

## ارزیابی شبیه‌سازی با رویکرد مرز مشترک در پیش‌بینی نفوذ شوری در آب‌خوان‌های لایه‌بندی ساحلی تحت پمپاژ

سید سجاد مهدی زاده محلی<sup>۱\*</sup>

[Saj.mehdizadeh@iauctb.ac.ir](mailto:Saj.mehdizadeh@iauctb.ac.ir)

فریدون وفایی<sup>۲</sup>

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۶/۱۰

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۱/۳۱

### چکیده

**زمینه و هدف:** افزایش جمعیت و رشد فعالیت‌های بشری در نواحی ساحلی، تنش بر آب‌خوان‌های ساحلی را افزایش داده و سبب پیش‌روی آب دریا به سمت آن‌ها شده‌است. مدل‌سازی ریاضی نفوذ شوری با استفاده از دو رویکرد امکان‌پذیر می‌باشد. در رویکرد مرز مشترک، فصل مشترک تقابل آب شور و شیرین با یک خط نشان داده می‌شود، حال آن‌که در رویکرد جریان اختلاطی، یک ناحیه انتقالی این دو سیال را از هم جدا خواهد نمود. شبیه‌سازی با رویکرد مرز مشترک به علت نیاز به داده‌های ورودی کم‌تر و زمان اجرای بسیار سریع‌تر، بیش‌تر مورد استفاده قرار گرفته، در حالی‌که در مدل‌سازی با رویکرد جریان اختلاطی به علت حل هم‌زمان معادله جریان و معادله پخش و انتقال، جواب‌های دقیق‌تری تولید می‌گردد.

**روش بررسی:** در این تحقیق برای آب‌خوان‌های لایه‌بندی ساحلی که در واقعیت از توزیع بیش‌تری نسبت به آب‌خوان‌های همگن برخوردارند، با استفاده از زبان برنامه‌نویسی فرترن، مدل عددی بر پایه رویکرد مرز مشترک (با نام SHI-SWIM) توسعه داده شده و نتایج مدل، پس از صحت‌سنجی و اعتباربخشی، با مشاهدات آزمایشگاهی و کد عددی SEAWAT (با رویکرد جریان اختلاطی) مقایسه شده‌است. در ادامه، سناریوهای مختلفی برای آب‌خوان لایه‌بندی در مقیاس واقعی و با اعمال چاه پمپاژ تعریف شده و علاوه بر بررسی واکنش آب‌خوان نسبت به این تغییرات، نقاط قوت و محدودیت‌های مدل توسعه داده شده آشکار شده‌است.

**یافته‌ها:** شبیه‌سازی مدل آب‌خوان تحت پمپاژ نشان می‌دهد که مدل SHI-SWIM در حالات کاهش فاصله بین چاه و دریا، نفوذ کامل چاه در آب‌خوان و دبی پمپاژ بالاتر پیش‌بینی دقیق‌تری از شکل گوه شوری داشته است اما پیش‌بینی میزان شوری آب برداشتی از چاه، چندان متناسب با نتایج به‌دست آمده در آزمایشگاه و مدل SEAWAT نبوده است.

**واژه‌های کلیدی:** آب‌خوان لایه‌بندی ساحلی، نفوذ شوری، مرز مشترک، پمپاژ، مدل SHI-SWIM، مدل SEAWAT.

۱- عضو هیات علمی گروه مهندسی عمران، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. \* (مسوول مکاتبات)

۲- دانشیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

## **Evaluation of sharp-interface simulation of saltwater intrusion into the multi-layered coastal aquifers exposed to pumping**

**S. Sadjad Mehdizadeh <sup>1\*</sup>**

[Saj.Mehdizadeh@iauctb.ac.ir](mailto:Saj.Mehdizadeh@iauctb.ac.ir)

**Freydoon Vafaie <sup>2</sup>**

Admission Date: August 31, 2016

Data Received: April 20, 2015

### **Abstract**

**Background and Objective:** Population growth and scarcity of coastal freshwater resources have increased the stresses on many coastal aquifers, leading to aquifer storage decline and saltwater intrusion (SWI). Investigation of coastal aquifers routinely involves the application of SWI models, which can be divided into two categories, namely sharp-interface and dispersive-interface approaches. There is no mixing between freshwater and saltwater at sharp-interface approaches. This makes them computationally more efficient while dispersive-modeling approaches are more numerically challenging, but allow for freshwater-saltwater mixing.

**Method:** Most coastal aquifers comprise overlying sequences of geological strata, resulting in SWI characteristics that may differ significantly to those of homogeneous cases. The layered coastal aquifers have received significantly less attention than the more simplified single-layer case, despite the fact that stratified aquifers are widespread. In this study, a sharp-interface approach (named as SHI-SWIM) was developed using FORTRAN programming code. The model is first validated and then applied for the simulation of sand-tank experiment and field-scale multi-layered aquifers exposed to pumping in order to evaluate the strength and limitation of the developed model.

**Findings:** SHI-SWIM model produced better result for higher pumping rates. Additionally, the results of fully penetrating wells and closer position of well to shoreline matched better with the dispersive modeling outputs. In real cases, where the saltwater may wend a long distance toward the well screen, the sharp-interface modeling weakly matched with the dispersive modeling, specially in terms of well salinities.

**Keywords:** Multi-layered coastal aquifer, Saltwater intrusion, Pumping, Sharp-interface approach, SHI-SWIM model, SEAWAT model.

---

1- Member of Faculty of Civil Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. \* (*Corresponding Author*)

2- Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

## مقدمه

رشد جهانی جمعیت و افزایش استانداردهای زندگی سبب افزایش میزان تقاضا و بالتبع آن، برداشت آب بیش‌تر از آب‌خوان‌های ساحلی گردیده است. این افزایش برداشت، سبب افزایش میزان نفوذ شوری به داخل آب‌خوان‌ها شده است. نظر به وجود آب دریا در مجاورت آب‌خوان‌های ساحلی، در ناحیه برخورد آب شیرین و شور به هم، یک ناحیه انتقالی تشکیل می‌گردد که در طول آن، چگالی سیال، از چگالی آب شیرین تا چگالی آب شور متغیر است. تحت شرایط مشخص، اگر عرض این ناحیه انتقالی در مقایسه با ضخامت آب‌خوان کوچک باشد، این ناحیه را می‌توان با یک خط مشخصی تقریب زد. این مرز مشترک ناحیه وجود دو سیال را از هم جدا نموده و در این حالت می‌توان فرض نمود که آب شور و شیرین اختلاط ناپذیرند. مدل‌سازی با این فرض، شبیه‌سازی با استفاده از رویکرد مرز مشترک شناخته می‌شود. اما اگر ضخامت این ناحیه انتقالی زیاد باشد این فرض نامعتبر خواهد بود (۱). در این حالت رویکرد جریان اختلاطی که در آن یک ناحیه انتقالی جداسازی آب شور و شیرین را برعهده داشته و پخش و انتشار هیدرودینامیکی سبب اختلاط دو سیال خواهد شد، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

از میان دو رویکرد مرز مشترک و جریان اختلاطی، در دهه گذشته از رویکرد دومی با توجه به توزیع غلظت شوری به عنوان خروجی مدل به دفعات استفاده شده است (۲). هرچند که محققین بر این باورند که عملاً تعیین همه پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی عددی توسط این رویکرد، فعالیتی سخت و طاقت‌فرسا است. پیچیدگی هندسی آب‌خوان نیز عملاً زمان محاسباتی را طولانی خواهد کرد (۳ و ۴). به عنوان یک گزینه جایگزین، از رویکرد مرز مشترک به علت سادگی می‌توان در آب‌خوان‌های بزرگ مقیاس استفاده نمود (۵ و ۶). که زمان محاسباتی برای شرایط یکسان از چندین ساعت در مدل اختلاطی به چندین دقیقه در مدل‌های مرز مشترک کاهش خواهد یافت (۷).

مسائل مربوط به شبیه‌سازی تاثیر چاه پمپاژ در پیش‌روی شوری به داخل آب‌خوان همگن، با ارایه راه‌حل‌های تحلیلی همراه بوده است. سپس متناسب با رویکردهای مختلف شبیه‌سازی، توسعه رویکرد مرز مشترک و یا جریان اختلاطی نیز صورت پذیرفته است (۸ و ۹). Shi و همکاران در سال ۲۰۱۱ (۳) از یک مدل عددی مرز مشترک به منظور تخمین میزان شوری در چاه‌های پمپاژ واقع در یک آب‌خوان همگن استفاده نموده و نتایج این مدل‌سازی را با انجام یک سری آزمایش‌ها کنترل نمودند. نتایج کار این محققین نشان می‌دهد که مدل مرز مشترک با دقت قابل قبولی می‌تواند میزان شوری استخراج شده از چاه‌ها را پیش‌بینی نماید. عطایی-آشتیانی و همکاران (۱۰) (۱۳۸۵) نیز با استفاده از رویکرد مرز مشترک و توسعه مدل عددی با نام MODSHARP به اثر پیش‌روی آب شور بر انتقال و پراکندگی آلاینده و تخلیه آن‌ها به دریا در آب‌خوان همگن سیاه‌رود پرداختند. در آن تحقیق اثر برداشت آب از چاه‌های منطقه مطالعاتی دیده نشده بود. Llopis-Albert و Pulido-Velazquez (۲۰۱۴) (۴) به مقایسه نتایج رویکرد مرز مشترک با مدل عددی SEAWAT (با رویکرد جریان اختلاطی) در یک آب‌خوان همگن و در حالت نفوذ کامل چاه در آب‌خوان پرداختند. آن‌ها با تغییر در پارامترهای تاثیرگذار بر این پدیده به این نتیجه رسیدند که نتایج حاصل از رویکرد مرز مشترک به موقعیت چاه در آب‌خوان و ضرایب هیدرودینامیکی انتشار وابسته است. در رابطه با عرض ناحیه انتقالی آن‌ها نشان دادند که این ناحیه انتقالی با افزایش ضریب هیدرودینامیکی پخش، کاهش هدایت هیدرولیکی قایم، کاهش میزان تغذیه سطحی، کاهش نسبت عرض آب‌خوان به طول آن عریض‌تر خواهد شد. استفاده از آب‌خوان همگن، برقراری جریان دایمی و نیز عدم رسیدن گوه شوری به دهانه چاه از مهم‌ترین محدودیت‌های آن تحقیق بوده است.

در مقایسه با آب‌خوان‌های همگن، در واقعیت آب‌خوان‌های ناهمگن از توزیع بیش‌تری برخوردار می‌باشند. آب‌خوان لایه‌بندی نوعی از آب‌خوان ناهمگن بوده که در آن لایه‌های

1-Sharp-interface approach

2-Density-dependant approach

گیرد تا دقت و صحت آن آشکار گردد. از این رو در این تحقیق یک مدل جامع مرز مشترک با در نظرگیری شکل بهینه نشت بین لایه‌ای توسعه داده خواهد شد و با مقایسه نتایج حاصل از آن با مشاهدات آزمایشگاهی و نیز نتایج حاصل از شبیه‌سازی با رویکرد اختلاطی، نقاط قوت و ضعف آن شناخته می‌شود.

