



Effect of Bed Slope on Seawater Intrusion into Confined Coastal Aquifer

M. Sasani¹ and S.S. Mehdizadeh^{2*}

Abstract

Excessive exploration of groundwater causes seawater intrusion (SWI) in coastal aquifers. The purpose of this study is to investigate the effect of aquifer bed slope on SWI characteristics including salt wedge toe position, thickness of mixing zone and seawater volume in the aquifer. Different scenarios under various bed slopes and directions were defined and numerical dispersive SEAWAT code was used for modeling. Two different boundary conditions (i.e. constant head and constant flux) were also applied to freshwater inflow at landside. The simulation results demonstrated that in the confined aquifers with landside constant flux, the SWI extent and thickness of mixing zone have increased when the slope changes from a positive value (i.e. longitudinal slope toward the sea) to negative amount (i.e. longitudinal slope toward the land). The results of this study showed that when the aquifer bed is considered flat, the SWI specifications including salt wedge toe position, mixing zone thickness at bed and saline water volume were lower than in cases with negative slope and higher than in cases with positive slope. Type of freshwater inflow at land boundary also influenced the results. In confined aquifers, when land boundary condition was changed from constant flux to constant head, salt wedge characteristics were not significantly changed. Finally, variation in the aquifer bed slope affect the gravity factor (potential head) in the related equations accompanied with pressure head. This plays a key role on SWI specifications in confined coastal aquifers.

Keywords: Seawater Intrusion, Confined Coastal Aquifer, SEAWAT Model, Toe Position, Mixing Zone Thickness.

Received: March 31, 2019

Accepted: June 27, 2019

تأثیر تغییرات شیب طولی بستر بر پیشروی شور در آبخوان تحت فشار ساحلی

مریم ساسانی^۱ و سیدسجاد مهدی زاده^{۲*}

چکیده

بهره برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی سبب پیشروی آب شور دریاها به سمت آبخوان‌های ساحلی می‌شود. پژوهش حاضر به بررسی اثر تغییر شیب بستر آبخوان بر مشخصات گوه شور شامل (۱) ضخامت ناحیه انتقالی، (۲) موقعیت پنجه شور و (۳) حجم آب شور آبخوان می‌پردازد. بدین منظور از کد عددی SEAWAT استفاده شده و با تعریف سناریوهای مختلفی با تغییر در اندازه و جهت شیب طولی بستر، رفتار گوه شور در یک آبخوان تحت فشار و بزرگ مقیاس ساحلی مشخص شده است. در این سناریوها به منظور آنالیز حساسیت، نوع ورود جریان از مرز خشکی و ضخامت آبخوان نیز متفاوت لحاظ شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که با شرایط دبی ثابت در مرز خشکی، پیشروی شور به سمت آبخوان و ضخامت ناحیه انتقالی در بستر با تغییر شیب از مثبت (شیب طولی به سمت دریا) به منفی (شیب طولی به سمت خشکی) افزایش یافته که افزایش حجم آب شور را در پی داشته است. از این رو مسطح در نظر گرفتن بستر مقدار پنجه شور، ضخامت ناحیه انتقالی در بستر و حجم آب شور را کمتر از سناریوهای مشابه با شیب منفی و بیشتر از سناریوهای مشابه با شیب مثبت پیش‌بینی می‌کند. نوع شرط مرزی ورودی جریان آب شیرین نیز بر نتایج تأثیرگذار است، به طوری که با تغییر مرز خشکی از دبی ثابت به هد ثابت، مشخصات گوه شور تغییرات کمتری داشته است. تغییر در شیب بستر سبب اثرگذاری در عامل ثقل (بار پتانسیل) در روابط حاکم خواهد شد و به همراه بار فشار نقش اساسی در این رخداد ایفا می‌کند.

کلمات کلیدی: پیشروی شور، آبخوان تحت فشار ساحلی، مدل SEAWAT، پنجه شور، ضخامت ناحیه انتقالی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۱/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۴/۶

1- M.Sc. Graduate of Water and Hydraulic Structures Engineering, Department of Civil Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email: Saj.Mehdizadeh@iauctb.ac.ir, Sa.Mehdizadeh@gmail.com

*- Corresponding Author

۱- دانش‌آموخته کارشناس ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، تهران، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، تهران، ایران.
*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

موقعیت پنجه شوری محدود شده بود. آنها با استفاده از شبیه‌سازی با مدل SUTRA نشان دادند که پنجه شوری به شیب‌های ملایم بستر حساس نبوده، با این‌وجود با افزایش قابل ملاحظه شیب، پنجه شوری به عقب خواهد رفت. (Koussis et al., 2012) نیز به بررسی و ارائه راه حل تحلیلی برای تعیین مرز مشترک آب شور و شیرین در آبخوان‌های ساحلی آزاد شیب‌دار با پمپاژ و تغذیه ناشی از نزولات جوی پرداختند. پس از آنها عمده تحقیقات صورت گرفته با لحاظ نمودن شیب ساحل یا بستر آبخوان مربوط به اثرگذاری افزایش تراز آب دریا بر میزان پیشروی شوری بوده است. به طور مثال Ataie-Ashtiani et al. (2013) به بررسی اهمیت در نظر گرفتن شیب ساحل (عمود بر خط ساحلی) در میزان پیشروی آب دریا به داخل آبخوان پرداختند. آنها نشان دادند که پارامتر شیب ساحل و میزان آب شوری که در نتیجه افزایش تراز آب دریا روی ساحل خواهد آمد، یک عامل کنترل کننده در موقعیت پنجه شوری در آبخوان‌های آزاد ساحلی می‌باشد. (Mazi et al., 2013) نیز به بررسی تأثیر افزایش تراز آب دریا بر میزان پیشروی شوری در آبخوان آزاد با شیب‌های مختلف بستر پرداختند. استفاده از رابطه تحلیلی و بررسی تنها موقعیت پنجه شوری را می‌توان از محدودیت‌های آن پژوهش به حساب آورد. در ارتباط با اثرگذاری افزایش تراز آب دریا بر میزان پیشروی شوری برای دو شرط مرزی هد ثابت^۱ و دبی ثابت^۲ در خشکی، آنها بیان کردند که رابطه افزایش پیشروی با افزایش تراز آب دریا غیرخطی است و نرخ آن به سه عامل عمق آبخوان، نرخ افزایش تراز آب دریا و میزان دبی آب شیرین ورودی وابسته می‌باشد. همچنین، (Koussis et al., 2015) رابطه تحلیلی ارائه شده برای موقعیت پنجه شوری توسط (Koussis et al., 2012) را با اضافه نمودن اثر پراکندگی هیدرودینامیکی مطابق با مطالعه (Pool and Carrera, 2011) بسط داده و آن را برای دو آبخوان واقعی در سواحل مدیترانه با لحاظ نمودن شیب بستر امتحان نمودند. نتیجه تحقیق آنها نیز حاکی از عدم حساس بودن پنجه شوری در شیب‌های کوچک بستر می‌باشد. جامع‌ترین بررسی در ارتباط با افزایش تراز آب دریا در آبخوان‌های شیب دار ساحلی مربوط به مطالعه (Ketabchi et al., 2016) می‌باشد. آنها با آنالیز حساسیتی جامع با استفاده از روابط تحلیلی و مدل‌سازی عددی نشان دادند که کمترین حساسیت موقعیت پنجه شوری به دو پارامتر نسبت اختلاف چگالی بین آب شور و شیرین و شیب بستر آبخوان می‌باشد. هرچند تمامی تحلیل‌های مرتبط، برای شیب بستر ۰/۰۱ بوده و موقعیت پنجه شوری نیز تنها شاخص در نظر گرفته شده بود. پس از آنها (Lu et al., 2016) راه حلی تحلیلی برای پیشروی آب دریا در آبخوان‌های آزاد و تحت فشار ساحلی با لحاظ شیب بستر بر مبنای فرضیات دوپویی-فورشه‌ایمر^۳ ارائه نموده و نشان دادند که برای یک دبی ثابت در مرز خشکی، موقعیت پنجه شوری به هندسه و

