

## بررسی آزمایشگاهی و عددی نفوذ شوری در آبخوان‌های آزاد ساحلی

سیدسجاد مهدی‌زاده محلی<sup>۱\*</sup>، فریدون وفایی<sup>۲</sup>

۱- عضو هیات علمی گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکز، تهران، پست الکترونیکی: [saj.mehdizadeh@iauctb.ac.ir](mailto:saj.mehdizadeh@iauctb.ac.ir)

۲- دانشیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، پست الکترونیکی: [fvafai@kntu.ac.ir](mailto:fvafai@kntu.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۲/۲۶

\* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۰/۴

© نشریه علمی - پژوهشی اقیانوس‌شناسی ۱۳۹۵، تمامی حقوق این اثر متعلق به نشریه اقیانوس‌شناسی است.

### چکیده

این مقاله به بررسی آزمایشگاهی و عددی نحوه نفوذ شوری در یک آبخوان آزاد ساحلی در مقیاس آزمایشگاهی و در دو حالت دائمی و غیردائمی پرداخته است. از مدل عددی SEAWAT به منظور شبیه‌سازی نتایج آزمایشگاهی استفاده گردید و توانایی این مدل در پیش‌بینی میزان شوری مورد ارزیابی قرار گرفت. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی نشان می‌دهد که اگرچه مدل عددی زبانه شوری را اندکی بیشتر از میزان نفوذ در آزمایشگاه نشان می‌دهد، اما می‌توان گفت که مدل عددی با دقت مناسبی قادر به شبیه‌سازی شرایط آزمایشگاهی است. همچنین مقایسه نتایج نشان می‌دهد که مدت زمان رسیدن به حالت دائمی در شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی تقریباً برابر بوده است. به منظور مقایسه ضخامت ناحیه انتقالی در مدل و آزمایشگاه، خطوط هم غلظت ۵٪ و ۹۵٪ نیز در مدل عددی به دست آمد. نتایج حاکی از ضخیم‌تر بودن ناحیه انتقالی در مدل عددی نسبت به نتایج آزمایشگاهی بوده که با واسنجی پارامتر پراکنندگی هیدرودینامیکی در مدل، این اختلاف کاهش یافته است. در پایان، با ترسیم خطوط جریان، نحوه حرکت جریان‌های آب شور و شیرین در داخل آبخوان، وضعیت جریان در نزدیکی گوه شوری و همچنین نحوه خروج آن‌ها از محیط نشان داده شده است.

کلمات کلیدی: نفوذ شوری، آبخوان ساحلی، فلوم ماسه، آب شیرین، مدل SEAWAT

### ۱. مقدمه

شایع‌ترین و شاید مهم‌ترین فرآیندهای است که سبب کاهش کیفیت آب زیرزمینی گردیده و برداشت آب از چاه‌ها را در آینده به خطر خواهد انداخت. منابع این شوری شامل نفوذ هرزآب‌های شور، آب‌های برگشتی از کشاورزی، تبخیر و نفوذ آب دریا است.

در آبخوان‌های ساحلی، به طور معمول گرادیان هیدرولیکی به طرف دریا وجود دارد که سبب جریان یافتن آب‌های اضافی به

سواحل در مقایسه با سایر زیستگاه‌های انسانی، بیشتر از ۶۰ درصد جمعیت جهان و دو سوم کلان‌شهرها را در خود جای داده‌اند (حسینی و چگینی، ۱۳۹۳). این مناطق با مشکلات هیدرولوژیکی جدی شامل کمبود آب شیرین، آلودگی آب‌های زیرزمینی و نفوذ آب دریا روبرو شده‌اند. نفوذ آب شور یکی از

موقعیت فصل مشترک آب شور و شیرین و پیش‌بینی تغییرات سطح آب و غلظت نمک در شرایط مختلف انجام شده‌است. میزان برداشت آب از چاه، تغییر اقلیم و تاثیر افزایش تراز آب دریا، میزان تاثیرپذیری نفوذ شوری از نوسانات جزر و مدی و یا موج‌ها از جمله این شرایط بوده است.

از میان تحقیقات آزمایشگاهی صورت پذیرفته در دهه گذشته می‌توان به بررسی آزمایشگاهی نحوه انتشار آلاینده با چگالی‌های مختلف به داخل یک آبخوان آزاد ساحلی (Zhang et al., 2002)، بررسی آزمایشگاهی میزان تبادل و همچنین نحوه اختلاط آب شور و شیرین تحت تاثیر جزر و مد (Robinson et al., 2004)، تشکیل گوه نمکی در یک محیط متخلخل از جنس شیشه‌های کروی شکل (Goswami and Clement, 2007)، بررسی نحوه کنترل نفوذ شوری به یک آبخوان ساحلی با استفاده از ساخت یک حائل در داخل یک آبخوان در مقیاس آزمایشگاهی (Luyun Jr et al., 2009)، بررسی بالا آمدگی مخروطی شکل شوری در زیر چاه (Werner et al., 2009) و تخمین میزان شوری در مجموعه چاه‌های پمپاژ (Shi et al., 2011) اشاره نمود. مدل‌های ریاضی نیز به ما در درک بهتر مکانیسم نفوذ کمک خواهند کرد. علاوه بر روابط تحلیلی، که با انجام فرضیات ساده‌سازی استخراج شده‌اند، مدل‌های دیگر ریاضی با فرض عدم وجود یا وجود ناحیه انتقالی (نازک یا ضخیم بودن ناحیه انتقالی در مقایسه با وسعت منطقه نفوذ) در دو دیدگاه مجزا قرار خواهند گرفت. در دیدگاه اول فرض می‌گردد که یک خط مشخص، مرز بین آب شور و شیرین بوده و معادله غیرخطی جریان آب شور و شیرین مجزا ولی همزمان جداسازی و حل می‌گردد. در رویکرد دوم که یک حل جامع و معتبرتر اما پیچیده‌تر است، معادله پخش و انتقال نمک به عنوان یک آلاینده با معادله جریان ترکیب شده و میزان پیشروی شوری و توزیع غلظت آن ناشی از اختلاف چگالی به-دست خواهد آمد. تمرکز شبیه‌سازی‌های عددی در دهه اخیر با توجه به میزان دقت و توانایی بر رویکرد دوم استوار بوده است. شبیه‌سازی تاثیر جزر و مد بر میزان شوری توسط Ataie-Ashtiani و همکاران (۱۹۹۹، ۲۰۰۱)، شبیه‌سازی تاثیر احداث سد زیرزمینی در کنترل نفوذ شوری به یک آبخوان ساحلی توسط Hamidi و Sabbagh-Yazdi (۲۰۰۶)، نمونه‌ای از بررسی نفوذ شوری با استفاده از این رویکرد است. همچنین برای تحقیقات میدانی نفوذ شوری به آبخوان‌های ساحلی در کشور ما می‌توان به شبیه‌سازی‌های عددی ارائه شده توسط عطایی-آشتیانی و