### روش انجام آزمایش

نمای کلی فلوم به کار رفته، مخازن تامین آب شور و شیرین و موقعیت چاه در داخل فلوم در شکل (۱) نشان داده شده است. آزمایش به صورت دو بعدی در یک فلوم ماسه به طول ۱۱۷۰ میلی‌متر، ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر و عرض ۵۲ میلی‌متر انجام شده است. صفحه جلو و عقب این فلوم از شیشه شفاف با ضخامت ۱۰ میلی‌متر ساخته شده تا امکان تصویربرداری فراهم گردد. سمت چپ و راست این فلوم از ورقه‌های فلزی به ضخامت ۱۰ میلی‌متر تشکیل شده است. به منظور استحکام بخشی کل فلوم و نیز تحمل وزن ماسه اشباع در خلال آزمایش، کل مجموعه توسط یک قاب فلزی مهار شده است. در دو طرف این فلوم دوازده منفذ دایروی به قطر ۱۰ میلی‌متر و با فاصله ۵۰ میلی‌متری نسبت به هم تعبیه شده که شیرهای پلاستیکی ورود و خروج آب در آن‌ها تعبیه می‌گردند. در داخل مجرای این شیرها نیز یک توری فلزی با ابعاد مش ریزتر از قطر ماسه تعبیه شده تا از انسداد جریان توسط ماسه و یا خروج ماسه از فلوم به داخل مجرای شیر جلوگیری گردد. کل مجموعه فلوم ماسه با استفاده از لوله‌هایی از جنس PVC و با قطر ۱۰ میلی‌متر به مخازن ماریوت مطابق آزمایش‌های انجام گرفته توسط Klute and Dirksen (۱۹۸۶) متصل شده‌اند. تعداد این مخازن شش عدد در سمت آب شیرین و دو عدد در سمت آب شور با ظرفیت هر کدام ۲۰ لیتر بوده است. این مخازن وظیفه تامین آب شیرین و آب شور و نیز ثابت نگاه داشتن مقدار هد هیدرولیکی در مرزها را بر عهده دارند (۲۰).

آب‌خوان لایه‌بندی از سه لایه تشکیل شده است. لایه به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر از ماسه درشت در کف آب‌خوان قرار گرفته است.

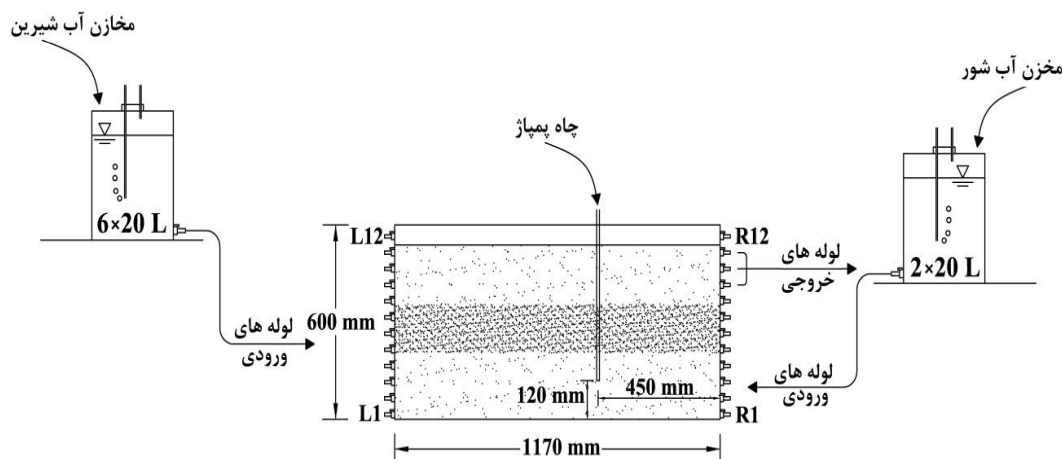
خاک از جنس‌های متفاوت بر روی یک دیگر قرار گرفته‌اند. مشابه آب‌خوان همگن، برای این نوع آب‌خوان‌ها نیز در ابتدا راه‌حل‌های تحلیلی در حالت جریان دایمی ارایه شده و خروجی آن‌ها پیش‌بینی خط مشترک آب شور و شیرین می‌باشد (۱۱-۱۳). Essaid (۱۹۹۰) و Huyakorn و همکاران (۱۹۹۶) یک مدل المان محدود با رویکرد مرز مشترک را توسعه داده و از آن برای پیش‌بینی میزان شوری در یک آب‌خوان لایه‌بندی در مقیاس واقعی استفاده نمودند (۱۵ و ۱۴). شکل توسعه‌یافته مدل در این رویکرد، توسط Bakker و همکاران (۲۰۱۳) در قالب یک بسته نرم‌افزاری (SWI Package) به نرم افزار MODFLOW اضافه گردید و چندین مثال با استفاده از آن حل شد (۱۶). Lu و همکاران (۲۰۱۳) با هدف ارزیابی تاثیر تغییر پارامترهای تاثیرگذار بر ضخامت ناحیه انتقالی در جریان دایمی آزمایشاتی ترتیب داده و گونه شوری را در آب‌خوان لایه‌بندی مورد آنالیز قرار دادند (۱۷). تحلیل آزمایش‌های این محققین نشان می‌دهد که میزان نفوذ شوری در آب‌خوان‌های لایه‌بندی کم‌تر از آب‌خوان همگن بوده است. بعد از آن‌ها نیز Liu و همکاران (۲۰۱۳) آزمایشی را با قرار دادن یک لایه شنی بین دو لایه ماسه ریز ترتیب دادند و نتایج حاصل را با یک رابطه تحلیلی مقایسه نمودند و اختلاف به وجود آمده در این مقایسه را به عدم لحاظ نمودن نشت قائم در رابطه تحلیلی نسبت دادند (۱۸). در آب‌خوان‌های لایه‌بندی، نشت و انتقال دبی از بین لایه‌ها اتفاق افتاده و سبب تغییر در میزان پیش‌روی و یا پس‌روی گوه شوری خواهد شد. در نظر گرفتن اثر صحیح نشت بین‌لایه‌ای در مدل‌سازی با رویکرد مرز مشترک در نتایج تحقیقات Mehdizadeh و همکاران (۲۰۱۴) آورده شده است. آن‌ها نشان دادند که اثر نشت بین‌لایه‌ای با کاهش نفوذپذیری لایه نیمه‌تراوای وسط نمود بیش‌تری دارد و عدم در نظرگیری آن سبب خطا در پیش‌بینی صحیح میزان نفوذ خواهد شد (۱۹). با انجام پمپاژ از آب‌خوان‌ها و حرکت مجموعه آب شور و شیرین به طرف دهانه چاه، در نظرگیری نشت بین‌لایه‌ای اهمیتی دوچندان خواهد داشت و باید نتایج حاصل از مدل مرز مشترک با در نظرگیری شکل صحیح نشت مورد ارزیابی قرار

شیارهایی به منظور ورود آب به طول ۲۵ میلی‌متر تعبیه شده‌است. کل دهانه چاه سپس با ژئوتکستایل کاملاً پوشانده شده تا از ورود ماسه به داخل آن جلوگیری شود. انتهای لوله نیز کاملاً بسته شده تا ورودی جریان به داخل آن تنها از داخل شیارهای ایجاد شده باشد. یک لوله نازک سیلیکونی با قطر داخلی ۲/۷۹ میلی‌متر در داخل لوله چاه قرار داده شده و به یک پمپ پرستالتیک اتصال داده شده تا عمل برداشت آب از چاه با دبی مشخص صورت پذیرد. آزمایش ابتدا با تنظیم هد آب شیرین برابر با ۰/۵۲۶ متر و هد آب شور برابر با ۰/۵۱۰ متر در مدت ۳۷۰ دقیقه به حالت دایمی رسید و پس از آن آزمایش غیردایمی پمپاژ به مدت ۲۸۰ دقیقه ادامه داشت تا جریان به حالت دایمی جدید برسد. همان‌طور که شکل (۱) نشان می‌دهد، چاه در موقعیت طولی ۴۵۰mm (از مرز دریا) در فلوم ماسه قرار داد شده به طوری که کف آن در تراز ارتفاعی mm ۱۲۰ از کف فلوم ماسه قرار دارد و آب با دبی پمپاژ برابر با ۳۰ ml/min از آن پمپاژ می‌گردد.

لایه نیمه تراوا از جنس ماسه ریز<sup>۱</sup> با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر در وسط و لایه بالایی از ماسه درشت و به ضخامت ۲۵ سانتی‌متر بوده‌است. انتخاب ماسه بر اساس انتخاب ماسه طبیعی با اندازه ذره تقریباً یکنواخت استوار بوده‌است. دانه‌بندی ماسه‌ها مطابق با آزمایش الک استاندارد انجام پذیرفته‌است. از منحنی دانه بندی، قطرهای  $d_{10}$ ،  $d_{50}$  و  $d_{60}$  برای ماسه درشت به ترتیب ۰/۵۷، ۰/۶۴ و ۰/۷۸ میلی‌متر و برای ماسه ریز به ترتیب ۰/۲۴، ۰/۴۱ و ۰/۴۷ میلی‌متر به دست آمده است. این دانه‌بندی منجر به ضریب یکنواختی ( $U=d_{60}/d_{10}$ ) برابر با ۱/۳۷ برای ماسه درشت و ۱/۹۶ برای ماسه ریز شده است. از روش توزیع اشباع مشابه روش ارایه شده توسط Ataie-Ashtiani (۱۹۹۸) [۲۱] به منظور توزیع یکنواخت ماسه، خروج حباب‌های هوای موجود در فضاهای خالی ماسه و نیز کم‌ترین میزان نشست ماسه در خلال انجام آزمایش استفاده شده است. یک لوله PVC با قطر داخلی ۱۰ میلی‌متر به عنوان چاه در نظر گرفته شده و در بخش پایانی آن و در فاصله ۲۰ میلی‌متری از کف،

2-Masterflex, 8 roller, L/S type, 07519-25 pump head with small cartridge, 07519-85 type

1- 'N-30' grade sand, Sloan Sands P/L



شکل ۱- تنظیمات آزمایشگاهی برای آزمایش پمپاژ

Figure 1 - Laboratory set up for pumping experiment

آن جایی که آزمایش‌های انجام گرفته دو بعدی می‌باشند، به پراکندگی جانبی قائم ( $\alpha T$ ) نیز نیاز می‌باشد که مقدار آن برابر با  $0.05$  پراکندگی طولی لحاظ شده است.

از دی کلرید کلسیم هیدراته با فرمول شیمیایی ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) به منظور خلوص بالای آن به عنوان نمک (منبع شوری) استفاده شده و میزان  $35$  گرم از آن در یک لیتر آب حل شده است. میزان هدایت الکتریکی ( $\text{EC}$ ) آب شور با استفاده از یک  $\text{EC}$  متر تعیین شده است. جهت نشان دادن نحوه تشکیل گوه نمکی و طول پیش‌روی آن ماده رنگی رودامین به آب شور تزریق شده است. یکی از مهم‌ترین خصوصیت ماده رنگی باید عدم جذب توسط ذرات ماسه باشد. این اتفاق باعث تاخیر در حرکت ماده رنگی نسبت به حرکت آب شور خواهد شد و نتایج را با خطا مواجه می‌کند. در آزمایش‌های حاضر میزان غلظت این ماده رنگی  $500$  گرم در هر لیتر آب شهری بوده است.