رشد جمعیت و توسعه جوامع بشری منجر به تقاضای مصرف بیشتر آب شده است. این امر حفاظت از منابع آب زیرزمینی در مقابل آلاینده‌ها نظیر نفوذ آب دریا در آبخوان‌های ساحلی را امری ضروری می‌نماید. در شرایط طبیعی آب‌های شیرین زیرزمینی موجود در سفره‌های آبدار آزاد و یا تحت فشار ساحلی به دریاها تخلیه می‌شوند. بهره‌برداری بیش از حد از آبخوان‌های ساحلی و یا تغییرات اقلیمی بر روی گرادیان هیدرولیکی تأثیر نموده و سبب می‌گردد تا آب دریا در سفره‌های آب‌های زیرزمینی پیشروی نماید (Todd and Mays, 2005; Farhoudi-Hafdaran and Ketabchi, 2018).

شبیه‌سازی عددی از روش‌های سودمند در مطالعه جریان آب‌های زیرزمینی و انتقال آلاینده‌ها به‌شمار می‌رود (Ataie-Ashtiani et al., 2006). در چند دهه اخیر، پیش‌بینی صحیح میزان پیشروی شوری در آبخوان‌های ساحلی با استفاده از مدل‌های ریاضی پیشرفت چشمگیری نموده است. در تحقیقات صورت پذیرفته ابتدا سعی شده است با انجام یکسری فرضیات ساده‌سازی، معادله‌ای تحلیلی برای پیشروی یا پیشروی شوری ارائه شود (به طور مثال می‌توان به راه‌حل‌های تحلیلی ارائه شده توسط (Kacimov and Obnosov, 2001) و (Akylas et al., 2006) اشاره کرد). (Chesnaux, 2015) و (Rathore et al., 2018) برای تعیین مرز مشترک آب شور و شیرین در آبخوان‌های ساحلی اشاره نمود. پیامدهای فعالیت‌های بشری به طور مثال پمپاژ بیش از حد و یا اثر تغییر اقلیم (افزایش تراز آب دریا) بر رفتار گوه شوری نفوذ کرده داخل آبخوان نیز به طور گسترده‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است که از میان پژوهش‌های موجود می‌توان به مطالعه بررسی و توسعه راهبردهای بهینه‌سازی پمپاژ از چاه در آبخوان‌های ساحلی (Cheng et al., 2000)، ارزیابی پتانسیل افزایش تراز آب دریا بر آسیب پذیری آب شیرین در آبخوان ساحلی (Melloul and Collin, 2006)، بررسی تأثیر تغییرات نرخ تغذیه و افزایش تراز آب دریا برای آبخوانی در جنوب کالیفرنیا (Payne, 2010)، بررسی تأثیر افزایش تراز آب دریا بر نفوذ شوری در آبخوان‌های لایه‌بندی ساحلی (Mehdizadeh et al., 2017) و بررسی اثر موج‌های ناشی از سیلاب و افزایش تراز آب دریا در آبخوان‌های ناهمگن ساحلی (Mahmoodzadeh and Karamouz, 2019) اشاره نمود. در تمامی این تحقیقات بستر آبخوان بدون شیب لحاظ شده است.

تحقیق (Abarca et al., 2007) را می‌توان از نخستین مطالعاتی دانست که اثرگذاری شیب بستر آبخوان بر پیشروی شوری در آن دیده شده است. هرچند این بررسی تنها به آبخوان تحت‌فشار و مقایسه

۳-۲- تعریف سناریوهای شبیه‌سازی

به منظور ایجاد شرایط متنوع، ۲۳ سناریو در قالب ۴ حالت مختلف مطابق جدول ۲ با تغییر در مقدار شیب بستر تعریف شده است. انتخاب شیب‌ها بر اساس شیب‌های متداول انتخابی در مطالعات پیشین بوده است. در این جدول برای نامگذاری مدل‌ها از حروف اختصاری استفاده شده است. برای بیان شرط مرزی هد ثابت از CH و دبی ثابت از CF استفاده شده است. عدد ابتدایی بعد از آن، معرف ضخامت آبخوان می‌باشد. B برای نشان دادن زاویه شیب بستر و علامت P برای زاویه مثبت (زاویه از محور X در خلاف جهت عقربه‌های ساعت: شیب طولی به سمت دریا)، N زاویه منفی (زاویه از محور X در جهت عقربه‌های ساعت: شیب طولی به سمت مرز خشکی) و پس از آن مقدار شیب آورده شده است. همچنین در کلیه سناریوهای ۱ تا ۱۹ (۱-۱) تا ۳-۱۹) سطح آبخوان تحت فشار کاملاً مسطح لحاظ شده است. در سناریوهای ۲۰ تا ۲۴ به منظور تطابق مناسب‌تر با شرایط واقعی و چینه‌شناسی زمین، سطح آبخوان نیز شیب‌دار لحاظ شده است. در این چهار سناریو علامت اختصاری di به نام آنها اضافه شده است.

