



بررسی سرعت تغییرات شرایط مرزی بر مدل سازی پدیده تداخل آب شور و شیرین در آبخوان های ساحلی

زهرا یزدی^۱، حجت احمدی^{۲*}

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه های آبی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

* نویسنده مسئول: h.ahmadi@urmia.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۱۰

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۰۳

چکیده

دریاها دارای تغییرات تراز سطح آب تدریجی و طولانی مدت می باشند. شبیه سازی عددی رفتار سفره های زیرزمینی ساحلی با دوره های زمانی طولانی، می تواند بسیار زمان بر باشد. در این مقاله به بررسی اثر افزایش و یا کاهش زمان تغییرات تراز آب دریاها بر مدل سازی عددی رفتار آب های زیرزمینی پرداخته شده است. بدین منظور از مدل عددی GeoStudio مبتنی بر روش اجزای محدود استفاده شد. ابتدا مدل مورد نظر بر اساس داده های آزمایشگاهی منتشر شده در منابع معتبر واسنجی و اعتبارسنجی شد و در ادامه تغییرات پنجه آب شور تحت حالت های تغییر تراز سریع و تدریجی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی نشان داد که مدت زمان تغییر تراز سطح آب شور تأثیری در برآورد ابعاد نهایی گوه آب شور ندارد. اما در حالت افزایش آبی تراز آب شور، مقدار طول پنجه ۰.۴٪ بیشتر از حالات افزایش تدریجی برآورد می شود. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد سریع ترین زمان به تعادل رسیدن سیستم (T_{R_min}) در حالت افزایش و یا کاهش آبی تراز سطح آب رخ می دهد. با این حال نتایج نشان داد که اگر طول مدت تغییرات تدریجی شرایط مرزی کمتر از نصف T_{R_min} باشد، تغییری در زمان تعادل رخ نمی دهد. علاوه بر این، نتایج حاصله نشان داد که زمان رسیدن به ۵۰٪ طول پیشروی پنجه آب شور مستقل از سرعت تغییرات شرایط مرزی آب شور است. در صورتی که مقدار حداقل زمان به تعادل رسیدن در حالت افزایش آبی تراز آب شور T_{A_min} باشد و زمان افزایش تراز سطح آب شور برابر یا بیشتر از $1/4 T_{A_min}$ باشد، زمان به تعادل رسیدن پنجه تقریباً منطبق بر زمان توقف تغییرات سطح آب شور خواهد بود.

واژه های کلیدی: آب زیرزمینی، پنجه آب شور، مدل عددی، مقیاس زمان.

مقدمه

اندرکنش آب های زیرزمینی در تماس با آب دریاهای شور مورد توجه بسیاری از محققان بوده و تحقیقات گسترده ای در این خصوص در حال انجام است (Motallebian et al., 2019). مطالعه دینامیک تداخل آب شور و شیرین ساحلی به روش های مختلفی نظیر مطالعات میدانی، مطالعات آزمایشگاهی و یا مدل سازی های عددی و یا ترکیبی از این روش ها انجام می شود. پدیده تداخل آب شور و شیرین یک پدیده طولانی مدت بوده و می تواند برای سال ها و دهه ها ادامه داشته باشد. با وجودی که این پدیده در مقیاس بزرگ در طبیعت رخ می دهد، تحقیقات آزمایشگاهی به عنوان یکی از پر کاربردترین روش ها در مطالعه و شناخت رفتار عوامل مؤثر پدیده تداخل

آب های زیرزمینی در نوارهای ساحلی اقیانوس ها، دریاها مهم ترین منبع تأمین آب شرب و حتی کشاورزی می باشند (Kjelgren et al., 2000; Barlow, 2003). با توجه به این که در نوار ساحلی به فاصله ۲۰۰ کیلومتر از دریاها بیش از ۳/۲ میلیارد انسان سکونت دارند، اهمیت حفظ این منابع دوچندان می باشد (Thangarajan and Singh, 2016). مهم ترین منبع آلاینده ای که آب های زیرزمینی ساحلی را تهدید می کند نفوذ آب شور به آبخوان ها بوده که باعث افزایش شوری آب های شیرین و در بسیاری موارد حتی منجر به کاهش عملکرد و تولیدات کشاورزی می شود (Gladden and Park, 2016). لذا

توسط فسکر (Feseker, 2007) نشان دهنده اثر مقیاس شرایط مرزی بر مقدار پیشروی و یا پسروی پنجه آب شور می باشد و از آنجا که تغییرات شرایط مرزی در طبیعت مسائل تداخل آب شور و شیرین می تواند قرن ها ادامه دار باشد، اعمال این تغییرات در مقیاس روزانه می تواند منجر به نتایج غیرواقعی شود. تأثیر عامل زمان در تغییرات شرایط مرزی در حالت شار ثابت توسط محققان مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. یافته های این محققان نشان داده است که تغییر فاکتور زمان به ازای تغییرات یکسان شرایط مرزی تأثیر قابل توجهی بر موقعیت پنجه آب شور ندارد (Kiro et al., 2008; Watson et al., 2010; Cahng et al., 2011). لو و ورنر (Lu and Werner, 2013) تغییرات آنی شرایط مرزی را در سمت دریا و خشکی در حالت تراز آب کنترل شده در یک آبخوان محصور مورد مطالعه قرار داده اند. بررسی این محققان نشان داد که اعمال سرعت های متفاوت تغییرات شرایط مرزی تأثیر قابل ملاحظه ای بر زمان نهایی جابجایی و یا در تثبیت پنجه آب شور ندارد. کتابچی و همکاران (Ketabchi et al., 2016) افزایش یک متری تراز آب و تأثیر آن بر پنجه آب شور را به صورت آنی مورد مطالعه قرار داده است. همچنین کتابچی و جهانگیر (Ketabchi and Jahangir, 2019) تأثیر اعمال شرایط مرزی در حالت تدریجی و آنی را برای افزایش سطح آب در حالت ماندابی شدن نوار ساحلی را در حالت شار ثابت مورد مطالعه قرار داده اند. با این حال در هر دو حالت اعمال تغییرات آنی و تغییرات تدریجی به مرزهای هیدرولیکی مساله، به شرایط غیر عادی گسترش بیش از حد پنجه آب شور (Overshooting) منجر نشد. این حالت در نتایج برخی از محققان که افزایش تراز آب دریاها را به صورت آنی در مدل های عددی به کار برده اند مشاهده شده است (Morgan et al., 2015).

علیرغم مطالعات متعددی که در خصوص تأثیر عوامل مختلف هندسی و شرایط مرزی مربوط به آب های زیرزمینی در حالت شار ثابت انجام شده است، مطالعات محدودی در حالت تراز ثابت آب زیرزمینی برای آبخوان های محصور و یا در حالت ماندابی صورت گرفته است (Morgan and Werner, 2014; Morgan et al., 2015). این تحقیق به کمک یک مدل عددی با قابلیت حل جریان در محیط های غیراشباع انجام شد. با اعمال تغییرات تدریجی و آنی تراز آب در یک سفره آزاد در

آب شور و شیرین توسط بسیاری از محققان بکار گرفته شده است (Motallebian et al., 2022; Gowsami and Clement, 2007; Abdoulhalik and Ahmed, 2018; Yi et al., 2016; Chang and Clement, 2012; Robinson et al., 2016; Steinmuller and Chambers, 2018; Dalai & Dhar 2022a). با این حال استفاده از مدل های عددی به دلایل مختلف و شناخته شده نظیر هزینه کم، امکان تغییر و کاربرد برای گزینه های مختلف، کنترل عوامل مؤثر و سرعت بالای اعمال شرایط مختلف از اهمیت ویژه ای برخوردار است و مطالعات بسیاری به صورت عددی در مقیاس های آزمایشگاهی به کمک مدل های مختلف انجام شده است (Ahmadi et al., 2022). با این حال تعیین دقیق پارامترهای ورودی مدل نظیر مشخصات فیزیکی و مکانیکی محیط متخلخل یا آبخوان، خصوصیات آب شور و چگالی مربوطه به همراه نحوه اعمال شرایط مرزی در رسیدن به نتایج صحیح و منطقی با مدل های عددی از اهمیت ویژه برخوردار است.

