

ارائه الگوی ارتقای پتانسیل بهره‌برداری مناسب از منابع آب زیرزمینی با استفاده از تغذیه مصنوعی (مطالعه موردی: سواحل مکران)

امیرکیان حسن‌زاده^۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۰۵

چکیده

رشد جمعیت و توسعه جوامع بشری منجر به تقاضای مصرف بیشتر آب شده است و با توجه به ثابت بودن تقریبی منابع تأمین آب، باید با مدیریتی صحیح، عرضه و تقاضا را در تعادل نگه داشت. این امر حفاظت منابع آبی در مقابل آلاینده‌ها را امری ضروری می‌نماید. تمرکز جمعیت در نواحی ساحلی و بالطبع رشد فعالیت‌ها سبب افزایش میزان برداشت از آب زیرزمینی شده است. این افزایش برداشت، سبب حرکت آب شور دریا به سمت آبخوان گردیده و این امر شوری بیشتر این منابع را به دنبال داشته است. شوری زیاد (بیشتر از ۲ تا ۳ درصد) استفاده از آب را برای شرب غیرممکن می‌سازد و به‌ناچار باید با فرآیندهایی نظیر تصفیه یا اختلاط با آب شیرین و یا تغذیه مصنوعی بر این مشکل فائق آمد. بنابراین حفاظت منابع آب زیرزمینی یک موضوع اساسی در شرایط افزایش تقاضا و کاهش این منابع می‌باشد. با توجه به اهمیت آب شیرین در این تحقیق به بررسی نفوذ شوری در آبخوان آزاد ساحل مکران و استفاده از تغذیه مصنوعی برای نشان دادن تغییرات حاصل از نفوذ آب شیرین در پسرقت یا پیشرفت گوه شوری^۲ استفاده شده. با توجه به اهمیت آب شیرین در این تحقیق به بررسی نفوذ شوری در بخشی از آبخوان آزاد سواحل مکران و استفاده از تغذیه مصنوعی برای نشان دادن تغییرات حاصل از نفوذ آب داخل آبخوان در پسرقت یا پیشرفت گوه‌شوری استفاده شده که در نهایت مشاهده

^۱ محقق، کارشناسی ارشد عمران

^۲ Salt water wedge

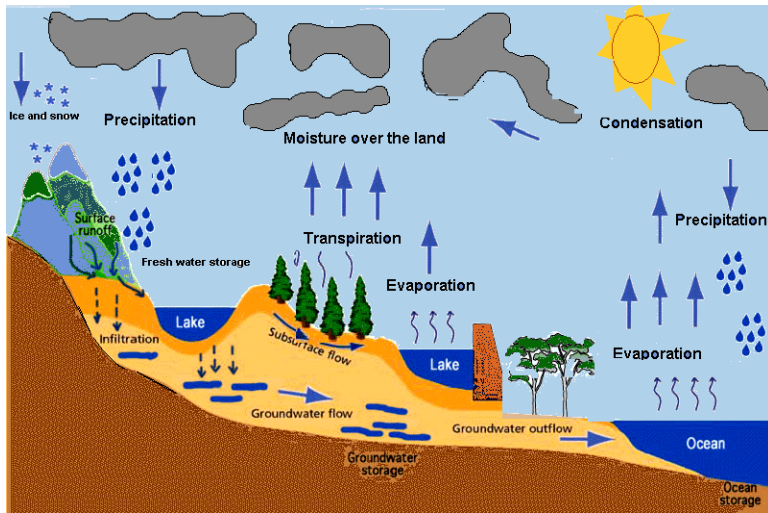
گردید با توجه به پایین بودن میزان بارش و عدم وجود رواناب‌های دائمی روش تغذیه مصنوعی برای مدیریت آبخوان کارآمد نبود و تأثیر کوتاه مدت در پس‌روی آب شور را دارد.

واژه‌های کلیدی

مرز مشترک، نفوذ شوری، ناحیه انتقالی، ناحیه اختلاطی، هد آبخوان

کلیات

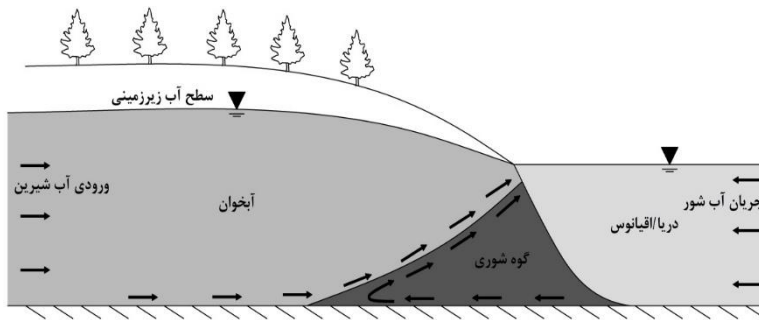
آب زیرزمینی یکی از منابع مهم تأمین آب می‌باشد. این منبع حدود ۲۳ درصد تمام آب شیرین کره زمین را تأمین می‌کند و تأمین ۷۷ درصدی باقی‌مانده توسط یخ‌های قطبی، آب شیرین رودخانه‌ها و دریاچه‌ها صورت خواهد گرفت. آب استخراجی از این منبع به مصرف صنعتی، کشاورزی و شرب رسیده بطوریکه نزدیک به ۳۰ درصد آب شرب مردم دنیا توسط منابع آب زیرزمینی تأمین می‌گردد. اما باوجوداینکه این منبع یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب بوده، همیشه و در هر زمان قابل‌دسترس نمی‌باشد. این امر مخصوصاً در جاهایی که برداشت بی‌رویه از آن سطح آب را بسیار پایین آورده، کاملاً مشهود است.



شکل ۱ - شماتیک چرخه هیدرولوژیکی

در شرایط طبیعی آب‌های زیرزمینی شیرین موجود در سفره‌های آبدار آزاد و یا تحت فشار ساحلی به دریاها یا دریاچه‌ها تخلیه می‌شوند و خط تماس متحرکی بین آب‌های شیرین و شور ایجاد می‌شود. بهره‌برداری سنگین از آبخوان ساحلی بر روی گرادیان هیدرولیکی تأثیر گذاشته و سبب می‌گردد تا آب دریا در فواصل بسیار دوری از ساحل در سفره‌های آب‌های زیرزمینی پیشروی نماید، چنین پدیده‌ای به نام پیشروی آب شور مورد مطالعه قرار می‌گیرد. به‌طور کلی هیدروژئولوژیست‌ها پذیرفته‌اند که حد بین آب شور و شیرین در سفره‌های ساحلی بستگی به تعادل نیروها بر سیستم دینامیکی دارد. به‌طور طبیعی آب شیرین به‌طور غیر منقطع و با سرعتی که بستگی به هد فشار سفره آب نسبت به سطح دریا دارد به سمت دریا حرکت می‌نماید. تا زمانی که بار فشاری آب شیرین در سفره واقع در خشکی حفظ شود آب شیرین به سوی اقیانوس تخلیه شده و ناحیه تماس با آب شور در فاصله مجاور ساحل برقرار خواهد ماند. عملیات پمپ‌زنی در خشکی هد فشاری آب شیرین را کاهش داده و بر اثر تغییر ارتفاع، حرکت آب شیرین به سمت دریا کاهش می‌یابد. اگر شیب این ارتفاع به حد لازم برسد جریان

آب شیرین به سمت مرز مشترک به‌طور کامل قطع خواهد شد. با کاهش جریان آب شیرین سیستم ناپایدار گردیده و آب شور به سمت سفره هجوم خواهد برد، در این حالت جبهه آب شور به سمت خشکی حرکت کرده و تا نقطه‌ای که هد فشار به تعادل برسد جریان خواهد داشت.