سمت دریا می‌گردد. بنابراین، تحت شرایط طبیعی در آبخوان‌های ساحلی، آب شیرین به دریا می‌ریزد. اما با برداشت بی‌رویه از آبخوان‌ها، سفره آب زیرزمینی یا سطح پیزومتری پائین خواهد افتاد. نظر به وجود آب دریا در مجاورت آبخوان‌های ساحلی، ناحیه برخورد بین آب شیرین با چگالی کمتر و آب شور با چگالی بیشتر سبب تشکیل یک ناحیه انتقالی گردیده که پراکندگی هیدرودینامیکی<sup>۱</sup> دلیل تشکیل آن است (Todd and Mays, 2005). افتادگی هد پیزومتری در آب شیرین، سبب رشد ناحیه انتقالی به طرف آبخوان تا رسیدن به یک تعادل جدید می‌گردد، که این پدیده نفوذ آب دریا نامیده می‌شود. همان‌طور که ناحیه انتقالی به سمت آبخوان حرکت می‌نماید، عرض آن نیز بیشتر شده و زمانی‌که این منطقه انتقالی به محل احداث چاه برسد، سبب برداشت آب شور از چاه می‌گردد. در نتیجه کارایی چاه از بین رفته و این امر رها کردن چاه را به دنبال خواهد داشت (Abd-Elhamid and Javadi, 2011).

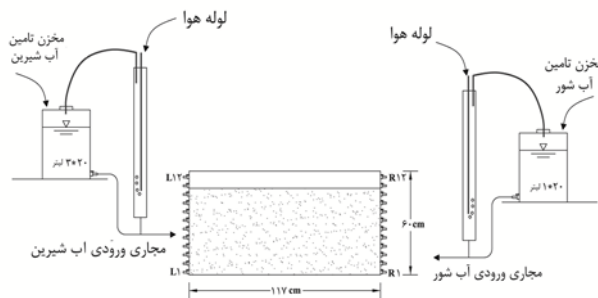
پدیده نفوذ شوری در آبخوان‌های ساحلی اولین بار توسط Ghyben (1889) در زمان برداشت آب از منبع آب زیرزمینی در آمستردام مشاهده گردید. چندین سال بعد Herzberg (1901) نیز در جزایر آلمانی دریای شمال به تشریح این پدیده پرداخت و این دو نفر به طور مستقل از هم به بیان معادله‌ای بر پایه تعادل استاتیکی بین آب شور و شیرین به شرح زیر پرداختند که بعدها به معادله Ghyben-Herzberg مشهور گردید (Feseker, 2007) (رابطه ۱).

$$h_s = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f \quad (1)$$

که در آن  $h_s$  عمق نفوذ شوری از سطح آزاد دریا،  $\rho_s$  و  $\rho_f$  به ترتیب چگالی آب دریا و آب شیرین و  $h_f$  تراز سطح آب زیرزمینی نسبت به سطح آزاد دریا است. همان‌طور که از رابطه ۱ مشخص است، تفاوت در چگالی‌ها به عنوان عامل نفوذ شوری نشان داده شده است. از آن زمان به بعد و در دهه‌های گذشته مطالعات در این زمینه با سرعت بیشتری پیشرفت نمود و ارزیابی میزان پیشروی شوری در نقاط مختلف جهان انجام پذیرفت. در دهه اخیر، تحقیق در مساله نفوذ شوری در آبخوان‌ها به سه روش تحقیقات آزمایشگاهی، میدانی و مدل‌های عددی-تحلیلی یا ترکیبی از آنها انجام پذیرفته است. این تحقیقات با هدف تعیین

<sup>1</sup> Hydrodynamic dispersivity

مشابه آزمایش‌های Werner و همکاران (۲۰۰۹)، از سه مخزن ماریوت با ظرفیت ۲۰ لیتر (مجموع ۶۰ لیتر) جهت تامین آب شیرین و یک مخزن ۲۰ لیتری ماریوت جهت تزریق آب شور به فلوم استفاده شده است. عملکرد مخزن ماریوت براساس اختلاف هد ثابت استوار بوده (Klute and Dirksen, 1986) و با اتصال آن به لوله‌های ورودی جریان، تا اتمام آزمایش‌ها همواره می‌تواند هد هیدرولیکی را در دو طرف فلوم ثابت نگه دارد. تمامی این مخازن روی پایه‌های چوبی در ارتفاع قرار داده شده‌اند و با لوله‌های پلاستیکی با قطر ۱۰ میلی‌متر به همدیگر و به شیرهای ورودی متصل شده‌اند. به جهت ضرورت وجود فشار هوای یکسان در مخازن ماریوت مرتبط با یکدیگر، سه مخزن ماریوت در سمت آب شیرین از بالا توسط یک لوله نازک نیز به هم اتصال دارند. این اتصال سبب حذف تفاوت‌های احتمالی هد ثابت مورد نیاز در هر مخزن خواهد شد. شروع عملکرد مخازن ماریوت زمانی صورت می‌گیرد که از لوله هوای داخل مخازن حباب‌های هوا خارج گردد. در این صورت می‌توان هد فشار در انتهای این لوله‌ها را صفر لحاظ نمود و اختلاف هد مناسب در دو طرف فلوم ایجاد کرد (شکل ۱).



