

بررسی عددی هجوم و برگشت آب در آبخوان‌های ساحلی

عباسعلی رضاپور^۱، سید فضل‌الله ساغروانی^{۲*}

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۱۲/۰۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۰۲/۰۱)

چکیده

هجوم آب دریا فرایندی گذراست، اما محدودیت‌های انسانی در برداشت نتایج آزمایشگاهی و عددی موجب شده که به رفتار گذرای این پدیده کمتر توجه شود. در مطالعه حاضر، حرکت گوه آب شور و ناحیه اختلاط در آبخوانی محصور، بر اثر کاهش و افزایش ارتفاع آب شیرین از مرز زمین توسط مدل عددی SUTRA شبیه‌سازی شد. به منظور برداشت و آنالیز نتایج شبیه‌سازی شده طی زمان، الگوریتم خودکاری در محیط MATLAB پیاده‌سازی شد. برای بررسی بیشتر حرکت گوه آب شور، تغییرات سه شاخص طول پنجه، مساحت و ارتفاع گوه نسبت به زمان اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد رفتار شاخص مساحت گوه با رفتار شاخص طول پنجه گوه در شرایط گذرا مشابه است. در وضعیت هجوم آب دریا، شاخص ارتفاع گوه به مراتب زودتر از دو شاخص دیگر به شرایط دائمی می‌رسد، در صورتی که در وضعیت برگشت، هر سه شاخص تقریباً به طور هم‌زمان پایدار می‌شوند. همچنین، نتایج نشان داد در اوایل مرحله برگشت آب دریا، ناحیه اختلاط گسترش می‌یابد، ولی در ادامه دوباره منقبض می‌شود تا اینکه سرانجام به مقدار اولیه خود در ابتدای وضعیت هجوم می‌رسد. آنالیزهای حساسیت نشان دادند سرعت هجوم یا برگشت آب دریا تأثیری بر ضخامت ناحیه اختلاط در شرایط دائمی ندارد.

کلیدواژه‌گان: آبخوان ساحلی، برگشت آب دریا، شرایط گذرا، مدل‌سازی عددی، هجوم آب دریا.

مقدمه

هجوم آب دریا یک مسئله جدی زیست‌محیطی است، چرا که حدود ۸۰ درصد از جمعیت جهان در نواحی ساحلی زندگی می‌کنند و آب مورد نیاز اغلب آنها از آبخوان‌های ساحلی تأمین می‌شود [۱]. آب دریا به علت چگالی بیشتر نسبت به آب زیرزمینی، در خلاف جهت اصلی جریان، به سمت آبخوان هجوم می‌آورد و یک گوه آب شور^۱ را در عمق آبخوان ایجاد می‌کند [۲ و ۳]. پیشروی گوه آب شور با کاهش شیب هیدرولیکی آبخوان که بیشتر نتیجه استخراج آب زیرزمینی است، تشدید می‌شود و از حجم آب شیرین آبخوان می‌کاهد. در مرز مشترک آب شور و شیرین، ناحیه بینابینی یا ناحیه اختلاط^۲ توسعه می‌یابد. ناحیه اختلاط در درجه اول، ناشی از تأثیرات پراکندگی مکانیکی و پخشیدگی مولکولی^۳ ماده محلول است. هرچند عوامل دیگری مانند ناهمگنی در ساختار زمین‌شناختی، نیروهای موج و جذر و مدی، بالآآمدگی تراز دریا^۴ و عملیات پمپاژ بر آن مؤثر است [۴]. ناحیه اختلاط منطقه‌ای مهم در آبخوان‌های ساحلی است، چرا که اختلاط حتی یک درصد از آب شور دریا با آب زیرزمینی کیفیت آب را برای آشامیدن از بین می‌برد [۵]. به علاوه، این ناحیه زیر زمین را به سیالاتی با چگالی‌های مشخص و مجزا تفکیک کرده و میدان جریان زیرزمینی را کنترل می‌کند [۴]. مدیریت مؤثر بر منابع آب‌های زیرزمینی ساحلی به توجه ویژه، به حرکت گوه آب شور و ناحیه اختلاط در شرایط گذرا نیاز دارد.

روش‌های ریاضی ابزار تحقیقاتی مفیدی برای پیش‌بینی پدیده هجوم آب دریا هستند که در مطالعات بسیاری از محققان استفاده شده‌اند. برای بررسی هجوم آب دریا توسط مدل‌های ریاضی، بیشتر از دو روش استفاده می‌شود: الف) روش سطح مشترک-قاطع^۵، ب) روش سطح مشترک-پراکندگی یا روش چگالی-متغیر^۶. در روش سطح مشترک-قاطع، آب شور و شیرین به‌عنوان دو سیال امتزاج‌ناپذیر فرض می‌شوند، بنابراین در این روش از شکل‌گیری ناحیه اختلاط صرف‌نظر می‌شود. این روش معمولاً برای حل تحلیلی مسائل در شرایط دائمی به کار

می‌رود. مبانی این روش در پژوهش‌های [۳، ۶ و ۷] آمده است و از آن در مطالعات بسیاری از جمله مطالعات [۸-۱۱] استفاده شده است. در روش چگالی-متغیر، معادلات جریان آب زیرزمینی و معادلات انتقال ماده محلول به طور هم‌زمان حل می‌شوند، بنابراین در روش یادشده امکان شبیه‌سازی ناحیه اختلاط وجود دارد. در این روش معادلات بیشتر توسط روش‌های عددی حل می‌شوند و در نتیجه پیچیدگی محاسباتی زیادتری نسبت به روش قبلی دارند [۱۲ و ۱۳]. اولین تلاش جدی برای شبیه‌سازی عددی جریان چگالی-متغیر توسط هنری انجام شد. مسئله هنری^۷ یک مسئله منحصر به فرد است، چون تنها مسئله‌ای است که پدیده هجوم آب دریا را از روش چگالی-متغیر به صورت تحلیلی بررسی کرده است. با وجود این، مسئله هنری فقط شرایط دائمی هجوم آب دریا را بررسی کرده و در آن محدودیت‌های وجود دارد که امکان شبیه‌سازی هجوم آب دریا را در شرایط واقعی فراهم نمی‌کند. در مسئله هنری تأثیرات پراکندگی مکانیکی در نظر گرفته نشده و ناحیه اختلاط فقط به علت وجود ضریب پخشیدگی مولکولی زیاد شکل می‌گیرد [۴ و ۱۴]. سیمپسون و کامنت برای بهبود مسئله هنری، پیشنهاد کاهش تغذیه آب شیرین را دادند [۱۵]. هلد و همکارانش اثر ناهمگنی محیط متخلخل را در مسئله هنری بررسی کردند [۱۶]. در مطالعه‌ای دیگر آباراکا و همکارانش در نظر گرفتن تأثیرات پراکندگی مکانیکی در مسئله هنری، توصیف بهتری از پدیده هجوم آب دریا ارائه دادند [۱۴]. آنها با انجام شبیه‌سازی‌های عددی فراوان، نشان دادند در شرایط دائمی هر دو پارامتر پراکنده‌پذیری طولی^۸ و پراکنده‌پذیری عرضی^۹ به مقدار مساوی بر گسترش ناحیه اختلاط مؤثرند. این در حالی است که پاستر و داگان [۱۷] و هلد و همکارانش [۱۶] معتقد بودند که برای آبخوان‌های همگن و در شرایط دائمی، پراکنده‌پذیری عرضی محلی مسئول اصلی گسترش ناحیه اختلاط است.

