

Modeling and determining the limit of salt water intrusion in a desert aquifer (case study: Sarayan plain)

S. Jam^۱, M. Akbarian^{۲*},

مدلسازی و تعیین حد اینترفاز هجوم آب شور در آبخوان کویری

(مطالعه موردی: دشت سرایان)

سحر جم^۱، محمد اکبریان^{۲*}

Abstract

Today, one of the problems of water resources is the invasion of salt water into fresh aquifers due to increased productivity and developments. This research has physically and qualitatively investigated the exploitation status of Sarayan Plain due to the advance of salt water from the desert. In this part of the mentioned plain, with the continuation of the current process of withdrawal from underground water resources and the scenarios of reducing and increasing the amount of productivity, it has been simulated and predicted. For this purpose, MODFLOW model was used to simulate the quantitative situation of the aquifer. Then, using the MT3DMS package, the qualitative model of saltwater invasion was simulated and predicted using the SEAWAT model. Quantitative modeling results showed that the highest saltwater intrusion occurred in the southeastern region of the aquifer at a level of ۷۰ meters. And the concentration of salt in productivity wells has increased by ۱۶۰ mg. On the other hand, the results of the scenarios showed that with a ۵% reduction in the pumping of wells, it will reduce the invasion of salt water fronts by ۷۰۰ meters, reduce the advance of salt water by ۱۲۰۰ meters, and increase the salt concentration by ۶۴ mg/liter. On the other hand, a ۱۵% decrease in extraction from these wells will be due to a drop in the water level to ۶۰ meters and an increase in salt concentration to ۸۲ mg/liter.

Keywords: Groundwater, Saltwater and Freshwater Interaction, Modeling, MODFLOW, MT3DMS, SEAWAT.

Received: April ۲, ۲۰۲۴

Accepted: May ۱۹, ۲۰۲۴

^۱. MSc., Civil Engineering Department, Ale-Taha Institute of Higher Education, Tehran, Iran.

^۲. Assistant Professor, Civil Engineering Department, Ale-Taha Institute of Higher Education, Tehran, Iran. Email:

m.akbarian@aletaha.ac.ir

چکیده

امروزه یکی از مشکلات منابع آب، تهاجم آب شور به آبخوان‌های شیرین، به دلایل افزایش بهره‌وری و توسعه‌های انجام شده است. این تحقیق وضعیت بهره‌برداری از دشت سرایان در اثر پیشروی آب شور از کویر را به صورت فیزیکی و کیفی مورد بررسی قرار داده است. در این بخش دشت مذکور با ادامه روند کنونی برداشت از منابع آب زیرزمینی و سناریوهای کاهش و افزایش مقدار بهره‌وری، شبیه‌سازی و پیش‌بینی شده است. به این منظور برای شبیه‌سازی وضعیت کمی آبخوان، از مدل MODFLOW استفاده شد. سپس با استفاده از بسته مدل MT3DMS مدل کیفی تهاجم آب شور و با استفاده از مدل SEAWAT، شبیه‌سازی تهاجم جبهه‌های آب شور، شبیه‌سازی و پیش‌بینی شد. نتایج مدل‌سازی کمی نشان داد بیشترین تهاجم آب شور، به میزان ۷۰ متر در منطقه جنوب‌شرقی آبخوان رخ داده است و غلظت نمک در چاه‌های بهره‌وری به میزان ۱۶۰ میلی‌گرم افزایش داشته است. از طرفی نتایج سناریوها نشان داد که با کاهش ۵ درصدی پمپاژ چاه‌های بهره‌بردار، کاهش تهاجم جبهه‌های آب شور به مقدار ۷۰۰ متر، کاهش روند پیشروی آب شور به مقدار ۱۲۰۰ متر و افزایش غلظت نمک به میزان ۶۴ میلی‌گرم در لیتر خواهد بود. از طرف دیگر کاهش ۱۵ درصدی برداشت از این چاه‌ها، باعث افت سطح آبخوان به مقدار ۶۰ متر و افزایش غلظت نمک به میزان ۸۲ میلی‌گرم در لیتر خواهد بود.

کلمات کلیدی: آب زیرزمینی، تداخل آب شور و آب شیرین، مدل‌سازی، MODFLOW، MT3DMS، SEAWAT. تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱/۱۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۲/۳۰

^۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی لطه، تهران، ایران.

^۲. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی لطه، تهران، ایران.

ایمیل: m.akbarian@aletaha.ac.ir

* نویسنده مسئول

مقدمه

یافت (کمالی و نیک‌سخن، ۱۳۹۶). محققین در سال ۲۰۱۵ جهت تعیین سطح آب زیرزمینی و تشخیص کیفیت آب در آبخوان منطقه‌ای شهری از مدل‌های SWAT، MODFLOW و MT³D استفاده کردند. سناریوهای نمک‌زدایی، برداشت آب سطحی و تصفیه فاضلاب را به‌عنوان راهکارهای چاره‌گر مورد مطالعه قرار دادند. نتایج بیانگر این موضوع است که سناریوی شیرین‌سازی آب بیشترین تأثیر را خواهد داشت (Tamer Eshtawi et al., ۲۰۱۶). در مطالعه دیگری مولیگان و همکاران تأثیر جزر و مد بر روی سطح آب شور وارد شده به آب زیرزمینی شیرین را با استفاده از نرم‌افزار SEWAT مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان‌دهنده این است تنها اگر سطح مشترک آبخوان و آب‌های اقیانوس شیب داشته باشند، هر یک از گزینه‌های مرزی مناسب خواهد بود. با این وجود زمانی که شیب رابط دریا و آب زیرزمینی کاهش یافت، رویکردهای PBC ضعیف عمل کرده و مرز GHB، بهتر مشخص شده است (Ann E. Mulligen et al., ۲۰۱۱). در سال ۲۰۱۸ چانگ و همکاران به منظور شبیه‌سازی نفوذ آب شور به آبخوان ساحلی در جنوب خلیج لیژو یک مدل دو بعدی را شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که سطح آب زیرزمینی در منطقه شور حدود ۱/۸ متر در آخر دوره افت داشته است و تا انتهای دوره پیش‌بینی نیز افزایش خواهد یافت. از طرفی به مقدار ۱۰۵ میلی‌گرم بر لیتر شاخص غلظت شوری نیز افزایش داشته است (Chang et al., ۲۰۱۸). از سوی دیگر ژو و همکاران به‌وسیله مدل SEWAT نفوذ آب دریا به آبخوان کارستی را با شبکه‌های