محاسبه هدایت هیدرولیکی ( $K$ ) با استفاده از دو طریق به دست آمده است. ابتدا از رابطه تجربی کوزنی-کارمن استفاده شده و با استفاده از منحنی دانه‌بندی و میزان تخلخل ماسه، اندازه آن محاسبه شده است. مطابق این رابطه میزان هدایت هیدرولیکی برای ماسه درشت و ریز به ترتیب  $308$  و  $43$  متر بر روز به دست آمده است. در روش دوم از تست هد ثابت داری استفاده شده است. آزمایش هد ثابت داری حد اقل سه بار تکرار شده و از نتایج متوسط آن‌ها در مدل‌سازی استفاده شده است. متوسط مقادیر هدایت هیدرولیکی با استفاده از این آزمایش برای ماسه درشت و ریز به ترتیب برابر با  $269$  و  $40$  متر بر روز به دست آمده است. تعیین تخلخل ( $n$ ) از روش اشباع آب مطابق با مطالعه انجام شده توسط Fetter (۲۰۰۱) (۲۲) و مقدار آب‌دهی ویژه برای لایه بالایی با استفاده از روش اشباع-زهکشی ارائه شده توسط Johnson (۱۹۹۶) (۲۳) به دست آمده‌اند. پراکندگی هیدرودینامیکی طولی ( $\alpha L$ ) که در پخش نمک در داخل ماسه موثر بوده نیز مطابق با روش ارائه شده توسط Mehdizadeh و همکاران (۲۰۱۴) (۱۹) برابر با  $2/0$  میلی‌متر حاصل شده است. این مقدار با مقادیر پراکندگی هیدرودینامیکی انتخاب شده در آزمایش‌های محققین قبلی بر روی ماسه طبیعی مطابقت دارد (به طور مثال Jakovovic و همکاران، ۲۰۱۱ (۲۴) و Dose و همکاران، ۲۰۱۴ (۲۵). از

جدول ۱- مقادیر پارامترهای به دست آمده در آزمایش

Table 1- Parameters of laboratory experiment

ماسه ریز	ماسه درشت	خصوصیات آب‌خوان
۴۰	۲۶۹	هدایت هیدرولیکی*، K (m/d)
۰/۳۹	۰/۴۱	تخلخل، n (-)
-----	۰/۳۳	آب‌دهی ویژه، Sy (-)
۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	پراکندگی طولی، $\alpha_L$ (m)
$2 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$	پراکندگی عرضی، $\alpha_T$ (m)
۱۰۰۰/۱۶		چگالی آب شیرین، $\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )
۱۰۲۴/۲۰		چگالی آب شور، $\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )
۳۳/۶۵		غلظت اولیه آب شور، C <sub>0</sub> (kg/m <sup>3</sup> )
۰/۲۸		غلظت اولیه آب شیرین، C <sub>0</sub> (kg/m <sup>3</sup> )

## توسعه مدل با رویکرد مرز مشترک

مدل مرز مشترک توسعه داده شده در این تحقیق به اختصار 'SHI-SWIM' نام‌گذاری شده و توسعه معادلات در این مدل بر پایه وجود لایه‌هایی با نفوذ پذیری کم (نیمه تراوا) در بین لایه‌های دیگری با نفوذ پذیری بیش‌تر (تراوا) می‌باشد. با فرض این‌که لایه‌های نیمه‌تراوا ذخیره آب نداشته باشند (ضریب ذخیره برابر با صفر) و نشت آب در آن‌ها تنها به صورت قایم باشد، روابط این رویکرد برای لایه‌ی تراواى m که در بین دو لایه نیمه‌تراواى m+1 و m به ترتیب در بالا و پایین قرار گرفته است (مطابق شکل ۲)، به فرم زیر نوشته خواهد شد:

$$\nabla \cdot (K_m^f b_m^f \nabla h_m^f) + \beta_T^f \lambda_{m+1}^f (h_{m+1}^f - h_m^f) + \beta_B^f \lambda_m^f (h_{m-1}^f - h_m^f) =$$

$$b_m^f S_{sm}^f \frac{\partial h_m^f}{\partial t} + n\eta \frac{\partial h_m^f}{\partial t} - n \frac{\partial Z}{\partial t} - Q_m^f \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (K_m^s b_m^s \nabla h_m^s) + \beta_T^s \lambda_{m+1}^s (h_{m+1}^s - h_m^s) + \beta_B^s \lambda_{m+1}^s (h_{m-1}^s - h_m^s) =$$

$$b_m^s S_{sm}^s \frac{\partial h_m^s}{\partial t} + n \frac{\partial Z}{\partial t} - Q_m^s \quad (2)$$

که در آن‌ها اندیس‌های f و s به ترتیب اشاره به آب شیرین و آب شور دارد. K [LT<sup>-1</sup>] هدایت هیدرولیکی، n [-] تخلخل، h [L] هد آب و b [L] ضخامت سیال می‌باشد. Q [LT<sup>-1</sup>] به

ترتیب دبی ورودی یا خروجی بر واحد سطح بوده،  $\eta$  پارامتر بی‌بعدی که در آب‌خوان آزاد مقدار آن ۱ و در آب‌خوان تحت فشار صفر لحاظ می‌گردد و  $S_s$  [L<sup>-1</sup>] ذخیره ویژه آب که در لایه آزاد با جای‌گذاری آب‌دهی ویژه اصلاح می‌گردد ( $bS_s$ ) ←  $(bS_s + S_y)$ . پارامتر  $\lambda$  برابر با حاصل تقسیم هدایت هیدرولیکی لایه نیمه‌تراوا ( $K'$ ) به ضخامت آن لایه ( $b'$ ) ( $\lambda' = K'/b'$ ) و  $\beta_T$  و  $\beta_B$  دو پارامتر بدون بعد بوده که به ترتیب مربوط به نشت از بالای لایه‌ی تراواى m و یا از پایین آن می‌باشند. مقادیر این دو پارامتر در صورتی که نشت صورت پذیرد برابر با یک و در صورتی که نشت انجام نشود برابر با صفر لحاظ می‌گردد. در نهایت Z [L] تراز فصل مشترک آب شور و شیرین نسبت به مبدا در لایه m بوده که مقدار آن در دو معادله فوق با استفاده از معادله (۳) جایگزین می‌گردد. زمانی که مقادیر هد آب شور و شیرین از دو معادله (۱) و (۲) به دست آمد، می‌توان ضخامت‌ها را از معادلات (۴) و (۵) محاسبه نمود.

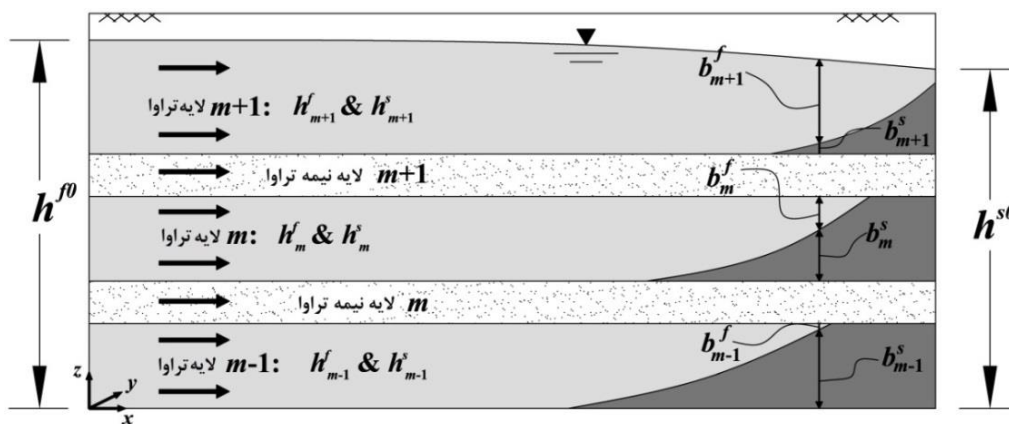
$$Z = (I + \delta) h_m^s - \delta h_m^f \quad (3)$$

$$b_m^f = Z_m^T - Z \quad (4)$$

$$b_m^s = Z - Z_m^B \quad (5)$$

جایگزین می‌گردد).

که در آن‌ها  $\delta = \rho_f / (\rho_s - \rho_f)$  و  $Z_B$  و  $Z_T$  [L] به ترتیب تراز کف و بالای لایه  $m$  می‌باشند (تراز بالا در لایه آزاد با  $h_f$



شکل ۲- مدل مفهومی یک آب‌خوان لایه‌بندی (شرایط مرزی هد ثابت در دو طرف لحاظ شده است)

Figure 2- Conceptual model of multi-layered coastal aquifer with constant head boundary condition at land and sea side

شیرین و شور حاصله از سعی قبلی خطی سازی شده و سپس از الگوریتم تفاضل مرکزی برای جداسازی مکانی و از الگوریتم صریح برای جداسازی زمانی استفاده شده است. معیار هم‌گرایی نیز اختلاف تراز فصل مشترک در دو سعی متوالی انتخاب شده است. تمامی مراحل برنامه‌نویسی با استفاده از نرم‌افزار فرترن (PGI Visual Fortran 13.9) انجام پذیرفته است.

از آن جایی که در مدل SHI-SWIM دو معادله آب شیرین و آب شور حل خواهد گردید، شرایط تمامی مرزها باید برای هر دو سیال قابل تعریف باشد. در مرز آب شیرین، دو شرط مرزی هد ثابت و دبی یکنواخت آب شیرین به مدل قابل اعمال می‌باشد. شرط مرزی هد ثابت (برابر با تراز آب دریا) به عنوان مرز آب شور برای مدل تعریف شده است. برای تعریف هد آب شیرین در مرز دریا ( $h_{fc}$ ) از رابطه تحلیلی ارائه شده توسط Bear and Dagan (۱۹۶۴) (۲۶) استفاده شده است. کف لایه انتهایی آب‌خوان مرز نفوذ ناپذیر لحاظ شده و تراز بالای لایه بالایی آب‌خوان منطبق بر تراز سفره آب زیرزمینی می‌باشد. در مسایل غیر دایمی که نیاز به شرایط اولیه می‌باشد، اندازه هدهای هیدرولیکی آب‌های شور و شیرین که در مرحله دایمی به دست آمده است، به عنوان ورودی به مساله تعریف شده است. صحت‌سنجی مدل برای دو حالت آب‌خوان همگن و

مهم‌ترین تفاوت مدل‌سازی آب‌خوان لایه‌بندی با یک آب‌خوان همگن در این تحقیق، لحاظ نمودن اثر نشست بین‌لایه‌ای می‌باشد. که باید به شکل صحیحی در مدل لحاظ گردد. در این تحقیق بر پایه مطالعات Mehdizadeh و همکاران (۲۰۱۴) (۱۹)، فرض بر این است که در تمامی طول آب‌خوان، نشست بین لایه‌ای از یک سیال به سیال هم‌جنس خود در لایه بالایی و یا پایینی اتفاق می‌افتد. به طور مثال آب شیرین در لایه تراوای  $m$  می‌تواند با عبور از آب شور در لایه تراوای  $m+1$  به آب شیرین آن لایه بپیوندد. هم‌چنین از آن جایی که مدل SHI-SWIM دو معادله آب شیرین و شور را جداگانه حل می‌نماید، دبی پمپاژ باید به صورت دو دبی مجزای آب شیرین و شور به مدل وارد گردد. در این تحقیق برای تفکیک دبی پمپاژ از روش ارائه شده توسط Shi و همکاران (۲۰۱۱) (۳) استفاده شده است. مطابق این روش مقدار هر کدام از این دبی‌های تفکیک‌شده به میزان نفوذ چاه در زبانه شوری و هدایت هیدرولیکی ارتباط داده شده است.