در سال‌های اخیر روش‌های ریاضی بیشتر برای بررسی تأثیرات بالآآمدگی تراز دریا بر رفتار گوه آب شور استفاده شده است. استفاده از روش سطح مشترک-قاطع برای

1. Saltwater wedge
2. Mixing zone
3. Molecular diffusion
4. Sea-level rise
5. Sharp-interface method
6. Variable-density method

7. Henry problem
8. Longitudinal dispersivity
9. Transverse dispersivity

شیب هیدرولیکی بر رفتار ناحیه اختلاط در شرایط گذرا با انجام آنالیزهای حساسیت تعیین شدند.

مواد و روش‌ها

مدل مفهومی

مدل مفهومی استفاده شده در مطالعه حاضر، یک آبخوان محصور دوبعدی است که به صورت همگن و همسان‌گرد فرض شده است. طول آبخوان یک هزار متر و ضخامت آن ۳۰ متر است (شکل ۱). مشخصات هندسی و پارامترهای هیدرولوژیکی آبخوان، برای مسئله- مبنای تحقیق حاضر، مشابه آبخوان مطالعه لو و وارنر در نظر گرفته شد (جدول ۱) [۲۶]. دریا در سمت چپ آبخوان واقع شده و سطح آن در تراز ۳۰ متری بستر آبخوان ثابت است. برای بررسی فرایند هجوم آب دریا در مسئله- مبنای ارتفاع آب شیرین در مرز راست آبخوان از تراز ۳۲ متری به تراز ۳۱ متری به صورت آبی کاهش یافت (مرحله هجوم آب دریا) و برای بررسی چگونگی برگشت آب دریا، این بار ارتفاع آب شیرین از تراز ۳۱ متری به تراز ۳۲ متری به صورت آبی افزایش یافت (مرحله برگشت آب دریا). در تمامی شبیه‌سازی‌ها، کانتور غلظت ۵۰ درصد به عنوان مرز مشترک آب شور و شیرین (مرز گوه آب شور) و سطح آب دریا در تراز ۳۰ متری بستر آبخوان، ثابت در نظر گرفته شده است. در تحقیق حاضر برای بررسی رفتار ناحیه اختلاط، تغییرات ضخامت ناحیه اختلاط بین کانتورهای غلظت ۲۵ تا ۷۵ درصد و در حد فاصل پیشروی ۲۵ تا ۷۵ درصد پنجه گوه اندازه‌گیری شد.

مدل‌سازی عددی

در تحقیق حاضر برای مدل‌سازی عددی هجوم آب دریا از کد [۲۷] SUTRA 2.2 استفاده شده است. SUTRA^۲ یک برنامه رایانه‌ای است که توانایی مدل‌سازی حرکت سیال با انتقال ماده محلول (یا انرژی) را در محیط متخلخل دارد. به علاوه، مدل SUTRA می‌تواند برای شبیه‌سازی جریان در شرایط اشباع و غیراشباع، در فضای دوبعدی (سطح مقطع) و سه‌بعدی (در پلان) به کار برود. معادلات اصلی حاکم بر جریان سیال و انتقال ماده محلول در محیط اشباع، در مدل عددی SUTRA به ترتیب زیر است (روابط ۱ و ۲).

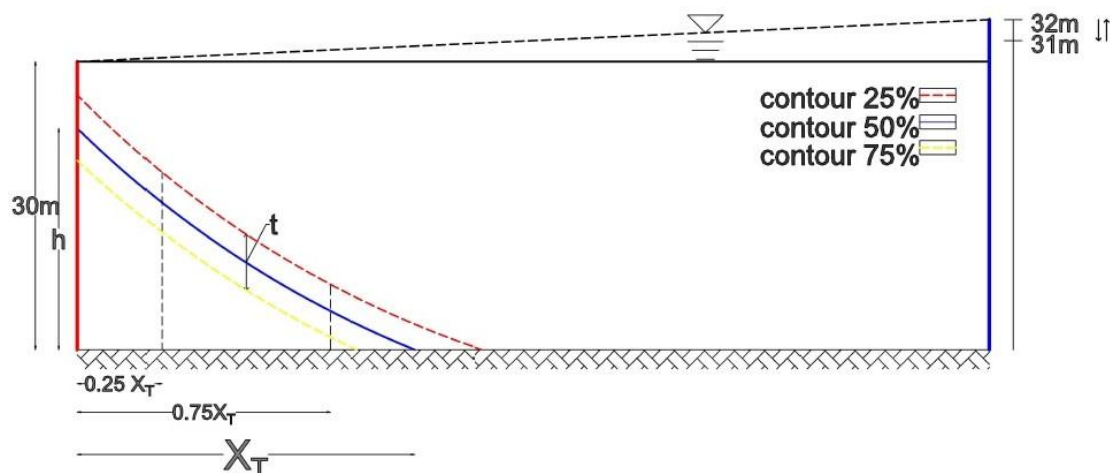
حل تحلیلی تأثیرات بالاآمدگی تراز دریا بر پدیده هجوم آب دریا، در شرایط دائمی، در مطالعات [۱۸-۲۰] دیده می‌شود. استفاده از روش چگالی- متغیر نیز بیشتر برای شبیه‌سازی‌های پدیده گذرای اور شوت^۱ انجام شده است. در این روش نیز تأکید بر اندازه‌گیری تغییرات شاخص طول پنجه گوه در زمان‌هایی مشخص بوده است [۲۱-۲۳]. کتابچی و همکارانش ضمن انجام مروری علمی بر موضوع تأثیرات بالاآمدگی تراز آب دریا بر پدیده هجوم آب شور، تأثیر بالاآمدگی تراز دریا را به همراه ترکیبی از پارامترهای مؤثر دیگر مانند تغییرات میزان تغذیه، تغییر شیب بستر آبخوان و تغییر شرایط مرزی سمت زمین بر پیشروی پنجه گوه آب شور بررسی کردند [۲۴].

بررسی منابع علمی نشان می‌دهد با وجود مطالعات وسیعی که روی پدیده هجوم آب دریا صورت گرفته است، هنوز شکاف‌های علمی برای درک این پدیده در شرایط گذرا وجود دارد [۴]. به طوری که شناخت عمومی از مسئله هجوم آب دریا، در درجه اول مبتنی بر شرایط دائمی این پدیده از جمله شکل‌های مختلف مسئله هنری است [۲۵]. برداشت چشمی نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی در شرایط گذرا، با توجه به حرکت بسیار آرام سیال درون محیط متخلخل، به خصوص برای ناحیه اختلاط، کاری سخت، زمان‌بر و تقریباً غیرممکن است. از این‌رو، محققان برای بررسی رفتار گوه آب شور بیشتر بر اندازه‌گیری طول پنجه گوه، آن هم در زمان‌هایی مشخص و محدود تمرکز داشته‌اند و برای بررسی رفتار ناحیه اختلاط اغلب به شرایط دائمی مسئله توجه کرده‌اند.