تقابل آب شور و شیرین در مقطع طولی یک آبخوان ساحلی

تحقیقات ارائه‌شده مرتبط با نفوذ شوری در آبخوان‌های ساحلی با ارائه روابط تحلیلی توسط گلاور^۱ (Glover, 1959)، وریجت^۲ و به صورت جدی آغاز شده است. در سال‌های بعد یک مدل عددی برای مدل‌سازی پدیده نفوذ شوری در آبخوان‌های همگن ساحلی ارائه نمودند (Liu, 2006). در سال ۲۰۰۲ این محققین از یک شبکه مثلثی بی ساختار به جهت شبکه‌بندی هندسه آبخوان استفاده نمودند. سپس کد عددی توسعه داده‌شده برای مسئله هنری اجرا شده و ارزیابی دقت مدل، با مقایسه با آن انجام پذیرفته است. در سال ۲۰۰۳ آن‌ها به توسعه مدل خود پرداختند اما این بار از شبکه‌های چهار گوشه استفاده نموده و قابلیت مدل را علاوه بر مسئله

Glover^۱

Verruijt^۲

هنری، در حل مسئله انتقال یک آلاینده صنعتی به یک آبخوان آزاد نشان دادند. این محققین در سال ۲۰۰۶ مدل خود را برای یک نمونه آبخوان واقعی در کشور استرالیا برای یک دوره پنج و ده ساله اجرا نموده و توزیع شوری در این آبخوان را با فرض پمپ‌زنی از چاه‌ها در نقاط مختلف نشان دادند. ژانگ^۱ و همکاران (Zhang, 2002: 229-237) به بررسی آزمایشگاهی نحوه انتشار آلاینده با چالی‌های مختلف به داخل یک آبخوان آزاد ساحلی پرداختند. آزمایش‌ها در داخل مخزنی با دانه‌های شیشه‌ای انجام‌شده و تزریق آلاینده از سطح به داخل محیط متخلخل صورت گرفته است. واسنجی ارتباط تصویر و غلظت، با تصویربرداری از همان مواد رنگی با غلظت مشخص انجام‌شده است.

در ارتباط با مطالعاتی که در زمینه کنترل نفوذ شوری انجام‌شده، می‌توان به تحقیق حمیدی و صباغ‌یزدی اشاره نمود (حمیدی، صباغ‌یزدی، ۲۰۰۶). کاربرد مدل‌سازی حجم محدود با شبکه بی ساختار مثلثی را برای تأثیر احداث سد زیرزمینی در کنترل نفوذ شوری به یک آبخوان ساحلی نشان دادند. این محققین همچنین در سال ۲۰۰۸ مدل خود را که تمامی روابط و جداسازی آن‌ها بر اساس روش حجم محدود با شبکه بی ساختار مثلثی بوده، برای چندین مسئله نمونه حل کرده و کاربرد آن را نمایش دادند. سه مثال حل‌شده توسط کد عددی آن‌ها شامل (۱) مسئله هنری، (۲) یک آبخوان آزاد ساحلی با تغذیه از سطح و (۳) یک آبخوان محصور با تعبیه سه چاه در آن به جهت ایجاد یک منطقه نیمه اشباع می‌باشد.

ارائه یک مدل جامع شبیه‌سازی نفوذ شوری با در نظر گرفتن اکثر پارامترهای محیطی تأثیرگذار از جمله موقعیت چاه‌های منطقه و میزان تغذیه‌های طبیعی و همچنین به صورت یک

Zhang^۱

شبیه‌سازی غیرتعادلی^۱ برای یک آبخوان واقعی مهم‌ترین نوآوری تحقیق حاضر به شمار می‌آید. در گام بعدی مدل‌سازی راهکار بیان‌شده برای استفاده از تغذیه مصنوعی و جمع‌آوری سیلاب در کنترل میزان نفوذ شوری نیز بر این نوآوری افزوده است.

روش‌شناسی

مشخصات آبخوان ساحلی مکران

مکران، مکران یا مکوران به فارسی باستان: مَک، از نظر تاریخی سرزمینی ساحلی در جنوب شرقی ایران و جنوب غربی پاکستان است، در طول خلیج عمان از میناب هرمزگان و رأس‌الکوه در غرب کنارک تا لاس بلا در جنوب غربی ایالت بلوچستان پاکستان کنونی گسترده است. کوه‌های خشک و بایر کرانه‌های مکران از دید جغرافیای طبیعی دنباله کویر است، که تا آنجا گسترش یافته. مهم‌ترین درآمد مکران از نیشکر و یک‌گونه شکر سفید موسوم به پانیذ بوده است که از آنجا به سرزمین‌های مجاور صادر می‌گردیده. مطابق نقشه می‌توان گفت مکران تقریباً شامل شهرستان‌های نیک شهر، کنارک، چابهار، ایرانشهر، خاش، سراوان، سرباز، فنوج نصرت‌آباد و زاهدان در ایران و بخش ایالت بلوچستان پاکستان فعلی می‌باشد.

سواحل سوق الجیشی و اقتصادی مکران در طول تاریخ به عنوان یکی از مناطق استراتژیک، نظامی و تجاری برای ایران بوده است. سواحل دریای عمان، عقبه منطقه خلیج فارس در برابر دشمنان فرا منطقه‌ای ایران به حساب می‌آید. همچنین توسعه اقتصاد دریایی جنوب کشور در

^۱Unsteady

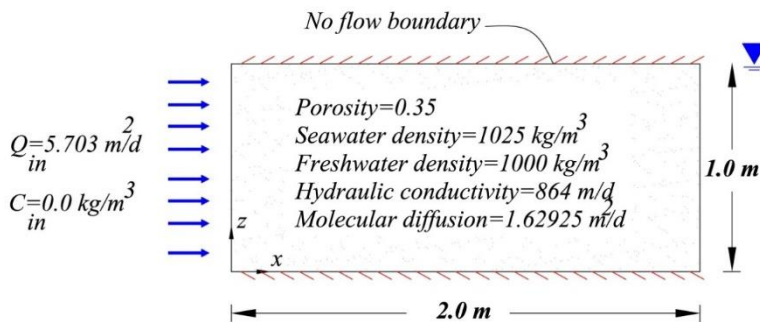
محور چابهار- خرمشهر با تأکید بر سواحل مکران، یکی از سیاست‌های کلی برنامه ششم توسعه است که توسط مقام معظم رهبری ابلاغ شده است. محدوده مطالعات فاز ششم، سواحل ایرانی دریای عمان، واقع در جنوب کشور می‌باشد. این محدوده از خلیج گواتر در مرز ایران و پاکستان شروع شده و تا مرز دو استان سیستان و بلوچستان و هرمزگان ادامه می‌یابد. **Error!** **Reference source not found.** از محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد:



شکل ۱ - محدوده مطالعات فاز ششم (سواحل مکران)