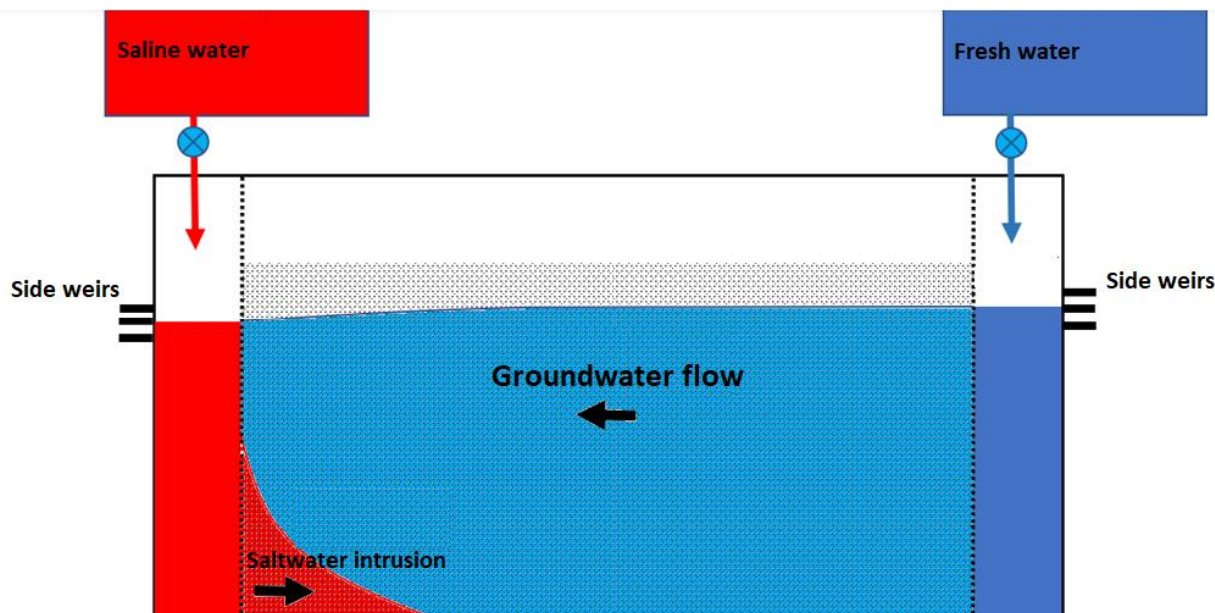
مطالعات مربوط به شرایط مرزی محدود به مطالعات شرایط مرزی آب زیرزمینی در سفره های ساحلی به صورت تراز ثابت یا شار ثابت جریان در نظر گرفته شده و مورد بررسی قرار گرفته است. هر یک از شرایط نامبرده با توجه به ابعاد مساله می تواند از دقت متفاوتی برخوردار باشد و لازم است که نوع مرز متناسب با شرایط و ابعاد مساله از لحاظ آزمایشگاهی و یا صحرایی انتخاب شود (Werner and Simmons, 2009; Chang et al., 2011; Laattoe et al., 2013).

یکی از خصوصیات مسائل مربوط به تداخل آب شور و شیرین تغییرات طولانی مدت شرایط مرزی می باشد (Abd-Elhamid et al., 2022). معمولاً افزایش تراز سطح آب دریاها آزاد در دوره های زمانی طولانی مدت مورد بررسی قرار می گیرد. برای مثال بررسی تأثیر افزایش تراز سطح آب دریاها آزاد به اندازه ی ۴۵ سانتی متر در صد سال بر توسعه ی پنجه آب شور توسط گیامباستیان و همکاران انجام شده است (Giambastiani et al., 2007). عطایی آشتیانی و همکاران (Ataie-Ashtiani et al., 1999) در خصوص مسائلی که تغییرات سریع در شرایط مرزی دارند توصیه به توجه به اندازه اجزاء و گام های زمانی در مدل سازی عددی دارد با این حال اشاره ای به تغییر مقیاس زمان تغییرات شرایط مرزی در شرایط نوسانات جزر و مدی ندارد. مطالعات عددی صورت گرفته

جهت بررسی سرعت اعمال تغییرات شرایط مرزی بر مدل سازی عددی، از داده های آزمایشگاهی منتشر شده توسط Goswami and Clement (2007) استفاده شد. مشخصات مدل آزمایشگاهی استفاده شده این محققان در شکل ۱ ارائه شده است.

مقیاس آزمایشگاهی تأثیر نحوه اعمال شرایط مرزی غیر ماندگار به صورت آبی و تدریجی بر مشخصات پنجه آب شور حاصل از شبیه سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش ها
 منطقه مورد مطالعه



شکل ۱- شکل شماتیک مدل آزمایشگاهی مورد استفاده توسط گوسوامی و کلمنت (Goswami & Clement, 2007).

Figure 1- Details of experimental model by Gowsami & Clement (2007).

SS1 و SS2 یک حالت غیر ماندگار به صورت پیشروی آب شور رخ داد. پس از این حالت تراز آب شیرین به سطح ۲۶/۵۵ سانتیمتر افزایش داده شد. افزایش تراز آب شیرین موجب پس روی پنجه آب شور به یک موقعیت جدید شد که پس از رسیدن به شرایط جدید و تثبیت آن حالت ماندگار جدیدی تحت عنوان SS3 شکل گرفت. در هر دو مورد اخیر تراز آب شور همان تراز حالت مربوط به حالت SS1 در نظر گرفته شد. مدت زمان جابجایی گوه آب شور در حالت پیشروی ۸۰ دقیقه و در حالت پس روی ۶۰ دقیقه گزارش شده است. در این تحقیق از اطلاعات مربوط به حالت SS1 برای واسنجی مدل و نتایج حالت SS2 و SS3 برای اعتبارسنجی مدل استفاده شده شد که نتایج مربوط به این تحلیل ها در بخش نتایج ارائه شده است.

مشخصات محیط متخلخل و داده های ورودی اولیه بر اساس مقادیر ارائه شده در مقاله گوسامی و کلمنت (Goswami & Clement, 2007) انتخاب گردید. جدول ۱ مشخصات مربوط محیط متخلخل را پس از انجام مرحله واسنجی نشان می دهد. واسنجی مدل در دو مرحله صورت گرفت. در مرحله اول مقدار

به منظور ایجاد محیط متخلخل در این مدل از ذرات سیلیسی با قطر متوسط ۱/۱ میلی متر استفاده شده است که توسط توری از بخش های کناری جدا شده است. تغذیه آب شور با غلظت ثابت و آب شیرین مخازن به صورت پیوسته انجام شده و توسط شیرهای متعدد تعبیه شده در ارتفاع های مختلف تراز آب در هر یک از مخازن قابل کنترل بوده است.

آزمایش های مختلفی به صورت ماندگار و غیر ماندگار تحت گرادپان های مختلف توسط این محققان در مدل آزمایشگاهی صورت گرفته است. در این تحقیق، حالت ماندگار در سه گرادپان مختلف تحت اسامی SS1، SS2 و SS3 انجام شده است. در حالت SS1، تراز آب شور در مخزن مربوطه برابر با ۲۵/۵ سانتیمتر و تراز آب در مخزن مربوط به آب شیرین که تغذیه کننده آب زیرزمینی بوده در تراز ۲۶/۷۰ سانتی متر قرار گرفت. پس ایجاد شرایط ماندگار و ثابت شدن پنجه آب شور، تراز آب شیرین به ارتفاع ۲۶/۲۰ سانتیمتر کاهش داده شد و تحت این شرایط پنجه آب شور شروع به پیشروی از مخزن آب شور به داخل مدل نمود پس از ثابت شدن موقعیت پنجه آب شور، حالت اخیر SS2 نامیده شد. بدین ترتیب بین حالت

به منظور اطمینان از صحت مدل در امر واسنجی، نتایج مدل عددی و داده‌های مشاهده‌ای با شاخص آماری ناش- ساتکیف مورد سنجش قرار گرفت. این مدل به منظور بررسی و ارزیابی عملکرد مدل‌های ریاضی در مقایسه با داده‌های مشاهده‌ای در موضوعات آب آرایه شده است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$N=1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{si} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q}_o)^2} \right) \quad (1)$$

در رابطه ۱ اندیس‌های s و o به ترتیب مربوط به داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای بوده و \bar{Q}_o میانگین داده‌های مشاهده‌ای است. محدوده تغییرات N ، بین یک تا منفی بینهایت بوده و هر چه قدر به عدد یک نزدیکتر باشد نشان دهنده دقت بالای مدل است (Jain and Sudheer, 2008).

جدول ۱- پارامترهای بکار رفته پس از واسنجی مدل عددی.

Table 1-Input parameters of numerical model after calibration.

Hydraulic conductivity	Dispersivity		Diffiusion	Spatial step	Time step	Prosoity	Saltwater density	Concentra tion
K (m/s)	α_T (m)	α_L (m)	D^* (m ² /s)	Δx (m)	Δt (sec)	n	ρ (kg/l)	C (gr/lit)
0.012	0.002	0.004	1e-8	0.005	10	0.385	1.026	35

توانایی و محدودیت‌های این مدل در مقایسه با مدل عددی SEAWAT در ارتباط با مساله تداخل آب‌شور و شیرین توسط احمدی و همکاران (Ahmadi et al., 2022) به تفصیل بیان شده است و دقت بالای مدل در ارزیابی چنین مسائلی تأیید شده است.