جداسازی معادلات حاکم در این تحقیق به روش حجم محدود و با انتخاب یک شبکه یکنواخت مستطیلی و با قرارگیری گره‌های حل در وسط حجم کنترل انجام پذیرفته است. روابط غیر خطی حاکم در این معادلات با قرار دادن ضخامت‌های آب



دقیقه) و سپس با اعمال پمپاژ، مدل تا رسیدن به حالت دائمی جدید اجرا می‌شود.

### نتایج و بحث

#### ارزیابی مدل مرز مشترک برای آب‌خوان در مقیاس

آزمایشگاهی: مقایسه نتایج میزان پیش‌روی در مدل مرز مشترک و مدل SEAWAT در شکل (۳) آورده شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که نتایج مدل SHI-SWIM از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشد هر چند که مدل، خط تقابل آب شور و شیرین را بیش‌تر از مقدار آزمایشگاهی پیش‌بینی نموده است. مقایسه موقعیت پنجه شوری در زمان‌های مختلف در شبیه‌سازی با استفاده از هر دو رویکرد، نشان می‌دهد که پنجه شوری پیش‌بینی شده در مدل SHI-SWIM، در زمان‌های اولیه بیش‌ترین اختلاف و در زمان‌های انتهایی کم‌ترین اختلاف را داراست به طوری که می‌توان عنوان نمود که نتایج این مدل در انتهای زمان آزمایش تطابق مناسب‌تری با نتایج آزمایشگاهی داشته است (بیشینه خطا پس از گذشت سی دقیقه برابر با ۱۴۴ درصد در لایه بالایی و میزان کمینه آن در زمان ۲۴۰ دقیقه برابر با ۱۲ درصد در همین لایه بوده است).

نتایج مدل SEAWAT نیز نشان می‌دهد که به جهت حرکت سریع گوه شوری به سمت محل چاه (با توجه به میزان پمپاژ)، ناحیه اختلاطی در زمان‌های اولیه آزمایش، ضخیم بوده و سپس به تدریج و با نزدیک شدن به دهنه چاه و شور نمودن آن از ضخامت این ناحیه کاسته می‌گردد، به طوری که بهترین هم‌پوشانی بین نتایج مدل و آزمایش‌ها در انتهای زمان آزمایش و در رسیدن به حالت دائمی مجدد رخ داده است. این امر برای مدل SHI-SWIM نیز صادق بوده و نتایج این مدل در انتهای زمان آزمایش پمپاژ تطابق مناسب‌تری با نتایج آزمایشگاهی داشته است. نتایج این مقایسه هم‌چنین نشان می‌دهد در زمان‌هایی که به علت میزان دبی پمپاژ، گوه شوری هنوز به دهنه چاه نرسیده است، نتایج مدل غیردائمی مرز مشترک اختلاف بیش‌تری نسبت به حالت دائمی پمپاژ خواهد داشت. در این‌جا قابل ذکر است که وجود اختلاف‌های جزئی بین آزمایش صورت پذیرفته و شرایط ایده‌ال مدل‌سازی مانند اعمال هد به

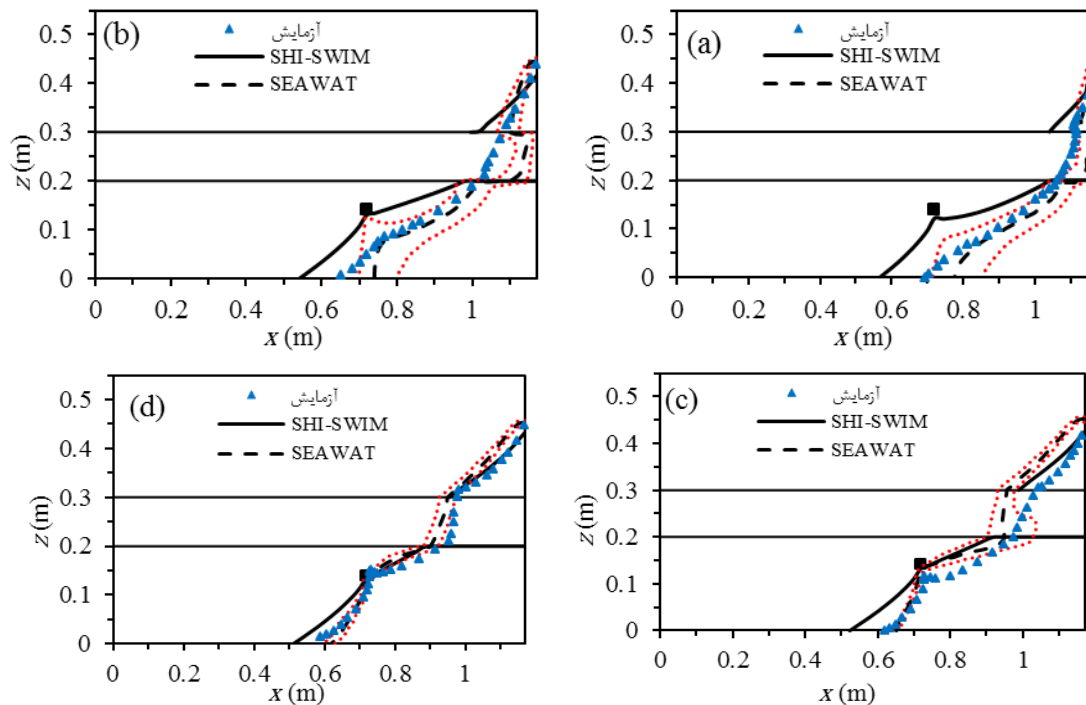
آب‌خوان لایه‌بندی برای جریان دائمی مطابق با روابط تحلیلی موجود صورت گرفته است (به طور مثال روابط ارایه شده توسط Mualem and Bear (۱۹۷۴) (۲۷)). برای صحت‌سنجی در جریان غیردائمی، نتایج مدل با مشاهدات آزمایشگاهی و نتایج مدل‌سازی ارایه شده توسط Clement و Goswami (۲۰۰۷) (۲۸) مقایسه شده است. مدل مرز مشترک توسعه داده شده در این تحقیق با دقت مناسبی قادر به پیش‌بینی شکل گوه شوری می‌باشد. بیش‌ترین اختلاف‌ها در مرز دریا و در پنجه شوری دیده شده و بیشینه خطا در شبیه‌سازی غیردائمی برابر با ۲۸٪ به دست آمده است.

در مدل SHI-SWIM جداسازی مکانی معادلات حاکم با انتخاب  $\Delta x=2$  سانتی‌متر انجام گرفته و آزمایش‌های غیردائمی با انتخاب  $\Delta t=1$  دقیقه در زمان گسسته شده‌اند. برای هم‌گرایی بهتر و جلوگیری از واگرایی حل، ضریب زیر تخفیف برابر با ۰/۵ به مدل اعمال شده و معیار هم‌گرایی نیز اختلاف تراز مرز مشترک در دو سعی متوالی برابر با ۰/۰۰۱ سانتی‌متر لحاظ شده است.

در این تحقیق با توجه به اشباع بودن خاک و نیز تحت ویندوز بودن نسخه جدید مدل SEAWAT (version 4, GMS) (9.2.7) از این نرم‌افزار در شبیه‌سازی با رویکرد اختلاطی و مقایسه نتایج مدل SHI-SWIM بهره گرفته شده است. گام زمانی در مدل SEAWAT برای حل معادله جریان ۳۰ ثانیه و برای حل معادله انتقال و پخش ۳ ثانیه لحاظ شده است. در انتخاب ابعاد شبکه حل به دلیل موثر بودن ابعاد در دقت شبیه‌سازی و ضخامت ناحیه انتقالی، از معیار عدد پکلت کم‌تر از ۴ استفاده شده است (Voss and Souza, ۱۹۸۷) (۲۹). با انتخاب  $\Delta x=0/005$ ،  $\Delta z=0/004$  متر عدد پکلت به ۱/۲۵ محدود می‌گردد که معیار فوق را ارضا می‌نماید. معادلات جریان و آلاینده به صورت صریح<sup>۱</sup> به هم کوپل شده‌اند و عدد کورانت<sup>۲</sup> در حل بسته انتقال ۰/۷۵ لحاظ شده است. شبیه‌سازی آزمایش پمپاژ به دو مرحله تقسیم شده است. مدل در ابتدا با اعمال دو هد ثابت در مرزها اجرا می‌گردد تا به حالت دائمی برسد (۶۰۰

فلوم، سبب شبیه‌سازی بیشتر نفوذ گوه شوری در مدل نسبت به نتایج آزمایشگاهی شده‌است.

صورت پیوسته در مرزها به مدل و هم‌چنین وجود مقداری ناهمگنی و غیریکنواختی به خاطر روش تحکیم ماسه داخل



شکل ۳- مقایسه نتایج آزمایشگاهی، مطالعه حاضر (مدل SHI-SWIM) و مدل SEAWAT برای زمان‌های مختلف. (a)، (b)، (c) و (d) به ترتیب پس از گذشت ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۲۴۰ دقیقه از شروع آزمایش. کانتورهای غلظت ۵ و ۹۵ درصد با نقطه چین قرمز رنگ نشان داده شده است.

Figure 3- Comparison of experimental results with SHI-SWIM and SEAWAT modeling at (a) 30 min, (b) 60 min, (c) 120 min and (d) 240 min. Dotted red lines present 5% and 95% salinity contours.

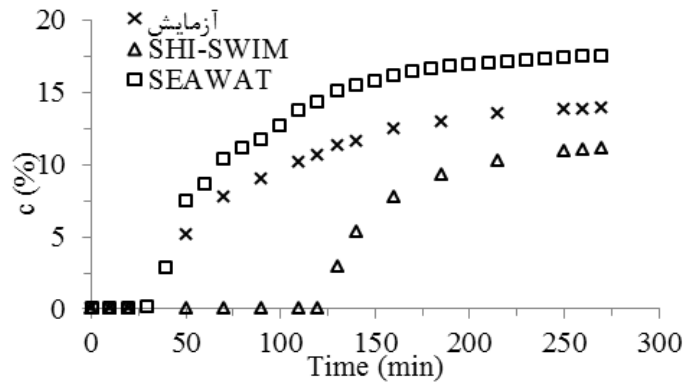
که در آن  $EC_f$  هدایت الکتریکی آب شیرین در مخزن،  $EC_0$  هدایت الکتریکی آب شور در مخزن و  $EC_m$  هدایت الکتریکی آب برداشتی می‌باشد. در این آزمایش میزان  $EC_0$  و  $EC_f$  به ترتیب  $476 \mu\text{s/cm}$  و  $39/9 \text{ ms/cm}$  به دست آمده است (در دمای ۱۶ درجه سانتی‌گراد). نتایج میزان نمک حاصل در مدل SHI-SWIM و نتایج آزمایشگاهی در شکل (۴) نشان داده شده است. در زمان‌های اولیه شروع پمپاژ با توجه به این‌که گوه شوری هنوز به دهانه چاه نرسیده مقدار پارامتر  $C$  صفر می‌باشد. شروع برداشت آب شور در مدل SHI-SWIM نسبت به مدل SEAWAT و قرائت‌های انجام شده در آزمایشگاه با تاخیر زمانی همراه بوده است به طوری‌که فاصله زمانی بین شروع شوری برداشتی از چاه در مدل SHI-SWIM و مدل

از آنجایی که مدل مرز مشترک قادر به پیش‌بینی غلظت آب شور نمی‌باشد، بنابراین میزان شوری چاه در آزمایش و مدل اصولاً قابل مقایسه نمی‌باشند. در مسایل پمپاژ از آب‌خوان، نظر به اهمیت تخمین میزان شوری آب پمپاژ شده، Shi و همکاران (۲۰۱۱) (۳) پارامتری به عنوان میزان نمک (c) برحسب میزان دبی آب شور ( $Q_{sw}$ ) و دبی آب شیرین ( $Q_{fw}$ ) برداشتی مطابق رابطه زیر تعریف نمودند که به تخمین میزان شوری آب چاه می‌پردازد:

$$c = \frac{Q_{sw}}{Q_w} \approx \frac{EC_m - EC_f}{EC_0} \quad (۶)$$

مقدار واقعی در آزمایشگاه تخمین زده شده‌است. کم‌ترین میزان خطای شوری پیش‌بینی در مدل در انتهای آزمایش و برابر با ۲۴٪ به دست آمده‌است.

