

## بررسی و مقایسه روش‌های جلوگیری از پیشروی آب شور در نواحی با سطح ایستابی کم عمق

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

۱ و ۲- کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی؛ و استاد گروه آبیاری و آبادانی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران  
۳- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران  
تاریخ دریافت: ۹۹/۱۰/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۲/۱۹

نوع مقاله: علمی پژوهشی

### چکیده

یکی از عوامل تهدیدکننده برای منابع آب شیرین، پیشروی آب شور و نفوذ آن به سفره آب زیرزمینی است. برای کنترل این پدیده، در این پژوهش سه راهکار زهکش حائل زیرزمینی، زهکش حائل روباز و پرده آب‌بند با استفاده از مدل واسنجی شده HYDRUS\_2D بررسی و ارزیابی شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد محل قرارگیری زهکش روباز و زیرزمینی اثر قابل توجهی روی خروج آب و املاح از مرز هر دو آبخوان شور و شیرین دارد. مشخص شد با تغییر محل زهکش از نزدیکی مخزن آب شور به مخزن آب شیرین، مقدار آب زهکشی شده با زهکش روباز و زیرزمینی به ترتیب ۶/۵ و ۵/۸ متر مکعب بر متر کاهش می‌یابد و در حالتی که زهکش روباز در فاصله ۹۰ سانتی‌متری از مخزن آب شیرین و عمق ۵ سانتی‌متری از کف قرار داشته باشد، مقدار تبخیر از سطح خاک در کل مدت شبیه‌سازی بیشتر از مقدار تبخیر در حالت بدون زهکش است که باعث افزایش شوری در محیط بین دو آبخوان می‌شود. مشاهده شد نصب پرده آب‌بند تا عمق‌های ۵۵، ۶۵ و ۷۰ سانتی‌متر به ترتیب باعث کاهش ۶، ۱۵ و ۸۸ درصد ورود جریان آب شور می‌شود. به‌کارگیری روش‌ها استفاده شده در این پژوهش به منظور جلوگیری از پیشروی شوری، جوانب مختلف محیط زیستی در بر دارد و باید با توجه به شرایط هر منطقه و اهمیت آن یکی از راهکارهای موجود انتخاب شود.

### واژه‌های کلیدی

آب زیرزمینی، پرده آب‌بند، جبهه شوری، گرادیان هیدرولیکی

### مقدمه

شامل می‌شود. این پدیده به روش‌های مختلفی مانند بررسی طول پیشروی، روش‌های کاهش پیشروی به صورت مدل‌های فیزیکی، ریاضی و با استفاده از داده‌های واقعی یا ترکیبی از آنها بررسی شده است (Toller & Strack, 2019; He *et al.*, 2018; Chang & Clement, 2012, Rathore *et al.*, 2018; Rice *et al.*, 2012)

اختلاط آب شور و شیرین، امروزه در بسیاری از مناطق جهان سبب نگرانی شده است (Adegoke *et al.*, 2013; Custodio, 2010; Werner, 2010) این نگرانی فقط خاص مناطق ساحلی و نزدیک به دریاها و شور نیست بلکه زمین‌های مجاور دریاچه‌های شور، آبخوان‌های شور و شورزارها را هم

(*al.*, 2017) با ساخت مدل فیزیکی تأثیر تغییرات غلظت آب شور و تراز آب شیرین را روی جبهه پیشروی و پسروی بررسی و نتایج حاصل از مدل فیزیکی را با استفاده از مدل SEAWAT به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. نتایج پژوهش‌های این محققان نشان داد با افزایش ۰/۵ سانتی‌متر سطح آب شیرین، جبهه آب شور ۳۰ سانتی‌متر پسروی داشته است. در پژوهشی، اثر تغذیه آب شیرین به صورت سطحی بر پسروی آب شور با استفاده از مدل فیزیکی و به کارگیری مدل عددی SEAWAT بررسی و نشان داده شد با کاهش سطح آب شور و تغذیه آب شیرین، آب شیرین به جای اینکه به سمت آب شور حرکت کند و بر آن اثر بگذارد، تمایل به حرکت افقی به سمت محل تخلیه مدل فیزیکی دارد (Mehdizadeh *et al.*, 2020).

زهکش روباز در شورزار مرکزی دشت قزوین برای جلوگیری از پیشروی شوری از مرکز شورزار به سمت اراضی کشاورزی احداث گردید. در پژوهشی با استفاده از نرم‌افزار GeoStudio اثر زهکش روباز احداث شده بررسی و نقش مؤثر آن در کنترل شوری ۱۳/۶ درصد اعلام شد (Sotoudehnia *et al.*, 2014). عبدالعطی و همکاران (Abd-Elaty *et al.*, 2019) تأثیر پرده آب‌بند در جلوگیری از پیشروی شوری در آبخوان بیسکین در فلوریدا را با استفاده از مدل SEAWAT بررسی کردند و در نتایج بررسی‌ها به نقش مؤثر آن در جلوگیری از پیشروی آب شور دریا به سمت ساحل و منابع آب شیرین رسیدند.

مدل عددی HYDRUS-2D توانایی شبیه‌سازی جریان توامان آب و املاح در محیط اشباع و غیراشباع را دارد (Šimůnek *et al.*, 2012). از این رو در پژوهش‌های بسیار و با هدف‌های مختلف استفاده شده است و نتایج به‌دست آمده از آنها به دقت قابل

گوسوامی و کلمنت (Goswami & Clement, 2007) پیشروی آب شور را که با رنگ (ردیاب)، مشخص شده بود در محیط متخلخل برای سه حالت در مقیاس آزمایشگاهی بررسی و مرز مشترک را در زمان‌های متفاوت برداشت کردند. این محققان از مشاهدات تجربی خود نتیجه گرفتند که ناحیه انتقالی بین آب شور و غیر شور، در هر دو حالت شرایط ماندگار و ناماندگار، به صورت مشخص و تیز است.

در پژوهشی، تداخل آب شور و شیرین در استان شاندرنگ چین با به کارگیری مدل SEAWAT بررسی و نشان داده شد که سطح آب شیرین، در انتهای دوره شبیه‌سازی به علت برداشت آب برای مصارف کشاورزی در نواحی کم عمق ۲ متر کاهش یافته است. همچنین، سطح آب زیرزمینی در مناطق آب‌شور با استخراج بیش از حد آب‌نمک در پایان دوره حدوداً ۱/۸۸ متر افت کرده است (Chang *et al.*, 2018).

با به کارگیری روش‌های مختلف در قالب پژوهش‌های متفاوت، از پیشروی شوری جلوگیری شده است. مطلبیان و همکاران (Motallebian *et al.*, 2019) اثر کانال تغذیه سطحی در کنترل نفوذ آب شور به آبخوان شیرین را بررسی و اثر بخشی کانال روباز را با استفاده از مدل SEAWAT ارزیابی کردند. نتایج پژوهش این محققان نشان داد که کانال تغذیه سطحی باعث کاهش پهنه نفوذ آب شور می‌شود. کاهش هدایت هیدرولیکی با استفاده از رسوبات مصنوعی برای ایجاد دیوار حائل زیرزمینی در لایه‌های بالای آبخوان آزمایش شده است و نتیجه بررسی‌ها نشان داد کاهش هدایت هیدرولیکی لایه بالا باعث کاهش پیشروی آب شور می‌شود (Strack *et al.*, 2016). نورآبادی و همکاران (Noorabadi *et al.*, 2016)

قبول نرم‌افزار در شبیه‌سازی اذعان داشته‌اند (Soltani *et al.*, 2018, Wang *et al.*, 2017, Selim *et al.*, 2018, de Oliveira *et al.*, 2020) پژوهش‌ها در مورد تداخل آب شور و آب شیرین غالباً در ناحیه اشباع و ساحل دریاها بوده است و به ناحیه غیر اشباع با سطح ایستابی کم عمق شور کمتر توجه شده است. اختلاط آب شور و آب شیرین در آبخوان‌های کم عمق و شور در پژوهش ربانی‌ها و همکاران (Rabbania *et al.*, 2020a) با استفاده از مدل فیزیکی با چهار گرادیان هیدرولیکی بررسی شده است. در پژوهشی دیگر، توانایی بالای مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی جبهه پیشروی شوری گزارش شده است (Rabbania *et al.*, 2020b).

