

## شبیه‌سازی تداخل آب شور و شیرین در ناحیه اشباع و غیر اشباع خاک با استفاده از مدل HYDRUS-2D فیزیکی و عددی

حسین ربانیها<sup>۱</sup>، عبدالمجید لیاقت<sup>۲\*</sup>، مسعود سلطانی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه آبیاری و آبادانی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲. استاد گروه آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۳. استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی<sup>(ره)</sup>، قزوین

(تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۴/۲۵؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۶/۱۱)

### چکیده

یکی از عوامل تهدیدکننده برای منابع آب شیرین، پیشروی آب شور و نفوذ آن به سفره آب زیرزمینی است. این مسئله در مناطق ساحلی و حاشیه کویرها اتفاق می‌افتد و سبب کاهش کیفیت آب شیرین می‌شود. تبخیر از سطح خاک و عمق سطح ایستابی از عوامل تأثیرگذار بر پیشروی شوری و توزیع نمک در ناحیه اشباع و غیر اشباع به حساب می‌آید. در پژوهش حاضر با ساخت مدل فیزیکی به ابعاد  $4 \times 1 \times 1$  متر شرایط قرارگیری آبخوان شور و شیرین در چهار گرادیان هیدرولیکی مختلف بررسی شد. هنگام انجام آزمایش از مدل فیزیکی، داده‌های رطوبت و شوری برداشت شد و سپس، توزیع شوری در مدل فیزیکی با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-2D به صورت عددی شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد مدل HYDRUS-2D به خوبی توزیع رطوبت و شوری را شبیه‌سازی می‌کند. بیشترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) برای شبیه‌سازی رطوبت و شوری به ترتیب  $9/28$  و  $21/69$  درصد بود. نتایج نشان داد الگوی پیشروی و پسروی شوری متفاوت است. در شرایطی که سطح آب شیرین بالاتر است، در ناحیه اشباع مانع از پیشروی آب شور شده و در ناحیه غیر اشباع تأثیر زیادی بر کنترل شوری نداشته است که دلیل آن تبخیر از سطح خاک است. در ناحیه اشباع، در شرایطی که سطح آب شور و شیرین برابر بود، سه واحد افزایش شوری در ناحیه شور دیده شد و در شرایطی که سطح آب شور بالاتر بود،  $6/5$  واحد افزایش شوری در وسط دو مخزن آب شور و شیرین مشاهده شد.

**کلیدواژگان:** آب زیرزمینی، جبهه شوری، گرادیان هیدرولیکی.

## مقدمه

ایران از جمله کشورهای خشک دنیاست و سطح گسترده‌ای از اراضی آن در معرض شوری قرار دارد، به طوری که چهارمین کشور شور در آسیاست [۱]. اطلاعات به‌دست‌آمده از نقشه یک میلیونیم منابع و استعداد خاک‌های ایران، نشان می‌دهد اراضی دارای خاک‌های با محدوده‌های مختلف شوری، مساحتی معادل ۵۵/۶ میلیون هکتار (۳۴ درصد مساحت کل کشور) دارند [۲]. بیشتر زمین‌های شور در فلات مرکزی و دشت‌های ساحلی جنوب و دشت خوزستان قرار دارند. در مجموع، ۶/۸ میلیون هکتار از اراضی کشاورزی کشور درجات مختلف شوری دارند و در این میان، ۴/۳ میلیون هکتار به غیر از شوری، محدودیت دیگری ندارند [۳].

پیشروی آب شور می‌تواند به عواملی مانند تفاوت مقدار تغذیه و تخلیه، ساختار زمین‌شناسی آبخوان، خواص هیدرودینامیکی و ناپایداری یا عدم تعادل شرایط حاکم بر آبخوان، نسبت داده شود [۴]. بررسی اثر هر یک از عوامل یادشده بر پیشروی آب شور و ناحیه اختلاط در شرایط واقعی، امری بسیار دشوار و غیرممکن است، به همین دلیل، از مدل‌های فیزیکی و عددی به عنوان یک راه حل که به راحتی این عوامل را به هم مربوط می‌سازند، استفاده زیادی شده است [۴].

گوسوامی و کلمنت (۲۰۰۷) در پژوهشی پیشروی آب شور را با رنگ (ردیاب)، مشخص کرده و در محیط متخلخل برای سه حالت ۱. جبهه شوری در شرایط ماندگار تحت گرادیان‌های هیدرولیکی مختلف؛ ۲. جبهه شوری در شرایط ناماندگار و گذرا در حالت پیشروی؛

۳. جبهه شوری در شرایط ناماندگار در حالت پسروی. را در مقیاس آزمایشگاهی بررسی کرده و مرز مشترک را در زمان‌های متفاوت، برداشت کردند. آن‌ها از مشاهدات تجربی خود نتیجه گرفتند که ناحیه انتقالی بین آب شور و غیر شور، در هر دو حالت شرایط ماندگار و ناماندگار روشن و مشخص یا غیر تدریجی است [۵].

در مطالعه‌ای تداخل آب شور و آبخوان آزاد شیرین در همجواری ساحل با استفاده از مدل فیزیکی (۱/۵\*۱۲۰\*۱۸۰ سانتی‌متر) شرایط تزریق آب شیرین، برداشت از آب شور و پرده آب‌بند زیرزمینی بررسی شد. نتایج پژوهش یادشده نشان داد رابطه گیبین-هرزبرگ

به‌خوبی مقدار برداشت آب و نفوذ آب شور را در سواحل و محیط اشباع شبیه‌سازی می‌کند [۶].

احمدی و همکاران (۱۳۹۶) سه حالت یادشده در پژوهش گوسوامی و کلمنت را با استفاده از مدل CTRAN/W و SEAWAT به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. نتایج پژوهش آنها بیانگر دقت زیاد مدل‌های CTRAN/W و SEAWAT در شبیه‌سازی موقعیت و حرکت جبهه آب شور بود [۵ و ۷].

افلاطونی و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از نرم‌افزار PMWIN5.3 زهکش حائل دشت قزوین را با به‌کارگیری داده‌های سطح ایستابی و هدایت الکتریکی، تغییرات سطح ایستابی و شوری شبیه‌سازی کردند [۸]. آنها سه پارامتر هدایت هیدرولیکی، میزان تغذیه و آب‌دهی ویژه را به عنوان عوامل با میزان حساسیت زیاد در شبیه‌سازی گزارش دادند.

ژوهانسن و همکاران (۲۰۰۲) با ساخت مدل فیزیکی به ابعاد ۲۰×۲۰×۲۰ سانتی‌متر، جریان با دانسیته متغیر در محیط آزمایشگاه را شبیه‌سازی کردند و مدل ریاضی برای پیش‌بینی جریان آب شور با چگالی متغیر را ارائه دادند. آنها با آنالیز حساسیت روی پارامترهای مدل ریاضی ارائه‌شده و مدل‌سازی معکوس مشخص کردند که مدل به ضریب انتشارپذیری عرضی بیشترین حساسیت را دارد [۹]. مقولی (۲۰۱۶) با استفاده از مدل شبیه‌سازی پیشروی شوری در آبخوان‌های ساحلی، پیشروی آب شور در شورزار مرکزی دشت قزوین را شبیه‌سازی کرد [۱۰]. نتایج شبیه‌سازی پیشروی آب شور در آبخوان سرایان واقع در خراسان جنوبی با استفاده از مدل MODFLOW نشان داد ادامه روند برداشت آب سبب پیشروی جبهه آب شور کویری و افزایش غلظت خواهد شد [۱۱]. نورعابدی و همکاران (۲۰۱۷) تأثیر غلظت آب شور و گرادیان هیدرولیکی را بر جبهه شوری با استفاده از مدل فیزیکی بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد پسروی آب شور در زمان کمتری نسبت به پیشروی آب شور اتفاق می‌افتد [۱۲]. همچنین، طی پژوهشی پیشروی آب شور در ساحل دریا با به‌کارگیری مدل فیزیکی و عددی MODFLOW به صورت جریان شعاعی بررسی شد. نتایج پژوهش یادشده بیانگر الگوی پیشروی و پسروی غیرمتقارن آب شور بود [۱۳]. طی پژوهش دیگری تغذیه مصنوعی آب شیرین برای کاهش پیشروی آب شور در