هدف از انجام تحقیق حاضر، بررسی حرکت گذرای گوه آب شور و ناحیه اختلاط، بر اثر کاهش و افزایش سطح ایستابی آبخوان، توسط مدل عددی SUTRA است. به این منظور و برای رفع محدودیت‌های انسانی، نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی طی زمان، با توسعه الگوریتمی در محیط MATLAB به صورت خودکار برداشت و آنالیز شدند. برای بررسی بیشتر دینامیک گوه آب شور علاوه بر آنالیز رفتار شاخص طول پنجه گوه، که در بیشتر تحقیقات قبلی از آن استفاده شده است، رفتار مساحت گوه و ارتفاع آن در مرز آب دریا نیز آنالیز شدند. در نهایت، تأثیر سرعت تغییر

2. Saturated-Unsaturated-TRANsport

1. Overshoot



شکل ۱. شماتیکی از مدل مفهومی آبخوان ساحلی به همراه پارامترهای اندازه‌گیری شده در تحقیق
 X_T عبارت است از شاخص طول پنجه گوه، h شاخص ارتفاع گوه و t عبارت است از ضخامت متوسط ناحیه اختلاط در حد فاصل
 ۲۵ تا ۷۵ درصد طول پنجه گوه

جدول ۱. خلاصه‌ای از پارامترهای به کاررفته در مسئله - مبنا

واحد	مقدار	پارامتر
m	۱۰۰۰	طول آبخوان (L)
m	۳۰	ضخامت آبخوان (H)
m	۱	پراکنده پذیری طولی (α_L)
m	۰/۱	پراکنده پذیری عرضی (α_T)
-	۰/۳	تخلخل مؤثر (n)
Kg/m ³	۱۰۲۵	چگالی آب شور (ρ_s)
Kg/m ³	۱۰۰۰	چگالی آب شیرین (ρ_f)
-	۰/۰۳۵	نسبت غلظت جرمی (C_s)
m ²	۱/۱۸E-۱۱	نفوذپذیری ذاتی (k)
1/m	۰/۰۰۸	ذخیره ویژه (S_s)

$$(PS_p) \frac{\partial P}{\partial t} + \left(\varepsilon \frac{\partial \rho}{\partial C} \right) \frac{\partial C}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\left(\frac{kP}{\mu} \right) \cdot (\nabla P - \rho g) \right] = Q_p \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\varepsilon \rho C)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon \rho V C) - \nabla \cdot [\varepsilon \rho (D_m I + D) \cdot \nabla C] = Q_p (C^* - C) \quad (2)$$

منبع سیال $[M_s/M]$ است. SUTRA برای حل معادلات جریان وابسته به چگالی و انتقال ماده محلول از ترکیب روش‌های اجزای محدود و اختلاف محدود استفاده می‌کند. روش اجزای محدود برای توصیف جمله‌هایی از معادله به کار می‌رود که بیان‌کننده شار جرم سیال و شار جرم محلول (یا شار انرژی) باشند و سایر جمله‌های بدون شار، با استفاده از روش اختلاف محدود تقریب می‌خورند. این شیوه حل معادلات، قابلیت زیاد SUTRA را نشان می‌دهد

که در آن ρ چگالی سیال $[M/L^3]$ ، فشار S_{Op} فشار مخصوص $[M/(L^2 T^2)]^{-1}$ ، فشار سیال P ، $[M/(L^2 T^2)]$ ، ε تخلخل خاک $[1]$ ، k نفوذپذیری ذاتی خاک $[L^2]$ ، μ لزجت دینامیکی سیال $[M/(L^* T)]$ ، g شتاب ثقل $[L/T^2]$ ، Q_p منبع جرمی سیال $[M/(L^3 * T)]$ ، V میانگین سرعت سیال (L/T) ، D_m ضریب پخش مولکولی $[L^2/T]$ ، I ماتریس همانی $[1]$ ، D ماتریس پراکنندگی مکانیکی $[L^2/T]$ ، C غلظت جرمی محلول $[M_s/M]$ و C^* غلظت ماده محلول در

الف) در هر گام زمانی کانتورهای غلظت مد نظر (کانتور ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد) با دقت زیادی رسم شدند،
 ب) تمامی مشخصات مد نظر اعم از مقدار شاخص‌های انتخابی برای گوه و ضخامت متوسط ناحیه اختلاط اندازه‌گیری شد،
 ج) مراحل الف و ب در مدت‌زمان پیشروی و برگشت آب دریا به‌صورت خودکار انجام و تغییرات هر پارامتر نسبت به زمان رسم شد.

نتایج و بحث

قبل از مدل‌سازی مرحله هجوم آب دریا، ارتفاع آب شیرین در مرز راست میدان مدل (مرز سمت زمین) در تراز ۳۲ متری و ارتفاع آب شور در مرز سمت چپ میدان مدل در تراز ۳۰ متری تنظیم شدند. با این شرایط مرزی، مدل‌سازی تا وقتی ادامه یافت که سیستم به شرایط دائمی رسید (به بیانی، پیشروی گوه آب شور کاملاً متوقف شد). برای شرایط دائمی این مرحله، مقدار طول پیشروی پنجه گوه (X_T) برابر $168/71$ متر، مساحت گوه (S) برابر $1732/38$ مترمربع و مقدار شاخص ارتفاع گوه (h) مساوی $27/94$ متر به دست آمد. نتایج شرایط دائمی این مرحله به‌عنوان شرط اولیه مدل‌سازی، مرحله هجوم آب دریا در نظر گرفته شد.

مرحله هجوم آب دریا

همان‌طور که می‌دانیم، کاهش ارتفاع آب شیرین از تراز ۳۲ متری به ۳۱ متری، موجب کاهش میدان فشار دینامیکی آب شیرین درون آبخوان می‌شود. بنابراین، وضعیت تعادل سیستم آبخوان به هم می‌خورد و گوه آب شور شروع به پیشروی می‌کند. پیشروی گوه تا وقتی ادامه می‌یابد که سیستم آبخوان به شرایط تعادل جدید برسد. شکل‌های ۲-الف، ۲-ب و ۲-ج به ترتیب تغییرات شاخص‌های طول پنجه گوه، مساحت گوه و ارتفاع گوه را نسبت به زمان در هنگام هجوم آب دریا نشان می‌دهد. در شرایط دائمی مرحله هجوم آب دریا، مقادیر سه شاخص طول پنجه، مساحت، و ارتفاع گوه به ترتیب برابر $383/587$ متر، $4001/933$ مترمربع و $29/06$ متر به دست آمدند. اختلاف اندکی بین نتایج به دست آمده برای شاخص طول پنجه گوه با نتایج مطالعه لو و وارنر مشاهده می‌شود [۲۷]. علت اختلاف موجود این است که در تحقیق حاضر، سطح مشترک آب شور و شیرین کانتور غلظت ۵۰ درصد در نظر