پیشینه مطالعات صورت گرفته با توجه به هدف این مطالعه که ارائه یک چارچوب کاربردی برای شناسایی میزان تهاجم جبهه‌های آب شور در آبخوان‌ها و پیشنهاد دادن یک راهکار مناسب به منظور کاهش میزان تهاجم است، به دو بخش تقسیم شد. بخش اول با استفاده از مدل MT³D به ارزیابی وضعیت کیفی منابع آب پرداخته است. بخش دوم که با استفاده از مدل SEAWAT انجام گرفت، به ارزیابی اثر تهاجم جبهه‌های آب شور و مدل‌سازی آن پرداخته است. زمزم و رهنما برای بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت رفسنجان از مدل کیفی و کمی MODFLOW و MT³DMS استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی حاکی از افزایش پارامترهای مختلف در آب‌های زیرزمینی این دشت در گذشته و آینده است (زمزم و رهنما، ۱۳۹۱). بهرامی و همکاران نیز با استفاده از مدل‌های MODFLOW و MT³D وضعیت کمی و کیفی آبخوان خزل واقع در استان همدان را در دو حالت جریان ماندگار و غیرماندگار شبیه‌سازی کردند. نتایج بیانگر این است که در نقاط مختلف شعاع تأثیر چاه‌های فاضلاب حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ متر است (بهرامی و همکاران، ۱۳۹۵). در مطالعه کمالی و نیک‌سخن با استفاده از مدل ترکیبی که شامل مدل‌های SWAT، MODFLOW و MT³DMS است، وضعیت پایداری آبخوان را در حوضه مطالعاتی اصفهان - برخوار شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد شاخص پایداری کمی و کیفی در اکثر نقاط با کاهش ۳۰ درصدی بهره‌برداری از آبخوان به‌طور قابل‌توجهی بهبود خواهد

در صورتی که توابع تغذیه یا تخلیه از طریق لایه محبوس‌کننده، تبخیر و تعرق از سطح آب و تغذیه طبیعی یا مصنوعی ممکن است به شکل یکنواخت توزیع شود یا نسبت به زمان و مکان در آبخوان تغییر نماید. در این حالت تابع عمومی W به معادله اضافه می‌شود. معادله جریان در فضای دوبعدی و برای آبخوان آزاد به صورت زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial X} (Kh \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (Kh \frac{\partial h}{\partial y}) = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \pm W \quad (3)$$

ΔX و ΔY جهت افق، ΔZ جهت قائم و S_y آبدهی ویژه را نشان می‌دهد.

واسنجی ماندگار

در حالت واسنجی ماندگار و در خصوص مدل‌سازی آب زیرزمینی، پارامتر هدایت هیدرولیکی برای واسنجی مدل کمی انتخاب شد و به‌عنوان مقدار اولیه در محاسبات وارد شد. این مقدار دارای دقت کمی است. بنابراین با تغییرات مداوم این پارامتر به روش سعی و خطا واسنجی انجام شد و مقدار نهایی آن در شکل ۱ مشخص شده است. مطالعات نشان داد که هر چه به پایین‌دست آبخوان نزدیک می‌شویم از مقدار هدایت هیدرولیکی نیز کاسته می‌شود. در مدل‌سازی حالت ماندگار آبخوان مقدار هدایت هیدرولیکی براساس معیار عملکرد RMSE، MAE و ME بین رقوم تراز آب زیرزمینی مشاهده و شبیه‌سازی شده است. واسنجی نیز از طریق سعی و خطا انجام گرفته است. لازم به ذکر است که جهت واسنجی، اختلاف میان مقادیر مشاهداتی و محاسباتی، ± 1 در نظر گرفته شده است.

مجربایی بررسی کردند. آن‌ها به صورت کمی محدوده وسیعی از نفوذ آب دریا را ارزیابی و تحت سناریوهای مختلف با پارامترهای مهم اندازه‌گیری کردند. از نتایج این مطالعه می‌توان به اندازه‌گیری شدن شوری در محدوده زیر دریا با افزایش بارش، افزایش سطح دریا و مدت زمان بیشتر شبیه‌سازی تحت یک دوره بارش سنگین اشاره کرد (Zhu et al., ۲۰۱۸).

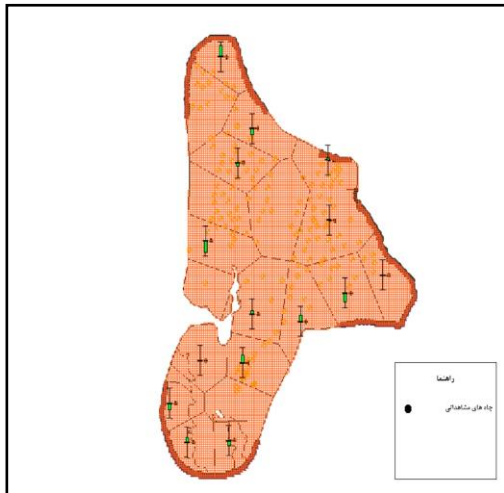
مواد و روش‌ها

این مطالعه به بررسی محدوده مطالعاتی سرایان که از محدوده‌های کویر لوت ایران است پرداخته است. هدف اصلی این مطالعه، بررسی حد اینترفاز آب شور و شیرین در محدوده مطالعاتی سرایان است. مدل‌سازی وضعیت کمی و کیفی آبخوان توسط بسته‌های MODFLOW، MT3D و SEAWAT صورت گرفت. واسنجی مدل کمی به دو صورت واسنجی ماندگار و واسنجی غیرماندگار انجام شد. در حالت ماندگار میزان ورودی و خروجی، برابر در نظر گرفته می‌شود و تحت آن تغییری در ذخیره آبخوان روی نمی‌دهد. از طرفی در حالت غیرماندگار فرض بر این است که هیچ‌گونه منبع تغذیه یا تخلیه در آبخوان وجود نداشته باشد. معادلات حاکم در جریان آب زیرزمینی به شکل زیر است:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad \text{حالت سه‌بعدی} \quad (1)$$