۱۰۰×۱۰۰×۴۰۰ سانتی‌متر، استفاده شد. برای جلوگیری از نشت آب بعد از ساخته شدن مدل، تمام درز و شکاف‌ها از داخل به وسیله جوش آهن، جوشکاری شد. در دو طرف مدل دو مخزن آب به طول ۲۱ سانتی‌متر تعبیه شد و برای جلوگیری از زنگ‌زدگی و ایجاد خطا در نمونه‌برداری‌ها، تمام سطوح با رنگ مخصوص آهن پوشش داده شد. خاک استفاده‌شده از مصالح رودخانه‌ای تهیه شده و ارتفاع آن در مدل ۷۰ سانتی‌متر بود. خاک داخل مدل به صورت لایه‌های ۲۰ سانتی‌متری ریخته شد. پس از پرس شدن مخزن، برای همگن شدن خاک و حصول وزن مخصوص طبیعی، سه بار با فاصله یک هفته روی سطح خاک شرایط ماندایی ایجاد شد و پس از آن، آزمایش‌ها شروع شد. مخازن آب با استفاده از ورق آهنی پانچ شده و توری پلاستیکی ریز از خاک جدا شدند تا مانع از ریزش و شسته شدن خاک شوند (شکل ۱). در بالای مدل دو ظرف پلاستیکی استوانه‌ای غیر شفاف به عنوان منبع تأمین سطح آب دو مخزن تعبیه شد. ظرف آب شیرین با آب شرب با شوری تقریباً ۰/۹۸ دسی‌زیمنس بر متر و ظرف آب شور با استفاده از نمک طعام با ترکیب شیمیایی (NaCl) با درصد خلوص ۹۹/۸ درصد و شوری ۲۰ دسی‌زیمنس بر متر پر شد. سطح آب مخازن در دو طرف مدل به وسیله سرریز ثابت نگه داشته شد. برای تثبیت سطح آب در مخازن آب شور و شیرین، جریان آب به طور مستمر از ظروف آب شور و شیرین به مخازن برقرار بود. شوری مخزن آب شور طی آزمایش نمونه‌برداری و مدام اندازه‌گیری می‌شد تا مقدار آن طی زمان تغییر نکرده باشد.

خاک استفاده‌شده شامل ۶۷/۸۲ درصد شن، ۱۰/۱۴ درصد سیلت و ۲۲/۰۳ درصد رس بود که بافت آن با توجه به درصد ذرات خاک، لوم رسی-سنی تعیین شد. هدایت هیدرولیکی خاک با استفاده از روش بار افتان اندازه‌گیری و ۱ متر بر روز برآورد شد.

در تحقیق حاضر چهار حالت شامل:

۱. سطح آب شیرین و شور در ۲۵ سانتی‌متری از کف؛
۲. سطح آب شیرین ۱۵ سانتی‌متر و سطح آب شور در تراز ۲۵ سانتی‌متر از کف؛
۳. سطح آب شیرین ۳۰ سانتی‌متر و سطح آب شور ۲۵ سانتی‌متر از کف؛
۴. سطح آب شیرین ۱۰ سانتی‌متر و سطح آب شور در تراز ۲۵ سانتی‌متری

آبخوان آزاد با استفاده از مدل فیزیکی و عددی شبیه‌سازی شد. نتایج پژوهش یادشده نشان داد بهترین مکان تغذیه مصنوعی، بالای پنجه پیشروی آب شور است [۱۴].

نتایج متعددی مدل عددی HYDRUS-2D سیمونک و همکاران (۲۰۱۲) را به عنوان ابزاری توانا برای شبیه‌سازی جریان هم‌زمان آب و املاح در خاک معرفی کرده‌اند [۱۵]. رنجبر و همکاران (۲۰۱۷) رطوبت، نیترات و آمونیوم را به صورت هم‌زمان در آبیاری جویچه‌ای با استفاده از مدل HYDRUS-2D شبیه‌سازی کردند. نتایج پژوهش آنها بیانگر این است که مدل HYSRUS-2D توانایی شبیه‌سازی رطوبت، نیترات و آمونیوم در زیرجویچه و پشته‌های آبیاری را دارد و برای مدیریت آب و املاح می‌تواند مفید باشد [۱۶]. مکالا و نامبی (۲۰۱۶) توانایی مدل HYDRUS-2D را در شبیه‌سازی چرخه نیتروژن (Nitrogen Dynamics) در نواحی اشباع و غیر اشباع با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بررسی کردند. آنها آزمایش را در شرایط آبیاری پیوسته و چرخه خشک شدن و تر شدن انجام دادند. نتایج پژوهش آنها نشان داد مدل HYDRUS-2D در هر دو حالت، مقادیر مشاهده‌شده را به خوبی پیش‌بینی می‌کند [۱۷]. سلطانی و همکاران (۲۰۱۸) نتایج شبیه‌سازی نسبت عرض کاشت به نکاشت متفاوت را در سامانه زهکش خشک، در مقیاس آزمایشگاهی با استفاده از HYDRUS-2D، نشان دادند. نتایج پژوهش آنها نشان داد مدل HYDRUS-2D حرکت آب و انتقال شوری را در زهکشی خشک با دقت معقولی برآورد می‌کند [۱۸].

پژوهش حاضر به منظور بررسی قابلیت مدل HYDRUS-2D در برآورد و شبیه‌سازی تداخل آب شور و شیرین در دو ناحیه اشباع و غیر اشباع در جوار سطح ایستابی کم عمق انجام شده است. همچنین، اثر گرادیان‌های هیدرولیکی مختلف بر توزیع شوری در مدل فیزیکی و HYDRUS-2D بررسی شده است. هدف اصلی از استفاده نرم‌افزار HYDRUS-2D در پژوهش حاضر، به دست آوردن ضرایب هیدرولیکی و انتقال املاح به روش حل معکوس در هر یک از تیمارها است.

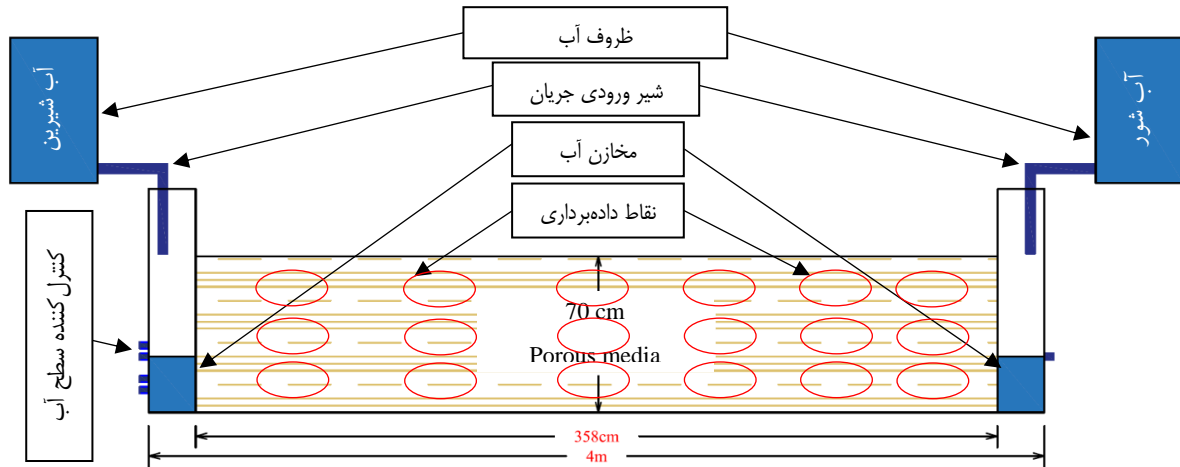
## مواد و روش‌ها

### داده‌برداری و عملیات آزمایشگاهی

در این آزمایش، از مدل فیزیکی از جنس آهن به ابعاد

زمان انجام طرح ثابت نگه داشته شد و تغییرات در سطح آب شیرین اعمال شد تا شرایط واقعی شبیه‌سازی شود.