که دقت ریاضی و انعطاف‌پذیری هندسی روش اجزای محدود را دارد، در حالی که کارآمدی روش اختلاف محدود را نیز حفظ می‌کند. برای ایجاد هندسه مدل، شبکه‌بندی میدان محاسباتی، تعریف شرایط مرزی و نیز به منظور مشاهده نتایج خروجی از رابط گرافیکی ModelMuse استفاده شد. برای شبیه‌سازی مناسب ناحیه اختلاط، میدان مدل به شبکه‌ای کوچک با ابعاد $\Delta X=1m$ و $\Delta Z=0.5m$ گسسته شد، به طوری که نتیجه آن ۶۰ هزار سلول چهارضلعی بود (مشابه مطالعه [۲۶] Lu and Werner). برای انتخاب ابعاد نهایی شبکه محاسباتی موارد زیر در نظر گرفته شد:

الف) جواب‌های به دست آمده از دو شبیه‌سازی متوالی، ناشی از کوچک کردن شبکه، در حد قابل قبولی بر هم منطبق شوند،

ب) شرط پایداری مکانی SUTRA (عدد پکلت کمتر از ۴) برقرار شود.

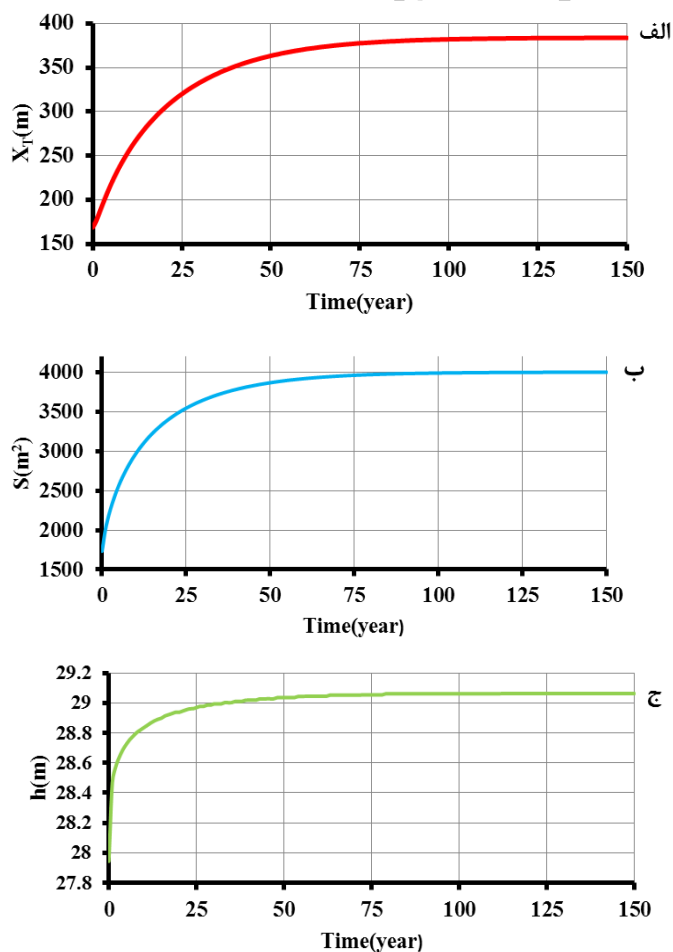
گام زمانی برابر $\Delta t = 1 \text{ day}$ تنظیم شد. شرط مرزی فشار هیدرواستاتیکی برای مرزهای راست و چپ میدان محاسباتی و شرط نبود جریان، برای مرزهای بالا و پایین میدان محاسباتی در نظر گرفته شد. برای شناسایی رفتار گوه آب شور و ناحیه اختلاط در شرایط گذرا باید اندازه شاخص‌های در نظر گرفته شده برای گوه و نیز اندازه ضخامت ناحیه اختلاط، در زمان‌های متوالی برداشت و آنالیز می‌شدند. برداشت مستقیم داده‌ها از SUTRA و سپس آنالیز آنها، با توجه به تعدد پارامترها و نیز مدت‌زمان زیاد آنها برای رسیدن به شرایط دائمی سخت و بسیار زمان‌بر بود. بنابراین، برای سهولت در کار و نیز زیاد کردن سرعت و دقت، لازم بود برداشت و آنالیز نتایج طی یک فرایند خودکار انجام شود. به این منظور، پس از اتمام شبیه‌سازی‌ها توسط SUTRA، نتایج غلظت به دست آمده برای تمامی گره‌های شبکه محاسباتی، در همه گام‌های زمانی متوالی، در قالب درایه‌های یک ماتریس از این برنامه خارج شدند. سپس، فایل نتایج غلظت در محیط MATLAB فراخوانی شد. با داشتن داده‌های غلظت، در MATLAB الگوریتمی پیاده‌سازی شد که در آن مراحل زیر انجام می‌شد:

بعدی است و امکان مقایسه را مستقل از واحد و مقدار کل تغییرات فراهم می‌کند. به طور مثال، برای شاخص طول پنجه گوه، تغییرات نسبی آن از رابطه ۳ محاسبه می‌شود. بدیهی است که هر یک از دو شاخص دیگر می‌تواند جانشین طول پنجه گوه در رابطه ۳ شود.

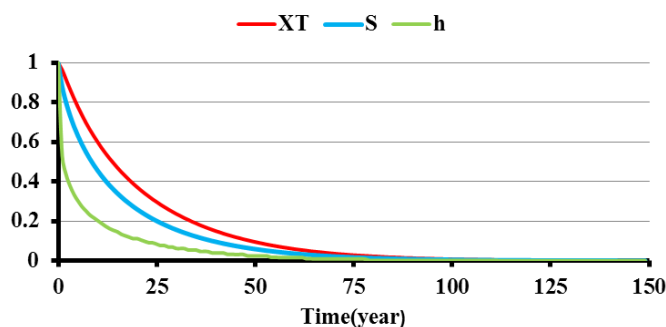
$$X_T^*(t) = \frac{|X_T(t_{ss}) - X_T(t)|}{\Delta X_T} \quad (3)$$

در رابطه ۳، $X_T^*(t)$ عبارت است از جابه‌جایی نسبی طول پنجه گوه پس از مدت‌زمان t از شروع هر یک از مراحل هجوم یا برگشت آب دریا. $X_T(t_{ss})$ اندازه شاخص طول پنجه گوه در شرایط دائمی هر یک از مراحل هجوم یا برگشت و $X_T(t)$ اندازه پیشروی پنجه گوه پس از مدت‌زمان t از شروع هر مرحله است. ΔX_T عبارت است از کل جابه‌جایی انجام‌شده توسط پنجه گوه در هر مرحله.