آزمایش‌گاهی تقریباً ۷۰ دقیقه بوده‌است. همان‌طور که در شکل مشخص است، تحت شرایط آزمایشگاهی تعریف شده در این آزمایش، استفاده از رابطه (۶) شوری آب برداشتی کم‌تر از



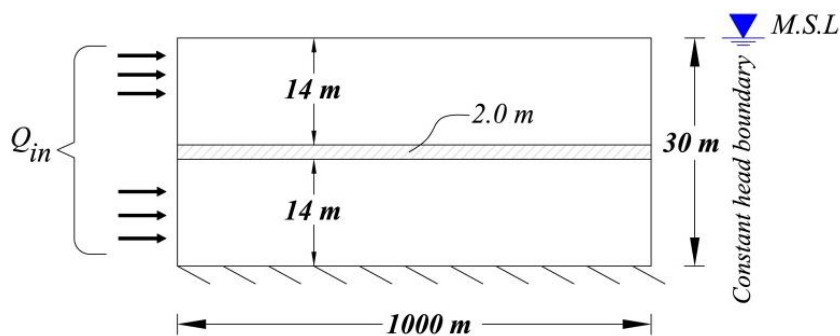
شکل ۴- نتایج مقایسه شوری آب برداشتی از چاه پمپاژ در مدل SHI-SWIM, SEAWAT و آزمایش

Figure 4- Comparison of salinity result in the experiment with SHI-SWIM and SEAWAT modeling

آن در ساحل پیش‌روی نموده‌است. در این تحقیق به منظور اعمال مدل مرز مشترک از طول آب‌خوان در دریا صرف‌نظر شده و تنها طول ۱۰۰۰ متری آن مدل‌سازی شده‌است (شکل ۵). کل ارتفاع آب‌خوان ۳۰ متر در نظر گرفته شده که از دو لایه با نفوذپذیری بیشتر و به ارتفاع ۱۴ متر در بالا و پایین و یک لایه نازک ۲ متری به عنوان لایه نیمه‌تراوا در بین آن‌ها تشکیل شده‌است. آب شیرین با دبی ثابت ( $Q_{in}$ ) در مرز خشکی اعمال می‌گردد و تمامی تنظیمات برای سایر شرایط مرزی، مشابه تنظیمات آزمایش‌های دائمی لحاظ شده‌است. به خصوصیات سیال و خاک این آب‌خوان نیز در جدول (۲) اشاره شده‌است.

ارزیابی مدل مرز مشترک برای آب‌خوان تحت پمپاژ با مقیاس واقعی

از آنجایی که انجام آزمایش‌های مختلف برای ارزیابی نتایج مدل SHI-SWIM میسر نبوده، به منظور ارزیابی خروجی این مدل در شرایط واقعی از یک آب‌خوان بزرگ مقیاس کمک گرفته شده و با مقایسه نتایج مدل توسعه داده شده با مدل SEAWAT، نقاط قوت و محدودیت‌های آن شناخته شده‌است. مشخصات هندسی، خواص سیال و خاک آب‌خوان بزرگ مقیاس از مطالعات انجام شده توسط Post و همکاران (۲۰۱۳) (۳۰) اقتباس شده‌است. آب‌خوان واقعی در مطالعات آن‌ها ۳۰۰۰ متر طول داشته که ۲۰۰۰ متر آن در دریا و ۱۰۰۰ متر



شکل ۵- هندسه و شرایط مرزی در مدل‌سازی آب‌خوان لایه‌بندی در مقیاس واقعی

Figure 5- Geometry and boundary condition of field-scale multi-layered coastal aquifer

## جدول ۲- خواص آب و محیط متخلخل در شبیه‌سازی آب‌خوان بزرگ مقیاس

Table 2- Water and porous media properties at field-scale aquifer simulation

مقدار	پارامتر
۰/۵۴۸	دبی آب شیرین ورودی، $Q_{in}$ (m <sup>2</sup> /d)
۱۰،۱۰	هدایت هیدرولیکی لایه بالا، پایین، $K$ (m/d)
۰/۳۵، ۰/۲۰، ۰/۳۵	تخلخل لایه‌های بالا، وسط، پایین، $n$ (-)
۰/۲۵	آب‌دهی ویژه لایه بالایی، $S_y$ (-)
۰/۵	پراکندگی طولی، $\alpha_L$ (m)
۰/۰۵	پراکندگی عرضی، $\alpha_T$ (m)
۱۰۰۰	چگالی آب شیرین، $\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )
۱۰۲۵	چگالی آب شور، $\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )
۳۵	غلظت اولیه آب شور، $C_0$ (kg/m <sup>3</sup> )
۳۰	هد آب شور سمت دریا، $h_{s0}$ (m)
$\Delta x=1, \Delta z=0.5$	ابعاد شبکه در SEAWAT، (m)
$\Delta x=5$	ابعاد شبکه در مدل SHI-SWIM، (m)

## جدول ۳- سناریوهای مختلف در ارزیابی مدل SHI-SWIM

Table 3- Different scenarios for SHI-SWIM modeling evaluation

Z <sub>w</sub> (m)	X <sub>w</sub> (m)	Q <sub>w</sub> (m <sup>3</sup> /d)	سناریو	Z <sub>w</sub> (m)	X <sub>w</sub> (m)	Q <sub>w</sub> (m <sup>3</sup> /d)	سناریو
۰	۴۰۰	۰/۵	۹	۵	۴۰۰	۰/۱	۱
۰	۶۰۰	۰/۵	۱۰	۵	۴۰۰	۰/۲۵	۲
۰	۸۰۰	۰/۵	۱۱	۵	۴۰۰	۰/۵	۳
۲۱	۲۰۰	۰/۵	۱۲	۵	۴۰۰	۰/۷۵	۴
۲۱	۴۰۰	۰/۵	۱۳	۵	۲۰۰	۰/۵	۵
۲۱	۶۰۰	۰/۵	۱۴	۵	۶۰۰	۰/۵	۶
۲۱	۸۰۰	۰/۵	۱۵	۵	۸۰۰	۰/۵	۷
				۰	۲۰۰	۰/۵	۸

\* X<sub>w</sub> فاصله از مرز دریا و Z<sub>w</sub> فاصله انتهای دهانه چاه تا کف آب‌خوان می‌باشد.

چاه در مدل و نیز مجموع ارتفاع سلول‌های برداشت آب در مدل SEAWAT لحاظ گردیده‌است (دو سلول به ارتفاع کلی یک متر). سایر تنظیمات، مشابه شبیه‌سازی مساله آزمایشگاهی به قوت خود باقی مانده است و تنها گام زمانی مناسب برای هر دو مدل تخصیص یافته است. این گام زمانی برای مدل SHI-

۱۵ سناریوی پمپاژ با تغییر سه مشخصه میزان دبی برداشتی، موقعیت طولی و ارتفاعی دهانه ورودی چاه (مطابق جدول ۳) به صورت غیردائمی شبیه‌سازی شده‌است. سناریوهای شماره ۱۶ و ۱۷ نیز به منظور بررسی اثر تغییر ضخامت لایه نیمه تراوای وسط و میزان نفوذپذیری آن تعریف شده‌اند. طول دهانه ورودی

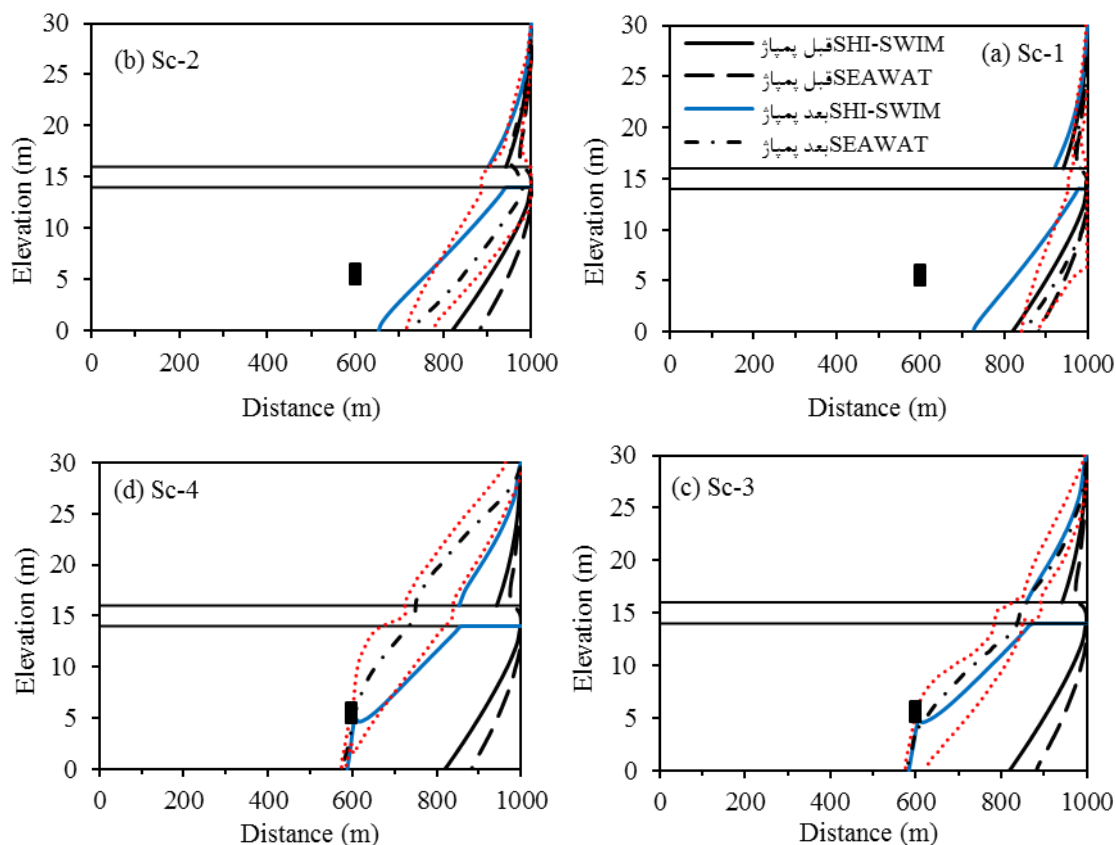
مرز مشترک برابر با  $Q_{SW} = 0.247 \text{ m}^3/\text{d}$  به دست آمده که عدد میزان نمک ( $C$ ) را به  $4/94$  درصد می‌رساند و این درحالی است که برای زمان مشابه، میزان غلظت برداشتی در مدل SEAWAT برابر با  $5/07 \text{ kg/m}^3$  بوده که تولید  $C$  برابر با  $14/5$  درصد خواهد شد. این افزایش مقدار میزان نمک در مدل SEAWAT سبب شده که پنجه شوری در لایه پایینی (با معیار خط هم‌غلظت  $50\%$ ) در زمان یاد شده در فاصله  $422/3$  متری از دریا قرار گیرد و این درحالی است که فاصله پنجه شوری در مدل مرز مشترک از دریا و در این زمان برابر با  $416/5$  متر به دست آمده است.