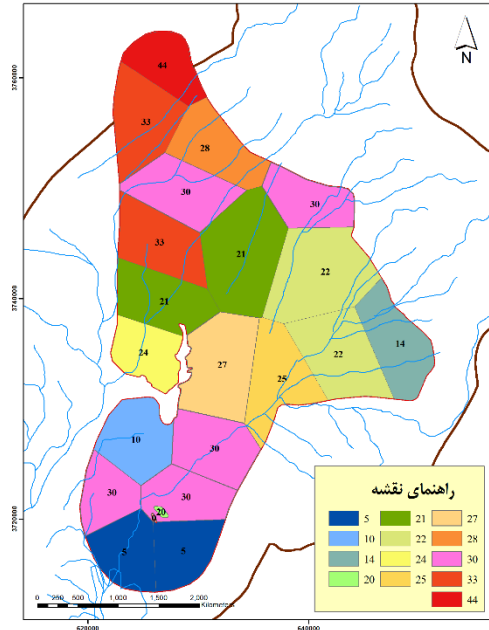
$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad \text{حالت دوبعدی} \quad (2)$$

آب زیرزمینی در حالت شبیه‌سازی و اختلاف تراز آب در هر چاه نشان داده شده است.



شکل ۲: مدل نهایی حالت ماندگار

تحلیل خطا و مدل‌سازی کمی آبخوان در حالت ماندگار در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: مقدار نهایی هدایت هیدرولیکی واسنجی شده در حالت ماندگار - متر در روز

جدول ۲: تحلیل وضعیت تراز آب زیرزمینی در حالت شبیه‌سازی ماندگار

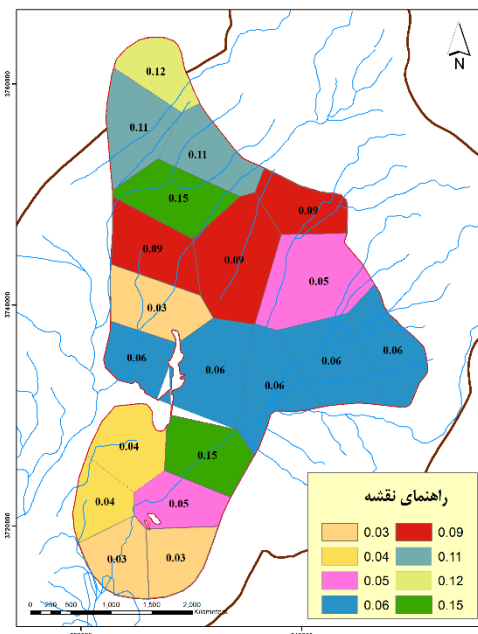
چاه	تراز آب	تراز آب	اختلاف تراز
WT ₁	۱۲۹۹/۵	۱۳۰۰/۳	۰/۸
WT ₂	۱۲۸۱	۱۲۸۰/۷	-۰/۲۵
WT ₃	۱۲۷۵	۱۲۷۴/۱	-۰/۸۸
WT ₄	۱۲۸۷	۱۲۸۶/۶	-۰/۳۵
WT ₅	۱۲۹۰	۱۲۸۹/۷۵	-۰/۲۵
WT ₆	۱۳۰۲	۱۳۰۱/۹۳	-۰/۰۷
WT ₇	۱۲۹۸	۱۲۹۷/۵	-۰/۴۳
WT ₈	۱۲۹۶	۱۲۹۶/۷	۰/۷۷
WT ₉	۱۲۹۱	۱۲۹۰/۶۷	-۰/۳۳
WT ₁₀	۱۲۸۰	۱۲۷۸/۷	-۱/۲۸
WT ₁₁	۱۲۹۳	۱۲۹۳/۳	-۰/۳۱
WT ₁₂	۱۲۸۳	۱۲۸۲/۱	-۰/۸۶

جدول ۱- جدول آنالیز پارامترهای مورد پذیرش واسنجی در حالت ماندگار

RMSE	MAE	ME
۰/۶۴۱	۰/۵۲۷	-۰/۲۳۶

مقادیر ضرایب RMSE، MAE و ME بعد از واسنجی در حالت ماندگار برابر ۰.۶۴، ۰.۵۲ و ۰.۲ متر است. این مقادیر حاکی از دقت قابل‌قبول مدل‌سازی در حالت پایدار است. سرانجام مدل نهایی بعد از مرحله واسنجی اجرا شد. شکل ۲ مدل ماندگار نهایی را نشان داده است. همچنین در جدول ۲ تحلیل وضعیت تراز

ذخیره ویژه در کنار پارامترهای هیدرولوژیکی جریان واسنجی، در حالت ناماندگار صورت گرفت. مقادیر به دست آمده بیانگر این است که مقادیر از بالای آبخوان به سمت پایین در حال افزایش هستند. پس می توان نتیجه گرفت که هدایت هیدرولیکی با ضریب آبدهی ویژه در آبخوان سرایان رابطه عکس دارد. شکل ۳ میزان آبدهی ویژه در این آبخوان و جدول ۳ تحلیل پارامترهای آماری خطای مدل ناماندگار را نشان داده است.



شکل ۳: ضریب آبدهی ویژه واسنجی شده

جدول ۳: جدول آنالیز پارامترهای مورد پذیرش واسنجی در حالت ناماندگار

RMSE	MAE	ME
۱/۲۵۵	۰/۹۴	۰/۳۹۵

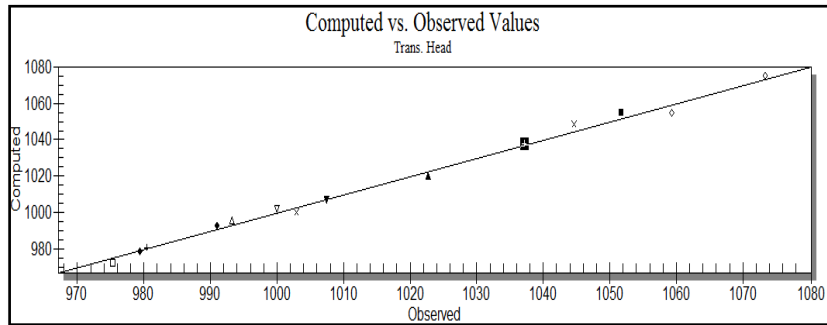
چاه	تراز آب	تراز آب	اختلاف تراز
WT۱۳	۱۲۷۸	۱۲۷۷	-۱
WT۱۴	۱۲۸۱	۱۲۸۱/۰۷	-۰/۰۷
WT۱۵	۱۲۸۷	۱۲۸۷/۲	۰/۲۵

جدول ۲ بیانگر این موضوع است حداکثر اختلاف بین تراز آب زیرزمینی شبیه سازی شده و مشاهدات مربوط به چاه شماره ۱۰ است که اختلاف ۱/۲۸ را نشان داده است.