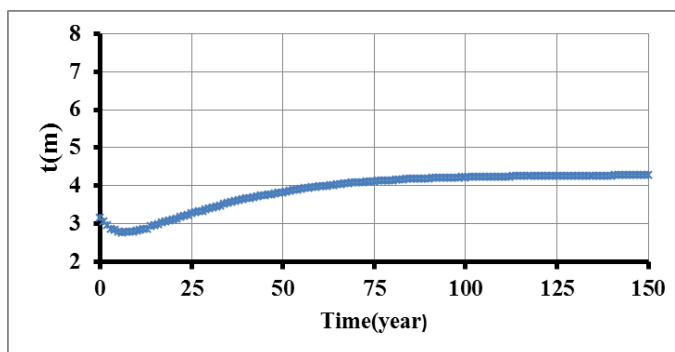
گرفته شده، در حالی که در مطالعه لو و وارنر سطح مشترک آب شور و شیرین کانتور غلظت ۹۰ درصد انتخاب شده است [۲۶]. بررسی‌ها نشان داد چنانچه در تحقیق حاضر نیز از کانتور ۹۰ درصد استفاده شود، نتایج کاملاً منطبق بر نتایج مطالعه لو و وارنر خواهد بود [۲۶]. با نگاهی گذرا به این شکل‌ها، تا حدودی مشخص می‌شود که رفتار شاخص مساحت گوه مشابه رفتار شاخص طول پنجه گوه است، به بیانی شیب خط مماس بر این دو منحنی در زمان‌های مساوی تقریباً با هم برابرند. در حالی که رفتار شاخص ارتفاع گوه متفاوت از دو شاخص دیگر به نظر می‌رسد. برای مشخص کردن این موضوع، باید هر سه منحنی در یک شکل واحد رسم شوند، بنابراین از تغییرات نسبی هر شاخص (تغییرات هر شاخص تقسیم بر کل تغییرات آن شاخص) استفاده شده است که پارامتر بدون



شکل ۲. تغییرات شاخص‌های انتخابی گوه آب شور در مدت‌زمان هجوم آب دریا



شکل ۳. تغییرات نسبی شاخص‌های انتخابی گوه آب شور در مدت‌زمان هجوم آب دریا



شکل ۴. چگونگی تغییرات ضخامت ناحیه اختلاط هنگام هجوم آب دریا

دائمی بیشتر شود، میزان نسبی پیشروی آن کاهش می‌یابد. از این‌رو، ارتفاع گوه با بیشترین میزان نسبی شروع به حرکت می‌کند و زودتر از سایر نقاط سطح مشترک به شرایط دائمی می‌رسد.

شکل ۴ تغییرات ضخامت ناحیه اختلاط را در مدت هجوم آب دریا نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که ضخامت ناحیه اختلاط در مدت‌زمان هجوم آب دریا افزایش می‌یابد. علت گسترش ناحیه اختلاط در مرحله هجوم آب دریا ناشی از کاهش شار جریان آب زیرزمینی است.

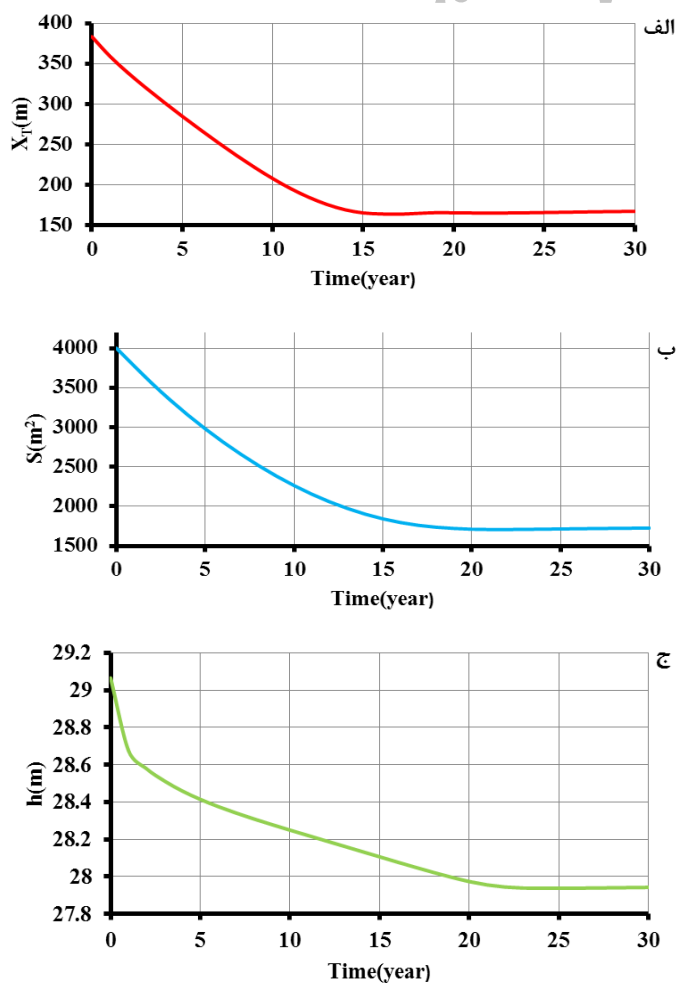
مرحله بازگشت آب دریا

با افزایش ارتفاع آب شیرین از تراز ۳۱ متری به تراز ۳۲ متری، نیروهای اندرکنشی اعمال شده از طرف آب شیرین بر سطح مشترک افزایش می‌یابد. بنابراین، گوه آب شور شروع به بازگشت به سمت مرز دریا می‌کند تا اینکه سرانجام به شرایط دائمی می‌رسد و متوقف می‌شود. شکل ۵ تغییرات شاخص‌های انتخابی را در مدت‌زمان بازگشت گوه نشان می‌دهد. مقایسه شکل‌های ۲ و ۵ نشان می‌دهد در شرایط کاهش و افزایش یکسان ارتفاع آب شیرین، مدت‌زمان