انجام شد (جدول ۱). در شرایط واقعی با برداشت و یا تغذیه آب زیرزمینی گرادیان هیدرولیکی و جبهه پیشروی شوری در دشت‌ها تغییر می‌کند. از این‌رو، تراز آب شور در



شکل ۱. شمای کلی مدل، مخازن آب شور و شیرین و نقاط داده‌برداری

جدول ۱. مشخصات تیمارهای آزمایش‌شده

شماره آزمایش	سطح آب شور از کف (سانتی‌متر)	سطح آب شیرین از کف (سانتی‌متر)	مدت زمان آزمایش (ساعت)	میانگین تبخیر از تشت تبخیر (میلی‌متر بر روز)
۱	۲۵	۲۵	۱۴۴	۱۰/۱
۲	۲۵	۱۵	۱۷۵	۹/۱
۳	۲۵	۳۰	۱۶۵	۷/۱
۴	۲۵	۱۰	۱۳۷	۵/۷

شده و در ظروف فلزی به آزمایشگاه منتقل و رطوبت آن‌ها به روش وزنی اندازه‌گیری شد. پس از خشک شدن نمونه‌ها و اندازه‌گیری وزن خشک آن‌ها، به هر یک مقدار مشخصی آب مقطر اضافه شد تا به محلول فوق اشباع تبدیل شوند. برای اندازه‌گیری شوری، ۲۴ ساعت پس از اضافه کردن آب به نمونه خاک خشک‌شده، شوری محلول اندازه‌گیری شد و با استفاده از رابطه ۱ و با دسترس بودن میزان رطوبت خاک، شوری محلول خاک محاسبه شد.

$$w_1 C_1 = w_2 C_2 \quad (1)$$

که در آن مقدار آب اولیه نمونه خاک [M]،  $C_1$  شوری اولیه خاک [ $dS.m^{-1}$ ]، مقدار آب هنگام اندازه‌گیری شوری [M] و  $C_2$  مقدار شوری ثانویه [ $dS.m^{-1}$ ] که اندازه‌گیری شده است. رابطه ۱ بیان جرمی در نمونه است که ارتباط بین مقدار آب و شوری اولیه و ثانویه (پس از اضافه کردن آب) را نشان می‌دهد. در رابطه ۱ مقدار  $C_1$  مجهول است.

در هر آزمایش در روزهای مختلف از خاک نمونه‌برداری انجام می‌شد. نمونه‌ها با استفاده از آگر با قطر داخلی ۳ سانتی‌متر از بالا در ۳ عمق و ۶ فاصله (در مجموع، ۱۸ نقطه) برداشته و برای اندازه‌گیری رطوبت و شوری به آزمایشگاه منتقل می‌شد. حفره ایجادشده توسط آگر پس از نمونه‌برداری با خاک همان محل پر شده و در نمونه‌برداری بعدی برای به حداقل رساندن خطا از آن محل نمونه‌برداری صورت نمی‌گرفت. عمق داده‌برداری بین ۲۰ تا ۷۰ سانتی‌متری از سطح بود. از آنجا که مدل فیزیکی در فضای باز قرار داشت، بدیهی است که به علت تبخیر از سطح خاک نمک در لایه سطحی تجمع پیدا کرده و مستقل از نوع آزمایش به طور پیوسته منجر به افزایش شوری لایه سطحی خاک شود. به همین دلیل، اندازه‌گیری‌های شوری خاک، شامل هر دو ناحیه اشباع و غیر اشباع محیط متخلخل انجام شد و شوری سطح خاک را شامل نمی‌شد. در هر نمونه‌برداری حدود ۳۰ گرم از خاک برداشته

**مدل HYDRUS-2D**

HYDRUS و بسته نرم‌افزاری همراه با آن، مدل‌های عددی را ارائه می‌کند که برای شبیه‌سازی حرکت آب، املاح و گرما در محیط متخلخل برای شرایط اشباع و غیر اشباع کاربرد دارد. این بسته نرم‌افزاری قابلیت شبیه‌سازی جریان و انتقال املاح به صورت یک‌بعدی، دوبعدی و سه‌بعدی را دارد. اگرچه شبیه‌سازی حرکت آب در تمام این مدل‌ها تقریباً یکسان است، ولی مدل‌های انتقال املاح مختلفی وجود دارند که در کدهای متفاوت ارائه شده‌اند. بعضی از مدل‌ها می‌توانند فقط انتقال املاح را مستقل از یکدیگر شبیه‌سازی کنند، در حالی که بعضی دیگر شامل بخش بیوژئوشیمیایی هستند که قادر به شبیه‌سازی واکنش‌های پیچیده بین املاح مختلف نیز هستند. در این تحقیق از نمک طعام برای ایجاد آب شور استفاده شده است، بنابراین از معادلات انتقال املاح مستقل برای شبیه‌سازی شوری بهره گرفته شده است.

**معادلات حاکم**

معادلات حاکم بر تداخل آب شور و شیرین شامل دو بخش معادلات جریان آب و معادلات انتقال املاح می‌شود. برای حصول نتیجه و بررسی چگونگی پیشروی شوری، باید این معادلات به صورت هم‌زمان در حالت‌های غیرماندگار حل شوند. برای این منظور، در هر گره محاسباتی ابتدا مقدار سرعت و جهت جریان آب محاسبه می‌شود و سپس، در مرحله بعدی به عنوان اطلاعات ورودی برای حل معادلات انتقال جرم استفاده می‌شود.

معادله حاکم بر جریان دارسی آب در محیط متخلخل صلب، برای شرایط تراکم‌ناپذیر و هم‌دما و با فرض نقش ناچیز فاز گازی در روند حرکت مایع، بر اساس معادله اصلاح‌شده ریچاردز دوبعدی در محیط اشباع و غیر اشباع به صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ K \left( K_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_i} K_{iz}^A \right) \right] - S \quad (2)$$

که در آن:

$\theta$  محتوای رطوبت حجمی  $[L^+L^-]$ ،  $h$  ارتفاع معادل فشار  $[L]$ ،  $S$  عبارت تخلیه یا تغذیه  $[T^{-1}]$ ،  $x_i$  مختصات مکانی  $[L]$ ،  $t$  زمان  $[T]$ ،  $K_{ij}^A$

مؤلفه‌های بی‌بعد تانسور غیرهمگنی  $K^A$  خاک و  $K$  هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک  $[LT^{-1}]$  و  $S$  حجم آب تخلیه-تغذیه‌شده در واحد زمان از یک واحد حجم خاک است. منحنی مشخصه رطوبتی خاک  $\theta(h)$  با استفاده از رابطه وانگنوختن (۱۹۸۰) و هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک  $K(h)$  با مدل کاپیلاری معلم (۱۹۷۶) مطابق روابط ۳-۵ به دست می‌آید [۱۹ و ۲۰]:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$K(h) = K_s S_e^l \left[ 1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (4)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad m = 1 - \frac{1}{n}, \quad n > 1 \quad (5)$$

$S_e$  اشباع نسبی،  $\theta_s$  رطوبت حجمی اشباع  $[L^+L^-]$ ،  $\theta_r$  رطوبت حجمی باقی‌مانده در پروفیل خاک  $[L^+L^-]$ ،  $K_s$  هدایت هیدرولیکی اشباع  $[LT^{-1}]$  و  $\alpha$ ،  $n$  و  $l$  پارامترهای تجربی ورودی مدل هستند که در بین آن‌ها  $m$ ،  $n$  و  $l$  بی‌بعد و  $\alpha$  دارای بعد  $[L^{-1}]$  است. پارامتر  $l$  معمولاً به طور میانگین برابر  $0.5$  در نظر گرفته می‌شود [۲۰].

مدل HYDRUS-2D برای شبیه‌سازی حرکت املاح در محیط متخلخل از حل معادله جابه‌جایی-انتشار بهره می‌گیرد. معادله یادشده به صورت عددی به روش عناصر محدود گالرکین، همراه با عبارات‌های تخلیه، واکنش‌های مرتبه صفر و یک حل می‌شود. روی املاح در محیط متخلخل واکنش‌های گوناگونی مانند جذب، ترکیب، تبدیل و تخریب اتفاق می‌افتد که هر یک از این عوامل برای هر جزء از نمک ضرایب مخصوص به خود را دارد. در پژوهش حاضر به طور کلی جابه‌جایی املاح و جبهه شوری، مد نظر بوده است و اثر تمام عوامل نام‌برده روی شوری محلول خاک نشان داده می‌شود. بنابراین، در شبیه‌سازی املاح در تحقیق حاضر شوری خاک در نقاط مختلف اندازه‌گیری شده و به مدل داده شده است.