۴-۲- تعریف پارامترهای معرف شوری

سه مشخصه موقعیت پنجه شوری، ضخامت ناحیه انتقالی و حجم آب شور معرف پیشروی شوری در آبخوان لحاظ شده‌اند. موقعیت پنجه شوری (X_t) فاصله محل تماس خط هم‌غلظت $0.05C_0$ با بستر آبخوان تا مرز دریا می‌باشد که در آن C_0 معرف غلظت شوری آب دریا است. ناحیه انتقالی، ناحیه باریکی با عرض متغیر بین آب شور و شیرین است که در روند شکل‌گیری گوه شوری به محدوده غلظت‌های بیشتر از ۵ درصد آب دریا و کمتر از ۹۵ درصد آب دریا اطلاق می‌شود. از آنجاییکه ضخامت ناحیه انتقالی (W_t) در ارتفاع آبخوان ممکن است با هم تفاوت‌هایی داشته باشد، این ضخامت در سه قسمت بستر آبخوان، وسط و بالای آبخوان مطابق شکل ۲ اندازه‌گیری شده است. در آخر نیز حجم آب شور (V_s) به حجم آب آبخوان که در آن غلظت شوری بیشتر از ۹۵ درصد غلظت شوری آب دریا می‌باشد اطلاق شده است. به جهت مقایسه میزان تغییرات شاخص‌های بیان شده در هر سناریو با سناریوی مبنا، این سه شاخص مطابق روابط زیر بی‌بعد شده‌اند تا درصد افزایش و یا کاهش شاخص‌های بیان شده مشخص گردد:

$$PX_t = \left(\frac{X_{ti} - X_{t0}}{X_{t0}} \right) \times 100 \quad (2)$$

$$PW_t = \left(\frac{W_{ti} - W_{t0}}{W_{t0}} \right) \times 100 \quad (3)$$

$$PV_s = \left(\frac{V_{si} - V_{s0}}{V_{s0}} \right) \times 100 \quad (4)$$

Table 1- Fluid and soil properties at confined coastal aquifer

جدول ۱- خصوصیات خاک و سیال آبخوان تحت فشار

Parameter	Value
Aquifer length, L (m)	1000
Aquifer height, H (m)	30 or 40
Hydraulic conductivity, K (m/d)	10
Longitudinal dispersivity, α_L (m)	1
Transverse dispersivity, α_T (m)	0.1
Molecular diffusion, D_m (m ² /d)	0
Effective porosity, n_e	0.3
Sea constant-head, H_s (m)	40
Land constant-head, H_f (m)	41.4
Land constant-flux, Q (m ³ /d)	0.3
Seawater density, ρ_s (kg/m ³)	1025
Freshwater density, ρ_f (kg/m ³)	1000
Seawater concentration, C_0 (kg/m ³)	35
Bed/surface slop, β	variable

جزئیات روابط انتقال آلاینده‌ها و روش‌های حل معادلات در بسیاری از مراجع بیان شده و در اینجا به جهت خلاصه‌نویسی از تکرار آن خودداری می‌شود (به طور مثال نگاه کنید به Langevin et al. (2008)). در این مطالعه در حل معادله جریان و آلاینده به ترتیب از الگوریتم‌های PCG2^۲ و GCC^۵ استفاده شده است. بسیاری از محققان نشان داده‌اند اندازه‌ی سلول‌ها یک فاکتور کلیدی برای تولید خروجی‌های معتبر می‌باشد. در حالت کلی اندازه سلول بر پایه ضابطه‌ی رایج عدد پکلت^۶ تخمین زده می‌شود. طبق این قاعده سائز ابتدایی سلول باید در رابطه‌ی اطمینان زیر جواب دهد (Voss and Souza, 1987):

$$P_e = \frac{u\Delta L}{D_m + \alpha_L u} \cong \frac{\Delta L}{\alpha_L} \quad (1)$$

که در آن P_e عدد پکلت، ΔL [L] سائز هر سلول، D_m [L²T⁻¹] ضریب پخش مولکولی و α_L ضریب انتشار طولی است. مطابق رابطه فوق، طول هر سلول (ΔX) برابر با ۲ متر و ارتفاع هر سلول (ΔZ) برابر با ۰/۴ متر به دست خواهد آمد. شبکه مدل‌سازی شامل ۵۰۰ ستون و ۵۰ تا ۱۵۰ ردیف است که تعداد سلول‌ها با توجه به شیب بستر آبخوان متغیر می‌باشد. جهت رسیدن به حالت دائمی (با معیار ثابت ماندن موقعیت پنجه شوری و مساحت ناحیه انتقالی) آبخوان بزرگ مقیاس در تمامی سناریوها حداقل برای یک دوره ۳۰۰ ساله شبیه‌سازی شده است. در تمامی این سناریوها برای معادله جریان گام زمانی ۱۰ روز و برای معادله انتقال آلاینده گام زمانی ۵ روز در نظر گرفته شده است.

Table 2- Definition of different scenarios
 جدول ۲- مشخصات سناریوهای تعریف شده در این تحقیق

NO.	Scenario name	Landside head (m)	Landside flux (m ³ /d)	Bed slope (%)	Surface slope (%)
1-1	CF-40-BN0.02	----	0.3	-0.02	----
1-2	CF-40-BN0.01	----	0.3	-0.01	----
1-3	CF-40-BN0.005	----	0.3	-0.005	----
1-4*	CF-40-B0	----	0.3	0	----
1-5	CF-40-BP0.005	----	0.3	0.005	----
1-6	CF-40-BP0.01	----	0.3	0.01	----
1-7	CF-40-BP0.02	----	0.3	0.02	----
2-8	CF-30-BN0.02	----	0.3	-0.02	----
2-9	CF-30-BN0.01	----	0.3	-0.01	----
2-10	CF-30-BN0.005	----	0.3	-0.005	----
2-11*	CF-30-B0	----	0.3	0	----
2-12	CF-30-BP0.005	----	0.3	0.005	----
2-13	CF-30-BP0.01	----	0.3	0.01	----
2-14	CF-30-BP0.02	----	0.3	0.02	----
3-15	CH-30-BN0.01	41.4	----	-0.01	----
3-16	CH-30-BN0.005	41.4	----	-0.005	----
3-17*	CH-30-B0	41.4	----	0	----
3-18	CH-30-BP0.005	41.4	----	0.005	----
3-19	CH-30-BP0.01	41.4	----	0.01	----
4-20	CF-30di-BP0.01 P0.01	----	0.3	0.01	0.01
4-21	CF-30di-BN0.01 N0.01	----	0.3	-0.01	-0.01
4-22	CF-30di-BN0.01 N0.005	----	0.3	-0.01	-0.005
4-23	CF-30di-BN0.01 P0.005	----	0.3	-0.01	0.005

* سناریوهای مبنا: Base scenarios

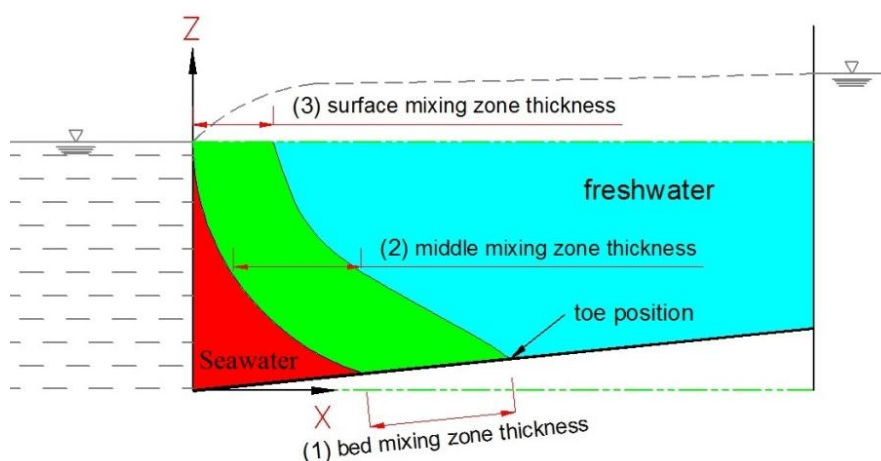


Fig. 2- Presentation of three measured characteristics in the current study
 شکل ۲- نمایش سه مشخصه اندازه‌گیری شده در مطالعه حاضر

