

پیش‌بینی گوهی آب شور تحت شرایط پیشروی و پسروی با استفاده از مدل‌های CTRAN/W و SEAWAT

حجت احمدی^{۱*} - محمد همتی^۲ - مهدی مطلبیان^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۸/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۲۵

چکیده

آبخوان‌های ساحلی منبع اصلی آب شیرین در بسیاری از مناطق دنیا می‌باشند. نفوذ آب شور بصورت یک زبانه از طرف دریا به زیر آب شیرین آبخوان باعث تخریب کیفیت این منابع می‌گردد. به علت این که مسائل تداخل آب شور بسیار پیچیده هستند و به طور کلی نمی‌توانند به صورت تحلیلی حل شوند، بنابراین روش‌های عددی ابزاری ایده‌آل برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی نتایج می‌باشند. در این مطالعه دقت مدل‌های ریاضی CTRAN/W و SEAWAT در شبیه‌سازی و پیش‌بینی گوهی آب شور در سه حالت الف) وضعیت جریان پایدار تحت گرادیان‌های مختلف ب) حالت گذرا تحت شرایط پیشروی گوهی آب شور ج) حالت گذرا تحت شرایط پس روی گوهی آب شور بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی دو مدل با مشاهدات آزمایشگاهی گوسامی و کلمنت (۸) مورد مقایسه قرار گرفت. به منظور مقایسه‌ی داده‌های واقعی و شبیه‌سازی شده از شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، معیار ناش-سانکلیف (CE)، ضریب همبستگی (R^2)، نسبت اختلاف (t) و انحراف استاندارد عمومی (GSD) استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل‌های CTRAN/W و SEAWAT دقت بالایی در شبیه‌سازی و پیش‌بینی موقعیت و حرکت گوهی آب شور را با متوسط میانگین مربعات خطا به ترتیب معادل ۰/۶۷ و ۰/۵۸ سانتیمتر (کمتر از ۱۰ درصد متوسط داده‌های واقعی) دارا می‌باشند. مدل CTRAN/W برآورد بهتری نسبت به مدل SEAWAT در محاسبه میزان دبی انتقالی از منبع آب شیرین به سمت منبع شور را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: آبخوان ساحلی، تداخل آب شور، شبیه‌سازی، مدل کامپیوتری

مقدمه

این مشکلات در مناطقی که آب زیرزمینی کم عمق دارند حادث است، چون اینگونه آبخوان‌ها ظرفیت ذخیره محدود دارند. علاوه بر آن در مناطق خشک و نیمه خشک شرایط اقلیمی بارش کم و پراکنده، مقدار تغذیه را محدود کرده و باعث می‌شود آبخوان در معرض خشکی قرار گیرد (۴). مدیریت تداخل آب شور به داخل آبخوان‌های ساحلی یکی از چالش برانگیزترین مسائل مدیریت زیست محیطی است که برنامه ریزان منابع آب در سرتاسر جهان با آن مواجه هستند. تهاجم آب شور به داخل سفره‌های ساحلی مانع از تخلیه آب زیرزمینی محصور در آبخوان به داخل اقیانوس می‌شود. به هر حال، بهره برداری بیش از حد از سفره‌های ساحلی تراز آب زیر زمینی و جریان آب زیرزمینی را کاهش داده که این منجر به تشدید مسئله تداخل آب شور به مناطق شهری می‌گردد (۲۵). علاوه بر این، حوادث فاجعه برانگیزی همچون سونامی و طوفانها می‌توانند آب شور را به داخل آبخوان‌ها تزریق کنند و حجم عظیمی از منابع آب شیرین را آلوده نمایند (۱۴). بنابراین فهم دینامیک اختلاط آب شور به داخل سیستم‌های آب شیرین یک مسئله‌ی پژوهشی مهم است.

مناطق ساحلی به دلیل مسطح بودن، فراوانی آب، خاک مستعد و تولید انبوه محصولات کشاورزی اغلب از مناطق پر جمعیت جهان هستند و اگر آب مصرفی در این مناطق بوسیله آب سطحی تأمین نشود تقاضا برای تأمین آب شیرین از منابع آب زیرزمینی بیشتر شده و کمبود آب شیرین یک امر عادی می‌باشد. اگر در سواحل موجود چنین مناطقی استخراج آب زیرزمینی بیش از حد انجام شود تعادل موجود بین آب شور و شیرین به هم خواهد خورد و باعث ایجاد مشکل پیشروی آب شور به سمت آبخوان خواهد گردید. ورود آب لب شور، باعث کاهش برداشت محصول، کاهش منابع آب آشامیدنی و سر انجام کاهش حاصلخیزی خاک و تعداد چاه‌های برداشت آب می‌شود.

۱ و ۲- دانشیار و استادیار گروه مهندسی آب و پژوهشکده مطالعات دریاچه ارومیه، دانشگاه ارومیه

*- نویسنده مسئول: (Email: h.ahmadi@urmia.ac.ir)

۳- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشگاه ارومیه

زیرزمینی را مطالعه کردند و مدلسازی عددی پدیده را با مدل SEAWAT انجام دادند. نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی نشان داد، دیواره کوتاه‌تر، آب شور باقیمانده در پشت دیوار حایل را، سریعتر از بین می‌برد. حداقل ارتفاع لازم برای حذف آب شور، مقدار ضخامت آب شور در محل احداث دیواره می‌باشد. ورنر و همکاران (۲۶) در تحقیقی به مطالعه فرایندهای تداخل آب شور و مدیریت آن در پیشرفت های اخیر و چالش هایی که در زمینه تداخل در آینده با آن روبرو خواهیم شد پرداختند. ابدلاتی و همکاران (۱) به بررسی بعضی از پارامترهای بالقوه و تأثیرشان بر رو تداخل آب شور در آبخوان دلتای نیل پرداختند. که در این مطالعه جهت شبیه سازی تأثیر پارامترها از مدل سه بعدی SEAWAT بهره گرفتند. ون لاپک و همکاران (۲۷) در مقاله‌ای به بررسی شور شدن آکیفرهای مطبق توسط انتقال گرمای ناشی از چاه‌های گاز و نفت و دکل‌های حفاری پرداختند که در این مطالعه از مدل SEAWAT استفاده کردند. نتایج نشان دادند که گرمای انتقال یافته از چاهها به داخل آکیفر بر روی چگالی آب شور تأثیر گذاشته و موجب جریان های وابسته به چگالی شده و موجب اختلاط آب شور زیرین سفره با آب شیرین بالای آبخوان در طولانی مدت می‌گردد. نورآبادی و همکاران (۲۱) به بررسی آزمایشگاهی تأثیرات استخراج آب بر روی جابه جایی گوه آب شور پرداخت. که در این مطالعه از مدل SEAWAT جهت مطالعه عددی فرایند تحت سناریوهای مختلف استفاده گردید.

هدف از این مطالعه شبیه‌سازی و بررسی رفتار گوه آب شور در تماس با آب شیرین می‌باشد که به کمک دو مدل عددی CTRAN/W و SEAWAT انجام شده است، که به ترتیب مدل اول بر مبنای روش اجزای محدود و مدل دوم بر مبنای تفاضل محدود معادلات حاکم را در هندسه مسئله تحلیل می‌کند. با توجه به مطالعات گذشته بررسی‌های صورت گرفته بر روی گوه آب شور، تاکنون مربوط به تأثیر چگالی آب شور بر میزان پیشروی گوه آب شور، نحوه حرکت آب شور تحت تأثیر برداشت آب‌های زیرزمینی، تأثیر روش‌های مدیریتی مختلف بر جلوگیری از نفوذ آب شور به سفره‌های آب شیرین به صورت عددی و آزمایشگاهی می‌باشد. اکثر مطالعات در زمینه تداخل آب شور و شیرین جهت بررسی عددی از مدل SEAWAT بهره گرفته‌اند که در این مطالعه علاوه بر استفاده از مدل مذکور از مدل CTRAN نیز استفاده شده است و نیز دقت هر یک از مدل‌ها در توانایی پیش‌بینی موقعیت گوه آب شور در شرایط پایدار و گذرا مقایسه گردیده است. جهت ارزیابی دقت هر یک از مدل‌ها پس از انجام شبیه‌سازی از نتایج مشاهدات آزمایشگاهی استفاده شده است.

امروزه برای تحلیل مسائل مربوط به دینامیک جریان در آبخوان‌های ساحلی بیشتر از مدل‌های ریاضی استفاده میشود، که می‌توان به حل گلوور (۹)، حل پمپاژ استراک (۲۴) و حل بر آمدگی بیر و داگان (۶) برای حل تحلیلی معدلات تداخل آب شور و شیرین در آبخانه های تک لایه و حل معلم و بیر (۲۰) برای آبخانه های چند لایه اشاره کرد. مدل‌های عددی برای محاسبه اثر چگالی و گرانیروی روی سیال در محیط اشباع اغلب برای شبیه سازی تداخل آب شور با چگالی حدود ۳۰ گرم بر لیتر در آبخانه توسعه داده شده است و معمولاً مرز بین آب شور و شیرین یک صفحه فرض می‌شود. بعضی مطالعات مربوط به آبخانه محدود (۷) یا نامحدود با جریان آب مدلسازی شده و با استفاده از روش ابدهی ویژه (۱۰، ۱۱ و ۲۸) است.

