتر می‌شود مقدار پیشروی بیشتر می‌شود و برای مقادیر کمتر جریان محلی زمان پاسخ 49420 روز می‌باشد و رفتار برگشت‌پذیری نیز نسبت به جریان محلی بیشتر، دیرتر اتفاق می‌افتد.

نتایج حاصل در این مطالعه که بر روی یک نمونه آبخوان محصور ساده انجام گرفت، قابلیت مدل‌سازی و بررسی در نمونه‌های پیچیده‌تر و واقعی در مناطق ساحلی جهان را دارد و با اتخاذ فرایندی مشابه می‌توان اثر تغییرات اقلیم بر روی نمونه‌های واقعی را نیز بررسی نمود که در کارهای آتی مدنظر خواهد بود. تحلیل حساسیت‌ها و نتایج حاصل در این مطالعه در تهیه مدل مفهومی، تصمیم‌گیری اندازه‌گیری یا جمع‌آوری داده‌های لازم، تحلیل و پیش‌بینی پاسخ‌دهی

سیستم می‌تواند بسیار مفید و راه‌گشا باشد.

6- نتیجه‌گیری

برای بررسی منابع آب زیرزمینی، بررسی اثرات تغییر اقلیم از جمله افزایش سطح آب دریا و تغییرات نرخ تغذیه می‌تواند از عوامل مهم باشد. در مطالعه حاضر، تأثیر افزایش سطح آب دریا و تغییرات نرخ تغذیه بر آبخوان ساحلی بصورت جریان وابسته به چگالی بررسی گردید. یک مدل مفهومی شامل 2 سناریوی شبیه‌سازی جریان، برای تعیین مقدار پیشروی آب شور برای افزایش تراز آب دریا به میزان 4 متر و تأثیر توأمان افزایش تراز آب دریا و تغییرات نرخ تغذیه در نظر گرفته شده است. زمان در بررسی این سناریوها بصورت دائمی و غیردائمی بررسی شده است. نتایج مطالعه به صورت زیر طبقه‌بندی می‌شود:

1- تأثیر افزایش تراز آب دریا در حالت دائمی شده، بیانگر این است که این عامل در آبخوان محصور تأثیری ناچیزی بر مقدار پیشروی آب شور دارد.
2- نتایج بررسی شده در حالت دائمی شده و برای 5 مقدار تغذیه نشان می‌دهد که با کاهش مقدار تغذیه در صورتی که تراز آب دریا افزایش نیافته باشد، میزان پیشروی آب شور بیشتر شده و با افزایش آن مقدار پیشروی بطور قابل توجهی کاهش می‌یابد.
3- بررسی غیردائمی افزایش سطح آب دریا، بیانگر این است که مکانیزم برگشت به علت پاسخ‌دهی سیستم آب زیرزمینی به این تغییر و برای به تعادل رسیدن آبخوان محصور، می‌تواند مهم و قابل بررسی باشد. با بررسی و مطالعه این رفتار، می‌توان گفت که در یک بازه زمانی مقدار پیشروی به حداکثر می‌رسد و با گذشت زمان و رسیدن به حالت دائمی پیشروی به محل اولیه خود باز می‌گردد.
4- تحلیل حساسیت مشخصه‌های آبخوان نشان می‌دهد که هدایت هیدرولیکی، جریان منطقه‌ای و نرخ تغذیه آبخوان نسبت به سایر عوامل تأثیرگذارتر است.

8- فهرست علایم

غلظت آب شور	C_s
غلظت سیال	c
غلظت ماده محلول در منبع سیال	c^*
ضریب پخش مولکولی	D_m
ماتریس پراکندگی مکانیکی	D
شتاب ثقل	g
ماتریس همانی	I
هدایت هیدرولیکی	K
نفوذپذیری ماتریس خاک	k
فشار سیال	p
منبع سیال	Q_p
نرخ جریان آب زیرزمینی محلی	q
نرخ تغذیه	R
ذخیره مخصوص	S_s
فشار مخصوص	S_{op}
حرارت	T
پراکندگی طولی	α_L
پراکندگی عرضی	α_T
تخلخل خاک	ε
لزجت دینامیکی سیال	μ
میانگین سرعت سیال	v
چگالی آب شور	ρ_s
چگالی آب شیرین	ρ_f

7- منابع

- رجبی، م.م.، کتابچی، ح. و عطائی آشتیانی، ب. (1390)، "مدل‌سازی عددی لنز آب شیرین در جزایر کوچک (مطالعه موردی جزیره کیش)"، مجله علمی و پژوهشی هیدرولیک، دوره 6، شماره 2، ص.ص. 45-56.