در این روابط V_{s0} و W_{t0} ، X_{t0} به ترتیب موقعیت پنجه شوری، ضخامت ناحیه انتقالی و حجم آب شور در این روابط و V_{si} و W_{ti} ، X_{ti} به ترتیب به موقعیت پنجه شوری، ضخامت ناحیه انتقالی و حجم آب شور در سناریوهای مبنا و V_{si} و W_{ti} ، X_{ti} به ترتیب به موقعیت پنجه شوری، ضخامت ناحیه انتقالی و حجم آب شور در سناریوهای شیب‌دار می‌باشند.

۳- نتایج و تحلیل نتایج

ضخامت ناحیه انتقالی در بستر آبخوان به ۳٪ و تغییرات حجم آب شور به ۸٪ محدود شده است.

حالت چهارم، آبخوان با ضخامت ۳۰ متر و با دبی ثابت در مرز خشکی و با اعمال همزمان شیب‌های مختلف در سطح و بستر آبخوان: در شکل ۷، مقایسه سناریوی ۴-۲۰ با مدل ۲-۱۳ و سناریوهای ۴-۲۱ تا ۴-۲۳ با مدل ۲-۹ به علت تشابه در تمامی مشخصات غیر از شیب ساحل صورت پذیرفته است. همچنانکه نشان داده شده است، تغییرات شیب سطح آبخوان نتوانسته تغییر محسوسی در مشخصات گوه شوری اعمال نماید و بیشینه نرخ افزایش یا کاهش در سه مشخصه موقعیت پنجه شوری، ضخامت ناحیه انتقالی در بستر و حجم آب شور به ترتیب به ۵/۵٪، ۸/۳٪ و ۲/۶٪ محدود شده است.

مطابق آنچه در بخش قبل مشاهده گردید، با تغییر شیب بستر آبخوان از مثبت (به طرف دریا) به منفی (به طرف خشکی) تمامی مشخصات گوه شوری شامل پنجه شوری، ضخامت ناحیه انتقالی و حجم آب شور افزایش یافته‌اند. علت این امر در مقدار هد (بار) هیدرولیکی در آبخوان در محدوده مرز دریا دیده شده است. در جریان آب زیرزمینی هد هیدرولیکی مشتمل بر بار فشار و بار پتانسیل (ثقل) خواهد بود. زمانی که شیب طولی بستر آبخوان به سمت مرز خشکی می‌باشد، نقش ثقل و در نتیجه بار پتانسیل پررنگ‌تر شده (مشابه جریان سطحی در رودخانه) و گرادیان هیدرولیکی موجود در نواحی نزدیک به دریا کاهش خواهد یافت. از این‌رو گوه شوری فرصت بیشتری برای پیشروی خواهد داشت. برای موقعیت پنجه شوری با شیب مثبت بستر آبخوان، نتایج مشابهی توسط Abarca et al. (2007) نیز گزارش شده است. در آن مطالعه نیز با افزایش شیب به سمت دریا پنجه شوری به صورت نامحسوسی به سمت دریا عقب‌نشینی داشته است. به همین طریق می‌توان در مورد چرایی کاهش اثر شیب بستر بر مشخصات شوری با کاهش ضخامت آبخوان تحلیلی مشابه ارائه داد. همانطور که در بخش قبل ملاحظه شد کاهش ضخامت آبخوان تحت فشار، سبب کاهش نسبی اثر شیب بر کلیه مشخصات گوه شوری شده است. با کاهش ضخامت لایه آبدار، بر میزان بار فشار به علت افزایش سرباره و افزایش فشار افزوده می‌شود (تحت گرادیان ثابت هیدرولیکی). از این‌رو نقش عامل ثقل (شیب طولی) محسوس نخواهد بود و بنابراین نمی‌تواند بر مشخصات گوه شوری تأثیر قابل ملاحظه‌ای بگذارد. مجدداً آنالیز حساسیت ارائه شده توسط Abarca et al. (2007) بر روی موقعیت پنجه شوری نتایج مشابهی داشته است. آنها نیز به این نتیجه رسیدند که افزایش ضخامت آبخوان افزایش پیشروی شوری را در پی خواهد داشت. هرچند در آن تحقیق با توجه به مقدار شیب انتخابی، این تغییر آن‌چنان محسوس نبوده است.

حالت اول، آبخوان با ضخامت ۴۰ متر و با دبی ثابت ورود آب شیرین در مرز خشکی: تأثیر تغییر شیب بر میزان مشخصات نفوذ شوری برای ۷ سناریوی تعریفی در آبخوان با ضخامت ۴۰ متر (سناریوهای ۱-۱ تا ۱-۷ از جدول ۲) در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. بررسی‌ها حاکی از پیشروی آب شور به سمت آبخوان با تغییر شیب از ۰/۰۲+ به ۰/۰۲- می‌باشد که سبب افزایش حجم آب شور داخل آبخوان می‌شود. در ارتباط با کمی‌سازی پارامترهای محاسباتی، می‌توان اشاره نمود که مسطح در نظر گرفتن بستر، موقعیت پنجه شوری را نسبت به آبخوان با شیب بستر ۰/۰۲+، ۲۱٪ بیشتر و نسبت به آبخوان با شیب ۰/۰۲-، ۳۲٪ کمتر پیش‌بینی نموده است. به همین ترتیب ضخامت ناحیه انتقالی در بستر آبخوان بیشترین تأثیر را از تغییر شیب پذیرفته به طوری که مقدار آن برای شیب ۰/۰۲- تا ۳۷٪ کمتر و برای شیب ۰/۰۲+ تا ۲۲٪ بیشتر از آبخوان با بستر مسطح بدست آمده است. این درحالی است که با فاصله گرفتن از بستر آبخوان (در جهت ارتفاع آبخوان)، اثرپذیری مشخصات گوه شوری از شیب بستر کاهش یافته به‌طوری‌که ضخامت وسط و بالای ناحیه انتقالی با تغییر شیب تقریباً ثابت مانده‌اند (شکل (b) ۴). نهایتاً حجم آب شور داخل آبخوان نیز برای شیب ۰/۰۲- تا ۱۴٪ کمتر و برای شیب ۰/۰۲+ تا ۱۲٪ بیشتر از مقداری که از آبخوان با بستر مسطح بدست آمده پیش‌بینی شده است.