شبکه بندی و گام‌های زمانی

با توجه به هندسه مدل آزمایشگاهی که به شکل مستطیل می‌باشد از مش با ساختار مربعی با اندازه المان‌های ۵ میلی‌متری برای مش‌بندی محیط حل استفاده شد. همچنین جهت افزایش دقت محاسبات گام زمانی ۱۰ ثانیه انتخاب شد. شکل ۲، شبکه مورد استفاده برای گسسته‌سازی هندسه مساله را نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر مربوط به ضریب پراکندگی، گام‌های مکانی و زمانی معیارهای مربوط به عدد پکلت و عدد کورانت به ترتیب کمتر از ۲ و ۱ حاصل شد. این مقادیر برای نیل به حل پایدار در مسائل مربوط به تداخل آب‌شور و شیرین ضروری است. معادلات مربوط به این اعداد بی‌بعد به شکل ذیل می‌باشند:

$$\text{عدد پکلت} = \frac{v \Delta L}{D} \leq 2 \quad (2)$$

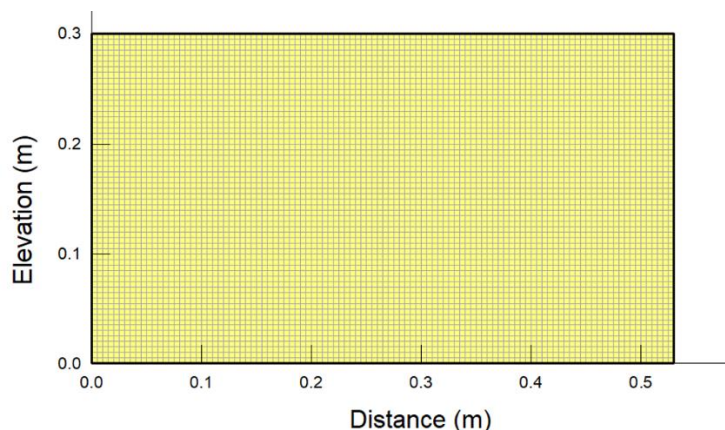
$$\text{عدد کورانت} = \frac{v \Delta t}{\Delta L} \leq 1 \quad (3)$$

در رابطه فوق v سرعت جریان، ΔL طول المانها، Δt گام زمانی و D ضریب پخشیدگی هیدرودینامیکی است.

هدایت هیدرولیکی محیط تعیین شد. بدین منظور در دو مخزن جانبی طبق شکل ۱، تراز سطح آب شیرین به ترتیب در دو سطح ۲۶/۷ و ۲۵/۵ سانتیمتر قرار گرفت. در این حالت با تغییر میزان هدایت هیدرولیکی در مدل عددی میزان نشت آب محاسبه شده از مدل دقیقاً برابر با مقدار نشت ثبت شده در آزمایشگاه برابر با ۱/۴۲ سانتیمتر مکعب در ثانیه حاصل شد. در گام دوم اقدام به واسنجی مقدار ضریب پراکندگی طولی و عرضی شد. مقدار ضریب پراکندگی طولی دو برابر مقدار عرضی تغییر داده می‌شد به صورتی که پنجه آب شور ایجاد شده در مدل بیشترین انطباق را از نظر شکل هندسی به پنجه مشاهده شده در آزمایشگاه داشته باشد.

مدل عددی

با توجه به هدف اصلی تحقیق مبنی بر بررسی تأثیر سرعت اعمال تغییرات شرایط مرزی تراز آب‌شور در مدل‌سازی عددی پدیده تداخل آب‌شور و شیرین از مدل عددی CTRAN/W مبتنی بر روش اجزای محدود استفاده شد. این مدل به عنوان یکی از ماژول‌های اصلی مدل GeoStudio بوده و به صورت کوپل با ماژول SEEP/W برای شبیه‌سازی رفتار آب‌های زیرزمینی ساحلی در حالت دوبعدی بکار گرفته می‌شود. در روند مدل‌سازی آب زیرزمینی در تماس با آب‌شور دریا، در حالت ماندگار و یا غیر ماندگار معادلات جریان آب در حالت وابسته به چگالی در خاک به صورت دوبعدی بر اساس شرایط مرزی هیدرولیکی آب‌شور و شیرین به همراه معادلات انتقال جرم بر اساس شرایط مرزی غلظت آب‌شور و شیرین در گام‌های زمانی یکسان حل می‌شود (Krahn, 2004). در این مدل رابطه بین غلظت آب‌شور و چگالی آب به صورت خطی در نظر گرفته شده است. برخلاف مدل‌های مرسوم عددی انتقال جرم نظیر هایدروس، در این مدل بجای معادله ریچاردز معادله فریند (Frind, 1982) در کنار معادله انتقال جرم پخشیدگی-انتقال حل می‌شود. بطوریکه اثر اختلاف چگالی دو سیال در معادلات انرژی لحاظ می‌گردد.



شکل ۲- هندسه مدل و مش مربعی مورد استفاده برای روش اجزای محدود.

Figure 2- Geometry and quadratic meshing used for finite element analysis.

حالت آرایه شده فوق در چهار زمان مختلف شامل، تغییر آنی (صفر دقیقه) و تدریجی ۳۰، ۶۰ و ۹۰ دقیقه اعمال شد. در نهایت نتایج حاصل نسبت به هم مورد مقایسه قرار گرفت. جدول ۲ خلاصه حالت‌های مختلف بررسی شده در تحقیق را نشان می‌دهد.

جدول ۲- مشخصات شرایط مرزی بکار رفته در سناریوهای مورد مطالعه.

Table 2-The employed boundary conditions in the studied scenarios.

Row	Freshwater Level (cm)	Saltwater Level (cm)	Saltwater level variation (mm)	Time of Variation (min)
1				0
2				30
3			-2	60
4	26.7	25.5		90
5				0
6				30
7			+2	60
8				90

نتایج

واسنجی و اعتبارسنجی مدل عددی

مطابق با آنچه در بخش مقدمه بیان شد مدل عددی بر اساس اطلاعات ارائه شده در مقاله گوسوامی و کلمت (Goswami and Clement, 2007) مورد بررسی و واسنجی قرار گرفت. بر این اساس ارتفاع آب در مخزن آب شیرین در تراز ۲۶/۷ سانتیمتر و ارتفاع آب شور در تراز ۲۵/۵ سانتیمتر تنظیم شد و داده‌های ورودی به مساله تعریف گردید. پس از انجام آنالیزهای مختلف بر اساس اطلاعات ارائه شده، با انجام تغییرات جزئی در مقادیر مربوط به هدایت هیدرولیکی و ضریب پخشیدگی مولکولی بر اساس مقادیر گزارش شده در کارهای آزمایشگاهی مربوطه، اقدام به واسنجی مدل شد

شریط اولیه و مرزی

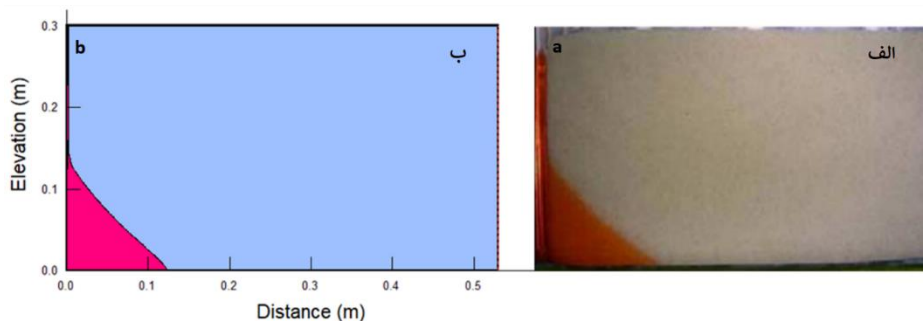
شرایط مدل‌سازی به ترتیب آنچه که در آزمایشگاه برای آزمایش‌ها صورت گرفته بود در نظر گرفته شد. بدین ترتیب که ابتدا مدل عددی بر اساس شرایط مرزی آب شیرین در دو طرف و به صورت شرایط ماندگار اجرا شد. نتایج این حالت به‌عنوان شرایط اولیه برای اجرای اولین سناریو یعنی SS1 در نظر گرفته شد. شرایط مرزی مربوطه طبق آنچه که در بخش مدل آزمایشگاهی ذکر شد در مدل تعریف شد. در ادامه شبیه‌سازی سناریوهای مورد مطالعه، SS1 به‌عنوان شرایط اولیه برای SS2 و آخرین گام محاسباتی این حالت به‌عنوان شرایط اولیه SS3 انتخاب شد. در ادامه، افزایش و یا کاهش ناگهانی تراز سطح آب به صورت آنی و افزایش و یا کاهش تراز آب به صورت تدریجی، شامل تغییرات تراز سطح آب شور نسبت به زمان در مرز آب شور اعمال شد.

