

ارزیابی راهکارهای علاج بخشی تهاجم آب شور با استفاده از شبیه سازی عددی (مطالعه موردی: آبخوان دشت آستانه- کوچصفهان)

سید جاوید بهشتی^۱، سامان جوادی^{۲*}، سید عباس حسینی^۳، حمید کاردان مقدم^۴

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده های ابوریحان، دانشگاه تهران

۳. استادیار گروه مهندسی عمران آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۴. استادیار پژوهشی مؤسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو

(تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۰۷/۰۱؛ تاریخ بازنگری ۱۴۰۰/۰۹/۰۹ تاریخ تصویب ۱۴۰۰/۱۱/۱۱)

چکیده

یکی از چالش های جدید در بهره برداری از منابع آب زیرزمینی، تهاجم آب شور آبخوان های ساحلی است. افزایش بهره برداری بدون برنامه ریزی سبب کاهش تراز آب زیرزمینی شده و این موضوع سبب شده است تا گرادیان هیدرولیکی نوار ساحلی کاهش یابد و در برخی مناطق جریان آب زیرزمینی معکوس شده و سبب شور شدن آبخوان شود. این مطالعه ارزیابی راهکارهای علاج بخشی تهاجم آب شور در آبخوان ساحلی آستانه-کوچصفهان را با استفاده از شبیه سازی عددی مورد بررسی قرار داده است. بررسی وضعیت فعلی این آبخوان با استفاده از پکیج SEAWAT بیانگر تهاجم ۷۴۰ متر آب شور به آبخوان طی ۵ سال را نشان داد که به منظور مدیریت این موضوع، ۱۹ راهکار مدیریتی (کاهش برداشت آب زیرزمینی)، سازه ای (تغذیه مصنوعی و سد زیرزمینی) و تلفیقی (مدیریتی و سازه ای) برای کاهش نفوذ آب شور ارائه شد. نتایج شبیه سازی راهکارهای مختلف علاج بخشی با استفاده از شاخص پایداری کیفی آبخوان که مبتنی بر میزان پسروری آب شور است، مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج نشان داد این شاخص برای راهکارهای تعریف شده بین ۱۴ تا ۶۵ درصد محاسبه شد. بیشترین بهبود نسبی آبخوان مربوط به راهکار S18 با کاهش ۲۰ درصد برداشت آب، تغذیه مصنوعی و سد زیرزمینی و کمترین بهبود نسبی آبخوان مربوط به راهکار S1 با کاهش ۵ درصد بهره برداری است. نتایج نشان داد راهکار S1 با پسروری ۱۰۰ متر آب و راهکار S18 با پسروری ۴۸۰ متر آب شور همراه بوده است. نتایج به دست آمده از این مطالعه می تواند برای مدیریت بهره برداری در این آبخوان مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: پکیج SEAWAT، راهکار مدیریتی، تهاجم آب شور، کاهش برداشت، شبیه سازی.

مقدمه

پیشروی آب شور در آبخوان‌های ساحلی یک مسئله جهانی است که این پدیده در نواحی ساحلی با افزایش تقاضای آب شیرین و بهره‌برداری بدون مدیریت تشدید می‌شود [۱]. میرزاوند و همکاران (۲۰۲۰) طی پژوهشی به بررسی منشأ شوری در منابع آب زیرزمینی پرداختند و بر این اساس، علت شوری را سه عامل منشأ دریایی، منشأ حاره‌ای و عوامل انسانی تقسیم کردند [۲]. بر این اساس، در نواحی ساحلی آب شیرین با آب شور ارتباط هیدرولیکی دارد. در شرایط طبیعی گرادیان هیدرولیکی جریان آب خالص رو به دریا است تا از آب شیرین حفاظت کند. گرادیان هیدرولیکی اغلب نسبتاً کوچک است و هرگونه برداشت بیش از حد از آب شیرین می‌تواند تعادل هیدرواستاتیکی را دگرگون کند. تحت این شرایط آب شور می‌تواند وارد آبخوان شده و جایگزین آب شیرین شود. این پدیده که نفوذ آب دریا یا نفوذ آب شور نامیده می‌شود، می‌تواند تأثیرات منفی و طولانی مدتی بر سیستم‌های آب زیرزمینی ساحلی بگذارد و بهره‌برداری از آن‌ها را به عنوان منبع تأمین آب با کیفیت مناسب به منظور استفاده‌های انسانی (بشر) و کشاورزی محدود کند [۳]. در سال‌های اخیر در بسیاری از نواحی ساحلی، پمپاژ بیش از حد از آبخوان‌ها، بسیاری از آن‌ها را از حالت پایدار خارج کرده است [۴]. حتی نتایج برخی مطالعات نشان می‌دهد به علت ارتباطات پیچیده زمین-شناسی، این اضافه برداشت از آب زیرزمینی در نزدیک ساحل و یا حتی دور از آن، می‌تواند منجر به ورود آب شور از چاه‌های بهره‌برداری به آبخوان شود [۵ و ۶]. مدیریت منابع محدود آب شیرین در چنین شرایطی امری حساس است و نیاز به توجه خاصی در راستای کاستن حرکت گوه آب شور به آبخوان‌ها و بالازدگی مخروطی آب دریا نزدیک ایستگاه‌های پمپاژ دارد [۷]. درجه نفوذ آب شور در مکان‌ها و شرایط هیدروژئولوژیکی مختلف، متفاوت است. در بسیاری از موارد، ناحیه آلوده شده توسط نفوذ آب شور به بخش‌های کوچکی از آبخوان محدود می‌شود و هیچ تأثیری روی چاه‌های پمپاژ که برای تأمین آب زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرند ندارد و یا تأثیر کمی روی آن دارد [۸]. در سایر موارد، آلودگی به صورت منطقه‌ای است و تأثیر قابل توجهی بر منابع آب زیرزمینی دارد. گسترش آب شور به یک آبخوان به چندین عامل بستگی دارد. این عوامل شامل

مجموع آب زیرزمینی تخلیه شده نسبت به مجموع آب شیرین تغذیه شده به آبخوان، فاصله تنش‌ها (چاه‌ها، کانال‌های زهکشی) از منبع (منابع) آب شور، ساختار زمین‌شناسی و توزیع خصوصیات هیدرولیکی آبخوان و حضور واحدهای محدودکننده‌ای که ممکن است مانع حرکت عمودی آب شور به سمت آبخوان یا درون آبخوان شوند. علاوه بر این، زمان لازم برای آب شور به منظور عبور از آبخوان و رسیدن به یک چاه پمپاژ می‌تواند بسیار طولانی باشد. بسته به محل و عرض جانبی نواحی انتقالی، سال‌های زیادی ممکن است طول بکشد تا چاهی که در گذشته تحت تأثیر نفوذ آب شور نبوده است، ناگهان آلوده شود [۹].

بنابراین، ضروری است در راستای حفظ منابع آب شیرین استراتژیک آبخوان‌های ساحلی، با استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی و مدل‌های مربوطه وضعیت آبخوان مورد ارزیابی قرار گیرد و میزان تهاجم آب شور و شیرین تعیین شود. این موضوع از این نظر اهمیت دارد که احیای آبخوان‌های شور توسط روش‌های بیولوژیکی، شیمیایی و تکنیک‌های فیزیکی، با توجه به میزان نفوذ شوری بسیار پرهزینه، زمان‌بر و در برخی مواقع غیر ممکن است [۱۰]. به بیان دیگر، کم‌هزینه‌ترین راهکار برای توقف یا کاهش روند نفوذ شوری تعیین میزان بهینه پمپاژ آب شیرین است که زیان ناشی از آن نیز کمتر متوجه کشاورزان شود. تحقیقات در خصوص مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی مرز آب شور و شیرین و میزان نفوذ آب شور از دو دهه گذشته افزایش یافته است. مدل‌های عددی در شبیه‌سازی نفوذ آب شور به‌ویژه وقتی ناحیه گذار بسیار ضخیم باشد، کارایی زیادی دارند [۱۱]. در این مدل‌ها علاوه بر شبیه‌سازی نفوذ آب شور، سناریوهایی نظیر کاهش برداشت از چاه‌های پمپاژ، تغییرات اقلیمی و اقدامات سازه-ای در راستای بهبود شرایط آبخوان اجرا شده است [۱۲]. [۱۹]. مطالعات شبیه‌سازی در خصوص تهاجم آب شور در کشور در سال‌های اخیر رشد قابل توجهی دارد که به مطالعات صیادی شهرکی و همکاران (۱۳۹۵)، قربانپور و همکاران (۱۳۹۸)، نصیری و همکاران (۱۳۹۸ و ۱۳۹۹)، مطلبیان و همکاران (۱۳۹۹) و جوادی و کاردان مقدم (۱۳۹۹) می‌توان اشاره داشت [۲۰-۲۵].