**حل معکوس**

برای شبیه‌سازی حرکت آب و املاح در خاک باید روابط ریچاردز و جابه‌جایی-انتشار حل شوند. هر یک از این روابط ضرایب ثابتی دارند که در خاک و شرایط مختلف،

که در آن، SI شاخص حساسیت،  $O_1$  مقدار اولیه پارامتر خروجی،  $O_2$  مقدار ثانویه پارامتر خروجی،  $I_1$  مقدار اولیه پارامتر ورودی،  $I_2$  مقدار ثانویه پارامتر ورودی،  $\bar{O}$  متوسط مقادیر پارامتر خروجی و  $\bar{I}$  متوسط مقادیر پارامتر ورودی است. طبق این روش، حساسیت خروجی‌های مدل نسبت به پارامترهای ورودی به چهار گروه حساس، نیمه‌حساس، با حساسیت کم و غیرحساس تقسیم‌بندی می‌شود [۱۸]. اگر میزان این شاخص  $0/5 - 1$  باشد، مدل به آن پارامتر ورودی نیمه‌حساس است. در صورتی که میزان این شاخص  $0 - 0/5$  مدل به آن پارامتر ورودی حساسیت کمی دارد و در صورتی که تغییرات پارامتر ورودی هیچ تأثیری بر خروجی (مقدار شاخص نزدیک صفر) مدل نداشته باشد، مدل به آن پارامتر غیرحساس است.

برای حدس اولیه پارامترهای هیدرولیکی، داده‌های صفحات فشاری در نرم‌افزار RETC وارد شده و ضرایب منحنی مشخصه به دست آمده است (جدول ۲). ضریب پخشیدگی مولکولی برای نمک طعام در شرایط استاندارد به گزارش فان و همکاران (۲۰۰۶) برابر با  $0/057$  سانتی‌متر مربع بر ساعت است که به عنوان فرض اولیه به مدل داده شد [۲۲]. ضریب انتشارپذیری طولی  $10$  درصد طول مسیر و برابر با  $35/8$  سانتی‌متر و ضریب انتشارپذیری عرضی  $10$  درصد انتشارپذیری طولی در نظر گرفته شد.

متفاوت‌اند. پارامترهای رطوبت اشباع، رطوبت باقی‌مانده،  $\alpha$  و  $n$  در حل جریان آب و ضرایب انتشارپذیری طولی و عرضی و ضریب پخشیدگی مولکولی نمک در شرایط استاندارد برای حل انتقال املاح، پارامترهایی هستند که باید برای شرایط هر آزمایش بهینه شوند. مدل HYDRUS برای بهینه کردن ضرایب، معادلات را به طور معکوس حل کرده و با تغییر در مقدار هر پارامتر و بر اساس تابع هدف موجود، مقدار خطا را حداقل می‌کند.

در مجموع، ۵ پارامتر برای شبیه‌سازی جریان آب باید بهینه شود. در پژوهش حاضر ابتدا با استفاده از تحلیل حساسیت، پارامترهای حساس شناسایی شده و سپس، برای حل معکوس به مدل معرفی شدند. تحلیل حساسیت بر اساس مقایسه رطوبت‌ها به عنوان پارامتر خروجی و با تغییر پارامترهای ورودی تا سطح  $\pm 90$  درصد انجام شد. برخی از پارامترها مانند رطوبت اشباع با تغییرات زیاد، از محدوده معقول خارج می‌شدند که در آن‌ها به مقادیر کم اکتفا شد. در نهایت، طبقه‌بندی کیفی حساسیت مدل با استفاده از شاخص حساسیت قربانی (۱۹۹۷) انجام شد [۲۱]. این شاخص عبارت است از:

$$SI = \frac{[(O_2 - O_1) / \bar{O}]}{[(I_2 - I_1) / \bar{I}]} \quad (6)$$

جدول ۲. مقادیر حدس اولیه

انتقال املاح			حرکت آب				
$D_w$	$D_T$	$D_L$	$K_s$	$\alpha$	$n$	$\theta_r$	$\theta_s$
( $cm^2 \cdot hr^{-1}$ )	(cm)	(cm)	( $cm \cdot hr^{-1}$ )	( $cm^{-1}$ )	(-)	( $cm^3 \cdot cm^{-3}$ )	( $cm^3 \cdot cm^{-3}$ )
۰/۰۵۷	۳/۵۸	۳۵/۸	۴/۱۷	۰/۰۵۱۵	۱/۴۷۱	۰/۰۵۴۶	۰/۳۸۵

واسنجی و صحت‌سنجی مدل

واسنجی و ارزیابی مدل با مقایسه نتایج حاصل از حل معکوس و داده‌های مشاهداتی صورت گرفت. برای مقایسه بین داده‌ها، از ضریب تبیین ( $R^2$ )، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE) استفاده شده است (روابط ۷ تا ۹). نتایج مربوط به صحت و اعتبارسنجی مدل در قسمت نتایج و بحث آمده است.

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(p_i - \bar{p})}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2} \right]^2 \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - p_i)^2} \quad (8)$$

$$NRMSE\% = \frac{RMSE \times 100}{\bar{O}} \quad (9)$$

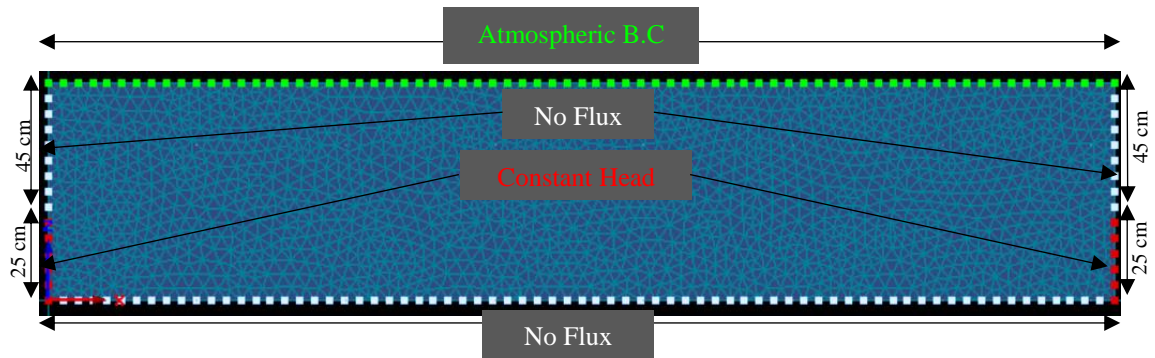
که در آن:

هیدرولیکی حل شده و پس از رسیدن به نتایج قابل قبول، حل معکوس برای شوری انجام گرفت. شرایط مرزی هیدرولیکی در سطح خاک به علت تبخیر شرط مرزی اتمسفریک، در مجاورت مخازن آب، شرط مرزی هد ثابت به اندازه سطح آب در آن تیمار و بقیه مرزها بدون جریان لحاظ شدند. شکل ۲ شرایط مرزی اعمال شده در تیمار یک (سطح برابر آب شور و آب شیرین) را نشان می‌دهد. تبخیر با استفاده از داده‌های تشت تبخیر اندازه‌گیری شد. مقدار ضریب تشت تبخیر در اقلیم کرج که نیمه‌خشک و خشک بود، ضریب تشت بر اساس روابط مختلف موجود بین ۰/۴۵ تا ۰/۷۵ محاسبه شد. با استفاده از مدل ضرایب مختلف تشت تبخیر بررسی شده و مقدار ۰/۵ از بین آن‌ها انتخاب شد. سپس، داده‌های تبخیر از تشت با ضرب ضریب تشت به تبخیر از سطح خاک تبدیل شد [۲۴ و ۲۵].