سناریوهای مورد مطالعه

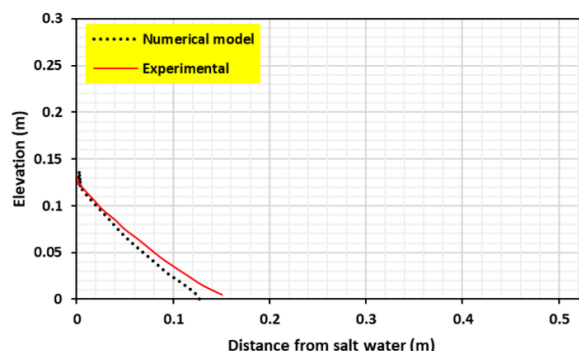
به منظور بررسی اثرات شرایط مرزی به صورت تدریجی و یا آنی بر تداخل آب شور و شیرین پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل، تراز آب شور نسبت به شرایط اولیه SS1 به میزان ۲ میلی‌متر کاهش داده شد. این حالت برای بررسی حالت کاهش تراز آب شور مورد استفاده قرار گرفت. برای بررسی حالت افزایش تراز سطح آب بر اساس شرایط اولیه SS2 تراز آب شور به میزان ۲ میلی‌متر افزایش داده شد این عمل موجب جابجایی گوهی آب شور به درون محیط متخلخل در مدل شد (این امر باعث پیشروی آب شور به سمت آبخوان یا منبع آب شیرین شد). جهت ارزیابی سرعت تغییرات تراز آب شور، میزان کاهش و یا افزایش تراز آب شور به مقدار ۲ میلی‌متر در دو

است. بیشترین اختلاف در پیش بینی موقعیت پنجه آب شور مربوط به بخش انتهایی پنجه آب شور است و این مساله به دلیل اثر مقاومت کف و سرعت کم جریان آب شیرین در کف مدل آزمایشگاهی نسبت به مدل عددی است (Ahmadi et al., 2022). همچنین در شکل ۵ اعتبارسنجی مدل به ازای شرایط ایجاد شده در حالت‌های SS2 و SS3 نشان داده شده است.

بطوریکه مقدار غلظت ۵۰ درصد از آب شور دریا در پنجه آب شور ورودی منطبق بر اطلاعات گزارش شده آزمایشگاهی شود. شکل ۳ نتایج مربوط به مدل‌سازی عددی را در مقایسه با داده‌های مشاهده‌ای و همچنین تصویری از پنجه آب شور ثبت شده آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۴، داده‌های استخراج شده مربوط به موقعیت حدفاصل پنجه آب شور در مدل عددی و مدل آزمایشگاهی نشان داده شده



شکل ۳- نتیجه مدل‌سازی عددی از حالت SS1 و مقایسه آن با تصویر آزمایشگاهی. الف) تصویر آزمایشگاهی، ب) مدل عددی.
Figure 3- Comparison of numerical model and recorded saltwater wedge results in SS1.

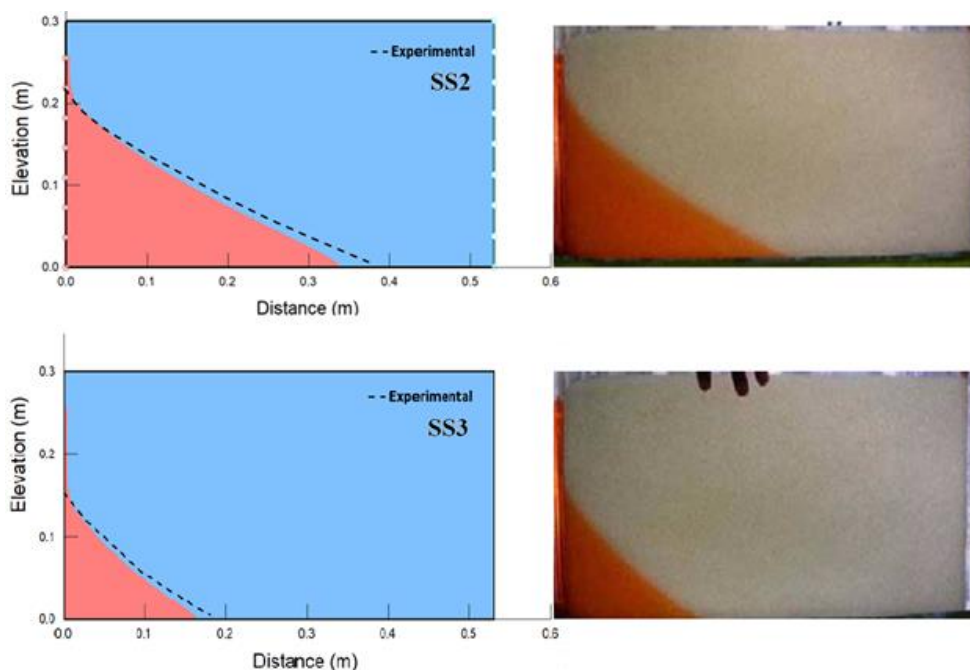


شکل ۴- مقایسه موقعیت پنجه آب شور بعد از واسنجی مدل برای حالت جریان ماندگار SS1.

Figure 4- Comparison of numerical result and observed location of saltwater wedge in SS1.

این شکل ناحیه ۵۰ درصد و بالاتر غلظت آب شور به رنگ قرمز مشخص شده است. جدول ۳ نتایج مربوط به آنالیز آماری داده‌های مشاهده‌ای و مدل عددی را نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر ارایه شده دقت مدل در ارزیابی رفتار حقیقی آب شور در تماس با آبخوان در مقیاس آزمایشگاهی مورد مطالعه بسیار خوب و قابل اعتماد است. با توجه به مقادیر حاصله برای معیار ناش-ساتکلیف به نظر می‌رسد با افزایش طول پنجه آب شور، دقت مدل در ارزیابی آن بهتر می‌شود.

در حالت SS2 تراز آب در مخزن آب شیرین به اندازه ۵ میلی‌متر پایین انداخته شد و به ۲۶/۲ سانتیمتر کاهش داده شد. تحت این شرایط جریان آب شور به آبخوان رخ داده و باعث گسترش بیشتر گوه آب شور در بخش پایین آب شیرین می‌شود. در حالت SS3 ارتفاع آب در مخزن آب شور برابر با ۲۵/۵ سانتیمتر و در مخزن آب شیرین برابر با ۲۶/۵۵ سانتیمتر قرار داده شد. نتیجه این بررسی و پروفیل جریان آب شور ورودی به زیر سفره آب شیرین در مدل عددی در شکل ۵ ارایه شده است. طبق



شکل ۵- مقایسه نتایج شبیه سازی حالت‌های SS2 و SS3 با تصاویر ثبت شده آزمایشگاهی.
Figure 5- Comparison among experimental and observed results of SS2 and SS3 states.

جدول ۳- ارزیابی آماری دقت مدل عددی در تعیین موقعیت پنجه آب شور.

Table 3- Statistical evaluation of model in estimation of the location of saltwater wedge.

Validation		Calibration	
SS3	SS2	SS1	The test
0.98	0.98	0.91	Nash-Sutcliffe

با طول زمانی به ترتیب ۱۵ دقیقه، ۳۰ دقیقه و ۶۰ دقیقه با نرخ ثابت انجام شد که در ادامه نتایج مربوط به هر یک به صورت مجزا ارائه شده است.

همانگونه که در شکل ۶ ارائه شده است، میزان پسروی آب‌شور به ازای سرعت‌های مختلف کاهش تراز آب‌شور دقیقاً به یک میزان است، به این معنا که در صورتی که سرعت پایین افتادن تراز آب‌شور تدریجی باشد، می‌توان از اعمال آن به صورت طولانی‌مدت مطابق با آنچه در طبیعت اتفاق می‌افتد صرف نظر کرد. هر چند برای این بخش از تحقیق داده‌های واقعی ثبت شده برای مقایسه موجود نبود ولی به دلیل این که نتایج هر چهار حالت از سرعت پایین افتادن تراز آب دقیقاً یکسان حاصل شده است می‌توان نتیجه گرفت که حذف سرعت پایین افتادن تراز آب‌شور در دقت مدل در پیش بینی موقعیت نهایی پنجه آب شور تاثیری نخواهد داشت.