ژانگ و همکاران (۲۸) بررسی‌های عددی و آزمایشگاهی بر روی انتقال آلودگی در حالت پایدار انجام دادند. هدف آنها بررسی پیامد ناشی از نادیده گرفتن تأثیر چگالی آب دریا و تغییرات جزر و مدی بود. ایشان نتیجه گرفتند که نادیده گرفتن تأثیرات چگالی میزان جریان املاح را دست کم برآورد نموده و مسیر انتقال آلودگی را نادرست پیش بینی می‌نماید. گوسامی و کلمنت (۸) در یک مدل آزمایشگاهی از محیط متخلخل پیشروی زبانه ی آب شور در آب شیرین آبخانه را مطالعه کردند. آزمایشات در سه وضعیت: الف) داده برداری زبانه ی آب شور در حالت پایدار ب) داده برداری انتقال آب شور در حین پیشروی ج) داده برداری زبانه آب شور هنگام پسروی، و اندازه‌گیری خصوصیات جریان در این سه حالت انجام شد و از مدل SEAWAT برای شبیه سازی داده‌ها استفاده شد. نتایج مدل با داده‌های آزمایشگاهی به عنوان مسئله مینا برای آزمایش مدل‌های جریان همراه با چگالی آب زیر زمینی استفاده شد و نسبت به اثرات چگالی حساسیت سنجی شد. نتایج نشان داد، مجموعه داده های حاصل از این آزمایش می‌تواند برای ارزیابی مدل‌های تداخل آب شور در شرایط ماندگار و انتقال به کار رود. کولار و همکاران (۱۷) برای اعتبار سنجی مدل پیشروی (Baroclinic shallow water) با استفاده از مسئله lock-exchange، از مدل آزمایشگاهی، مجموعه داده بسیار دقیقی برای مقایسه صحت و کمیت نتایج آزمایشگاهی و عددی پیشروی جبهه آب شور دریا جمع‌آوری کردند و دو سیاست تداخل منظم و غیر منظم وابسته به نسبت چگالی آب شور به آب شیرین را اعمال کردند و در نهایت نتایج آزمایشگاهی را برای اعتبارسنجی مدل (ADCIRC7) بانضمام اثرات شکل تداخل عمودی روی نتایج شبیه سازی بکار بردند.

لویمان و همکاران (۱۹) در یک مدل فیزیکی با ابعاد ۹۰ سانتیمتر طول و ۶۰ سانتیمتر ارتفاع و هشت سانتیمتر عرض و مخزن شور و شیرین در طرفین مدل پیشروی آب شور را بررسی کردند، پس از نفوذ آب شور در مدل با نصب دیواره حائل با ارتفاع‌های مختلف (۲۰ و ۴۰ سانتیمتر) رفتار آزمایشگاهی و مدلسازی عددی کنترل آب شور با سد

معادلات انتقال

فرایندهای انتقال، چگونگی انتقال و توزیع مواد حل شده را از نقطه‌ای به نقطه‌ای دیگر در آب زیرزمینی بیان می‌کنند. سامانه آب زیرزمینی، وسیله این انتقال و توزیع است. به علت اتفاقات زیادی که هم زمان با هم در محیط رخ می‌دهد، شرح این فرایندها به شیوه‌ای ساده مشکل است. فعل و انفعالات شیمیایی و زیستی احتمالی، مقدار، کیفیت و توزیع مواد حل شده در سامانه آبی را تغییر می‌دهد. اگرچه ظاهراً ماده همراه با جریان آب زیرزمینی و سوار بر آن حرکت می‌کند، اما این ماده می‌تواند در حین حرکت، جذب ذرات جامد محیط شود و یا احياناً توسط باکتری‌های موجود در محیط مصرف گردد. فرایندهای فیزیکی که شار ماده در یک حجم معیار از محیط متخلخل را کنترل می‌کنند، شامل فرایندهای جابجایی و پراکندگی هیدرودینامیکی است. در بسیاری از مسائل انتقال آلودگی، سهم جابجایی، نسبت به سایر فرایندهای انتقال غالب است. جهت اندازه‌گیری درجه غالب بودن جابجایی نسبت به سایر پارامترهای معادله انتقال، از عدد بی بعد پکلت استفاده می‌شود که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_e = \frac{|V|L}{D} \quad (3)$$

که در آن V اندازه بردار سرعت نشت، L طول مشخصه که معمولاً برابر عرض سلول شبکه در نظر گرفته می‌شود و D ضریب پخش می‌باشد.

در مسائلی که پدیده جابجایی غالب است، عدد پکلت عدد بزرگی است و در مسائلی که جابجایی صرف وجود دارد، عدد فوق به سمت بینهایت میل می‌کند. حرکت املاح در محیط متخلخل توسط سه عامل جریان آب زیرزمینی (انتقال)، انتشار مولکولی، پخشیدگی مکانیکی اتفاق می‌افتد. معادله دیفرانسیل زیر بیان‌کننده تغییرات غلظت ماده نسبت به زمان و مکان یا حرکت املاح در آب زیرزمینی می‌باشد (۳):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (D \cdot \nabla C) - \nabla \cdot (\theta C) - \frac{q_s}{\theta} C_s + \sum_{k=1}^N R_k \quad (4)$$

که در آن D ضریب پخشیدگی هیدرودینامیکی، θ سرعت جریان، C_s غلظت آب ورودی یا خروجی از چشمه یا چاه، R_k نرخ تولید یا زوال در واکنش k از N واکنش مختلف می‌باشند. رابطه (۴) ضریب پخشیدگی هیدرودینامیکی با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$D = \alpha_L \frac{V_L^2}{|v|} + \alpha_H \frac{V_H^2}{|v|} + \alpha_V \frac{V_V^2}{|v|} + D^* \quad (5)$$

که در آن D ضریب پخشیدگی هیدرودینامیکی، α_L پخشیدگی طولی، V_L سرعت طولی جریان، α_H پخشیدگی افقی، V_H سرعت

مواد و روش‌ها

معادلات حاکم

معادلات حاکم بر اندرکنش آب شور و شیرین به دو بخش معادلات جریان و معادلات انتقال جرم تقسیم می‌شود که باین معادلات به صورت کوپل و همزمان در حالت‌های غیرماندگار حل می‌گردند. بدین منظور در هر گام محاسباتی ابتدا با حل معادله جریان سرعت و جهت جریان در هر نقطه حاصل شده و بعنوان اطلاعات ورودی برای حل یک گام زمانی از معادلات انتقال جرم استفاده می‌شود و بر اساس شرایط جدید حاصله مجدداً برای گام بعدی سرعت و جهت جریان تعیین شده و حل مسئله ادامه می‌یابد.

معادلات جریان

معادله عمومی حاکم بر حرکت آب‌های زیرزمینی از ترکیب معادلات پیوستگی و داری به دست می‌آید به صورت زیر بیان می‌شود که در مدل‌های ریاضی به منظور شبیه‌سازی جریان آب زیر زمینی به روش‌های عددی خاصی مانند اجزای محدود، اختلاف محدود، اجزای مرزی حجم محدود حل می‌شود.

$$k_{xx} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_{yy} \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_{zz} \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \pm q_s \quad (1)$$

که در آن k_{xx} ، k_{yy} و k_{zz} مقادیر هدایت هیدرولیکی در سه جهت مختصات می‌باشد، S_s ضریب ذخیره آبخوان می‌باشد و q_s حجم آب چاه یا چشمه در واحد حجم آبخوان است.

جریان آب زیر زمینی با چگالی متغیر

در فرایند مربوط به اختلاط آب شور و شیرین بدان علت که دو سیال با چگالی‌های متغیر با هم در ارتباط می‌باشند مکانیسم آن با زمانی که فقط یک سیال باشد متفاوت بوده و مکانیسم آن تغییر می‌کند. بنابراین زمانی که تأثیر چگالی در معادله جریان آب زیرزمینی (معادله (۱)) وارد گردد، رابطه به صورت زیر تغییر خواهد کرد:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\rho K_x \left(\frac{\partial h_f}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\rho K_y \left(\frac{\partial h_f}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho K_z \left(\frac{\partial h_f}{\partial z} + \left(\frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \right) \frac{\partial z}{\partial z} \right) \right] = \rho_s \frac{\partial h_f}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial c} \frac{\partial c}{\partial t} - \rho_s q_s \quad (2)$$

که در آن h_f بار آبی آب شیرین، k_{fx} ، k_{fy} و k_{fz} هدایت هیدرولیکی آب شیرین در سه جهت مختصات، ρ چگالی آب آبخوان، ρ_f چگالی آب شیرین، S_s ذخیره ویژه، C غلظت املاح، θ تخلخل موثر، ρ_s چگالی آب ورودی از یک منبع و یا آب رهاشده از سینک، q_s نرخ حجمی آب بر واحد حجم آبخوان می‌باشد.