$\bar{p}$ ,  $O$ ,  $\bar{O}$ ,  $n$  و  $i$  به ترتیب مقادیر برآورد شده، متوسط مقادیر برآورد شده، مقادیر اندازه‌گیری شده، متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده، تعداد داده‌ها و شماره هر یک از داده‌ها است. طبق گزارش جیمسون و همکاران (۱۹۹۱) اگر مقدار  $NRMSE < 10\%$  باشد، نشان‌دهنده عملکرد عالی مدل؛ اگر  $10\% < NRMSE < 20\%$  باشد، عملکرد خوب مدل را نشان می‌دهد؛ اگر  $20\% < NRMSE < 30\%$  باشد، نشان‌دهنده عملکرد متوسط مدل و  $NRMSE > 30\%$  نشان‌دهنده عملکرد ضعیف مدل است [۲۳].

### شرایط اولیه و مرزی

شرایط اولیه رطوبت در کف مدل اشباع و در سطح خاک ۷۰- سانتی‌متر به صورت خطی فرض شد، به بیانی تعادل رطوبتی در پروفیل خاک منظور شد. شرایط اولیه شوری اثر زیادی بر نتایج دارد به همین دلیل از خاک نمونه‌برداری شده و به نرم‌افزار داده شد. مدل ابتدا برای شرایط



شکل ۲. شرایط مرزی اعمال شده تیمار نخست

### نتایج و بحث

#### تحلیل حساسیت

برخی نتایج تحلیل حساسیت روی پارامترهای هیدرولیکی خاک در جدول ۳ قابل مشاهده است. تأثیر تغییر پارامترها بر رطوبت خاک، مبنای کار قرار گرفته است (پارامتر  $O$  در رابطه ۶). بر اساس نتایج تحلیل حساسیت (جدول ۳)، مدل به رطوبت اشباع و ضرایب  $n$  و  $\alpha$  حساسیت داشت، بنابراین سه پارامتر یادشده در حل معکوس وارد شدند. مقدار رطوبت باقی‌مانده و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک دو پارامتر غیر حساس تعیین شدند که اولی بر اساس بافت خاک و با استفاده از مدل Rosseta تخمین زده شد و پارامتر هدایت هیدرولیکی اشباع بر اساس مقدار اندازه‌گیری شده در آزمایش، استفاده شد.

پس از تعیین پارامترهای حساس، اقدام به حل معکوس مدل برای به دست آوردن مقادیر بهینه پارامترهای هیدرولیکی حساس شد. با توجه به شرایط هیدرولیکی متغیر (سطح آب در مخازن و میزان تبخیر از سطح خاک)، هر آزمایش به طور مستقل حل معکوس شد و پارامترهای منحصر به فرد برای آن آزمایش استخراج شد. در مرحله اول ۷۰ درصد داده‌های مشاهده شده که شامل رطوبت و شوری می‌شدند، به طور تصادفی انتخاب شده و برای هر آزمایش به مدل داده شد. پس از محاسبه شاخص‌های آماری (روابط ۷ تا ۹) برای اطمینان از صحت ضرایب به دست آمده، باقی‌مانده داده‌ها برای مرحله صحت‌سنجی به مدل داده شد.

جدول ۳. خلاصه نتایج شاخص حساسیت پارامترهای هیدرولیکی خاک

شاخص حساسیت					
$\alpha$	n	هدایت هیدرولیکی	رطوبت باقی مانده	رطوبت اشباع	درصد تغییرات
-۰/۱	---	۰/۰۴۷	---	---	-۹۰
-۰/۳	-۰/۷	۰/۰۸۴	۰/۰۵۹	۲/۶	-۳۰
-۰/۱۳	-۰/۲۷	۰/۰۲۸	۰/۰۲۴	۰/۹۶	-۵
-۰/۱۲	-۰/۲۷	۰/۰۳	۰/۰۲۳	۰/۹۶	-۱۵
-۰/۱۴	-۰/۲۶	۰/۰۲۵	۰/۰۲۷	۰/۹۶	۱۵
-۰/۱۳	-۰/۲۶	۰/۰۲۷	۰/۰۲۵	۰/۹۶	۵
-۰/۱	-۰/۳	۰/۰۲۵	۰/۰۲۸	---	۳۰
-۰/۲	-۰/۳	۰/۰۲۲	۰/۰۳۴	---	۹۰

**واسنجی و صحت‌سنجی مدل**

مقادیر نهایی بهینه‌شده ضرایب حرکت آب و انتقال املاح در جدول ۴ قابل مشاهده است. حرکت و جابه‌جایی املاح در خاک تحت تأثیر سه مکانیزم توده‌ای، پخشیدگی و انتشارپذیری است. ضرایب انتشارپذیری طولی و عرضی و ضریب پخشیدگی مولکولی متأثر از عواملی مانند دما، مقدار جریان و شکل خلل و فرج خاک هستند [۲۶]. مقدار تبخیر از سطح خاک (جدول ۱)، درجه دمای هوا و سطح آب در مخازن در آزمایش‌ها متفاوت است و این امر سبب شده مقادیر ضرایب انتشارپذیری و پخشیدگی مولکولی ( $D_w$ ) در آزمایش‌ها متفاوت باشند. همچنین، تفاوت در شرایط اولیه شوری و رطوبت و توالی انجام آزمایش‌ها روی این ضرایب تأثیر گذاشته است. مقدار ضریب انتشارپذیری طولی ( $D_L$ ) بین  $2/53 - 54/07$  و مقدار ضریب انتشارپذیری عرضی ( $D_T$ ) بین  $0/43 - 4/5$  سانتی‌متر در آزمایش‌ها متغیر است. همچنین، ضریب پخشیدگی مولکولی بین  $0/02 - 1/72$  سانتی‌مترمربع بر ساعت در روند بهینه‌سازی به دست آمد. در آزمایش سوم سطح آب شیرین بیشتر از آب شور است، حداقل سطح ایستابی در نزدیکی سه متری از مخزن آب شیرین و در ارتفاع  $24/75$  سانتی‌متری از کف مدل فیزیکی واقع شده است. مقدار پیشروی آب شور تحت گرادیان هیدرولیکی  $0/004$  متر بر متر صورت می‌گیرد. گرادیان هیدرولیکی کم سبب شده

که انتقال املاح بیشتر از طریق پخشیدگی و انتشار اتفاق می‌افتد. به همین علت، ضریب  $D_L$  و  $D_w$  بیشتر از آزمایش‌های دیگر است. از طرفی، مقدار میانگین رطوبت در آزمایش سوم بیشتر از آزمایش‌های دیگر است و می‌تواند دلیلی بر افزایش ضرایب انتشارپذیری طولی و پخشیدگی مولکولی باشد.

نتایج واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب در جدول‌های ۵ و ۶ قابل مشاهده است.

در شبیه‌سازی رطوبت در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی ریشه میانگین مربعات خطا کمتر از ۳ درصد و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال‌شده کمتر از ۱۰ درصد است که شبیه‌سازی عالی را نشان می‌دهد [۲۳]. ضریب تبیین در شبیه‌سازی شوری، بیشتر از ضریب تبیین شبیه‌سازی رطوبت است که با نتایج گزارش‌شده [۱۸] همخوانی دارد، ولی ریشه میانگین مربعات خطای نرمال‌شده در شبیه‌سازی رطوبت کمتر از شبیه‌سازی شوری است که به دلیل دامنه تغییرات بیشتر شوری نسبت به دامنه تغییرات رطوبت است. در مرحله واسنجی مدل شوری همه مقادیر NRMSE در محدوده شبیه‌سازی خوب قرار گرفته‌اند و در مرحله صحت‌سنجی نزدیک به مرز بین شبیه‌سازی خوب و متوسط هستند. بیشترین مقدار NRMSE در مرحله صحت‌سنجی تیمار سوم است که برابر با  $21/69$  درصد است.