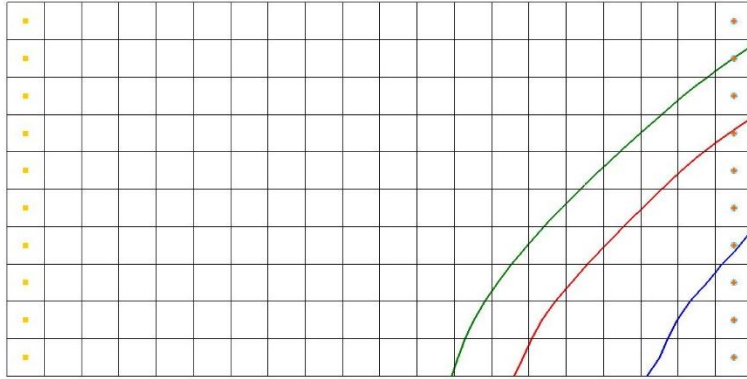
اعتبارسنجی نرم‌افزار سیوات^۱ SEAWAT با مسائل معیار هنری و الدر

قبل از آغاز شبیه‌سازی به جهت اطمینان از صحت خروجی نرم‌افزار سیوات دو مسئله معیار هنری و الدر به شرح زیر مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن در ذیل ارائه می‌شود. مسئله هنری یک مسئله دوبعدی با وجه قائم در سمت دریا و دبی ثابت آب شیرین در سمت خشکی می‌باشد که در آن جریان دائمی با ضریب پخش ثابت برقرار است این مسئله یکی از معروف‌ترین مسائل مرجع در رویکرد جریان اختلاطی می‌باشد. مطابق شکل ۲ این مسئله یک آبخوان - محصور به طول ۲/۰ و ارتفاع ۱/۰ متر را نشان می‌دهد که در بالا و پایین آن دولایه نفوذناپذیر قرار گرفته است.



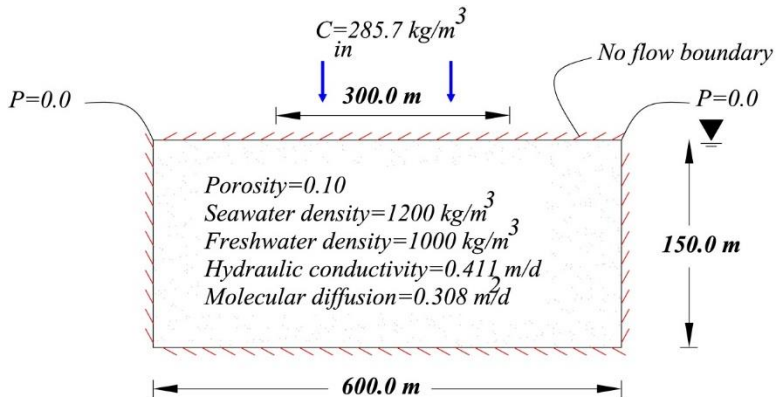
شکل ۲ - مسئله معیار هنری و پارامترها و شرایط مرزی مربوطه

برای صحت‌سنجی نرم‌افزار GMS نسخه 10.1 نمودار خط هم‌غلظت ۵۰٪ مسئله هنری در این پایان‌نامه شبیه‌سازی شده است و همان‌طور که از شکل ۳ مشاهده می‌شود جواب حاصله سازش خوبی با نمودار اصلی دارد.



شکل ۳ - نمودار خط هم‌غلظت ۵۰٪ پس از شبیه‌سازی مسئله هنری در نرم‌افزار GMS10.1

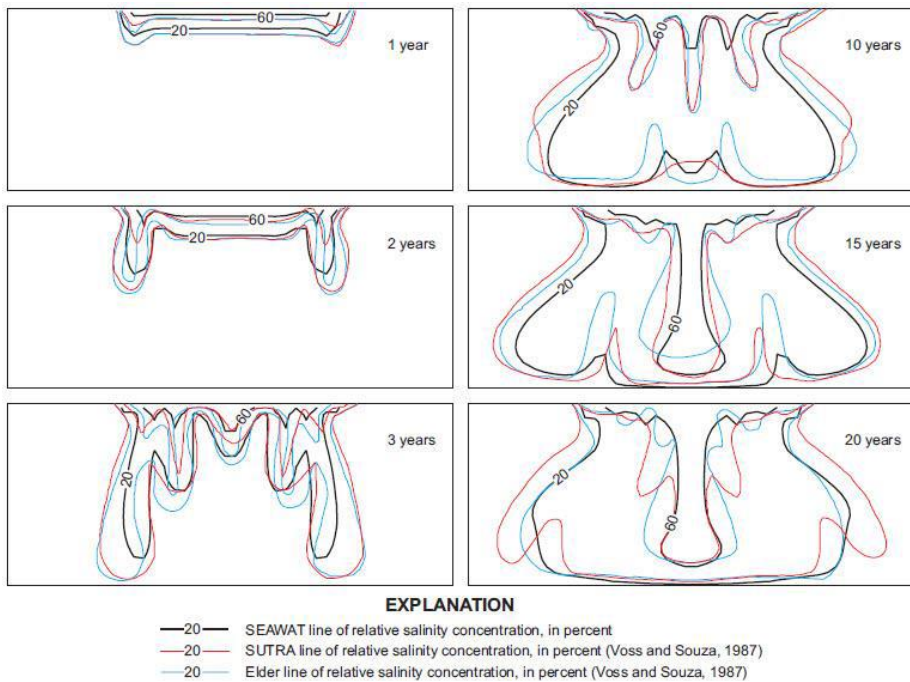
مسئله الدر از سوی دیگر یک مسئله آزمایشگاهی انتقال حرارت می‌باشد که در یک سلول هلی-شاو^۱ انجام پذیرفته و به شکل مسئله انتقال آلاینده اصلاح گردیده است. شکل مسئله الدر و شرایط مرزی آن در شکل زیر نشان داده شده است. مطابق **Error! Reference source not found.** شرط مرزی عدم جریان در چهار وجه این مسئله برقرار است و آلاینده تنها از یک طول ۳۰۰ متری از وجه بالا به محیط وارد می‌شود. ضریب پخش نیز در کل محیط ثابت فرض شده است.



¹ Hele-Shaw cell

شکل ۴ - مسئله معیار الدر و پارامترها و شرایط مرزی مربوطه

غلظت شوری مرتبط به دست‌آمده از سیوات با نتایج SUTRA (Voss & Souza, 1987) در شش زمان مختلف مقایسه شده است و در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است که در آن سیوات نتایج قابل قبولی را تولید نموده است.



شکل ۵ - مقایسه نتایج مسئله الدر در طول زمان

در این نرم‌افزار کمترین چگالی سیال که مربوط به آب شیرین و برابر با 1000 kg/m^3 و بیش‌ترین چگالی سیال که مربوط به آب شور و برابر با 1025 kg/m^3 می‌باشد. همچنین

نسبت چگالی به غلظت برابر با عدد $0/7143$ است. این ضریب با توجه به $DENSEREF^1$ و $DRHODC^2$ که دو پارامتر ورودی مهم در این شبیه‌سازی هستند به دست می‌آید. مقدار 1000 برای $DENSEREF$ نشان‌دهنده چگالی سیال محیط است. در اینجا چگالی آب شیرین در 25 درجه سانتی‌گراد که برابر 1000 kg/m^3 است. مقدار $0/7143$ برای $DRHODC$ نشان‌دهنده این است که چگالی به‌طور خطی بین 1000 kg/m^3 آب شیرین و 1025 kg/m^3 آب شور متغیر خواهد بود. مقدار $DRHODC$ بر اساس تقسیم تفاوت چگالی آب شور و آب شیرین بر تفاضل غلظت آب شور و آب شیرین حاصل می‌شود.