میانی جدا شده بودند. از دانه‌های سیلیکا با قطر متوسط ۱/۱ میلی‌متر برای محیط متخلخل استفاده شد که هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل با استفاده از روش بار ثابت تحت گرادیان‌های مختلف تعیین گردید که هدایت هیدرولیکی متوسط حدود ۱۰۵۰ متر بر روز برآورد گردید. جهت تهیه آب شور از نمک صنعتی استفاده شد و چگالی آب شور تهیه شده ۱/۰۲۷ کیلوگرم بر مترمکعب تعیین گردید. به منظور ردیابی آب شور از رنگ مواد خوراکی قرمز با غلظت ۱۰ میلی گرم بر لیتر استفاده شد. آزمایشات برای سه حالت مختلف الف) وضعیت پایدار تحت گرادیان‌های مختلف ب) حالت گذرا تحت شرایط پیشروی گوه آب شور ج) حالت گذرا تحت شرایط پس روی گوه آب شور با ثابت نگه داشتن سطح آب شور در تراز ۲۵/۵ سانتیمتر و تغییرات سطح آب در مخزن آب شیرین بین ۲۶/۲ تا ۲۶/۷ سانتیمتر انجام گرفت. وضعیت پایدار در سه فاز انجام گرفت که در فاز اول هدایت آب شیرین در ارتفاع ۲۶/۷ تنظیم شد و جریان پایدار پس از مدتی برقرار شد (SS1) که در این حالت اندازه‌گیری‌های لازم انجام شد و سپس در فاز دوم سطح آب شیرین از تراز ۲۶/۷ به تراز ۲۶/۲ کاهش داده شد و پس از ۶۰ دقیقه به حالت پایدار رسید (SS2) و در فاز سوم تراز سطح آب شیرین از ۲۶/۲ به ۲۶/۵۵ افزایش داده شد که در این حالت گوه آب شور شروع به پسروی کرده و پس از گذشت زمان ۳۵ دقیقه به حالت پایدار رسید (SS3).

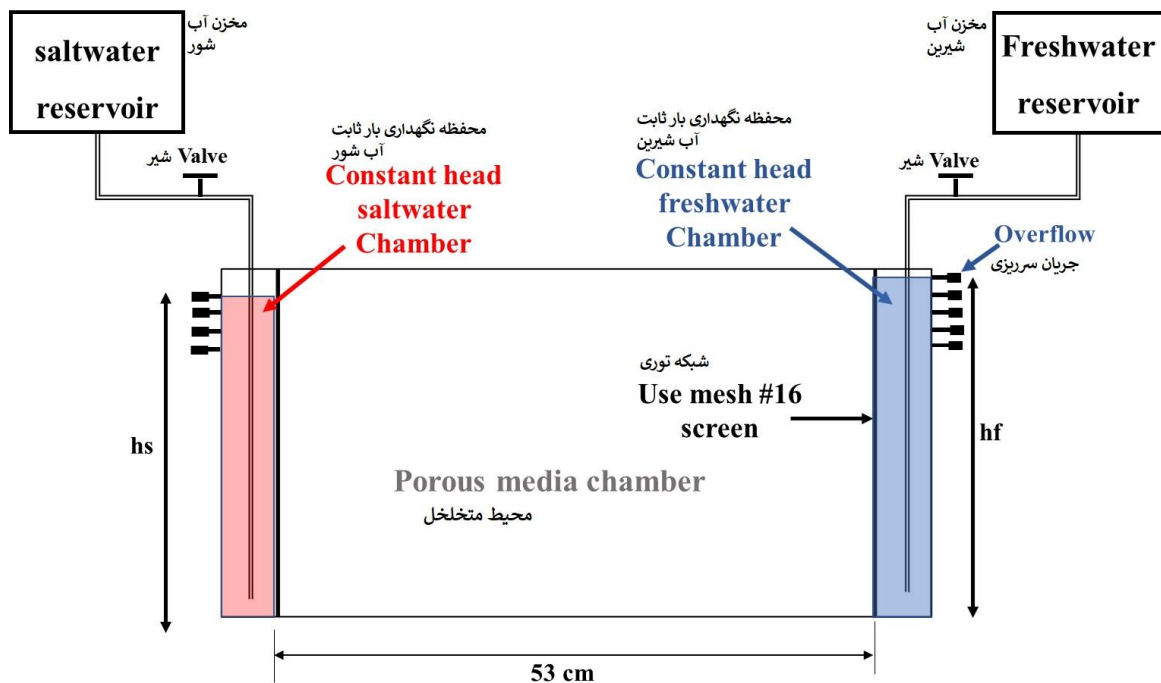
افقی جریان α_V پخشیدگی عمودی، V_V سرعت عمودی جریان، D^* ضریب انتشار مولکولی، ν : مقدار سرعت نفوذ می‌باشد (کران ۱۸).

انتقال املاح تحت تأثیر چگالی

برای جریان آب زیرزمینی با تغییرات چگالی زیاد در املاح منتقل شده، توزیع غلظت املاح چگالی را تغییر می‌دهد که در نتیجه بر روی جریان آب زیر زمینی تأثیر می‌گذارد. بنابراین، جریان آب زیر زمینی و انتقال املاح در آبخوان در چنین وضعیتی فرایندهایی مرتبط باهم هستند به طوری که معادله (۲) و معادله (۴) باید به طور پیوسته و همزمان حل شوند.

مدل آزمایشگاهی

در این مطالعه از داده‌های آزمایشگاهی گوسامی و کلمنت (۸) استفاده شد. آزمایشات در یک جعبه ماسه‌ای مستطیلی انجام شد. مدل با استفاده از پلکسی گلس با ضخامت ۶ میلی‌متر با ابعاد داخلی ۵۳ سانتیمتر طول و ۲/۷ سانتیمتر عرض ۳۰/۵ سانتیمتر ارتفاع ساخته شد. جعبه ی مدل از سه بخش بخش مرکزی که محیط متخلخل و دو بخش کناری که مخازن آب شور و شیرین را با هد ثابت تشکیل شد. هندسه شماتیک مدل آزمایشگاهی در شکل (۱) نشان داده شده است. مخازن آب شور و شیرین با یک شبکه توری از محیط متخلخل



شکل ۱- تصویر شماتیک مدل آزمایشگاهی
Fig. 1-Schematic view of experimental setup

مدل CTRAN/W

در این مطالعه جهت استفاده از مدل SEAWAT، از بسته‌ی نرم افزاری GMS که واسطه گرافیکی و به عنوان پیش پرداز و پس پرداز چندین مدل آب زیر زمینی است، بهره گرفته شد.

ورود اطلاعات به مدل‌های CTRAN/W و SEAWAT

مدل به صورت جعبه‌ای مستطیلی با ابعاد 26×53 سانتیمتر طراحی گردید. و ضخامت مدل واحد در نظر گرفته شد و داده‌های اتخاذ شده از مدل آزمایشگاهی گوسوامی از قبیل هدایت هیدرولیکی $(k=1050 \text{ m/s})$ ، تخلخل $(S=0.385)$ ، چگالی آب شور (1.027 kg/L) به مدل وارد شد. با توجه به نظریه بعضی از محققین (۷)، ۱۴، ۱۵، ۱۷، ۲۰ مقدار پراکنندگی طولی برابر قطر متوسط ذرات (۱ میلیمتر) و مقدار پراکنندگی عرضی حدود یک دهم پراکنندگی طولی (۰/۱ میلیمتر) در نظر گرفته شد. با انجام آنالیزهای متعدد با اندازه شبکه‌های مختلف، شبکه بندی مدل با ابعاد ۰/۵ سانتیمتر انتخاب شد. در شکل (۲) و (۳) تصاویر هندسه مدل عددی و شبکه عددی استفاده شده نشان داده شده است.

واسنجی مدل

واسنجی با تغییر پارامترهای حساس که با عدم قطعیت همراه است صورت گرفت. پارامترهایی که در این تحقیق جهت کالیبراسیون مدل استفاده گردید میزان پخشیدگی طولی و عرضی (دامنه تغییرات میزان پخشیدگی طولی برای مقیاس‌های بزرگ از ۲ میلیمتر تا چندین متر متغیر بوده و برای مقیاس‌های آزمایشگاهی بین ۰ تا ۱۰ میلیمتر نیز متغیر است و پخشیدگی عرضی معمولاً ۱۰ مرتبه کوچکتر از پخشیدگی عرضی می‌باشد که بنا به پیشنهاد نرم افزار CTRAN/w میتوان مقدار اولیه پخشیدگی طولی را یک دهم طول هندسه در فضای واقعی در نظر گرفت (۱۸)) می‌باشد، که برای انجام واسنجی مدل از داده‌های آزمایشگاهی برای فاز دوم (جریان پایدار (SS2)) استفاده گردید. نتایج مربوط به واسنجی در قسمت نتایج تحقیق آمده است.