از مقایسه سرعت پسروی پنجه آب‌شور در سرعت‌های مختلف کاهش تراز آب‌شور نتایج متفاوتی به دست آمد، بطوریکه حداقل زمان به تعادل رسیدن پنجه آب‌شور در مدت ۳۰ دقیقه

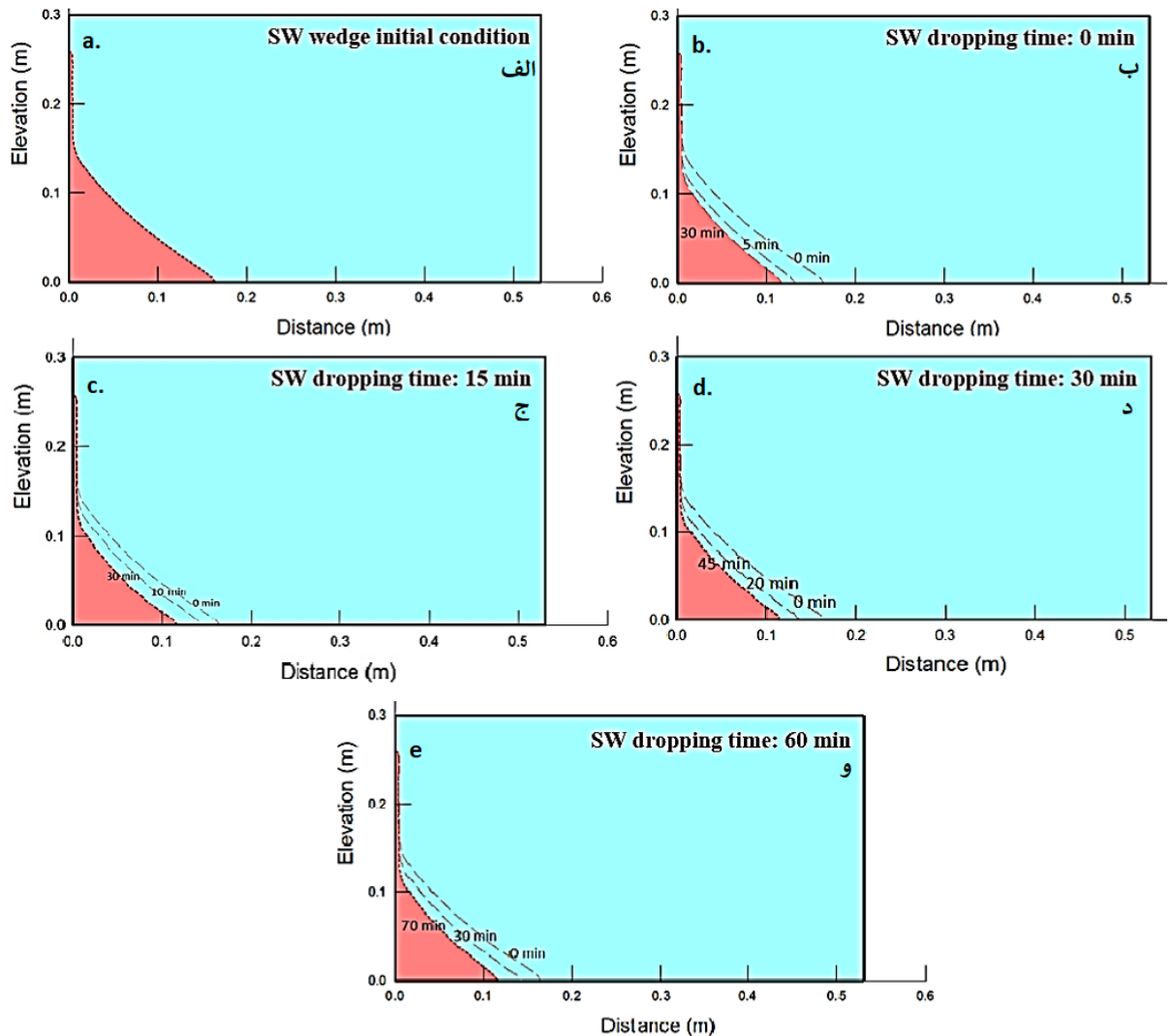
تغییرات شرایط مرزی

به منظور بررسی تأثیر سرعت اعمال تغییرات شرایط مرزی به ازای تغییر ترازهای یکسان سطح آب‌شور، مدل عددی برای دو حالت مختلف شامل کاهش تراز آب شور و افزایش تراز آب‌شور مدل گردید. که در ادامه هر یک از این حالات به صورت اجمالی ارائه شده است.

کاهش تراز آب شور

برای این حالت ابتدا ارتفاع آب شیرین و شور به ترتیب در ترازهای ۲۶/۵۵ و ۲۵/۵ سانتیمتر قرار گرفت. تحت این شرایط نفوذ آب‌شور به زیر سفره آب شیرین مدل گردید و تعادل در موقعیت پنجه آب شور ایجاد شد. طبق نتایج مدل این تعادل حدوداً پس از گذشت ۳۰ دقیقه ایجاد شد ولی جهت اطمینان شبیه‌سازی به مدت یک ساعت ادامه داده شد تا از حصول شرایط ماندگار اطمینان کامل به عمل آید. سپس تراز سطح آب در مخزن شور به ۲۵/۳ سانتی‌متر کاهش داده شد. این کاهش ابتدا به صورت آبی و سپس در سه حالت تدریجی

و در حالت کاهش لحظه‌ای سطح آب شور رخ داده است (T_{R-} min). در واقع این حداقل زمانی است که در مدل مورد بررسی برای به تعادل رسیدن سیستم (ثابت شدن موقعیت گوهی



شکل ۶- سرعت و مقدار تغییر مکان موقعیت پنجه آب شور به ازای سرعت‌های مختلف از پایین افتادن تراز آب شور به میزان ۲ میلی‌متر. (الف) شرایط اولیه، (ب) تغییرات آنی، (ج) تغییرات مرز در ۱۵ دقیقه، (د) تغییرات مرز در ۳۰ دقیقه، (و) تغییرات مرزی در ۶۰ دقیقه.

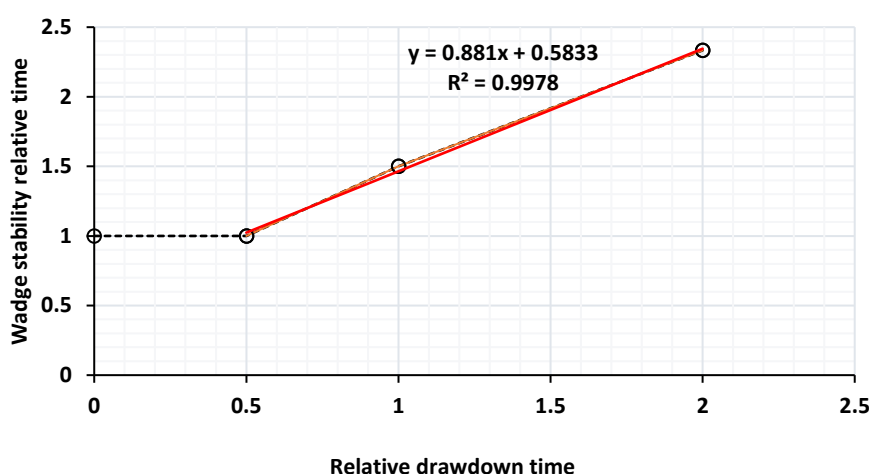
Figure 6- Rate and movement of the wedge under the different rates of drawdown of saltwater as 2mm. a. Initial condition, b. Instantaneous variation, c. Variation in 15 min., d. Variation in 30 min., e. Variation in 60 min.