کتابچی، ح، رجبی، م.م. و عطائی آشتیانی، ب. (1392)، "ارائه راهکارهای عملی بهره‌برداری بهینه از منابع آب زیرزمینی جزایر کوچک (مطالعه موردی جزیره کیش) "، دوازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تهران.

کتابچی، ح. (1393)، "مدل کارآمد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی برای مدیریت آبخوان‌های ساحلی"، پایان‌نامه دکتری مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

محمودزاده، د. (1392)، "تأثیر افزایش سطح آب دریا و خصوصیات آبخوان بر پیشروی آب شور در آبخوان‌های

ساحلی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

محمودزاده، د.، کتابچی، ح. و عطائی آشتیانی، ب. (1392)، "بررسی اثر افزایش سطح آب دریا بر روی سیستم آب زیرزمینی جزیره کیش"، دوازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تهران.

محمودزاده، د.، کتابچی، ح. و عطائی آشتیانی، ب. (1395)، "مدیریت بهینه منابع آب زیرزمینی جزیره کیش: تحلیل حساسیت راهبردهای بهینه نسبت به تغییرات محیطی مختلف"، فصلنامه علمی پژوهشی آب و فاضلاب، دوره 27، شماره 2، ص.ص. 61-70.

Ataie-Ashtiani, B., Volker, R.E. and Lockington, D.A. (1999), "Tidal effects on seawater intrusion in unconfined aquifers", Journal of Hydrology. 216 (1-2), pp. 17-31

Ataie-Ashtiani, B., Werner, A.D., Simmons, C.T., Morgan, L.K. and Lu, C. (2013), "How important is the impact of land-surface inundation on seawater intrusion caused by sea level rise?", Hydrogeol. Journal. 21(7), pp. 1673-1677.

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): pp. 1283-1291.

International Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change (2013), "The physical science basis", Working group 1 contribution to the fifth assessment report of the international panel on climate change. Cambridge, New York.

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), pp. 5938-5953.

Ketabchi, H., and Ataie-Ashtiani, B. (2015a). "Review: Coastal groundwater optimization advances, challenges, and practical solutions", Hydrogeology Journal, 23(6), pp. 1129-1154.

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

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

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

Ketabchi, H., Mahmoodzadeh, D., and Ataie-Ashtiani, B. (2016b). "Groundwater travel time computation for two-layer islands". Hydrogeology Journal 24 (4), pp. 1045-1055

Laattoe, T., Werner, AD. and Simmons, C.T. (2013), "Seawater Intrusion under current sea-level rise: Processes Accompanying Coastline Transgression, Groundwater in the Coastal Zones of Asia-Pacific", Coastal Research Library 7., doi:10.1007/978-94-007-5648-9-14

Mahmoodzadeh, D., Ketabchi, H., Ataie-Ashtiani, B. and Simmons, C.T. (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, pp. 399-413.

Melloul, A. and Collin M., (2006), "Hydrogeological changes in coastal aquifers due to sea level rise, Ocean & Coastal Management", 49: pp. 281-297

Michael, H. A., Russoniello, C. J. and Byron, L. A., (2013), "Global assessment of vulnerability to sea-level rise in topography-limited and recharge-limited coastal groundwater systems", Water Resources Research, 49 (4), pp. 2228-2240.

Oude Essink, GHP. and Schaars, F., (2002), "Impact of climate changes on the groundwater system of the water board of the Rijn land, the Netherlands", Proceeding of the 17th Salt Water Intrusion Meeting, Delft, The Netherlands.

Payne, DF., (2010), "Effects of climate change on saltwater intrusion at Hilton Head Island", SC. U.S.A. SWIM21-21st Salt Water Intrusion Meeting, Azores, Portugal: 293-296.

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

Sherif, M. M. and Singh, V. P., (1999), "Effects of climate change on sea water intrusion in coastal aquifers". Hydrological Processes, 13: pp. 1277-1287.

Vermeer, M. and Rahmstorf, S., (2009), "Global sea level linked to global temperature", Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America, 106(51): pp. 21527–21532.

Voss, CI. and Provost, AM., (2010), "SUTRA: a model for saturated-unsaturated, variable-density ground-water flow with solute or energy transport", U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report, 02–4231.

Watson, A., Werner and A. D., Simmons, C. T. (2010). "Transience of seawater intrusion in response to sea level rise", Water Resources Research. 46(12): W12533.