

## Impact of River Water Seepage on Reduction of Saltwater Volume in Offshore Coastal Aquifers

ELHAM PANJNOOSH<sup>1</sup>, SEYED SADJAD MEHDIZADEH<sup>1\*</sup>

1. Department of Civil Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.  
(Received: June. 19, 2019- Revised: Dec. 6, 2019- Accepted: Jan. 7, 2020)

### ABSTRACT

Investigation on available freshwater below the sea in offshore aquifers (i.e. part of the coastal aquifer is stretched beneath the sea) can provide a resource for ecological demand in the future. In this study, to understand the response of intruded seawater to freshwater recharge that is leaked from the riverbed, various scenarios with different aquitard length and permeability or river conductance have been introduced. SEAWAT dispersive code is used for seawater intrusion simulation and saltwater wedge toe position, mixing zone thickness and saltwater volume were estimated. The results showed that the river conductance influences the volume of freshwater in offshore aquifers significantly. Thereby, small conductance value (i.e. 0.0025 m<sup>2</sup>/d in this study) leads to a negligible impact on saltwater characteristics but as this coefficient grows up to a specific amount, more freshwater is released from the riverbed which could significantly affect saltwater characteristics (60% reduction in brackish water volume). Nonetheless, extra-large conductance (i.e. 375 m<sup>2</sup>/d in this study) cannot sharply affect seawater recession due to high-velocity magnitude of recharged freshwater and limited contact time with the saltwater wedge. Hydraulic conductivity and length of aquitard also affect the results; so that the extension of aquitard length to the dry land boundary will cause reduction in the recharged freshwater and consequently reduce the intruded saltwater especially in the vicinity of aquifer bed.

**Keywords:** Offshore aquifer; Toe position; Conductance; Aquitard.

## تأثیر نشت آب از بستر رودخانه در کاهش حجم آب شور در آبخوان‌های فراساحلی

الهام پنج نوش<sup>۱</sup>، سید سجاد مهدی زاده<sup>\*</sup>

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، تهران، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۳/۲۹ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۹/۱۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۱۰/۱۷)

### چکیده

بررسی وضعیت آب شیرین موجود در زیر دریا در آبخوان‌های فراساحلی (امتداد بخشی از آبخوان تا زیر دریا) می‌تواند برای تأمین نیازهای اکولوژی سواحل در آینده مفید باشد. در این پژوهش به منظور آگاهی از میزان تأثیرپذیری آبخوان‌های فراساحلی از نشت آب شیرین از رودخانه، ابتدا سناریوهای مختلفی با تغییر در ابعاد هندسی آبخوان فراساحلی و مقادیر هدایت هیدرولیکی لایه نیمه تراوا و ضریب آبگذری رودخانه تعریف شد. در ادامه با مدل‌سازی پسروری شوری با استفاده از کد عددی SEAWAT، مشخصات گوه شوری شامل موقعیت پنجه شوری، ضخامت ناحیه انتقالی و حجم آب شور در زمان برآورد شد. نتایج نشان داد که مقدار ضریب آبگذری بستر رودخانه در میزان حجم آب شیرین زیر دریا تأثیرگذار است. زمانی که ضریب آبگذری رودخانه کاهش محسوس می‌یابد (به طور مثال  $0.025 \text{ m}^2/\text{d}$  در این مطالعه)، تأثیر آن بر مشخصات شوری و کاهش میزان حجم آب شور بسیار اندک بوده اما افزایش این ضریب تا میزان مشخص می‌تواند بیشترین تأثیر (تا ۶۰ درصد کاهش حجم آب شور) را بر مشخصات شوری بگذارد. با این وجود با افزایش قابل ملاحظه این ضریب (به طور مثال  $375 \text{ m}^2/\text{d}$  در این مطالعه)، میزان تأثیر آن بر مشخصات شوری کمتر خواهد شد. علت این امر در سرعت بالای جریان ورودی و زمان اندرکنش محدود با گوه شوری دیده شده است. میزان نفوذپذیری لایه نیمه تراوا و طول گسترش آن نیز بر نتایج تأثیر خواهد گذاشت؛ به گونه‌ای که با امتداد لایه نیمه تراوا تا مرز خشکی، از میزان آب شیرین نشت‌کرده کم شده و در نتیجه از اثرات آن بر گوه شوری در نواحی نزدیک به بستر آبخوان کاسته خواهد شد.

**واژه‌های کلیدی:** آبخوان دور از ساحل، پنجه شوری، ضریب آبگذری، لایه نیمه تراوا.

### مقدمه

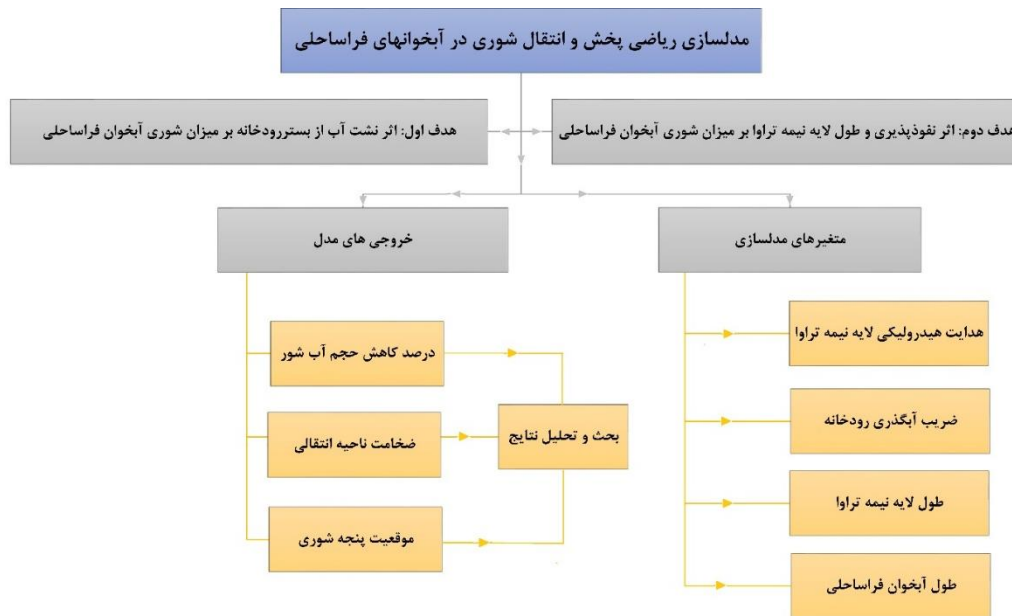
تمرکز جمعیت در نواحی ساحلی و بالطبع رشد فعالیت‌ها سبب افزایش میزان برداشت از آب زیرزمینی شده است. این افزایش برداشت، سبب حرکت آب شور دریا به سمت آبخوان‌ها شده و این امر شوری بیشتر این منبع را به دنبال داشته است. شوری زیاد (بیشتر از ۲ تا ۳ درصد)، استفاده از آب را برای شرب غیرممکن می‌سازد و به ناچار باید با فرآیندهایی نظیر تصفیه یا اختلاط با آب شیرین بر این مشکل فائق آمد (Todd and Mays 2005). تحقیق در مسأله پیشروی شوری در دهه گذشته با هدف تعیین موقعیت فصل مشترک آب شور و شیرین و پیش‌بینی تغییرات سطح سفره آب زیرزمینی و یا غلظت نمک، محدود به آبخوان‌هایی بوده که در گستره ساحلی قرار داشتند (به طور مثال نتایج مطالعات Feseker 2007; Abd-Elhamid and Javadi 2011; Jakobovic et al., 2011; Laattoe et al., 2013; Mahmoodzadeh et al., 2016; Mahmoodzadeh and Karamouz 2019). از میان تحقیقاتی که در مورد آبخوان‌های دور از ساحل (فراساحلی: بخشی از آبخوان تا زیر دریا امتداد دارد)

انجام شده می‌توان به ارائه راه‌حل تحلیلی برای جریان‌های دائمی توسط Bakker 2006 اشاره کرد. او با در نظر گرفتن آبخوانی که در زیر دریا گسترده شده و توسط یک لایه نیمه‌تراوا از دریا جدا شده بود، به ارائه معادله تحلیلی جهت تعیین موقعیت پنجه شوری در زیر دریا پرداخت. Lu et al., 2013 نیز به بررسی میزان پیشروی شوری در آبخوان لایه‌بندی‌شده ساحلی که بخشی از آن در زیر دریا امتداد داشته، پرداختند. در آن پژوهش، نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با استفاده از رویکرد پخش و انتقال شوری (کد SEAWAT) مقایسه شد و تأثیر پارامترهایی نظیر هدایت هیدرولیکی، ضریب پخش، ضخامت لایه‌ها و گرادیان هیدرولیکی بر میزان پیشروی شوری دیده شد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که ضخامت ناحیه انتقالی بیشتر متأثر از ترتیب قرارگیری لایه‌ها می‌باشد و اندازه هدایت هیدرولیکی تأثیر کمتری بر ضخیم‌شدن یا نازک‌شدن ناحیه انتقالی در جریان دائمی خواهد داشت. میزان پیشروی شوری در آبخوان‌های فراساحلی موضوع مورد مطالعه توسط Bakker 2017 et al., نیز بوده است. در آن پژوهش بر اساس شرط مرزی ورودی

به صورت طبیعی (به طور مثال توسط رودخانه) و چه به صورت مصنوعی (به طور مثال ایجاد گودال تغذیه و یا حفر کانال خاکی) می‌تواند تأثیر به‌سزایی در کاهش نفوذ شوری داشته باشد، لزوم مطالعه میزان و نحوه تبادل آب بین آبخوان و آب‌های سطحی بیش از پیش آشکار می‌شود. همچنین کمی‌کردن مقدار تبادل آب بین آب سطحی و آبخوان از مراحل مهم در مطالعاتی مانند بیلان آب و تعیین نیازهای زیست‌محیطی است (Ketabchi *et al.*, 2017).