شکل ۱: فلوم ماسه و اجزای وابسته به آن در آزمایشگاه

ماسه استفاده شده در این تحقیق یک ماسه تقریباً یکنواخت محلی (16-30 grade sand, Sloan Sands P/L, Dry Creek, South Australia) بوده که به طور یکنواخت و به ارتفاع تقریبی ۵۲ سانتی‌متر در داخل فلوم قرار گرفته است. برای دستیابی به یک توزیع یکنواخت ماسه در داخل فلوم، خروج حباب‌های هوای موجود در فضاهای خالی ماسه و همچنین کمترین میزان نشست ماسه در خلال انجام آزمایش‌ها از روشی به شرح زیر استفاده شده است. ماسه مورد نظر در ضخامت‌های ۲ تا ۳ سانتی‌متر به داخل فلوم در حالی ریخته شده که در آبی به ضخامت حدود ۵ سانتی‌متر غرقاب شده‌اند، در ادامه با کوبیدن لایه‌های ماسه توسط

همکاران (۱۳۸۵)؛ فاطمی و عطایی - آشتیانی (۱۳۸۷) در سواحل شمال کشور اشاره نمود.

مروری بر مطالعات گذشته نشان می‌دهد که مطالعات آزمایشگاهی معتبر برای جریان‌های دایمی و مخصوصاً غیردایمی کمتر انجام شده و نحوه حرکت جریان‌های شور و شیرین و تخلیه آنها از آبخوان نشان داده نشده است. بنابراین در این تحقیق سعی شده تا در یک شرایط کنترل شده آزمایشگاهی، نحوه پیشروی شوری در آبخوان آزاد ساحلی در دو حالت دایمی و غیردایمی با تصویربرداری ثبت و سپس پردازش گردد. در ادامه با استفاده از نرم‌افزار SEAWAT که یک مدل ریاضی با حل همزمان معادلات جریان سیال و معادلات انتقال آلاینده در محیط‌های متخلخل اشباع می‌باشد، شبیه‌سازی عددی این پدیده صورت پذیرفته و نتایج آن با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است. در انتها نیز با توجه به هد جریان استخراج شده از شبیه‌سازی عددی، نحوه توزیع سرعت و حرکت جریان‌های آب شور و شیرین نشان داده شده است.

## ۲. موارد و روش‌ها

### ۲-۱ روش انجام آزمایش‌ها

آزمایشات در یک فلوم ماسه با ابعاد داخلی ۱۱۷ سانتیمتر طول، ۶۰ سانتی‌متر ارتفاع و ۵/۲ سانتی‌متر عرض بر پایه آزمایش‌های دو بعدی انجام شده است. صفحه جلو و عقب این فلوم از شیشه شفاف با ضخامت ۱۰ میلی‌متر ساخته شده تا امکان تصویر برداری فراهم گردد. همچنین دیواره‌های جانبی این فلوم از ورقه‌های فلزی به ضخامت ۱۰ میلی‌متر تشکیل شده است. به جهت استحکام بخشی کل فلوم و تحمل وزن ماسه اشباع در خلال آزمایش‌ها، 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. نمای کلی فلوم بکار رفته و مخازن تامین آب شور و شیرین در شکل ۱ نشان داده شده است.

آزمایشات دایمی اندازه‌گیری شده و سپس با تغییر هد جریان در سمت آب شیرین، آزمایش‌های غیردایمی آغاز می‌گردد.

## ۲-۲ تعیین پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی عددی

تعیین هدایت هیدرولیکی ( $K$ ) ماسه مورد آزمایش از دو طریق به‌دست آمده است. در روش اول منحنی دانه بندی ذرات ماسه به‌دست آمده و سپس از رابطه تجربی و متداول کوزنی-کارمن (Kozeny- Carman) استفاده شده است. در روش دوم نیز از تست ستون و قانون دارسی بهره گرفته شده است. منحنی دانه بندی ذرات، اندازه قطرهای  $d_{10}$ ،  $d_{50}$  و  $d_{60}$  را به ترتیب ۰/۵۷، ۰/۶۴ و ۰/۷۸ نشان می‌دهد که منجر به ضریب یکنواختی  $(d_{60}/d_{10})$  ۱/۴۷ خواهد شد.

تعیین تخلخل ( $n$ ) نیز از روش اشباع آب به‌دست آمده (Fetter, 2001) و به جهت اطمینان با رابطه تجربی ارائه شده توسط

Vukovic و Soro (۱۹۹۲) مقایسه شده است. این ضریب برای ماسه مورد استفاده ۰/۴۱ لحاظ شده است. با جایگذاری مقدار تخلخل در رابطه کوزنی-کارمن میزان هدایت هیدرولیکی  $cm/min$  ۲۱/۴۰ به‌دست می‌آید. تست دارسی نیز در یک استوانه از جنس پلکسی گلاس با ارتفاع ۳۷ سانتی‌متر و قطر ۵ سانتی‌متر انجام شده است. این آزمایش چندین مرتبه تکرار شده و مقادیر متوسط هدایت هیدرولیکی از این روش،  $cm/min$  ۱۸/۷ به‌دست آمده است. از آنجایی که نحوه و میزان تراکم تاثیر زیادی بر اندازه هدایت هیدرولیکی خواهد گذاشت، سعی شده که تراکم ماسه در این استوانه حتی‌الامکان مشابه تراکم ایجاد شده در فلوم ماسه باشد. از آنجایی که تاثیر آبدی ویژه در آبخوان‌های آزاد بسیار بیشتر از ضریب ذخیره ویژه ( $S_s$ ) است، از روش اشباع-زهکشی ارائه شده توسط Johnson (1996) برای محاسبه آبدی ویژه ( $S_y$ ) استفاده شده است. بدین منظور از یک استوانه مشابه بهره گرفته شده و ماسه به صورت اشباع در آن قرار داده شد، سپس به ذرات ماسه اجازه داده شد که از استوانه به صورت ثقلی زهکشی گردد. حجم آب خارج شده اندازه‌گیری شده و آبدی ویژه ۰/۳۳ به‌دست آمده است. برای تعیین پراکندگی هیدرودینامیکی طولی ( $\alpha_L$ ) که در پخش نمک در داخل ماسه موثر بوده، از همان استوانه دارسی استفاده شده است و با تزریق آب شور با غلظت مشخص از یک سمت و اندازه‌گیری غلظت با زمان در خروجی، منحنی  $C/C_0$