ارزیابی مدل

جهت ارزیابی مدل‌های مذکور در تخمین موقعیت گوه آب شور از شاخص‌های آماری نظیر ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، معیار ناش-ساتکلیف (CE)، ضریب همبستگی (R^2) ، نسبت اختلاف (r) و انحراف استاندارد عمومی (GSD)، طبق روابط ۷ تا ۱۱ استفاده شده است.

مدل CTRAN/W یکی از ماژول‌های نرم افزار GeoStudio,2007 می‌باشد که این مدل عددی قابلیت تحلیل مسائلی پیچیده شامل پخشیدگی مولکولی، پراکنندگی، جذب سطحی، واپاشی و جریان چگال در محیط‌های متخلخل مانند خاک و سنگ را دارا می‌باشد. این نرم افزار با استفاده از روش المان محدود معادلات دیفرانسل مربوط به انتقال آلاینده‌ها را حل می‌نماید. شکل عمومی المان محدود رابطه (۴) به صورت زیر می‌باشد که در آن محدوده مورد نظر به تعدادی المان شبکه‌بندی شده محدود تقسیم می‌شود:

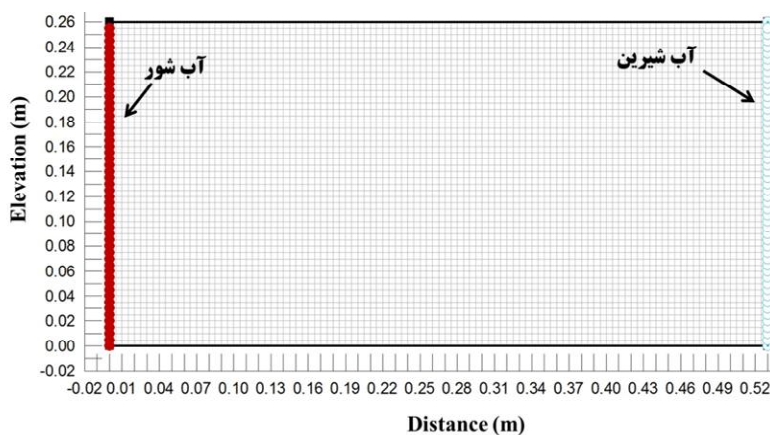
$$[K][C] = \{Q\} \quad (6)$$

که در آن $[K]$ ماتریس ضرابی است که مربوط به ویژگی‌های هندسی و مشخصات مواد، $\{C\}$ بردار غلظت در هر نقطه و $\{Q\}$ بردار شار آلاینده در هر نقطه می‌باشد. هدف اصلی از رابطه (۶) تعیین غلظت در هر نقطه می‌باشد. مقادیر مجهول در هر نقطه بر اساس غلظت ویژه‌ای که مقدار آن از ابتدا مشخص است بدست می‌آیند. بدون داشتن داشتن مقداری ویژه برای غلظت، حل معادله المان محدود امکان پذیر نمی‌باشد. در هر تحلیل حداقل باید در یک نقطه مقدار ویژه غلظت معلوم باشد که به آن شرایط مرزی گفته می‌شود. نرم افزار CTRAN/W از روش جایگزینی تکراری در هر فرایند حل خود استفاده می‌کند. فرآیند تکرار تا جایی ادامه پیدا می‌کند تا نتایج بدست آمده شرایط همگرایی مورد نظر را ارضا کند. همگرایی به معنای حل تکراری روابط غلظت هر گره تا جایی است که تغییرات به دست آمده تکرارهای بعدی از حد معینی بیشتر نباشد.

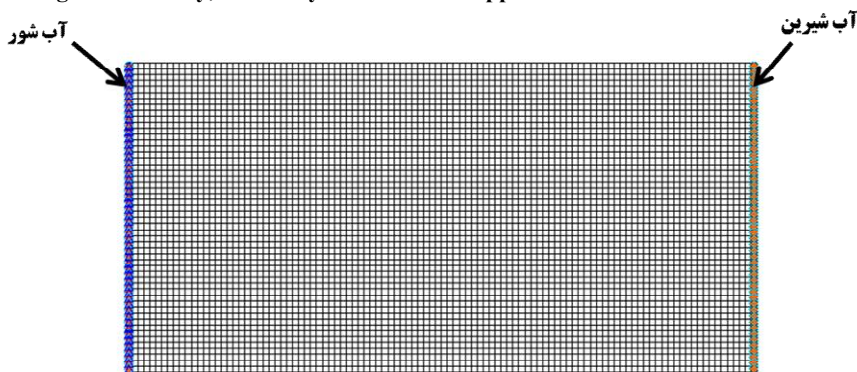
برای اجرای مدل CTRAN/W لازم است مدلی از مسئله در بسته SEEP/W از نرم افزار GeoStudio برای محاسبه سرعت جریان آب‌های زیر زمینی ایجاد شود و به همراه مدل CTRAN/W به صورت کوپل همزمان مورد حل قرار بگیرد.

مدل SEAWAT

مدل SEAWAT توسط سازمان تحقیقات زمین شناسی آمریکا (۲۵) تهیه شده است. این مدل توانایی شبیه سازی سه بعدی جریان آب زیرزمینی و انتقال املاح با شرایط چگالی متغیر با تلفیق مدل‌های MODFLOW و MT3DMS به روش تفاضل محدود را داراست. در این مدل ابتدا توسط MODFLOW شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی انجام شده و سپس خروجی آن جهت شبیه سازی انتقال املاح به صورت همرفت - پراکنندگی در اختیار مدل MT3DMS قرار گرفته و نتایج حاصله از مدل MT3DMS نیز به مدل SEAWAT وارد شده تا شبیه سازی انتقال املاح تحت تأثیر چگالی صورت پذیرد.



شکل ۲- هندسه مدل عددی، شرایط مرزی و شبکه مش بکار رفته در مدل عددی CTRAN/W
 Fig. 2- Geometry, boundary condition and applied mesh in CTRAN/W model



شکل ۳- هندسه مدل عددی، شرایط مرزی و شبکه مش بکار رفته در مدل عددی SAEWAT
 Fig. 3- Geometry, boundary condition and applied mesh in SAEWAT model

که در رابطه‌های ذکر شده، RMSE: ریشه میانگین مربعات خطا، n: تعداد داده‌ها، O_i : مقدار واقعی، P_i : مقدار تخمینی مدل، \bar{O} : میانگین مقادیر مشاهده شده، \bar{P} : میانگین مقادیر برآورده شده، CE: معیار ناش-ساتکلیف، R^2 : ضریب همبستگی، r: نسبت اختلاف و GSD: انحراف استاندارد عمومی می‌باشد.

مقدار بهینه شاخص‌های RMSE و GSD برابر صفر بوده، در حالی که مقدار بهینه شاخص آماری ضریب همبستگی ۱ می‌باشد. همچنین هر چه مقدار شاخص نسبت اختلاف و معیار ناش-ساتکلیف به ۱ نزدیکتر باشد مدل از دقت بیشتری برخوردار خواهد بود (۲۱).

نتایج و بحث

واسنجی مدل

پس از اجرای مدل و آنالیز حساسیت، با تغییر پراکندگی طولی و عرضی مدل برای حالت SS2 به روش آزمون سعی و خطا مدل واسنجی شد. در نهایت بهترین مقادیر پراکندگی طولی و عرضی به ترتیب ۰.۵ و ۰.۰۵ میلیمتر بدست آمد که این مقادیر در دامنه‌ی تعیین

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - p_i)^2} \quad (7)$$

$$CE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - p_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (8)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(p_i - \bar{p})}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2} \right]^2 \quad (9)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n p_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (10)$$

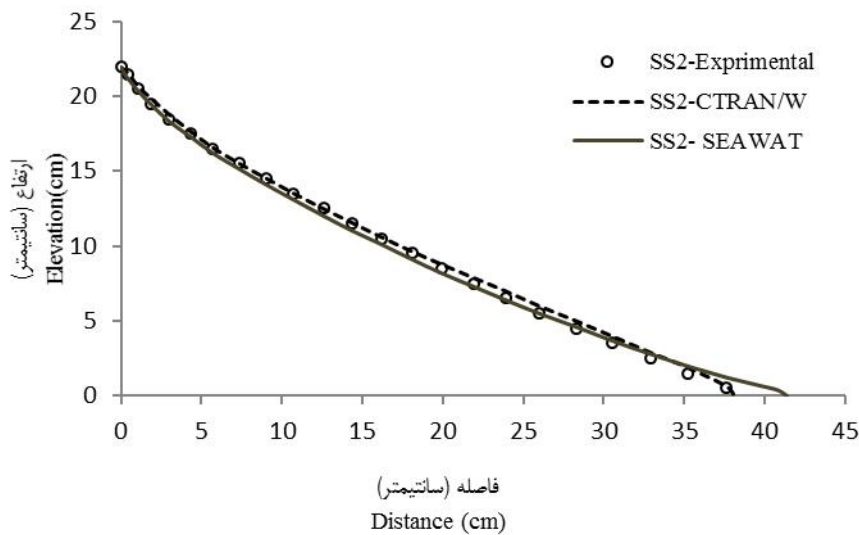
$$GSD = \frac{RMSE}{\bar{p}} \quad (11)$$

آخر واسنجی مدل در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی آورده شده است که گوهی آب شور در فاصله ۴۱/۳۸ سانتیمتری از منبع آب شور قرار گرفته است. مقادیر شاخص آماری در جدول (۱) آمده است و در شکل (۵) برازش مقادیر محاسباتی و مقادیر مشاهداتی مربوط به میزان پیشروی گوه آب شور نشان داده شده است.