جدول ۴. ضرایب بهینه‌شده در حل معکوس

پارامترهای بهینه‌سازی شده						
انتقال املاح			حرکت آب			تیمار
$D_w$ ( $cm^2 \cdot hr^{-1}$ )	$D_T$ (cm)	$D_L$ (cm)	$\alpha$ ( $cm^{-1}$ )	$n$ (-)	$\theta_s$ ( $cm^3 \cdot cm^{-3}$ )	
۰/۱۳	۲/۳۷	۷/۲۹	۰/۰۷۴۶	۱/۴۴۲	۰/۳۵۸	۱
۱/۶۹	۰/۶۱	۲/۵۳	۰/۰۷۴۳	۱/۴۴۳	۰/۳۷۳۳	۲
۱/۷۲	۰/۴۳	۵۴/۰۷	۰/۰۶۹۹	۱/۵۷۳	۰/۳۷۶۵	۳
۰/۰۲	۴/۵	۸/۱	۰/۱۲۷۶	۱/۲۵۱	۰/۳۶۹	۴

جدول ۵. نتایج واسنجی مدل برای شرایط هیدرولیکی و شوری خاک

پارامترهای آماری						تیمار
شبیه‌سازی شوری			شبیه‌سازی رطوبت			
NRMSE (%)	RMSE ( $dS \cdot m^{-1}$ )	$R^2$ (-)	NRMSE (%)	RMSE ( $cm^3 \cdot cm^{-3}$ )	$R^2$ (-)	
۱۷/۳	۱/۶۲	۰/۹۵	۸/۸۴	۰/۰۳	۰/۷۲	۱
۱۵/۶۴	۱/۵۱	۰/۹۶	۷/۷۸	۰/۰۲	۰/۸۱	۲
۱۲/۳۲	۱/۸۱	۰/۹۷	۹/۲۵	۰/۰۳	۰/۸۱	۳
۱۶/۲۱	۲/۰۷	۰/۹۵	۷/۷	۰/۰۲	۰/۸۱	۴

جدول ۶. نتایج صحت‌سنجی مدل برای شرایط هیدرولیکی و شوری

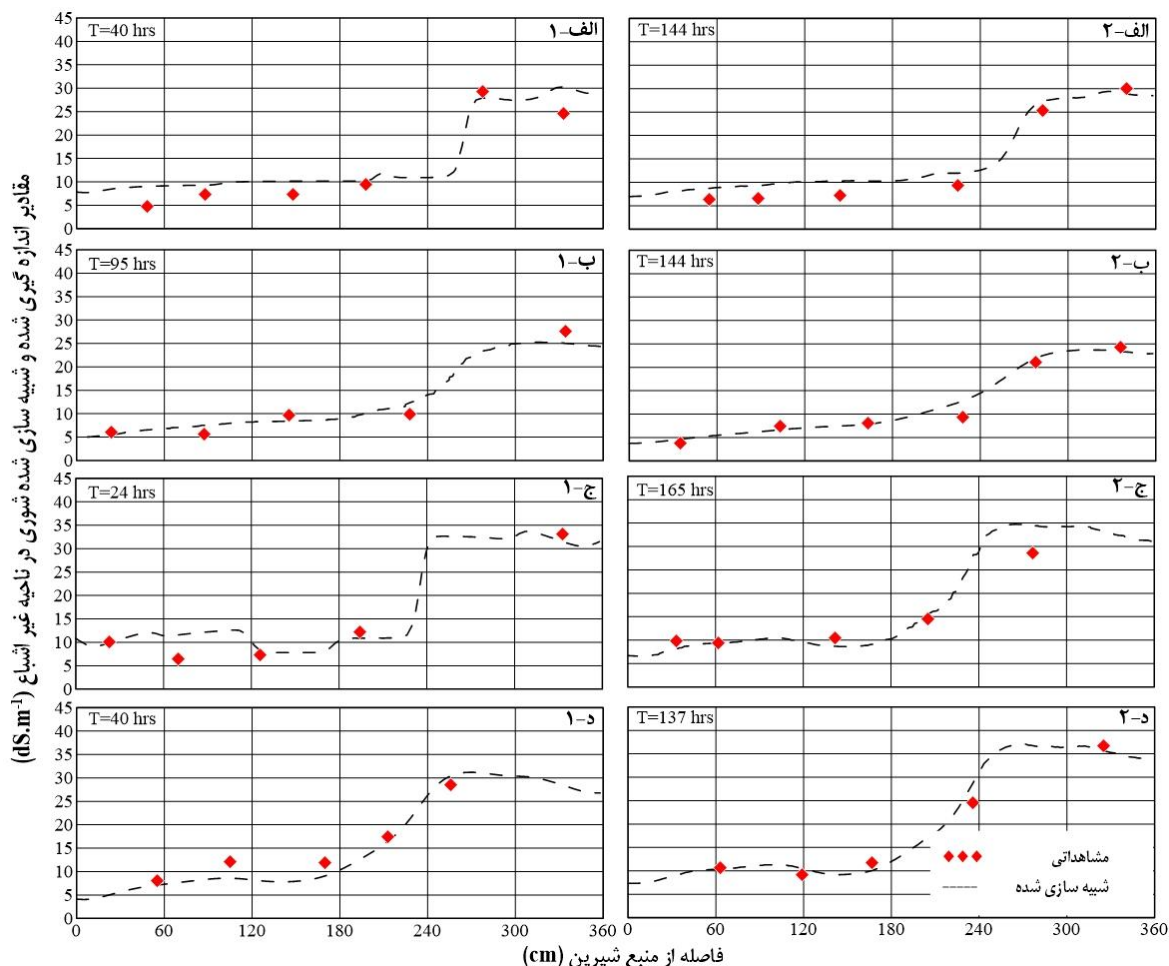
پارامترهای آماری						تیمار
شبیه‌سازی شوری			شبیه‌سازی رطوبت			
NRMSE (%)	RMSE ( $dS \cdot m^{-1}$ )	$R^2$ (-)	NRMSE (%)	RMSE ( $cm^3 \cdot cm^{-3}$ )	$R^2$ (-)	
۲۰/۸۹	۱/۹۵	۰/۹۶	۶/۰۹	۰/۰۲	۰/۸۹	۱
۲۰/۳۳	۱/۹۷	۰/۹۵	۵/۱۹	۰/۰۲	۰/۸۸	۲
۲۱/۶۹	۲/۸۸	۰/۹۴	۹/۲۸	۰/۰۳	۰/۷۶	۳
۱۹/۱۴	۲/۲	۰/۹۲	۹/۳۹	۰/۰۳	۰/۹۴	۴

تقریباً از وسط مدل فیزیکی، شوری افزایش می‌یابد و ناحیه تبادلی آغاز می‌شود. محل شروع خط مورب با شرایط آزمایش هم‌خوانی دارد. هر چه به سمت مخزن آب شور نزدیک می‌شود، مقدار شوری افزایش می‌یابد و خط مورب حالت قائم به خود می‌گیرد و حدود ۳۰ سانتی‌متری از مخزن آب شور، تغییرات شوری کمتر می‌شود. در آزمایش دوم و چهارم که سطح آب شور به ترتیب ۱۵ و ۱۰ سانتی‌متر از آب شیرین بیشتر است، ناحیه تبادلی نسبت به آزمایش اول و سوم (سطح آب شیرین ۳۰ سانتی‌متر و سطح آب شور ۲۵ سانتی‌متر) به صورت مایل است که پیشروی شوری به سمت مخزن آب شیرین را نشان

در شکل ۳ مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده شوری در زمان‌های مختلف در همه تیمارها آورده شده است. نمودارهای نشان داده‌شده در شکل ۳ مربوط به بالای سطح ایستابی و ناحیه غیراشباع خاک هستند. مقایسه بین اندازه‌گیری‌ها و شبیه‌سازی‌ها بیان می‌کند که مدل به‌خوبی توانسته توزیع شوری در مدل فیزیکی را شبیه‌سازی کند. نمودارها را می‌توان به سه ناحیه کم‌شور (نزدیک مخزن شیرین)، تبادلی (ناحیه با خط مورب) و ناحیه شور (نزدیک مخزن شور) تقسیم کرد. در آزمایش نخست (سطح آب شیرین و شور برابر و ۲۵ سانتی‌متر) بعد از گذشت ۱۴۴ ساعت از شروع آزمایش (شکل ۳-الف-۲)

مدل فیزیکی قبل از شروع آزمایش سوم می توان گفت که اگرچه آب شیرین مانع از پیشروی آب شور شده است، ولی تأثیر زیادی بر عقب راندن آب شور در ناحیه غیراشباع نداشته است که دلیل آن می تواند تبخیر از سطح خاک باشد.