مرور بر مطالعات گذشته نشان می‌دهد که مدل‌سازی عددی جریان‌های شور و شیرین به منظور آگاهی از نحوه نشت آب شیرین از رودخانه و اثر زمانی و مکانی آن بر آبخوان‌های فراساحلی تاکنون مورد توجه قرار نگرفته است. بنابراین در پژوهش حاضر با استفاده از مدل اختلاطی تفاضل محدود SEAWAT، شبیه‌سازی زمانی این رخداد صورت پذیرفته و در ارتباط با تأثیر حجم آب شیرین نشت‌کرده از بستر رودخانه با تغییر در هندسه و مشخصات فیزیکی این‌گونه آبخوان‌ها از جمله تغییر هدایت هیدرولیکی لایه نیمه تراوا بحث شده است. فلوچارت مراحل مطالعه حاضر در شکل (۱) ارائه شده است.

آب شیرین به صورت دبی یا هد ثابت، راه‌حل تحلیلی ارائه شده در مطالعات Bakker 2006 بسط داده شد و وضعیت پنجه شوری در حالت‌های مختلف جریان دائمی بررسی شد. مدل‌سازی پیشروی شوری با رویکرد اختلاطی در آبخوان فراساحلی توسط Solorzano-Rivas and Werner 2018 نیز انجام شد. آن‌ها یک مدل فرضی از آبخوان فراساحلی را در نظر گرفته و با ایجاد یک لایه نیمه‌تراوا در زیر دریا به بررسی و نمایش نحوه نفوذ آب شیرین در زیر دریا پرداختند. در آن تحقیق میزان نفوذپذیری لایه نیمه تراوا در سناریوهای مختلف تغییر کرده و نتایج نشان داد که میزان نفوذ آب شیرین در آبخوان فراساحلی به میزان نفوذپذیری لایه نیمه‌تراوا بستگی دارد. هرچه این لایه نفوذپذیری کمتری داشته باشد، از میزان نفوذ آب شور به داخل آبخوان ممانعت به عمل آمده و بر حجم آب شیرین در زیر دریا افزوده می‌شود و بالطبع آن، پنجه شوری به عقب‌تر رانده خواهد شد. وجود لایه ناتراوا یا نیمه تراوا با توجه به ایجاد مانعی برای عدم نشت عمودی آب دریا امری ضروری در تشکیل این‌گونه آبخوان‌ها می‌باشد. از آنجایی که نتایج مطالعات پیشین (به طور مثال Christy and Lakshmanan 2017; Atlabachew *et al.*, 2018; Lu *et al.*, 2017; Motallebian *et al.*, 2019) نشان دادند که نفوذ آب شیرین چه



شکل ۱- فلوچارت مراحل انجام کار مطالعه حاضر

Werner 2018 می‌باشد. آبخوان آزاد کوچک مقیاس دارای ۱۰۰ متر طول در خشکی و ۲۰ متر امتداد در زیر دریا می‌باشد. ارتفاع آبخوان در بخش خشکی ۳۲ متر و ارتفاع آن در زیر دریا ۱۱ متر می‌باشد. ضخامت لایه نیمه تراوا در بالای این آبخوان یک متر انتخاب شده است. هد آب شیرین در مرز ورودی ۳۲ متر و هد

## موارد و روش‌ها

### انتخاب آبخوان بزرگ مقیاس فراساحلی

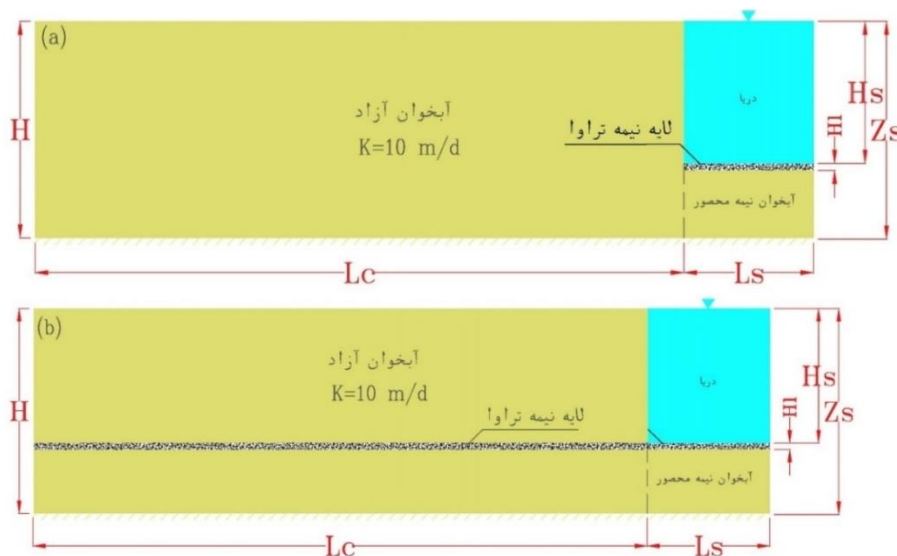
در این پژوهش دو نوع آبخوان آزاد بزرگ و کوچک مقیاس مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات این دو آبخوان مطابق با آبخوان‌های ارائه شده در پژوهش Solorzano-Rivas and

آبخوان بزرگ و کوچک مقیاس در دو حالت بررسی شد. در حالت اول این لایه فقط در زیر دریا قرار دارد و در حالت دوم لایه نیمه تراوا در کل آبخوان گسترده شده است. به سایر مشخصات هندسی و فیزیکی در جدول (۱) اشاره شده است. شکل (۲) نیز وضعیت دو آبخوان مذکور به همراه جانمایی لایه نیمه تراوا را نمایش می-دهد.

آب شور در مرز دریا ۳۱ متر می‌باشد. ضریب تخلخل ۰/۳ و در کل آبخوان ثابت در نظر گرفته شده است. چگالی آب شیرین و شور به ترتیب ۱۰۰۰ و  $1025 \text{ kg/m}^3$  می‌باشد. غلظت آب شور در این چگالی برابر با  $35 \text{ kg/m}^3$  به دست آمده است. آبخوان بزرگ مقیاس دارای طول ۳۰۰۰ متری در زیر ساحل و ۴۹۰ متری در زیر دریا می‌باشد. سایر مشخصات جریان و خاک مشابه آبخوان کوچک مقیاس در نظر گرفته شد. لایه نیمه تراوا برای

جدول ۱- خصوصیات محیط متخلخل و سیال در دو آبخوان مورد بررسی (اقتباس شده از نتایج مطالعه Solarzano-Rivas and Werner 2018)

مشخصات	آبخوان کوچک مقیاس	آبخوان بزرگ مقیاس
طول آبخوان در بخش ساحلی ( $L_c:m$ )	۱۰۰	۳۰۰۰
طول آبخوان در بخش دریا ( $L_s:m$ )	۲۰	۴۹۰
ارتفاع آب دریا بالای لایه نیمه تراوا ( $H_s:m$ )	۲۰	۲۰
ارتفاع لایه نیمه تراوا ( $H_i:m$ )	۱	۱
ارتفاع آبخوان ساحلی ( $H:m$ )	۳۲	۳۲
هد آب شور ( $Z_s:m$ )	۳۱	۳۱
هدایت هیدرولیکی ( $K:m/d$ )	۱۰	۱۰
تخلخل مؤثر ( $n_e$ )	۰/۳	۰/۳
چگالی آب شیرین ( $\rho_f: \text{kg/m}^3$ )	۱۰۰۰	۱۰۰۰
چگالی آب شور ( $\rho_s: \text{kg/m}^3$ )	۱۰۲۵	۱۰۲۵
هد آب شیرین در مرز ( $H_r:m$ )	۳۲	۳۲
غلظت آب دریا ( $C_o:\text{kg/m}^3$ )	۳۵	۳۵
پراکندگی طولی هیدرودینامیکی ( $\alpha_L:m$ )	۱	۱
پراکندگی قائم هیدرودینامیکی ( $\alpha_v:m$ )	۰/۰۱	۰/۰۱
ذخیره ویژه ( $S_s:1/m$ )	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۸
آبدهی ویژه ( $S_y$ )	۰/۲	۰/۲