داده‌های موردنیاز جهت انجام شبیه‌سازی

چاه‌های منطقه

یکی از مهم‌ترین علل نفوذ شوری در آبخوان ساحلی برداشت بی‌رویه از چاه‌ها می‌باشد که به مصارف مختلفی خواهد رسید. وجود تعداد چاه‌های بی‌شمار در آبخوان ساحلی مکران نیز موید این مطلب می‌باشد. اطلاعات اخذشده از چاه‌های محدوده طرح، حاوی اطلاعات زیادی

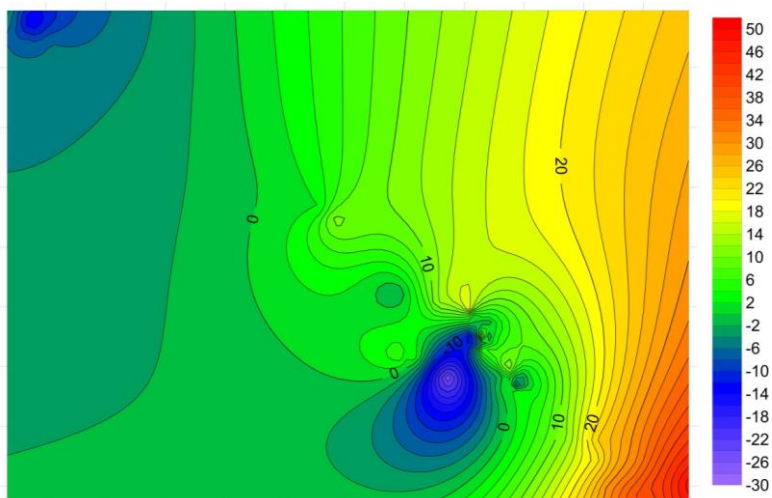
¹ Reference fluid density

² Density/Conc.slope

بوده است که اطلاعات موردنیاز برای این تحقیق شامل موارد عمق چاه‌ها و میزان دبی برداشت سالیانه می‌باشد. اکثر چاه‌های منطقه از نوع چاه نیمه عمیق بوده و از ساحل فاصله گرفته‌اند، این امر مؤید این مطلب است که احتمالاً بسیاری از چاه‌های منطقه که در نزدیکی ساحل بوده‌اند، به علت شدت شوری قابل‌استفاده نمی‌باشند. به علت زیاد بودن تعداد شبکه‌های ایجادشده در نرم‌افزار، وارد کردن تمامی چاه‌ها غیرممکن بوده به همین دلیل آن‌ها را به چند کلونی تقسیم کرده و جمع دبی آن‌ها را وارد مدل کرده‌ایم.

تراز آب زیرزمینی

تراز آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که به عنوان ورودی باید به نرم‌افزار سیوات معرفی گردد. از آنجایی که سیوات تنها خاک اشباع را شبیه‌سازی می‌نماید. تراز آب زیرزمینی ملاک ضخامت آبخوان در نواحی مختلف نیز می‌باشد. مبنای تراز آب زیرزمینی، تراز متوسط آب‌های آزاد می‌باشد که صفر متر لحاظ می‌گردد. تراز آب زیرزمینی مربوط به منطقه مطالعاتی از **Error! Reference source not found.** جداشده. همان‌طور که دیده می‌شود به علت برداشت بیش از حد از آبخوان، نواحی‌ای که تجمع چاه‌های منطقه زیاد می‌باشد، افتادگی قابل‌ملاحظه‌ای در سطح ایستایی دیده می‌شود.



شکل ۶ - خطوط هم تراز آب زیرزمینی (واحد متر) با استفاده از اطلاعات موجود در کل منطقه

هدایت هیدرولیکی

این ضریب پارامتر مهمی است که باید مقدار آن در شبیه‌سازی عددی مشخص باشد. تعیین این ضریب در آزمایشگاه توسط آزمایش‌های رایج نفوذ سنج با هد ثابت، افتان یا دبی ثابت صورت می‌گیرد. روابط تجربی زیادی نیز برای محاسبه مقدار این ضریب بر پایه دانه‌بندی ذرات ارائه شده که معروف‌ترین آن رابطه کوزنی-کارمن^۱ به شرح زیر می‌باشد:

$$K = \frac{g}{\nu} \times 8.3 \times 10^{-3} \left[\frac{n^3}{(1-n)^2} \right] d_{10}^2$$

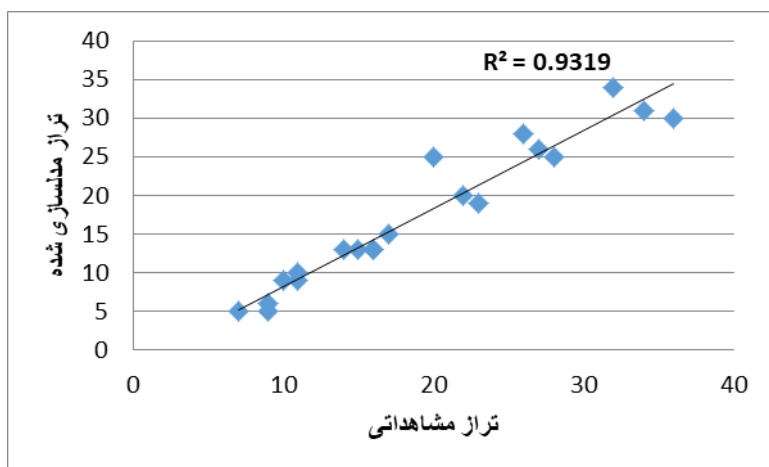
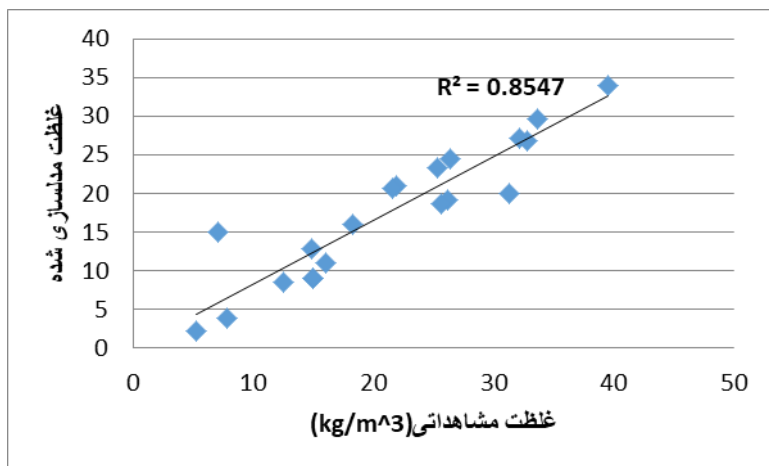
^۱ Kozeny- Carmen Equation, proposed by Kozeny (1927) and modified by Carmen (1937, 1956)

یافته‌ها (تجزیه و تحلیل داده‌های کمی یا کیفی)

در راستای اهداف تعریف‌شده برای این تحقیق، ابتدا به نحوه مدل‌سازی در سیوات پرداخته و صحت‌سنجی نتایج خروجی از آن مورد بحث قرار می‌گیرد. در ادامه برای شبیه‌سازی وضع موجود حاکم بر آبخوان مکران، نتایج به‌دست‌آمده از اجرای طولانی مدت مدل برای رسیدن به جریان دائمی ارائه خواهد شد. سپس با انجام اجرای غیردائمی مدل، کارایی روش ارائه‌شده در این تحقیق (تغذیه مصنوعی) مورد بحث قرار گرفته و در انتها راهبرد تغذیه مصنوعی برای جلوگیری یا کند کردن روند پیشروی شوری در آبخوان مورد مطالعه بررسی می‌گردد.