بررسی مطالعات مختلف انجام شده ضرورت اهمیت بررسی میزان تهاجم آب شور و ارزیابی کیفیت منابع آب را

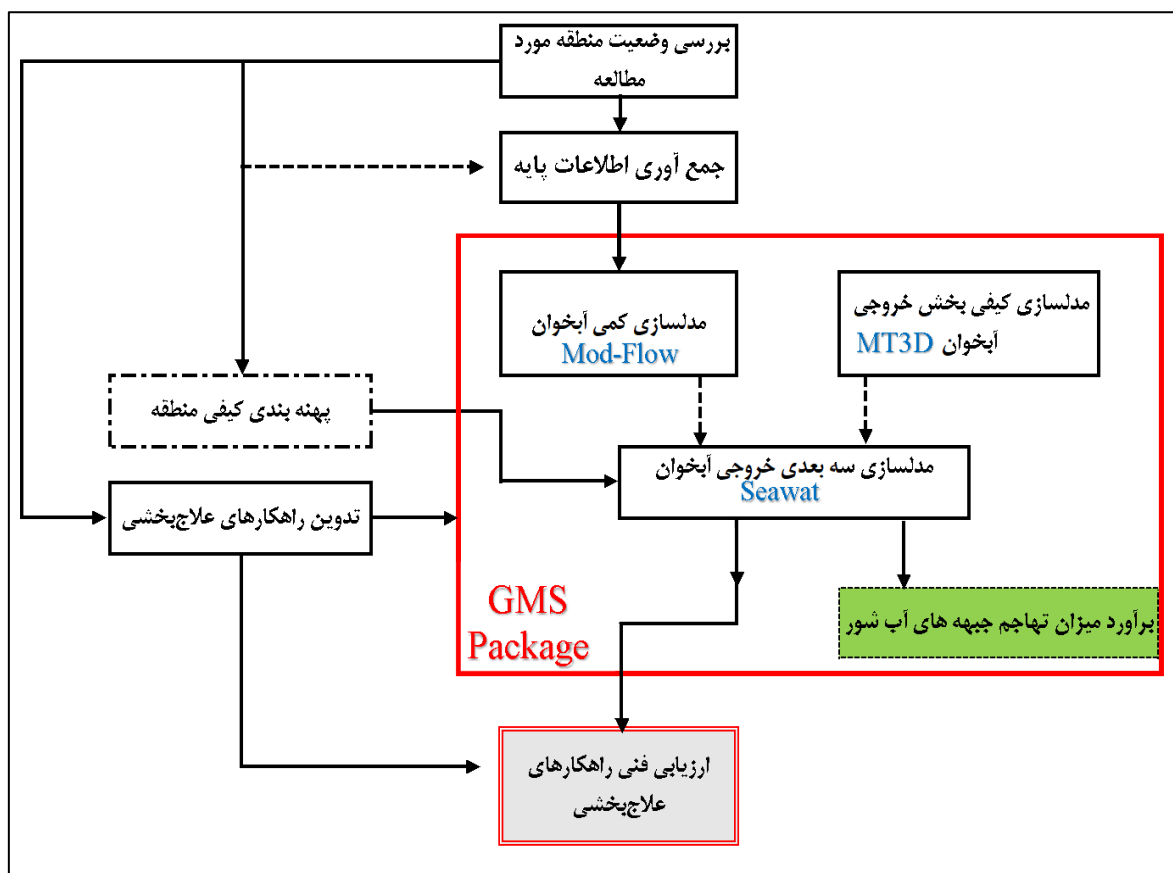
نتیجه آن تهاجم آب شور دریا با چگالی بیشتر از کف آبخوان به سمت مرکز آن است. این پدیده به تدریج سبب شور شدن اراضی و تنزل کیفیت چاه‌های بهره‌برداری در این مناطق می‌شود و ادامه آن روند حتی می‌تواند بخش مهمی از آبخوان را از نظر بهره‌برداری از دسترس خارج کند. در این راستا با توجه به شکل ۱ که فلوجارت انجام این تحقیق است، در گام نخست پس از جمع‌آوری آمار و اطلاعات منطقه، وضعیت کمی و کیفی آبخوان به ترتیب با کدهای MODFLOW و MT3D در محیط نرم‌افزار GMS شبیه‌سازی شد. در گام بعدی، با استفاده از مدل عددی SEAWAT میزان تهاجم آب شور در بخش خروجی آبخوان به صورت سه‌بعدی تعیین می‌شود. در ادامه، راهکارهای عملیاتی و قابل اجرا برای کنترل تهاجم آب شور شبیه‌سازی و با استفاده از یک شاخص مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. شاخص تعریف‌شده بیانگر میزان تأثیر راهکارهای علاج‌بخشی بر میزان پس‌روی آب شور از دریا است.

مورد بررسی قرار داده‌اند. این موضوع با توجه به مشکلات زیست‌محیطی در آبخوان‌های ساحلی بسیار مهم و حائز اهمیت بوده و بنابراین، تدوین راهکارهای مختلف کنترل تهاجم آب شور حائز اهمیت است. این مطالعه راهکارهای مختلف کنترل تهاجم آب شور از طرف دریا را مورد بررسی قرار داده و با تدوین یک شاخص به منظور تعیین کارایی هر راهکار، اولویت‌بندی فنی در تعیین میزان کنترل تهاجم آب شور را مورد بررسی قرار می‌دهد. نتایج این مطالعه می‌تواند اثربخشی فنی راهکارهای علاج‌بخشی تهاجم آب شور را مورد بررسی قرار دهد و این موضوع به عنوان یک ابزار مدیریتی برای کنترل مشکلات زیست‌محیطی مطرح باشد.

مواد و روش‌ها

روش پژوهش

یکی از چالش‌های مهم در آبخوان‌های ساحلی، کاهش تراز آب زیرزمینی بر اثر افزایش بهره‌برداری و در پی آن، کاهش گرادیان هیدرولیکی جریان در بخش منتهی به دریا است.

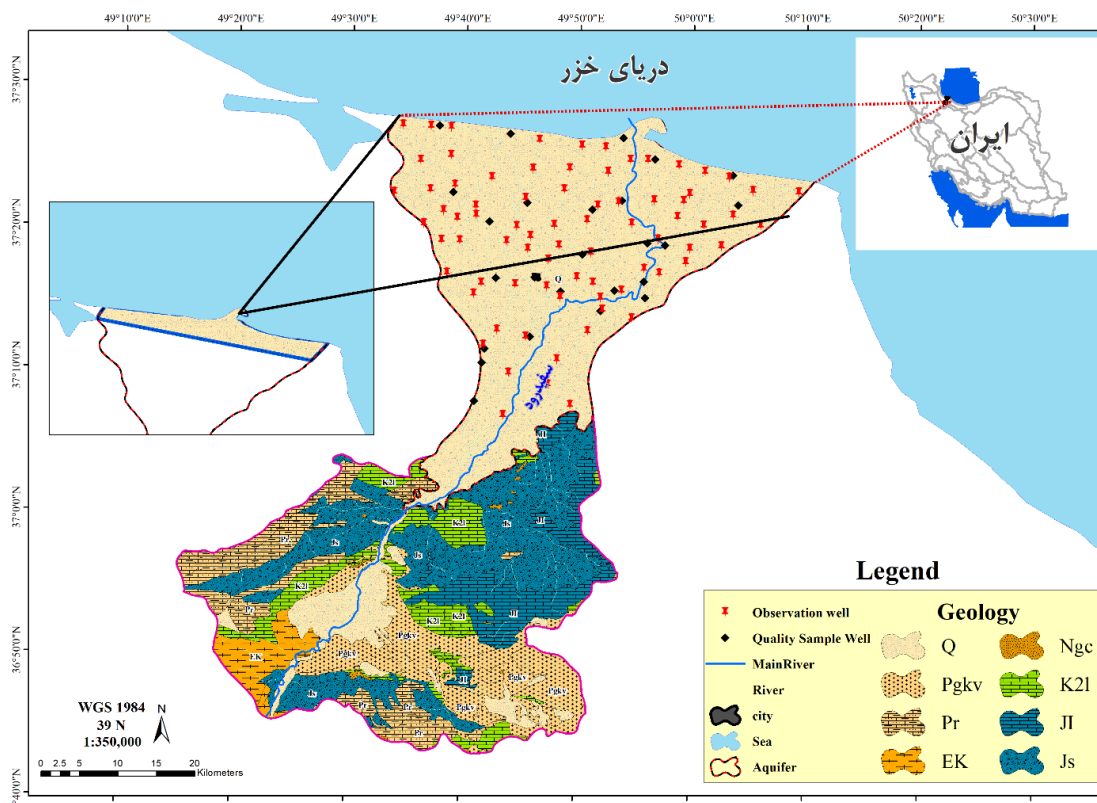


شکل ۱. مراحل تحقیق

منطقه مطالعه شده

روند افزایش جمعیت و تنش های اقلیمی سبب شده تا مناطق با پتانسیل بهره برداری در بخش کشاورزی و صنعت توریست مورد توجه قرار گیرد و تمرکز مدیریت بر آن ها واقع شود. این موضوع سبب افزایش حجم بهره برداری از منابع آب زیرزمینی و مشکلات کمی و کیفی در آبخوان ها شده است. آبخوان آستانه-کوچصفهان تحت تأثیر تنش های مختلف در سال های اخیر قرار گرفته و با توجه به قابلیت های بهره برداری، ضروری است که رویکردهای مدیریتی برای پایداری بهره برداری در آن انجام گیرد. این آبخوان در شمال کشور بین طول جغرافیایی $48^{\circ} 40'$ تا $50^{\circ} 25'$ و عرض جغرافیایی $37^{\circ} 00'$ تا $39^{\circ} 50'$ با میانگین بارش 1500 میلی متر در یک اقلیم مرطوب واقع شده است. این آبخوان از مخروط افکنه سفیدرود تا دریا ادامه داشته و غیر از آبرفت های جوان تر که در قسمت سطحی مخروط افکنه قرار گرفته اند، در بقیه قسمت های دشت، تناوب عناصر دانه ریز-دانه درشت یا به کلی عناصر دانه ریز دیده شده است. قسمت عمده ای از منابع آب زیرزمینی و سطحی این محدوده در بخش کشاورزی و کشت برنج

مورد بهره برداری قرار می گیرد. این آبخوان با مساحت 1300 کیلومتر مربع از جنس آبرفت بوده و در قسمت های جنوب غربی از نوع آبخوان تحت فشار است. آبخوان آستانه-کوچصفهان از نظر ساختاری یکپارچه نیست و با توجه به ساختار زمین شناسی و لایه بندی تغییراتی دارد. براساس مطالعات ژئوفیزیک انجام شده در منطقه، بیشترین ضخامت آبرفت 250 متر و حداقل ضخامت 100 متر است. سنگ کف دشت، نهشته های دریاچه ای است که براساس اطلاعات موجود، ضخامت آن تا 1000 متر نیز می رسد. عمق سطح آب در این دشت عموماً بین 1 تا 4 متر متغیر است. بیان منابع آب این محدوده نشان می دهد سالانه بیش از 41 میلیون مترمکعب از طریق چاه های منطقه برداشت می شود که این موضوع در بخش های خروجی آبخوان که منتهی به دریا است باعث افت آب زیرزمینی شده است [۲۶]. این افت آبخوان در بخش خروجی سبب تغییر گرادیان هیدرولیکی و کاهش حجم جریان های زیرزمینی خروجی شده و با توجه به چگالی بیشتر آب شور دریا در این بخش، سبب تهاجم آب شور از طرف دریا به ساحل شده است.