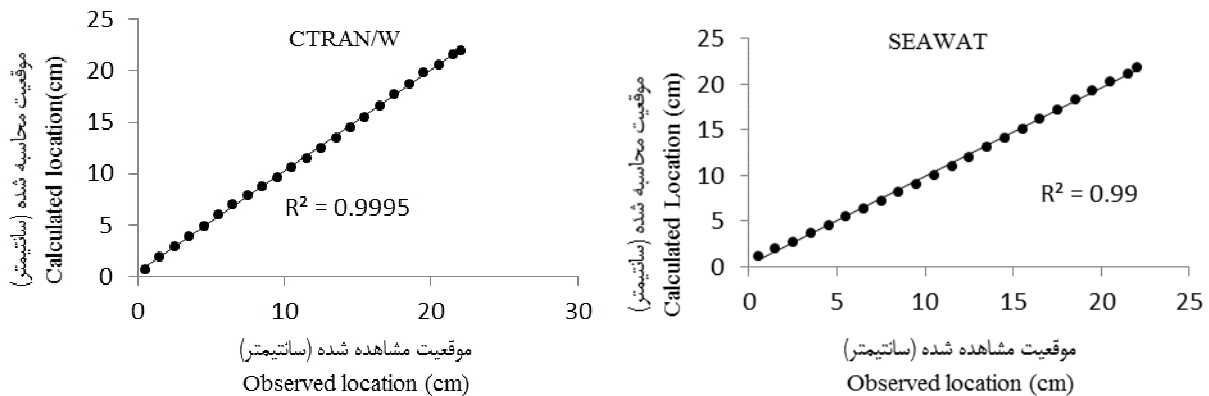
شده برای مقادیر پراکنندگی طولی و عرضی در آزمایشات متعدد (برای تخلخل‌ها و اندازه‌های مختلف دانه‌ها) انجام شده توسط زو و اکستین (۲۹) قرار دارد. مقادیر خطا بر اساس شاخص‌های آماری مختلف نیز تعیین گردید. این مقادیر نشان دهنده‌ی دقت بالای واسنجی مدل‌های SEAWAT و CTRAN/W می‌باشد. در شکل (۴) گراف مربوط به موقعیت قرارگیری مرز فوقانی گوهی آب شور پس از گام

جدول ۱- مقادیر شاخص آماری پس از کالیبراسیون
Table 1. Statistical Parameters After Calibration

Model مدل	statistical indicators شاخص‌های آماری				
	RMSE	CE	R^2	r	GSD
CTRAN/W	0.29	0.998	0.99	1.02	0.026
SEAWAT	0.34	0.997	0.99	0.99	0.031



شکل ۴- مقایسه نتایج کالیبراسیون مدل و داده‌های آزمایشگاهی در حالت پایدار ss2
Fig.4- Comparison of calibration results and experimental data at steady state of ss2 test



شکل ۵- برازش مقادیر محاسباتی و مقادیر مشاهداتی
Fig. 5- Regression of computational and observed data

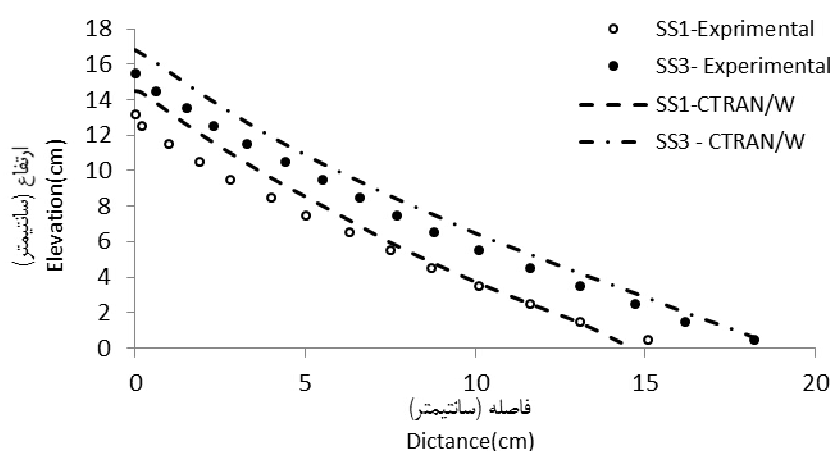
نتایج ارزیابی مدل

ارزیابی مدل برای سه حالت الف) وضعیت پایدار تحت گرادیان‌های مختلف ب) حالت گذرا تحت شرایط پیشروی گوهی آب شور ج) حالت گذرا تحت شرایط پس روی گوه آب شور با استفاده از شاخص‌های آماری مختلف صورت گرفت که در ذیل به صورت مجزا آورده شده است.

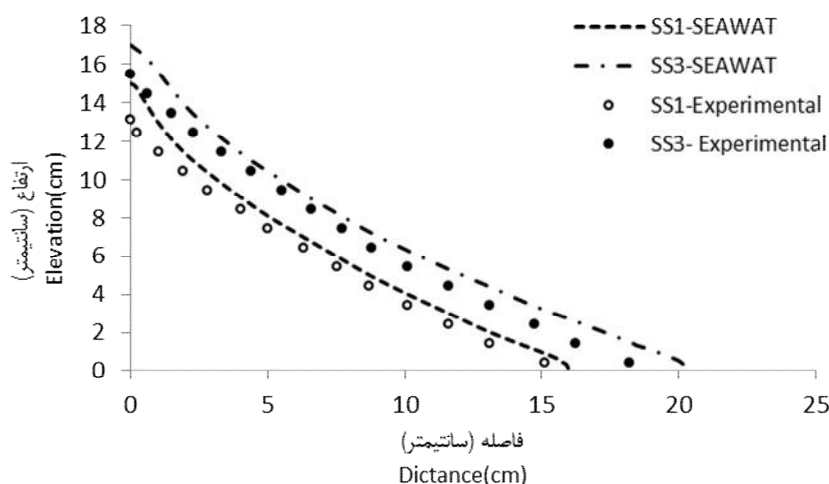
وضعیت پایدار

به منظور تعیین دقت مدل برای وضعیت پایدار، برای دو فاز

(SS1) و (SS3) شبیه‌سازی صورت گرفت که نتایج مربوط به قرارگیری موقعیت گوهی آب شور توسط مدل در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی به صورت نمودار ارائه گردیده است و همچنین مقادیر شاخص آماری نیز در صورت جدول ۲ ارائه شده است. شکل‌های (۶) و (۷) و همچنین مقادیر شاخص‌های آماری ارائه شده در جدول (۲)، تطابق خوب هر دو مدل مورد نظر با داده‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌ها و جدول ارائه شده، هر دو مدل برای حالت پایدار جریان، برآوردی بیشتر از مقدار واقعی برای هر سه فاز دارند.