هدف از این پژوهش، شبیه‌سازی و بررسی راهکارهای جلوگیری از پیشروی شوری در سناریوهای بلند مدت (شش ماه) است. راهکارهای مورد بررسی در این پژوهش شامل: ۱- زهکش زیرزمینی، ۲- زهکش روباز و ۳- پرده آب‌بند هستند. محل قرارگیری زهکش زیرزمینی و روباز هر یک در شش و پرده آب‌بند در سه مکان مختلف با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-2D شبیه‌سازی و تاثیر محل قرارگیری آنها بر توزیع شوری و جلوگیری از پیشروی آب شور بررسی شد.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ K \left( K_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_i} K_{iz}^A \right) \right] - S \quad (1)$$

که در آن،  $\theta$  = مقدار رطوبت حجمی (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)؛  $h$  = ارتفاع معادل فشار (سانتی‌متر)؛  $S$  = تخلیه یا تغذیه (بر سانتی‌متر)؛  $X_i$  ( $i=1,2,\dots$ ) = مختصات مکانی (سانتی‌متر)؛  $t$  = زمان (ساعت)؛  $K_{ij}^A$  = مؤلفه‌های بی‌بعد تانسور غیرهمگنی خاک و  $K^A$  = هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک (سانتی‌متر بر ساعت)؛ و  $S$  = حجم آب تخلیه-تغذیه شده در واحد زمان از یک واحد حجم خاک.

منحنی مشخصه رطوبتی خاک ارائه شده توسط ون‌گنوختن (Van Genuchten, 1980) (رابطه ۲) و هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک نیز از مدل کاپیلاری معلم (Mualem, 1976) مطابق رابطه (۳) استفاده شده است:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

## مواد و روش‌ها

در این پژوهش، پیشروی آب شور با غلظت ۲۰ دسی‌زیمنس بر متر و تراز ۲۵ سانتی‌متر به طرف آب شیرین با غلظت ۱ دسی‌زیمنس بر متر و تراز ۱۰ سانتی‌متر در مقطع ۳۶۰×۷۰ سانتی‌متر مد نظر است (Rabbania *et al.*, 2020a). با استفاده از مدل واسنجی و صحت‌سنجی شده (Rabbania *et al.*, 2020b).

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial(q_i C)}{\partial x_i} \quad (5)$$

که در آن،

C = غلظت املاح محلول در آب خاک (میلی‌گرم بر سانتی‌متر مکعب)؛  $D_{ij}$  = تانسور ضریب انتشار (سانتی‌متر مربع بر ساعت)؛  $q_i$  = شدت جریان (سانتی‌متر بر ساعت) و دیگر پارامترها پیشتر توضیح داده شده‌اند.

مقادیر ضریب‌های منحنی مشخصه رطوبتی و ضریب‌های انتقال املاح با استفاده از داده‌های رطوبت و شوری برداشت شده از مدل فیزیکی و به کارگیری ابزار حل معکوس در مدل HYDRUS-2D به دست آمده و در جدول ۱ قابل مشاهده‌اند (Rabbaniha et al., 2020b). سناریوی مورد بررسی به منظور بررسی اثر زهکش زیرزمینی در کنترل و جلوگیری از پیشروی شوری، زهکش زیرزمینی به صورت لوله‌ای به قطر ۱۰ سانتی‌متر و در ۶ مکان مختلف جانمایی شد (جدول ۲).

$$K(h) = K_s S_e^l \left[ 1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (3)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad m = 1 - \frac{1}{n}, \quad n > 1 \quad (4)$$

که در آن،

$S_e$  = اشباع نسبی؛  $\theta_s$  = رطوبت اشباع (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)؛  $\theta_r$  = رطوبت باقی‌مانده (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)؛  $K_s$  = هدایت هیدرولیکی اشباع (سانتی‌متر بر ساعت)؛ و  $\alpha$ ،  $n$ ،  $m$  و  $l$  = پارامترهای تجربی ورودی مدل که در بین آن‌ها  $n$ ،  $m$  و  $l$  بی‌بعد و  $\alpha$  دارای بعد (بر سانتی‌متر) است. پارامتر  $l$  معمولاً به طور میانگین برابر ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود. جابه‌جایی املاح در محیط خاک با استفاده از معادله انتقال-انتشار تخمین زده می‌شود. معادله انتقال-انتشار از ترکیب مکانیزم‌های پخشیدگی، انتقال توده‌ای و انتشارپذیری به دست می‌آید (رابطه ۵).

جدول ۱- ضریب‌های ثابت حرکت آب و املاح (Rabbaniha et al., 2020b)

Table1. Water flow and solute transport parameters

پخشیدگی مولکولی (سانتی‌متر مربع بر روز)	انتشارپذیری عرضی (سانتی‌متر)	انتشارپذیری طولی (سانتی‌متر)	هدایت هیدرولیکی اشباع (سانتی‌متر بر روز)	$\alpha$ (1/cm)	$n$ (-)	رطوبت باقی‌مانده (درصد) Residual Water Content (%)	رطوبت اشباع (درصد) Saturated Water Content (%)
0.02	4.5	8.1	100	0.1276	1.251	0.546	0.369

جدول ۲- جانمایی مرکز لوله زهکش

Table 2. Location of the drainage pipe center

حالت Case	قطر (سانتی‌متر) Diameter (cm)	فاصله مرکز لوله از منبع شیرین (سانتی‌متر) x (cm)	فاصله مرکز لوله از کف (سانتی‌متر) z (cm)
الف- a	۱۰	۲۷۰	۵
ب- b	۱۰	۲۷۰	۵
ج- c	۱۰	۱۸۰	۱۰
د- d	۱۰	۱۸۰	۱۰
ه- e	۱۰	۹۰	۱۵
و- f	۱۰	۹۰	۱۵

زهکش روباز به صورت کانالی با شیب دیواره ۱ به ۱ و عرض کف ۱۰ سانتی‌متر نیز در شش مکان قرار داده شد که اثر زهکش روباز و محل قرارگیری آن بررسی شود (جدول ۳). پرده آب‌بند به علت مکانیزم متفاوتی که نسبت به زهکش دارد، هر چه به مخزن آب شور نزدیکتر باشد عملکرد بهتری خواهد داشت. از این رو پرده آب‌بند تنها از نظر عمق (سه عمق مختلف) بررسی شد. ضخامت پرده آب‌بند ۱۰ سانتی‌متر و در سه عمق چسبیده به کف، فاصله ۵ سانتی‌متر از کف و ۱۵ سانتی‌متر از کف قرار داده شد. جنس پرده آب‌بند از نوع خاک با بافت رس با هدایت هیدرولیکی ۰/۰۸ سانتی‌متر بر روز با توجه به گزارش عبدالعطی و همکاران (Abd-Elaty *et al.*, 2019) انتخاب شد.