واسنجی غیرمادگار

در حالت واسنجی غیرمادگار، هدف تخمین مقدار آبدهی ویژه و تصحیح پارامترهای هیدرولوژیکی جریان است. اگرچه واسنجی مادگار دارای برتری بیشتری در مدل سازی است اما اگر بتوان از واسنجی غیرمادگار استفاده کرد، شرایط برای ورود به مرحله صحت سنجی آسان تر و امید دقت نیز بیشتر خواهد شد. ضریب ذخیره اولیه در محاسبات مدل سازی و برای کل محدوده ۰/۰۳ در نظر گرفته شده است. برای اجرای مدل ناماندگار شرایط اولیه مهم است. مهر سال ۸۹ بار هیدرولیکی اولیه به مدل وارد شد. با توجه به محدود بودن آمار و تعریف شرایط اولیه در محدوده آبخوان مذکور، بازه زمانی سال آبی ۹۰-۸۹ تا ۹۳-۹۲ برای مدل سازی آبخوان در نظر گرفته شد. همچنین برای اجرای دقیق مدل در حالت ناماندگار، تمامی پارامترهای مؤثر بیلان آب زیرزمینی، در محدوده سرایان وارد نرم افزار شد و مدل اجرا شد. در این مدل واسنجی، هدف تخمین آبدهی ویژه و تصحیح پارامترهای هیدرولوژیکی جریان در آبخوان است. از این رو با تغییر دادن مقادیر، آبدهی ویژه و ضریب

همچنین مدل نهایی واسنجی شده در حالت ناماندگار در آبخوان سرایان در شکل ۴ نشان داده شده است.

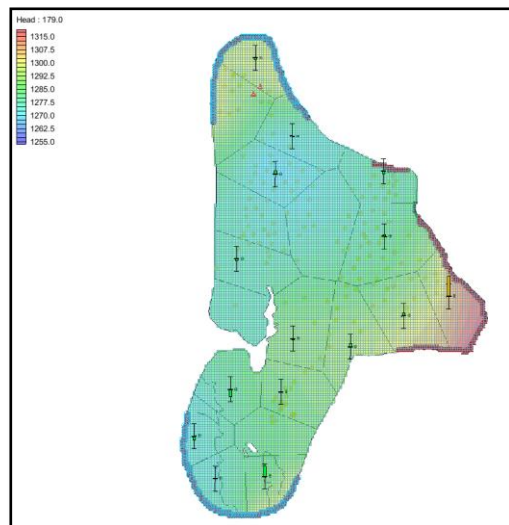


شکل ۵: همبستگی مقادیر سطح آب مشاهده‌ای و محاسباتی در پایان شش ماهه دوم (شهریور ۹۳)

کامل‌تر انجام شد و از یک سال پایانی جهت صحت‌سنجی مدل استفاده شد. برای تحلیل صحت‌سنجی از نمودار تراز آب زیرزمینی مشاهده شده در مقابل تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده، در بازه ۶ ماهه استفاده شده است و نتایج مورد تحلیل قرار گرفت. شکل ۵ همبستگی مقادیر سطح آب مشاهده‌ای و محاسباتی را در گام ۶ ماهه آبی مدل اجرا شده نشان داده است.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل کیفی

در شبیه‌سازی کیفی آبخوان به علت تحت تأثیر بودن مدل کیفی از مدل کمی، دو پارامتر هدایت هیدرولیکی و ضریب آبدهی ویژه به‌عنوان عامل مهم و حساس شناخته شده است. واسنجی در مدل کیفی به روش سعی و خطا انجام شد. در پدیده همرفت پارامترهای ورودی بسیار نامشهود است؛ به‌طوری‌که میزان خطا را تنها به مقدار ۵ میلی‌گرم در لیتر برای پارامتر TDS



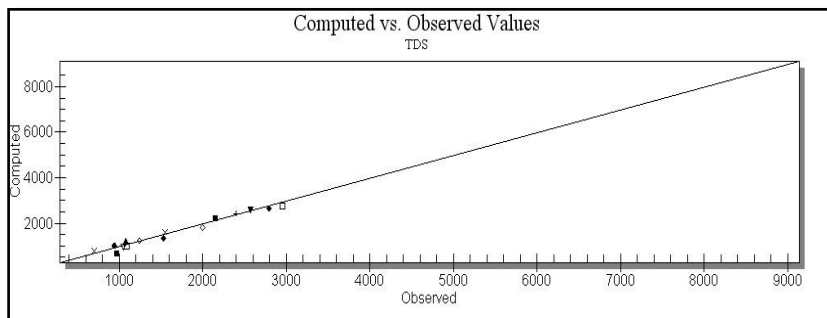
شکل ۴: مدل نهایی واسنجی شده حالت ناماندگار

صحت‌سنجی مدل کمی

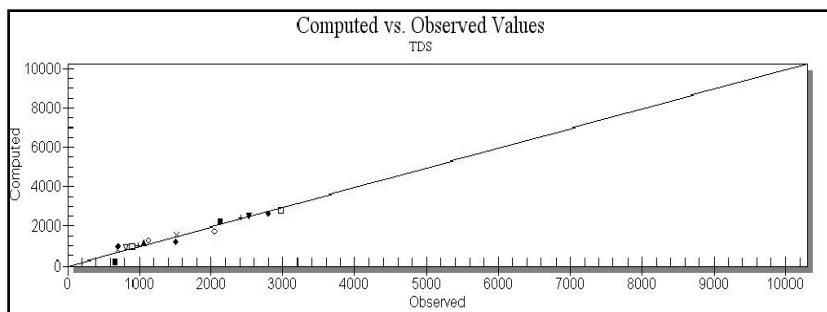
به منظور صحت‌سنجی مدل کمی آبخوان از مهر سال ۸۹ تا شهریور سال ۹۳ مدل‌سازی به علت اطلاعات

قبولی در آبخوان مذکور است. تحلیل حساسیت و واسنجی مدل کیفی نشان داد، مدل کیفی حساسیت کمتری به ضرایب ورودی مدل داشته است.