یک وسیله مسطح سعی بر ایجاد یک تراکم یکنواخت گردید. زهکشی آب وارد شده به ماسه کوبیده شده و غرقاب نمودن مجدد آن به ما در ایجاد یک لایه متراکم و یکنواخت و کاملاً اشباع ماسه و با کمترین تله‌اندازی هوا کمک نمود. لایه‌های بعدی به همین صورت تا رسیدن به ارتفاع مورد نظر روی لایه‌های زیرین قرار گرفته‌اند.

تولید محلول آب شور با حل نمودن ۳۵ گرم کلرید کلسیم دی‌هیدرات ( $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ ) در یک لیتر آب شرب معمولی به‌دست آمده است. از رودامین نوع WT (Fluorescent FWT Red dye, ENVCO, Australia) به عنوان ردیاب رنگی به جهت تصویربرداری از نفوذ آب شور و تمایز آن با آب شیرین استفاده شده است. رودامین با غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به محلول آب شور اضافه شده و با همزدن توزیع یکنواخت محلول رودامین-نمک به‌دست آمده است. در انتخاب ماده رنگی سعی گردید که سه خصوصیت دارا بودن چگالی تقریباً مشابه با آب شور، قابلیت انحلال مناسب در آب و عدم چسبیدگی به ذرات ماسه حتی‌الامکان در نظر گرفته شود. ماده رنگی رودامین در آزمایش‌های محققین گذشته با موفقیت بکار گرفته شده (Simmons et al., 2002; Werner et al., 2009; Shi et al., 2011)، هر چند که میزان اندک چسبندگی آن به ذرات ماسه نیز گزارش شده است (Jakovic et al., 2012).

مطابق شکل ۱ آب شیرین از طریق پورت‌های شماره L2 تا L10 و آب شور از طریق پورت‌های R2 تا R7 وارد فلوم خواهند شد. مخلوط آب شور و شیرین نیز از شیرهای R8، R9 و R10 از سیستم خارج می‌گردد. دو مانومتر نیز در پورت‌های R1 و L1 به فلوم متصل شده تا هد فشار اندازه‌گیری شود. قبل از شروع هر آزمایش، فلوم ابتدا با آب شیرین کاملاً اشباع می‌گردد، در حالیکه تمامی پورت‌های آب شور بسته هستند، سپس با باز نمودن مجاری آب شور و تنظیم ارتفاع مخازن در دو طرف، اختلاف هد ثابتی با هدف ایجاد گرادیان هیدرولیکی به سمت دریا ایجاد می‌گردد. آزمایش‌ها توسط یک دوربین که در فاصله ثابتی در جلوی فلوم نصب شده است در فاصله زمانی معین با وضوح مناسب تصویربرداری می‌شود. نور محیط انجام آزمایش‌ها نیز باید به گونه‌ای تنظیم گردد تا حتی‌الامکان مانع انعکاس اجسام در داخل تصویر شود. آزمایش‌ها زمانی حالت دایمی تلقی می‌گردد که موقعیت پنجه شوری در دو عکس متوالی (با فاصله زمانی ۱۵ دقیقه) ثابت بماند. دبی مخلوط آب شیرین و شور در انتهای

جدول ۱: پارامترها و تنظیمات وارد شده به نرم افزار SEAWAT

پارامتر	مقدار	واحد
هدایت هیدرولیکی ( $K$ )	۱۸/۷	cm/min
تخلخل ( $n$ )	۰/۴۱۲	-----
چگالی آب شیرین ( $\rho_f$ )	۱۰۰۰/۱۶	kg/m <sup>3</sup>
چگالی آب شور ( $\rho_s$ )	۱۰۲۴/۲۰	kg/m <sup>3</sup>
غلظت اولیه آب شور ( $C_0$ )	۳۳/۶۵	kg/m <sup>3</sup> ( $\partial\rho/\partial c = 0.7143$ )
پراکنندگی طولی هیدرودینامیکی ( $\alpha_L$ )	۰/۴۰	cm
پراکنندگی عرضی و قائم هیدرودینامیکی ( $\alpha_V, \alpha_T$ )	۰/۰۲	cm
ضریب پخش مولکولی ( $D_m$ )	۶×۱۰ <sup>-۴</sup>	cm <sup>2</sup> /min
ذخیره ویژه ( $S_s$ )	۰/۰۰۱	l/cm
آبدهی ویژه ( $S_y$ )	۰/۳۳	-----
معیار همگرایی هد جریان	۱۰ <sup>-۴</sup>	cm
معیار همگرایی غلظت	۱۰ <sup>-۴</sup>	kg/m <sup>3</sup>

در تمامی شبیه سازی های انجام شده گام زمانی برای حل جریان ۱ دقیقه و برای حل انتقال ۰/۰۱ دقیقه با ضریب افزایش ۱/۱ لحاظ شده است. انتخاب ابعاد شبکه حل به دلیل موثر بودن در دقت شبیه سازی و ضخامت ناحیه انتقالی نیاز به دقت دارد (Goswami and Clement, 2007). یکی از معیارهای بیان شده در مطالعات گذشته در انتخاب ابعاد مناسب، عدد پکلت به شرح زیر است (Lu et al., 2013):

$$Pe = \frac{V\Delta L}{D_m + \alpha_L V} \approx \frac{\Delta L}{\alpha_L} \leq 4 \quad (2)$$

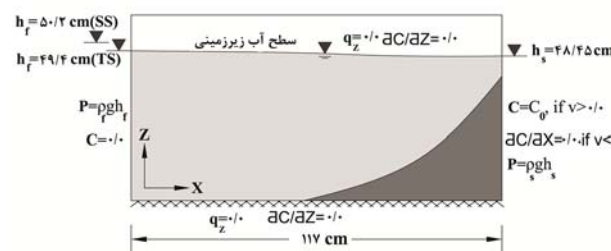
که در آن  $Pe$  عدد پکلت،  $V$  سرعت و  $\Delta L$  اندازه شبکه است. در این تحقیق با در نظر گرفتن معیار فوق از شبکه یکنواخت مستطیلی ۰/۵ سانتی متر × ۰/۵ سانتی متر ( $\Delta x = \Delta z$ ) استفاده شده است.