شکل ۲. موقعیت منطقه مطالعه شده و سازندهای زمین شناسی

جدول ۱. بیلان منابع آب زیرزمینی آبخوان آستانه- کوچصفهان- MCM

عوامل ورودی			عوامل خروجی		
مساحت	جریان	نفوذ	تخلیه از	جریان	تغییرات
آبخوان	زیرزمینی	از	منابع آب	زیرزمینی	ذخیره
	ورودی	بارش	زیرزمینی	خروجی	جمع
		سطحی	خروجی	آبخوان	
۹۸۹	۱۲	۵۳/۷	۴۱/۱۳	۱۵/۱۱	۱۴۱/۶۲
		۶/۰۴		۶۸/۹۵	۱۶/۴۳
					۱۴۱/۶۲
					۰

چگالی انجام می‌گیرد. معادله ۲ تحلیل عددی شبیه‌سازی را بر اثر تغییرات غلظت و چگالی در آبخوان ساحلی به صورت هم‌زمان نشان می‌دهد:

$$\left[1 + \frac{\rho_b K_d}{\theta}\right] \frac{\partial(\theta C^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\theta D_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x_j} \right] - \frac{\partial}{\partial x_i} [\theta v_i C^k] + q_s C_s^k + \sum R_n \quad (2)$$

در این رابطه ρ_b چگالی ظاهری $\left(\rho_b = \frac{M_s}{V_t}\right)$ ، K_d ضریب جذب خطی (ضریب توزیع)، θ تخلخل مواد (بدون بعد)، C^k غلظت محلول، T ، زمان، x_{ij} فاصله در راستای محورهای مختصات کارتریز، D_{ij} تانسور ضریب انتشار هیدرودینامیکی، v_i سرعت آب در محیط متخلخل یا سرعت جریان داری، q_s نرخ جریان حجمی در واحد حجم آبخوان، $\sum R_n$ واحد واکنش شیمیایی است. شبیه‌سازی تهاجم آب شور بر مبنای حرکت آب زیرزمینی تحت تأثیر گرادیان هیدرولیکی تحت تغییرات چگالی آب شور و شیرین انجام می‌گیرد.

با توجه به رابطه بالا برای شبیه‌سازی حد اینترفاز آب شور و شیرین در طول و عمق نوار ساحلی به پارامترهای چگالی آب شور دریا، چگالی آب شیرین در نوار ساحلی، میزان هدایت هیدرولیکی در نوار ساحلی، میزان غلظت کلراید (Cl) و شیب گرادیان تغییر غلظت املاح جهت شبیه‌سازی تهاجم جبهه‌های آب شور نیاز است.

تهیه مدل مفهومی

اولین گام برای شبیه‌سازی نفوذ آب شور به سفره آب زیرزمینی، تهیه مدل مفهومی از آبخوان (شامل شرایط مرزی، شبکه‌بندی در سطح و عمق و حد اینترفاز) و بررسی ساختار زمین‌شناسی آن است [۲۷]. با توجه به اینکه ساختار مدل SEAWAT ماهیت تهاجم آب شور از طرف دریا را سه‌بعدی در نظر می‌گیرد، از این‌رو در بخش

وضعیت بهره‌برداری منطقه به گونه‌ای است که تلفیق بهره‌برداری از منابع سطحی و زیرزمینی در منطقه وجود دارد و بر این اساس، بیلان منابع آب زیرزمینی بدون کسری مخزن به صورت جدول ۱ ارائه شده است.

شبیه‌سازی تهاجم آب شور

به منظور شبیه‌سازی تهاجم آب شور، ابتدا شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW انجام گرفت و پس از ارزیابی و صحت نتایج شبیه‌سازی کمی آبخوان، سپس شبیه‌سازی تغییرات غلظت با استفاده از مدل MT3DMS انجام گرفت. به منظور شبیه‌سازی نفوذ آب شور از مدل SEAWAT برای تحلیل تغییر چگالی استفاده شد. بر این اساس، مطابق رابطه ۱ جریان تحت تأثیر تغییر چگالی شبیه‌سازی می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\rho K_x \left(\frac{\partial h_f}{\partial x} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial z}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\rho K_y \left(\frac{\partial h_f}{\partial y} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial z}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho K_z \left(\frac{\partial h_f}{\partial z} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial z}{\partial z} \right) \right] = \rho S_f \frac{\partial h_f}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} - p_s q_s \quad (1)$$

در این رابطه x ، y و z به عنوان جهت جریان، K_x ، K_y و K_z به عنوان هدایت هیدرولیکی در جهات مختلف (LT)، S_f ضریب ذخیره در آبخوان آب شیرین (L)، h_f معادل تراز آب در آبخوان شیرین، θ تخلخل مؤثر، ρ چگالی آب شور، ρ_f چگالی آب شیرین، ρ_s چگالی آب ورودی از یک منبع، q_s نرخ حجمی سرعت در واحد حجم آبخوان (T)، C غلظت محلول (LT) و t زمان است.

پس از شبیه‌سازی جریان و غلظت با استفاده از مدل MODFLOW و MT3D، شبیه‌سازی تهاجم جبهه‌های آب شور از طرف یک محدوده آب شور (نظیر دریا) به طرف یک محدوده شیرین براساس گرادیان هیدرولیکی تابع تغییرات چگالی آب به صورت هم‌زمان انجام می‌گیرد. این شبیه‌سازی با استفاده از مدل SEAWAT و تعریف مرز خروجی آبخوان در نوار ساحلی براساس تغییرات غلظت و

از مدل SEAWAT برای تعیین میزان تهاجم در عمق آبخوان به عنوان تعیین حد انیترفاز آب شور و شیرین استفاده شد. در این مدل مرز جبهه‌های آب شور در مقابل مرز جبهه‌های آب شیرین به صورت GHB براساس نتایج مدل MT3D تعریف شد. در مدل SEAWAT از پکیج VDF برای تعیین غلظت اولیه کلراید در آبخوان (آب شیرین) و غلظت کلراید در آب شور و همچنین، چگالی آب شور و شیرین استفاده شد. با توجه به مطالعات انجام شده و اندازه‌گیری به‌عمل آمده متوسط چگالی آب شور در بخش خروجی آبخوان ۱۰۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب و میزان غلظت نمک ۳۳ کیلوگرم در هر مترمکعب مشخص شده است. بر این اساس، مقدار تغییرات شیب چگالی نسبت به غلظت که به عنوان پارامتر DRHODC معرفی می‌شود، براساس رابطه ۳ به دست آمد.

Density / concentration.slop (DRHODG):

$$(3) \quad \frac{1025(\text{kg}/\text{m}^3) - 1000(\text{kg}/\text{m}^3)}{33(\text{kg}/\text{m}^3) - 0(\text{kg}/\text{m}^3)} = 0.75$$

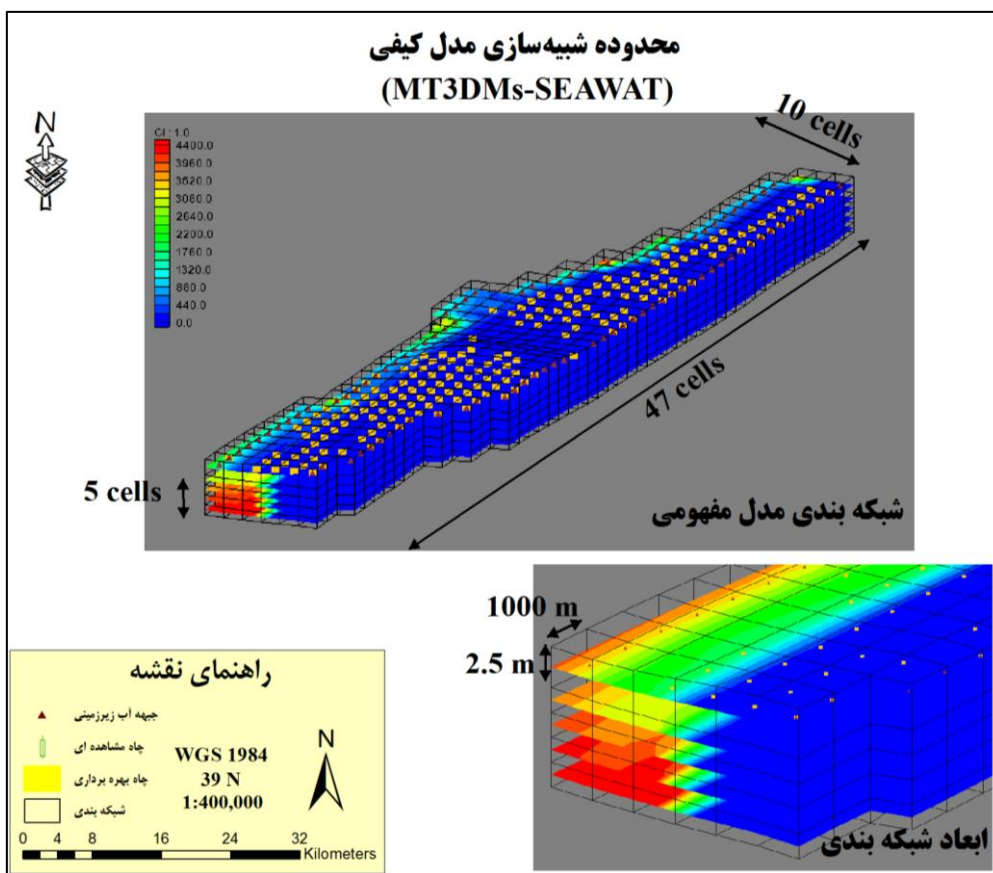
دوره شبیه‌سازی برای تعیین عمق پیشروی آب شور مشابه مدل کمی MODFLOW و مدل کیفی MT3D دوره ۵ ساله انتخاب شد.