نشان داده است. اما تغییرات ضریب پخشیدگی میزان خطا در مدل را در مرحله واسنجی به مقدار ۱۶۰ میلی گرم در لیتر بهبود داده است که این مقدار قابل



شکل ۶: همبستگی مقادیر TDS مشاهده‌ای و محاسباتی در گام اول دوره صحت‌سنجی



شکل ۷: همبستگی مقادیر TDS مشاهده‌ای و محاسباتی در گام انتهای دوره صحت‌سنجی

۰/۵	TRPT (نسبت پخش افقی به پخش طولی)	۱	تغییرات این ضرایب اثر اندکی در کاهش مقدار خطای مدل داشته است. جدول ۴ مقدار نهایی ۳ ضریب در معادله پخشیدگی آلودگی را بعد از واسنجی مدل نشان داده است. همچنین ضریب پخشیدگی طولی به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر در واسنجی مدل شناخته شده است.
۰/۲	TRPV (نسبت پخش عمودی به پخش طولی)	۲	
۱ متر	DMCOEF (ضریب پخش مولکولی مؤثر)	۳	جدول ۴: ضرایب در نظر گرفته در شده معادله پخشیدگی

یکی از مراحل مدل‌سازی کیفی، تطبیق مدل با واقعیت است. هدف این مرحله به‌دست آوردن اعتماد

ردیف	نام پارامتر	میزان
------	-------------	-------

پیش‌بینی وضعیت کیفی آبخوان با استفاده از

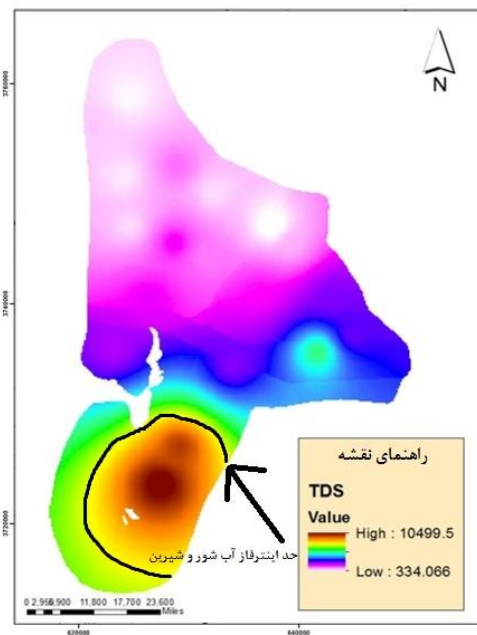
مدل MT³D

با شبیه‌سازی پارامتر TDS در آبخوان و ارزیابی دقت در مرحله صحت‌سنجی، پیش‌بینی تغییرات کیفیت آب زیرزمینی آبخوان با مدل MT³D در شرایط نرمال در طی ۱۰ سال و به صورت گام زمانی ۶ ماهه انجام شد.

بیشتر به نتایج مدل کیفی و کارایی آن جهت پیش‌بینی وضعیت آبی آبخوان است. نتایج صحت‌سنجی در سال انتهایی در دو دوره ۶ ماهه در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است.

جدول ۵: تغییرات غلظت TDS در مدل‌سازی و پیش‌بینی (میلی‌گرم بر لیتر)

تغییرات TDS	غلظت در انتهای دوره پیش‌بینی (ppm)	غلظت اولیه (ppm)	UTM Y	UTM X	کد چاه
۱۷۱۰	۲۷۰۰	۹۹۰	۳۷۵۶۱۳۸	۶۲۳۳۲۲	W۱
۴۵۵۷	۱۱۷۴۰	۷۱۸۳	۳۷۵۳۷۶۵	۶۲۴۹۲۶	W۲
۶۲۶	۱۳۸۶	۷۶۰	۳۷۵۱۴۸۲	۶۲۵۸۰۴	W۳
۷۰۷	۱۳۵۷	۶۵۰	۳۷۵۱۷۲۶	۶۲۶۲۸۰	W۴
۳۸۴	۱۲۴۸	۸۶۴	۳۷۴۷۰۱۱	۶۲۶۳۳۷	W۵
۱۷۲۸	۳۸۵۸	۲۱۳۰	۳۷۴۰۱۴۹	۶۲۸۱۵۴	W۶
۹۴۳۹	۱۹۹۳۹	۱۰۵۰۰	۳۷۲۳۵۲۵	۶۲۹۱۴۰	W۷
۹۳۵۷	۱۱۴۵۷	۲۱۰۰	۳۷۴۵۴۳۶	۶۳۰۳۷۶	W۸
۸۵۰۸	۱۰۰۹۱	۱۵۸۳	۳۷۵۲۴۷۴	۶۳۰۵۹۲	W۹
۴۳۲۱	۱۳۹۰۱	۹۵۸۰	۳۷۲۶۸۹۸	۶۳۰۷۸۸	W۱۰
۱۹۵	۱۶۹۵	۱۵۰۰	۳۷۴۴۰۸۴	۶۳۳۲۰۳	W۱۱
۸۳۵	۱۶۷۵	۸۴۰	۳۷۵۰۰۱۴	۶۳۳۷۹۴	W۱۲
۷۹۰	۳۵۹۰	۲۸۰۰	۳۷۳۴۱۵۶	۶۳۵۵۵۷	W۱۳
۱۳۰۱	۳۳۰۱	۲۰۰۰	۳۷۴۰۶۸۴	۶۳۷۹۰۱	W۱۴
۳۰۲۶	۳۳۵۹	۳۳۳	۳۷۴۷۰۲۳	۶۳۹۰۵۲	W۱۵
۶	۲۵۶۹	۲۵۰۰	۳۷۴۹۴۴۸	۶۳۹۵۸۹	W۱۶
۷۷۸	۱۹۱۳	۱۱۳۵	۳۷۴۵۳۷۰	۶۴۰۶۵۹	W۱۷
۱۱۳۰	۶۶۳۰	۵۵۰۰	۳۷۳۵۴۵۸	۶۴۳۰۴۱	W۱۸
۱۶۸	۳۰۰۰	۲۸۳۲	۳۷۴۰۵۱۲	۶۴۴۴۰۲	W۱۹
۴۹۸	۳۵۰۰	۳۰۰۲	۳۷۳۶۹۸۳	۶۴۶۱۸۴	W۲۰