سرعت پایین انداختن سطح آب در مرز آب شور برابر یا کمتر از نصف حداقل زمان لازم برای به تعادل رسیدن پنجه آب شور باشد، زمان جابجایی پنجه آب شور تغییر نخواهد کرد. مقایسه زمان به تعادل رسیدن پنجه آب شور به ازای سرعت‌های کاهش تراز آب در مدت ۳۰ و ۶۰ دقیقه که به ترتیب برابر و دو برابر حداقل زمان لازم برای به جابجایی کامل پنجه آب شور و به تعادل رسیدن مجدد سیستم است منجر به افزایش زمان تعادل به ترتیب به ۴۵ و ۷۰ دقیقه شده است. لذا در صورتی که سرعت پایین افتادن تراز آب شور بیش از نصف حداقل زمان

مقایسه زمان به تعادل رسیدن موقعیت پنجه آب شور سایر حالات بررسی شده با سریع‌ترین حالت رسیدن به تعادل نتایج جالبی را ارائه می‌دهد. طبق شکل ۶، در حالت پایین افتادن سطح آب شور در مدت ۱۵ دقیقه، زمان ایجاد تعادل نهایی و ثابت شدن موقعیت جدید پنجه آب شور مشابه با حالت کاهش ناگهانی تراز آب شور می‌باشد. سرعت کاهش تراز سطح آب شور در حالت ۱۵ دقیقه، نصف حداقل زمان مورد نیاز جهت به تعادل رسیدن پنجه آب شور است. لذا به نظر می‌رسد که اگر

لازم برای تعادل باشد، نتایج متفاوتی برای زمان تعادل سیستم حاصل خواهد شد. شکل ۷ نمودار بی بعد شده مربوط به زمان تعادل سیستم را به ازای سرعت‌های مختلف تغییرات سطح آب شور نسبت به حداقل زمان تعادل (T_{R_min}) نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷ رابطه بین سرعت پایین افتادن آب شور در مرز با زمان به تعادل رسیدن سیستم تقریباً خطی است. با این حال به دلیل نبود داده‌ی مشاهده‌ای، میزان اختلاف بین زمان تعادل واقعی با زمان تعادل آنالیز عددی در این تحقیق میسر نبوده و نیاز به جمع‌آوری داده‌های مشاهده‌ای برای این منظور ضروری است. با این حال طبق یافته‌های احمدی و همکاران

لازم برای تعادل باشد، نتایج متفاوتی برای زمان تعادل سیستم حاصل خواهد شد. شکل ۷ نمودار بی بعد شده مربوط به زمان تعادل سیستم را به ازای سرعت‌های مختلف تغییرات سطح آب شور نسبت به حداقل زمان تعادل (T_{R_min}) نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷ رابطه بین سرعت پایین افتادن آب شور در مرز با زمان به تعادل رسیدن سیستم تقریباً خطی است. با این حال به دلیل نبود داده‌ی مشاهده‌ای، میزان اختلاف بین زمان تعادل واقعی با زمان تعادل آنالیز عددی در این تحقیق میسر نبوده و نیاز به جمع‌آوری داده‌های مشاهده‌ای برای این منظور ضروری است. با این حال طبق یافته‌های احمدی و همکاران



شکل ۷- رابطه بین زمان به رسیدن به تعادل سیستم در سرعت‌های مختلف پایین افتادن تراز آب شور.

Figure 7- Reaching steady state vs different rates of saltwater drawdown.

عبارتی پنجه به میزان ۷۱ میلی‌متر به سمت آبخوان جابه‌جا شده است. این جابجایی پس از ۴۵ به تعادل رسیده است و اصطلاحاً شرایط ماندگار حاصل شده است. این زمان به‌عنوان حداقل زمان تعادل حالت افزایش تراز سطح آب و با T_{A_min} نامگذاری شد. همچنین در این شکل موقعیت پنجه آب شور برای زمان‌های مختلف تا رسیدن به موقعیت ثابت نشان داده شده است. طبق این شکل بعد از حدود ۵ دقیقه، ۵۰ درصد پیشروی پنجه آب شور رخ می‌دهد اما برای حرکت ۵۰ درصد بعدی نیاز به زمان ۴۰ دقیقه بوده و در واقع ۵۰٪ درصد دوم پیشروی در مدت زمان ۸ برابری نسبت به ۵۰ درصد اول طی می‌شود.

این مقادیر برای همه سرعت‌ها تقریباً یکسان است. بطوریکه در همه سرعت‌های افزایش تراز سطح آب، تقریباً نصف مسافت جابجایی پنجه آب شور در مدت ۵ دقیقه از لحظه شروع جابجایی رخ داده است. بررسی زمان جابجایی پنجه آب شور

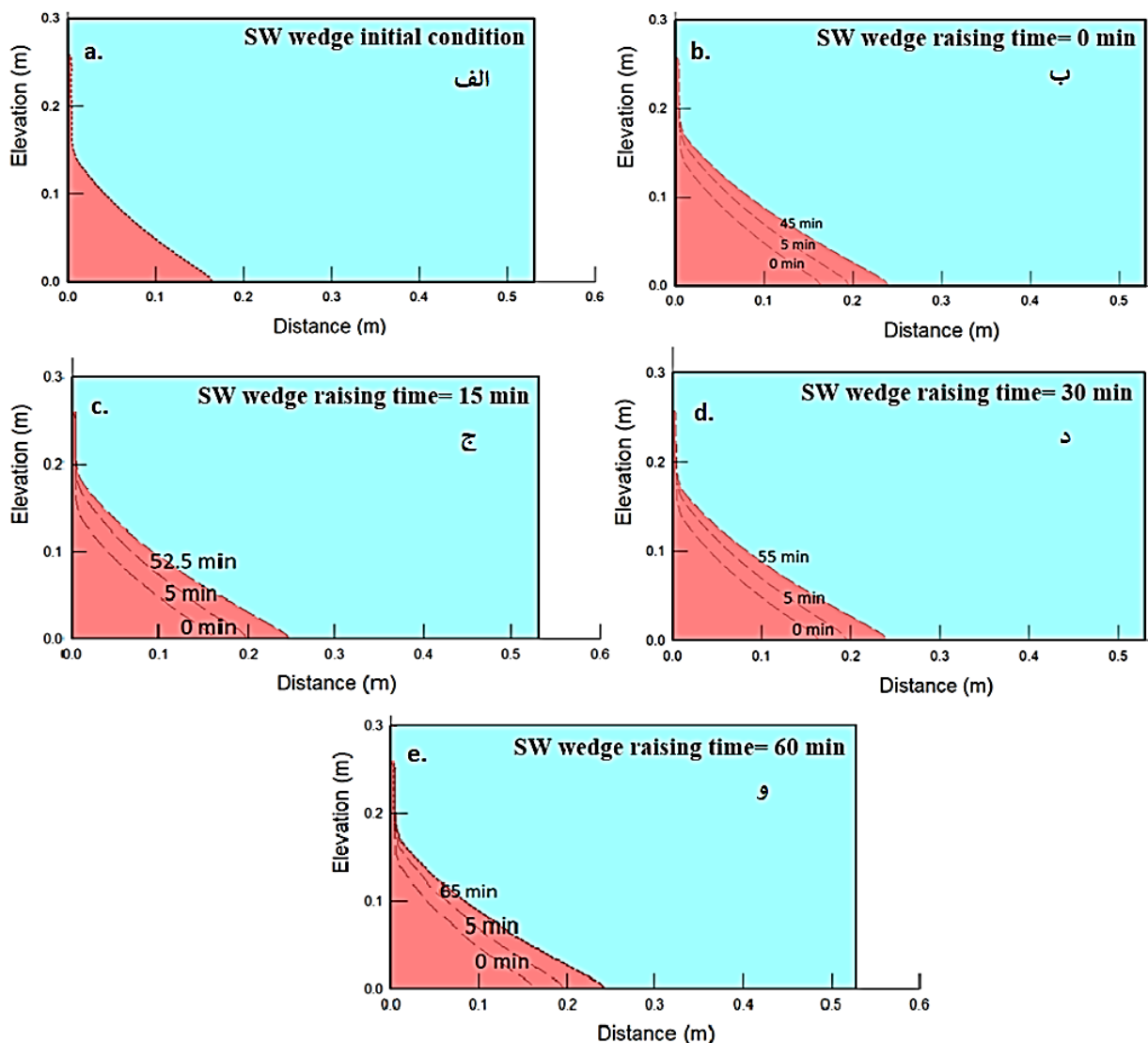
افزایش تراز آب شور

به‌منظور شبیه‌سازی رفتار پنجه آب شور در شرایط افزایش سطح آب دریا، تراز سطح آب در مخزن آب شور در چهار حالت مختلف به صورت ناگهانی و در طی مدت زمان‌های ۱۵، ۳۰ و ۶۰ دقیقه به میزان یکسان و برابر با ۲ میلی‌متر افزایش داده شد. شرایط اولیه برای این بخش از نتایج بر اساس شرایط ارائه شده در حالت کاهش ناگهانی سطح آب شور در نظر گرفته شد. بدین معنی که حالت پایدار و ثابتی از پنجه آب شور تحت ترازهای آب شیرین و آب شور برابر ۲۶/۵۵ و ۲۵/۵ سانتیمتر در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از هر یک از این آنالیزها بر میزان پیشروی پنجه آب شور و همچنین زمان به تعادل رسیدن آن مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۸، نتایج مربوط به آنالیزهای این بخش از تحقیق را ارائه می‌دهد. طبق این شکل افزایش تراز آب شور به صورت ناگهانی موجب جابجایی پنجه آب شور از نقطه ۰/۱۶۸ متر به ۰/۲۴۰ متر شده است. به

توقف فرآیند افزایش سطح آب شور به تصویر کشیده شده است. همانطوریکه در این شکل مشخص است با کاهش سرعت افزایش سطح آب، زمان رسیدن به تعادل به زمان صرف شده برای افزایش سطح آب نزدیک تر می شود. به طوری که در سریع ترین حالت افزایش سطح آب، ۴۵ دقیقه طول کشیده تا سیستم به تعادل برسد. در مقابل وقتی تراز سطح آب در مدت ۶۰ دقیقه به همان مقدار افزایش می یابد، ۵ دقیقه بعد از توقف افزایش تراز آب شور سیستم به تعادل رسیده است.