برداشت قابل ملاحظه آب از چاه، همان‌طور که در مدل SEAWAT در شکل (۶d) مشخص می‌باشد، می‌تواند سبب رسیدن گوه شوری به سطح آب‌خوان شود و سطح سفره آب زیرزمینی را شور نماید. اختلاف ایجاد شده در مدل SHI-SWIM و SEAWAT در این حالت نیز به همین دلیل است. شرط مرزی تعریف شده برای آب شیرین در مدل SHI-SWIM به‌گونه‌ای است که در همه حالات، تخلیه آب شیرین به دریا از وجه قایم سمت دریا صورت خواهد گرفت، بنابراین گوه شوری در این مدل نمی‌تواند تمامی ارتفاع  $30$  متری مرز دریا را فرا بگیرد (هرچند ارتفاع این پنجره تخلیه کوچک باشد). این امر سبب خواهد شد که در مدل مرز مشترک سطح سفره آب زیرزمینی بر خلاف مدل SEAWAT شور نگردد و این امر بر اختلاف نتایج این دو مدل در حالت پمپاژ با دبی بسیار بالا در لایه بالایی خواهد افزود. مانند اشکال قبلی، خطوط قرمز رنگ نقطه‌چین، کانتورهای غلظت  $5$  و  $95$  درصد را نمایش می‌دهند.

SWIM،  $5$  روز و در بعضی از سناریوها  $10$  روز انتخاب شده است. در مدل SEAWAT این گام زمانی برای روابط مربوط به حل معادله جریان  $5$  روز و برای روابط مرتبط با پخش و انتقال شوری یک روز می‌باشد. برای تطابق بهتر دوره زمانی با شرایط واقعی و پیش بینی نفوذ شوری در سال‌های آینده، هر دو مدل برای یک دوره زمانی  $100$  ساله اجرا شده و نتایج حاصل در بخش‌های زیر مورد بحث قرار گرفته است.

#### اثر دبی برداشتی

نتایج شبیه‌سازی چهار سناریوی اول (تغییر در دبی برداشتی) در شکل (۶) آورده شده است. این شکل نشان می‌دهد که عملکرد مدل SHI-SWIM با افزایش دبی پمپاژ، تطابق بهتری با نتایج مدل SEAWAT خواهد داشت. مدل SHI-SWIM به طور معمول میزان نفوذ شوری را بیش‌تر از مقدار واقعی (یا بیشتر از مدل SEAWAT) پیش‌بینی می‌نماید و این امر در دو سناریوی اول و دوم که میزان ناچیز پمپاژ سبب می‌شود که گوه شوری به دهانه چاه نرسد کاملاً مشهود می‌باشد. با رسیدن گوه شوری به دهانه چاه و برداشت آب شور، مدل SHI-SWIM عملکرد ضعیف‌تری خواهد داشت و میزان دبی آب شور برداشتی را کم‌تر از مدل SEAWAT پیش‌بینی می‌نماید. از این‌رو هم‌چنان‌که گوه شوری در مدل SEAWAT با سرعت فزاینده‌ای به سمت دهانه چاه حرکت می‌نماید، آهنگ حرکت فصل مشترک آب شیرین و شور به سمت دهانه چاه در مدل مرز مشترک کند شده و این سبب می‌گردد که به طورمثال پس از گذشت  $100$  سال نتایج مدل SHI-SWIM و مدل SEAWAT در دو سناریوی سوم و چهارم به هم نزدیک‌تر گردد. در سناریوی سوم میزان پیش‌بینی دبی آب شور برداشتی پس از گذشت  $100$  سال توسط مدل

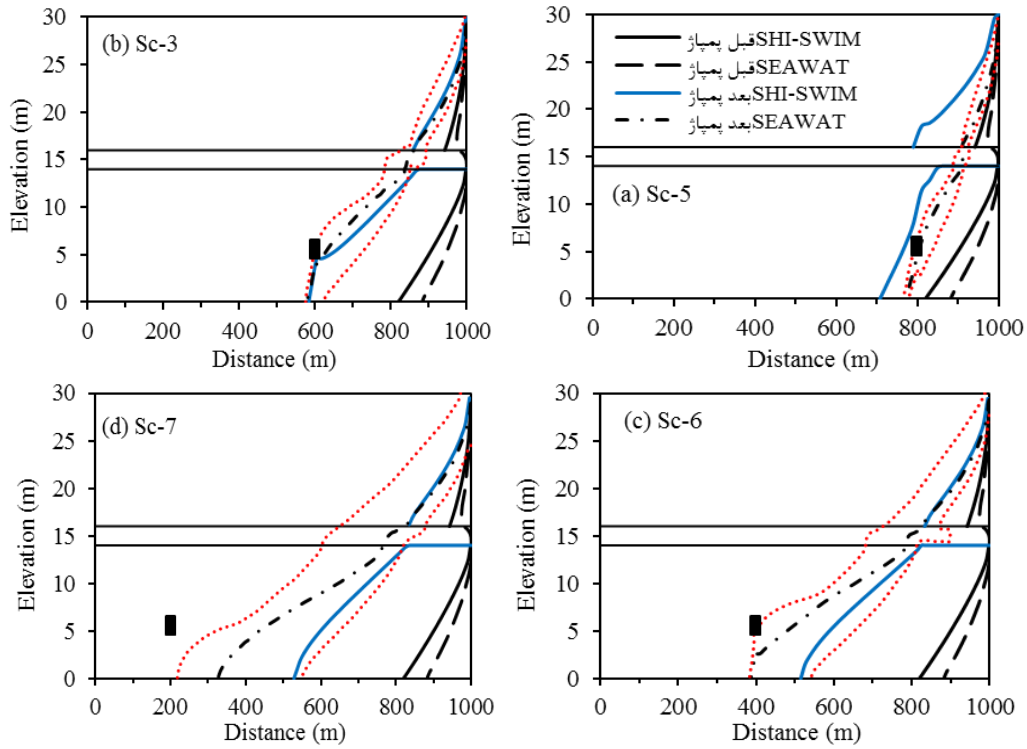


شکل ۶- (a), (b), (c) و (d) به ترتیب نتایج شبیه‌سازی سناریوهای اول تا چهارم با تغییر میزان دبی پمپاژ. کانتورهای غلظت ۵ و ۹۵ درصد با نقطه چین قرمز رنگ نشان داده شده است.

Figure 6-(a), (b), (c) and (d) respectively present the results of scenario 1 to 4 with different pumping rate. Dotted red lines present 5% and 95% salinity contours.

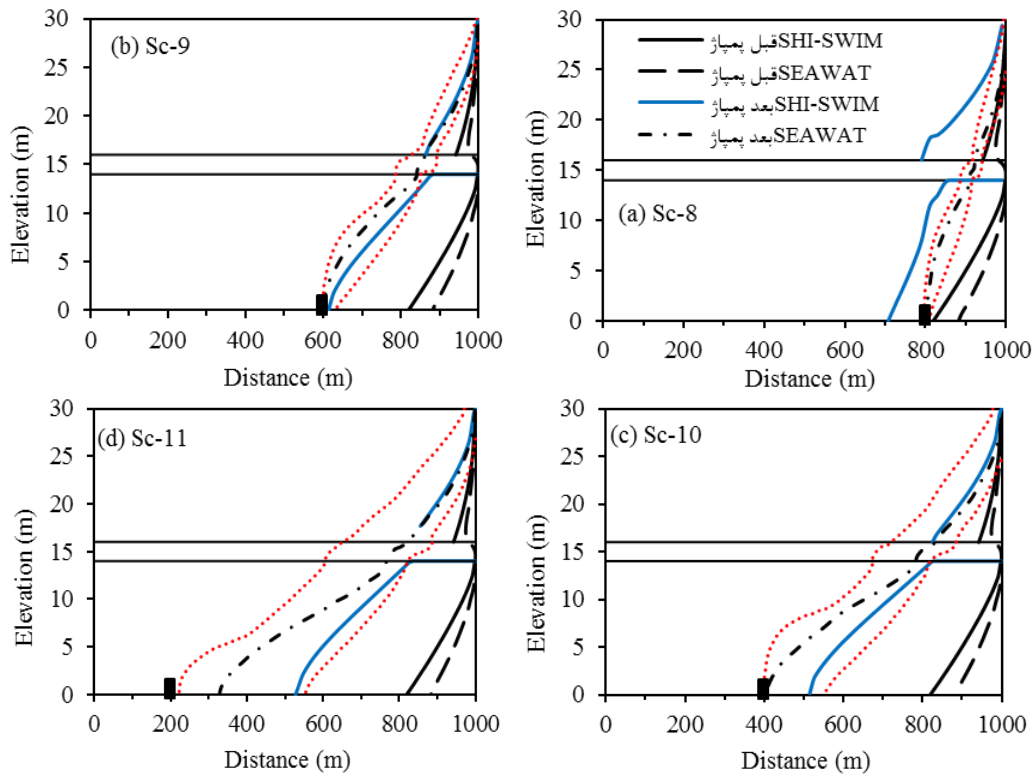
می‌دهد. مقایسه نتایج این سناریوها مشخص می‌کند که نزدیک شدن دهانه چاه به دریا، تطابق بهتر پیش‌بینی مدل SHI-SWIM را با مدل SEAWAT در پی خواهد داشت. نزدیک بودن دهانه چاه به مرز دریا و در نتیجه به گوه شوری طبیعی موجود (قبل از پمپاژ)، فاصله زمانی رسیدن گوه شوری به چاه را کاهش داده و در نتیجه زمان رسیدن به حالت دائمی ثانویه کاهش می‌یابد.