راهکارهای علاج بخشی و ارزیابی راهکارها

با توجه به تهاجم آب شور و نتایج شبیه‌سازی مدل SEAWAT، سه راهکار منفرد کاهش برداشت آب در چهار سطح ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد، تغذیه مصنوعی و احداث سد زیرزمینی و ۱۳ راهکار تلفیقی تعریف و شبیه‌سازی شد. مبنای انتخاب این راهکارها براساس کسری آبخوان و افت آب زیرزمینی در بخش خروجی آبخوان انتخاب شده است. راهکارهای تعریف شده از دو منظر مدیریتی (کاهش برداشت) و سازه ای (تغذیه مصنوعی و سد زیرزمینی) انتخاب شده است. در نهایت، تعداد ۱۹ راهکار برای بهبود وضعیت آبخوان مطابق جدول ۲ ارائه می‌شود.

خروجی آبخوان (نوار ساحلی) بعد سوم در عمق آبخوان با توجه به ضخامت آبخوان در ۵ لایه طراحی شد. از آنجا که لایه‌بندی در عمق اهمیت بسزایی دارد، شبکه‌بندی مدل در سطح ۱۰۰۰*۱۰۰۰ متری است و در عمق آبخوان به صورت ۲/۵ متری تعریف شد. تعداد سلول‌ها و لایه‌های در نظر گرفته شده در عمق آبخوان با توجه به ضخامت سفره در ناحیه ساحلی در نظر گرفته شد. برای شبیه‌سازی نفوذ آب شور توسط پکیج SEAWAT، لازم است ابتدا مدل کمی (MODFLOW) و مدل کیفی (MT3D) آبخوان تهیه شود. دوره مدل‌سازی کمی و کیفی به مدت پنج سال (۱۳۹۱ تا ۱۳۹۵) در نظر گرفته شد. در مدل مفهومی جبهه‌های آب زیرزمینی ورودی و خروجی از نوع GHB، تغذیه از سطح آبخوان شامل جریان‌های برگشتی و نفوذ از بارش و رواناب براساس مطالعات بیلان و تخلیه از چاه‌های بهره‌برداری براساس آماربرداری سراسری منتهی به سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۹۰ در نظر گرفته شد. در مرحله بعد به منظور شبیه‌سازی نفوذ جبهه‌های آب شور در بخش خروجی آبخوان، نوار ساحلی (شکل ۲) با استفاده از مدل کیفی MT3D و SEAWAT شبیه‌سازی شد. در شبیه‌سازی با مدل MT3D دو فرایند همرفت^۱ و پخشیدگی^۲ برای شبیه‌سازی انتقال املاح استفاده شد. برای شبیه‌سازی کیفی با توجه به نفوذ آب شور دریا، پارامتر کیفی کلراید (CI) انتخاب شد. این پارامتر با توجه به نمونه‌برداری‌های کیفی در منطقه، داشتن سری زمانی مناسب و پایداری یون در فرایندهای تبادل کاتیونی برای شبیه‌سازی انتخاب شد. پس از تعیین شرایط مرزی در مدل‌سازی کمی، شرایط مرزی مدل مفهومی کیفی آبخوان براساس جبهه‌های ورود غلظت کلراید به آبخوان تعریف شد. مطابق شکل ۳ مدل مفهومی کیفی سه جبهه ورودی شامل سطح آبخوان (تغذیه ناشی از آب برگشتی)، غلظت ورودی آب شور از خط ساحلی آبخوان (لایه مرزی GHB در انتهای آبخوان) و غلظت وارد شده از مرز ورودی جریان آب زیرزمینی (لایه مرزی GHB در ابتدای آبخوان) در نظر گرفته شد.

پس از شبیه‌سازی کیفی با مدل MT3D و تعیین میزان تغییرات غلظت کلراید و شیوه ورود آن به آبخوان،



شکل ۳. مدل مفهومی آبخوان

جدول ۲. راهکارهای علاج بخشی آبخوان

کد راهکار	راهکار علاج بخشی	نوع راهکار	کد راهکار	راهکار علاج بخشی	نوع راهکار
S11	کاهش برداشت ۵ درصد+ سد زیرزمینی		S1	کاهش برداشت ۵ درصد	
S12	کاهش برداشت ۱۰ درصد+ سد زیرزمینی		S2	کاهش برداشت ۱۰ درصد	منفرد-
S13	کاهش برداشت ۱۵ درصد+ سد زیرزمینی		S3	کاهش برداشت ۱۵ درصد	مدیریتی
S14	کاهش برداشت ۲۰ درصد+ سد زیرزمینی		S4	کاهش برداشت ۲۰ درصد	
S15	کاهش برداشت ۵ درصد+ تغذیه مصنوعی+ سد زیرزمینی		S5	تغذیه مصنوعی	منفرد-سازه‌ای
S16	کاهش برداشت ۱۰ درصد+ تغذیه مصنوعی+ سد زیرزمینی	ترکیبی	S6	ایجاد سد زیرزمینی	
S17	کاهش برداشت ۱۵ درصد+ تغذیه مصنوعی+ سد زیرزمینی		S7	کاهش برداشت ۵ درصد+ تغذیه مصنوعی	
S18	کاهش برداشت ۲۰ درصد+ تغذیه مصنوعی+ سد زیرزمینی		S8	کاهش برداشت ۱۰ درصد+ تغذیه مصنوعی	ترکیبی
S19	ایجاد سد زیرزمینی+ تغذیه مصنوعی		S9	کاهش برداشت ۱۵ درصد+ تغذیه مصنوعی	
			S10	کاهش برداشت ۲۰ درصد+ تغذیه مصنوعی	

نتایج و بحث

ارزیابی نتایج مدل سازی کمی

اولین گام در شبیه سازی تهیه مدل مفهومی و اعتبارسنجی مدل کمی MODFLOW برای شبیه سازی است. به این منظور، پس از شناسایی عوامل حساس در شبیه سازی کمی آبخوان، ارزیابی مدل براساس معیارهای آماری خطا بین تراز آب زیرزمینی شبیه سازی شده و مشاهداتی مطابق جدول ۳ به دست آمد. نتایج به دست آمده از معیار ارزیابی خطای شبیه سازی کمی آبخوان بیانگر دقت مناسب بود و میانگین مجذور خطا در سه حالت مدل ماندگار، غیرماندگار و دوره صحت سنجی کمتر از یک متر به دست آمد. با توجه به نتایج به دست آمده مدل نهایی آبخوان آستانه-کوچصفهان با در نظر گرفتن خطای کمتر از ۵۰ سانتی متر بین تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و شبیه سازی شده به صورت شکل ۴ ارائه شد.

نتایج ارائه شده در شکل ۴ نشان می دهد جریان آب زیرزمینی از بخش جنوبی به طرف شمال و دریا در حرکت است و بیشترین حجم جریان زیرزمینی ورودی در بخش مرکزی این منطقه قرار دارد. دو پارامتر هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه آبخوان دو پارامتر حائز اهمیت در واسنجی مدل در حالت کمی بود که با روش سعی و خطا انجام گرفت. نتایج به دست آمده در شکل ۵ برای این دو پارامتر ارائه شده است.