شکل ۲- مدل مفهومی دو آبخوان کوچک و بزرگ مقیاس. (a) لایه نیمه تراوا فقط در زیر دریا (b) لایه نیمه تراوا در کل آبخوان

مولکولی و  $\alpha_L$  پراکندگی طولی است. در تحقیق حاضر با توجه به رابطه فوق و همچنین لحاظ نمودن این امر که هر دو آبخوان در فضای دوبعدی شبیه‌سازی شده‌اند، ابعاد هر سلول ( $\Delta x \times \Delta z$ ) در آبخوان کوچک مقیاس  $1 \times 0.25$  متر انتخاب شد. در آبخوان بزرگ مقیاس با توجه به طول  $3490$  متری و ابعاد بزرگ شبکه به جهت عدم واگرایی حل و زمان پردازش توسط رایانه مورد استفاده از شبکه نامنظم استفاده شد. آبخوان در بخش ساحلی با طول  $3000$  متر به فواصل  $10$  متری و آبخوان در بخش دریایی با طول  $490$  متر به فواصل  $2$  متری تقسیم‌بندی شد. ارتفاع سلول‌ها در هر دو حالت برابر با  $0.25$  متر لحاظ شد. از حل‌کننده  $PCG2^4$  در حل جریان و برای ترم انتقال از روش تفاضل محدود استاندارد<sup>۵</sup> استفاده شد. معیار همگرایی هد جریان و غلظت به ترتیب برای هر دو آبخوان  $0.001 \text{ cm}$  و  $0.001 \text{ kg/m}^3$  در نظر گرفته شد.

#### معرفی سناریوها

ابتدا هر دو آبخوان در هر دو حالت معرفی شده در بخش قبل در حالت دائمی شبیه‌سازی شدند. سپس شبیه‌سازی در حالت غیردائمی برای یک دوره  $20$  ساله با اضافه نمودن اثر نشت جریان آب شیرین از رودخانه ادامه یافت. در اجرای غیردائمی مدل، شرایط اولیه برای غلظت‌ها و هد جریان مطابق با آخرین گام زمانی در شبیه‌سازی حالت دائمی در نظر گرفته شد. هدایت هیدرولیکی لایه نیمه تراوا به ضخامت یک متر در این مطالعه متغیر فرض شده است. از این رو سناریوهای مختلفی مطابق با جدول (۲) تعریف شده است.

در تمامی سناریوهای غیردائمی، رودخانه نیز در مدل تعریف شد. مشخصات مورد نیاز برای تعریف رودخانه شامل تراز آب رودخانه، ضریب آبگذری<sup>۶</sup> و تراز کف رودخانه می‌باشد. در این تحقیق با توجه به دو بعدی بودن آبخوان‌ها، یک مقطع طولی از رودخانه که دارای عرض ثابت و طول مستقیم می‌باشد، در نظر گرفته شد. همچنین به جهت ساده‌سازی و عدم واگرایی حل، فرض شده که تمامی مسیر رودخانه دارای عمق ثابت است. مقدار ضریب آبگذری بین رودخانه و آبخوان از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$C = \frac{K_{seds} \cdot L \cdot W}{b_{seds}} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن  $C$  ضریب آبگذری بین رودخانه و آبخوان ( $L^2/T$ )،  $W$  میانگین پهنای بستر رودخانه،  $K_{seds}$  ضریب هدایت هیدرولیکی لایه بستر رودخانه،  $b_{seds}$  ضخامت بستر رودخانه و  $L$

#### تنظیمات مدل‌سازی عددی

در مدل‌های عددی که وابسته به چگالی هستند، آب شیرین و شور در یک تعادل دینامیکی که از پخش و انتقال آلاینده در آبخوان نتیجه می‌شود، فرض می‌گردند. در تحقیق حاضر مدل عددی SEAWAT (نسخه چهارم در قالب نرم‌افزار عددی (GMS10.0.11) که ترکیب دو نرم افزار MODFLOW (حل جریان) (Harbaugh 2005) و MT3DMS (حل انتقال و پخش آلاینده) (Zheng and Wang 1999) می‌باشد، استفاده شده است. در این مدل، دو معادله جریان سیال و انتقال و پخش شوری حاصل از آب دریا به طور همزمان و بر اساس ترم مشترک چگالی آب در هر دو معادله حل شده و نتیجه شبیه‌سازی به صورت توزیع هد و غلظت برای خاک‌های اشباع حاصل می‌شود. از این مدل در بسیاری از مطالعات پیشین در ارتباط با پیش‌بینی میزان شوری در آبخوان‌های ساحلی یا حجم و موقعیت عدسی (lense) آب شیرین در جزایر با موفقیت استفاده شده است (Post et al., 2013; Badaruddin et al., 2015; Mehdizadeh et al., 2017). صحت این مدل همچنین با شبیه‌سازی مسائل معیاری همچون هنری<sup>۱</sup> و الدر<sup>۲</sup> که دارای داده آزمایشگاهی می‌باشند، کنترل شده است. معادلات جریان آب زیرزمینی و پخش و انتقال آلاینده در یک محیط متخلخل اشباع که در مدل مذکور استفاده و گسسته شده‌اند، شامل دو رابطه زیر است (Langevin et al., 2008):

$$\nabla \cdot \left[ K \rho \left( \nabla h + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \nabla z \right) \right] = \rho S_s \frac{\partial h}{\partial t} + n \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$n \frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (n D \nabla C) - \nabla \cdot (v C) = 0.0 \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آنها  $\rho$  چگالی سیال مخلوط (آب شیرین و شور)،  $c$  غلظت سیال مخلوط،  $h$  میزان هد هیدرولیکی داخل آبخوان،  $z$  تراز نقطه،  $D$  ضریب پخش،  $v$  سرعت و نهایتاً  $t$  زمان است (سایر پارامترها در جدول (۱) تعریف شده‌اند).

بسیاری از محققان نشان داده‌اند که اندازه‌ی سلول‌ها یک فاکتور کلیدی برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی است (Diersch and Kolditz, 2002; Lu et al., 2013). در حالت کلی اندازه سلول بر پایه ضابطه رایج عدد پکلت<sup>۳</sup> تخمین زده می‌شود. طبق این قاعده، سایز ابتدایی سلول باید در رابطه‌ی اطمینان (۳) جواب دهد (Voss and Souza 1987; Goswami and Clement 2007):

$$P_e = \frac{v \Delta L}{D_m + \alpha_L v} \approx \frac{\Delta L}{\alpha_L} \leq 4 \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در این رابطه  $\Delta L$  سایز هر سلول،  $D_m$  ضریب پخش

5. Standard finite-difference method  
6. Conductance

1. Henry benchmark problem  
2. Elder benchmark problem  
3. Peclet number  
4. Pre-Conditioned Conjugate-Gradient

برای رودخانه مطابق جدول (۳) تعریف شده است. در هر دو آبخوان، تراز کف رودخانه ۳۳/۰ متر، عمق آب در آن ۰/۶ متر و ضخامت مصالح بستر رودخانه ۰/۴ متر فرض شد.

طول بستر رودخانه در شبکه موردنظر می‌باشد. از شرط مرزی کوشی<sup>۱</sup> برای مدل‌سازی رودخانه استفاده شده. مطابق این شرط آب از رودخانه و از طریق بستر وارد آبخوان می‌شود (یا بالعکس). با تغییر در مقدار ضریب آبگذری رودخانه سناریوهای مختلفی

جدول ۲- مشخصات آبخوان‌ها با تغییر در طول و میزان نفوذپذیری لایه نیمه‌تراوا

نام مدل*	طول آبخوان ساحلی m	هدایت هیدرولیکی لایه نیمه‌تراوا m/d
S-0.0001	۱۰۰	۰/۰۰۰۱
L-0.0001	۳۰۰۰	۰/۰۰۰۱
S-0.01	۱۰۰	۰/۰۱
L-0.01	۳۰۰۰	۰/۰۱

\* در جدول فوق، S و L به ترتیب به آبخوان کوچک و بزرگ مقیاس اشاره داشته و اعداد پس از آن‌ها هدایت هیدرولیکی لایه نیمه‌تراوا است.

