

مقاله علمی-پژوهشی

## مطالعه آزمایشگاهی تداخل آب شور و شیرین کم عمق بر توزیع شوری در ناحیه اشباع و غیراشباع با استفاده از مدل فیزیکی

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

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۴/۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۵/۲۲

### چکیده

اختلاط آب شور و شیرین در آبخوان‌های نزدیک ساحل دریاها و حاشیه شورزارها باعث محدودیت استفاده از منابع آب زیرزمینی باکیفیت می‌گردد. از طرف دیگر افزایش غلظت آبخوان آب شور در نتیجه تبخیر از سطح خاک و کاهش هد فشاری در آبخوان شیرین در نتیجه برداشت بی‌رویه از آبخوان، باعث پیشروی جبهه اختلاط، به سمت آبخوان آب شیرین خواهد شد. در این تحقیق با ساخت مدل فیزیکی، ناحیه اختلاط و نحوه توزیع نمک در دو قسمت اشباع و غیراشباع محیط متخلخل مورد بررسی قرار گرفته است. چهار سناریوی مختلف هیدرولیکی شامل سطح ایستابی برابر آب شور و شیرین، سطح آب شیرین بالاتر از آب شور و دو سطح ایستابی شور بالاتر (۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر) از آب شیرین در آبخوان مورد بررسی قرار گرفت. غلظت آب شور  $20 \text{ dS/m}$  و غلظت آب شیرین  $0.98 \text{ dS/m}$  بود. ابعاد مدل فیزیکی برابر با  $4 \times 1 \times 1$  متر بود. نتایج نشان داد شکل سطح ایستابی، عامل مهمی در نحوه توزیع و پراکنش شوری در هر دو ناحیه اشباع و غیراشباع می‌باشد. با کاهش سطح آب در مخزن آب شیرین به میزان ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر مرز بین ناحیه کم‌شور و شور در زیر سطح ایستابی به ترتیب ۵۵ و ۹۶ سانتی‌متر پیشروی و با افزایش سطح آب در مخزن آب شیرین به میزان ۵ سانتی‌متر، همان ناحیه ۲۸ سانتی‌متر پسروی داشته است.

**واژه‌های کلیدی:** آبخوان کم‌عمق، جبهه اختلاط، گرادیان هیدرولیکی، محیط متخلخل، مدل فیزیکی

### مقدمه

میلیون هکتار به غیر از شوری محدودیت دیگری ندارند (مؤمنی، ۱۳۸۹). پیشروی شوری از شورزارها و کویرها به سمت منابع آب شیرین و زمین‌های کشاورزی می‌تواند مشکلات جدی به همراه داشته باشد.

بارلو و ریچارد گزارش کردند که اگرچه پیشروی آب شور می‌تواند از راه‌های مختلف و تحت شرایط متفاوتی اتفاق بیافتد، لیکن خطر پیشروی آب شور می‌تواند به عواملی مانند مقدار عقب نشینی در مقایسه با مقدار تغذیه، تفاوت مقدار تغذیه و تخلیه، ساختار زمین شناسی آبخوان، توزیع خواص هیدرودینامیکی و ناپایداری یا عدم تعادل شرایط، نسبت داده شود. بررسی اثر هر یک از عوامل فوق بر پیشروی آب شور و ناحیه اختلاط در شرایط واقعی امری بسیار دشوار و غیرممکن است، به همین دلیل مدل‌های فیزیکی و عددی به عنوان یک راه حل که به راحتی این عوامل را به هم مربوط می‌سازند، مورد استفاده فراوان قرار گرفته‌اند (Barlow and Reichard, 2010).

مدل‌سازی به صورت عددی و فیزیکی ابزاری است که باعث می‌شود پدیده‌های بلند مدت در طبیعت، در زمان کوتاه و تحت شرایط

ایران از جمله کشورهای خشک دنیاست و سطح گسترده‌ای از اراضی آن در معرض شوری قرار دارد، به طوری که چهارمین کشور شور در آسیا است (آذری و همکاران، ۱۳۸۱). بر اساس اطلاعات مستخرج از نقشه یک میلیونیم منابع و استعداد خاک‌های ایران، اراضی دارای خاک‌های با درجات مختلف شوری مساحتی معادل  $55/6$  میلیون هکتار (۳۴ درصد مساحت کل کشور) را در بر می‌گیرند که اکثر آن‌ها در فلات مرکزی و دشت‌های ساحلی جنوب و دشت خوزستان قرار دارند (بنائی، ۱۳۸۰). از مجموع  $6/8$  میلیون هکتار از اراضی کشاورزی کشور که دارای درجات مختلف شوری هستند  $4/3$

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

۲- استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

۳- استادیار گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

(Email: aliaghat@ut.ac.ir

\*) نویسنده مسئول:

با غلظت بالا ضروری است (Johannsen et al., 2002). معقولی و همکاران (۱۳۹۵) پیشروی شوری از شورزار مرکزی دشت قزوین به سمت اطراف را با استفاده از مدل پیشروی شوری در آبخوان‌های ساحلی شبیه‌سازی نمودند. ایشان به این نتیجه رسیدند که با کاهش شوری آبخوان بالادست شورزار، پیشروی شوری افزایش می‌یابد. همچنین دریافتند با افزایش عمق زهکش احداث شده برای کنترل شوری، مرز مشترک آب شور و بسیار شور، عقب می‌نشیند (معقولی و همکاران، ۱۳۹۵).

سیرپایی و همکاران تداخل آب شور و آبخوان آزاد شیرین را در همجواری ساحل مدل کردند. ایشان با استفاده از مدل فیزیکی (۱۸۰×۱۲۰×۱/۵ سانتی‌متر) شرایط تزریق آب شیرین، برداشت از آب شور و حائل زیرزمینی را بررسی نمودند. نتایج آنان نشان داد رابطه گین-هرزبرگ به خوبی مقدار برداشت آب و نفوذ آب شور را شبیه‌سازی می‌کند (Sriapai et al., 2012).