انجام شبیه سازی در سه مرحله زمانی انجام پذیرفت. دوره زمانی اول با زمان کل ۴۰۰ دقیقه با هدف شبیه سازی جریان دائمی تعریف گردید. شرایط مرزی هد ثابت به مرزها اعمال گردیده و مقادیر این هدهای ثابت با توجه به قرائت مانومترها ۵۰/۲ سانتی متر برای آب شیرین و ۴۸/۴۵ سانتی متر برای آب شور تنظیم شده است. در مرحله زمانی دوم هد آب شیرین در کمتر از یک دقیقه به میزان ۴۹/۴ کاهش پیدا می کند (در حالیکه هد آب شور ثابت می باشد) و در نهایت در مرحله زمانی سوم با هدف شبیه سازی جریان غیر دائمی در مدت زمانی ۴۰۰ دقیقه مدل اجرا خواهد گشت. قابل توجه است که به علت توالی مراحل زمانی تعریف شده، توزیع هد و غلظت در انتهای مرحله زمانی اول به عنوان شرایط اولیه به مراحل بعدی انتقال می یابد.

نسبت به زمان رسم شده است، سپس از رابطه یک بعدی Ogata و Bank (۱۹۶۱) استفاده شده و منحنی ذکر شده با منحنی ناشی از این رابطه مورد ارزیابی قرار گرفت و سعی شد تا با تغییر  $\alpha_L$  هم پوشانی مناسبی بین این دو منحنی برقرار گردد. مقدار  $\alpha_L$  ناشی از این آزمایش برابر با ۴ میلی متر به دست آمده است. میزان غلظت اولیه آب شور توسط یک EC متر به دست آمده و چگالی آب شور و شیرین نیز توسط پیکنومتر محاسبه شده است.

### ۳-۲ شبیه سازی عددی

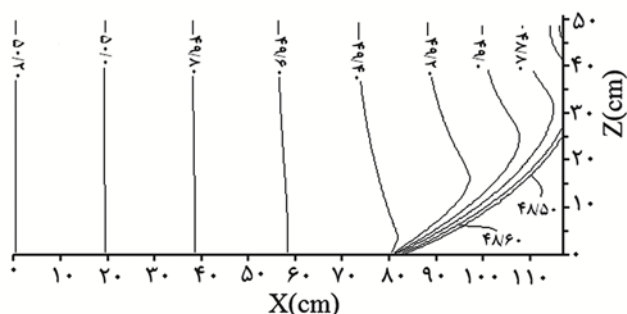
در مدل های ریاضی که وابسته به چگالی هستند، آب شیرین و آب شور در یک تعادل دینامیکی که از پخش و انتقال آلاینده در آبخوان نتیجه می شود، فرض می گردد. دو معادله جریان سیال و انتقال-پخش آلاینده به طور همزمان اما وابسته به هم حل شده و نتیجه شبیه سازی به صورت توزیع غلظت و هد با زمان حاصل می گردد. جزئیات معادلات بیان شده و نحوه گسسته سازی و حل در بسیاری از مراجع بیان شده و در اینجا از تکرار آن خودداری می گردد. در تحقیق حاضر از مدل عددی SEAWAT (version 4, ) (pm 8.0.21) که ترکیب دو نرم افزار MODFLOW (حل جریان) و MT3DMS (حل انتقال و پخش آلاینده) است، استفاده شده و نتایج حاصل از آن با داده های آزمایشگاهی مقایسه شده است. این مدل در تحقیقات گذشته استفاده شده (Werner et al., 2012) و همچنین توضیحات مربوط به نحوه استفاده از این کد عددی توسط Guo و Langevin (۲۰۰۲) بیان شده است. در این مدل از حل کننده PCG2 در حل جریان و برای انتقال از روش حل 3rd-order TVD استفاده شده است. سایر تنظیمات شبیه سازی، در شکل ۲ نمایش داده شده است. در این شکل  $P$  فشار و  $q$  دبی وارد یا خارج شده از آبخوان است. سایر پارامترهای ورودی به مدل در جدول ۱ بیان گردیده است.



شکل ۲: شرایط مرزی و اولیه در شبیه سازی عددی (SS به حالت دائمی و TS به حالت غیردائمی اشاره دارد).

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳-۱ جریان دایمی



شکل ۴: توزیع هد هیدرولیکی جریان پس از رسیدن به جریان دایمی و پایدار (SS). تراز کف کانال به عنوان تراز مبدا لحاظ شده است.