اعتبارسنجی

به دلیل آنکه برای بسیاری از پارامترهای دخیل در این مسئله، مقدار مشخصی در دسترس نبوده، نیاز است که در شروع حل برای آن‌ها مقداری متناسب با وضعیت منطقه فرض نمود. از آنجایی که توزیع غلظت شوری مهم‌ترین خروجی این نرم‌افزار می‌باشد، تلاش شده که با تغییر برخی از پارامترهای تأثیرگذار که مقدار مشخصی نداشته‌اند، بیش‌ترین هم‌پوشانی بین خروجی مدل و توزیع شوری وضع موجود (به‌دست‌آمده از چاه‌های منطقه) حاصل گردد. بر طبق اشکال شماره ۷ اعتبارسنجی برای مقدار شوری مدل‌سازی شده و مشاهداتی به ترتیب برای ۲۰ حلقه چاه در منطقه قابل مشاهده است. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود نرم‌افزار در حد قابل قبولی مقدار شوری را پیش‌بینی نموده است.



شکل شماره ۷ - اعتبارسنجی دبی و تراز مدل شده چاه‌ها با مقادیر مشاهداتی

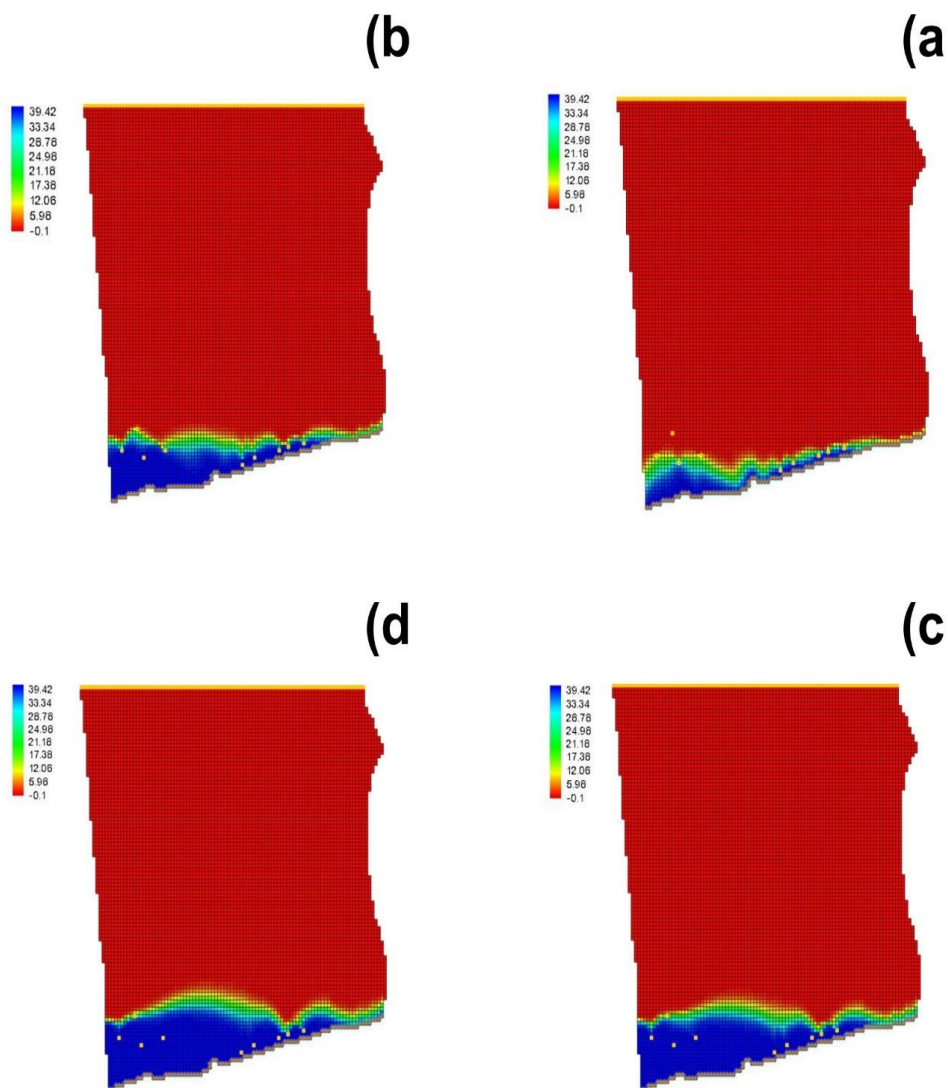
کل زمان شبیه‌سازی نیز در یک فرایند سعی و خطایی به دست آمده است. از آنجایی که آبخوان باید ابتدا برای یک جریان دائمی شبیه‌سازی می‌شد، مدل باید تا زمانی اجرا می‌گشت که در دو گام زمانی متوالی تغییرات شوری در یک سلول به وجود نیاید و همچنین این توزیع شوری از توزیع غلظت وضع موجود نیز پیروی نماید. این مدل پس از گذشت زمان نزدیک به ۲۰۰ سال به حالت دائمی رسیده که بیش‌ترین تطابق را با وضع موجود داشته است.

نتایج حاصل از اجرای دائمی مدل

توزیع شوری

توزیع شوری در فواصل زمانی مختلف در اشکال زیر نشان داده شده است. با توجه به پراکندگی چاه‌ها، نرخ شوری از ساحل با سرعت بیشتری به سمت آبخوان به جلو رفته به‌طورکلی بیش‌ترین نفوذ شوری در پایان شبیه‌سازی در این منطقه رخ داده است. همچنین بررسی این اشکال نشان می‌دهد که نفوذ شوری در سال‌های ابتدایی شبیه‌سازی با سرعت بیشتری به سمت آبخوان پیش‌رفته و در سال‌های انتهایی نرخ نفوذ شوری محسوس نمی‌باشد.