نورآبادی و همکاران تاثیر غلظت آب شور و گرادیان هیدرولیکی را بر جبهه شوری با استفاده از مدل فیزیکی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد پسروری آب شور در زمان کمتری نسبت به پیشروی آب شور اتفاق می‌افتد (NoorAbadi et al., 2017). معماری و همکاران پیشروی آب شور در ساحل دریا با به کارگیری مدل فیزیکی و عددی MODFLOW به صورت جریان شعاعی مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از الگوی پیشروی و پسروری غیرممتقارن آب شور بود (Memari et al., 2020). تغذیه مصنوعی آب شیرین برای کاهش پیشروی آب‌شور در آبخوان آزاد با استفاده از مدل فیزیکی و عددی شبیه‌سازی شده و نتایج نشان داد که بهترین مکان تغذیه مصنوعی بالای پنجه پیشروی آب شور می‌باشد (Mahdizadeh et al., 2020).

در پژوهش‌های نام‌برده تداخل آب شور در شرایط اشباع و با شوری بسیار زیاد که منجر به تفاوت قابل توجه در چگالی آب شور و آب شیرین می‌شود، مورد بررسی قرار گرفته است. این پژوهش به منظور بررسی تداخل آب شور و شیرین با اختلاف شوری کمتر، در دو ناحیه اشباع و غیر اشباع در جوار سطح ایستابی کم‌عمق انجام شده است. همچنین اثر گرادیان‌های هیدرولیکی مختلف بر روی توزیع شوری مورد بررسی قرار گرفته است.

## مواد و روش‌ها

در این آزمایش، مدل فیزیکی از جنس آهن به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۴۰ 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

گوناگون مورد بررسی قرار گیرد. گوسوامی و کلمنت پیشروی آب شور را که با رنگ (ردیاب)، مشخص شده بود در محیط متخلخل برای سه حالت در مقیاس آزمایشگاهی بررسی کرده و مرز مشترک را در زمان‌های متفاوت، برداشت نمودند. 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 (Goswami and Clement, 2007).

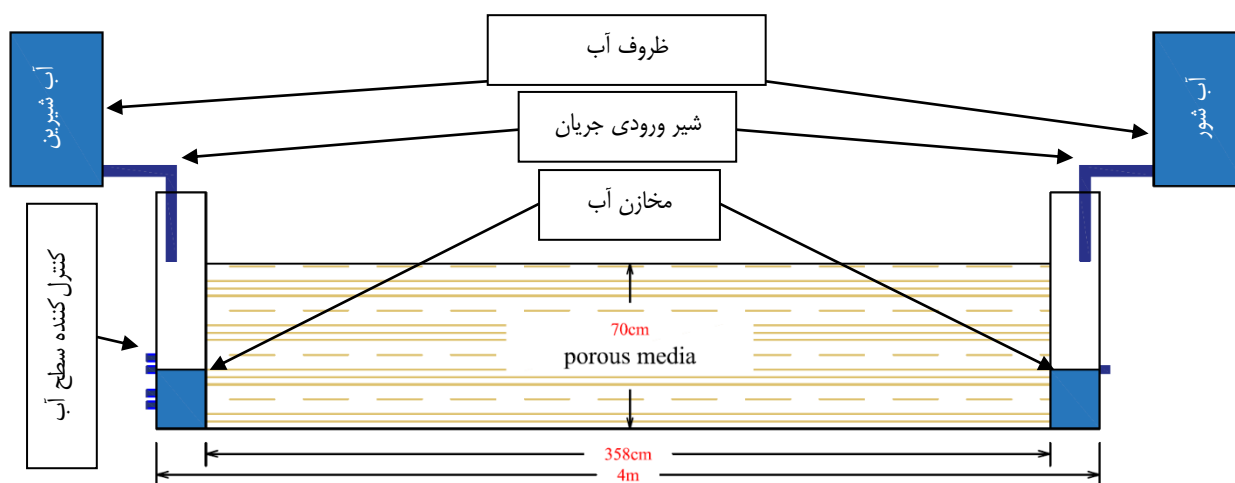
احمدی و همکاران (۱۳۹۶) نتایج حاصل از مشاهدات گوسوامی و کلمنت را به صورت عددی شبیه‌سازی نمودند. ایشان در این مطالعه سه حالت جریان پایدار، جریان گذرا تحت پیشروی آب شور و جریان گذرا تحت پسروری آب شور را به صورت عددی با استفاده از مدل CTRAN/W و SEAWAT شبیه‌سازی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد مدل‌های CTRAN/W و SEAWAT دقت بالایی در شبیه‌سازی موقعیت و حرکت جبهه آب شور دارا می‌باشند. (احمدی و همکاران، ۱۳۹۶)

ابراهیمی آذرخواران و همکاران (۱۳۹۲) تداخل آب شور و شیرین در اثر برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی را در تالاب میقان به صورت عددی بررسی کردند. ایشان با استفاده از بسته نرم‌افزاری GEOSTUDIO جبهه شوری را مدل نمودند. پس از در نظر گرفتن سناریوهای مختلف احداث بند زیرزمینی، به عنوان سناریوی برتر برای مدیریت و کنترل جبهه آب شور پیشنهاد گردید (ابراهیمی آذرخواران و همکاران، ۱۳۹۲). رانجان و همکاران اثر متقابل آب شور و آب شیرین را در حوضه رودخانه والو در سریلانکا به صورت عددی شبیه‌سازی نمودند. ایشان با استفاده از هدایت هیدرولیکی اصلاح شده، مدل را برای شرایط واقعی واسنجی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل‌سازی عددی به خوبی می‌تواند برای شبیه‌سازی نیمرخ شوری در این شرایط استفاده شود (Ranjan et al., 2007). افلاطونی و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از داده‌های سطح ایستابی و هدایت الکتریکی منطقه قزوین و زهکش حائل، تغییرات سطح ایستابی و شوری را با به کارگیری نرم‌افزار PMWIN5.3 شبیه‌سازی کرده و به ضرایب تبیین ۸۵٪ برای سطح ایستابی و ۹۳٪ برای شوری رسیدند (افلاطونی و همکاران، ۱۳۹۱). ستوده‌نیا و همکاران (۱۳۹۳) نقش مثبت زهکش حائل در دشت قزوین را تایید و میانگین کاهش شوری در آب زیرزمینی را برای سال اول پایش، حدود ۱۳/۶ درصد اعلام کردند (ستوده‌نیا و همکاران، ۱۳۹۳).