#### ۳-۲ جریان غیردایمی

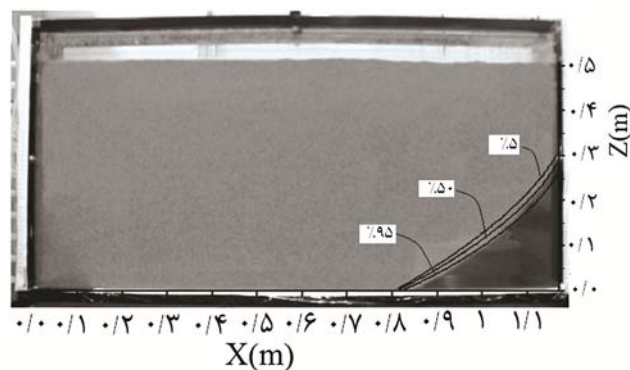
با اتمام آزمایش دایمی، همانطور که بیان گردید، هد مرز آب شیرین به عدد  $49/4$  سانتی‌متر کاهش داده می‌شود. فاصله زمانی بین عکس‌ها نیز به  $5$  دقیقه تقلیل یافته و نفوذ بیشتر شوری انجام شده به سبب این کاهش گرادیان هیدرولیکی ( $0/08 = 117 \div 49/4 - 48/45$ ) تصویربرداری و پردازش می‌گردد. مدت زمانیکه گوه شوری مجدداً به حالت دایمی خواهد رسید  $135$  دقیقه در آزمایش به دست آمده که همخوانی مناسبی با اتمام شبیه‌سازی عددی دارد. مقایسه تصاویر آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی در شکل ۵، حاکی از تطابق مناسب بین نتایج است. هر چند که مشابه حالت دایمی، شبیه‌سازی عددی، میزان نفوذ شوری را بیشتر نشان می‌دهد اما در محل پنجه گوه شوری، این اختلاف کاهش یافته است. میزان پیشروی پنجه شوری در پایان این مرحله و رسیدن به حالت دایمی جدید در آزمایش  $53/5$  سانتی‌متر و در شبیه‌سازی عددی  $52/5$  سانتی‌متر (خط هم‌غلظت  $50\%$ ) از مرز خشکی فاصله داشته است. اما همانطور که در شکل ۵ مشخص است بیشترین اختلاف در اواسط مرز بین آب شور و شیرین مشاهده می‌گردد.

#### ۳-۳ توزیع سرعت جریان

به منظور مشاهده نحوه حرکت جریان در داخل فلوم ماسه، سرعت جریان محاسبه و خط جریان ترسیم گردید. محاسبه مولفه‌های طولی و قائم سرعت از توزیع هد جریان و مطابق روابط زیر انجام شده است (Bear, 1979):

$$U = (u, v) \rightarrow u = -K_x \frac{\partial h}{\partial x} = -K_x \frac{(h_{i+1,j} - h_{i,j})}{\Delta x} \quad (3)$$

موقعیت پنجه شوری در آزمایش پس از گذشت  $240$  دقیقه به حالت ثابت رسیده و می‌توان آزمایش را دایمی لحاظ نمود. شبیه‌سازی عددی نیز زمان مشابه‌ای را نشان می‌دهد. مقایسه میزان پیشروی شوری حاصل از آزمایش و شبیه‌سازی صورت پذیرفته در شکل ۳ نشان داده شده است. از آنجاییکه در شبیه‌سازی عددی ناحیه انتقالی ( $0 < C < C_0$ ) نیز تشکیل می‌گردد، از سه خط هم‌غلظت  $5\%$ ،  $50\%$  و  $95\%$  به منظور مقایسه استفاده شده است. همپوشانی نتایج نشان می‌دهد که کد عددی با دقت مناسبی قادر به پیش‌بینی میزان شوری است. همان‌طور که شکل ۳ نشان می‌دهد، پنجه گوه نمکی در آزمایش دایمی در فاصله  $85$  سانتی‌متری از مرز خشکی قرار دارد ( $32$  سانتی‌متر طول پیشروی) و در قیاس با خط هم‌غلظت  $50\%$  که در  $81/5$  سانتی‌متری از مرز خشکی قرار گرفته ( $35/5$  سانتی‌متر پیشروی)، اختلاف  $11\%$  درصدی را نشان می‌دهد.



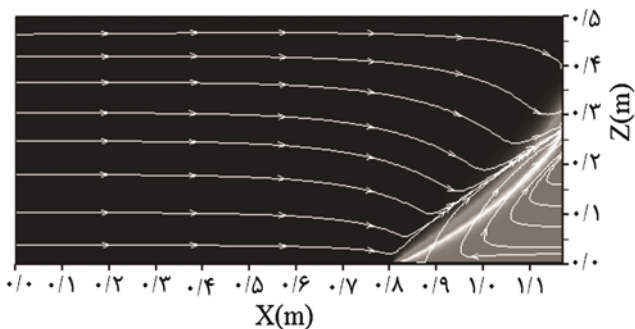
شکل ۳: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی برای جریان دایمی و پایدار (SS)

توزیع هد جریان حاصل از شبیه‌سازی عددی و در حالت دایمی نیز در شکل ۴ نمایش داده شده است. با توجه به گرادیان هیدرولیکی  $(\partial h / \partial x)$  اعمال شده به مدل ( $115 = 117 \div 48/45 - 48/2$ )، مشاهده می‌گردد که توزیع هد نیز از شکل گوه پیشروی تبعیت می‌نماید. در نزدیکی مرز آب شیرین میزان هد جریان در ارتفاع تقریباً برابر بوده و با نزدیک شدن به سمت گوه شوری از میزان آن کاسته شده و توزیع ارتفاعی آن نیز متفاوت خواهد بود.

از آنجا که خط جریان بر بردار سرعت مماس است، می‌توان تابع جریان ( $\psi$ ) را مطابق رابطه ۵ محاسبه و رسم نمود.

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial z}, v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (5)$$

شکل ۶ خط جریان در انتهای حالت دائمی را در داخل فلوم ماسه نمایش می‌دهد. همانطور که مشخص می‌باشد، جریان آب شور و شیرین از مرزها حرکتی مستقیم داشته تا به یکدیگر نزدیک گردند. در نزدیکی مرز تقابل، هر دو خط جریان تغییر جهت داده و به سمت خروجی حرکت خواهند کرد. میزان دبی خروجی نیز در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده و با دبی به دست آمده از رابطه داری در مدل عددی مقایسه شده است. متوسط این دبی در آزمایش دائمی،  $1/51$  میلی‌لیتر در ثانیه به دست آمده که مقایسه آن با دبی مدل عددی،  $1/43 \text{ ml/s}$ ، نشان از دقت مناسب شبیه‌سازی دارد.