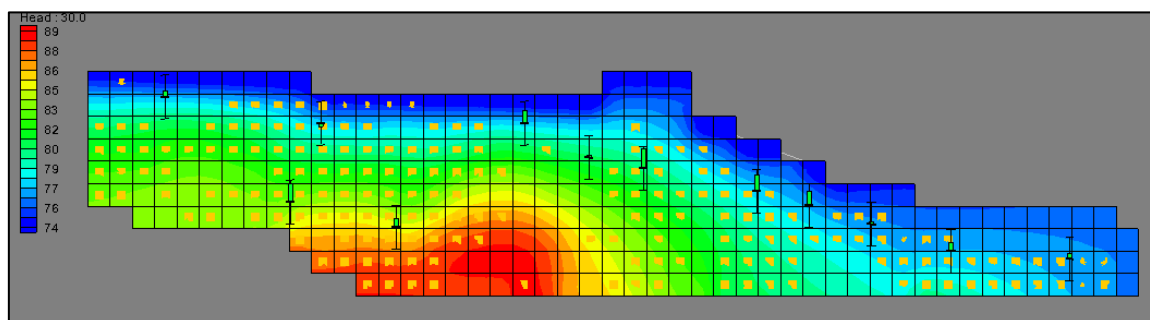
معیارهای عملکرد یک سیستم منابع آب براساس میزان کارایی تعریف شده برای کاربران آب در بخش های مختلف تعریف می شود. کارایی فنی یک سیستم منابع آب در ارائه راهکارهای علاج بخشی منابع آب را براساس هدف آن می توان تعریف کرد [۲۹]. با توجه به هدف این مطالعه که بحث تهاجم آب شور از طرف دریا و منطقه تحت تأثیر شوری آب است، بنابراین در منطقه ساحلی تحت تأثیر نفوذ آب شور دریا از شاخص پایداری کیفی آبخوان استفاده شد. این شاخص بر مبنای میزان طول تهاجم آب شور تعریف می شود. شاخص به صورت رابطه ۴ ارائه می شود:

$$\alpha_L = 100 * \left(\frac{L_{mt} - L_{qs}}{L_{mt}} \right) \quad (4)$$

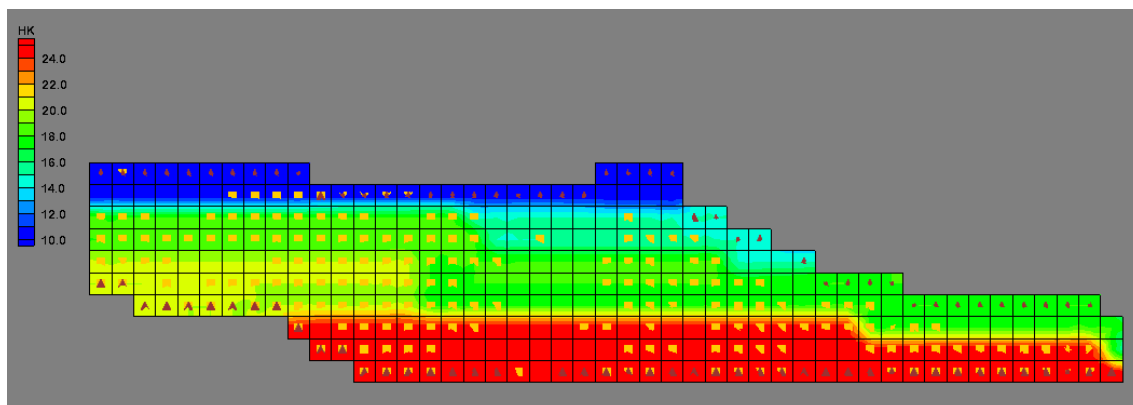
در این رابطه L_{qs} میزان تهاجم آب شور پس از اعمال سناریو (متر/کیلومتر) و L_{mt} میزان تهاجم آب شور در شرایط اولیه (بدون اعمال سناریو) در آبخوان (متر/کیلومتر) و α_L شاخص پایداری کیفی تهاجم آب شور (%) است. محدوده تغییرات این شاخص بین ۱+ تا -∞ است. هر چه میزان این شاخص به ۱+ نزدیک تر باشد، وضعیت کیفی آبخوان از نظر هجوم آب شور بهبود یافته و موجب پسروی آب شور می شود. و پیشروی آب شور باعث کاهش این شاخص می شود. طول تهاجم آب شور در شرایط اولیه و پس از اعمال سناریوها براساس نتایج شبیه سازی مدل SEAWAT به دست می آید.

جدول ۳. میزان خطای مدل کمی در دو حالت ماندگار و غیرماندگار-متر

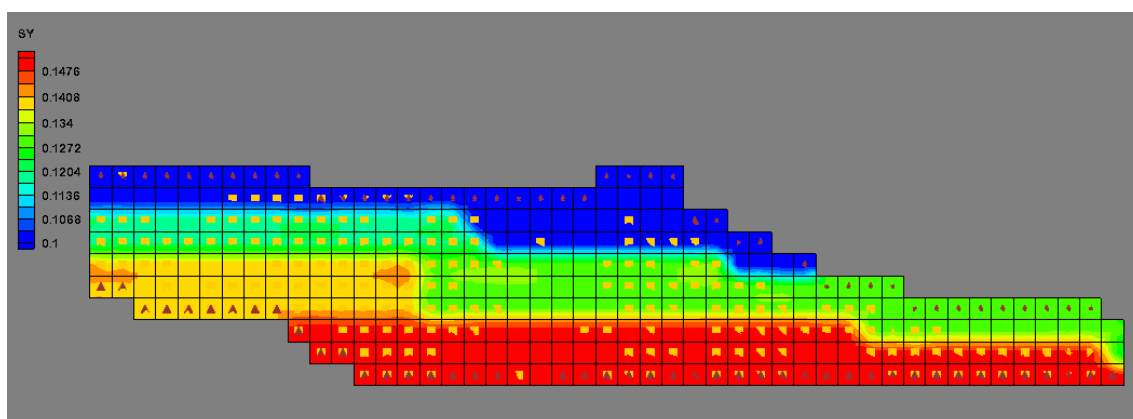
شاخص خطا	مدل ماندگار	مدل غیرماندگار	صحت سنجی
میانگین خطا	۰/۱۸	۰/۴۷	۰/۷۷
میانگین مطلق خطا	۰/۳۲	۰/۷۶	۰/۸۴
میانگین مجذور خطا	۰/۴۷	۰/۹۷	۰/۸۹



شکل ۴. مدل نهایی واسنجی شده بخش خروجی آبخوان آستانه-کوچصفهان



الف- هدایت هیدرولیکی



ب- آبدهی ویژه

شکل ۵. نتایج پهنه‌بندی پارامترهای واسنجی در بخش خروجی آبخوان آستانه-کوچصفهان

در آبخوان انجام گرفت. شبیه‌سازی مدل کیفی با در نظر داشتن سه جبهه ورود کلراید انجام گرفت. کلراید ورودی از طریق جبهه‌های آب زیرزمینی ورودی به آبخوان، تغذیه ناشی از آب برگشتی از سطح آبخوان و آب زیرزمینی ورودی از طرف دریا به آبخوان مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. در نهایت، شبیه‌سازی مدل انتقال املاح MT3DMs براساس تغییرات غلظت پارامتر کلراید انجام گرفت. واسنجی در مدل کیفی با روش سعی و خطا انجام و پارامتر ضریب پخشیدگی طولی آنالیز و واسنجی شد. واسنجی ضریب پخشیدگی طولی با توجه به عدم داشتن داده‌های مربوط به انتقال آلودگی براساس میزان هدایت هیدرولیکی و نوع سازندهای زمین‌شناسی منطقه، شیب بخش خروجی آبخوان، کاربری اراضی و استفاده از نمونه‌برداری‌های کیفی انجام گرفت. شکل ۶ بیانگر تغییرات غلظت کلراید در سطح آبخوان در انتهای دوره شبیه‌سازی است. نتایج پس از یک دوره ۵ ساله

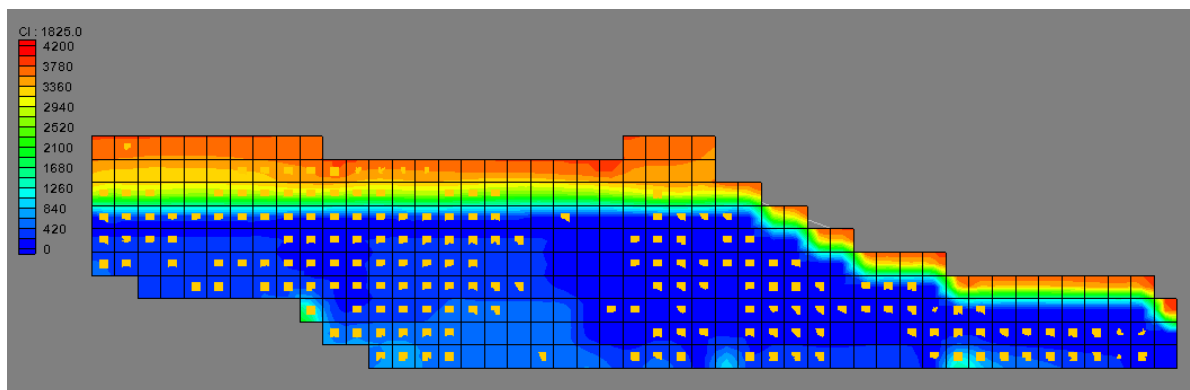
نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد همبستگی بین هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه در بخش خروجی آبخوان برقرار بوده و در جهت جریان میزان هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه کاهش داشته است. همچنین، نتایج نشان می‌دهد حداقل مقدار هدایت هیدرولیکی که ۱۰ متر در روز است در بخش ساحلی قرار دارد و این مقدار در بخش خروجی با توجه به مقدار عددی بالا، امکان انتقال و سرعت جریان را بالا می‌برد. همچنین، نتایج ضریب آبدهی ویژه آبخوان نیز بیانگر این موضوع است که حداقل مقدار ۱۰ درصد بوده که مقدار زیادی است و این موضوع پتانسیل زیاد این منطقه جهت بهره‌برداری و تعریف راهکارهای علاج بخشی تهاجم آب شور از طرف دریا را میسر می‌کند.