شکل ۸: مرزبندی آب شور و شیرین در آبخوان سرایان

پیش‌بینی مدل کیفی SEAWAT

در این بخش به منظور شبیه‌سازی اثر تهاجم جبهه‌های آب شور در بخش جنوب‌شرق آبخوان، از مدل SEAWAT استفاده شد و شبیه‌سازی انجام گرفت. پس از معرفی خصوصیات استراگرافی آبخوان، معرفی پکیج VDF در مدل SEAWAT با توجه به غلظت اولیه TDS در آبخوان، غلظت TDS در آب شور و همچنین چگالی آب شور و شیرین انجام شد. دو پارامتر DENSREF مربوط به چگالی آب شیرین و $MT^3DRHOFLG$ که مربوط به غلظت نمک در آبخوان است در مدل وارد شد. مطالعات صورت گرفته نشان داد که متوسط چگالی آب شور در جنوب آبخوان ۱۰۲۴ کیلوگرم بر مترمکعب و غلظت نمک ۳۵

نتایج اولیه حاکی از آن است که در ابتدای آبخوان غلظت TDS مناسب و هرچه به سمت خروجی آبخوان حرکت می‌کنیم غلظت افزایش پیدا می‌کند. از طرفی نتایج ارائه شده بیانگر افزایش غلظت TDS به میزان ۵۴۰ میلی‌گرم در لیتر، در ۲۰ چاه کیفی به مدت ۱۰ سال پیش‌بینی شده است. روند تغییرات این پارامتر در آبخوان سرایان بیانگر افزایش غلظت TDS است. از طرف دیگر نتایج بیانگر این است که در چاه‌های نمونه‌برداری نزدیک به خروجی، افزایش غلظت TDS بسیار زیاد است. همچنین در مناطقی که مقدار افت بیشتر است، گرادیان هیدرولیکی جریان آب زیرزمینی معکوس شده است. این معکوس شدن باعث انتقال آب با املاح بالا و افزایش مقدار TDS شده است. جدول ۵ تغییرات غلظت TDS را نشان داده است. با توجه به جدول ۵، چاه نمونه‌برداری W۷ و چاه نمونه‌برداری W۱۹ به ترتیب دارای بیشترین و کمترین میزان غلظت TDS در طی ۱۰ سال را داشته است.

تحلیل غلظت در انتهای دوره و پیش‌بینی تغییرات آن نشان می‌دهد در جنوب‌شرقی آبخوان، تغییرات غلظت TDS زیاد بوده است. بررسی تغییرات TDS نشان داد که در ۲ منطقه شمال‌شرقی و غربی آبخوان، تغییرات و افزایش میزان TDS زیاد است. همچنین سناریو بالا‌زدگی آب شور از آب شیرین در این منطقه نیز می‌تواند صحیح باشد که با توجه به عدم داشتن لوگ حفاری، پروفیل‌های ژئوفیزیک و حفاری به همراه آزمایش کیفی در منطقه اشباع، نمی‌توان این سناریو را پیاده‌سازی کرد. شکل ۸ مرز جبهه آب شور و شیرین را در بخش جنوبی آبخوان نشان داده است.

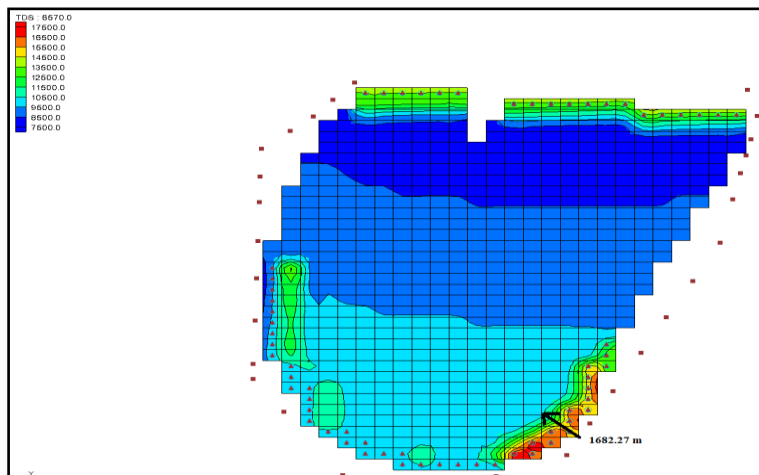
در دوره شبیه‌سازی جهت تعیین عمق پیشروی آب شور در دوره ۴ ساله استفاده شد. نتایج این شبیه‌سازی حاکی از آن است که در جنوب‌شرقی آبخوان تغییرات غلظت TDS بیشترین میزان تغییر را داشته است. این مقدار برابر ۴۳۲۰/۵۵ میلی‌گرم بر لیتر است.

کیلوگرم در مترمکعب است. این مقدار بر اساس رابطه ۴ محاسبه شده است:

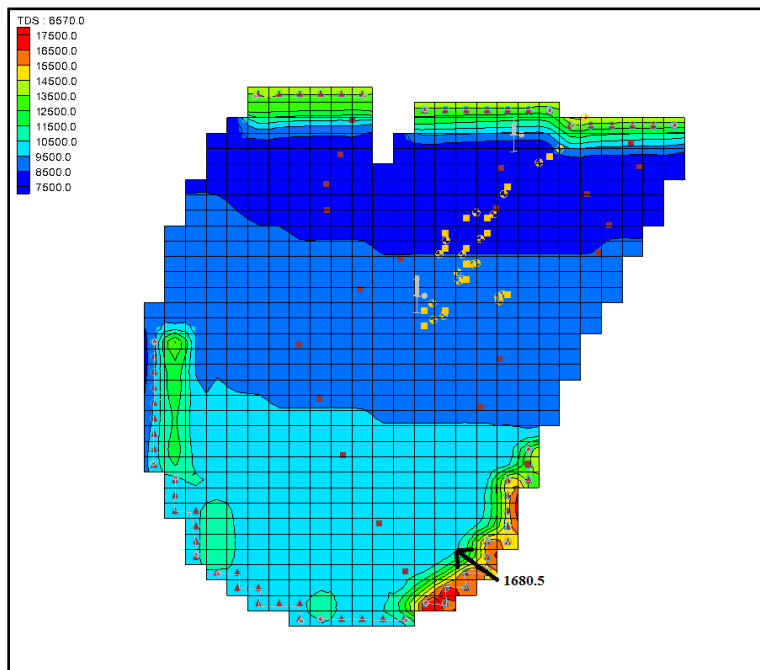
Density/concentration .slop(DRHODG): (۴)

$$\frac{1024(\text{kg/m}^3) - 1000(\text{kg/m}^3)}{30(\text{kg/m}^3) - 0(\text{kg/m}^3)} = 0.7$$