می دهد. در آزمایش سوم سطح آب شیرین ۵ سانتی متر از سطح آب شور بیشتر است و آب شیرین مانع از پیشروی املاح شده است. در شکل ۳-ج-۱ توزیع شوری در ساعت های اولیه شبیه سازی که تقریباً برابر با شوری اولیه است، نشان داده شده است. با توجه به شوری اولیه زیاد در



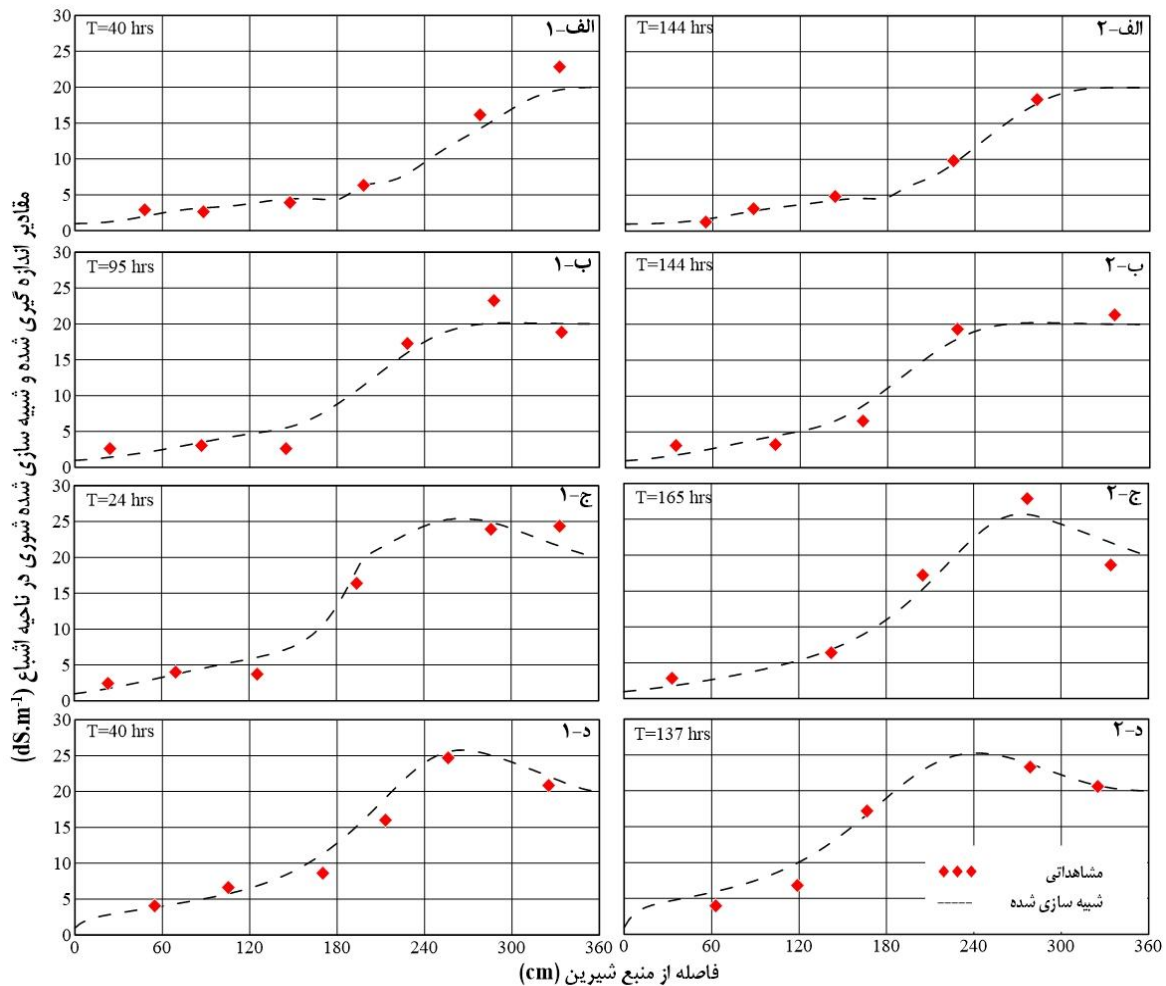
شکل ۳. مقایسه مقادیر شوری اندازه گیری شده و شبیه سازی در زمان های مختلف در ناحیه غیراشباع (ارتفاع ۴۵ سانتی متر از کف مدل) (الف) آزمایش اول (ب) آزمایش دوم (ج) آزمایش سوم (د) آزمایش چهارم

بیشترین مقدار افزایش شوری در فاصله دو متری از مخزن آب شیرین و به مقدار ۲ دسی زیمنس بر متر است. در آزمایش سوم سطح آب شیرین بیشتر از آب شور است که سبب آبشویی می شود. آبشویی املاح از نزدیکی مخزن آب شیرین شروع شده و تا فاصله حدود ۲۶۰ سانتی متر از مخزن آب شیرین ادامه داشته است. بیشترین مقدار آبشویی بعد از گذشت ۱۴۰ ساعت (شکل ۴-ج ۱ و ۲) در فاصله ۲ متر از مخزن آب شیرین انجام شده است. همچنین، با توجه به موقعیت سطح ایستابی در این آزمایش از سمت مخزن

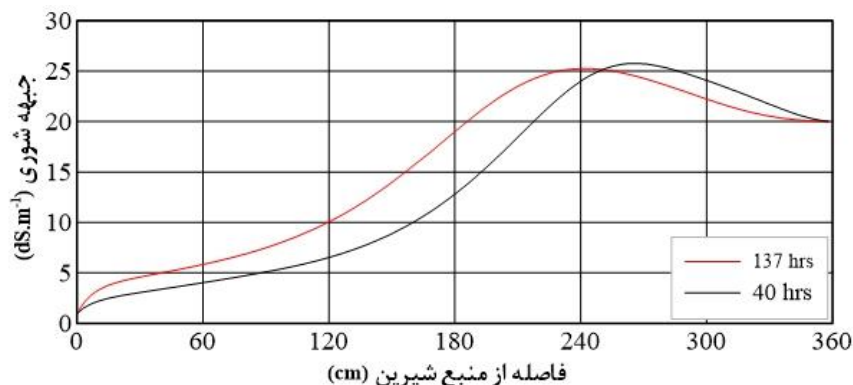
مقادیر شوری اندازه گیری شده و شبیه سازی شده در ناحیه اشباع در شکل ۴ آورده شده است. مقدار تغییرات شوری نسبت به زمان در ناحیه اشباع مشهودتر است. در آزمایش نخست (شکل ۴-الف) در فاصله ۲۱۰ تا ۳۳۰ سانتی متر از مخزن شیرین بعد از گذشت چهار روز با پیشروی آب شور، شوری به میزان ۳ دسی زیمنس بر متر افزایش یافته است. با مقایسه شکل های مربوط به آزمایش دوم (ب-۱ و ب-۲) مشاهده می شود شوری تا حدود ۹۰ سانتی متر از مخزن آب شیرین پیشروی کرده است، ولی

۴-د و ۱ و ۲). تغییرات شوری بین دو مخزن در آزمایش چهارم در شکل ۵ نشان داده است. الگوی پیشروی و پسروی شوری یکدیگر متفاوت است. به دلیل این امر حرکت پخشیدگی و انتشارپذیری املاح، جبهه حرکت آب و املاح در خاک متفاوت است. شرایطی که جبهه شوری در حال پیشروی است (آزمایش‌های ۲ و ۴)، املاح جلوتر از آب پیشروی کرده و سبب افزایش شوری در خاک می‌شود که با نتایج گزارش شده همخوانی دارد [۱۲ و ۱۳]. همچنین، میزان تبخیر از سطح خاک نیز روی افزایش شوری تأثیر گذار است و در حضور تبخیر از سطح خاک، فارغ از نوع آزمایش همواره شوری افزایش می‌یابد.