جدول ۳- تنظیم‌های سناریوهای مختلف با اعمال رودخانه در کد SEAWAT

شماره سناریو	نام مدل	هدایت هیدرولیکی لایه نیمه‌تراوا (m/d)	هدایت هیدرولیکی مصالح بستر رودخانه (m/d)	ضریب آبگذری (m <sup>2</sup> /d)
آبخوان کوچک مقیاس				
۱		۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۲۵
۲		۰/۰۰۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲۵
۳	S-0.0001	۰/۰۰۰۱	۱	۲/۵
۴		۰/۰۰۰۱	۱۵	۳۷/۵
۵		۰/۰۰۰۱	۸۰	۲۰۰
۶		۰/۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۲۵
۷		۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲۵
۸	S-0.01	۰/۰۱	۱	۲/۵
۹		۰/۰۱	۱۵	۳۷/۵
۱۰		۰/۰۱	۸۰	۲۰۰
آبخوان بزرگ مقیاس				
۱۱		۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۲۵
۱۲		۰/۰۰۰۱	۰/۰۱	۰/۲۵
۱۳	L-0.0001	۰/۰۰۰۱	۱	۲۵
۱۴		۰/۰۰۰۱	۱۵	۳۷۵
۱۵		۰/۰۰۰۱	۸۰	۲۰۰۰
۱۶		۰/۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۲۵
۱۷		۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۲۵
۱۸	L-0.01	۰/۰۱	۱	۲۵
۱۹		۰/۰۱	۱۵	۳۷۵
۲۰		۰/۰۱	۸۰	۲۰۰۰

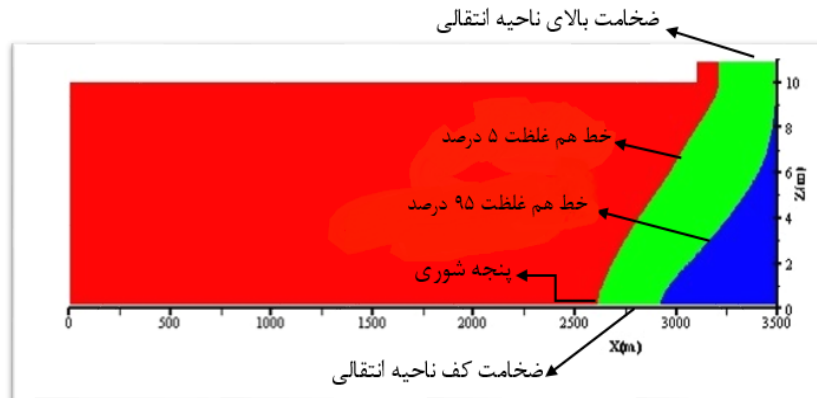
مختلف استفاده شد. معیار مقایسه سناریوهای مختلف موقعیت پنجه شوری با معیار محل برخورد خط هم‌غلظت ۵ درصد با بستر

روش‌های تحلیل و مقایسه برای تحلیل نتایج، از اشکال پیشروی شوری در طی سال‌های

$$R_f = \frac{V_{si} - V_{so}}{V_{so}} \times 100 \quad (\text{رابطه } ۵)$$

که در آن  $R_f$  ضریب کاهش حجم آب شور،  $V_{so}$  حجم آب شور بعد از اتمام شبیه‌سازی حالت دائمی (قبل از نشت آب از رودخانه) و  $V_{si}$  حجم آب شور در زمان  $i$  پس از ورود آب از رودخانه می‌باشد.

آبخوان، ضخامت ناحیه انتقالی با معیار ضخامت بالا و کف ناحیه بین غلظت ۵ تا ۹۵ درصد آب دریا و حجم آب شور با معیار غلظت شوری بیشتر از ۵ درصد آب دریا بود. در شکل (۳) پارامترهای اندازه‌گیری شده نمایش داده شده است. همچنین پارامتر بی‌بعدی تحت عنوان ضریب کاهش حجم آب شور ( $R_f$ ) مطابق رابطه (۵) تعریف شد:



شکل ۳- نمایش مشخصات شوری اندازه‌گیری شده

شیرین نشت کرده از بستر رودخانه نیز تأثیر گذاشته است؛ به طوری که مقدار بالای این ضریب، گسیل حجم قابل توجهی از آب شیرین را در زمان‌های ابتدایی در پی داشته و ضخامت ناحیه انتقالی در زمان‌های اولیه به علت رقیق‌شدگی بالای آب شور داخل آبخوان افزایش یافته است. از بررسی اشکال می‌توان نتیجه گرفت که در شبیه‌سازی این آبخوان با خصوصیات یادشده، با افزایش ضریب آبگذری و ورود بیشتر آب شیرین به سیستم، حجم آب شور تا ۹۳ درصد کاهش می‌یابد (تغییر حجم آب شور از  $m^3$  ۸۴۵ در واحد عرض آبخوان در حالت پایدار به  $m^3$  ۵۵ بعد از گذشت ۲۰ سال).

نتایج افزایش نشت آب شیرین بر آبخوان کوچک مقیاس زمانی که هدایت هیدرولیکی لایه نیمه تراوا به  $0.1 \text{ m/d}$  افزایش و طول آن نیز تا مرز خشکی امتداد یابد، در شکل (۵ و ۶) بیان شده است. با امتداد لایه نیمه تراوا در کل طول آبخوان دو پنجه شوری تشکیل می‌شود. موقعیت پنجه شوری در لایه بالایی و پایینی قبل از اعمال رودخانه با گذشت ۵۰ سال در حالت دائمی به ترتیب ۲۷ و ۲۰ متر می‌باشد. با ورود آب شیرین در ضریب آبگذری‌های پایین این موقعیت در دو لایه مذکور به ترتیب به مقادیر ناچیز ۲۲ و ۱۹ متر کاهش یافته است. در ضریب آبگذری‌های بالا و با نفوذ بیشتر آب شیرین از رودخانه، بخش بزرگی از این آب با عبور از لایه نیمه‌تراوا به لایه پایینی رسیده و

## نتایج و بحث

### آبخوان کوچک مقیاس

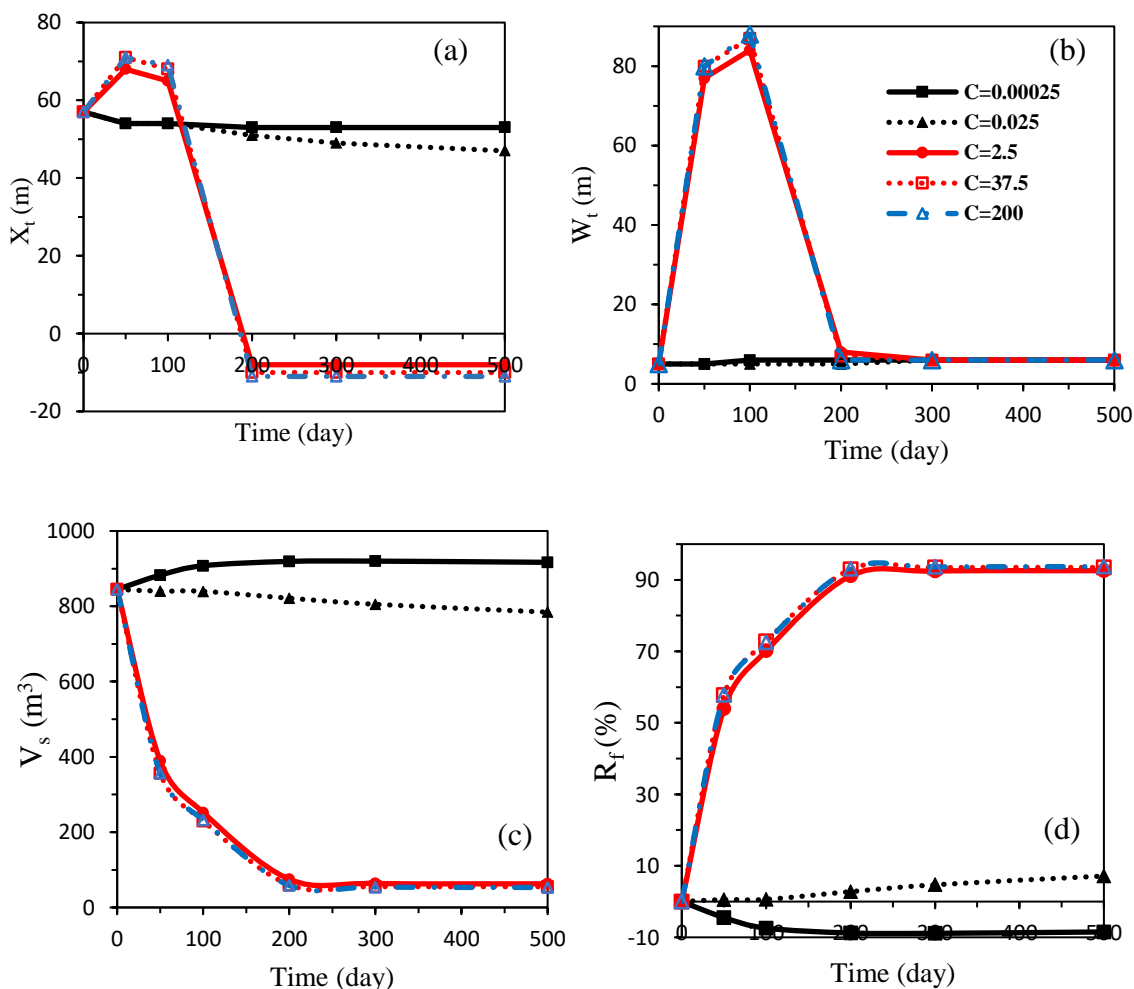
در ابتدا، به جهت اطمینان از صحت شبیه‌سازی، توزیع غلظت در برخی مدل‌های ارائه شده در جدول (۳) با نتایج مطالعه Solarzano-Rivas and Werner 2018 در حالت دائمی و بدون اثر رودخانه کنترل شده است. اشکال مرتبط با نتیجه شبیه‌سازی در آبخوان کوچک مقیاس با نفوذپذیری پایین لایه نیمه تراوا (برابر با  $0.0001 \text{ m/d}$  در مدل S-0.0001) و عدم امتداد آن در کل آبخوان در شکل (۴) نمایش داده شده است. نتایج نشان داد که با ورود آب از رودخانه به سیستم در صورتی که ضریب آبگذری دارای مقادیر کوچک باشد، موقعیت پنجه شوری با یک شیب ملایم کاهش می‌یابد؛ به گونه‌ای که مقدار آن از ۵۷ متر پس از ۵۰ سال در حالت دائمی (مبدأ مختصات، آخرین سلولی که بیانگر منطقه زیر دریا است انتخاب شده است) به حدود ۴۷ متر کاسته می‌شود. با اعمال ضریب آبگذری بزرگتر، پنجه شوری در ابتدا اندکی به سمت مرز خشکی پیشروی داشته و سپس بعد از گذشت ۱۰۰ روز با نرخ نسبتاً تندی کاهش یافته و نهایتاً بعد از گذشت ۲۰۰ روز ثابت مانده است. بیشینه مقدار عقب‌روی پنجه شوری در تمامی سناریوهای مرتبط با این مدل از ۵۷ متر در حالت دائمی تا ۱۱- متر بوده است. عدد منفی نشان‌دهنده کشیده‌شدن موقعیت پنجه شوری به زیر دریا می‌باشد. همچنین بررسی سناریوهای مرتبط نشان می‌دهد که ضریب آبگذری بر حجم آب