شکل ۶- مقایسه نتایج مدل CTRAN/W و داده‌های اندازه‌گیری شده در حالت SS1 و SS3
Fig. 6- Comparison of CTRAN/W results with measured data at ss1 and ss3 tests



شکل ۷- مقایسه نتایج مدل SEAWAT و داده‌های اندازه‌گیری شده در حالت SS1 و SS3
Fig. 7- Results of SEAWAT compared to measured data at ss1 and ss3 tests

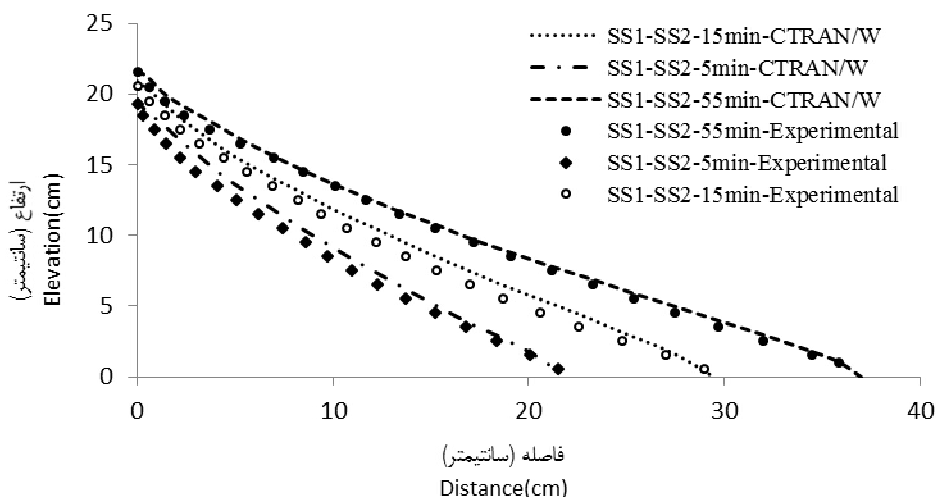
جدول ۲- مقادیر شاخص آماری برای حالت‌های SS3 و SS1
Table 2- Statistical indexes at ss1 and ss3 tests

مدل Model	حالت Mode	شاخص‌های آماری statistical indicators				
		RMSE	CE	R^2	R	GSD
CTRAN/W	SS1	1.09	0.92	0.99	1.12	0.142
SEAWAT		1.03	0.93	0.99	1.14	0.132
CTRAN/W	SS3	1.02	0.95	0.99	1.12	0.121
SEAWAT		0.97	0.96	0.81	1.14	0.145

با توجه به شکل‌های (۸) و (۹) و همچنین مقادیر شاخص‌های آماری، مدل‌های CTRAN/W و SEAWAT دقت بسیار بالایی در برآورد موقعیت گوه آب شور در حالت پیشروی را دارد. نتایج نیز نشان می‌دهد که مدل SEAWAT در شبیه‌سازی حالت گذرا در زمان‌های ۵ و ۱۵ دقیقه پس از حالت SS1 برآورد نزدیکتری به واقعیت نسبت به مدل CTRAN/W دارد و بالعکس در زمان ۵۵ دقیقه مدل CTRAN/W برآورد دقیقتری را دارا است.

وضعیت گذرا (پیشروی گوهی آب شور)

جهت تعیین دقت مدل‌های CTRAN/W و SEAWAT در پیش‌بینی موقعیت گوه آب شور در حالت پیشروی، از مدل‌های مذکور برای حالت انتقال از SS1 به SS2 برای زمان‌های ۵، ۱۵ و ۵۵ دقیقه پس از برقراری حالت پایدار SS1 استفاده شد که نتایج مربوط به قرارگیری موقعیت گوهی آب شور در حالت پیشروی توسط مدل‌ها در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در شکل‌های (۸) و (۹) ارائه گردیده است و همچنین مقادیر شاخص آماری به صورت جدول (۳) می‌باشد.



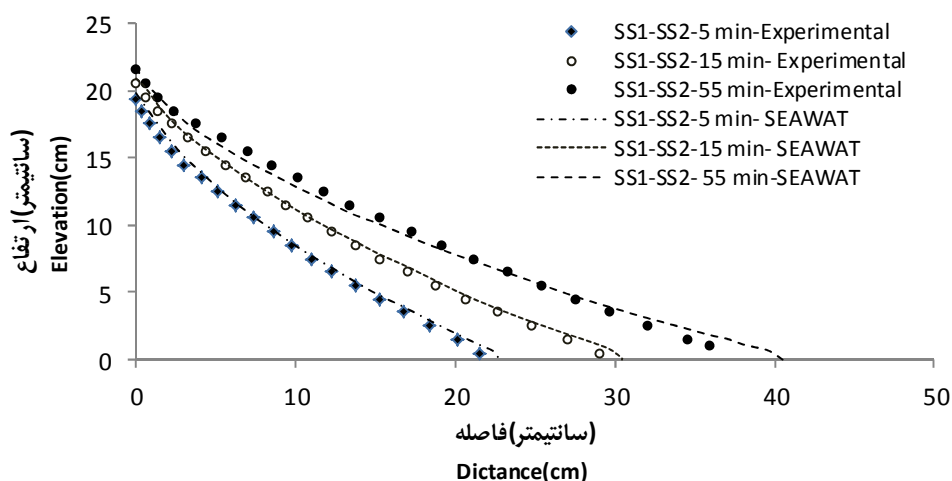
شکل ۸- مقایسه نتایج مدل CTRAN/W و داده‌های اندازه‌گیری شده در حالت پیشروی

Fig. 8- Compression between results of CTRAN/W and observed data at intruding state

جدول ۳- مقادیر شاخص آماری برای حالت گذرا از SS1 به SS2 در زمان‌های مختلف

Table 3- Statistical indexes for transient condition from ss1 to ss2 at different intervals

Model	حالت Mode	شاخص‌های آماری statistical indicators				
		RMSE	CE	R^2	r	GSD
CTRAN/W	SS1-SS2-5min	0.81	0.98	0.99	1.07	0.075
SEAWAT		0.48	0.99	0.97	1.05	0.05
CTRAN/W	SS1-SS2-15min	0.79	0.98	0.99	1.07	0.074
SEAWAT		0.33	0.99	0.95	1.03	0.034
CTRAN/W	SS1-SS2-55min	0.37	0.99	0.99	1.03	0.034
SEAWAT		0.51	0.99	0.97	1.05	0.048



شکل ۹- مقایسه نتایج مدل SEAWAT و داده های اندازه گیری شده در حالت پیشروی
 Fig. 9- Compression between results of SEAWAT and observed data at intruding state

بالایی در برآورد موقعیت گوهی آب شور در حالت پیشروی را دارا می‌باشند. نتایج نیز نشان می‌دهد که مدل CTRAN/W در شبیه سازی حالت گذرا در زمان های ۱۰ و ۱۵ دقیقه پس از حالت SS2 برآورد نزدیکتری به واقعیت نسبت به مدل SEAWAT دارد و بالعکس در زمان ۲۵ دقیقه مدل SEAWAT برآورد دقیقتری دارد.

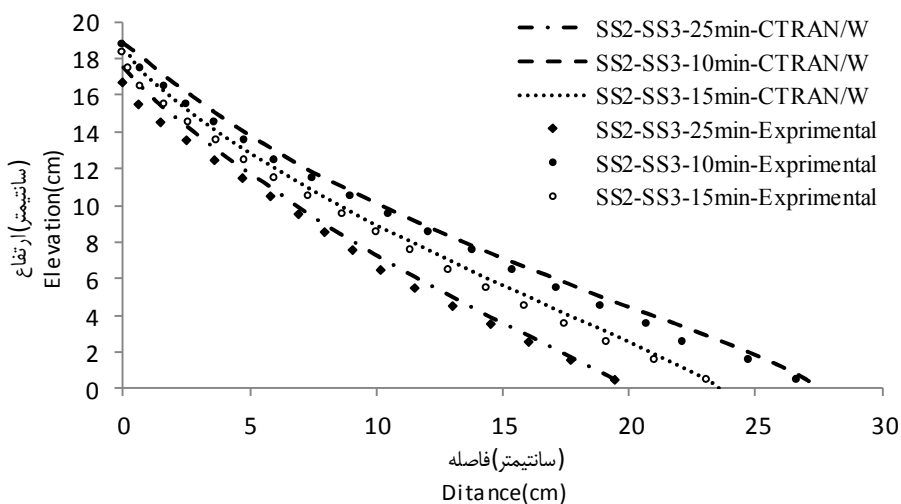
۳-۳- مقایسه دبی آب شیرین انتقال یافته

به منظور دستیابی به اینکه آیا مدل های مذکور در برآورد دبی انتقال یافته از منبع آب شیرین به آب شور را دارد، دبی های انتقالی محاسبه شده توسط مدل ها برای سه حالت SS1، SS2 و SS3 با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شدند. که نتایج آن در جدول (۵) ارائه شده است.

۳-۲-۳- وضعیت گذرا (پسروی گوهی آب شور)

جهت ارزیابی دقت مدل های CTRAN/W و SEAWAT در پیش بینی موقعیت گوهی آب شور در حالت پسروی، از مدل های فوق الذکر برای حالت انتقال از SS2 به SS3 برای زمان های ۱۰، ۱۵ و ۲۵ دقیقه پس از برقراری حالت پایدار SS2 خروجی گرفته شد که نتایج مربوط به قرارگیری موقعیت گوهی آب شور در حالت پسروی توسط مدل ها در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در شکل های (۱۰) و (۱۱) ارائه گردیده است.