شبیه‌سازی اولیه پس از ورود متغیرها انجام شد. از مشابه مدل کمی MODFLOW و مدل کیفی MT3D



شکل ۹: نمای پیشروی آب شور در سال آخر پیش‌بینی



شکل ۱۰: مرزبندی تهاجم جبهه‌های آب شور و شیرین تحت سناریوی کاهش برداشت ۳ درصدی



همچنین نتایج استفاده از راهکارهای پیشنهادی نشان‌دهنده این موضوع است که بیشترین مقدار تهاجم جبهه‌های آب شور مربوط به کاهش برداشت ۳ درصدی است و مقدار آن برابر ۱۶۸۰ متر است. از طرف دیگر تحلیل کلی نتایج برداشت آب نسبت به وضعیت فعلی، بیانگر این موضوع است که مقدار تهاجم آب شور نسبت به عقب‌زدگی آب شور تحت راهکارهای ارائه شده بسیار بیشتر است؛ بنابراین اعمال این راهکارها اگرچه باعث عقب‌زدگی آب شور می‌شود اما زمان بر است.

نتایج

امروزه با رشد جمعیت تقاضا برای آب بیشتر شده است. از آنجایی که در مناطق خشک منابع آب زیرزمینی تنها منبع تأمین آب است، بنابراین حفاظت از این منابع بسیار بااهمیت است. این مطالعه به بررسی میزان تهاجم جبهه‌های آب شور کویری به آبخوان و همچنین به بررسی عمق شوری ورودی پرداخته است. از سوی دیگر راهکارهای مختلف برای تعادل بخشی و عقب‌زدگی میزان تهاجم جبهه‌های آب شور مورد بررسی قرار داده شده است. به دلیل برداشت بیش از حد، آبخوان سطح آب زیرزمینی بسیار کاهش داشته است؛ این کاهش سبب کاهش گرادیان هیدرولیکی و در بعضی بخش‌ها باعث معکوس شدن جریان آب زیرزمینی شده است. در این بخش‌های آبخوان، بالازدگی آب شور از کف آبخوان به دلیل پایین بودن چگالی آب شیرین نسبت به آب شور رخ داده است. این تحقیق، به وضعیت تهاجم جبهه‌های آب شور آبخوان سرایان

پس از شبیه‌سازی اولیه در دوره ۴ ساله، پیش‌بینی وضعیت آبی آبخوان به مدت ۱۰ سال برای تعیین تهاجم جبهه‌های آب شور انجام شد. پیش‌بینی در سال انتهایی شبیه‌سازی همان طور که در شکل ۹ مشخص است، نشان داد که تهاجم جبهه‌های آب شور به بیشترین مقدار خود یعنی ۱۶۸۲ متر رسیده است. همچنین در نوار مرزی جنوب شرقی آبخوان سرایان از مدلسازی سه بعدی آبخوان و با استفاده از مدل SEAWAT به جهت تعیین میزان بالازدگی آب شور از کف آبخوان استفاده شد. نتایج این بخش بیانگر هجوم آب شور مقداری از سمت جنوب غربی و مقداری از سمت شمال آبخوان است.

تحلیل سناریوهای کاهش تهاجم جبهه‌های آب شور

در این مطالعه برای تصمیم‌گیری و ارائه راهکار برای عوامل مؤثر بر کاهش و پیشروی جبهه‌های آب شور، از ۴ روش برداشت به میزان ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد نسبت به برداشت فعلی استفاده شد. کاهش برداشت می‌تواند به واسطه پلمپ چاه‌های غیرمجاز، تأکید بر روی عدم اضافه برداشت و نیز توسط شرکت‌های آب منطقه‌ای انجام شود. براساس این ۴ روش شبیه‌سازی کیفی و کمی صورت گرفت. نتایج در شکل ۱۰ نشان داده شده است (برای نمونه تنها کاهش برداشت به میزان ۳ درصد نشان داده شده است).

نتایج شبیه‌سازی نشان داد که با پیشروی آب شور به سمت آبخوان در بخش خروجی، برگشت آن زمان‌بر است و به سرعت قابل جبران نیست.



آب زیرزمینی در این منطقه می‌تواند کاهش برداشت از آبخوان سرایان باشد.

جمع‌بندی

یکی از مشکلات منابع آب، تهاجم آب شور به آبخوان‌های شیرین است. این پیشروی آب شور به سفره‌های آب شیرین، امکان دارد که از طریق کویرها، باتلاق‌ها و چاله‌های آب شور رخ دهد. هدف این تحقیق بررسی وضعیت بهره‌برداری از دشت سرایان در اثر پیشروی آب شور از کویر است. مدل‌سازی وضعیت کمی و کیفی آبخوان توسط مدل‌های MODFLOW، MT3D و SEAWAT صورت گرفته است. نتایج کمی نشان داد که با ادامه روند تخلیه و تغذیه کنونی، سطح آب زیرزمینی افت خواهد کرد و با تهاجم جبهه‌های آب شور مواجه خواهیم شد. همچنین نتایج بیانگر این است که بیشترین تهاجم آب شور مربوط به بخش جنوب‌شرقی آبخوان است. از سناریوهای کاهش برداشت آب زیرزمینی می‌توان نتیجه گرفت هر چه درصد برداشت از چاه‌ها بیشتر باشد میزان عقب‌گرد آب شور کمتر است و با هم رابطه عکس دارند. بنابراین کاهش برداشت از آبخوان سرایان می‌تواند بهترین راه‌حل برای نجات آب زیرزمینی این منطقه باشد. از طرفی نتایج حاکی از این است که بخش شمال‌غربی آبخوان تأثیر بسیاری در تهاجم جبهه‌های آب شور به دلیل برهم خوردن گرادیان هیدرولیکی و انتقال آب شور به شیرین دارد. از این رو پیشنهاد شده است که مدل‌سازی و نمونه‌برداری کیفی در محل جبهه‌های ورود آب شور در اعماق