اثر موقعیت طولی چاه: به منظور مقایسه اثر موقعیت طولی چاه در نتایج مدل، چاه با نفوذ کامل و نسبی در نظر گرفته شده است. شکل (۷) نتایج شبیه‌سازی سناریوهای ۵، ۳، ۶ و ۷ را برای چاه‌های با نفوذ نسبی (کف چاه ۵ متر بالاتر از بستر آب‌خوان) در فاصله به ترتیب برابر با ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ متری از دریا نشان داده و شکل (۸) نتایج سناریوهای ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱ را برای چاه‌های با نفوذ کامل در فواصل مشابه نمایش



شکل ۷- نتایج شبیه‌سازی سناریوهای مختلف با تغییر موقعیت طولی دهانه چاه ( $Z_w=5.0$  m)

Figure 7- Presentation of SHI-SWIM and SEAWAT modeling results for different longitudinal well location ( $Z_w=5.0$  m)



شکل ۸- نتایج شبیه‌سازی سناریوهای مختلف با تغییر موقعیت طولی دهانه چاه ( $Z_w=0.0$  m)

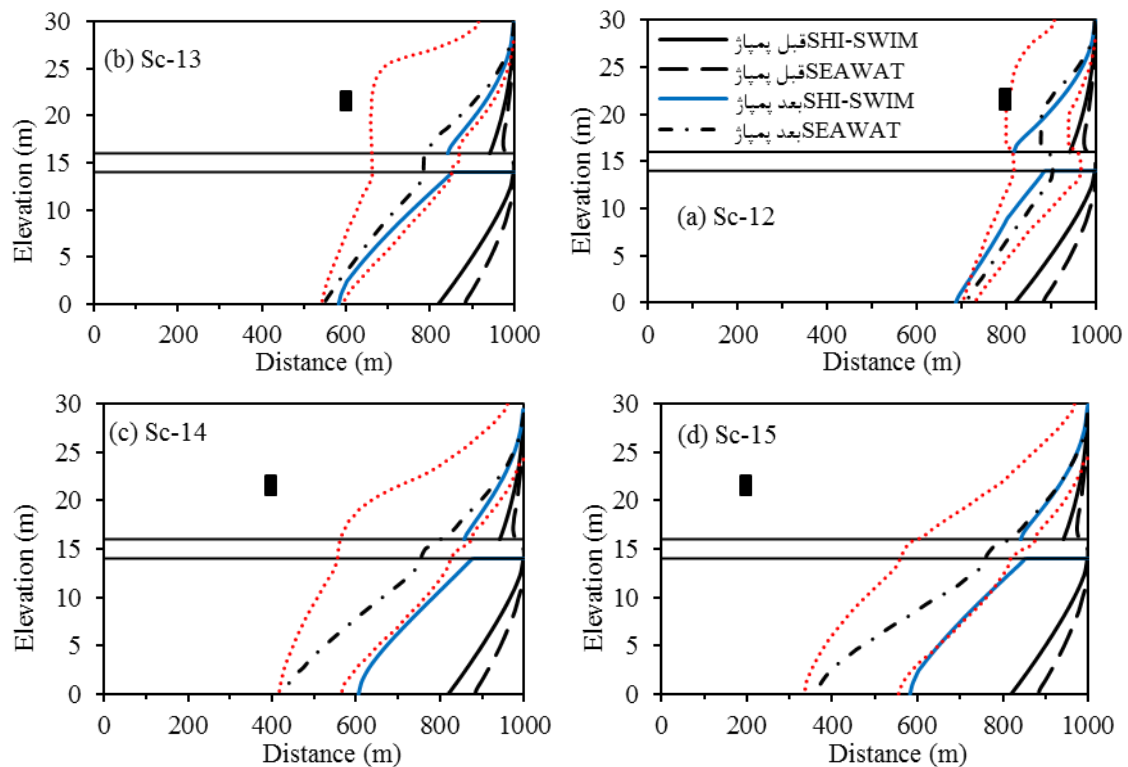
Figure 8- Presentation of SHI-SWIM and SEAWAT modeling results for different longitudinal well location ( $Z_w=0.0$  m)

### اثر موقعیت ارتفاعی چاه

شکل (۷ و ۸) نشان می‌دهند که با فاصله گرفتن اندک موقعیت چاه نسبت به بستر لایه پایینی، تغییر قابل ملاحظه‌ای در نتایج پیش‌بینی چه در مدل SHI-SWIM و چه در مدل SEAWAT ایجاد نخواهد شد. برای مشاهده عملکرد مدل و نیز بررسی رفتار آب‌خوان لایه‌بندی، در چهار سناریوی پیش‌رو دهانه چاه در لایه بالایی قرار داده شده و سپس مدل برای یک دوره ۱۰۰ ساله اجرا شده است. نتایج حاصل از هر دو رویکرد در شکل (۹) نمایش داده شده است. مقایسه این سناریوها (به همراه سناریوهای قبلی) نشان می‌دهد که در یک موقعیت طولی یکسان، نتایج شبیه‌سازی میزان نفوذ شوری زمانی که دهانه چاه نفوذ کامل در آب‌خوان نموده است، از دقت بیشتری نسبت به نفوذ نسبی برخوردار است و بر اختلاف نتایج این دو رویکرد با قراردادن دهانه پمپاژ در لایه بالایی افزوده می‌گردد. قرارگیری دهانه چاه در نزدیکی سطح سفره آب زیرزمینی احتمال شوری این سطح را در پی خواهد داشت (شکل ۹) و همان‌گونه که در توضیحات قبلی بیان گردید، به دلیل وجود پنجره خروجی در مرز دریای مدل SHI-SWIM، بر اختلاف این دو رویکرد افزوده می‌شود. از طرفی قرارگیری دهانه چاه در لایه بالایی، نقش نشت قابم آب شور از لایه پایینی به آب شور لایه بالایی را پر اهمیت خواهد ساخت. از آنجایی که مدل‌سازی نشت آب شور از لایه پایینی به آب شور لایه بالایی

در مدل SHI-SWIM به صحت مدل SEAWAT پیش‌بینی نمی‌شود (Mehdizadeh و همکاران، ۲۰۱۴ (۱۹)). نتایج شبیه‌سازی در این حالات در مدل مرز مشترک تطابق کم‌تری با مدل SEAWAT خواهند داشت و همان‌طور که در شکل مشخص است، پیش‌بینی فصل مشترک آب شور-شیرین توسط مدل SHI-SWIM در بسیاری از حالات کم‌تر از مدل SEAWAT صورت گرفته است. به طور مثال برای دو سناریوی ۱۴ و ۱۵، مدل مرز مشترک، پنجه شوری را به ترتیب در فاصله ۳۹۴/۱ و ۳۹۷/۸ متری از دریا در لایه پایینی و ۱۴۲/۶ و ۱۳۸/۱ متری در لایه بالایی پس از گذشت ۱۰۰ سال پیش‌بینی نموده و این درحالی‌است که پنجه شوری در مدل SEAWAT برای سناریوی ۱۴ و به ترتیب منطبق با کانتور غلظت ۰/۹۵٪، ۰/۵۰٪ و ۰/۵٪ برابر با ۴۳۵/۳، ۵۲۷/۹ و ۵۸۴/۴ متر در لایه پایینی و ۱۲۶/۳، ۱۹۶/۳ و ۴۳۱/۷ متر در لایه بالایی بوده است. این ارقام برای سناریوی ۱۵ برابر با ۴۴۴/۴، ۶۳۳/۷ و ۶۶۴/۸ متر در لایه پایینی و ۱۲۲/۳، ۱۸۱/۵ و ۳۹۹/۴ متر در لایه بالایی بوده است. با فرض در نظرگیری معیار خط هم غلظت ۰/۵٪ برای مقایسه، شبیه‌سازی در مدل SHI-SWIM برحسب پنجه شوری به ترتیب در سناریوهای ۱۴ و ۱۵ منجر به ۳۴ و ۵۹ درصد خطا در لایه پایینی و ۳۸ و ۳۱ درصد خطا در لایه بالایی شده است.



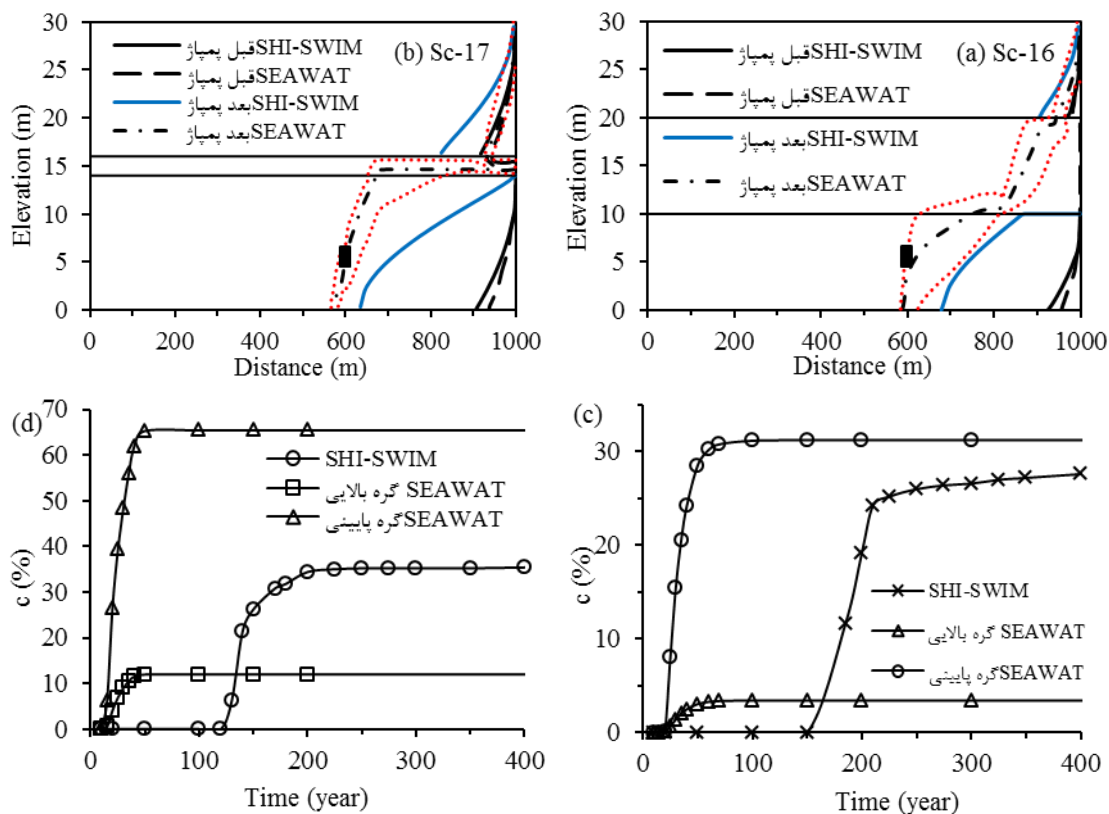


شکل ۹- نتایج شبیه‌سازی با مدل SHI-SWIM و SEAWAT با تغییر در موقعیت طولی دهانه چاه در لایه بالایی

Figure 9- Presentation of SHI-SWIM and SEAWAT modeling results for different well location at upper layer

کاهش ضخامت دو لایه بالایی و پایینی به ۱۰ متر، ضخامت کل آبخوان ثابت مانده است. در سناریوی ۱۷ نیز تنها میزان نفوذپذیری لایه نیمه‌تراوا به  $0.0001 \text{ m/d}$  کاهش پیدا نموده است. از آن جایی که علاوه بر مقایسه موقعیت پنجه شوری در هر دو رویکرد، میزان شوری آب برداشتی از چاه نیز در این جا بررسی شده است، هر دوی این سناریو برای یک دوره زمانی ۴۰۰ ساله با هر دو رویکرد اجرا شده و نتایج آن در اشکال زیر آورده شده است.