زهکش روباز به صورت کانالی با شیب دیواره ۱ به ۱ و عرض کف ۱۰ سانتی‌متر نیز در شش مکان قرار داده شد که اثر زهکش روباز و محل قرارگیری آن بررسی شود (جدول ۳). پرده آب‌بند به علت مکانیزم متفاوتی که نسبت به زهکش دارد، هر چه به مخزن آب شور نزدیکتر باشد عملکرد بهتری خواهد داشت. از این رو پرده آب‌بند تنها از نظر عمق

جدول ۳- جانمایی مرکز کف زهکش روباز

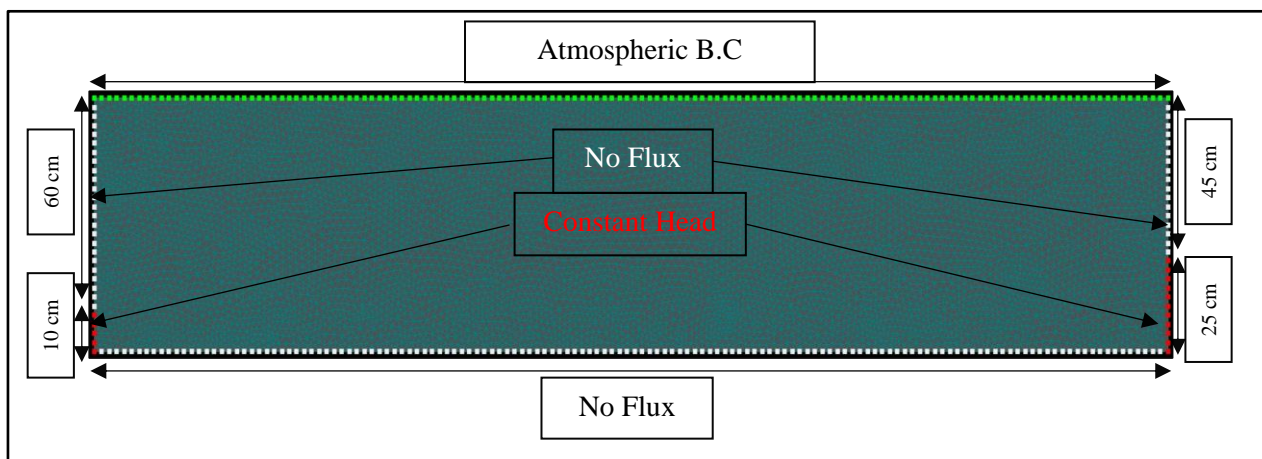
Table 3. Location of the open drainage center

حالت Case	عرض کف (سانتی‌متر) Width (cm)	فاصله مرکز کانال از منبع شیرین (سانتی‌متر) x (cm)	فاصله مرکز کانال از کف (سانتی‌متر) z (cm)
الف- a	۱۰	۲۷۰	۵
ب- b	۱۰	۲۷۰	۵
ج- c	۱۰	۱۸۰	۱۰
د- d	۱۰	۱۸۰	۱۰
ه- e	۱۰	۹۰	۱۵
و- f	۱۰	۹۰	۱۵

شرایط مرزی برای تعیین سطح آب آبخوان‌های آب شور و شیرین به صورت هد ثابت، سطح خاک به علت تماس با جو، شرط مرزی اتمسفریک و بقیه مرزها به صورت بدون جریان تعریف شدند (شکل ۱). شرط مرزی املاح در مرز آبخوان‌ها به دلیل ثابت بودن غلظت در آبخوان‌ها، نوع اول (غلظت ثابت) لحاظ گردید.

برای خروج آب و املاح از طریق زهکشی روباز و زیرزمینی، شرط مرزی سطح نشت در جداره آنها منظور گردید.

شرایط مرزی برای تعیین سطح آب آبخوان‌های آب شور و شیرین به صورت هد ثابت، سطح خاک به علت تماس با جو، شرط مرزی اتمسفریک و بقیه مرزها به صورت بدون جریان تعریف شدند (شکل ۱). شرط مرزی املاح در مرز آبخوان‌ها به دلیل ثابت

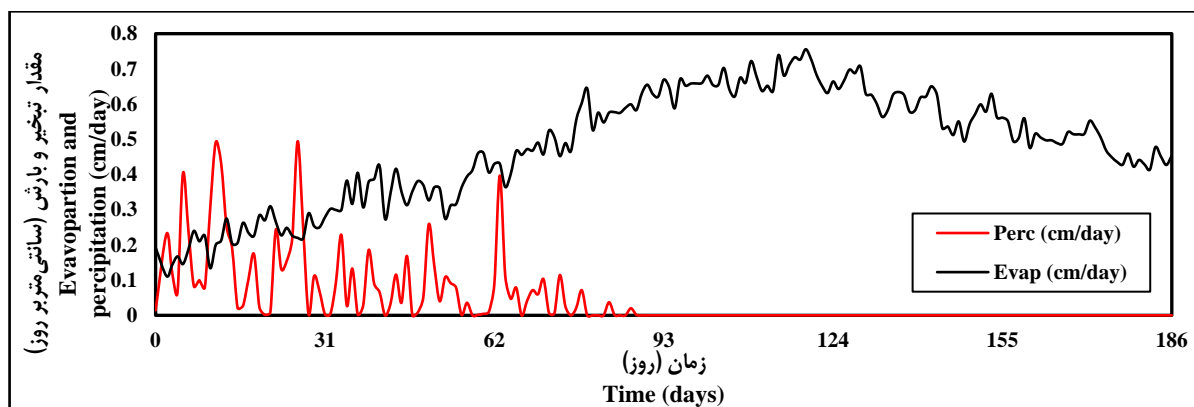


شکل ۱- شرایط مرزی هیدرولیکی  
Fig 1. Hydraulic boundary condition

## نتایج و بحث

تأثیری روی شوری و سطح آب در مخازن ندارد (شکل ۲). از طرفی، تبخیر زیاد از سطح خاک باعث می‌شود که سطح آب در مدل افت کند و شرایط بحرانی از نظر توزیع شوری ایجاد کند (شکل ۲). این رو در این پژوهش برای بررسی توزیع شوری در طولانی مدت به شش ماه ابتدایی سال اکتفا شد. داده‌های تشکک تبخیر و بارش از ایستگاه هواشناسی نزدیک ایستگاه هواشناسی دانشگاه تهران واقع در مزرعه آموزشی دانشگاه گرفته شد.

در این پژوهش، زمان شش ماه برای بررسی طولانی مدت در نظر گرفته شد زیرا در فصل پاییز و زمستان به علت بارش، سطح ایستابی در مدل فیزیکی بالا می‌آید و آب به همراه املاح از مدل فیزیکی به مخازن آب شور و شیرین سرازیر می‌شود. این امر باعث می‌شود شوری مخازن تغییر کند و شرایط مرزی منتخب صادق نباشد. در فصل تابستان و بهار بارش به صورت پراکنده و مقدار آن کم است و



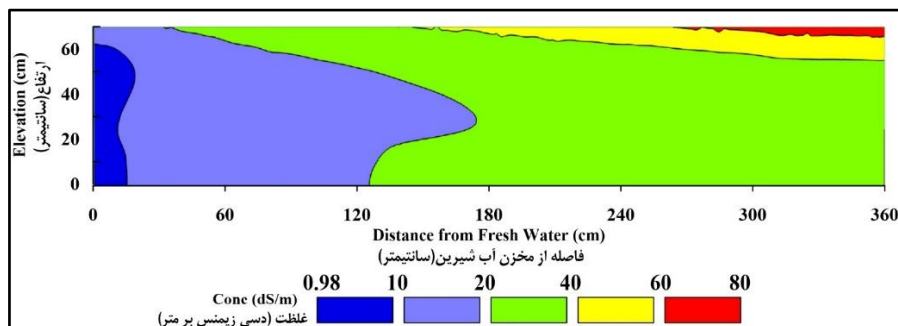
شکل ۲- مقدار تبخیر و بارش در مدت شبیه‌سازی  
Fig 2. Evaporation and precipitation during the simulation period

در حالت "الف" گرادیان هیدرولیکی افزایش یافته و آب شور با سرعت بیشتری نسبت به قبل تخلیه شده است، به طوری که از مرز آبخوان شور ۹۴ و ۸۹/۹ کیلوگرم نمک به همراه جریان آب وارد شده که ۹۱/۵ و ۸۸/۵ کیلوگرم از آن به ترتیب توسط زهکش زیرزمینی و روباز تخلیه شده است. در شرایط بدون زهکش، ۲۱/۸ کیلوگرم نمک از مرز آبخوان شور وارد محیط خاک شده که به دلیل گرادیان هیدرولیکی ۱۲ کیلوگرم آن از مرز آبخوان شیرین به همراه جریان آب خارج شده و بقیه در محیط خاک و بین دو آبخوان ذخیره شده است.