### آبخوان بزرگ مقیاس

نتایج شبیه‌سازی برای آبخوان مدل L-0.0001 با هدایت هیدرولیکی لایه نیمه تراوا برابر با  $0.0001 \text{ m/d}$  و امتداد این لایه تنها در زیر دریا در شکل (۷ و ۸) ارائه شده است. اشکال مربوطه نشان می‌دهد که موقعیت پنجه شوری در این مدل در ضریب آبگذری‌های پایین روند کاهشی کندی را تجربه می‌کند؛ به طوری که مقدار آن از ۱۴۳۰ متر بعد از گذشت ۱۰۰۰ سال در حالت دائمی، تنها به ۱۳۸۰ متر کاهش یافته است. با افزایش ضریب آبگذری روند کند کاهشی در روزهای آغازین ادامه داشته و از ۱۴۳۰ به ۱۴۲۰ متر می‌رسد اما برخلاف انتظار پس از گذشت ۵ سال این افزایش مقدار نتوانسته پنجه شوری را به طور محسوسی به عقب براند. این روند تأثیر نامحسوس برای ضخامت ناحیه انتقالی نیز اتفاق افتاده است (شکل ۷-b).

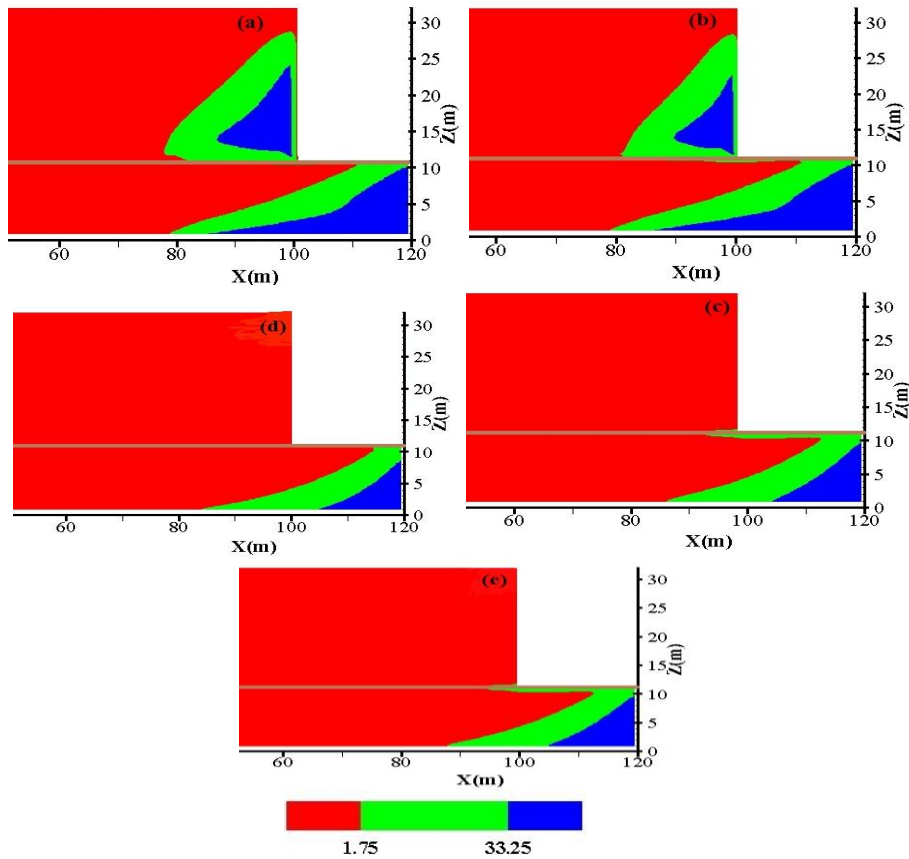
پنجه شوری در بستر آبخوان تا ۱- متر به عقب رانده می‌شود (شکل ۶-a). مطابق (شکل ۶-c)، با افزایش ضریب آبگذری بیشینه کاهش حجم آب شور تا ۷۰ درصد نیز خواهد رسید (تغییر از  $409 \text{ m}^3$  در واحد عرض آبخوان و در حالت دائمی به حدود  $130 \text{ m}^3$ ).

در سناریوهای با ضریب آبگذری پایین، افزایش ضخامت ناحیه انتقالی در بالای لایه نیمه تراوا نیز دیده می‌شود. حجم اندک آب شیرین گسیل شده از رودخانه به همراه وجود لایه نیمه‌تراوا در این سناریوها باعث تجمع آب شیرین ورودی در لایه بالایی شده، رقیق‌سازی ناحیه انتقالی را انجام داده و سپس از پنجره خروجی به دریا تخلیه می‌شود. در این سناریوها همچنین نفوذ آب شیرین به لایه پایینی به کندی صورت پذیرفته و از این رو ضخامت ناحیه انتقالی در بستر آبخوان تقریباً ثابت باقی می‌ماند.