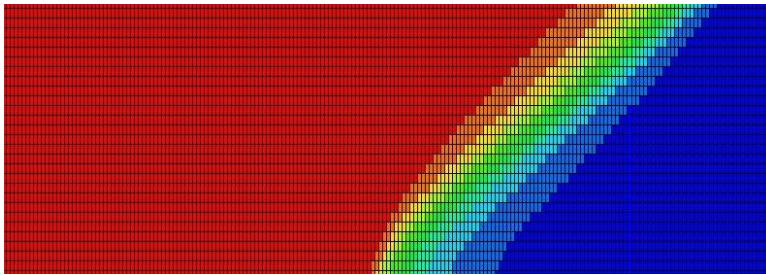
برای رسیدن به یک راهکار برای کنترل نفوذ شوری ابتدا نیاز است شرایط حال حاضر منطقه بررسی شود، که برای این کار با توجه به اطلاعات به‌دست‌آمده از سال‌های گذشته شرایط کنونی و میزان پیشروی آب دریا شبیه‌سازی شده است. با توجه به اهمیت سواحل مکران و در نظر گرفتن بهره‌برداری‌های نظامی و یا اقتصادی و تفریحی در منطقه و رفع نیاز به آب شیرین با استخراج از آبخوان در یک بازه زمانی ۲۰ ساله آبخوان شبیه‌سازی گردیده، که بر طبق شکل ۸ مشاهده گردیده که آب دریا به سمت آبخوان هجوم آورده. همچنین اگر زمان تست افزایش داده شود شاهد نفوذ بیشتر هستیم و شاهد شور شدن آبخوان خواهیم بود.



شکل ۸- توزیع شوری، (a) حال حاضر منطقه مورد مطالعه (از گذشته دور تا سال ۱۳۹۵)، (b) پس از گذشت ۵ سال،

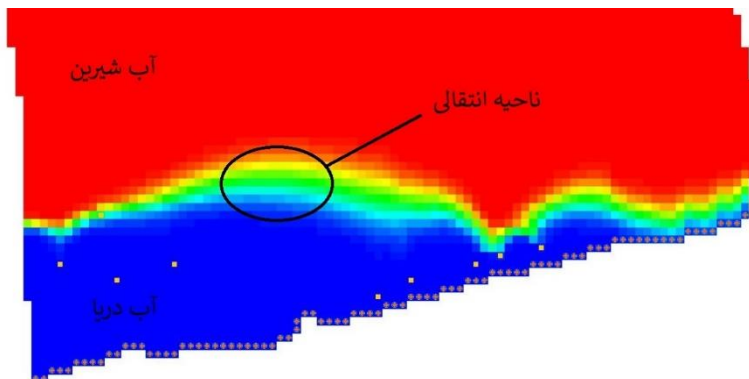
(c) پس از گذشت ۱۰ سال، (d) پس از گذشت ۱۰ سال، بعد از بهره‌برداری از منطقه

توزیع شوری در تمامی اشکال فوق برای لایه آخر نشان داده شده است. بر پایه قرارگیری لایه چگال‌تر بر روی لایه‌های سبک‌تر، اصولاً باید نفوذ شوری در لایه‌های پایینی بیشتر از لایه‌های بالایی باشد و در مقطعی از هر آبخوان باید گوه شوری شکل بگیرد که پنجه این گوه در لایه زیرین قرار دارد. در شکل برش عرضی برای نشان دادن گوه شوری آورده شده است.



شکل ۹- نمایش برش عرضی گوه شوری در آبخوان

ناحیه انتقالی در نفوذ شوری به ناحیه‌ای گفته می‌شود که میزان شوری در آن از شوری آب دریا تا آب شیرین تغییر می‌کند. در شکل ۱۰ ضخامت ناحیه انتقالی نشان داده شده است. این ناحیه در قسمت‌های مرکزی آبخوان با توجه به نفوذ قابل توجه شوری از ضخامت کمتری برخوردار است و بالعکس در نواحی که نفوذ شوری قابل توجه نبوده از ضخامت بسیار بیشتری برخوردار می‌باشد.

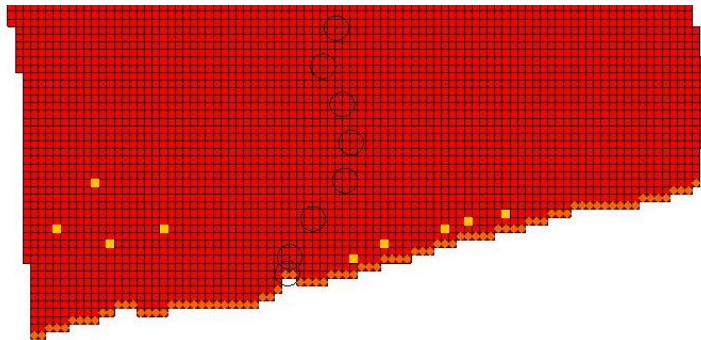


شکل ۱۰ - وضعیت نفوذ شوری

به علت بالا بودن متوسط دما و وزش بادهای موسمی، میزان تبخیر در این استان زیاد است و به طور متوسط چهار میلی متر در روز گزارش شده است بارندگی عمدتاً در ماه های زمستان صورت می گیرد. به طور متوسط در هفت ماه از سال در این ناحیه اثری از باران مشاهده نمی شود. میزان بارندگی از طرف شرق به غرب استان افزایش می یابد. متوسط سالیانه بارندگی آن حدود هفتاد میلی متر و بسیار نامنظم است.

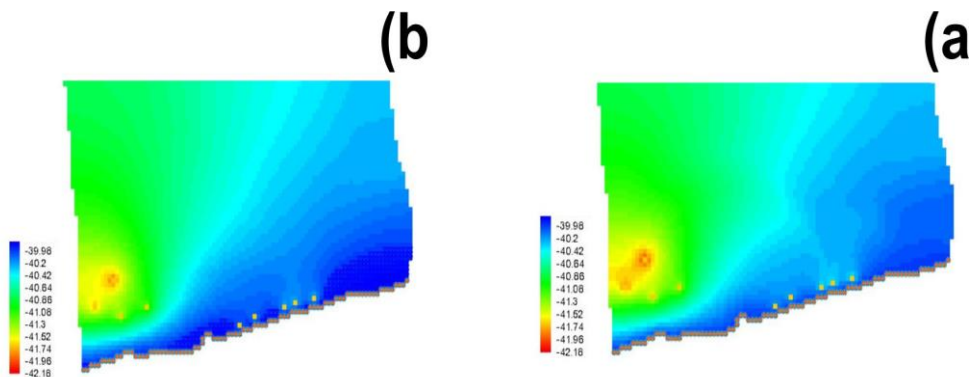
کنترل نفوذ شوری در آبخوان آزاد ساحلی مکران

جهت کنترل نفوذ شوری روش های مختلفی وجود دارد. این روش ها بسته به منبع آب شور، وسعت نفوذ، زمین شناسی ساحل، نوع استفاده از آب و فاکتور اقتصادی در آبخوان ها متفاوت خواهد بود. اصلاح الگوی پمپ زنی، تغذیه مصنوعی، حائل استخراجی و تزریقی و سد زیرزمینی پنج روش متداول کنترل می باشند. در این آبخوان ساحلی نظر به وسعت نفوذ شوری و عدم بارندگی قابل توجه بحث کنترل نفوذ از اهمیت بالایی برخوردار است. در روش تغذیه مصنوعی به علت شرایط توپوگرافی منطقه مورد مطالعه و نبود رودخانه دائمی برای احداث سد برای جمع آوری سیلاب به منظور تغذیه آبخوان از احداث چاله هایی استفاده کرده ایم. این چاله ها را در سلول ها به صورت دریاچه ای با طول و عرض 30 متر و عمق 30 متر و عمق ۲ متر که معادل حجم ۱۸۰۰۰۰۰ لیتر آب می باشد تعریف کردیم.