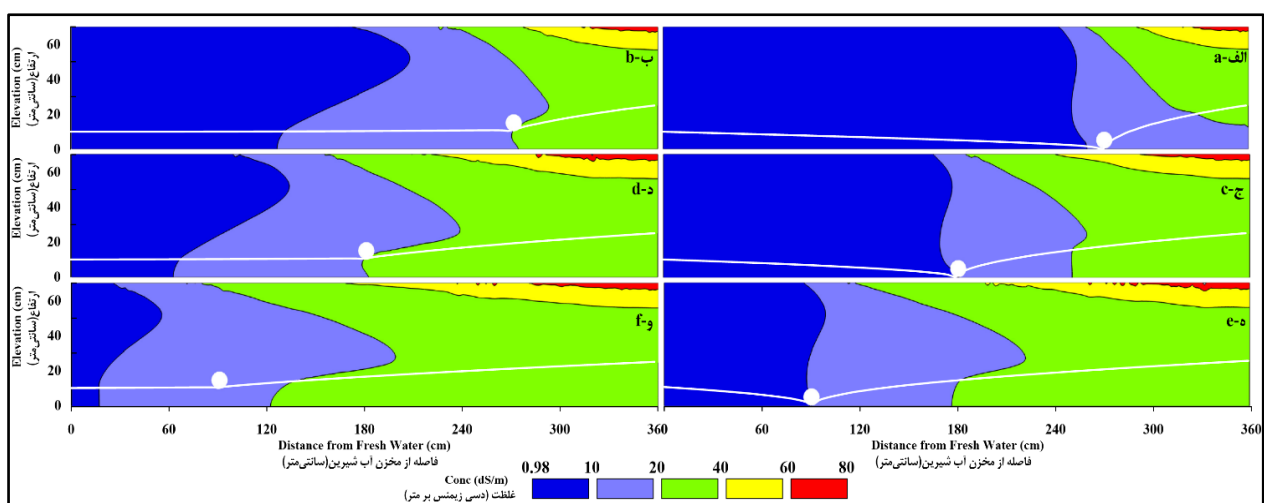
در بین حالت‌های مختلف قرار گیری زهکش‌ها، بیشترین مقدار زهکشی نمک و آب در هر دو نوع زهکش حائل مربوط به حالت "الف" و کمترین مقدار مربوط به حالت "و" است (جدول ۴). در حالت "و" زهکش در فاصله ۹۰ سانتی‌متری از آبخوان آب شیرین و ۱۵ سانتی‌متری از کف قرار گرفته است. در این حالت زهکش سطح آب را در نزدیکی مخزن آب شیرین برابر با ۱۰ سانتی‌متر کنترل کرده و مانع از ورود آب شور به آبخوان شیرین شده است. مقدار شوری در محیط خاک افزایش پیدا کرده به طوری که نسبت به حالت‌های دیگر بیشتر است ولی مقدار نمک دفع شده و تأثیر زهکش بر آبخوان شیرین کمتر از بقیه موارد است. در نتیجه، به‌رغم اینکه مقدار جریان و نمک خروجی از زهکش حداقل است ولی زهکش وظیفه اصلی را که جلوگیری از پیشروی شوری است ایفا نکرده است.

نقش زهکش حائل زیرزمینی و رو باز در کنترل شوری

شکل ۳ توزیع شوری و سطح ایستابی را بعد از گذشت ۶ ماه در شرایط عادی و بدون زهکش و شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب توزیع شوری را در حالت‌های (الف تا و) قرارگیری لوله و کانال زهکشی نشان می‌دهند. با مقایسه شکل‌های ۳، ۴ و ۵ مشخص می‌شود که زهکش زیرزمینی و روباز نقش قابل توجهی در کنترل بیشینه شوری در فاصله بین دو زهکش نداشته‌اند. در مورد جانمایی محل زهکش، سه عامل بااهمیت است که بررسی شده‌اند: ۱- میزان خروج نمک از زهکش ۲- کنترل شوری و جلوگیری از پیشروی آن ۳- تأثیر محل زهکش بر ورود و خروج آب از آبخوان شیرین. در شکل ۴-الف و ۵-الف زهکش مانع جریان آب و املاح و پیشروی شوری شده و از این جهت مؤثر بوده است. از طرفی با توجه به نیمرخ سطح آب، مشخص می‌شود که علاوه بر آبخوان آب شور، آبخوان آب شیرین نیز تحت تأثیر قرار گرفته و در حال تخلیه است، به طوری که از مرز آبخوان شور ۷/۲ و ۶/۸۸ مترمکعب بر متر و از مرز آبخوان شیرین ۰/۴۳ و ۰/۳۶ مترمکعب بر متر به ترتیب در زهکش حائل زیرزمینی و روباز آب به سمت داخل وارد شده است. در حالی که در شرایط بدون زهکش، از آبخوان شور ۱/۶۵ مترمکعب بر متر آب وارد شده که ۱/۲۴ متر مکعب بر متر از آن به علت تفاوت سطح ایستابی در دو آبخوان، از مرز آبخوان شیرین تخلیه شده است (جدول ۴).



شکل ۳- توزیع شوری در مدل فیزیکی بعد از گذشت شش ماه  
 Fig 3. Salinity distribution in physical model after 6 months



شکل ۴- توزیع شوری در حضور زهکش زیرزمینی در محل‌های مختلف (x, z) بعد از زمان شش ماه. الف- (۵، ۲۷۰)، ب- (۱۵، ۲۷۰)، ج- (۵، ۱۸۰)، د- (۱۵، ۱۸۰)، ه- (۵، ۹۰) و و- (۱۵، ۹۰) سانتی متر (خط سفید نشان‌دهنده سطح ایستابی است).

Fig 4. Salinity distribution in presence of subsurface drainage in various locations (x, z) after 6 months, a (270, 5), b (270, 15), c (180, 5), d (180, 15), e (90, 5) and f (90, 15) cm (the white line is the water table).

طرفی، با مقایسه تخلیه از مرز آبخوان شیرین مشخص می‌شود که با افزایش عمق زهکش، مقدار آب تخلیه شده در زهکش روباز بیشتر است تا در زهکش زیرزمینی. ولی در عمق پایین تفاوت قابل توجهی در مقدار آب وارد شده به مدل از مرز آبخوان شیرین وجود ندارد. به طور کلی می‌توان گفت زهکش روباز از نظر جلوگیری از پیشروی شوری بهتر از زهکش زیرزمینی عمل می‌کند. مقدار بیشینه شوری و توزیع آن در زهکش روباز کمتر است تا در زهکش زیرزمینی؛ دلیل آن را می‌توان حذف ارتباط بین خاک و جلوگیری از حرکت آب در خاک دانست.