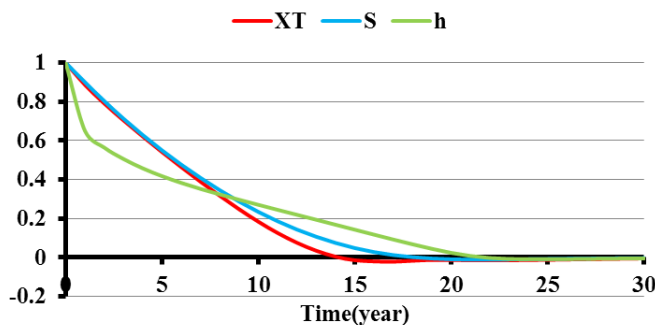
شکل ۳ مقایسه تغییرات نسبی سه شاخص انتخابی را در مدت‌زمان هجوم آب دریا نشان می‌دهد. در شکل یادشده به‌وضوح دیده می‌شود که میزان نسبی تغییر مساحت گوه با مقدار نسبی تغییر طول پنجه گوه در زمان‌های یکسان برابر است. نکته مهم دیگر، رفتار ارتفاع گوه آب شور است. همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، شاخص ارتفاع گوه با سرعت نسبی به‌مراتب بیشتر نسبت به طول پنجه گوه و مساحت گوه تغییر می‌کند و در نتیجه زودتر از دو شاخص دیگر به شرایط دائمی می‌رسد. توجه شود که شاخص ارتفاع گوه تقریباً بعد ۶۰ سال به حالت پایدار می‌رسد، در حالی که دو شاخص دیگر بعد از حدود ۹۰ سال به پایداری می‌رسند. علت این رفتار را می‌توان چنین توصیف کرد که بر اثر کاهش ارتفاع آب شیرین در مرز زمین، میدان فشار دینامیکی آب شیرین در آبخوان کم می‌شود. بنابراین، آب‌های شور از مرز دریا به سمت آبخوان هجوم می‌آورند و سطح مشترک شروع به پیشروی می‌کند. به علت اختلاف چگالی بین آب شور و شیرین، هرچه عمق آبخوان افزایش یابد، میزان پیشروی سطح مشترک در شرایط دائمی بیشتر می‌شود. هر چه میزان پیشروی سطح مشترک در شرایط

نسبی تغییرات ارتفاع گوه بیشتر از دو شاخص دیگر است، در نهایت هر سه شاخص تقریباً به طور هم‌زمان به شرایط دائمی می‌رسند. از آنجا که شاخص ارتفاع گوه روی مرز دریا قرار دارد، در ابتدای مرحله برگشت با سرعت نسبی بیشتری نسبت به دو شاخص دیگر کاهش می‌یابد. با گذشت زمان، جریان‌های آب شیرین به ناحیه اختلاط ورود کرده و شروع به شستن لایه‌های غلیظ ناحیه می‌کنند. جریان‌های لب‌شور در امتداد سطح مشترک به سمت خروجی جریان (روی مرز دریا) حرکت می‌کنند. خروج آب‌های لب‌شور از مرز دریا موجب کاهش سرعت افت ارتفاع گوه می‌شود. فرایند شست‌وشو تا زمانی ادامه می‌یابد که پنجه گوه به شرایط دائمی نزدیک شود، در نتیجه هر سه شاخص طول پنجه گوه، مساحت گوه و ارتفاع گوه تقریباً به طور هم‌زمان به شرایط دائمی می‌رسند.

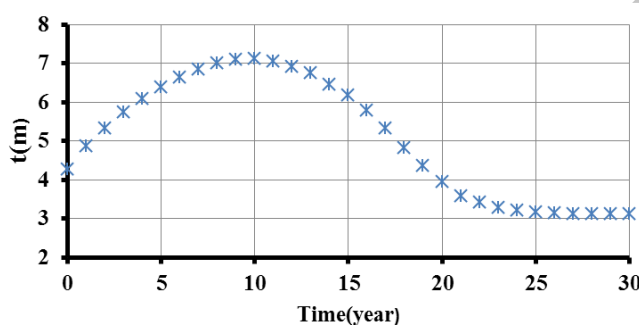
رسیدن به شرایط دائمی در مرحله برگشت به مراتب کمتر از مرحله هجوم است. در مرحله برگشت هر سه شاخص تقریباً بعد از ۲۵ سال به شرایط دائمی می‌رسند، در حالی که هنگام هجوم این مقدار، به‌خصوص برای پنجه گوه، خیلی بیشتر است (حدود ۹۰ سال). چانگ و کلمنت علت این پدیده را تغییر در میدان جریان و ایجاد جریان‌های همسوی آب شور و شیرین به سمت دریا دانستند [۲]. برای مقایسه بهتر رفتار شاخص‌های انتخابی، مشابه حالت هجوم، از تغییرات نسبی هر شاخص استفاده شده است. از شکل ۶ مشخص می‌شود که نخست: هنگام برگشت آب دریا، رفتار مساحت گوه انطباق بیشتری با رفتار طول پنجه گوه نسبت به وضعیت هجوم دارد. به بیانی، شیب خط مماس بر منحنی تغییرات این شاخص‌ها در زمان‌های بیشتری با هم برابرند. دوم اینکه: اگرچه در ابتدای مرحله بازگشت میزان



شکل ۵. تغییرات شاخص‌های انتخابی گوه آب شور در مدت زمان برگشت آب دریا



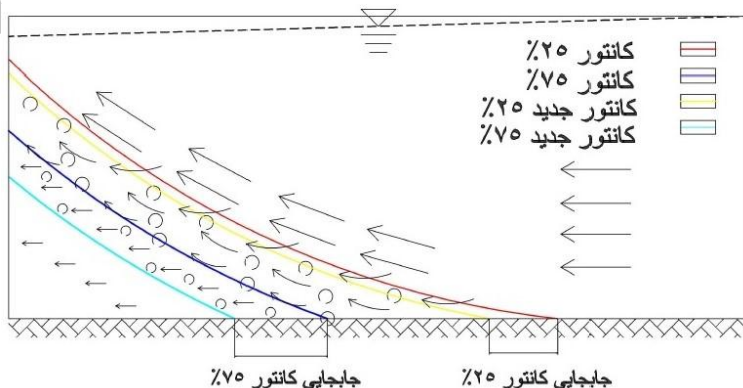
شکل ۶. تغییرات نسبی شاخص‌های انتخابی گوه آب شور در مدت‌زمان برگشت آب دریا



شکل ۷. چگونگی تغییرات ضخامت ناحیه اختلاط هنگام برگشت آب دریا

همکارانش دیده شد، آنها علت وقوع آن را به صورت کلی ناشی از تغییر میدان جریان در مرحله برگشت آب دریا بیان کردند [۲۸]. این در حالی است که بررسی‌های عددی دقیق ما از میدان جریان نشان داد اثر هم‌زمان فرایندهای شست‌وشو و اختلاط موجب گسترش ناحیه اختلاط در ابتدای مرحله برگشت می‌شود. این فرایندها در شکل ۸ دیده می‌شوند.