شکل ۱۱ - موقعیت حوضچه‌های جمع‌آوری سیلاب برای تغذیه مصنوعی

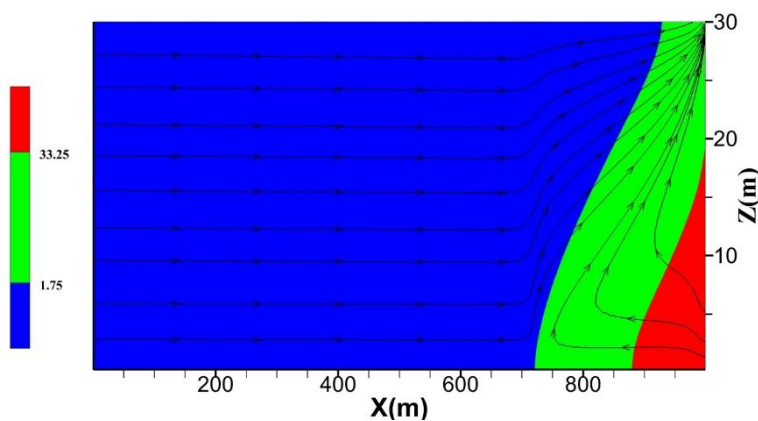
مقدار زمان اجرای غیردائمی را برای این مدل ده روز در نظر گرفتیم و نتایج آن با حالت پایدار مقایسه شده، در **Error! Reference source not found.** تراز آب زیرزمینی در حالت پایدار آورده شده و سپس تراز آب پس از گذشت ده روز از آغاز تغذیه مصنوعی نمایش داده شده است، همین طور که در شکل مشخص است تراز آب بهبود خوبی داشته است، می‌توان مشاهده کرد که هد آب بعد از تغذیه مصنوعی مجدد افزایش یافته است که این امر باعث جلوگیری از پیشروی آب شور به داخل آبخوان می‌شود.



شکل ۱۲ - (a) هد آب در شرایط پایدار بعد از بهره‌برداری آبخوان، (b) هد آب بهبودیافته پس از اتمام تغذیه مصنوعی

بررسی حرکت جریان‌های آب شور و آب شیرین داخل آبخوان

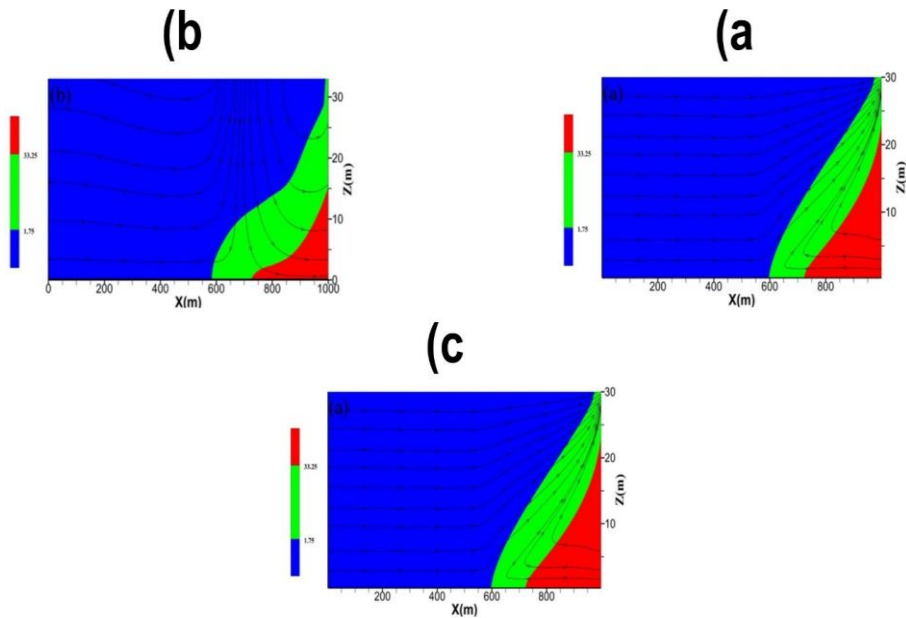
برای مشاهده روند حرکت آب در آبخوان با استفاده از نرم‌افزار^۱ به تحلیل آن پرداختیم که با بررسی جریان در حالت پایدار مشاهده می‌کنیم که آب شیرین به سمت دریا حرکت کرده و از سیستم خارج می‌شود و به دریا می‌ریزد اما آب شور ابتدا به داخل آبخوان آمده و تا جایی که بتواند داخل آبخوان نفوذ کرده و پس از برخورد با آب شیرین تغییر جهت داده و دوباره به دریا می‌ریزد.



شکل ۱۳ - نمودار روند حرکت آب شور و شیرین در حالت دائمی

در زمانی که آبخوان با آب شیرین به صورت مصنوعی تغذیه می‌شود، مشاهده می‌کنیم که شرایط تغییر کرده و در زمان‌های ابتدایی اجازه ورود آب شور به سیستم را نمی‌دهد و باعث عقب رفت گوه‌شور می‌شود و پس از پایان آب دریاچه دوباره آب دریا وارد سیستم می‌شود.

^۱TECPLOT



شکل ۱۴ - نمودار روند نفوذ شوری در زمان‌های مختلف، (a) در زمان پایدار، (b) ابتدای تغذیه و (c) انتهای زمان تغذیه

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در ابتدا مشاهده شده که نفوذ آب دریاچه‌ها یا چاله‌ها با ارتفاع آبخوان نسبت مستقیم دارد. همان‌طور می‌دانیم آب حاصل از تغذیه مصنوعی تمایل به خروج از سیستم و زهکشی به داخل دریا دارد و در صورت زیاد بودن ارتفاع آبخوان با توجه به ثقلی بودن حرکت آب و جریان آب شیرین به سمت دریا، آب دریاچه قبل از تأثیرگذاری بر شوری از سیستم خارج شده است. البته هرچه فاصله دریاچه‌ها از دریا بیشتر باشد، تغذیه مصنوعی تأثیری بیشتری بر گوه‌شوری خواهد گذاشت.

در این تحقیق ابتدا با توجه به اطلاعات اخذشده از سازمان‌های مربوطه و با استفاده از اطلاعات زمان‌های گذشته و شرایط حال حاضر به مدلی پایدار با شرایط موجود رسیده و

سپس با در نظر گرفتن بهره‌برداری از منطقه و استفاده از ساحل با احداث پایگاه‌های نظامی و یا مناطق اقتصادی و مسکونی همچنین نیاز به آب آشامیدنی با برداشت بی‌رویه از آبخوان، شرایط جدید در بازه‌های زمانی پنج، ده و بیست سال در حالت پایدار شبیه‌سازی شد و مشاهده گردید که با بهره‌برداری از منطقه و استفاده از آب زیرزمینی به علت شرایط آب و هوایی و بارش کم در استان سیستان و بلوچستان آب دریا با سرعت زیادی به سمت آبخوان نفوذ کرده و آب آبخوان شور کرده. با توجه به سرعت نفوذ شوری در این آبخوان عملاً چاه‌ها به علت شور شدن آب کارایی خود را از دست خواهند داد و آب در اکثر مناطق ساحلی قابل آشامیدن نمی‌باشد.