اثر پارامترهای لایه نیمه تراوا: از آن جایی که ترم نشت در مدل مرز مشترک SHI-SWIM به دو پارامتر ضخامت لایه نیمه‌تراوا و میزان نفوذپذیری آن وابسته است، به منظور بررسی اثر تغییرات این دو پارامتر بر نتایج حاصله، سناریوی ۱۶ و ۱۷ تعریف شده‌اند. شرایط مرزی و هندسی آبخوان و نیز موقعیت چاه و میزان پمپاژ از آن در این دو سناریو، مشابه سناریوی سوم می‌باشد با این تفاوت که در سناریوی ۱۶ ضخامت لایه نیمه‌تراوای وسط به ۱۰ متر افزایش پیدا کرده در حالی که با



شکل ۱۰- نتایج شبیه‌سازی با مدل SHI-SWIM و SEAWAT پس از گذشت ۱۰۰ سال از زمان پمپاژ به ترتیب برای (a) افزایش ضخامت لایه نیمه‌تراوا و (b) کاهش نفوذپذیری آن. (c) و (d) میزان نمک تولید شده در مدل SHI-SWIM و

SEAWAT در طول زمان به ترتیب برای سناریوی ۱۶ و سناریوی ۱۷

Figure 10- SHI-SWIM and SEAWAT results after 100 years transient simulation with (a) increasing aquitard thickness and (b) decreasing aquitard permeability. (c) And (d) transient salinity prediction by SH-SWIM and SEAWAT modeling respectively at scenario 16 and 17

#### نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور ارزیابی شبیه‌سازی نفوذ شوری در یک آب‌خوان لایه‌بندی ساحلی با استفاده از رویکرد مرز مشترک، یک آزمایش غیردایمی فلوم ماسه ترتیب داده شد. مقایسه شکل گوه شوری در مدل مرز مشترک با مشاهده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که نتایج مدل مرز مشترک (با نام SHI-SWIM) از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشد. این مدل زمانی که گوه شوری به چاه رسیده و در نتیجه ضخامت ناحیه انتقالی رو به کاهش و جریان دایمی جدید در حال تولید باشد، با نتایج آزمایشگاهی تطابق بهتری داشته‌است. اما در شروع آزمایش، مدل مرز مشترک خط تقابل آب شور و شیرین را بیش‌تر از مقدار آزمایشگاهی پیش‌بینی نموده‌است. میزان

تحلیل این اشکال نیز نتایج مشابه سناریوهای قبلی را در پی خواهد داشت. در سناریوهایی که شوری به دهانه چاه رسیده، مدل SHI-SWIM نمی‌تواند متناسب با مدل SEAWAT به پیش‌بینی شوری آب برداشتی بپردازد و از اینرو موقعیت پنجه شوری کم‌تر از میزان آن در مدل SEAWAT پیش‌بینی خواهد شد. در این اشکال از آنجایی که برداشت آب در مدل SEAWAT از دو سلول با ارتفاع ۰/۵ متر انجام می‌گیرد (ارتفاع دهانه چاه برابر با ۱/۰ متر)، غلظت نمک در هر دو سلول آورده شده است. مدل مرز مشترک، میزان نمک را از میزان موجود در سلول بالایی بیش‌تر پیش‌بینی نموده‌است اما مقدار آن را در مقایسه با سلول پایینی (یا در مقایسه با مقدار میانگین دو سلول) کم‌تر برآورد نموده‌است.

- 2- Abd-Elhamid, H.F., Javadi, A.A., 2011. A density-dependent finite element model for analysis of saltwater intrusion in coastal aquifers. *Journal of Hydrology*, 401, 259–271.
- 3- Shi, L., Cui, L., Park, N., Huyakorn, P.S., 2011. Applicability of a sharp-interface model for estimating steady-state salinity at pumping wells-validation against sand-tank experiments. *Journal of Contaminant Hydrology*, 124, 35-42.
- 4- Llopis-Albert, C., Pulido-Velazquez, D., 2013. Discussion about the validity of sharp-interface models to deal with seawater intrusion in coastal aquifers. *Hydrological Process*, 28 (10), 3642-3654.
- 5- Bear, J., Cheng, A.H.-D., Sorek, S., Ouazar, D., Herrera, I., 1999. *Seawater Intrusion in coastal aquifers-concepts, methods and practices*. Springer publication 14, 627 pp.
- 6- Bear, J., Cheng, A.H.-D., 2010. *Modeling groundwater flow and contaminant transport*, Springer publication, Vol 23, 834p.
- 7- Dausman, A.M., Langevin, C., Bakker, M., Schaars, F., 2010. A comparison between SWI and SEAWAT- the importance of dispersion, inversion and vertical anisotropy, 21st saltwater intrusion meeting, Portugal, 271-274.
- 8- Mantoglou, A., Papanoniou, M., Giannouloupoulos, P., 2004. Management of coastal aquifers based on nonlinear optimization and evolutionary algorithms. *Journal of Hydrology*, 297, 209-28.
- 9- Pool, M., Carrera, J., 2011. A correction factor to account for mixing in Ghyben-Herzberg and critical pumping rate approximations of

شوری آب برداشتی در مدل مرز مشترک نیز کم‌تر از مقدار واقعی پیش‌بینی شده و همچنین با تاخیر زمانی نیز همراه بوده است.

مقایسه عملکرد مدل SHI-SWIM با مدل SEAWAT (مدلی با رویکرد اختلاط جریان) در آب‌خوان بزرگ مقیاس نشان می‌دهد که مدل SHI-SWIM با افزایش دبی پمپاژ، تطابق مناسب‌تری با نتایج مدل SEAWAT خواهد داشت. نتایج سناریوهای تعریف شده با تغییر در موقعیت طولی دهانه چاه نشان می‌دهد که نزدیک شدن دهانه چاه به دریا نیز منجر به تطابق بهتر پیش‌بینی مدل SHI-SWIM با مدل SEAWAT خواهد شد. نزدیک بودن دهانه چاه به مرز دریا و در نتیجه به گوه شوری طبیعی موجود (قبل از پمپاژ)، فاصله زمانی رسیدن گوه شوری به چاه را کاهش داده و در نتیجه زمان رسیدن به حالت دائمی ثانویه کاهش می‌یابد. مقایسه سناریوهای با تغییر در موقعیت ارتفاعی مختلف دهانه چاه نشان می‌دهد که در یک موقعیت طولی یکسان، نتایج شبیه‌سازی شوری زمانی که دهانه چاه نفوذ کامل در آب‌خوان نموده است، از دقت بیش‌تری نسبت به نفوذ نسبی برخوردار است و بر اختلاف نتایج این دو مدل مرز مشترک و SEAWAT با قراردادن دهانه پمپاژ در لایه بالایی افزوده خواهد شد. علت این امر، افزایش ضخامت ناحیه انتقالی بوده است. آنچه شبیه‌سازی مدل آب‌خوان تحت پمپاژ نشان می‌دهد، استفاده از رویکرد مرز مشترک برای مسایل پمپاژ در زمانی است که گوه شوری به دهانه چاه برسد که باید با احتیاط بیش‌تری صورت پذیرد.

#### تشکر و قدردانی

آزمایشات این پژوهش در خلال فرصت کوتاه مدت تحقیقاتی که برای نویسنده اول در دانشگاه فلیندرز، آدلاید، استرالیا، فراهم آمده بود، انجام گردید. نویسندگان این تحقیق بر خود لازم می‌دانند که از همکاری و کمک‌های آقای دکتر آدریان ورنر (Adrian D.Werner) و مرکز ملی آموزش و تحقیقات آب زیرزمینی آن دانشگاه، تشکر و قدردانی به عمل آورند.

#### Reference

- 1- Bear, J., 1979. *Hydraulics of Groundwater*, McGraw-Hill, 569 pp.

- 17- Lu, C., Chen, Y., Zhang, C., Luo, J., 2013. Steady-state freshwater-seawater mixing zone in stratified coastal aquifers. *Journal of Hydrology*, 505, 24-34.
- 18- Liu, Y., Mao, X., Chen, J., Barry, D.A., 2013. Influence of a coarse interlayer on seawater intrusion and contaminant migration in coastal aquifers. *Hydrological Processes*, 28(20), 5162-5175
- 19- Mehdizadeh, S.S., Werner, A.D., Vafaie, F., Badaruddin, S., 2014. Vertical leakage in sharp-interface seawater intrusion models of layered coastal aquifers, *Journal of Hydrology*. 519, Part A, 1097-1107.
- 20- Klute, A., Dirksen, C., 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods, In: *Methods of soil analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods*, 2nd ed., Agronomy Monograph, Vol. 9, American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin USA, 687-734.
- 21- Ataie-Ashtiani, B., 1998. Contaminant transport in coastal aquifers, PhD thesis, University of Queensland, Brisbane, Australia.
- 22- Fetter, C.W., 2001. *Applied Hydrogeology*. 4th edition, Prentice Hall Inc., New Jersey, 598 pp.
- 23- Johnson, A.I., 1966. *Compilation of specific yields for various materials*. U.S. Geological Survey Open-File Report, Albuquerque, 119 pp.
- 24- Jakovovic, D., Werner, A.D., Simmons, C.T., 2011. Numerical modeling of saltwater up-coning: Comparison with experimental laboratory observations. *Journal of Hydrology*, 402, 261-273.
- seawater intrusion in coastal aquifers. *Water Resources Research*, 47(5).
- 10- Ataie-Astiani, B., Hosseinabadi, H.R., Fatemi, E., 2006. Numerical model of transport and contaminant discharge from coastal aquifers into seaward, *Iran-Water Resources Research*, 2(1). 1-17. (In Persian)
- 11- Dagan, G., Zeitoun, D.G., 1998. Seawater-freshwater interface in a stratified aquifer of random permeability distribution. *Journal of Contaminant Hydrology*, 29, 185-203.
- 12- Bakker, M., 2006. Analytic solutions for interface flow in combined confined and semiconfined, coastal aquifers, *Advances in Water Resources*, 29(3), 417-425.
- 13- Fitts, C.R., Godwin, J., Feiner, K., McLane, C., Mullendore, S., 2015. Analytic element modeling of steady interface flow in multilayer aquifers using AnAqSim, *Groundwater*, 53 (3).
- 14- Essaid, H.I., 1990. A multilayered sharp-interface model of coupled freshwater and saltwater flow in coastal systems: model development and application. *Water Resources Research*, 16(7), 1431-1454.
- 15- Huyakorn, P.S., Wu, Y.S., Park, N.S., 1996. Multiphase approach to the numerical solution of a sharp-interface saltwater intrusion problem. *Water Resource Research*, 32(1), 93-102.
- 16- Bakker, M., Schaars, F., Hughes, J.D., Langevin, C.D., and Dausman, A.M., 2013. Documentation of the seawater intrusion (SWI2) package for MODFLOW. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Book 6, Chap. A46, 47 pp.

- 29- Voss, C.I., Souza, W.R., 1987. Variable density flow and solute transport simulation of regional aquifers containing a narrow freshwater-seawater mixing zone. *Water Resources Research*, 23, 1851-1866.
- 30- Post, V.E.A., Vandenbohede, A., Werner, A.D., Maimun, Teubner, M.D., 2013. Groundwater ages in coastal aquifers, *Advances in Water Resources*, 57, 1-11.
- 25- Dose, E.J., Stoeckl, L., Houben, G.J., Vacher, H.L., Vassolo, S., Dietrich, J., Himmelsbach, T., 2014. Experiments and modeling of freshwater lenses in layered aquifers: Steady state interface geometry, *Journal of Hydrology*, 509, 621-630.
- 26- Bear, J., Dagan, G., 1964. Moving interface in coastal aquifers. *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 90 (HY4), 193-215.
- 27- Mualem, Y., Bear, J., 1974. The shape of the interface in steady flow in a stratified aquifer. *Water Resources Research*, 10(6), 1207-1215.
- 28- Goswami, R.R., Clement, T.P., 2007. Laboratory-scale investigation of saltwater intrusion dynamics. *Water Resources Research*, 43, W04418,