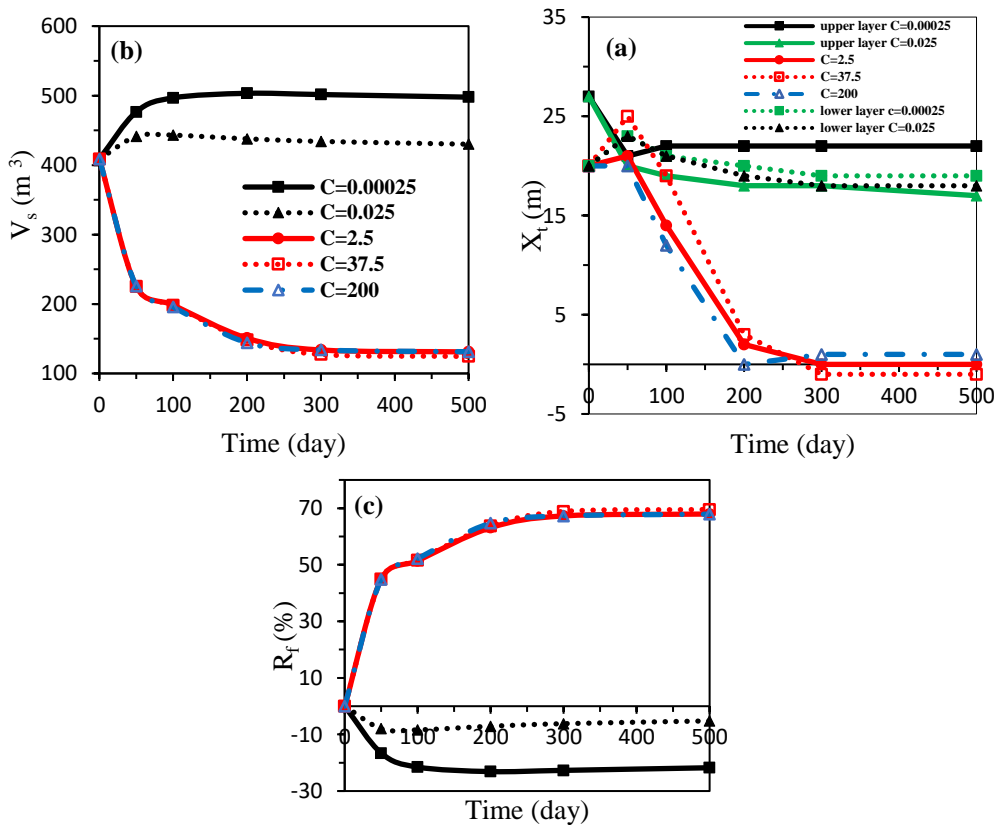


شکل ۴- مقایسه (a) پنجه شوری، (b) ضخامت ناحیه انتقالی، (c) حجم آب شور و (d) درصد کاهش حجم آب شور در مدل S-0.0001 با ضرایب نشست مختلف رودخانه (به علت ثابت ماندن مقادیر مورد بررسی، نتایج تنها برای ۵۰۰ روز اول نمایش داده شد)

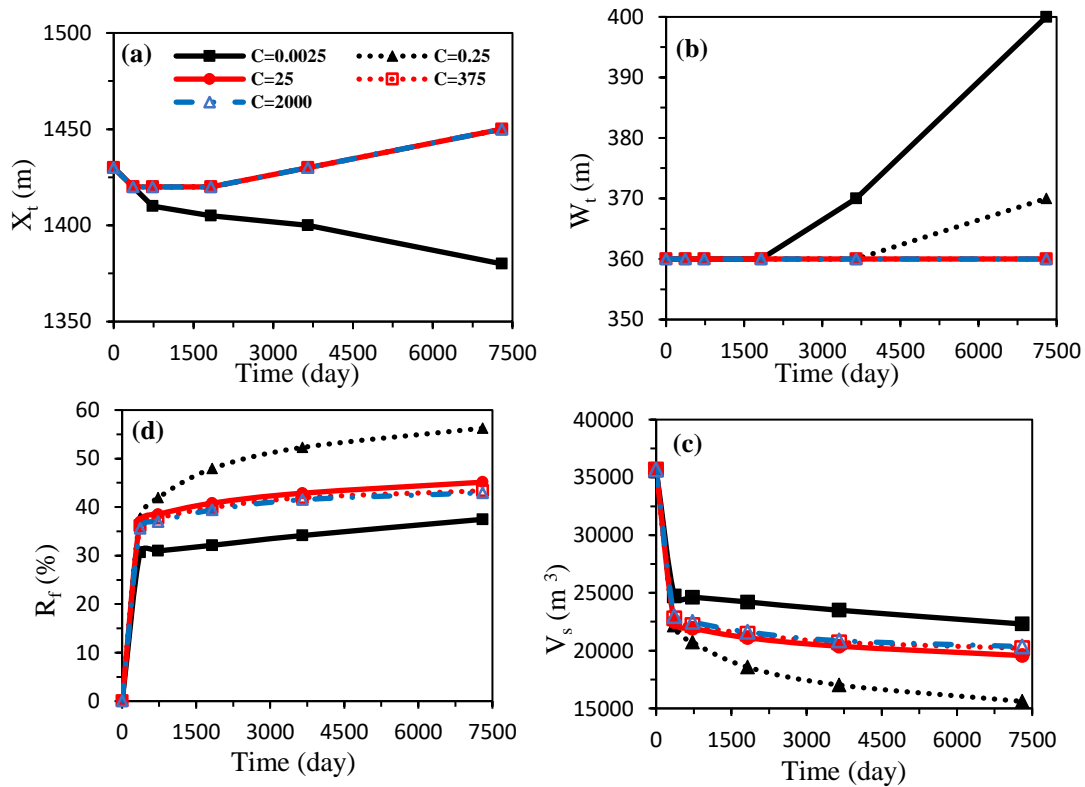




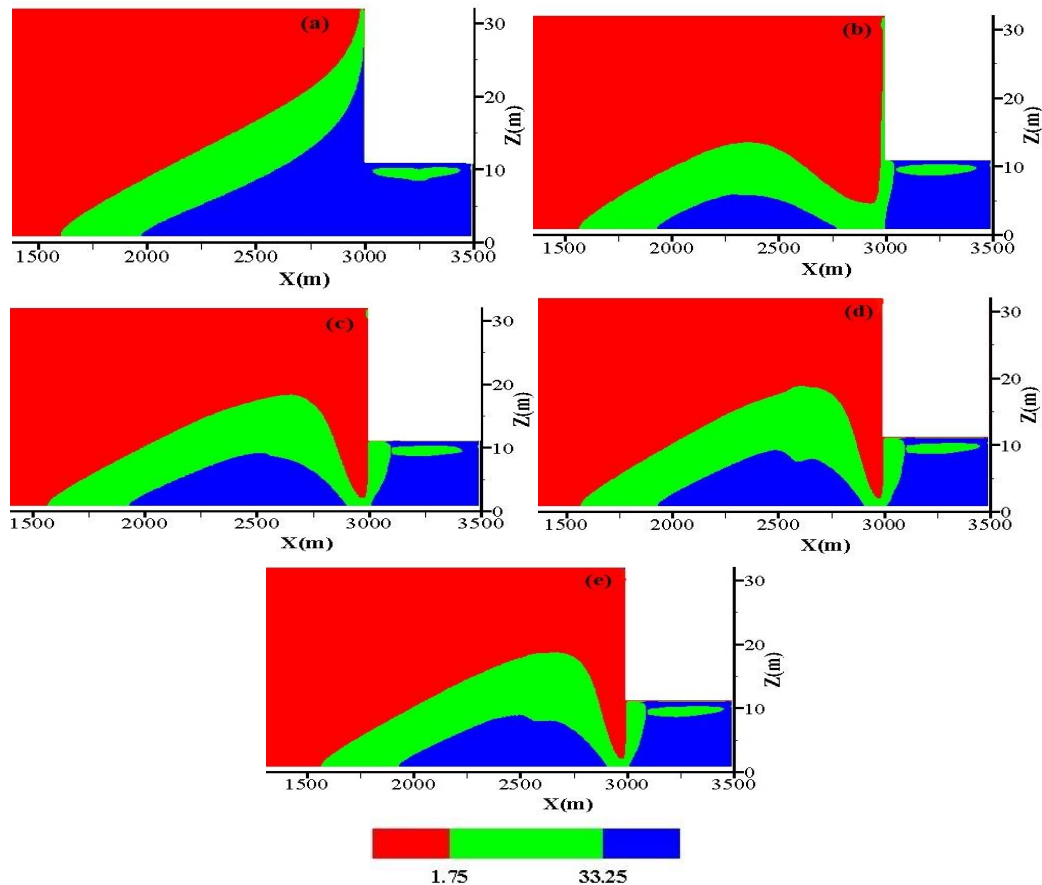
شکل ۵- پسروری آب شور در سناریوهای مختلف آبخوان S-0.01 بعد از گذشت ۱۰۰ روز از شروع نشت آب شیرین از رودخانه، (a). C=0.00025 (b). C=0.025 (c). C=2.5 (d). C=37.5 (e) و C=200 m<sup>2</sup>/d



شکل ۶- مقایسه (a) پنجه شوری، (b) حجم آب شور و (c) درصد کاهش حجم آب شور در مدل S-0.01 با ضرایب نشت مختلف رودخانه (در سناریوهای با ضریب آبگذری بالا به علت یکپارچگی گوه شوری در دو لایه بالایی و پایینی، تنها به تغییرات زمانی موقعیت پنجه شوری در لایه پایینی اشاره شده است. همچنین در محاسبه ضریب کاهش، کل حجم آب شور داخل آبخوان ملاک بوده است)