چگونگی تغییرات ضخامت ناحیه اختلاط در وضعیت بازگشت گوه، در شکل ۷ دیده می‌شود. همان طور که مشخص است، ضخامت ناحیه اختلاط در ابتدای مرحله بازگشت افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به مقدار حداکثری، از مقدار آن کاسته می‌شود تا اینکه سرانجام به مقدار اولیه خود در ابتدای مرحله هجوم می‌رسد. اگرچه این پدیده در مطالعه آزمایشگاهی رابینسون و

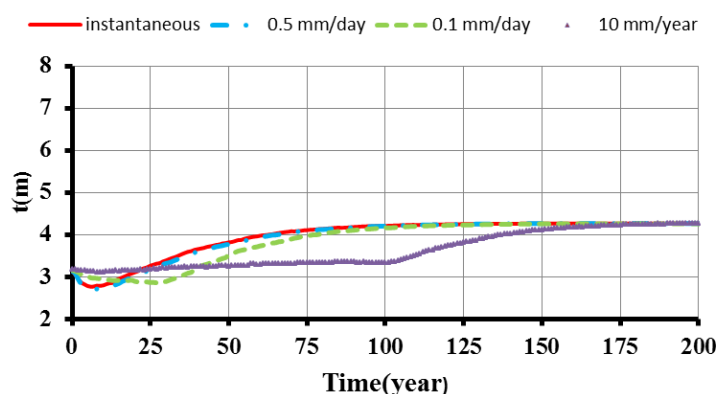


شکل ۸. شماتیکی از چگونگی گسترش ناحیه اختلاط در ابتدای مرحله برگشت آب دریا

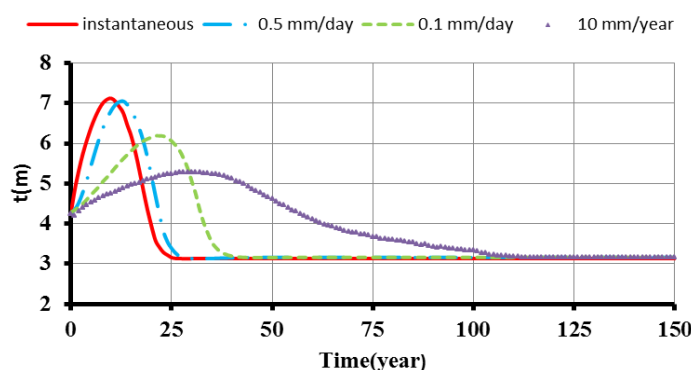
کاهش می‌یابد. بنابراین، کانتور ۲۵ درصد به کانتور ۷۵ درصد رفته‌رفته نزدیک می‌شود، به بیانی ضخامت ناحیه اختلاط نسبت به زمان کوچک می‌شود. با نزدیک شدن گوه به شرایط دائمی، بردارهای آب شور درون گوه به سمت مرز زمین کم‌کم تغییر جهت می‌دهند، سرانجام گوه آب شور وضعیت هجوم می‌گیرد و در نتیجه ناحیه اختلاط دوباره به شرایط تعادل می‌رسد.

به منظور بررسی حساسیت تغییر ضخامت ناحیه اختلاط به سرعت تغییر ارتفاع آب شیرین، علاوه بر کاهش و افزایش آنی (مسئله مبنا)، ارتفاع آب شیرین با سرعت‌های ۰/۵ میلی‌متر بر روز، ۰/۱ میلی‌متر بر روز و ۱۰ میلی‌متر بر سال تغییر کرد. شکل‌های ۹ و ۱۰ چگونگی افزایش و کاهش ناحیه اختلاط را به ترتیب برای مراحل هجوم و برگشت آب دریا نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سرعت تغییر ارتفاع آب شیرین تأثیری بر مقدار ضخامت ناحیه اختلاط در شرایط دائمی چه در مرحله هجوم و چه در مرحله بازگشت گوه ندارد. همچنین، در شکل ۱۰ مشخص است که هر چه سرعت بالآمدگی آب شیرین کاهش یابد، میزان افزایش ضخامت ناحیه اختلاط که در ابتدای مرحله بازگشت رخ می‌دهد، کمتر می‌شود. چون هر چه سرعت بالآمدگی ارتفاع آب شیرین کمتر شود، از سرعت جریان ورودی به آبخوان کاسته می‌شود. بنابراین، امکان ورود ذرات آب شیرین به ناحیه اختلاط کم می‌شود، در نتیجه اثر فرایند شست‌وشو کمتر می‌شود.

بر اثر افزایش ارتفاع آب شیرین از ۳۱ متر به ۳۲ متر، از طرفی شدت جریان آب شیرین ورودی به آبخوان افزایش می‌یابد و از طرفی هم گوه آب شور به سمت دریا شروع به حرکت می‌کند. با توجه به اینکه سرعت گوه آب شور نسبت به سرعت جریان آب شیرین ورودی کمتر است، مقداری از ذرات آب شیرین در امتداد سطح مشترک به سمت خروجی جریان (در بالای گوه روی مرز دریا) تغییر مسیر می‌دهند و مقداری نیز به ناحیه اختلاط وارد می‌شوند. این ذرات با ورود به ناحیه اختلاط با ذرات لب‌شور آنها اختلاط می‌کنند. در ادامه، ضمن رقیق کردن ناحیه اختلاط شروع به شستن کانتور غلیظ آن (۷۵ درصد) به سمت خروجی جریان می‌کنند (شکل ۸). اثر هم‌زمان شست‌وشو و اختلاط سبب می‌شود که کانتور جدیدی با غلظتی برابر غلظت کانتور شسته‌شده قبلی (۷۵ درصد) اما نزدیک‌تر به مرز دریا به وجود آید. اگرچه سرعت جریان به سمت مرز دریا در محل کانتور رقیق ناحیه (۲۵ درصد) مقداری بیشتر از کانتور غلیظ آن (۷۵ درصد) است، اما اثر هم‌زمان فرایند شست‌وشو و سرعت محلی جریان سیال موجب می‌شود که کانتور غلیظ فاصله خود را از کانتور رقیق بیشتر کند و در نتیجه آن ضخامت ناحیه اختلاط افزایش یابد. پس از گذشت مدت‌زمانی از شروع مرحله برگشت، اختلاف سرعت بین ذرات آب شیرین ورودی به ناحیه اختلاط و گوه آب شور به تدریج کم می‌شود، در نتیجه اثر فرایند شست‌وشو به تدریج



شکل ۹. حساسیت ضخامت ناحیه اختلاط به سرعت تغییر ارتفاع آب شیرین در مرحله هجوم



شکل ۱۰. حساسیت ضخامت ناحیه اختلاط به سرعت تغییر ارتفاع آب شیرین در مرحله هجوم

دریاست. بررسی‌ها نشان دادند هرچه سرعت برگشت آب دریا کمتر شود، ناحیه اختلاط کمتر گسترش می‌یابد. ۴. آنالیزهای حساسیت نشان دادند سرعت هجوم یا برگشت آب دریا تأثیری بر ضخامت ناحیه اختلاط در شرایط دائمی ندارد.

تحقیق حاضر درک مناسبی از فرایندهای گذرای هجوم و برگشت آب دریا را در آبخوان‌های ساحلی ارائه می‌کند، اما نتایج به‌دست‌آمده، برای یک آبخوان فرضی دویبعدی، همگن و همسان‌گرد است. بدیهی است که حل مسئله با در نظر گرفتن شرایط واقعی مسئله می‌تواند بر تکمیل نتایج تحقیق حاضر بیفزاید.

منابع

- [1]. Chang S.W, Clement T.P, Simpson M.J, Lee K.K. Does sea-level rise have an impact on saltwater intrusion? *Advances in Water Resources*. 2011; 34:1283–91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2011.06.006>
- [2]. Chang S.W, Clement, T. P., Experimental and numerical investigation of saltwater intrusion dynamics in flux-controlled groundwater systems. 2012. 48(March), 1–10. <https://doi.org/10.1029/2012WR012134>
- [3]. Bear J, Cheng A.H.D. *Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport*. Volume 23. Library of Congress Control Number: 2009938711. Springer Science+Business Media B.V. 2010
- [4]. Werner A. D, Bakker M, Post V. E. A, Vandenbohede A, Lu C, Ataie-Ashtiani B, Simmons C.T, Barty D.A. Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges. *Advances in Water Resources*. 2013. 51, 3–26. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres>.