جوهانسن و همکاران یک مدل ریاضی برای شبیه‌سازی داده‌های آزمایشگاهی جریان با دانسیته متغیر، در مدلی به ابعاد ۲۰×۲۰×۲۰ سانتی‌متر ارائه نمودند. ایشان با استفاده از آنالیز حساسیت روی پارامترها و مدل‌سازی معکوس دریافتند، در ۱۰٪ از نمونه‌ها، مدل به ضریب انتشار عرضی، بیشترین حساسیت را دارد. همچنین دریافتند شبکه‌بندی مکانی بسیار زیاد (نزدیک به ۱۶ میلیون) برای نمونه‌های

منبع تامین سطح آب دو مخازن 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 و شوری ۲۰ دسی‌زیمنس بر متر پر شد. سطح آب مخازن در دو طرف مدل به وسیله سرریز ثابت نگه‌داشته 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 در طول آزمایش نمونه‌برداری و به طور مرتب اندازه‌گیری می‌شد تا مقدار آن طی زمان تغییر نکرده باشد.

نمونه‌برداری‌ها، تمام سطوح با رنگ مخصوص آهن رنگ شد. خاک مورد استفاده از مصالح رودخانه‌ای تهیه شده و ارتفاع آن در مدل ۷۰ سانتی‌متر می‌باشد. خاک داخل مدل به صورت لایه‌های ۲۰ سانتیمتری ریخته شد. پس از پر شدن مخزن، برای همگن شدن خاک و حصول دانسیته طبیعی، سه بار با فاصله یک هفته روی سطح خاک شرایط ماندابی ایجاد شد و پس از آن آزمایشات شروع گردید. 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 گردد (شکل-۱). در بالای مدل دو ظرف پلاستیکی استوانه‌ای غیر شفاف به عنوان



شکل ۱- شمای کلی مدل و مخازن آب شور و شیرین

برداری 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 می‌باشد. از آنجایی 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 نمی‌شود.

نمونه‌های خاک 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 کدام 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 خشک شده، شوری محلول اندازه‌گیری شد و با استفاده از رابطه (۱) و با دسترس بودن میزان رطوبت خاک، شوری محلول خاک محاسبه گردید.

خاک مورد استفاده 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-شنی تعیین شد. هدایت هیدرولیکی خاک با استفاده از روش بار افتان اندازه‌گیری و ۱ متر بر روز برآورد گردید.

در این تحقیق 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 انجام شد. در شرایط واقعی با برداشت و یا تغذیه آب زیرزمینی گرادیان هیدرولیکی و جبهه پیشروی شوری در دشت‌ها تغییر می‌نماید. از این رو تراز آب شور در زمان انجام طرح ثابت نگه داشته شد و تغییرات در سطح آب شیرین اعمال شد تا شرایط واقعی شبیه‌سازی شود.

در هر آزمایش در روزهای مختلف از خاک نمونه‌برداری انجام می‌گردید. نمونه‌ها با استفاده از اگر از بالا در سه عمق و ۶ فاصله (مجموعاً ۱۸ نقطه) برداشته و برای اندازه‌گیری رطوبت و شوری به آزمایشگاه منتقل می‌گردید. حفره ایجاد شده توسط اگر پس از نمونه

محاسبه شد. مقدار تبخیر با استفاده از داده‌های تبخیر از تشتک تبخیر ایستگاه هواشناسی دانشگاه تهران واقع در مزارع آموزشی دانشگاه در روزهای آزمایش محاسبه گردید. برای تبدیل تبخیر از تشت، به تبخیر از سطح خاک ضریب ۰/۵ در داده‌های تبخیر ضرب شد.

$$k \frac{d}{dx} \left( h \frac{dh}{dx} \right) = -e \quad (2)$$

که در آن  $k$  هدایت هیدرولیکی اشباع  $[LT^{-1}]$ ،  $h$  هد کل  $[L]$ ،  $x$  طول  $[L]$  و  $e$  تبخیر  $[LT^{-1}]$

$$kh^2 = -ex^2 + C_1x + C_2 \quad (3)$$

با جایگذاری شرایط مرزی در هر آزمایش (سطح آب در دو طرف مدل) معادله زیر (رابطه-۳) دارای جواب صریح می‌باشد:

$$h = \sqrt{h_1^2 - \frac{(h_1^2 - h_2^2)x}{L} - \frac{e}{k}(L-x)x} \quad (4)$$

در آزمایش اول سطح آب شور و شیرین در دو طرف مدل برابر بوده و در تمام مدت آزمایش در ۲۵ سانتی‌متری از کف، نگه داشته شده است. پس از گذشت زمان شش روز از شروع آزمایش، تغییرات سطح ایستابی بسیار ناچیز بود. در واقع بعد از این زمان، محیط اشباع کاملاً به تعادل رسیده و از نظر هیدرولیکی شرایط ماندگار بود. پروفیل سطح ایستابی (خط آبی در شکل ۲) به علت وجود تبخیر از سطح خاک به صورت مقعر درآمد و کمترین ارتفاع آن (حدود ۲۱/۵ سانتی‌متر از کف) در وسط مدل فیزیکی واقع شده است. که با علامت ضربدر در شکل ۲ مشخص شده است.