نتایج شبیه‌سازی تهاجم آب شور

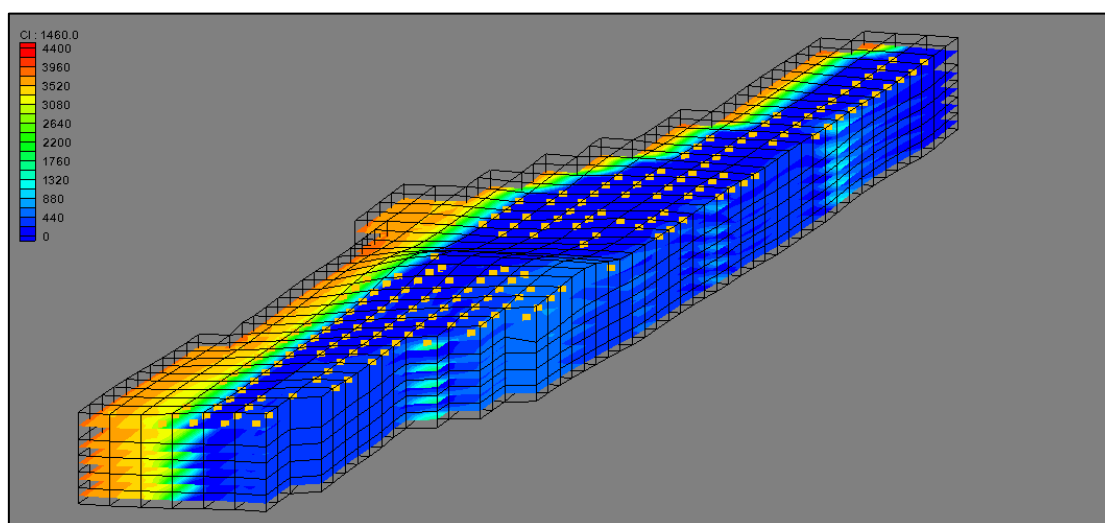
پس از ارزیابی و دقت مناسب مدل کمی که شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی را نشان داد، شبیه‌سازی کیفی ابتدای با استفاده از مدل MT3DMs با شبیه‌سازی غلظت کلراید

نسبت به بخش غربی کاهش داشته است. نتایج شبیه‌سازی غلظت کلراید نشان داد بخش خروجی آبخوان که بیشتر تحت تأثیر آب دریا و جریان‌های زیرزمینی خروجی قرار دارد، بیشترین میزان غلظت کلراید را نشان داده است. پس از شبیه‌سازی تغییرات غلظت کلراید در سطح آبخوان با استفاده از مدل MT3DMS، میزان تهاجم آب شور با استفاده از مدل SEAWAT انجام گرفت. در این مدل با معرفی پارامترهای پکیج VDF در مدل، غلظت اولیه کلراید در آبخوان، غلظت نمک در آب شور و چگالی آب شور و شیرین به عنوان شرایط اولیه و مرزی انجام گرفت. در شکل ۷ نتایج شبیه‌سازی در کف آبخوان و هجوم آب شور در لایه‌های عمقی را نشان می‌دهد.

شبیه‌سازی در بخش خروجی آبخوان نشان داد میزان غلظت کلراید در بخش غربی نسبت به سایر بخش‌ها افزایش بیشتری داشته است. بخش غربی آبخوان تا فاصله بیش از یک کیلومتری تحت تأثیر تهاجم آب شور دریا قرار گرفته و غلظت کلراید به بیش از ۴ هزار میلی‌گرم در لیتر رسیده است. بررسی شبکه بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی نشان می‌دهد حجم بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در بخش غربی نسبت به بخش شرقی حجم بیشتری را برداشت می‌کنند. همین موضوع مهم‌ترین دلیل بر افزایش تهاجم آب شور در آن ناحیه است. از طرف دیگر، بخش شرقی آبخوان تحت تأثیر جریان‌های سطحی و رودخانه سفیدرود به عنوان بزرگ‌ترین منبع آب سطحی این منطقه است، بنابراین میزان افزایش غلظت کلراید



شکل ۶. نتایج شبیه‌سازی غلظت کلراید با استفاده از مدل MT3DMS



شکل ۷. شبیه‌سازی مدل کیفی SEAWAT در بخش خروجی آبخوان

حدود ۳ میلیون مترمکعب در سال به صورت پهنه‌ای وارد مدل و شبیه‌سازی انجام گرفت. در راهکارهای ترکیبی، اعمال سناریوها و مقادیر آنها توأمان انجام گرفت. بر این اساس، شبیه‌سازی آبخوان انجام و براساس میزان پس‌روی آب در هر راهکار، شاخص پایداری کیفی آبخوان محاسبه شد. در جدول ۴ مقدار پس‌روی آب در هر راهکار و مقدار شاخص پایداری کیفی پس‌روی آب شور محاسبه شده است.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده راهکار S18 که بیشترین میزان کاهش برداشت، بیشترین میزان تغذیه و کنترل جریان ورودی خروجی را با استفاده از سد زیرزمینی دارد، بیشترین مقدار شاخص پایداری کیفی آبخوان را به میزان ۶۵ درصد نشان می‌دهد. کمترین میزان تأثیرگذاری را در شاخص پایداری کیفی آبخوان مربوط به سناریوی S1 با کاهش ۵ درصد بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی منطقه است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده نتایج چهار راهکار S3، S7، S10 و S18 در شکل ۸ ارائه شده است.

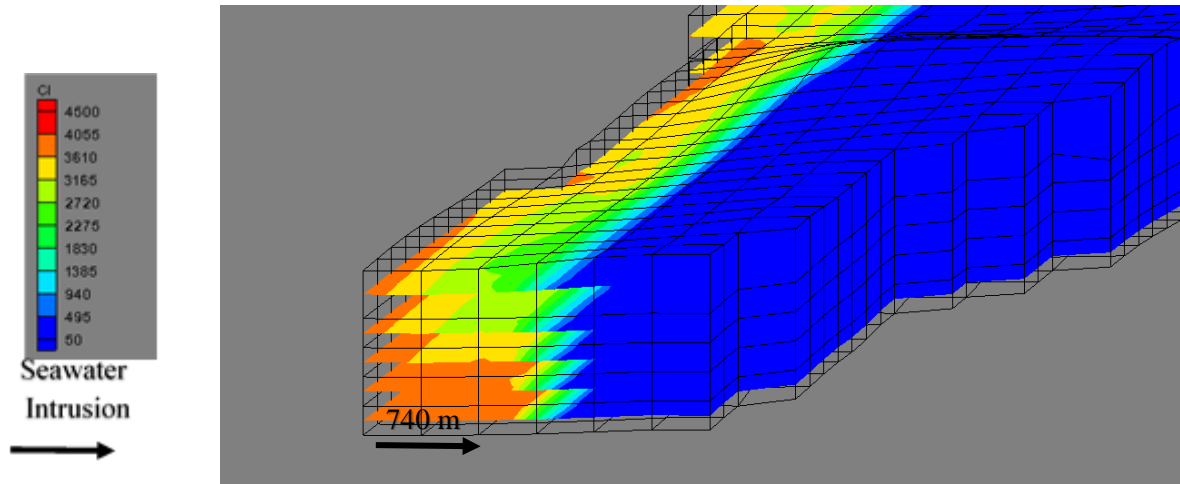
نتایج شبیه‌سازی در عمق آبخوان نشان داد تهاجم آب شور به میزان ۷۴۰ متر طی ۵ سال (۲۰۱۲ تا ۲۰۱۷) انجام گرفته است. این تهاجم بیشتر تحت تأثیر بهره‌برداری از آب زیرزمینی و کاهش گرادیان هیدرولیکی اتفاق افتاده است.

ارزیابی راهکارهای علاج بخشی آبخوان

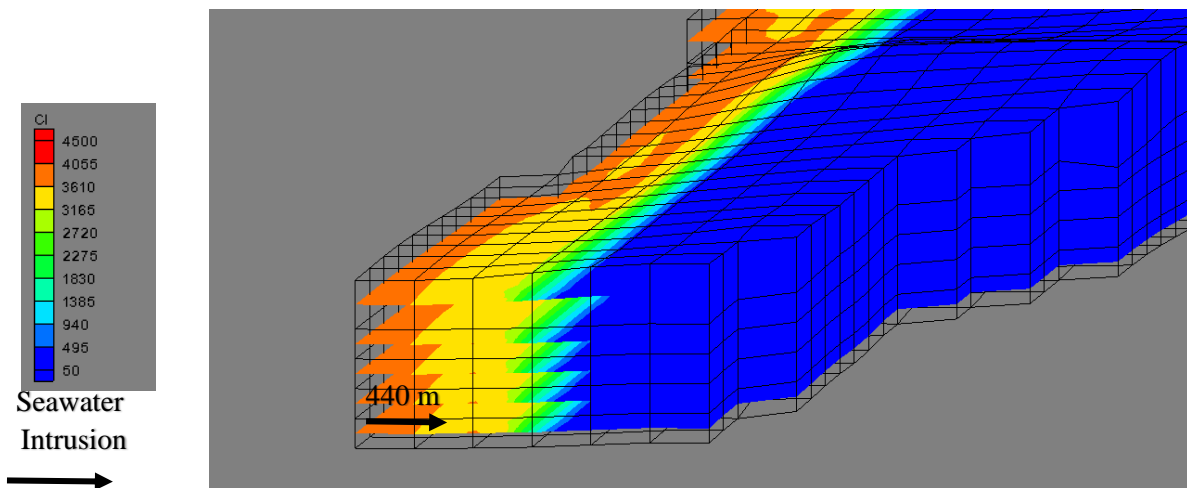
پس از شبیه‌سازی کمی و کیفی آبخوان و تهاجم ۷۴۰ متر آب شور از کف آبخوان، سه مجموعه راهکار علاج بخشی آبخوان شبیه‌سازی شد. راهکار کاهش برداشت آب از چاه‌های این بخش از آبخوان در چهار سطح تعریف شد که با توجه به بهره‌برداری کشاورزی این چاه‌ها، مقادیر کاهش به صورت مساوی برای چاه‌های منطقه تعریف و میزان آب برگشتی ناشی از مصارف نیز مشخص و در مدل اعمال شد. در راهکار احداث سد زیرزمینی محدوده‌های منتهی به دریا با کاوریج Barrier تعریف شد. این کاوریج انتقال آب از دو طرف جریان را مسدود می‌کند. در راهکار تغذیه مصنوعی با توجه به جریان‌های سطحی در منطقه، حجمی