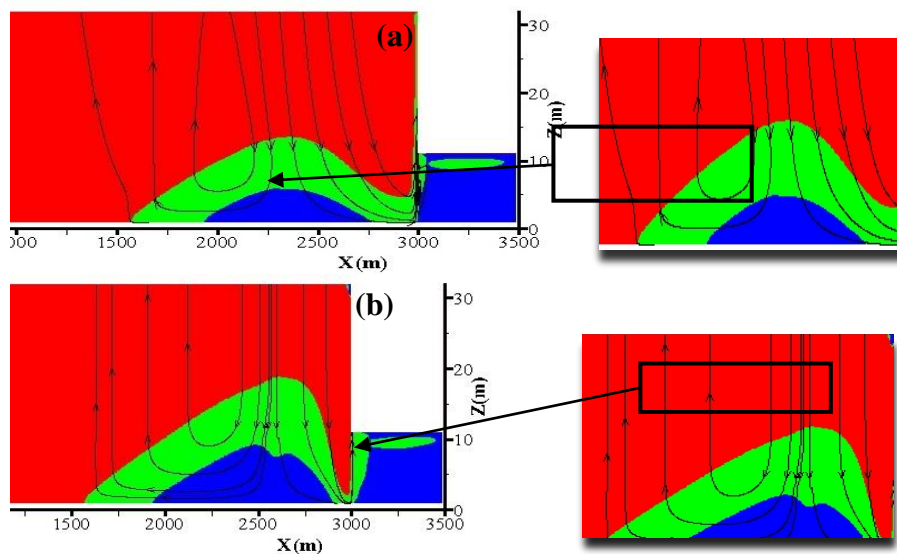
شکل ۷- مقایسه (a) پنجه شوری، (b) ضخامت ناحیه انتقالی، (c) حجم آب شور و (d) درصد کاهش حجم آب شور در مدل L-0.0001 با ضرایب نشست مختلف رودخانه



شکل ۸- پسروری آب شور در سناریوهای مختلف آبخوان L-0.0001 بعد از گذشت ۱۰ سال از شروع نشست آب شیرین از رودخانه، (a) C=0.0025، (b) C=0.25، (c) C=25، (d) C=375 و (e) C=2000 m<sup>2</sup>/d

وارد آبخوان شده کاهش خواهد یافت و از این رو فرصت بیشتری برای تماس با گوه شوری را خواهد داشت. همان طور که شکل (۹) نمایش می‌دهد، خروج موفق تر آب شیرین از پنجره تخلیه به سمت دریا، ناحیه بیشتری از نوک گوه شوری را رقیق کرده و در نتیجه گوه شوری در مجاورت محل خروج، آب شور کمتری خواهد داشت. البته بدیهی است که این ضریب آبگذری کوچک تر به مقدار خاصی محدود می‌شود چرا که میزان بسیار کوچک آن عدم نشت آب شیرین از رودخانه را سبب خواهد شد.

برای جستجوی علت عدم کاهش مشخصات گوه شوری با افزایش ضریب آبگذری در این مدل، خطوط جریان در دو سناریو با ضریب آبگذری  $0.25 \text{ m}^2/\text{d}$  و  $375$  در شکل (۹) ترسیم شده است. مطابق این شکل با افزایش ضریب آبگذری، حرکت غالب آب نشت کرده از رودخانه به صورت قائم می‌باشد. از این رو آب شیرین قبل از تخلیه، فرصت تقابل کمتری با گوه شوری مخصوصاً در نواحی نزدیک به بستر خواهد داشت و تنها می‌تواند ناحیه انتقالی را با رقیق‌سازی اندکی افزایش دهد. این درحالی است که اگر ضریب آبگذری کمتر انتخاب شود، سرعت آب شیرینی که

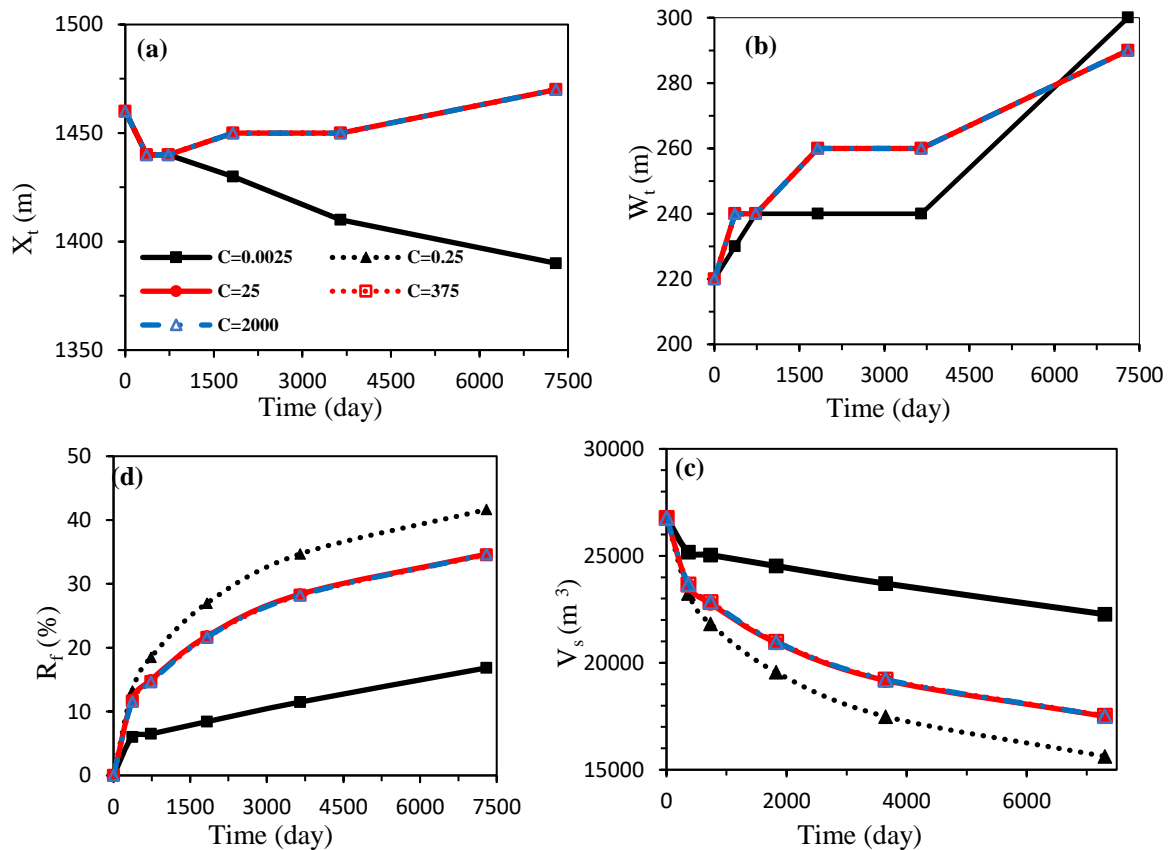


شکل ۹- وضعیت خطوط جریان در آبخوان بزرگ مقیاس  $L=0.0001$ . (a) ضریب آبگذری برابر با  $0.25 \text{ m}^2/\text{d}$  و (b) ضریب آبگذری برابر با  $375 \text{ m}^2/\text{d}$

ملاحظه ضریب آبگذری رودخانه نمی‌تواند نرخ کاهش مشخصات شوری داخل آبخوان را تسریع کند. به بیان دیگر افزایش هدایت هیدرولیکی مصالح بستر رودخانه که منجر به افزایش ضریب آبگذری و در نتیجه افزایش میزان آب شیرین نشتی می‌شود، تنها سرعت ورود آب شیرین را افزایش خواهد داد. این سرعت بالا زمان تماس آب شور موجود و آب شیرین نشت کرده را کاهش داده و از اثرپذیری آن می‌کاهد. از میان دامنه ضریب آبگذری متغیر از  $0.25 \text{ m}^2/\text{d}$  تا  $2000 \text{ m}^2/\text{d}$  که در این تحقیق به آن پرداخته شد، بیشترین تأثیر بر پسروری گوه شوری و کاهش حجم آب شور مربوط به ضریب آبگذری  $0.25 \text{ m}^2/\text{d}$  بوده است. مجدداً این نتیجه‌گیری با نتایج مطالعه *Mastrocicco et al., 2019* تطابق داشته و آن‌ها ضریب مناسب آبگذری برای رودخانه واقعی در ایتالیا را  $8/64 \text{ m}^2/\text{d}$  به دست آوردند. شبیه‌سازی در دو بعد، همگنی لایه آبدار و ثابت بودن خصوصیات رودخانه در طول، فرضیات پژوهش حاضر بوده است.

با افزایش نفوذپذیری لایه نیمه تراوا در آبخوان بزرگ مقیاس (مدل  $L=0.01$ ) و گسترش طول آن به کل آبخوان در ضریب آبگذری‌های پایین که حجم آب شیرین کمتری وارد سیستم می‌شود، تجمع آب شیرین در بالای لایه نیمه تراوا قابل مشاهده بوده که باعث ضخیم‌شدن ناحیه انتقالی در لایه بالا می‌شود. در این حالت به علت نشت کند آب به لایه پایینی، پنجه شوری اندکی پسروری داشته است. با افزایش نرخ سرعت ورود آب شیرین به آبخوان در ضریب آبگذری‌های بالا، آب در بالای لایه نیمه تراوا شیرین شده و نتیجتاً کاهش غلظت آب شور محسوس خواهد بود. دلایل ذکر شده در بخش فوق در اینجا نیز صادق بوده و سناریوهای با ضریب آبگذری بالاتر موفق تر عمل ننموده‌اند.