در مناطقی که هدایت هیدرولیکی خاک کمتر است نفوذ کمتری صورت گرفته و آب شور در جاهایی که خاک دارای هدایت هیدرولیکی بیشتری است با سرعت بیشتری به داخل آب نفوذ کرده است. برای ارائه راهبرد برای کنترل یا پسرقت آب شور در این تحقیق از روش تغذیه مصنوعی استفاده شده است. در این منطقه به علت عدم وجود مکان مناسب برای احداث یک سد کوتاه و یا آبراه‌ای دائمی یا فصلی برای انتقال آب آن برای تغذیه مخزن به منظور نفوذ آب شیرین برای کنترل شوری آبخوان از چاله‌ایی برای جمع‌آوری سیلاب باران‌های موسمی فصلی استفاده شده است. اجرای مدل ناپایدار برای تغذیه مصنوعی در این تحقیق ده روز در نظر گرفتیم، در این مدل مشاهده گردید که هد آبخوان بهبود یافت و حالت اولیه نزدیک شد، با افزایش هد آبخوان نسبت به هد دریا و همچنین چگالی آب، مقداری از شوری باید به عقب بازگردد ولی با اتمام آب موجود در چاه‌ها و اتمام نفوذ آب شیرین به داخل آبخوان شاهد بازگشت آب دریا درون آبخوان خواهیم بود. در نتیجه این روش در این منطقه با توجه به تبخیر زیاد، بارش کم و نبود رودخانه‌ای دائمی همچنین برداشت و استفاده از

آبخوان برای مصارف کشاورزی، صنعت و آشامیدن راهبردی دائمی نبوده و نیاز به بهره‌گیری از روش‌های دیگر می‌باشد. همچنین با مطالعه بر روی ناحیه انتقالی بر این پژوهش مشخص شده است که تغذیه مصنوعی باعث افزایش ضخامت این محدوده به علت اختلاط آب جمع‌آوری شده از سیلاب با گوه شوری شده است.

تحلیل نتایج نشان می‌دهد که احداث چاله برای جمع‌آوری رواناب‌های سطحی و تغذیه آن‌ها به داخل آبخوان به منظور تغذیه مصنوعی برای کمک به عدم پیشروی یا عقب راندن گوه‌شوری در آبخوان‌های ساحلی به علت کم باران بودن و خشک بودن منطقه راهبردی مناسب برای مبارزه با شوری آبخوان نمی‌باشد و با ادامه برداشت از آبخوان در آینده نزدیک امکان استفاده از آبخوان غیرممکن می‌شود. همچنین مشاهده گردید به علت نزدیک بودن منابع تغذیه مصنوعی به دریا مقدار کمی از آب به داخل آبخوان نفوذ کرده و بخش زیادی از آن بدون نفوذ به داخل آبخوان به دریا می‌ریزد. در نتیجه در صورت استفاده از این روش باید مخزن تغذیه مصنوعی را دقیق بر روی گوه‌شوری که در شبیه‌سازی در حالت پایدار به دست آمده احداث گردد.

منابع

- Abdul-Wahab, S. A., Al-Hinai, H., Al-Najar, K. A., & Al-Kalbani, M. S. 2007. Fog water harvesting: quality of fog water collected for domestic and agricultural use. *Environmental Engineering Science*, 24(4), 446-456.
- Algarni, S. 2018. Assessment of fog collection as a sustainable water resource in the southwest of the Kingdom of Saudi Arabia. *Water and environment journal*, 32(2), 301-309.

- Alizadeh, A. 2010. Principle of Applied Hydrology. Emam Reza University Press, 650p. (In Persian)
- Bardi Sheikh, V., Jafari Shalamzari, M. and Gholami, A. 2018. Principles and methods of traditional and modern water harvesting. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources Press, 444 pp. (In Persian)
- Batisha, A. F. 2015. Feasibility and sustainability of fog harvesting. Sustainability of water quality and ecology, 6, 1-10.
- Gandhidasan, P., Abualhamayel, H. I., & Patel, F. 2018. Simplified Modeling and Analysis of the Fog Water Harvesting System in the Asir Region of the Kingdom of Saudi Arabia. Aerosol and Air Quality Research, 18, 200-213.
- Ghazanfari, M.S., Alizadeh, A., Naseri, M., and Mousavi Baygi, M. 2010. Dynamical Assessment of Fog Harvesting Based on Fractal Theory. J. Water Soil. 3: 527-533. (In Persian)
- Karimpour Reihan, M., Alizadeh, M. and Kamalian, S. 2017. Selection of suitable sites for water harvesting from air humidity in Bushehr province using GIS. Journal of Geography and Regional Planning, 7(1): 43-51. (In Persian)
- Mahmoudi, P., Khajeh Amiri Khaledi, Ch. and Salari Fanodi, M.R. 2016. Examining the feasibility of water harvesting from air humidity in the Southern province of Sistan and Baluchestan. J. of Water and Soil Conservation, 23(2): 253-265.
- Marloth, R. 1903. Results of experiments on Table Mountain for ascertaining the amount of moisture deposited from the south-east clouds. Transactions of the South African Philosophical Society, 14(1), 403-408.

- Marzol, M. V., & Sánchez, J. 2008. Fog water harvesting in Ifni, Morocco. An assessment of potential and demand. *Die Erde*, 139(1-2), 97-119.
- Mousavi-Baygi, M., and Shabanzadeh, S. 2008. Design and construction of an apparatus for fog and cap cloud collection (A new method of water harvesting). *Agricultural Sciences and Technology (Special Issue in Water and Soil)*, 1: 2-11. (In Persian)
- Morichi, G., Calixto, L. B., & Zanelli, A. 2018. Novel Applications for Fog Water Harvesting. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 6(03), 26.
- Olivier, J. 2002. Fog-water harvesting along the West Coast of South Africa: A feasibility study. *Water Sa*, 28(4), 349-360.
- Qadir, M., Jiménez, G., Farnum, R., Dodson, L., & Smakhtin, V. (2018). Fog water collection: Challenges beyond technology. *Water*, 10(4), 372.
- Shi, W., Anderson, M. J., Tulkoff, J. B., Kennedy, B. S., & Boreyko, J. B. 2018. Fog Harvesting with Harps. *ACS applied materials & interfaces*.
- Yi, S., Wang, J., Chen, Z., Liu, B., Ren, L., Liang, L., & Jiang, L. (2019). Cactus Inspired Conical Spines with Oriented Microbarbs for Efficient Fog Harvesting. *Advanced Materials Technologies*.
- Wen, C., Guo, H., Bai, H., Xu, T., Liu, M., Yang, J., ... & Zhang, L. (2019). Beetle-Inspired Hierarchical Antibacterial Interface for Reliable Fog Harvesting. *ACS applied materials & interfaces*, 11(37), 34330-34337.
- Li, C., Liu, Y., Gao, C., Li, X., Xing, Y., & Zheng, Y. (2019). Fog Harvesting of a Bioinspired Nanocone-Decorated 3D Fiber Network. *ACS applied materials & interfaces*, 11(4), 4507-4513.
- Zhong, L., Feng, J., & Guo, Z. (2019). An alternating nanoscale (hydrophilic–hydrophobic)/hydrophilic Janus cooperative copper mesh

fabricated by a simple liquidus modification for efficient fog harvesting.
Journal of Materials Chemistry A, 7(14), 8405-8413.