جدول ۴. شاخص‌های پایداری کیفی آبخوان و میزان پس‌روی آب شور

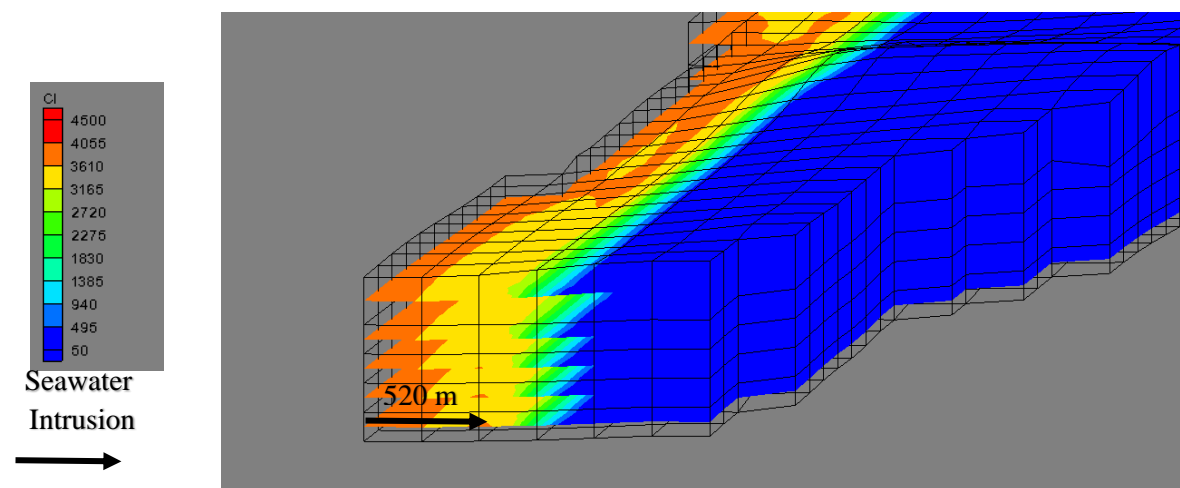
شاخص پایداری کیفی	مقدار پس‌روی متر	راهکار علاج بخشی	شاخص پایداری کیفی	مقدار پس‌روی متر	راهکار علاج بخشی
۰/۴۷	۳۵۰	کاهش برداشت ۵ درصد+ سد زیرزمینی- S11	۰/۱۴	۱۰۰	کاهش برداشت ۵ درصد- S1
۰/۵۱	۳۷۵	کاهش برداشت ۱۰ درصد+ سد زیرزمینی- S12	۰/۲۳	۱۷۰	کاهش برداشت ۱۰ درصد- S2
۰/۵۴	۴۰۰	کاهش برداشت ۱۵ درصد+ سد زیرزمینی- S13	۰/۳۴	۲۵۰	کاهش برداشت ۱۵ درصد- S3
۰/۵۹	۴۴۰	کاهش برداشت ۲۰ درصد+ سد زیرزمینی- S14	۰/۴۱	۳۰۰	کاهش برداشت ۲۰ درصد- S4
۰/۵۴	۴۰۰	کاهش برداشت ۵ درصد+ تغذیه مصنوعی+ سد زیرزمینی- S15	۰/۲	۱۵۰	تغذیه مصنوعی- S5
۰/۵۸	۴۳۰	کاهش برداشت ۱۰ درصد+ تغذیه مصنوعی+ سد زیرزمینی- S16	۰/۴۱	۳۰۰	ایجاد سد زیرزمینی- S6
۰/۶۱	۴۵۰	کاهش برداشت ۱۵ درصد+ تغذیه مصنوعی+ سد زیرزمینی- S17	۰/۳	۲۲۰	کاهش برداشت ۵ درصد+ تغذیه مصنوعی- S7
۰/۶۵	۴۸۰	کاهش برداشت ۲۰ درصد+ تغذیه مصنوعی+ سد زیرزمینی- S18	۰/۳۷	۲۷۵	کاهش برداشت ۱۰ درصد+ تغذیه مصنوعی- S8
۰/۵۵	۴۱۰	ایجاد سد زیرزمینی+ تغذیه مصنوعی- S19	۰/۴۳	۳۲۰	کاهش برداشت ۱۵ درصد+ تغذیه مصنوعی- S9
			۰/۴۹	۳۶۰	کاهش برداشت ۲۰ درصد+ تغذیه مصنوعی- S10



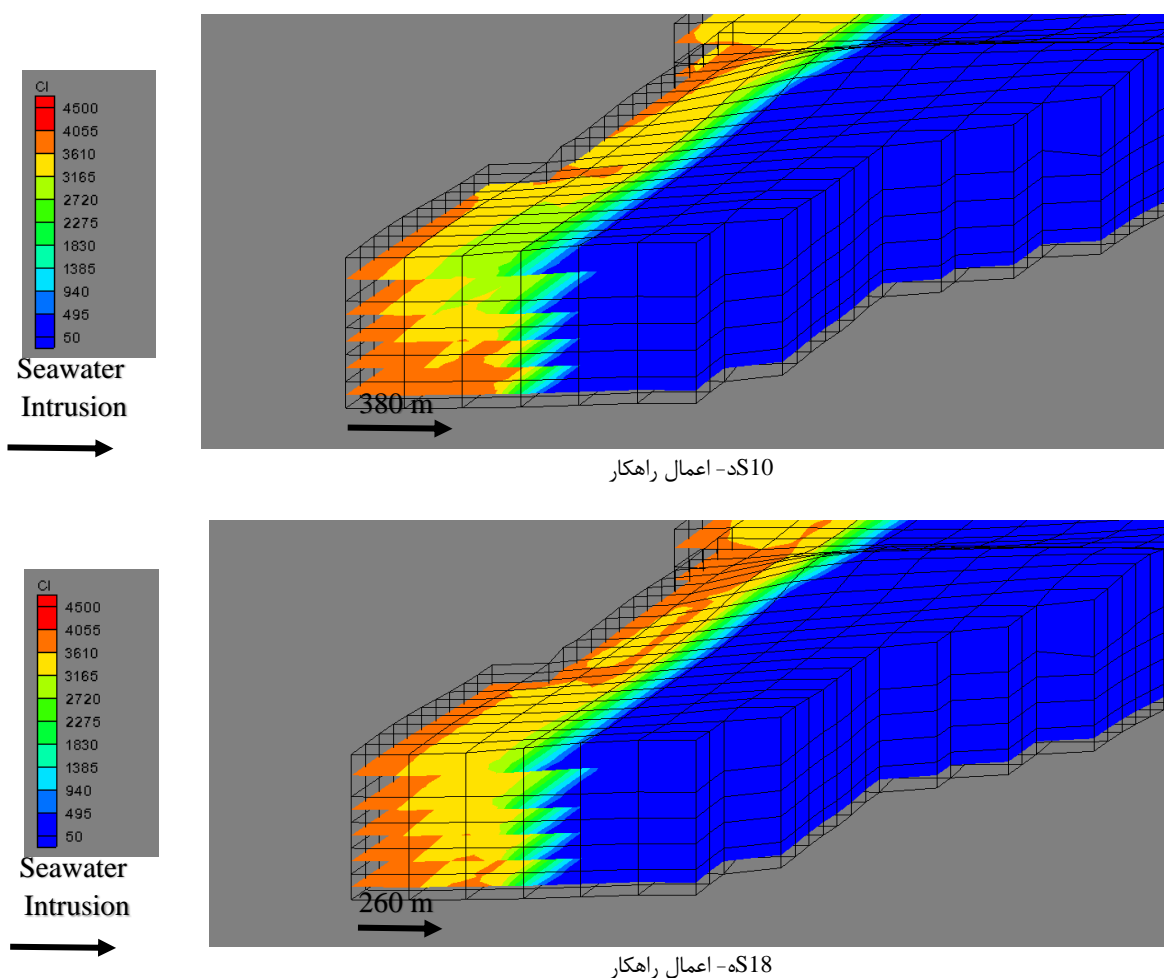
الف- بدون اعمال راهکار



S3- اعمال راهکار



S7- اعمال راهکار



شکل ۸. نتایج شبیه‌سازی اعمال راهکارهای علاج بخشی در آبخوان

و تغذیه مصنوعی آبخوان در بخش خروجی به عنوان سه راهکار کلان در ۱۹ راهکار منفرد و ترکیبی مورد استفاده قرار گرفت. به منظور ارزیابی نتایج شبیه‌سازی تحت اعمال راهکارهای مختلف از شاخص پایداری کیفی آبخوان که مبتنی بر میزان پس‌روی آب شور بر اثر اعمال راهکار است، استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد اعمال راهکارهای مختلف سبب پس‌زدگی آب شور می‌شود که کمترین میزان تأثیر را راهکار S1 با کاهش ۵ درصد برداشت از آبخوان داشته و بیشترین تأثیر را در راهکار S18 که کاهش ۲۰ درصد بهره‌برداری به همراه اعمال تغذیه مصنوعی و سد زیرزمینی است، به میزان ۶۵ درصد داشته است. اعمال راهکارهای علاج بخشی نشان داد تغییر گرادیان هیدرولیکی بخش ساحلی سبب افزایش تراز آب زیرزمینی شیرین آبخوان نسبت به دریا می‌شود و در کنترل تهاجم آب شور بسیار مناسب است. این موضوع در مطالعات مختلف تدوین راهکارهای