پرداخته است. برای این کار ابتدا داده‌ها مورد بررسی واقع گردید و بعد از مدل‌سازی کمی و کیفی آبخوان، مشخص شد که غلظت TDS رابطه مستقیمی با افت سطح ایستابی در آبخوان دارد. از طرفی به دلیل اینکه بخش‌های جنوبی آبخوان، نسبت به حجم منابع آب زیرزمینی بیشتر تحت تأثیر است، سبب افزایش بیشتر غلظت TDS شده است. همچنین در بخش جنوبی آبخوان، بیشترین غلظت مربوط به چاه W7 است. به دلیل چگالی بیشتر جبهه‌های آب شور نسبت به آب شیرین، آب شور در زیر آبخوان قرار گرفته است و برداشت از کل آبخوان باعث کاهش تراز آب در کل آبخوان شده است. بالا آمدن آب شور و کاهش تراز سبب برهم خوردن گرادیان هیدرولیکی میان آب شور و شیرین می‌شود؛ در نتیجه باعث انتقال آب شور به سمت آب شیرین می‌گردد. پس می‌توان نتیجه گرفت که بخش شمال‌غربی آبخوان تأثیر زیادی در تهاجم جبهه‌های آب شور دارد. نتایج سناریوی کاهش برداشت آب زیرزمینی حاکی از آن است که با کاهش برداشت آب در سطح آبخوان، مقدار برداشت آب کاهش پیدا می‌کند و میزان افت نیز در بعضی بخش‌ها روند نزولی خواهد داشت. این کاهش افت آبخوان باعث بالا آمدن سطح آب و پتانسیل هیدرولیکی در بخش آب شیرین می‌شود. سناریوهای کاهش برداشت بیانگر این موضوع است که هر چه درصد برداشت از چاه‌های بهره‌برداری کاهش یابد میزان عقب‌گرد آب شور نیز بیشتر می‌شود و با هم رابطه عکس دارند. پس می‌توان نتیجه گرفت بهترین راه‌حل برای نجات



permeability coastal karst aquifer with conduit networks, Pages ۲۲۱-۲۳۹.

Chang, Y, X.Hu.B, Li.X, (۲۰۱۸), E3S Web of Conferences ۵۴, Modeling Seawater Intrusion to Coastal Aquifers in South Coast of Laizhou Bay, China.

IAH. Hydology. London: IAH, ۲۰۰۳.

Ghoraba.S.M,Zyedana.B.A., Rashwan.I.M.H. "Solute transport modeling of the groundwater for quaternary aquifer quality management in Middle Delta, Egypt." Alexandria Engineering Journal, ۲۰۱۲: ۱۹۷-۲۰۷.

Eshtawi.T, Evers.M, Tischbein.B, Diekkruiger. B, "Integrated hydrologic modeling as a key for sustainable urban water resources planning." Water Research, ۲۰۱۶: ۴۱۱-۴۲۸.

Ben Simon.R, Bernard.S, Meurville.C, Rebour.V. "Flow-Through Stream Modeling with MODFLOW and MT3D: Certainties and Limitations." Groundwater (January ۲۰۱۵): ۹۶۷-۹۷۱.

Langevin.C, Christian.D و "Modeling Axisymmetric Flow and Transport." Groundwater (July ۲۰۰۸): pages: ۵۷۹-۵۹۰.

Changa.S,PrabhakarClement.T, Matthew.A, Simpsonb.J, Lee.K. "Does sea-level rise have an impact on saltwater intrusion?" Advances in Water Resources (October ۲۰۱۱): ۱۲۸۳-۱۲۹۱.

Mulligan.A.E,Langevin.C, Vincent.E.A. "Tidal Boundary Conditions in SEAWAT." Groundwater (January ۲۰۱۱): pages: ۸۶۶-۸۷۹.

Lathashri.U.A, Mahesha.A, "Simulation of Saltwater Intrusion in a Coastal Aquifer in

مختلف انجام شود. همچنین اثر تغییر اقلیم بر وضعیت کمیّت و کیفیت آبخوان بررسی شود و نیز میزان تهاجم جبهه‌های آب شور تحت تأثیر این پدیده مورد بررسی واقع شود. از طرف دیگر پیشنهاد شده که سناریوهای سازه‌ای در آبخوان برای کنترل ورود جبهه‌های آب شور به آبخوان اعمال شود.

مراجع

زمزم، ع و رهنما، م.ب، «ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی با مدل ریاضی MT3DMS مطالعه موردی: دشت رفسنجان». مجله پژوهش آب/ایران، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه شهید باهنر کرمان (بهار و تابستان ۱۳۹۱: ۲۰۳-۲۰۷).

حسینی، م و بهرامی جوین، ا، «مدل‌سازی پیشروی آب شور به سمت آب شیرین در آبخوان‌های کویری مجاور مطالعه موردی: آبخوان مه و لات». مشهد: دولتی - وزارت علوم، تحقیقات، و فناوری - دانشگاه فردوسی مشهد - دانشکده فنی و مهندسی ۱۳۹۵.

کمالی، ا و نیک‌سخن، م.ح، «توسعه مدلی برای محاسبه شاخص پایداری کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی» (اکوهیدرولوژی ۴، زمستان ۱۳۹۶: ۱۰۷۱-۱۰۸۷).

Priyanka.B.N, Mahesha.A. (۲۰۱۵). Aquatic Procedia, Parametric Studies on Saltwater Intrusion into Coastal Aquifers for Anticipate Sea Level Rise, Volume ۴, Pages ۱۰۳-۱۰۸.

Xu.Z, X.Hu.B, Ye.M. (۲۰۱۸). Hydrol. Earth Syst. Sci, Numerical modeling and sensitivity analysis of seawater intrusion in a dual-

Karnataka, India." Aquatic Procedia ۴ (march ۲۰۱۵): ۷۰۰-۷۰۵.

Huang.P.S, Chiu.Y.C, "A Simulation-Optimization Model for Seawater Intrusion Management at Pingtung Coastal Area, Taiwan." water ۱۰, (February ۲۰۱۸): ۲۵۱-۲۷۹.