$$W_1, C_1 = W_2, C_2 \quad (1)$$

که در آن  $w_1$  مقدار آب اولیه نمونه خاک  $[M]$ ،  $C_1$  شوری اولیه خاک  $[dS/m]$ ،  $w_2$  مقدار آب در زمان اندازه‌گیری شوری  $[M]$  و  $C_2$  مقدار شوری ثانویه  $[dS/m]$  که اندازه‌گیری شده است. رابطه (۱)، بیان جرمی در نمونه می‌باشد، که ارتباط بین مقدار آب و شوری اولیه و ثانویه (پس از اضافه کردن آب) را نشان می‌دهد. در رابطه فوق مقدار  $C_1$  مجهول می‌باشد. پس از اندازه‌گیری شوری نمونه‌ها برای بررسی بهتر و حذف اثر رطوبت، شوری‌ها به شوری عصاره اشباع تبدیل شدند و با استفاده از نرم‌افزار Arcmap به روش کریجینگ، درون‌یابی انجام شده و نقشه رستری پراکنش شوری در مدل بدست آمد. کریجینگ یک روش تخمین و درون‌یابی است که بر منطق " میانگین متحرک وزن‌دار " استوار است. هموارسازی یا نرم شدن تغییرات هنگام درون‌یابی، از ویژگی‌های این روش است (قهرودی تالی، ۱۳۸۱).

## نتایج و بحث

به منظور ارزیابی تداخل آب شور و شیرین در گرادیان‌های مختلف و تاثیر آن بر روی ناحیه غیر اشباع خاک این پژوهش صورت گرفت. نتایج این آزمایش نحوه تغییرات و توزیع شوری را در سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار داده است. مشخصات آزمایش‌های انجام شده در جدول ۱ قابل مشاهده است. بدون داشتن اطلاعات جهت جریان آب درون مدل، تحلیل نتایج پراکنش شوری ممکن نیست، لذا با استفاده از حل تحلیلی معادله یک بعدی بوسینسک (رابطه ۲) پروفیل سطح ایستابی در آزمایش‌ها

جدول ۱- مشخصات هر یک از تیمارهای آزمایشی

شماره آزمایش	سطح آب شور (سانتی‌متر)	سطح آب شیرین (سانتی‌متر)	مدت زمان آزمایش (ساعت)	میانگین تبخیر از تشتک تبخیر (میلی‌متر بر روز)
۱	۲۵	۲۵	۱۴۴	۱۰/۱
۲	۲۵	۱۵	۱۴۴	۹/۱
۳	۲۵	۳۰	۱۴۱	۷/۱
۴	۲۵	۱۰	۱۳۷	۵/۷

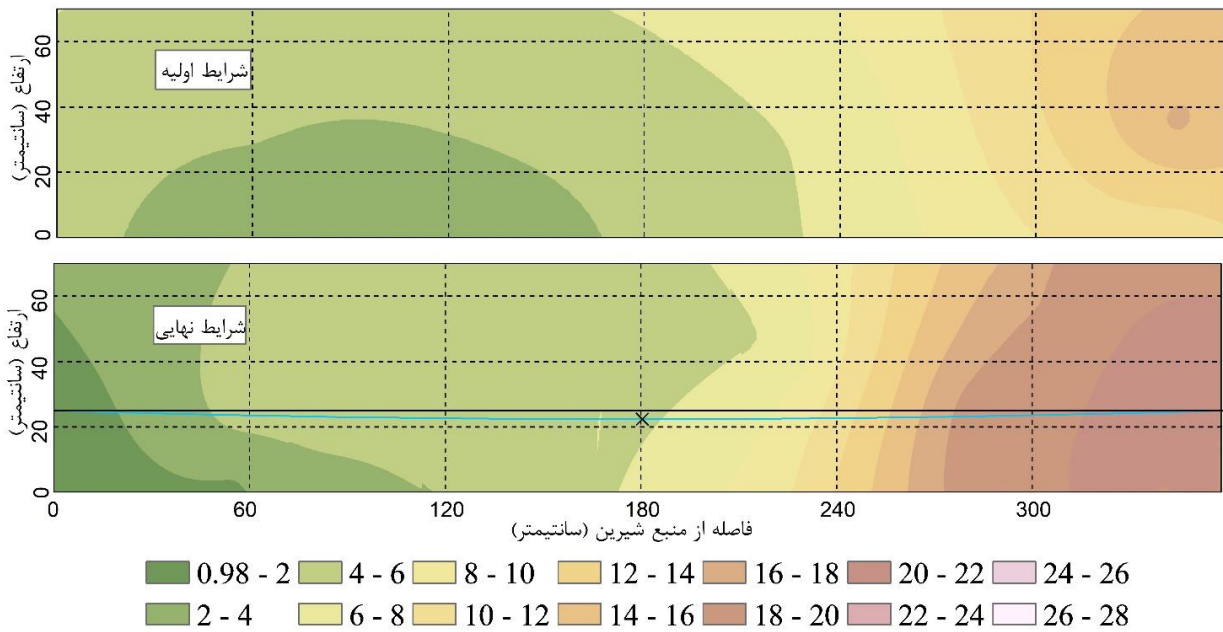
مدل فیزیکی می‌باشد.

محل قرار گیری نقطه حداقل سطح ایستابی (نقطه تعقر)، معرف این است که از طرفین تا آن نقطه جریان برقرار می‌شود. با توجه به این نکته و مقایسه حالت اولیه و نهایی، مشهود است که شوری از سمت راست تا وسط مدل حرکت نموده و باعث افزایش شوری در آن نقاط شده است. از طرفی به علت تبخیر از سطح خاک، آب و نمک به طرف بالا حرکت نموده و با تبخیر شدن آب، نمک در خاک باقی