حالت دوم، آبخوان با ضخامت ۳۰ متر و با دبی ثابت ورود آب شیرین در مرز خشکی: سناریوها در این حالت دقیقاً شبیه شرایط حالت پیش بوده و تنها ضخامت آبخوان در آن نسبت به حالت اول از ۴۰ به ۳۰ متر کاهش یافته است (سناریوهای ۲-۸ تا ۲-۱۴ از جدول ۲). تغییرات مشخصات نفوذ شوری برای این حالت در شکل ۵ ارائه شده است. همانطور که این شکل نشان می‌دهد مطالب بیان شده برای حالت اول در اینجا نیز صادق بوده با این تفاوت که نرخ تغییرات سه مشخصه گوه شوری با کاهش ارتفاع آبخوان، روندی کاهشی داشته و این بدان معنی است که با کاهش ضخامت لایه آبدار از اثرپذیری گوه شوری با تغییرات شیب بستر کاسته شده است.

حالت سوم، آبخوان با ضخامت ۳۰ متر و با هد ثابت در مرز خشکی: سناریوها در این حالت (۳-۱۵ تا ۳-۱۹) دقیقاً شبیه شرایط حالت دوم بوده و تنها شرایط مرزی ورود جریان در سمت خشکی از دبی ثابت به هد ثابت تغییر یافته است. نمودارهای مشخصات نفوذ شوری در این حالت در شکل ۶ ارائه شده است. مطابق این شکل تغییرات مشخصات گوه شوری با تغییر شیب از ۰/۰۱+ به ۰/۰۱- نسبت به سناریوها در حالت دوم کمتر بوده است. به‌طوری‌که درصد تغییرات بیشینه برای موقعیت پنجه شوری در کلیه سناریوهای این حالت به ۱/۵٪ و تغییرات

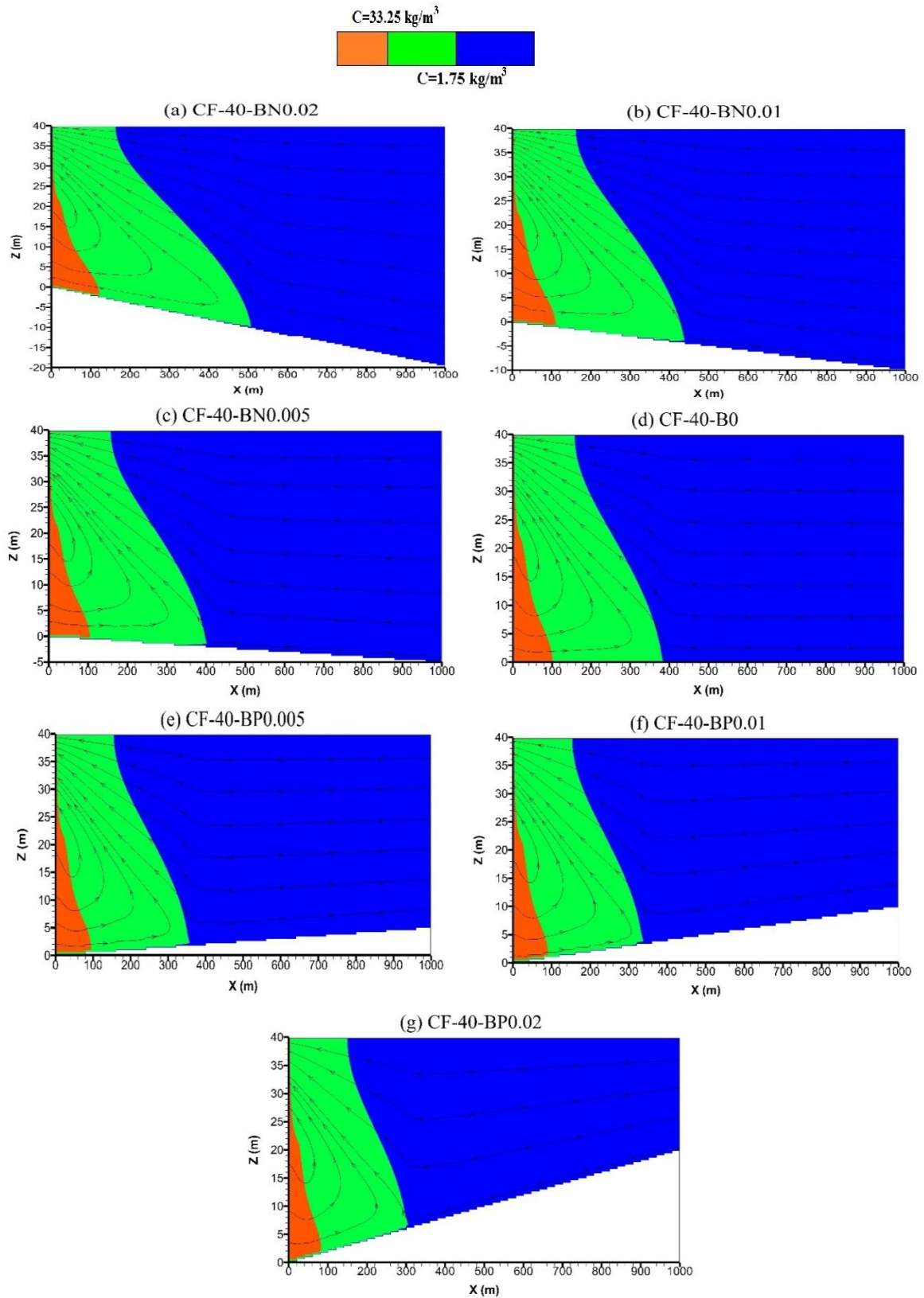


Fig. 3- Distribution of saline water inside 40m high confined aquifers for different scenarios