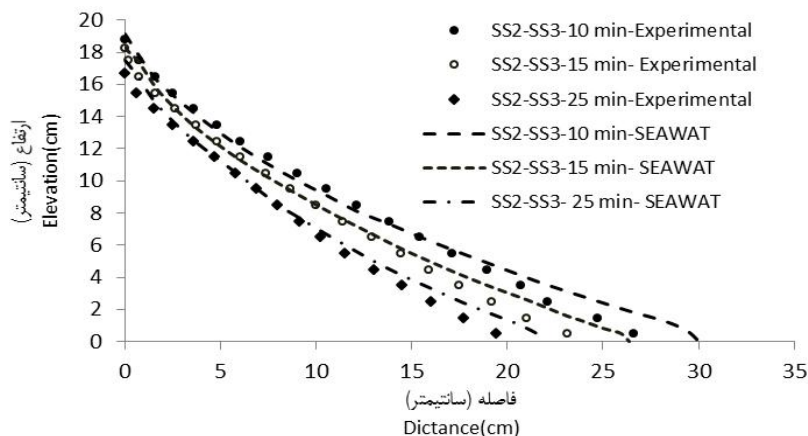
همچنین مقادیر شاخص آماری حاصل از مقایسه داده های مشاهده ای و عددی در جدول (۴) ارائه شده است. شکل های (۱۰) و (۱۱) و همچنین مقادیر شاخص های آماری ارائه شده در جدول (۴) نشان می‌دهد که مدل های CTRAN/W و SEAWAT دقت بسیار



شکل ۱۰- مقایسه نتایج مدل CTRAN/W و داده های اندازه گیری شده در حالت پسروی
 Fig. 10- Compression between results of CTRAN/W and observed data at receding state

جدول ۴- مقادیر شاخص آماری برای حالت گذار از SS2 به SS3 در زمان‌های مختلف
Table 4-Statistical indexes at transient condition from SS2 to SS3 at different conditions

Model	حالت Mode	شاخص‌های آماری statistical indicators				
		RMSE	CE	R ²	r	GSD
CTRAN/W	SS2-SS3-10 min	0.50	0.99	0.99	1.05	0.053
SEAWAT		0.55	0.99	0.94	1.02	0.066
CTRAN/W	SS2-SS3-15min	0.52	0.99	0.99	1.05	0.055
SEAWAT		0.59	0.98	0.91	1.07	0.065
CTRAN/W	SS2-SS3-25min	0.62	0.99	0.99	1.06	0.072
SEAWAT		0.54	0.99	0.90	1.07	0.073



شکل ۱۱- مقایسه نتایج مدل SEAWAT و داده‌های اندازه‌گیری شده در حالت پسروی
Fig. 11-Compression between results of SEAWAT and observed data at receding state

جدول ۵- مقایسه جریان آب شیرین پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده
Table 5- Compression between fresh water flow rate at predicted and observed states

model	جریان انتقالی از منبع آب شیرین به سمت آب شور (سانتیمتر مکعب بر ثانیه) Transported flow from freshwater resource to saltwater resource (cm ³ /s)		
	SS1	SS2	SS3
داده‌های آزمایشگاهی Experimental Data	1.42	0.59	1.19
CTRAN/W	1.40	0.60	1.16
SEAWAT	1.46	0.59	1.13

نتیجه‌گیری

مطالعات صورت گرفته بر روی گوه آب شور تاکنون مربوط به تأثیر چگالی آب شور بر میزان پیشروی گوه آب شور، نحوه حرکت آب شور تحت تأثیر برداشت آب‌های زیرزمینی، تأثیر روش‌های مدیریتی مختلف بر جلوگیری از نفوذ آب شور به سفره‌های آب شیرین به صورت عددی و آزمایشگاهی و ... می‌باشد و با توجه به اینکه مسائل تداخل آب شور بسیار پیچیده هستند و به طور کلی نمی‌توانند به صورت تحلیلی حل شوند، بنابراین روش‌های عددی ابزاری ایده‌آل برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی نتایج می‌باشند بنابراین در این راستا در این مقاله دقت مدل‌های CTRAN/W و SEAWAT در شبیه‌سازی و پیش‌بینی گوهی آب شور در سه حالت الف) وضعیت پایدار تحت

طبق جدول (۵)، مشاهده می‌شود که هر دو مدل دقت خوبی در برآورد میزان دبی انتقالی دارند با این حال مدل CTRAN/W نسبت به مدل SEAWAT در شرایط پس‌روی و تحلیل حالت تعادل دقت بیشتری در برآورد دبی انتقالی دارد و در عین حال مدل SEAWAT با توجه به اختلاف کمی که بین دبی مشاهده‌ای و محاسباتی در حالت SS2 از خود نشان داده، برای ارزیابی شرایط پس‌روی گوهی آب شور می‌تواند مناسب‌تر باشد. البته این در شرایط یکسان عددی از نظر تعداد مش به کار رفته می‌باشد که تعداد مش‌ها با توجه به کاهش ناپایداری عددی در مدل تعیین گردید.

SEAWAT در شبیه‌سازی و پیش‌بینی موقیعت و حرکت گوهی آب شور به ترتیب معادل $0/58$ و $0/67$ سانتیمتر می‌باشد که این مقادیر بسیار به هم نزدیک بوده و در کل نشان دهنده دقت بالاتر مدل SEAWAT نسبت به مدل CTRAN/W در شبیه‌سازی موقیعت گوهی آب شور می‌باشد. مقایسه صورت گرفته بین مدل‌ها نشان می‌دهد که مدل CTRAN/W برآورد بهتری نسبت به مدل SEAWAT در محاسبه میزان دبی انتقالی از منبع آب شیرین به سمت منبع شور را داراست.

سپاسگزاری

بدینوسیله نویسندگان مقاله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه ارومیه و همچنین ریاست محترم پژوهشکده مطالعات دریاچه ارومیه به سبب فراهم آوردن امکانات انجام این تحقیق و حمایت‌های صورت گرفته نهایت تشکر را دارند.

گرادیان‌های مختلف ب) حالت گذرا تحت شرایط پیشروی گوه آب شور ج) حالت گذرا تحت شرایط پس روی گوه آب شور بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی مدل‌های مذکور با نتایج آزمایشات گوسامی و کلمنت (۸) انجام شده بود مقایسه گردید. به منظور مقایسه داده‌های واقعی و شبیه‌سازی شده، از شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، معیار ناش-ساتکلیف (CE)، ضریب همبستگی (R^2)، نسبت اختلاف (r) و انحراف استاندارد عمومی (GSD) استفاده شد. در همه حالت‌های شبیه‌سازی شده مقدار RMSE کمتر از ۱۰ درصد مقدار ماکزیمم داده‌ها بوده و مقدار معیار ناش-ساتکلیف (CE) که در بازه ۱-۰/۸۱ قرار داشته و مقدار ضریب همبستگی و نسبت اختلاف نیز نزدیک به ۱ بوده و میزان انحراف استاندارد به صفر نزدیک می‌باشد که نشان می‌دهد مدل‌های CTRAN/W و SEAWAT توانایی شبیه‌سازی و پیش‌بینی موقیعت و حرکت گوه آب شور را تحت شرایط پایدار و گذرا را دارا بوده و همچنین در برآورد میزان جریان انتقالی از منبع آب شیرین به منبع آب شور دقت بالایی دارند. معیار متوسط میانگین مربعات خطای مدل‌های CTRAN/W و

منابع

- 1- Abdelaty I.M., Abd-Elhamid H.F., Fahmy M.R., Abdelaal G.M. 2014. Investigation of some potential parameters and its impacts on saltwater intrusion in Nile Delta Aquifer. J.Engineering Sciences Assiut University Faculty of Engineering. 4:931-955.
- 2- Bear J. 1979. Hydraulics of Ground Water, McGraw-Hill, New York City.
- 3- Contaminant Modeling with CTRAN/W .2007. An Engineering Methodology Third Edition, March 2008.
- 4- Custodio Ch. and Broggman G. A. 1987. Groundwater problems in coastal aquifers, Studies and Reports in Hydrology, UNESCO, Paris, Vol. 45: 1-576.
- 5- C. W. Fetter Jr. 1972. Position of the saline water interface beneath oceanic islands. Water Resources research 8,no.5:1307-1315.
- 6- Dagan G., and Bear J. 1968. Solving the problem of local interface upconing in a coastal aquifer by the method of small perturbations. J. Hydrol. Res., v. 6:15-44.
- 7- Frind E.O. 1982. Simulation of long-term transient density-dependent transport in groundwater. Advances in Water Resources 5, 6:73-88.
- 8- Goswami RR., and Clement TP. 2007. Laboratory-scale investigation of saltwater intrusion dynamics. Water Resour Res ;43:W04418. <http://dx.doi.org/10.1029/2006WR00515>.
- 9- GLOVER R.E. 1964. Ground water movement. U.S. Bureau of Reclamation Engineering Monograph 31:31-34
- 10- Galeati G., Gambolati G., and Neuman S.P.1992.coupled and partially coupled eulerian-lageangian model of freshwater-seawater mixing. Water Resources research 28,no.1:149-165.
- 11- Huykorn P.S., Anderson P.F., Mercer J.W., and White H.O. Jr. 1987. Saltwater intrusion in aquifers: Development and testing of a three-dimensional finite-element model. Water Resources research 23,no.2: 293-312.
- 12- Henry H. R. 1960. Salt intrusion into coastal aquifers, Ph.D. thesis, Columbia University, New York.
- 13- Henry H.R. 1964. Effects of dispersion on salt encroachment in coastal aquifers. Seawater in Coastal Aquifers. USGS Water-Supply Paper 1613-C: 70-84.
- 14- Illangasekare T., et al. 2006. Impacts of the 2004 tsunami on groundwater resources in Sri Lanka, Water Resources., 42, W05201, doi:10.1029/2006WR004876.
- 15- Johannsen K., Kinzelbach W., Oswald S., Wittum G. 2002. The salt-pool benchmark problem – numerical simulation of saltwater upconing in a porous medium. Adv. Water Resour, 25(3): 335-348
- 16- Konz M., Younes A., Ackerer P., Fahs M., Huggenberger P., and Zechner E. 2009. Variable-density flow in heterogeneous porous media – Laboratory experiments and numerical simulations. J. Contam. Hydrol., 108 (3-4):168-175