در مقایسه با زمان افزایش تراز آب نشانگر این است که سرعت جابجایی پنجه آب شور تا زمانی که افزایش تراز آب متوقف نشده ثابت بوده ولی پس از توقف افزایش تراز آب شور، سرعت جابجایی تغییر می کند.

شکل ۹ زمان نسبی به تعادل رسیدن پنجه آب شور را به ازای زمان های متفاوت افزایش سطح آب به میزان برابر ۲ میلی متر نسبت به زمان تعادل T_{A_min} نشان می دهد. علاوه بر این در این شکل زمان لازم برای رسیدن به تعادل سیستم پس از



شکل ۸- سرعت و مقدار تغییر مکان موقعیت پنجه آب شور به ازای سرعت های مختلف افزایش تراز آب شور به میزان ۲ میلی متر. الف) شرایط اولیه، ب) تغییرات آنی، ج) تغییرات مرز در ۱۵ دقیقه، د) تغییرات مرز در ۳۰ دقیقه، و) تغییرات مرز در ۶۰ دقیقه.

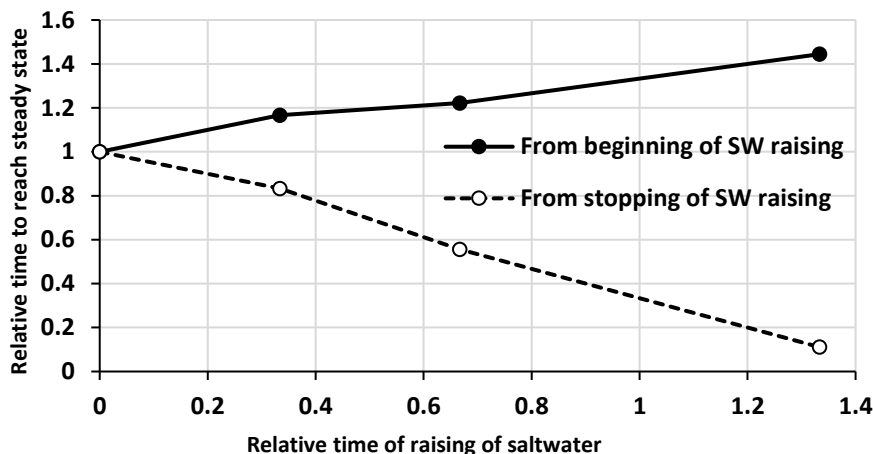
Figure 8- Rate and displacement of saltwater wedge under different rate of saltwater level raising up to 2 mm. a) Initial condition, b) Instantaneous change, c) Variation in 15 min., d) Variation in 30 min., e) Variation in 60 min.

خط ممتد در شکل ۹)، ولی به نظر می رسد در صورتی که سرعت افزایش تراز سطح آب بسیار کند گردد، زمان به تعادل رسیدن سیستم و شکل گیری موقعیت جدید برای پنجه آب

هر چند تعادل نهایی بعد از توقف تغییرات تراز سطح آب اتفاق می افتد و بدیهی است که زمان کل رسیدن به تعادل متناسب با زمان افزایش تراز سطح آب افزایش پیدا می کند (منحنی

رسید اختلاف جزئی در طول پنجه آب شور نفوذ یافته است. شکل ۱۰ توزیع غلظت شوری را در امتداد کف مدل به ازای سرعت‌های متفاوت افزایش سطح آب نشان می‌دهد. در واقع در همه این زمان‌ها تمامی مشخصات شامل بار فشار و غلظت یکسان بوده و فقط زمان و یا سرعت اعمال تغییرات تراز آب متفاوت بوده است. این شکل برای پیشانی گوه آب شور و محدوده ناحیه بینابین ترسیم شده است (به ابعاد محور افقی توجه شود).

شور مقارن با توقف تغییرات تراز سطح آب باشد. از آن جایی که منحنی خط چین در شکل ۹ با افزایش زمان به سمت صفر میل می‌کند. این بدین معنی است که در صورتی که زمان تغییرات مرز تا رسیدن به حداکثر تراز $1/4$ برابر یا بیشتر از مقدار TA_{min} باشد، زمان به تعادل رسیدن پنجه آب شور منطبق بر زمان تغییرات مرز آب شور خواهد بود. نقطه دیگری که می‌توان با مقایسه زبانه‌های آب شور محاسبه شده بر اساس سرعت‌های متفاوت افزایش تراز آب شور بدان

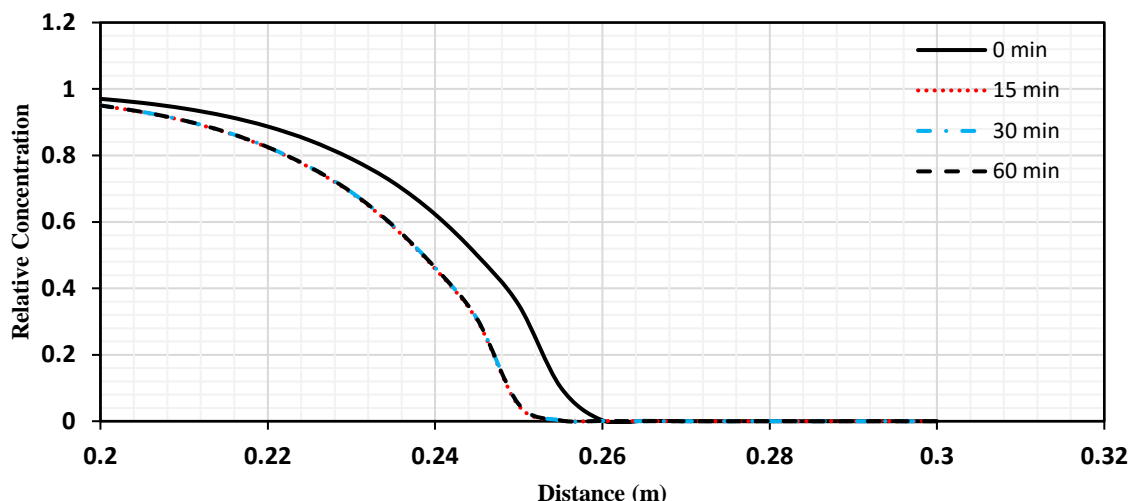


شکل ۹- زمان نهایی رسیدن به پایداری پنجه آب شور تحت زمانهای مختلف افزایش سطح آب شور (نقاط تو پر) و بخشی از زمان صرف شده جهت رسیدن به تعادل پس از توقف افزایش تراز آب (نقاط تو خالی).

Figure 9- Time to reach a steady state of saltwater wedge under the different rates of saltwater level raising (solid points) and the needed time to reach a steady state after stopping saltwater level (null points).

در حدود ۴ درصد می‌باشد بطوریکه می‌توان گفت طول پیشروی غلظت آب شور در زیر سفره آب شیرین در صورت اعمال آنی افزایش تراز آب شور ۴ درصد بیش برآورد خواهد بود. بدین ترتیب یافته‌های محققانی نظیر (Ketabchi et al., 2016; Watson et al., 2010; Ketabchi et al., 2016) که در مطالعات عددی خویش افزایش تراز سطح آب دریاها را آنی لحاظ کرده‌اند احتمالاً مقدار پیشروی آب شور بیشتر از شرایط واقعی برآورد شده است.

طبق این شکل در صورت افزایش آنی سطح آب شور میزان پیشروی پنجه آب شور بیش از سایر حالات می‌باشد و در سه حالت دیگر یعنی زمان‌های ۱۵، ۳۰ و ۶۰ دقیقه نتایج یکسانی حاصل شده است. این اختلاف در حالت افزایش آنی نسبت به حالت‌های دیگر به دلیل نفوذ ضربه‌ای پنجه آب شور به سیستم بوده که موجب می‌شود که پیشروی آب شور بیش از حالتی باشد که سطح آب شور آهسته بالا می‌آید. حداکثر این اختلاف



شکل ۱۰- توزیع نسبی شوری در طول کف مدل به ازای زمانهای صرف شده برای افزایش ۲ میلیمتری تراز آب شور.

Figure 10- Salt concentration distribution in the bottom of the model at different times under raising of 2 mm of saltwater.