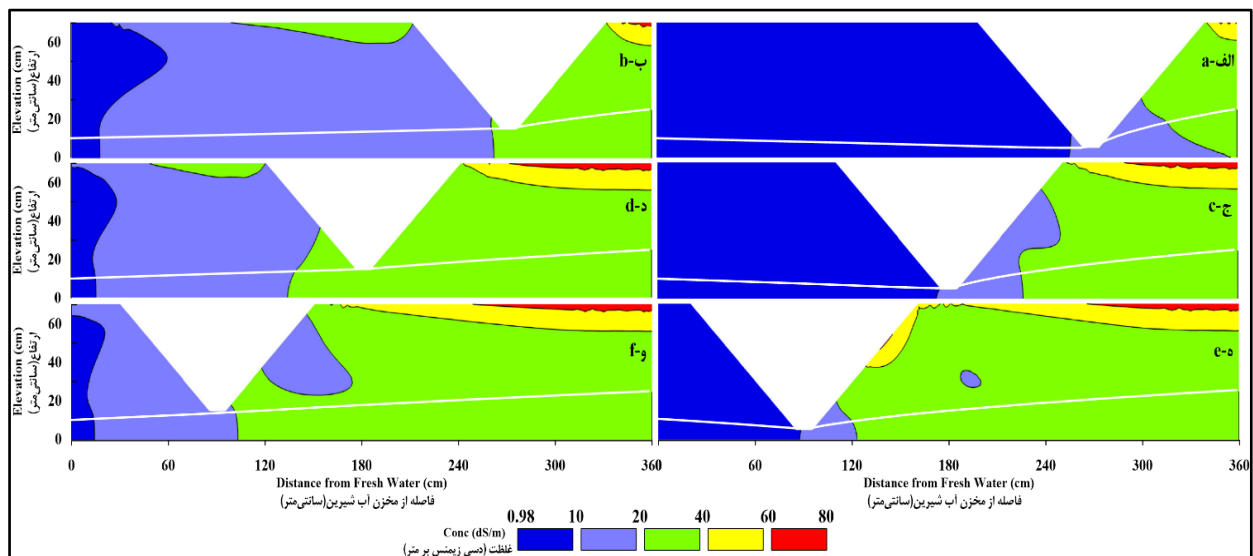
انتخاب بین گزینه‌های مختلف بستگی به شرایط اولویت‌های مختلف منطقه مورد مطالعه دارد و با مقایسه بین شرایط مختلف باید حالتی انتخاب کرد که کمترین آسیب را به محیط زیست وارد می‌سازد. تصمیم درباره محل احداث زهکش حائل به عوامل محیطی و هدف اجرای زهکشی بستگی دارد. در احداث زهکش روباز، با افزایش سطح خاک در تماس با هوای آزاد، مقدار تبخیر از سطح خاک افزایش می‌یابد و خود باعث افت سطح ایستابی می‌شود. مقدار آب تخلیه‌شده از زهکش روباز کمتر از مقدار آب تخلیه‌شده از زهکش زیرزمینی است و دلیل آن افزایش سطح تبخیر و افت سطح ایستابی است. از



جدول ۴- بیان نمک و آب در حالت‌های مختلف زهکشی

Table 4. The amount of water and salt passing through each aquifer boundary in different drainage situations

نمک (کیلوگرم) Salt (kg)				مقدار آب (متر مکعب بر متر) Water (m <sup>3</sup> /m)				حالت case				
زهکشی Drainage		مرز آبخوان شیرین Fresh water aquifer boundary		مرز آبخوان شور Saline aquifer boundary		زهکشی Drainage			مرز آبخوان شیرین Fresh water aquifer boundary		مرز آبخوان شور Saline aquifer boundary	
روباز Surface	لوله‌ای Subsurface	روباز Surface	لوله‌ای Subsurface	روباز Surface	لوله‌ای Subsurface	روباز Surface	لوله‌ای Subsurface		روباز Surface	لوله‌ای Subsurface	روباز Surface	لوله‌ای Subsurface
-----	-----	-12	-12	21.8	21.8	-----	-----	-1.24	-1.24	1.65	1.65	بدون زهکشی non-drained
88.5	91.5	0.23	0.25	89.9	94	7.17	7.48	0.36	0.43	6.88	7.2	الف- a
50	68.6	-2.5	-0.007	59	73.7	4	5.41	-0.4	-0.01	4.51	5.64	ب- b
41.5	43	0.33	0.4	45.5	46.8	3.9	4	0.52	0.62	3.5	3.47	ج- c
17.4	30.7	-5.35	-0.034	30.6	37.8	1.5	2.6	-0.6	-0.04	2.3	2.88	د- d
24.6	25.7	0.56	0.67	31.41	32.1	3	3.43	0.97	1.18	2.4	2.44	ه- e
7.9	17	-7.6	-0.61	23.3	26.5	0.67	1.62	-0.86	-0.09	1.8	2.01	و- f



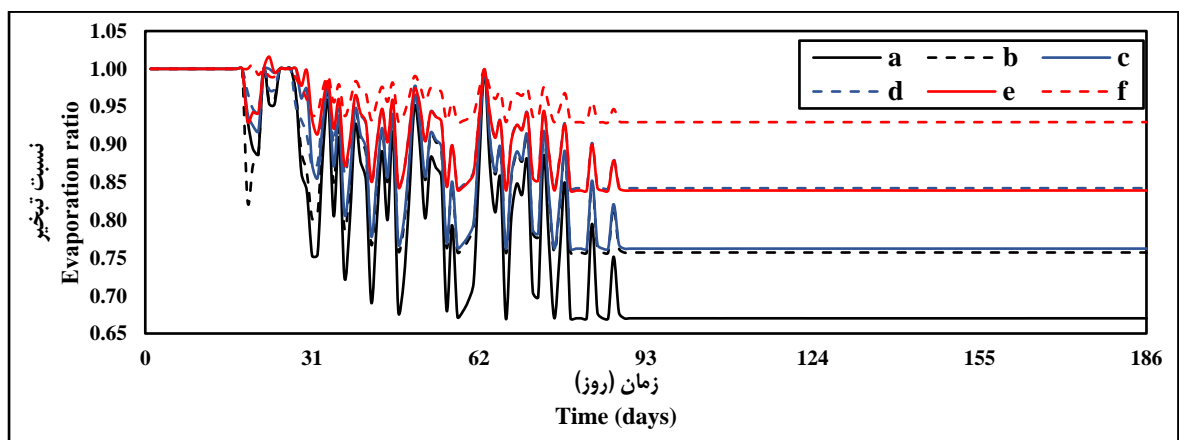
شکل ۵- توزیع شوری در حضور زهکش روباز در محل‌های مختلف (x, z) بعد از زمان شش ماه. الف- (۲۷۰ ، ۵) ، ب- (۲۷۰ ، ۱۵) ، ج- (۲۷۰ ، ۵) ، د- (۱۸۰ ، ۱۵) ، ه- (۹۰ ، ۵) و و- (۹۰ ، ۱۵) سانتی متر (خط سفید نشان دهنده سطح ایستابی است).

Fig 5. Salinity distribution in presence of surface drainage in various locations (x ,z) after 6 months, a (270 , 5), b (270 , 15), c (180 , 5), d (180 , 15), e (90 , 5) and f (90 , 15) cm (the white line is the water table).

قرارگیری زهکش به ترتیب زیرزمینی و روباز نسبت به تبخیر واقعی از سطح خاک در حالت بدون زهکش نشان می‌دهد. تبخیر از سطح خاک توسط مدل HYDRUS-2D بر اساس رطوبت باقی مانده در خاک محاسبه و زیر عنوان تبخیر واقعی در قسمت خروجی مدل نمایش داده می‌شود.