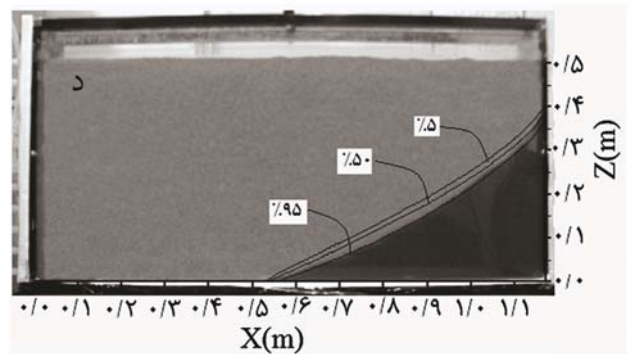
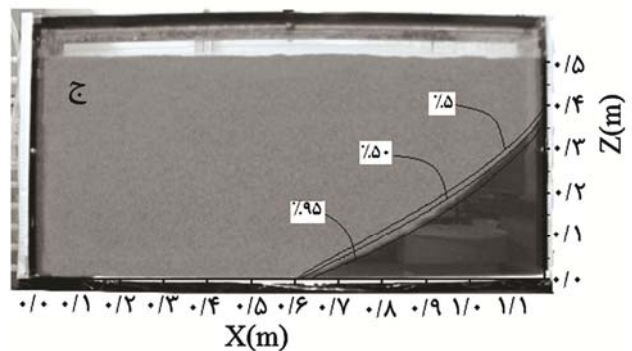
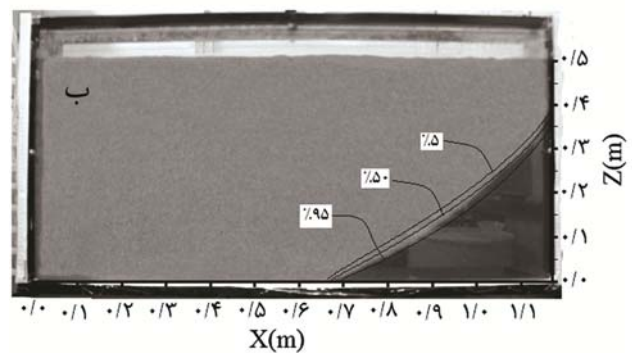
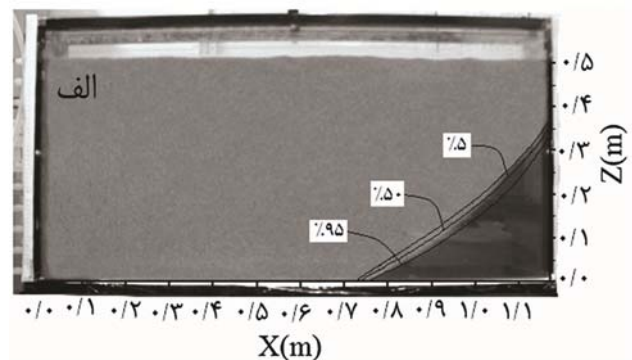


شکل ۶: نحوه حرکت آب شور و شیرین در داخل آبخوان آزمایشگاهی در انتهای حالت دائمی (SS)

### ۴-۳ ناحیه انتقالی

از آنجایی که در آبخوان‌های واقعی ضخامت ناحیه انتقالی تا چندین صد متر نیز مشاهده شده است (Lu et al., 2013)، توانایی مدل عددی در پیش‌بینی صحیح این ضخامت اهمیت خواهد داشت. ضخامت ناحیه انتقالی تابع میزان پخش‌شدگی طولی و ارتفاعی شوری بوده و علاوه بر مقادیر پراکندگی‌های طولی و ارتفاعی، ضریب پخش مولکولی و الگوریتم حل آن نیز مهم هستند. در این تحقیق، کالیبراسیون ضرایب پراکندگی طولی و ارتفاعی، با توجه به مقدار پراکندگی هیدرودینامیکی به دست آمده از آزمایش‌ها انجام شده و در نهایت، پراکندگی عرضی  $0/05$

$$U = (u, v) \rightarrow v = -K_z \frac{\partial h}{\partial z} = -K_z \frac{(h_{i,j+1} - h_{i,j})}{\Delta z} \quad (4)$$



شکل ۷: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی برای جریان غیر دائمی (TS) (الف) دقیقه  $t=30$  (ب) دقیقه  $t=60$  (ج) دقیقه  $t=90$  و (د) دقیقه  $t=135$

و یا پمپاژ از آن نیز در میزان پیشروی شوری در آبخوان‌ها تاثیرگذار است، بدیهی است که نتایج شبیه‌سازی عددی باید برای این شرایط واقعی و پیچیده‌تر نیز مورد ارزیابی قرار گیرد.

#### ۵. سپاسگزاری

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

#### منابع

حسینی، س.ط.؛ چگینی، و.، ۱۳۹۳. مطالعه تغییرات فصلی پارامترهای فیزیکوشیمیایی آب دریا در محدوده آب‌های ساحلی شبه‌جزیره بوشهر، نشریه اقیانوس‌شناسی، سال پنجم، ۱۷: ۱۲۵-۱۴۴.  
عطایی-آشتیانی، ب.؛ حسین‌آبادی، ح.ر.؛ فاطمی، س.ا.، ۱۳۸۵. مدل عددی انتقال و تخلیه آلاینده‌ها از آبخوان ساحلی به دریا، مجله تحقیقات منابع آب ایران، سال دوم، ۱: ۱-۱۷.  
فاطمی، س.ا.؛ عطایی-آشتیانی، ب.، ۱۳۸۷. شبیه‌سازی اثر پیشروی آب شور بر تخلیه آلاینده‌ها در آبخوان ساحلی زیر حوضه تالار، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، صفحات ۱-۷.

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

Ataie-Ashtiani, B.; Volker, R.E.; Lockington, D.A., 1999. Tidal effects on sea water intrusion in unconfined aquifers, *Journal of Hydrology*, 216: 17-31.

Ataie-Ashtiani, B.; Volker, R.E.; Lockington, D.A., 2001. Tidal effects on groundwater dynamics in unconfined aquifer, *Hydrological Processes*, 15: 655-669.

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

برابر پراکندگی طولی لحاظ شده است. این نسبت مطابق با یافته‌های تحقیقات گذشته است (Jakovic et al., 2011).