شکل ۳- توزیع شوری در سناریوهای مختلف در آبخوان با ضخامت ۴۰ متر

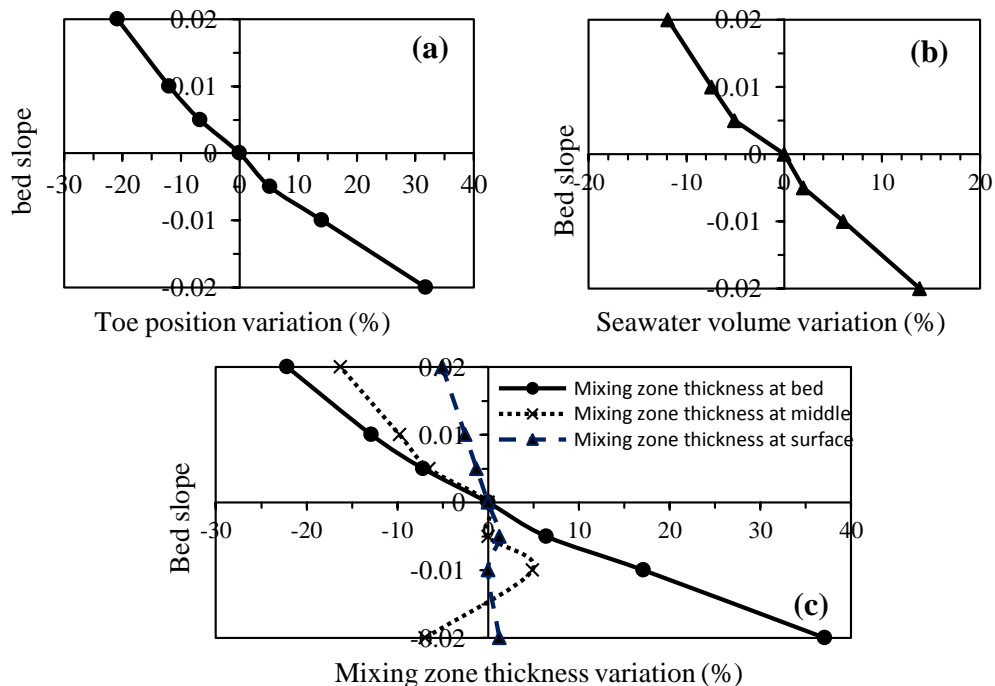


Fig. 4- Variation on dimensionless salt wedge characteristics in 40m high confined aquifers with landside constant flux; (a) Toe position (b) Seawater volume (c) Mixing zone thickness

شکل ۴- تغییرات مشخصات بی بعد شوری در آبخوان با ضخامت ۴۰ متر و با دبی ثابت در مرز خشکی، (a) موقعیت پنجه شوری، (b) حجم آب شور و (c) ضخامت ناحیه انتقالی

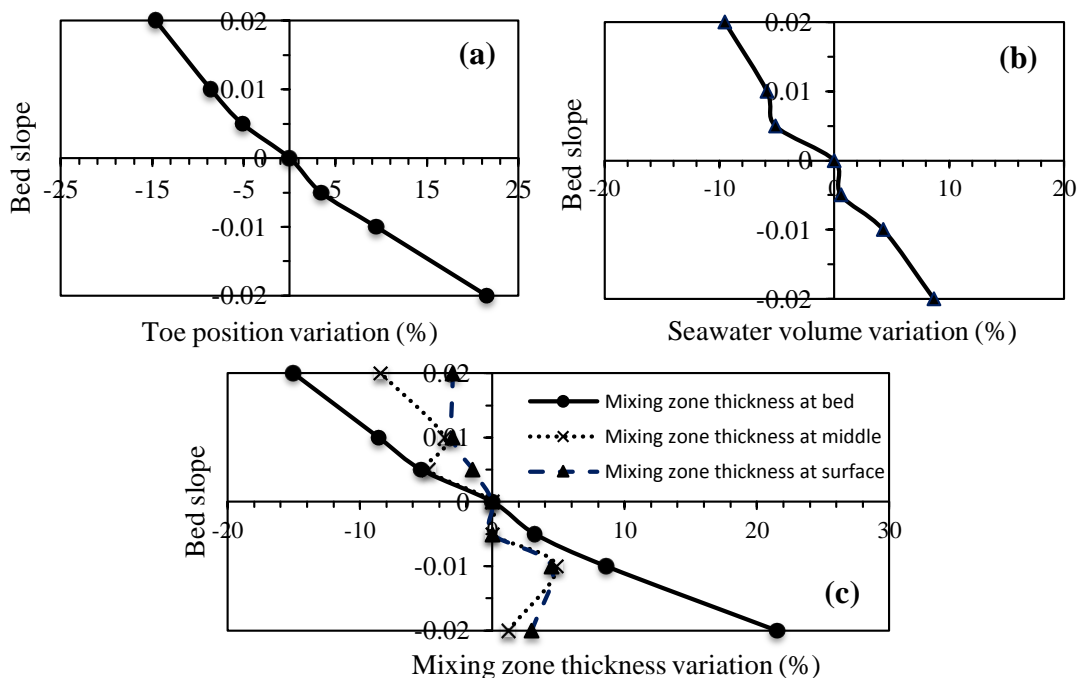


Fig. 5- Variation on salt dimensionless wedge characteristics in 30m high confined aquifers with landside constant flux; (a) Toe position (b) Seawater volume (c) Mixing zone thickness

شکل ۵- تغییرات مشخصات بی بعد شوری در آبخوان با ضخامت ۳۰ متر و با دبی ثابت در مرز خشکی، (a) موقعیت پنجه شوری، (b) حجم آب شور و (c) ضخامت ناحیه انتقالی

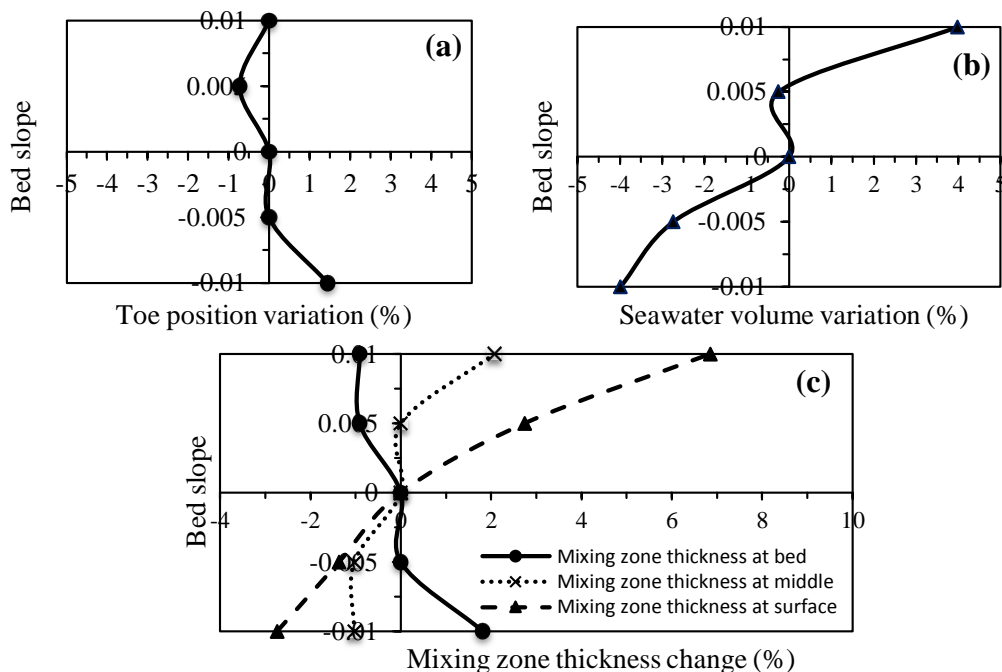


Fig. 6- Variation on dimensionless salt wedge characteristics in 30m high confined aquifers with landside constant head; (a) Toe position (b) Seawater volume (c) Mixing zone thickness