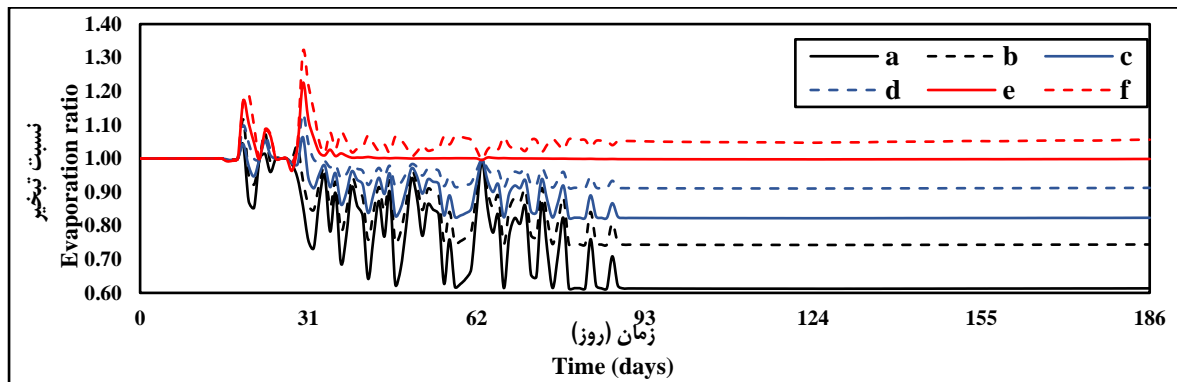
#### اثر محل زهکش بر تبخیر از سطح خاک

زهکش زیر زمینی و روباز تأثیر مستقیم بر سطح ایستابی دارند. از طرفی، سطح ایستابی بر تبخیر از سطح خاک اثرگذار است. بدین ترتیب محل قرارگیری زهکش بر تبخیر از سطح خاک اثر می‌گذارد. شکل ۶ و ۷ نسبت تبخیر واقعی از سطح خاک را در هر یک از حالت‌های



شکل ۶- نسبت تبخیر در حالت‌های مختلف قرارگیری زهکش زیرزمینی به تبخیر در حالت بدون زهکش

Fig 6. Evaporation ratio in various placement cases of subsurface drainage to without drainage case



شکل ۷- نسبت تبخیر در حالت‌های مختلف قرارگیری زهکش روباز به تبخیر در حالت بدون زهکش

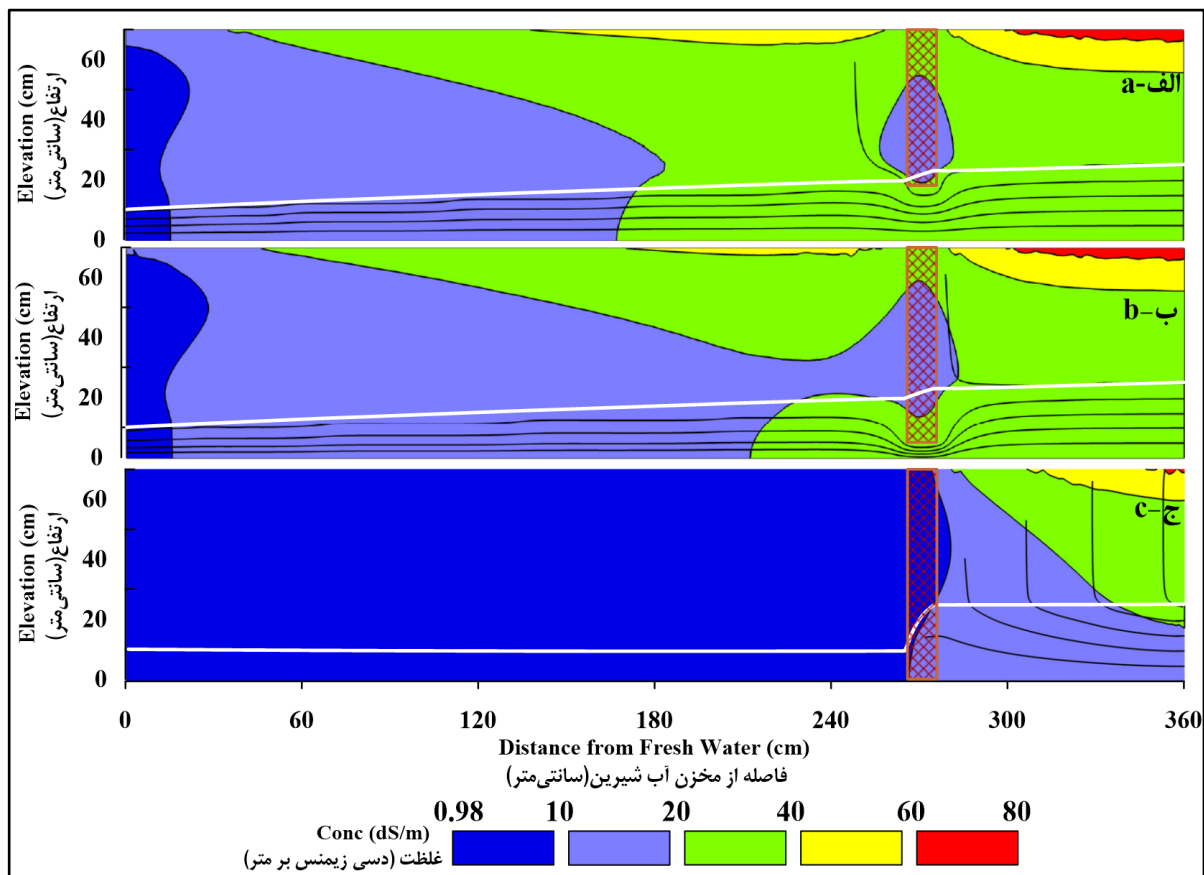
Fig 7. Evaporation ratio in various placement cases of surface drainage to without drainage case

همچنین، محل قرارگیری زهکش به دلیل اثر کاهشی آن روی سطح ایستابی، منجر به کاهش تبخیر می‌شود به طوری که تبخیر در حالت "الف" نسبت به حالت بدون زهکش به میزان ۱۵ درصد کاهش داشته است. کاهش تبخیر از سطح خاک، تجمع شوری لایه سطح خاک را کاهش می‌دهد. با مشاهده توزیع شوری در شکل ۵-الف و شکل ۴ مشخص می‌شود که شوری سطحی خاک مخصوصاً در ناحیه نزدیک به آبخوان آب شور کاهش داشته است.

تاثیر پرده آب‌بند در کنترل پیشروی شوری

شکل ۸ توزیع شوری، نیمرخ سطح آب و محل پرده آب‌بند را در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. در این شکل، برای بررسی خطوط جریان در حضور پرده آب‌بند، روی مرز آبخوان آب شور ردیاب قرار داده شد. پرده آب‌بند تنها در شرایطی مانع جریان آب شور گشته است که تا لایه غیرقابل نفوذ رسیده باشد (شکل ۸-ج). در حالتی که پرده آب‌بند از لایه غیرقابل نفوذ ۱۵ سانتی‌متر فاصله داشته باشد، مقدار آب ورودی از مرز آبخوان آب شور ۱/۵۵ متر مکعب بر متر است و با افزایش عمق پرده آب‌بند به ۱/۳۲ متر مکعب بر متر کاهش یافته است.

نوسان‌های نسبت تبخیر در سه ماهه اول به علت بارش‌های پراکنده بهاری است. ولی همان‌طور که گفته شد بارش‌ها در حدی نیستند که بر آب مخازن تاثیر گذار باشند. کمترین مقدار تبخیر از سطح خاک در حالت "الف" و بیشترین مقدار تبخیر در حالت "و" در هر دو نوع زهکش زیرزمینی و روباز است. کاهش مقدار تبخیر باعث می‌شود که جریان رو به بالا که به همراه املاح اتفاق می‌افتد، کمتر شود و در نتیجه مقدار تجمع نمک بر سطح خاک کاهش یابد. در حالت "الف"، در هر دو نوع زهکش مقدار تجمع شوری کمترین مقدار است و این با مقایسه پهنه قرمز رنگ شوری در شکل‌های ۴ و ۵ مشخص می‌شود. زهکش روباز باعث افزایش تماس خاک با هوا می‌شود که خود باعث افزایش تبخیر و تجمع شوری شده است. دلیل افزایش تبخیر در نیمه اول شبیه‌سازی در زهکش روباز نیز همین است. در حالت "و" مقدار تبخیر همواره بیشتر از حالت عادی است و مقدار شوری سطح خاک نسبت به حالت بدون زهکش بیشتر شده است. این بدین معنی است که قرارگیری زهکش روباز در حالت "و" نه تنها از پیشروی شوری جلوگیری نکرده بلکه باعث تخلیه نمک به آبخوان آب شیرین و افزایش شوری در سطح خاک نیز شده است.