- 17- Kolar R. L., Kibbey T.C.G., Szpilka C., Atkinson J.H. 2009. Process-oriented tests for validation of baroclinic shallow water models: The lock-exchange problem. *Ocean Modelling* 28(1-3):137-152.
- 18- Krahn J. 2004. Contaminant transport modeling with Ctran/w: an engineering methodology. Geo-Slope International Ltd. Canada.
- 19- Luyun R.J. Momii K., Nakagawa K. 2009. Laboratory-scale saltwater behavior due to subsurface cutoff wall. *J. Hydrol.*, 377(3-4): 227-236
- 20- Mualem Y., and Bear J.1974. The shape of the interface in steady flow in a stratified aquifer, *Water Resources Research*, 10(6):1207– 1215.
- 21- Noorabadi S., Nazemi A.H, Sadraddini A.A. and Delirhasannia R. 2017. Laboratory investigation of water extraction effects on saltwater wedge displacement. *Global J. Environ. Sci. Manage.*, 3(1): 21-32, Winter 2017. DOI: 10.22034/gjesm.2017.03.01.003.
- 22- Oswald S.E. and Kinzelbach W. 2004. Three-dimensional physical benchmark experiments to test variable-density flow models. *J. Hydrol.*, 290(1-2):22-42.
- 23- Rezaee Pazhand H. 2001. Application of probability and statistics in water resources. Sokhan Gastar publication, 456p (In Persian).
- 24- Strack ODL. 1976. A single-potential solution for regional interface problems in coastal aquifers. *Water Resour Res*;12:1165–74.
- 25- U.S. Geological Survey (USGS) .2000. Groundwater resources for the future—Atlantic Coastal Zone, Fact Sheet 085-00, Reston, VA.
- 26- Werner A.D., Bakker M., Post VAE, Vandenbohede A., Lu C, Ataie-AshtianiB, Sim-mons CT, and Barry DA. 2013. Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges. *AdvWater Resources*. 2013;51: 3–26.
- 27- Van Lopik J.H., Hartog N., Zaadnoordijk W.J., Cirkel D.G, and Raof A. 2015. Salinization in a stratified aquifer induced by heat transfer from well casings. *Advances inWater Resources* 86 (2015) 32–45.
- 28- Xue Y., Xie0 C. and Wu J. 1995. A three dimensional model for seawater intrusion in China. *Water Resour.Res.*, No. 4:903-912.
- 29- Xu M. and Eckstein Y. 1997. Statistical analysis of the relationships between dispersivity and other physical properties of porous media. *Hydrogeology Journal*, V. 5, no. 4
- 30- Zhang Q., Volker R.E., and Lockington D. A. 2001. Influence of seaward boundary condition on contaminant transport in unconfined coastal aquifers, *J. Contam. Hydrol.*, 49(3– 4):201– 215.

Assessment of Accuracy of CTRAN/W and SEAWAT Models for Prediction of Saltwater Wedge Under Intruding and Receding Conditions

H. Ahmadi^{1*} - M. Hemmati² - M. Motalebian³

Received: 06-11-2017

Accepted: 15-01-2018

Introduction: Coastal aquifers are major source of freshwater in many parts of the world. Saltwater intrusion is a serious environmental issue since 80% of the world's population live along the coast and utilize local aquifers for their water supply. Under natural conditions, these coastal aquifers are recharged by rainfall events, and the recharged water flowing towards the ocean would prevent saltwater from encroaching into the freshwater region. However, over exploitation of coastal aquifers has resulted in reducing groundwater levels (hence reduced natural flow) and this has led to severe saltwater intrusion. Saltwater intrusion from the sea into below the freshwater of aquifer impairs the quality of these resources. Cause of the complexity of saltwater intrusion issues and generally they cannot be solved analytically, so numerical methods can be useful tools for simulation and prediction of salt water intrusion.

Materials and Methods: CTRAN/W is a finite element software product that can be used to model the movement of contaminants through porous materials such as soil and rock. The comprehensive formulation of CTRAN/W makes it possible to analyze problems varying from simple particle tracking in response to the movement of water, to complex processes involving diffusion, dispersion, adsorption, radioactive decay and density dependencies. SEAWAT is a three-dimensional variable density groundwater flow and transport model developed by the USGS based on MODFLOW and MT3DMS. SEAWAT is based on MODFLOW and MT3DMS. SEAWAT includes two additional packages: Variable-Density Flow (VDF) and Viscosity (VSC). In this study, the precision of CTRAN / W and SEAWAT models to simulation and prediction of saltwater wedge were investigated in three states: a) steady state salt-wedge data observed under different hydraulic gradient conditions; b) transient salt-wedge data observed under intruding-wedge conditions; and c) transient salt-wedge data observed under receding-wedge conditions. Both models were initially calibrated and then the models were performed for the above conditions. The simulation results of the two models with the experimental results of Goswami and Clement (2007) have been compared. For comparing the measured data and simulated data, statistical indicators were used: root-mean-square error (RMSE), a measure of Nash-Sutcliffe (CE), the Correlation Coefficient (R^2), the ratio of difference (r) and the General Standard Deviation (GSD).

Results and Discussion: In this study, the precision of CTRAN / W and SEAWAT models to predict saltwater wedge was investigated. At first step, both models were calibrated and the best values for longitudinal and transverse dispersion were obtained 0.5 and 0.05, respectively. Then simulation was performed with both models for all three modes (a- steady state salt-wedge data observed under different hydraulic gradient conditions; b- transient salt-wedge data observed under intruding-wedge conditions; and c- transient salt-wedge data observed under receding-wedge conditions). The results showed that CTRAN/W and SEAWAT models have high precision for simulation of position and movement of saltwater wedge in steady state with average of root mean square error (RMSE) equal to 1.05 and 1 cm, respectively and Both models have a higher estimate than the actual value for a steady state. As well as for transient state under the under intruding-wedge conditions CTRAN/W and SEAWAT models have high precision with average of root mean square error (RMSE) equal to 0.65 and 0.44 cm, respectively and other statistical indicators were acceptable. The results of prediction of position and movement of saltwater wedge under receding-wedge conditions with average of root mean square error (RMSE) equal to 0.54 and 0.56 cm, respectively provided acceptable estimates of both models. Finally, in order to determine the accuracy of the models in estimating the flow rate from the source of fresh water to the source of salt water, a comparison was made between the results of the models and the laboratory data, which showed that The CTRAN/W revealed appropriate estimation of amount of transferring discharge from freshwater reservoir to saltwater reservoir in compared with SEAWAT model. In general, according to statistical

1 and 2- Associate Professor and Assistant Professor, Department of Water Engineering, Urmia Lake Research Institute, Urmia University

(*-Corresponding Author Email: h.ahmadi@urmia.ac.ir)

3- PhD student of Hydraulic Structures, Department of Water Engineering, Urmia University

indicators, the results of both models were acceptable

Conclusion: The results showed that CTRAN/W and SEAWAT models have high precision for simulation and prediction of position and movement of saltwater wedge with average of root mean square error equal to 0.67 and 0.58 cm (less than 10% of the average of measured data), respectively. The CTRAN/W revealed appropriate estimation of amount of transferring discharge from freshwater reservoir to saltwater reservoir in compared with SEAWAT model. In general, according to statistical indicators, the results of both models were acceptable.

Keywords: Coastal Aquifer, Saltwater Intrusion, Saltwater wedge, CTRAN/W, SEAWAT