از میان الگوریتم‌های مختلف حل موجود در بسته نرم‌افزار (اجزای محدود، منحنی مشخصه و حجم محدود به روش کاهش مجموع تغییرات)، با وجود اینکه الگوریتم حجم محدود (3rd-order TVD) در حل معادله انتقال کمترین ضخامت ناحیه انتقالی را می‌دهد و بیشتر توسط محققین گذشته مورد استفاده قرار گرفته است (Goswami and Clement, 2007; Luyun Jr et al., 2009)، اما مقایسه این ضخامت در مدل عددی (حدود ۲/۵ سانتی‌متر: بیشترین فاصله عمودی از خط هم غلظت ۵٪ تا خط هم غلظت ۹۵٪) با تحلیل تصاویر برداشتی نشان می‌دهد که ضخامت ناحیه انتقالی در آزمایش‌ها کمتر از میزان به‌دست آمده در مدل عددی بوده است. هر چند در آزمایش‌ها، تعیین دقیق ضخامت ناحیه انتقالی شاید به طریق مشاهداتی و پردازش تصاویر میسر نباشد و باید با نمونه‌گیری از مرز بین آب شور و شیرین و تعیین میزان EC نظر قطعی را داد.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی آزمایشگاهی نحوه نفوذ شوری در آبخوان‌های آزاد ساحلی در جریان دایمی و غیردایمی پرداخته گردید و با مقایسه نتایج به‌دست آمده نتایج حاصل از مدل عددی SEAWAT، توانایی مدل در شبیه‌سازی مناسب مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این مقایسه نشان داد که شبیه‌سازی عددی در هر دو حالت جریان، با دقت مناسبی می‌تواند، گوه نمکی تشکیل شده را شبیه‌سازی نماید. در حالت کلی و برای هر دو حالت جریان، میزان پیشروی به‌دست آمده از مدل عددی بیشتر از میزان مشاهده شده در آزمایشگاه است. ضخامت ناحیه انتقالی نیز در شبیه‌سازی‌ها بیشتر از نتایج آزمایشگاهی به‌دست آمده است. آنچه مسلم است علاوه بر دقت در شبیه‌سازی، نحوه انجام آزمایش و دقت و صحت پارامترهای به‌دست آمده نیز بر میزان این اختلاف تاثیر خواهد داشت. چسبندگی جزیی ماده ردیاب به ذرات ماسه، اختلاف جزیی در چگالی و غلظت محلول آب شور به‌دست آمده ناشی از افزودن ماده ردیاب، نمونه‌ای از عوامل تاثیرگذار بر این اختلاف باشد.

از آنجایی که در واقعیت شرایط حاکم بر آبخوان از پیچیدگی بیشتری برخوردار بوده و عوامل محیطی و انسانی مانند جزرو مد



- 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.
- Luyun, Jr.R.; Momii, K.; Nakagawa, K., 2009. Laboratory-scale saltwater behavior due to subsurface cutoff wall, *Journal of Hydrology*, 377: 227-236.
- Ogata, A.; Banks, R.B., 1961. A solution of the differential equation of longitudinal dispersion in porous media, *US Geological Survey Professional Paper*, 411-A.
- Robinson, C.; Li, L., 2004. Effect of tidal oscillations on water exchange and mixing in a coastal aquifer. *Proceedings of the XV<sup>th</sup> international conference on computational methods in water resources*, 1583-1594.
- 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.
- Simmons, C.T.; Pierini, M.L.; Hutson, J.L., 2002. Laboratory investigation of variable density flow and solute transport in unsaturated-saturated porous media, *Transport in Porous Media*, 47: 215-244.
- Todd, D.K.; Mays, L.W., 2005. *Groundwater Hydrology*, John Wiley & Sons, Inc. Third Edition, 656PP.
- Werner, A.D.; Jakovovic, D.; Simmons, C.T., 2009. Experimental observations of saltwater up-coning, *Journal of Hydrology*, 373: 230-241.
- Werner, A.D.; Bakker, M.; Post, V.E.A.; Vandenbohede, A.; Lu, C.; Ataie-Ashtiani, B.; Simmons, C.T.; Barry, D.A., 2012. Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advance sand future challenges. *Advances in Water Resources*, 51: 3-26.
- Vukovic, M.; Soro, A., 1992. Determination of hydraulic conductivity of porous media from grain-size composition, *Water Resources Publications*, Littleton, Colorado, 83P.
- 569PP.
- Feseker, T., 2007. Numerical studies on saltwater intrusion in a coastal aquifer in northwestern Germany, *Hydrogeology Journal*, 15: 267-279.
- Fetter, C.W., 2001. *Applied hydrogeology*, fourth edition, Prentice Hall Inc., New Jersey, 598PP.
- Goswami, R.R.; Clement, T.P., 2007. Laboratory-scale investigation of saltwater intrusion dynamics, *Water Resources research*, 43, W04418, doi: 10.1029/2006WR005151.
- Guo, W.; Langevin, C., 2002. User's guide to SEAWAT: A computer program for the simulation of three-dimensional variable-density ground-water flow: *USGS Techniques of Water Resources Investigations*, Book 6, Chapter A7, 87PP.
- Hamidi, M.; Sabbagh-Yazdi, S., 2006. Numerical study on effect of subsurface dam on controlling salt water intrusion in coastal aquifer, *7th international Congress on Civil Engineering*, Tehran, Iran.
- 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.
- Jakovovic, D.; Post, V.E.A.; Werner, A.D.; Männicke, O.; Hutson, J.L.; Simmons, C.T., 2012. Tracer adsorption in sand-tank experiments of saltwater up-coning, *Journal of Hydrology*, 414-415, 476-481.
- Johnson, A.I., 1966. Revision, compilation of specific yields for various materials, *USGS open files report*, 119PP.
- Klute, A.; Dirksen, C., 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods*, second ed., *Agronomy Monograph*, vol. 9 American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI, 687-734.

coastal groundwater, *Advances in Environmental Research*, 6: 229-237.

Zhang, Q.; Volker, R.E.; Lockington, D.A., 2002. Experimental investigation of contaminant transport in