شکل ۸- توزیع شوری در حضور پرده آب‌بند در محل‌های مختلف  $(x, z)$  بعد از زمان شش ماه. الف- (۵، ۲۷۰)، ب- (۱۵، ۲۷۰) و ج- (۰، ۲۷۰) سانتی‌متر (خط سفید نشان‌دهنده سطح ایستابی است).

Fig 8. Salinity distribution in presence of surface drainage in various locations  $(x, z)$  after 6 months, a (270 , 5), b (270 and c (270, 0) cm (the white line is the water table). , 15)

دلیل آن وجود مجرای برای عبور راحت‌تر جریان در زیر پرده است. با بررسی مسیر جریان توسط ردیاب‌ها، (شکل ۸) مشخص می‌شود که آب با تغییر مسیر، خود را به زیر پرده آب‌بند رسانده و از مسیر مستقیم منحرف شده است. مقدار جریان عبوری از مرز آبخوان آب شیرین در حالتی که لایه آب‌بند در ۱۵ سانتی‌متری قرار گرفته است، ۱/۲۲- مترمکعب بر متر، هنگامی که در ۵ سانتی‌متری قرار گرفته ۱- مترمکعب بر متر و در شرایطی که به طور کامل مانع جریان شده است ۰/۰۷ مترمکعب بر متر آب از مرز آبخوان شیرین وارد شده است. همان‌طور که پرده آب‌بند جریان ورودی از طرفین را تحت تأثیر قرار

مقدار ورودی آب از مرز آبخوان شور در حالت عادی ۱/۶۵ متر مکعب بر متر است. هنگامی که پرده آب‌بند به لایه غیر قابل نفوذ رسیده است، تنها ۰/۱۶ مترمکعب بر متر آب وارد شده که صرف تبخیر از سطح خاک شده است. مقدار بیشینه شوری در محیط خاک، قبل و بعد از احداث پرده آب‌بند تفاوتی نداشته ولی پرده آب‌بند بر توزیع شوری تأثیرگذار بوده است (شکل ۳ و ۸). نیمرخ سطح ایستابی با رسیدن به پرده آب‌بند به علت هدایت هیدرولیکی بسیار کم (حدود ۰/۱ متر بر روز) دچار شکست شده است. مقدار شکست و افت سطح ایستابی با افزایش عمق پرده افزایش یافته است.

و زیرزمینی بر خروج آب و املاح از هر دو آبخوان شیرین و شور تأثیرگذار است. قرارگیری زهکش در نزدیکی آبخوان شور، باعث افزایش ورود نمک به میزان حدود چهار برابر از آبخوان آب شور به زهکش می‌شود و اگر زهکش در نزدیکی آبخوان آب شیرین احداث شود، میزان ورود نمک از آبخوان آب شور حدود  $1/5$  برابر می‌شود. این در حالی است که در شرایط بدون زهکش در دوره شش ماهه از مرز آبخوان آب شیرین،  $1/24$  مترمکعب بر متر آب خارج شده است و اگر زهکش در نزدیکی آبخوان آب شور قرار گیرد  $0/43$  مترمکعب بر متر و اگر در نزدیکی آبخوان آب شیرین قرار گیرد  $1/18$  مترمکعب بر متر آب از مرز آبخوان آب شیرین وارد زهکش می‌شود. بهترین کارایی پرده آب‌بند زمانی است که به لایه غیرقابل نفوذ رسیده باشد. در این حالت، مقدار جریان ورودی آب شور  $10$  برابر کاهش می‌یابد. استفاده از روش‌های جلوگیری از پیشروی شوری، جوانب مختلف محیط زیستی در بر دارد. اگر از زهکش روباز یا زیرزمینی برای کنترل شوری استفاده شود، هر دو آبخوان آب شیرین و آب شور تحت تأثیر قرار می‌گیرند. در این حالت، ممکن است از ذخیره آب شیرین کم شود ولی جلوگیری از پیشروی آب شور به سمت آبخوان آب شیرین منجر به پایداری بیشتر این ناحیه خواهد شد. درحقیقت با خروج بخشی از آب شیرین به صورت زهاب، سطح وسیعی از آبخوان کنترل و از شور شدن منابع آب شیرین جلوگیری می‌شود.

از طرف دیگر، دفع زهاب تولید شده با غلظت بالا در نتیجه زهکشی آبخوان شور، برای جلوگیری از آسیب به محیط زیست، نیاز به بررسی دقیق و جامع برای تعیین تخلیه‌گاه دارد.

داده است، بر نمک ورودی و خروجی نیز اثر گذاشته است. در حالت بدون پرده آب‌بند، از مرز آبخوان شور در مدت شش ماه  $21/8$  کیلوگرم نمک وارد آب شده و با نصب پرده آب‌بند تا فاصله  $15$  سانتی‌متری از کف  $20/5$  کیلوگرم، تا فاصله  $5$  سانتی‌متری از کف  $17/5$  کیلوگرم و در حالتی که پرده تا لایه غیر قابل نفوذ احداث شود تنها  $2/6$  کیلوگرم نمک وارد شده است. تأثیر پرده آب‌بند بر خروج نمک بیشتر بوده است تا بر خروج آب از مرز آبخوان. هنگامی که پرده آب‌بند در فاصله  $15$  سانتی‌متری از کف احداث شده است مقدار خروج آب  $1/6$  درصد کاهش داشته ولی مقدار خروج نمک  $8/3$  درصد کم شده است. پرده در حالتی که در  $5$  سانتی‌متری از لایه غیر قابل نفوذ باشد،  $19/3$  و  $30$  درصد به ترتیب خروج آب و نمک از آبخوان آب شیرین را کاهش داده است.

در تحقیقات ستوده‌نیا و همکاران (Sotoudehnia *et al.*, 2014) زهکش روباز در جلوگیری از پیشروی شوری به سمت بالادست اثر بخش گزارش شده است. قربانی و همکاران (Ghorbani *et al.*, 2016) نیز نقش موثر زهکش شوره‌زار دشت قزوین را در سه سال اول احداث در جلوگیری از پیشروی شوری مؤثر گزارش دادند و با شبیه‌سازی زهکش در سال‌های آینده پیش‌بینی کردند تا  $1/5$  متر سطح ایستابی افت خواهد کرد. سد زیرزمینی و زهکش عمودی در جلوگیری از پیشروی آب شور دریا توسط عبدالعطی و همکاران (Abd-Elaty *et al.*, 2019) مؤثر عنوان شد که با نتایج کلی این پژوهش مطابقت دارد.