شکل ۶- تغییرات مشخصات بی بعد شوروی در آبخوان با ضخامت ۳۰ متر و با هد ثابت در مرز خشکی، (a) موقعیت پنجه شوروی، (b) حجم آب شور و (b) ضخامت ناحیه انتقالی

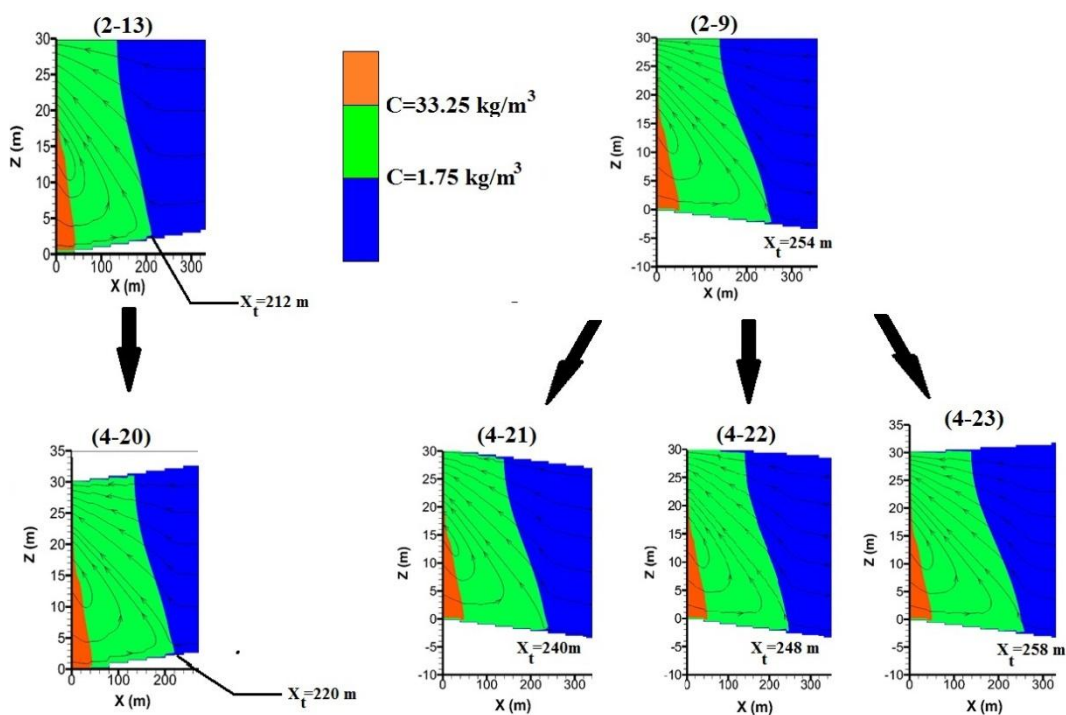


Fig. 7- Comparison of salt wedge shape with both bed and surface slope

شکل ۷- مقایسه شکل گوه شوروی با اعمال همزمان شیب در بستر و سطح آبخوان

برای یک آبخوان تحت فشار با شرایط ورود دبی ثابت آب شیرین در مرز خشکی، زمانی که شیب طولی بستر از سمت دریا به سمت خشکی تغییر پیدا می کند، آب شور بیشتری به آبخوان هجوم آورده و ناحیه انتقالی در بستر از ضخامت بیشتری برخوردار خواهد بود. همچنین، ضخامت آبخوان تحت فشار در میزان اثرگذاری شیب بستر بر مشخصات نفوذ شوری مؤثر است، بطوریکه با کاهش ضخامت آبخوان تحت فشار از اثرپذیری گوه شوری توسط شیب طولی بستر کاسته خواهد شد و مشخصات گوه شوری افزایش یا کاهش محسوس نخواهد داشت. نتایج این مطالعه نشان می دهد که نوع شرایط مرزی نیز بر نتایج تأثیرگذار است. شیب طولی بستر در آبخوان تحت فشار و در شرایط دبی ثابت در مرز خشکی بر مشخصات گوه شوری همچنان که بیشتر بیان گردید اثر گذاشته ولی در تغییر این مشخصات زمانی که شرایط ورود جریان در مرز خشکی به هد ثابت تغییر می یابد، محسوس نبوده است. تغییراتی که در مقدار هد هیدرولیکی و هر دو عامل مؤثر در آن (بار فشار و بار پتانسیل) رخ می دهد در این اتفاق مؤثر بوده است. همچنین نشان داده شده است که شیب سطح آبخوان تحت فشار بر رفتار و مشخصات گوه شوری تأثیر قابل ملاحظه ای نداشته است. در انتها نتیجه گرفته شده است که مسطح در نظر گرفتن بستر آبخوان نمی تواند تخمینی منطبق بر واقعیت بر میزان نفوذ شوری در آبخوان هایی با شیب طولی محسوس ارائه دهد.

همچنین مشاهده شده است که با تغییر شرایط ورودی جریان در مرز خشکی از دبی ثابت به هد ثابت، نرخ تغییرات مشخصات گوه شوری کاهش یافته است. برای دانستن علت این امر توضیح هد هیدرولیکی در دو آبخوان با وضعیت کاملاً مشابه ولی با شرایط مرزی متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده توزیع هد هیدرولیکی در آبخوان نشان می دهد که در شرایط مرزی هد ثابت، یکنواختی مقدار بار هیدرولیکی در ارتفاع در نواحی بیشتری مشاهده شده است. ثابت بودن بار هیدرولیکی بدان معنا می باشد که در یک طول مشخص از آبخوان، افزایش ارتفاع آبخوان (کاهش هد فشار) با افزایش تأثیر ثقل جبران شده به گونه ای که جمع بار هیدرولیکی آنها $(P/\gamma+Z)$ ثابت مانده و بنابراین شیب بستر آبخوان نتوانسته بر مشخصات گوه شوری به اندازه آبخوان با شرط مرزی دبی ثابت تأثیرگذار باشد. مطابق یافته های Abarca et al. (2007)، Mazi et al. (2013) و Ketabchi et al. (2016) از میان متغیرهای تأثیرگذار بر گوه شوری در آبخوان ساحلی از جمله شرایط مرزی و یا میزان تغذیه از سطح، کمترین حساسیت موقعیت پنجه شوری به تغییر شیب بستر آبخوان بوده است. نتایج این تحقیق نیز حاکی از تأیید این امر می باشد. اما این پژوهش نشان داده که این امر برای مشخصه ضخامت ناحیه انتقالی در بستر آبخوان چندان مصداق نداشته و اثرپذیری این پارامتر نسبت به تغییرات شیب بستر بارزتر از اثرپذیری موقعیت پنجه شوری می باشد.