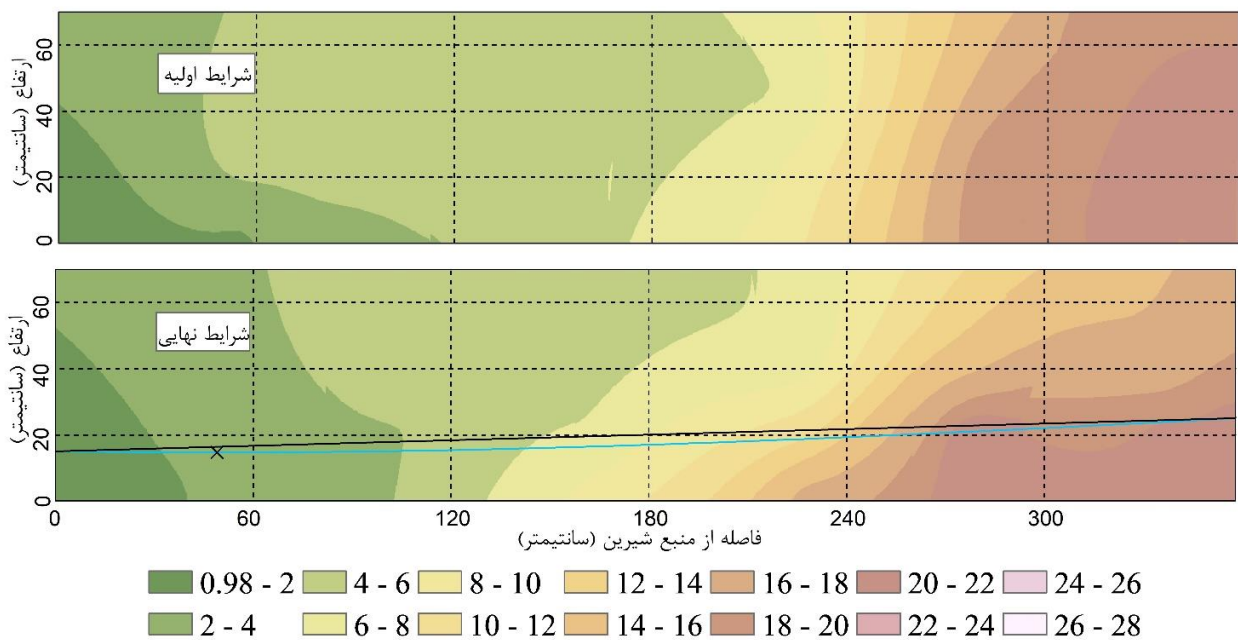
با شروع آزمایش و برقراری جریان به طور هم‌زمان از طرفین، در سمت چپ آبشویی اتفاق افتاده است و در سمت مخزن آب شور به علت بیشتر بودن شوری آب از شوری اولیه، شوری افزایش پیدا کرده است. در شکل ۲، توزیع مکانی شوری در صفحه قائم (در راستای جریان و راستای عمود بر جریان) و نحوه تغییرات آن در پایان آزمایش به صورت منحنی‌های هم شوری نشان داده شده است. در این شکل محور افقی فاصله از مخزن آب شیرین و محور عمودی فاصله از کف

در آزمایش دوم (سطح آب شور ۲۵ و سطح آب شیرین ۱۵ سانتیمتر از کف) گرادیان هیدرولیکی به طرف مخزن آب شیرین وجود دارد که باعث می شود انتقال املاح به صورت توده ای بیشتر از پخشیدگی اتفاق بیافتد (شکل ۳). اختلاف سطح آب در دو طرف ۱۰ سانتی متر بوده که باعث می شود گرادبان هیدرولیکی جریان ۰/۰۲۸ متر بر متر باشد.

می ماند و باعث افزایش شوری در ناحیه غیر اشباع خاک می شود. افزایش شوری به علت تجمع نمک، در نزدیکی مخزن شور، بیشتر از نواحی دیگر است. در نواحی نزدیک به مخازن آب، گرادبان هیدرولیکی زیاد می باشد و باعث می شود که حرکت املاح سریع تر اتفاق بیافتد و هر چه به سمت وسط مدل حرکت می کند از گرادبان هیدرولیکی کاسته شده و از سهم حرکت توده ای کاسته می شود.