نتایج این بخش به گونه‌ای مشابه با نتایج مطالعات *Saeedpanah and Mohammadzade Roffchaei 2018* همخوانی دارد. آن‌ها نیز بیان نمودند که کاهش هدایت هیدرولیکی تأثیر بیشتری نسبت به افزایش آن روی آبخوان می‌گذارد. در این تحقیق مشخص شده است که افزایش قابل



شکل ۱۰- مقایسه (a) پنجه شوری، (b) ضخامت ناحیه انتقالی، (c) حجم آب شور و (d) درصد کاهش حجم آب شور در مدل L-0.01 با ضرایب نشت مختلف رودخانه

### نتیجه گیری

مدل‌های با نفوذپذیری پایین لایه نیمه تراوا، به علت عدم نشت قابل توجه آب شیرین از رودخانه، مشخصات گوه شوری شامل موقعیت پنجه شوری و حجم آب شور به کندی کاهش خواهد یافت. در مقابل ضخامت ناحیه انتقالی تقریباً ثابت بوده و حتی در برخی سناریوها افزایش یافته است. امتداد لایه نیمه تراوا تا مرز خشکی به عنوان حائلی برای عدم نشت به لایه محبوس زیری عمل خواهد نمود. بخش قابل توجهی از آب شیرین نشت کرده از رودخانه در لایه بالایی با اثرگذاری بر گوه شوری تشکیل شده در همان لایه به دریا تخلیه می‌شود و از این رو تأثیر غیرمحسوسی بر مشخصات شوری در نواحی زیر دریا از آبخوان خواهد داشت. هرچه نفوذپذیری این لایه افزایش یابد، تأثیر آن بر افزایش حجم آب شیرین در زیر دریا محسوس تر می‌شود. تحقیقات بیشتر در این زمینه و در فضای سه بعدی و ناهمگن آبخوان به ما در درک صحیح تر تبادل آب واقعی بین رودخانه و آبخوان کمک خواهد کرد. مدل سازی آبخوان در مقیاس آزمایشگاهی نیز با فراهم نمودن داده‌های مشاهداتی به کنترل صحت شبیه سازی عددی کمک شایانی خواهد نمود.

امروزه آبخوان‌های ساحلی در معرض تهاجم آب دریا بوده و اندرکنش آب دریا و آب شیرین موجود در آبخوان ساحلی، شوری آن را در پی خواهد داشت. رودخانه‌ها در مناطق ساحلی می‌توانند نقش مهمی در راستای احیای آبخوان ایفا کنند. به گونه‌ای که ساخت بندهای اصلاحی بر روی رودخانه‌ها و نفوذ آب شیرین از مخزن آن‌ها به داخل آبخوان امروزه به عنوان یکی از روش‌های تغذیه مصنوعی کارآمد و ارزان نسبت به سایر روش‌های کاهش حجم آب شور از نواحی ساحلی مانند پمپاژ آب شور و احداث حائل زیرزمینی شناخته می‌شود. مدلسازی ریاضی تبادل آب بین رودخانه و آبخوان به ما در درک مکانیزم نشت از بستر رودخانه کمک شایانی خواهند کرد. در تحقیق حاضر، مدل سازی ریاضی میزان شوری در آبخوان‌های فراساحلی (امتداد بخشی از آبخوان تا زیر دریا) به همراه نشت آب شیرین از رودخانه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که سه عامل هدایت هیدرولیکی لایه نیمه تراوا، طول این لایه و ضریب آبگذری رودخانه نقش اساسی در پسروری گوه شوری داخل آبخوان ایفا می‌کنند. به طوری که در

### REFERENCES

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.

- Atlabachew, A., Shu, L., Wu, P., Zhang, Y., Xu, Y., (2018) Numerical modeling of solute transport in a sand tank physical model under varying hydraulic gradient and hydrological stresses, *Hydrogeology Journal*, 26(6), 1-25.
- Badaruddin, S., Werner, A.D., Morgan, L.K., (2015) Water table salinization due to seawater intrusion, *Water Resources Research*, 51(10):8397-8408.
- Bakker, M., (2006) Analytic solutions for interface flow in combined confined and semi-confined coastal aquifers. *Advances in Water Resources*, 29(3): 417-425.
- Bakker, M., Miller, A., Morgan, L., (2017) Evaluation of analytic solutions for steady interface flow where the aquifer extends below the sea. *Journal of Hydrology*, 551, 660-664.
- Christy, R.M., Lakshmanan, E., (2017) Percolation pond as a method of managed aquifer recharge in a coastal saline aquifer: A case study on the criteria for site selection and its impacts, *Journal of Earth System Science*, 126(66).
- Diersch, H.-J.G., Kolditz, O., (2002) Variable density flow and transport in porous media: Approach and challenges. *Advances in Water Resources*, 25 (8-12), 439-459.
- Feseker, T., (2007) Numerical studies on saltwater intrusion in a coastal aquifer in northwestern Germany, *Hydrogeology Journal*, 15, 267-279.
- Goswami, R.R., Clement, T.P., (2007) Laboratory-scale investigation of saltwater intrusion dynamics, *Water Resources Research*, 43, W04418.
- Harbaugh A.W., (2005) MODFLOW-2005, the U. S. Geological Survey modular ground water model- the ground-water flow process, *U. S. Geological Survey Techniques and Methods*, Book 6, Chapter A16, Reston, Virginia.
- 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.
- Ketabchi, H., Mahmoodzadeh, D., Farhoudi-Hafdaran, R., (2017) Estimation of wetland-aquifer exchanges (Case study of Kaniborazan wetland), *Journal of Ecohydrology*, 4(3): 699-709. (In Persian)
- Laattoe, T., Werner, A.D., 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*, Volume 7, Chapter 14, pp 295-313.
- Langevin, C.D., Thorne Jr, D.T., Dausman, A.M., Sukop, M.C., Guo, W., (2008) SEAWAT version 4: a computer program for simulation of multi-species solute and heat transport (No. 6-A22). Geological Survey (US).
- Lu, C., Shi, W., Xin, P., Wu, J., Werner, AD., (2017) Replenishing an unconfined coastal aquifer to control seawater intrusion: Injection or infiltration?, *Water Resources Research*, 53(6): 4775-4786.
- Lu, Ch., Chen, Y., Zhang, Ch., Luo, J., (2013) Steady-state freshwater-seawater mixing zone in stratified coastal aquifers, *Journal of Hydrology*, 505: 24-34.
- Mahmoodzadeh, D., Karamouz, M., (2019) Seawater intrusion in heterogeneous coastal aquifers under flooding events, *Journal of Hydrology*, 568:1118-1130.
- Mahmoodzadeh, D., Ketabchi, H., Ataie-Ashtiani, B., (2016) Effects of sea level rise and recharge rate variations on seawater intrusion in confined aquifer, *Journal of Hydraulics*, 10(4):1-15. (In Persian)
- Mastrocicco, M., Busico, G., Colombani, N., Vigliotti, M., Ruberti, D., (2019) Modelling actual and future seawater intrusion in the Variconi coastal wetland (Italy) due to climate and landscape changes, *Water*, 11, 1502. 1-15.
- Mehdizadeh, S. S., Karamalipour, S. E., Asoodeh, R., (2017) Sea level rise effect on seawater intrusion into layered coastal aquifers (simulation using dispersive and sharp-interface approaches), *Ocean & Coastal Management*, 138, 11-18.
- Motallebain, M., Ahmadi, H., Raoof, A., Cartwright, N., (2019) An alternative approach to control saltwater intrusion in coastal aquifers using a freshwater surface recharge canal, *Journal of Contaminant Hydrology*, 222: 56-64.
- Post, V.E., Vandenbohede, A., Werner, A.D., Teubner, M.D., (2013) Groundwater ages in coastal aquifers, *Advances in Water Resources*, 57: 1-11.
- Saeedpanah, I., Mohammadzade Roofchae, S., (2018) Modelling the effect of water fall in the river level on unsteady groundwater flow in leaky aquifer by separation of variables, *Journal of Ecohydrology*, 5(3): 969-976. (In Persian)
- Solorzano-Rivas, S., Werner, A.D., (2018) On the representation of subsea aquitards in models of offshore fresh groundwater, *Advances in Water Resources*, 112: 283-294.
- Todd, D., Mays, L., (2005). *Groundwater Hydrology*, John Wiley & Sons, Inc. Third Edition.
- 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.
- Zheng, C., Wang, P.P., (1999) MT3DMS: a modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reactions of contaminants in groundwater systems; documentation and user's guide. Alabama Univ University. Contract report SERDP-99-1, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, Mississippi.