پی نوشت ها

- 1- Constant Head
- 2- Constant Flux
- 3- Dupuit-Forchheimer
- 4- Pre-Conditioned Conjugate-Gradient
- 5- Generalized Conjugate-Gradient
- 6- Peclet Number

۵- مراجع

- Abarca E, Carrera J, Sanchez-Vila X, Voss C I (2007) Quasi-horizontal circulation cells in 3D seawater intrusion. *Journal of Hydrology* 339:118-129
- Akylas E, Koussis A, Yannacopoulos A (2006) Analytical solution of transient flow in a sloping soil layer with recharge. *Hydrological Sciences Journal* 51(4):626-641
- Ataie-Ashtiani B, Hosseinabadi HR, Fatemi R (2006) Numerical model of transport and contaminant discharge from coastal aquifers into seaward. *Iran-Water Resources Research* 2(1):1-17 (In Persian)
- Ataie-Ashtiani B, Werner A, Simmons C, Morgan L, Lu C (2013) How important is the impact of land-

۴- خلاصه و جمع بندی

شبه سازی ریاضی جریان آب زیرزمینی و بالطبع پیش بینی تغییرات آن در آبخوان های ساحلی با توجه به تعداد متغیرهای تأثیرگذار بر آن امری پیچیده می باشد. از این رو در بسیاری از مطالعات گذشته بستر آبخوان صاف فرض شده است. مطالعات پیشین نشان دادند که بدون شیب لحاظ نمودن بستر کمترین تأثیر را بر موقعیت پنجه شوری خواهد داشت. با این وجود در آبخوان های با مقیاس واقعی علاوه بر پنجه شوری، اثرپذیری ناحیه انتقالی و حجم شوری از شیب بستر نیز نیاز به بررسی خواهد داشت. تأثیر تغییرات طولی تراز بستر آبخوان بر میزان پیشروی شوری در آبخوان های تحت فشار ساحلی موضوع این پژوهش بوده است. بدین منظور یک آبخوان بزرگ مقیاس دو بعدی انتخاب شده، سناریوهای مختلفی با تغییر شیب طولی بستر تعریف شده و با استفاده از نرم افزار تفاضل محدود SEAWAT، نفوذ شوری از دریا به داخل آبخوان مدل سازی شده است. در بررسی نتایج حاصل از تغییرات شیب بر روی این نوع از آبخوان ها خلاصه نتایجی به شرح زیر حاصل شده است:

- and unconfined coastal aquifers. *Water Resources Research* 52(9):6989-7004
- Mahmoodzadeh D, Karamouz M (2019) Seawater intrusion in heterogeneous coastal aquifers under flooding events. *Journal of Hydrology* 568:1118-1130
- Mazi K, Koussis AD, Destouni G (2013) Tipping points for seawater intrusion in coastal aquifers under rising sea level. *Environmental Research Letters* 8(1):1-6
- Mehdizadeh SS, Eghmazi-Karamalipour S, Asoodeh R (2017) Sea level rise effect on seawater intrusion into layered coastal aquifers. *Ocean and Coastal Management* 138:11-18
- Melloul A, Collin M (2006) Hydrogeological changes in coastal aquifers due to sea level rise. *Ocean and Coastal Management* 49:281-297
- Payne D (2010) Effects of climate change on saltwater intrusion at Hilton Head Island, SC. U.S.A. In: *Proc. of 21st Salt Water Intrusion Meeting (SWIM21)*, 21-26 June, Azores, Portugal, 293-296
- Pool M, Carrera J (2011) A correction factor to account for mixing in Ghyben-Herzberg and critical pumping rate approximations of seawater intrusion in coastal aquifers. *Water Resources Research* 47(5):1-9
- Rathore S, Zhao Y, Lu C, Luo J (2018) Analytical analysis of the temporal asymmetry between seawater intrusion and retreat. *Advances in Water Resources* 111:121-131
- Todd D, Mays L (2005) *Groundwater hydrology*. John Wiley & Sons, 652p
- Voss C, Souza W (1987) Variable density flow and solute transport simulation of regional aquifers containing a narrow freshwater-salt water transition zone. *Water Resources Research* 23:1851-1866
- Walther M, Graf T, Kolditz O, Liedl R, Post V (2017) How Significant is the slope of the sea-side boundary for modelling seawater. *Journal of Hydrology* 551:648-659
- Werner AD, Bakker M, Post V, Vandenbohede A, Lu C, Ataie-Ashtiani B, Simmons CT, Barry DA (2013) Seawater intrusion processes, investigation and management: recent advances and future challenges. *Advances in Water Resources* 51: 3-26
- surface inundation on seawater intrusion caused by sea-level rise?. *Hydrogeology Journal* 21:1673-1677
- Badaruddin S, Werner AD, Morgan LK (2017) Characteristics of active seawater intrusion. *Journal of Hydrology* 551:632-647
- Cheng A, Halhal D, Naji A, Ouazar D (2000) Pumping optimization in saltwater-intruded coastal aquifers. *Water Resources Research* 36(8):2155-2165
- Chesnaux R (2015) Closed-form analytical solutions for assessing the consequences of sea-level rise on groundwater resources in sloping coastal aquifers. *Hydrogeology Journal* 23(7):1399-1413
- Farhoudi-Hafadaran R, Ketabchi H (2018) Numerical simulation of Urmia Lake and Ajabshir coastal aquifer interaction. *Iran-Water Resources Research* 14(1):45-58 (In Persian)
- Kacimov AR, Obnosov YV (2001) Analytical solution for a sharp interface problem in seawater intrusion into a coastal aquifer. *Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 457:3023-3038
- Ketabchi H, Ataie-Ashtiani B (2015) Review: Coastal groundwater optimization - advances, challenges, and practical solutions. *Hydrogeology Journal* 23(6):1129-1154
- Ketabchi H, Mahmoodzadeh D, Ataie-Ashtiani B, Simmons CT (2016) Sea-level rise impacts on seawater intrusion in coastal aquifers: Review and integration. *Journal of Hydrology* 535:235-255
- Koussis AD, Mazi K, Destouni G (2012) Analytical single-potential, sharp interface solutions for regional seawater intrusion in sloping unconfined coastal aquifers, with pumping and recharge. *Journal of Hydrology* 416-417:1-11
- Koussis AD, Mazi K, Riou F, Destouni G (2015) A correction for Dupuit-Forchheimer interface flow models of seawater intrusion in unconfined coastal aquifers. *Journal of Hydrology* 525:277-285
- Langevin C, Thorne D, Dausman A, Sukop M, Guo W (2008) SEAWAT version 4: A computer program for simulation of multi-species solute and heat transport. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 39p
- Lu C, Xin P, Kong J, Li L, Luo J (2016) Analytical solutions of seawater intrusion in sloping confined