شکل ۲- پراکنش شوری (دسی زیمنس بر متر) در شرایط اولیه و نهایی آزمایش ۱

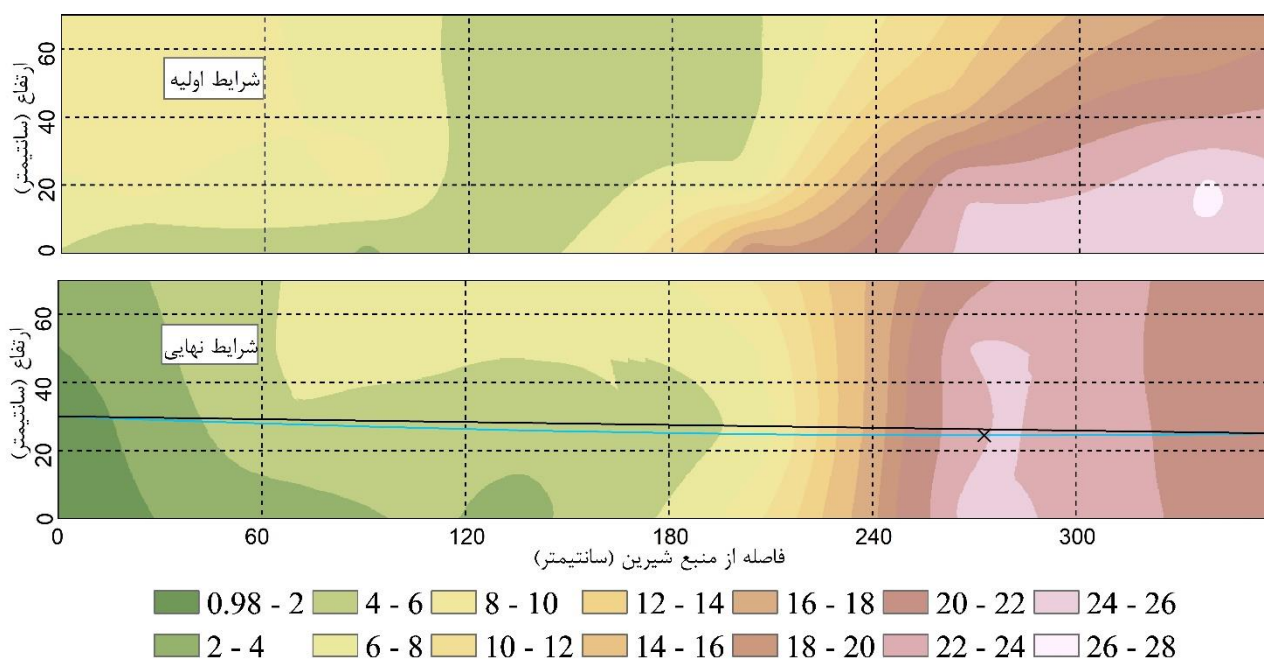


شکل ۳- پراکنش شوری (دسی زیمنس بر متر) در شرایط اولیه و نهایی آزمایش ۲

آب شیرین، گرادیان هیدرولیکی افزایش می‌یابد و در نزدیکی منبع شیرین ۰/۱۴- می‌شود. تفاوت علامت گرادیان‌ها در دو طرف، بیان‌گر تفاوت در جهت جریان است.

با قرار دادن شرایط مرزی حالت سوم (سطح آب شور ۲۵ سانتی‌متر و سطح آب شیرین ۳۰ سانتی‌متر) در حل تحلیلی معادله سطح آب (رابطه-۳)، پروفیل سطح آب مانند حالات قبل، مقرر بوده و دارای نقطه مینیمم می‌باشد (شکل-۴). نقطه کمینه سطح آب در نزدیکی مخزن شور در فاصله ۲۸۰ سانتی‌متری از مخزن شیرین و ارتفاع ۲۴/۶۲ سانتی‌متری از کف مدل می‌باشد. با توجه به مکان هندسی پروفیل سطح آب مشخص است که جریان از دو طرف وارد خاک می‌شود. شوری اولیه در نواحی نزدیک به مخزن آب شور بیشتر از شوری آب داخل مخزن می‌باشد و باعث می‌شود که با وارد شدن آب شور، آبشویی اتفاق می‌افتد و املاح موجود با حرکت آب جابه‌جا شوند. ولی همان‌طور که در شکل ۴ مشخص است جا به‌جایی شوری تا محل قرارگیری مینیمم سطح ایستابی اتفاق افتاده است.

در این حالت سطح ایستابی مانند حالت یک تعقر داشته و مقدار کمینه سطح آب در فاصله ۴۹ سانتی‌متری از مخزن آب شیرین است. در واقع اختلاف ارتفاع سطح آب در دو مخزن باعث متمایل شدن نقطه کمینه به سمت مخزن با سطح آب کمتر شده است. این مسئله باعث پیشروی جبهه شوری به سمت مخزن آب شیرین شده است. پیشروی شوری در لایه کف (لایه اشباع) بسیار مشهودتر از پیشروی شوری در لایه غیر اشباع خاک می‌باشد (شکل ۳). اختلاف بین نقطه مینیمم و تراز آب شیرین بسیار کم بوده و در حدود ۳/۶ میلی‌متر می‌باشد و همان‌طور که در شکل ۳ قابل مشاهده است فقط در کف مدل باعث به عقب رانده شدن املاح شده است. در نزدیکی مخزن آب شور، شیب سطح آب و به علت تبخیر از سطح خاک با حرکت به سمت مخزن شیرین، از مقدار گرادیان هیدرولیکی کاسته می‌شود. این کاهش تا نقطه حداقل سطح ایستابی ادامه دارد تا به صفر می‌رسد، سپس با گذر از نقطه مینیمم سطح ایستابی و نزدیک شدن به منبع



شکل ۴- پراکنش شوری (دسی‌زیمنس بر متر) در شرایط اولیه و نهایی آزمایش ۳

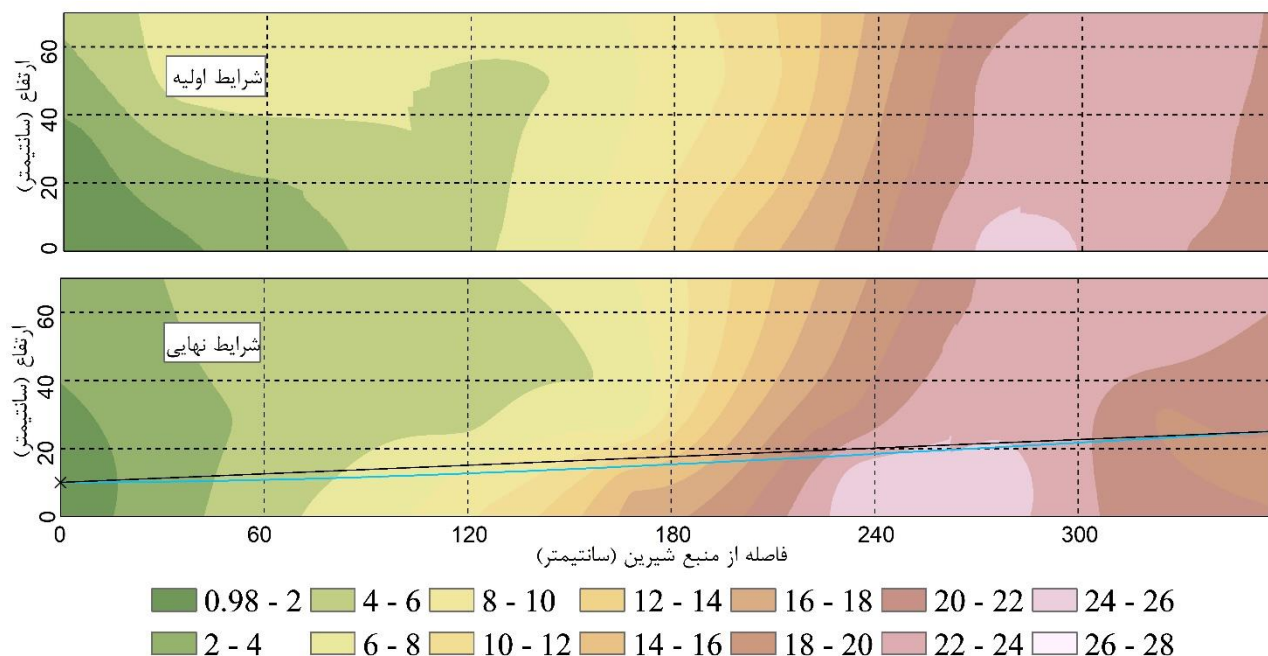
شوری بین ۶-۱۸ دسی‌زیمنس بر متر را شامل می‌شود، ابتدا حالت مایل دارند و در حالت نهایی به علت حرکت مؤثر آب شور از طرف راست و آب کم شور از طرف چپ حالت عمودی به خود گرفته‌اند (شکل ۴).