## نتیجه‌گیری

نتایج بررسی نشان داد محل احداث زهکش روباز

## مراجع

- Abd-Elaty, I., Abd-Elhamid, H. F., & Nezhad, M. M. (2019). Numerical analysis of physical dams' systems efficiency in controlling saltwater intrusion in coastal aquifers. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(35), 35882-35899.
- Adegoke, J. A., Popoola, O. I., & Faluyi, O. O. (2013). Investigation of variation of diffusion coefficient in saltwater intrusion in porous media. *Journal of Environmental Hydrology*, 21
- Chang, S. W., & Clement, T. P. (2012). Experimental and numerical investigation of saltwater intrusion dynamics in flux-controlled groundwater systems. *Water Resources Research*, 48(9).
- Chang, Y., Hu, B. X., Xu, Z., Li, X., Tong, J., Chen, L. & Ma, Z. (2018). Numerical simulation of seawater intrusion to coastal aquifers and brine water/freshwater interaction in south coast of Laizhou Bay, China. *Journal of contaminant hydrology*, 215, 1-10.
- de Oliveira, L. A., Woodbury, B. L., de Miranda, J. H., & Stromer, B. S. (2020). Using electromagnetic induction technology to identify atrazine leaching potential at field scale. *Geoderma*, 375, 114525.
- Ghorbani, K., Lee, T. S., Wayayok, A., & Boroomand Nasab, S. (2016). Interceptor Drainage Modelling to Manage High Groundwater Table on the Abyek Plain, Iran. *Irrigation and Drainage*, 65(3), 341-359.
- Goswami, R. R., & Clement, T. P. (2007). Laboratory-scale investigation of saltwater intrusion dynamics. *Water Resources Research*, 43(4).
- He, W., Zhang, J., Yu, X., Chen, S., & Luo, J. (2018). Effect of runoff variability and sea level on saltwater intrusion: A case study of Nandu River Estuary, China. *Water Resources Research*, 54(12), 9919-9934.
- Mehdizadeh, S. S., Ketabchi, H., Ghorogi, M., & Hasanzadeh, A. K. (2020). Experimental and numerical assessment of saltwater recession in coastal aquifers by constructing check dams. *Journal of Contaminant Hydrology*, 103637.
- Motallebain, M., Ahmadi, H., Raof, A., & Cartwright, N. (2019). An alternative approach to control saltwater intrusion in coastal aquifers using a freshwater surface recharge canal. *Journal of contaminant hydrology*, 222, 56-64.
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water resources research*, 12(3), 513-522.

- Noorabadi, S., Sadraddini, A. A., Nazemi, A. H., & Delirhasannia, R. (2017). Laboratory and numerical investigation of saltwater intrusion into aquifers. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 8(12), 4273-4283.
- Rabbaniha, H., Liaghat, A., & Soltani, M. (2020a). Experimental study of shallow saline water and freshwater interference on distribution of salinity in the saturated and unsaturated zone using physical model. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 14(5), 1677-1685. (in Persian)
- Rabbaniha, H., Liaghat, A., & Soltani, M. (2020b). Simulation of Saline and Fresh Water Interference in Saturated and Unsaturated Zones Using Physical and Hydrus-2D Model. *Iranian journal of Ecohydrology*, 7(4), 907-919. (in Persian)
- Rathore, S. S., Zhao, Y., Lu, C., & Luo, J. (2018). Defining the effect of stratification in coastal aquifers using a new parameter. *Water Resources Research*, 54(9), 5948-5957.
- Rice, K. C., Hong, B., & Shen, J. (2012). Assessment of salinity intrusion in the James and Chickahominy Rivers as a result of simulated sea-level rise in Chesapeake Bay, East Coast, USA. *Journal of Environmental Management*, 111, 61-69.
- Selim, T., Bouksila, F., Hamed, Y., Berndtsson, R., Bahri, A., & Persson, M. (2018). Field experiment and numerical simulation of point source irrigation with multiple tracers. *Plos one*, 13(1), e0190500.
- Šimůnek, J., Van Genuchten, M. T., & Šejna, M. (2012). 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*.
- Soltani, M., Rahimikhoob, A., Sotoodehnia, A., Mendicino, G., Akram, M., & Senatore, A. (2018). Numerical evaluation of the effects of increasing ratio of cropped to uncropped width on dry drainage efficiency in salty soils. *Irrigation and Drainage*, 67, 91-100.
- Sotoudehnia, A., Jafarei, M., & Daneshkar Arasteh, P. (2014). The Role of Qazvin Central Marsh Interceptor Drain in Controlling Shallow Groundwater Salinity. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 45(4), 447-452. (in Persian)
- Strack, O. D. L., Stoeckl, L., Damm, K., Houben, G., Ausk, B. K., & de Lange, W. J. (2016). Reduction of saltwater intrusion by modifying hydraulic conductivity. *Water Resources Research*, 52(9), 6978-6988.
- Toller, E. A., & Strack, O. D. (2019). Interface Flow with Vertically Varying Hydraulic Conductivity. *Water Resources Research*, 55(11), 8514-8525.

- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898.
- Wang, J., Huang, Y., Long, H., Hou, S., Xing, A., & Sun, Z. (2017). Simulations of water movement and solute transport through different soil texture configurations under negative-pressure irrigation. *Hydrological Processes*, 31(14), 2599-2612.



## **Investigations and comparison of the ways to prevent saline water advancement in zones with shallow water table**

**H. Rabhaniha\*, A. M. Liaghat and M. Soltani**

\* Corresponding Author: MSc from Department of Irrigation & Reclamation Engineering, Campus of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: hrabhaniha@gmail.com

Received: 18 January 2021, Accepted: 7 February 2021

### **Extended Abstract**

#### **Introduction**

One of the threatening factors to fresh water resources is the advancement of saline water and intrusion into the groundwater aquifer. This problem occurs in coastal zones and desert margins and reduces fresh water quality. Evaporation from the soil surface and the water table depth are factors affecting the salinity and salt distribution in the saturated and unsaturated zones. HYDRUS and the accompanying software package provide numerical models used to simulate the movement of water, solute and heat in a porous medium for saturated and unsaturated conditions. According to the existing reports on the ability of HYDRUS model to simulate moisture and salinity, using it can help decide and consider how to prevent the salinity advancement.

#### **Methodology**

In this research, the advance of saline water with a concentration of 20 dS/m and a level of 25 cm towards fresh water with a concentration of 1 dS/m and a level of 10 cm in the domain of 360×70 cm is considered. Different scenarios were examined to prevent the progression of salinity using a validated model. The studied scenarios include inceptor pipe drainage, inceptor open drainage and subsurface barrier which were simulated using the HYDRUS-2D model. The parameter of the equations governing water flow and solute transport were estimated using observed moisture and salinity data and inverse solution tools in HYDRUS-2D model. pipe and open drainage were considered at three distances of 270, 180 and 90 cm from the freshwater reservoir and two depths of 15 and 5 cm from the impermeable layer. The effect of the subsurface dam on preventing the advance of saline water at three depths of 55, 65 and 70 were investigated.

#### **Results and Discussion**

Different scenarios of different drainage locations have been simulated to study salinity distribution and water table after 6 months. Regarding the location of the drainage site, three factors are important that have been studied: 1- The amount of water and salt outflow from the drainage 2- Controlling and preventing the advance of salinity 3- Its effect on the entry and exit of water from the freshwater aquifer. The location of surface and subsurface drainage showed different effects on salinity advancement. By changing the location of drainage from A to f the amount of drained water in pipe and open drainage decreased by 5.8 and 6.5 m<sup>3</sup>/m, respectively. Drainage location also affected actual evaporation from soil surface and salinity accumulation in the soil surface layer. In the cases of drainage where the lowest and highest evaporation from the soil surface occurs respectively, 15% difference was observed. In the case of open drainage at a distance of 90 cm from the freshwater reservoir and a depth of 5 cm from the impermeable layer, the amount of actual evaporation from the soil surface during the whole simulation period is greater than the actual evaporation in non-drained condition and also caused increased salinity between two reservoirs. The subsurface barrier has generally blocked the saline water flow only when it has reached the impermeable layer. The profile of the water table is broken due to very

low hydraulic conductivity (about 0.1 m per day) when it reaches the subsurface barrier. The amount of failure and drop of the water table increased with increasing barrier depth.

**Conclusions**

The salinity distribution parameters in the area between two aquifers, discharged drain from drainage and its concentration and protection of freshwater aquifer are effected and can be considered according to the condition of each location. On the other hand, each of the scenarios has a positive and negative effect on these factors, so according to each sample and specific location, it must be decided how to prevent the progression of salinity (drainage or subsurface barrier) and their location.

**Keywords:** Groundwater, Hydraulic gradient, inceptor drainage, Salinity Front