نتیجه‌گیری

امروزه، موضوع تهاجم آب شور از طرف دریا به آبخوان به عنوان یکی از چالش‌های مهم زیست‌محیطی مطرح بوده و این موضوع در آبخوان‌های شمال کشور بسیار مشهود است. این مطالعه به بررسی و ارزیابی راهکارهای علاج بخشی برای کنترل تهاجم آب شور به منظور مدیریت منابع آب زیرزمینی با استفاده از شبیه‌سازی عددی و تعریف یک شاخص مورد بررسی قرار داده است. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی تهاجم آب شور در آبخوان نشان داد پس از یک دوره ۵ ساله، آب شور دریا تا ۷۴۰ متر به داخل پیشروی می‌کند و باعث شور شدن نوار ساحلی آبخوان می‌شود. با توجه به این موضوع، راهکارهای علاج بخشی با رویکرد ترکیبی از سناریوهای مدیریتی و سازه‌ای، برای مدیریت آبخوان ساحلی نسبت به نفوذ آب شور مورد بررسی قرار گرفت. سه راهکار کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی، احداث سد زیرزمینی

- [9]. Stein S, Yechieli Y, Shalev E, Kasher R, Sivan O. The effect of pumping saline groundwater for desalination on the fresh-saline water interface dynamics. *Water research*. 2019 Jun 1; 156: 46-57.
- [10]. Hussain MS, Abd-Elhamid HF, Javadi AA, Sherif MM. Management of seawater intrusion in coastal aquifers: a review. *Water*. 2019 Dec; 11(12):2467.
- [11]. Llopis-Albert C, Pulido-Velazquez D. Discussion about the validity of sharp-interface models to deal with seawater intrusion in coastal aquifers. *Hydrological Processes*. 2014 May 15; 28(10):3642-54.
- [12]. Qu W, Li H, Wan L, Wang X, Jiang X. Numerical simulations of steady-state salinity distribution and submarine groundwater discharges in homogeneous anisotropic coastal aquifers. *Advances in water resources*. 2014 Dec 1; 74:318-28.
- [13]. Yu X, Michael HA. Mechanisms, configuration typology, and vulnerability of pumping-induced seawater intrusion in heterogeneous aquifers. *Advances in Water Resources*. 2019 Jun 1; 117-128.
- [14]. Tang G, Yang M, Chen X, Jiang T, Chen T, Chen X, Fang H. A new idea for predicting and managing seawater intrusion in coastal channels of the Pearl River, China. *Journal of Hydrology*. 2020 Nov 1; 590.
- [15]. Abdoulhalik A, Ahmed AA. The effectiveness of cutoff walls to control saltwater intrusion in multi-layered coastal aquifers: Experimental and numerical study. *Journal of Environmental Management*. 2017 Sep 1; 199: 62-73.
- [16]. Luyun Jr R, Momii K, Nakagawa K. Effects of recharge wells and flow barriers on seawater intrusion. *Groundwater*. 2011 Mar; 49(2):239-49.
- [17]. De Filippis G, Foglia L, Giudici M, Mehl S, Margiotta S, Negri SL. Seawater intrusion in karstic coastal aquifers: Current challenges and future scenarios in the Taranto area) southern Italy. (*Science of the total Environment*). 2016 Dec 15; 573:340-51.
- [18]. Sherif M, Sefelnasr A, Ebraheem AA, Javadi A. Quantitative and qualitative assessment of seawater intrusion in Wadi Ham under different pumping scenarios. *Journal of Hydrologic Engineering*. 2014 May 1; 19(5): 855-66.
- [19]. Lu C, Chen Y, Zhang C, Luo J. Steady-state freshwater-seawater mixing zone in stratified coastal aquifers. *Journal of Hydrology*. 2013 Nov 15; 505: 24-34.
- علاج بخشی نیز مورد بررسی قرار گرفته است (and Nasiri et al, 2021 2020, al et Zeynolabedin). بررسی نتایج شاخص پایداری کیفی آبخوان در اعمال راهکارهای مختلف نشان داد با کاهش بهره برداری یا افزایش تغذیه در نوار ساحلی میزان تراز آب زیرزمینی بهبود دارد و این بهبود سبب افزایش گرادیان هیدرولیکی از طرف ساحل به دریا شده و این افزایش سبب تغییر جهت جریان آب زیرزمینی و کاهش تهاجم آب شور می شود.

منابع

- [1]. Petalas C, Pisinaras V, Gemitzi A, Tsihrintzis VA, Ouzounis K. Current conditions of saltwater intrusion in the coastal Rhodope aquifer system, northeastern Greece. *Desalination*. 2009 Feb 1; 237(1-3): 22-41.
- [2]. Mirzavand M, Ghasemieh H, Sadatinejad SJ, Bagheri R. An overview on source, mechanism and investigation approaches in groundwater salinization studies. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2020 Apr; 17(4):2463-76.
- [3]. Javadi S, Kardan Moghaddam H, Neshat A. A new approach for vulnerability assessment of coastal aquifers using combined index. *Geocarto International*. 2020 Jul 1; 23-29.
- [4]. Costall AR, Harris BD, Teo B, Schaa R, Wagner FM, Pigois JP. Groundwater throughflow and seawater intrusion in high quality coastal aquifers. *Scientific reports*. 2020 Jun 17; 10(1):1-33.
- [5]. Yu X, Michael HA. Offshore pumping impacts onshore groundwater resources and land subsidence. *Geophysical Research Letters*. 2019 Mar 16; 2553(5): 46-62.
- [6]. Knight AC, Werner AD, Morgan LK. The onshore influence of offshore fresh groundwater. *Journal of Hydrology*. 2018 Jun 1; 36: 561-764.
- [7]. Nasiri M, Moghaddam HK, Hamidi M. Development of Multi-Criteria Decision Making Methods for Reduction of Seawater Intrusion in Coastal Aquifers Using SEAWAT Code. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2021 Oct 1; 10: 242-384.
- [8]. Mirzavand M, Sadeghi S, Bagheri R. Groundwater and soil salinization and geochemical evolution of Femenin-Ghahavand plain, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020 Dec; 27(34):43056-66.

- [20]. Sayadi shahraki, A., Soltani Mohammadi, A., Naseri, A.A. and Mokhtaran, A., 2017 . Simulation of groundwater salinity using Artificial Neural Network) ANN ,(Particle Swarm Optimization) PSO (and SEAWAT model) .Case study :Debal khazaie sugarcane plantation .(Journal of Water and Soil Conservation. 2016; 23(5): 307-316. doi : 10.22069/jwfst.2017.10157.2459 [Persian].
- [21]. Ghorbanpour ,D ,.Solaimani ,K ,.Mirnia ,M ,. Shahedi ,K ,.Kolahchi ,A .Simulation of aquifers due to seawater intrusion using SEAWAT model ,case study :Babolrood River Plain . Watershed Engineering and Management. 2019; 11(4): 840-850. doi : 10.22092/ijwmse.2018.116637.1401 [Persian].
- [22]. Nasiri ,M ,.hamidi ,M ,.Kardan moghaddam , H .Evaluating the effect of supplying drinking water and agriculture water of Sari-Neka aquifer on the salinity movement with the utilization of Gelvard dam .Journal of Water and Soil Resources Conservation. 2020; 9(2): 71-88 [Persian].
- [23]. Nasiri, M., Kardan moghaddam, H., Hamidi, M. A hybrid approach with SWARA and COPRAS methods in ranking management strategies to control seawater intrusion in coastal aquifers. Water and Irrigation Management, 2020; 10(3): 365-379. doi: 10.22059/jwim.2021.308487.814 [Persian].
- [24]. Motallebian ,M ,.Ahmadi ,H ,.Rauf ,A ,. Cartwright ,N .Investigating the Effect of Urmia Lake Water-level Fluctuations on Groundwater Level Changes Trend .Water and Soil. 2020; 34(2): 301-316; doi :10.22067/jsw.v34i2.81370 [Persian].
- [25]. Javadi ,S ,.Kardan moghaddam ,H .Utilizing 3-D Simulation of saltwater intrusion in desert aquifer by SEAWAT model .Water and Irrigation Management. 2019; 9(1): 129-142, doi: 10.22059/jwim.2019.290477.715 [Persian]
- [26]. Kardan moghaddam, H., Javadi, S., Rahimzadeh, Z. Evaluation of Aquifer Vulnerability Assessment Methods for Alluvial and Coastal Aquifers, Case Study in Astaneh-Koochesfahan Aquifer, Guilan, Iran. Water and Irrigation Management, 2020; 10(2): 203-220. doi: 10.22059/jwim.2020.295862.750. [Persian]
- [27]. Javadi S ,Kardan Moghaddam H ,Neshat A . Evaluation and Simulation of Groundwater Flow in Aquifers Enclosed With Desert Saline Areas) Case Study :Isfahan Province-Ardestan Aquifer .(Water Harvesting Research .2018 Jan 1; 3(2 &1):15-27.
- [28]. Moghaddam HK ,Banihabib ME ,Javadi S , Randhir TO .A framework for the assessment of qualitative and quantitative sustainable development of groundwater system .Sustainable Development. 2021 Nov; 29(6): 1096-110.