حالت افزایش آبی به مقدار ۴ درصد بیشتر از حالت‌هایی است که افزایش تراز سطح آب شور تدریجی باشد. مشابه حالت کاهش تراز سطح آب، حداقل زمان لازم برای رسیدن به شرایط تعادل جدید پنجه آب شور در حالت افزایش ناگهانی سطح آب رخ می‌دهد و هر چقدر مقدار زمان صرف شده برای افزایش مقدار یکسان تراز آب شور طولانی‌تر باشد، فاصله زمانی بین توقف تغییرات تراز آب و تعادل پنجه آب شور کوتاه‌تر خواهد بود.

با اتکا به یافته‌های این تحقیق می‌توان مسائلی را که دارای تغییرات زمانی طولانی مدت شرایط مرزی می‌باشند را بدون اعمال فاکتور زمان بر تغییرات تراز آب شور، با شرایط تغییرات آبی جایگزین کرد. این فرآیند در کاهش زمان محاسبات و همچنین سهولت تعریف شرایط مرزی می‌تواند بسیار مؤثر باشد. با این حال اصلاحات لازم در زبانه آب شور محاسبه شده می‌بایستی در نظر گرفته شود. متأسفانه داده‌های معیار مشاهده شده برای مطالعه پدیده تداخل آب شور و شیرین بسیار محدود است لذا پیشنهاد می‌گردد که اعمال لحظه‌ای و آهسته روند تغییرات تراز آب شور بر پدیده مورد بحث به صورت آزمایشگاهی مطالعه گردد هر چند که کنترل دقیق آزمایش‌های تداخل آب شور و شیرین بسیار مشکل می‌باشد.

نتیجه گیری

در این تحقیق اثر شرایط مرزی مربوط به تراز آب شور در مدل‌سازی عددی پدیده تداخل آب شور و شیرین در دو حالت متفاوت کاهش و یا افزایش تراز سطح آب شور مورد ارزیابی قرار گرفت و نتیجه‌گیری‌های کلی به شرح ذیل حاصل شد: الف) در حالت پایین افتادن تراز سطح آب شور پس‌روی پنجه آب شور رخ می‌دهد و مقدار پس‌روی پنجه آب شور به سمت مخزن آب شور مستقل از سرعت پایین افتادن سطح آب شور می‌باشد. با این حال سرعت جابجایی پنجه آب شور ثابت نبوده و وابسته به سرعت پایین افتادن سطح آب شور است. بیشترین سرعت جابجایی پنجه آب شور برای رسیدن به شرایط تعادل جدید در حالت پایین افتادن ناگهانی رخ می‌دهد و به عبارتی زمان تعادل حداقل (زمان تثبیت پنجه آب شور) در این حالت اتفاق می‌افتد. اگر مدت زمان پایین افتادن تراز سطح آب شور در مدتی برابر یا کمتر از نصف زمان تعادل حداقل باشد، تفاوتی در زمان تعادل رخ نمی‌دهد در غیر این صورت با افزایش زمان جابجایی تراز آب شور به موقعیت جدید، مدت زمان رسیدن به تعادل به صورت خطی افزایش می‌یابد.

ب) در حالت افزایش تراز سطح آب شور، به ازای سرعت‌های مختلف افزایش سطح آب میزان پیشروی سطح آب شور در

منابع

Abd-Elhamid, H.F., Abdel-Aal, G.M., Fahmy, M., Sherif, M., Zelenáková, M., Abd-Elaty, I., 2022.

Experimental and Numerical Study to Investigate the Impact of Changing the Boundary Water Levels on Saltwater Intrusion in Coastal Aquifers. Water, 14(4), 631p.

index. *Journal of hydrologic engineering*, 13(10): 981-986.

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

Ketabchi, H., Jahangir, M. S., 2019. Probabilistic numerical assessment of seawater intrusion overshoot in heterogeneous coastal aquifers. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 33(11-12): 1951-1968.

Kiro, Y., Yechieli, Y., Lyakhovsky, V., Shalev, E., Starinsky, A. 2008. Time response of the water table and saltwater transition zone to a base level drop. *Water Resources Research*, 44(12).

Kjelgren, R., Rupp, L., Kilgren, D., 2000. Water conservation in urban landscapes. *HortScience*, 35(6):1037-1040

Krahn, J., 2004. Seepage modeling with SEEP/W: An engineering methodology. GEO-SLOPE International Ltd. Calgary, Alberta, Canada. 205 p.

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*, 295-313.

Lu, C., Werner, A. D., 2013. Timescales of seawater intrusion and retreat. *Advances in water resources*, 59: 39-51.

Morgan, L.K., Bakker, M., Werner, A.D., 2015. Occurrence of seawater intrusion overshoot. *Water Resources Research*, 51(4):1989-1999.

Morgan, L.K., Werner, A.D., 2014. Seawater intrusion vulnerability indicators for freshwater lenses in strip islands. *Journal of Hydrology*, 508: 322-327.

Motallebian, M., Ahmadi, H., Raouf, 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.

Motallebian, M., Ahmadi, H., Raouf, A., Cartwright, N., 2022. Impacts of Receding of the Lakes Located in the Arid and Semi-arid Areas on the Coastal Groundwater: Integrated Modeling and Experimental Study. *Water Resources Management*, 36(11): 4057-4080.

Robinson, G., Ahmed, A.A. Hamill, G.A., 2016. Experimental saltwater intrusion in coastal aquifers using automated image analysis: Applications to homogeneous aquifers. *Journal of Hydrology*, 538: 304-313.

Steinmuller, H.E., Chambers, L.G., 2018. Can saltwater intrusion accelerate nutrient export from freshwater wetland soils? An experimental approach. *Soil Science Society of America Journal*, 82(1): 283-292.

Thangarajan, M., Singh, V.P. eds., 2016. *Groundwater assessment, modeling, and management*. CRC Press. 534 p.

Abdoulhalik A., Ahmed A.A., 2018. Transient investigation of saltwater upcoming in laboratory-scale coastal aquifer. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 214:149-160.

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

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

Ahmadi, H., Hemmati, M., Motallebian, M., 2022. Numerical modeling of Saltwater Wedge under Intruding and Receding Conditions (Case Study: Kahriz Aquifer, Lake Urmia). *Water Resources*, 49 (2):248-257

Barlow, P.M., 2003. *Groundwater in freshwater-saltwater environments of the Atlantic coast* (Vol. 1262). Washington, DC, USA: US Department of the Interior, US Geological Survey. 121 p.

Chang, S.W., Clement, T.P., 2012. Experimental and numerical investigation of saltwater intrusion dynamics in flux-controlled groundwater systems. *Water Resources Research*, 48(9).

Chang, S. W., Clement, T. P., Simpson, M. J., Lee, K. K., 2011. Does sea-level rise have an impact on saltwater intrusion?. *Advances in water resources*, 34(10):1283-1291.

Dalai, C., Dhar, A., 2022a. Impact of beach face slope variation on saltwater intrusion dynamics in unconfined aquifer under tidal boundary condition. *Flow Measurement and Instrumentation*, 102298 p.

Dalai, C., Dhar, A., 2022b. Two-Dimensional Laboratory-Scale Experiments on Saltwater Intrusion Dynamics. In *Groundwater and Water Quality*. 303-311

Feseker, T., 2007 Numerical studies on saltwater intrusion in a coastal aquifer in northwestern Germany. *Hydrogeol J* 15: 267-279

Frind, E.O., 1982. Seawater intrusion in continuous coastal aquifer-aquitard systems. *Advances in Water Resources*, 5(2): 89-97.

Giambastiani B.M, Antonellini M., Essink G.H.O., Stuurman R.J., 2007. Saltwater intrusion in the unconfined coastal aquifer of Ravenna (Italy): a numerical model. *Journal of Hydrology*, 340(1-2): 91-104.

Gladden, L. A., & Park, N. S. 2016. *Coastal Groundwater Development: Challenges and Opportunities*. *Groundwater Assessment, Modeling, and Management*, 3-16.

Goswami, R.R., Clement, T.P., 2007. Laboratory-scale investigation of saltwater intrusion dynamics. *Water Resources Research*, 43(4).

Jain, S. K., Sudheer, K. P., 2008. Fitting of hydrologic models: a close look at the Nash-Sutcliffe

Werner, A. D., Simmons, C. T., 2009. Impact of sea-level rise on sea water intrusion in coastal aquifers. *Groundwater*, 47(2): 197-204.

Yi, L., Ma, B., Liu, L., Tang, G., Wang, T., 2016. Simulation of groundwater-seawater interaction in the coastal surficial aquifer in Bohai Bay, Tianjin, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 177: 20-30.

Williams, W.D., 2002. Environmental threats to salt lakes and the likely status of inland saline ecosystems in 2025. *Environmental conservation*, 29(2):154-167.

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