نتیجه‌گیری

محدودیت‌های بشری از جمله نبود دقت کافی در خواندن چشمی نتایج مدل‌سازی هجوم آب دریا و نیز زمان‌بر بودن برداشت آنها، موجب شده که فرایندهای گذرای هجوم آب دریا کمتر مورد توجه قرار گیرد. در تحقیق حاضر، پس از شبیه‌سازی عددی هجوم و برگشت آب دریا توسط مدل عددی SUTRA، تمامی پارامترهای مد نظر با توسعه الگوریتمی در محیط MATLAB برداشت و آنالیز شدند. به‌منظور بررسی بیشتر حرکت گذرای گوه آب شور، علاوه بر بررسی شاخص طول پنجه گوه که در بیشتر تحقیقات قبلی از آن استفاده شده است، تغییرات شاخص مساحت و ارتفاع گوه در مدت هجوم و برگشت آب دریا نیز آنالیز شدند. مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده به شرح زیر است:

۱. سرعت تغییرات نسبی مساحت گوه آب شور با سرعت تغییرات نسبی طول پنجه گوه طی زمان هجوم و برگشت آب شور تقریباً برابرند. به بیانی، رفتار این دو شاخص در شرایط گذرا مشابه هم است.
۲. شاخص ارتفاع گوه رفتاری متفاوت از دو شاخص دیگر ارائه می‌کند. هنگام پیشروی، ارتفاع گوه زودتر از شاخص مساحت گوه و طول پنجه گوه به شرایط دائمی می‌رسد در حالی که هنگام برگشت در ابتدا با سرعت نسبی بیشتری به سمت دائمی شدن پیش می‌رود، ولی پس از مدتی از سرعت آن کاسته شده و هر سه شاخص تقریباً هم‌زمان متوقف می‌شوند.

۳. بررسی عددی میدان جریان نشان داد فرایند شست‌وشو عامل اصلی گسترش ناحیه اختلاط در مرحله برگشت آب

- [5]. Abarca E, Clement T.P. A novel approach for characterizing the mixing zone of a saltwater wedge. *Geophysical Research Letters*. 2009.36(6), 1–5. <https://doi.org/10.1029/2008GL036995>
- [6]. Bear J. Dynamics of fluids in porous media. Amsterdam: Elsevier; 1972.
- [7]. Bruggeman GA. Analytical solutions of geohydrological problems. Developments in water science, vol. 46. Amsterdam: Elsevier; 1999.
- [8]. Strack ODL. A single-potential solution for regional interface problems in coastal aquifers. *Water Resour Res* 1976;12:1165–74.
- [9]. Dagan G, Zeitoun D.G. Seawater–freshwater interface in a stratified aquifer of random permeability distribution. *J Contam Hydrol* 1998;29:185–203.
- [10]. Bakker M. Transient Dupuit interface flow with partially penetrating features. *Water Resour Res* 1998;34:2911–8.
- [11]. Bakker M. Analytic solutions for interface flow in combined confined and semi-confined, coastal aquifers. *Adv Water Resour* 2006;29:417–25.
- [12]. Watson TA, Werner AD, Simmons CT. Transience of seawater intrusion in response to sea level rise. *Water Resour Res* 2010;46:W12533. <http://dx.doi.org/10.1029/2010WR00956>
- [13]. Mehdizadeh S.S, Werner A. D, Vafaie F, Badaruddin S. Vertical leakage in sharp-interface seawater intrusion models of layered coastal aquifers. *Journal of Hydrology*; 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.08.027>
- [14]. Abarca E, Carrera J, Sánchez-Vila X, Dentz M. Anisotropic dispersive Henry problem. *Advances in Water Resources*; 2007.30(4), 913–926. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2006.08.005>
- [15]. Simpson MJ, Clement TP. Improving the worthiness of the Henry problem as a benchmark for density-dependent groundwater flow models. *Water Resour Res* 2004;40:W01504. <http://dx.doi.org/10.1029/2003WR00219>
- [16]. Held R, Attinger S, Kinzelbach W. Homogenization and effective parameters for the Henry problem in heterogeneous formations. *Water Resour Res* 2005;41:1–14.
- [17]. Paster A, Dagan G. Mixing at the interface between two fluids in porous media: a boundary-layer solution. *J Fluid Mech* 2007;584:455–72.
- [18]. Werner AD, Simmons CT. Impact of sea-level rise on seawater intrusion in coastal aquifers. *Ground Water* 2009;47:197–204.
- [19]. Ataie-Ashtiani B, Werner A.D, Simmons C.T, Morgan L.K, Lu C. How important is the impact of land-surface inundation on seawater intrusion caused by sea-level rise?. *Hydrogeology Journal*. 2013; 21: 1673–1677. DOI 10.1007/s10040-013-1021-0
- [20]. Carretero S, Rapaglia J, Bokuniewicz H, Kruse E. Impact of sea-level rise on saltwater intrusion length into the coastal aquifer, partido dela costa, Argentina. 2013. *Cont. Shelf Res*. 61–62, 62–70.
- [21]. Hussain M.S, Javasi A.A. Assessing impacts of sea level rise on seawater intrusion in a coastal aquifer with sloped shoreline boundary. *Journal of Hydro-environment Research*. 2016; 11: 29–41
- [22]. Morgan L.K, Stoeckl L, Werner A.D, Post V.E.A. An assessment of seawater intrusion overshoot using physical and numerical modeling. *Water Resour. Res*. 2013. 49 (10), 6522–6526
- [23]. Morgan L.K, Bakker M, Werner A.D. Occurrence of seawater intrusion overshoot. *Water Resour. Res*. 2015: 51 (4), 1989–1999.
- [24]. Ketabchi H, Mahmoodzadeh D, Ataie-Ashtiani B, Simmons C.T. Sea-level rise impacts on seawater intrusion in coastal aquifers: Review and integration. *Journal of Hydrology*.2016: 535; 235–255
- [25]. Werner A.D. On the classification of seawater intrusion. *Journal of Hydrology*. 2017; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.12.012>
- [26]. Lu C, Werner A.D. Timescales of seawater intrusion and retreat. *Advances in Water Resources*. 2013; 59, 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres>
- [27]. Voss C, Provost.A. SUTRA—a Model for Saturated–unsaturated, Variable-density Groundwater Flow with Solute or Energy Transport. US Geological Survey Water-Resources Investigations Report, 2010. 02-4231
- [28]. Robinson G, Hamill G, Ahmed A.A. Automated image analysis for experimental investigations of salt water intrusion in coastal aquifers. *J. Hydrol*. 2015; 530. 350–360