اختلاف بین سطح آب در دو طرف مدل (۱۵ سانتی‌متر) در آزمایش ۴ (سطح آب شور ۲۵ سانتی‌متر و سطح آب شیرین ۱۰

در بالای سطح ایستابی در نواحی نزدیک به منبع شور با حرکت آب شور به سمت سطح خاک و در ادامه با تبخیر از سطح خاک، شوری افزایش داشته است. از طرفی در سمت منبع آب شیرین به علت هد بیشتر، پیشروی آب و به تبع آن آبشویی بیشتری اتفاق افتاده و تا فاصله ۲۸۰ سانتی‌متری که محل قرارگیری مینیمم سطح ایستابی است اثرگذار بوده است. خطوط سبز کم‌رنگ تا قهوه‌ای که

(شرایط اولیه). با ورود آب شور از سمت راست، مقداری آبشویی اتفاق افتاده است و باعث پیشروی شوری به طرف مرکز مدل شده است. خطوط هم‌شوری دارای رنگ قهوه‌ای تا زرد که مرز بین ناحیه شور و شیرین (یا کم شور) می‌باشند، به صورت مایل قرار گرفته‌اند.

سانتی‌متر) باعث شده که حداقل سطح ایستابی بر سطح آب در مخزن آب شیرین منطبق باشد (شکل ۵). شکل ۵ نشان می‌دهد که شوری خاک در ناحیه اشباع و غیر اشباع در نزدیکی مخزن به دلیل تبخیر از سطح خاک تا میزان ۲۴-۲۶ دسی‌زیمنس بر متر افزایش داشته است



شکل ۵- پراکنش شوری (دسی‌زیمنس بر متر) در شرایط اولیه و نهایی آزمایش ۴

بیشتر ناحیه اشباع در نزدیکی سواحل مدنظر بوده است. در این مطالعه اثر محل قرار گیری سطح ایستابی در سناریوهای مختلف بر توزیع نمک در ناحیه اشباع و غیراشباع بررسی شد. در حالتی که گرادیان هیدرولیکی از منبع شیرین به سمت منبع شور برقرار باشد (شکل ۴)، بیشترین آبشویی در نواحی نزدیک به منبع شیرین اتفاق می‌افتد. نتایج این پژوهش نشان داد در حالتی که سطح آب در مخازن آب شیرین و شور یکسان باشد (شکل ۲)، به علت تبخیر از سطح خاک، سطح ایستابی به صورت مقعر شده و دارای نقطه مینیمم سطح ایستابی می‌باشد که باعث می‌شود جریان از دو طرف وارد مدل شده و شوری خاک در ناحیه اشباع و غیراشباع افزایش یابد. در شرایطی که سطح آب شور بالاتر باشد، ناحیه اختلاط به صورت یک خط مورب بوده (شکل ۲ و ۴) به طوری که در مرکز مدل فیزیکی با افزایش عمق خاک، میزان شوری افزایش پیدا می‌کند. در حقیقت در این شرایط عمیق‌تر کردن چاه آب به منظور برداشت بیشتر، باعث کاهش شدید کیفیت آب خروجی خواهد شد. همچنین پیشنهاد می‌گردد برای بررسی تداخل آب شور و شیرین بر روی کشاورزی و تولید محصول، شوری سطحی خاک لحاظ شود، زیرا شوری سطحی خاک بر جوانه‌زنی گیاه بیشترین تاثیر را دارد.

در نتایج پژوهش سیرپایی و همکاران (2012) با افزایش تفاوت تراز آب شور و شیرین مرز بین آب شور و شیرین نسبت به محور قائم مایل شده است. در آزمایش دوم (سطح آب شور ۲۵ سانتی‌متر و سطح آب شیرین ۱۵ سانتی‌متر) خطوط هم‌شوری قهوه‌ای تا زرد رنگ حالت مایل داشته ولی به علت تفاوت در گرادیان هیدرولیکی و بیشتر بودن حرکت توده‌ای در آزمایش چهار نسبت به دو، خطوط هم‌شوری در زیر سطح ایستابی بیشتر به جلو مایل شده‌اند که با نتایج مهدی‌زاده و همکاران (2020) مطابقت دارد. در واقع در زیر سطح ایستابی حرکت آب اشباع بوده و مقدار جریان و سرعت آن بیشتر از بالای سطح ایستابی می‌باشد. به همین علت خطوط هم‌شوری با گذر از سطح ایستابی تغییر زاویه می‌دهند و در جهت جریان مایل می‌شوند. با مقایسه آزمایش‌های دو و چهار با آزمایش سه که به ترتیب مربوط به پیشروی و پسروی شوری می‌باشند، مشخص می‌شود که الگوی پیشروی و پسروی شوری یکسان نیست و با نتایج معماری و همکاران (۲۰۲۰) مطابقت دارد.

### نتیجه‌گیری

در پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه اختلاط آب شور و شیرین،

## منابع

دانشگاه تهران.