آب شور املاح وارد شده و در نواحی نزدیک به مخزن آب شور حداکثر ۰/۵ واحد افزایش شوری مشاهده می‌شود. در آزمایش ۴ (شکل ۴-د و ۱ و ۲) بعد از گذشت تقریباً چهار روز املاح پیشروی کرده و سبب افزایش شوری در خاک شده است. افزایش شوری در خاک بین ۰/۵ تا ۶/۵ دسی‌زیمنس بر متر به ترتیب در نزدیکی مخزن آب شیرین و ۱۸۰ سانتی‌متری از مخزن آب شیرین بوده است. به طور کلی، شوری تا مخزن آب شیرین پیشروی داشته ولی در نواحی نزدیک به مخزن آب شور (فاصله ۲۵۰-۳۶۰ سانتی‌متر) که میزان نمک خاک بیشتر از میزان نمک مخزن آب شور بوده است، سبب کاهش شوری خاک (به مقدار ۱/۵ دسی‌زیمنس بر متر) شده و در فاصله ۰-۲۵۰ سانتی‌متر شوری خاک افزایش یافته است (شکل



شکل ۴. مقایسه مقادیر شوری اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی در زمان‌های مختلف در ناحیه اشباع (ارتفاع ۵ سانتی‌متر از کف مدل) (الف) آزمایش اول (ب) آزمایش دوم (ج) آزمایش سوم (د) آزمایش چهارم



شکل ۵. مقایسه جبهه شوری در ناحیه اشباع در آزمایش چهارم

[2]. Banayi M H. Resources and Capacity of Iranian soils Map. Soil and water Research Institute. Iran. 2002; 6(p). [Persian]

[3]. Momeni A. Geographical distribution and salinity levels of Iranian soil resources. Journal of Soil Research. 2011; 24(3):203-215.[Persian]

[4]. Barlow PM, Reichard EG. Saltwater intrusion in coastal regions of North America. Hydrogeology Journal. 2010 Feb 1;18(1):247-260.

[5]. Goswami RR, Clement TP. Laboratory- scale investigation of saltwater intrusion dynamics. Water Resources Research. 2007 Apr;43(4):335-348.

[6]. Sriapai T, Walsri C, Phueakphum D, Fuenkajorn K. Physical model simulations of seawater intrusion in unconfined aquifer. Songklanakarin Journal of Science & Technology. 2012 Nov 1;34(6):679-687.

[7]. Ahmadi H, Hemmati M, Motallebian M. Assessment of accuracy of CTRAN/W and SEAWAT models for prediction of saltwater wedge under intruding and receding conditions. Journal of Water and Soil. 2018;32(1):13-27. [Persian]

[8]. Aflatooni M, Eskandari L, Dehghanisanij H. Calibration and Sensitivity Analysis of Hydraulic Behavior in Qazvin Plain Aquifer. Iranian Journal of Soil and Water Research. 2015;45(3):283-291. [Persian]

[9]. Johannsen K, Kinzelbach W, Oswald S, Wittum G. The saltpool benchmark problem—numerical simulation of saltwater upconing in a porous medium. Advances in Water Resources. 2002 Mar 1;25(3):335-48.

[10]. Maghooli G. Saltware intrusion assessment along swamp casts (Case study: Central salt marsh of Qazvin). Irrigation and Reclamation Engineering Department. University of Tehran; 2016 sep. [Persian]

### نتیجه گیری

در تحقیقات انجام شده در زمینه پیشروی آب شور به سمت آبخوان شیرین بیشتر به پیشروی آب شور در ناحیه اشباع پرداخته شده است. در این پژوهش توزیع شوری هم در نواحی اشباع و هم غیراشباع خاک با استفاده از مدل فیزیکی و عددی HYDRUS-2D مطالعه شده است. به طور کلی، می توان گفت که مدل HYDRUS-2D، شرایط رطوبتی را بهتر از شوری شبیه سازی کرده است هر چند که شاخص های آماری مربوط به شبیه سازی شوری نیز در محدوده قابل قبول قرار دارند. با توجه به نتایج واسنجی و صحت سنجی مدل HYDRUS-2D می توان این گونه اظهار داشت که مدل توانایی شبیه سازی این پدیده را در دو ناحیه غیراشباع و اشباع دارد. در آزمایش سوم سطح آب شیرین بیشتر از آب شور است و مانع از پیشروی آب شور در ناحیه اشباع خاک شده ولی در ناحیه غیر اشباع به دلیل اثر تبخیر در افزایش شوری، تأثیر زیادی بر کاهش غلظت املاح نداشته است. در شرایطی که سطح آب شیرین و شور برابر باشد، در ناحیه اشباع، سه واحد افزایش شوری در ناحیه شور و در شرایطی که سطح آب شور بالاتر است، ۶/۵ واحد افزایش شوری در وسط دو مخزن آب شور و شیرین مشاهده شد. با به کارگیری مدل های عددی بعد از واسنجی و صحت سنجی می توان سناریوهای مختلفی را که امکان وقوع آنها در طبیعت محتمل است را ارزیابی کرد.

### منابع

[1]. Azari A, Liaghat Z, Darbandi S. Drainage; Quantity and Quality of Return Flow. 1nd ed. Tehran. Iranian National Committee on Irrigation and Drainage; 2002. [Persian]

- [11]. KardanMoghadam H, Banihabib M. Investigation of Interference of Salt water in Desert Aquifers (Case study: South Khorasan, Sarayan Aquifer). 2017; 31(3):673-688. [Persian]
- [12]. Noorabadi S, Sadraddini AA, Nazemi AH, Delirhasannia R. Laboratory and numerical investigation of saltwater intrusion into aquifers. *Journal of Materials and Environmental Sciences*. 2017;8(12):4273-83.
- [13]. Mehdizadeh SS, Ketabchi H, Ghoroghi M, Hasanzadeh AK. Experimental and numerical assessment of saltwater recession in coastal aquifers by constructing check dams. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2020 Mar 12:103637.
- [14]. Memari SS, Bedekar VS, Clement TP. Laboratory and Numerical Investigation of Saltwater Intrusion Processes in a Circular Island Aquifer. *Water Resources Research*. 2020 Feb;56(2):e2019WR025325.
- [15]. Šimůnek J, Van Genuchten MT, Šejna M. The HYDRUS software package for simulating the two-and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated porous media. Technical manual. 2012 Sep.
- [16]. Ranjbar A, Rahimikhoob A, Ebrahimian H, Varavipour M. Simultaneous Simulation of Water, Nitrate and Ammonium Transport in Soil Using HYDRUS-2D Model in Furrow Irrigated Maize. 2017; 31.2(2):25-276. [Persian]
- [17]. Mekala C, Nambi IM. Experimental and simulation studies on nitrogen dynamics in unsaturated and saturated soil using HYDRUS-2D. *Procedia Technology*. 2016 Jan 1;25:122-9.
- [18]. Soltani M, Rahimikhoob A, Sotoodehnia A, Akram M. Evaluation of HYDRUS\_2D Software in Simulating Dry Drainage. 2018; 31.4(4):595-607. [Persian]
- [19]. Van Genuchten MT. A closed- form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*. 1980 Sep;44(5):892-8.
- [20]. Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water resources research*. 1976 Jun;12(3):513-22.
- [21]. Ghorbani B. A mathematical model to predict surface runoff under sprinkler irrigation conditions. Doctoral dissertation. Cranfield University. Silsoe College; 1997.
- [22]. Fan AW, Liu W, Xu GL. Numerical investigation on the temperature effect on the transport of soil solute. *Heat Transfer Asian Research: Co- sponsored by the Society of Chemical Engineers of Japan and the Heat Transfer Division of ASME*. 2006 Dec;35(8):539-52.
- [23]. Jamieson PD, Porter JR, Wilson DR. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field crops research*. 1991 Nov 1;27(4):337-50.
- [24]. Mohammadi M, Ghahraman B, Davary K, Liaghat AM, Bannayan M. Pan coefficient (K<sub>p</sub>) estimation under uncertainty on fetch. *Meteorology and Atmospheric Physics*. 2012 Jul 1;117(1-2):73-83.
- [25]. Ghamarnia H, Soltani N. Evaluating the Efficiency of Empirical Estimation of Reference Evapotranspiration (Pan Based Method) in Different Climate Conditions of Iran. 1397 Jan 1; 14(4): 170-183. [Persian]
- [26]. Abbasi F. *Advanced Soil Physics*. 3rd ed. Tehran: University of Tehran Press (UTP); 2015. [Persian]