احمدی، ح.، همتی، م.، و مطلبیان، م. ۱۳۹۷. پیش‌بینی گوهی آب شور تحت شرایط پیشروی و پسروی با استفاده از مدل‌های CRATN/W و SEAWAT. نشریه آب و خاک. ۳۲(۱): ۲۷-۱۳.

Johannsen, K., Kinzelbach, W., Oswald, S., and Wittum, G. 2002. The salt pool benchmark problem—numerical simulation of saltwater upcoming in a porous medium. *Journal Advances in Water Resources* 25(3): 335-348.

Goswami, R.R. and Clement, T.P. 2007. Laboratory-scale investigation of saltwater intrusion dynamics. *Journal Water Resources Research* 43(4): W04418.

Ranjan, P., Kazama, S. and Sawamoto, M. 2007. Numerical modelling of saltwater-freshwater interaction in the Walawe River basin, Sri Lanka. IAHS-AISH publication: 306-314.

Barlow, P.M. and Reichard, E.G. 2010. Saltwater intrusion in coastal regions of North America. *Hydrogeology Journal* 18(1): 247-260.

Sriapai, T., Walsri, C., Phueakphum, D. and Fuenkajorn, K. 2012. Physical model simulations of seawater intrusion in unconfined aquifer. *Journal of science and technology* 34(6): 679-687.

Noorabadi, S., Sadraddini, A.A., Nazemi, A.H., and Delirhasannia, R. 2017. Laboratory and numerical investigation of saltwater intrusion into aquifers. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 8(12): 4273-4283.

Mehdizadeh, S.S., Ketabchi, H., Ghoroghi, M., and Hasanzadeh, A.K. 2020. Experimental and numerical assessment of saltwater recession in coastal aquifers by constructing check dams. *Journal of Contaminant Hydrology*, 103637.

Memari, S.S., Bedekar, V.S., and Clement, T.P. 2020. Laboratory and Numerical Investigation of Saltwater Intrusion Processes in a Circular Island Aquifer. *Water Resources Research*, 56(2), e2019WR025325.

بنائی، م.ح. ۱۳۸۰. نقشه منابع و استعداد خاک‌های ایران. مؤسسه تحقیقات خاک و آب، تهران، ایران، ۶ برگ.

آذری، ا.، لیاقت، ز. و دربندی، ص. ۱۳۸۱. زهکشی؛ کمیت و کیفیت جریان برگشتی، گروه کار زهکشی، انتشار کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، چاپ اول.

قهروودی تالی، م. ۱۳۸۱. ارزیابی دورن‌یابی به روش کریجینگ. مرکز جی‌آی‌اس جهاد دانشگاهی واحد دانشگاه تربیت معلم تهران. پژوهش‌های جغرافیایی. شماره ۴۳: ۹۵-۱۰۸.

مؤمنی، ع. ۱۳۸۹. پراکنش جغرافیایی و سطوح شوری منابع خاک ایران. مجله پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب). ۲۴(۳): ۲۱۵-۲۰۳.

افلاطونی، م.، فولادمند، ح. و اسکندری، ل. ۱۳۹۱. ارزیابی عملکرد سیستم زهکش حائل دشت قزوین با استفاده از مدل مناسب زهکشی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران.

ابراهیمی آذرخواران، ف.، عبدالشاه نژاد، م.، ملکیان، آ.، و پورآصف، ف. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی و مدیریت تداخل آب شور و شیرین در اثر برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی تالاب میقان). پنجمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران. بهمن ماه، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

ستوده نیا، ع.، جعفری، م.، و دانش‌کار آراسته، پ. ۱۳۹۳. نقش زهکش حائل شورزار مرکزی قزوین در کنترل شوری، تحقیقات آب و خاک ایران، شماره ۴: ۴۵۲-۴۴۷.

معقولی، گ.، لیاقت، ع. ا.، خلقی، م. و اکرم، م. ۱۳۹۵. بررسی تداخل آب شور و غیر شور در حاشیه مرداب‌ها (مطالعه موردی شورزار مرکزی قزوین)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی،



## Experimental Study of Shallow Saline Water and Freshwater Interference on Distribution of Salinity in the Saturated and Unsaturated Zone Using Physical Model

H. Rabbaniha<sup>1</sup>, A.M. Liaghat<sup>2\*</sup>, M. Soltani<sup>3</sup>  
Received: Jun.25, 2020 Accepted: Aug.12, 2020

### Abstract

The phenomenon of mixing saline and fresh water in aquifers near the sea coasts and the margin of salt marshland, limits the application of high-quality groundwater resources. On the other hand, by increasing concentration of saline water in aquifer due to evaporation from the soil surface and also decreasing pressure head in freshwater aquifers as a result of groundwater over exploitation, lead the mixing front advances toward the freshwater aquifer. In this study, by making a physical model, mixing area and salt distribution in both saturated and non-saturated zone of porous media has been studied. Four different hydraulic scenarios have been performed, including equal water table of fresh and saline water, higher freshwater level and two higher saline levels (10 and 15 centimeters). The concentration of saline water and freshwater were 20 and 0.98 dS/m, respectively. The physical model size was 4×1×1 meter. The results showed that the water table shape is an important factor for distribution and scattering of salinity in both saturated and non-saturated areas. By decreasing the water level in the freshwater reservoir by 10 and 15 centimeters, the boundary between the fresh and saline zone below the water table progressed 55 and 96 cm respectively, and by increasing the water level in the freshwater reservoir by 5 cm, the same zone has had a recession to 28 cm.

**Keywords:** Hydraulic gradient, Mixing front, Physical model, Porous media, Shallow aquifer

---

1- M.Sc. Student in Department of Irrigation & Reclamation Engineering, Campus of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran

2- Professor in Department of Irrigation & Reclamation Engineering, Campus of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran

3- Assistant Professor Water Sciences and Engineering Department Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

(\*- Corresponding Author Email: aliaghat@ut.ac.ir)