

بررسی اثرات زیست محیطی هجوم جبهه‌های آب شور به آبخوان‌های کویری (مطالعه موردی: استان خراسان جنوبی - آبخوان سرایان)

حمید کاردان مقدم^۱ - محمد ابراهیم بنی حبیب^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۶/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۲/۰۳

چکیده

تغییرات کیفیت آب زیرزمینی یکی از معضلاتی است که بخصوص در مناطق خشک با توجه به روند برداشت زیاد آب و کاهش تغذیه سبب بروز نگرانی در بین مدیران و برنامه ریزان منابع آب شده است. همچنین بیش از ۷۰ درصد آبخوان‌های ایران علاوه بر مشکل کم آبی بحران زیست محیطی نیز داشته و در مناطق کویری هجوم جبهه‌های آب شور کویری بر اثر برداشت بی رویه آب سبب شده تا غلظت املاح افزایش یافته و سبب بروز مشکلات زیست محیطی شود. در این مطالعه با استفاده از مدل کیفی MT3D که یکی از ماژول‌های مدل MODFLOW می باشد شبیه سازی کیفی آبخوان با استفاده از غلظت TDS در چاه‌های منطقه انجام گرفت. یک دوره آماری ۵ ساله با گام زمانی ۶ ماهه جهت شبیه سازی انتخاب و واسنجی این مدل با در نظر گرفتن ضریب ۰/۵ برای نسبت افقی به پخش طولی، ۰/۲ برای نسبت عمودی به پخش طولی، ۱ متر برای پخش مولکولی موثر و ۲۰ برای پخشیدگی طولی انجام گردید. پیش بینی آتی وضعیت کیفی آبخوان نشان داد که ادامه روند برداشت آب سبب هجوم جبهه‌های آب شور کویری و افزایش غلظت TDS در طی ۵ سال آینده خواهد شد. لذا نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مدیریت برداشت از آب زیرزمینی با استفاده از سناریو مدیریتی کاهش برداشت آب از منابع زیرزمینی به منظور بهبود کیفیت آب آبخوانهای کویری و ممانعت تهاجم آب شور کویری به آنها با توجه خشکسالی‌های اخیر ضروری است.

واژه‌های کلیدی: آبخوان، کیفیت، مدل MT3D، واسنجی، هجوم جبهه‌های آب شور

مقدمه

روش‌های مطلوب در مطالعه آب زیر زمینی تبدیل شده است (۷). حل عددی مسائل مربوط به حرکت سیالات در محیط متخلخل برای اولین بار، قبل از سال ۱۹۵۰، در صنعت نفت بکار گرفته شد. روش‌های عددی بصورت معادلات دیفرانسیلی برای اولین بار توسط فاست و مرکر در سال ۱۹۸۰ توسعه داده شد و ونگ و اندرسون در سال ۱۹۸۸ با انتشار کتاب روش‌های عددی تفاضل محدود و عناصر محدود همراه با برنامه‌های کامپیوتری به زبان فرترن برای حل معادلات جریان در محیط‌های متخلخل ارائه دادند (۳ و ۷). با عدم بازبینی آب تجدید شونده در آبخوان‌های نوار ساحلی و پمپاژ شدید آب از چاه سبب بالادگی آب شور و تداخل آب شور با شیرین می‌شود (۱۱). شوری آب زیرزمینی ناشی از تداخل آب شور و شیرین یک عمل برگشتناپذیر بوده که سبب بروز مشکلات عدیده زیست محیطی و اجتماعی می‌شود (۱۷). تداخل آب شور و شیرین سبب برهم خوردن تعادل شیمیایی آب زیرزمینی شده و این هم تعادل حتی ناشی از تغییرات ۲ تا ۳ درصدی حجم آب نیز است (۱). هاکان ارسلان (۶) در سال ۲۰۱۴ به بررسی روش‌های مختلف درون‌یابی شوری ناشی از

منابع آب زیرزمینی به عنوان اصلی ترین منبع تامین آب در مناطق خشک در سالیان اخیر دچار تنش‌های متعددی شده است. تغییرات اقلیمی صورت گرفته در پی افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای از یک طرف و عدم مدیریت صحیح برداشت از منابع آب از طرف دیگر سبب افت شدید آبخوان‌ها و کاهش کیفیت آن شده است. امروزه با پیشرفت تکنولوژی و ارتباط علوم مختلف با ابزارهای کامپیوتری سبب شده تا از روش‌های مدل‌سازی جهت شبیه‌سازی وضعیت موجود استفاده شود. استفاده از مدل‌های ریاضی از سال ۸۰۰ میلادی شروع شده است. به دنبال گسترش کامپیوترهای پیشرفته در دهه ۱۹۶۰ استفاده از مدل‌های ریاضی با راه حل عددی به یکی از

۱ و ۲- دانشجوی دکتری منابع آب و دانشیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

(Email: banihabib@ut.ac.ir)

*-نویسنده مسئول:

DOI: 10.22067/jsw.v31i3.48205

مفید بوده و می تواند به بهره برداری و برداشت بهینه از منابع آب زیرزمینی با رعایت مسائل زیست محیطی کمک شایانی کند.

مواد و روش ها

۱- هجوم آب شور

افزایش غلظت املاح موجود در منابع آب زیرزمینی با برداشت شدید از آبخوان ها تشدید شده و سبب بالازدگی آب شور در این منابع می شود. این امر در نواحی ساحلی که فاصله نزدیک آب شور دریا را نیز دارد بسیار شدیدتر می باشد. در آبخوان ها با برداشت آب شیرین سبب تهاجم آب شور به سمت بالا می باشد. تهاجم^۲ این پدیده به شکل گوه^۳ است و فصل مشترک آب شور- شیرین می تواند چند متر تا چندین متر ضخامت داشته باشد. تهاجم آب شور و آب شیرین از دیدگاه هیدروژئوشیمی دارای دو ساختار متفاوت نسبت بهم هستند. اگر غلظت Ca^{2+} و Cl^- تقریباً ۸۴ درصد غلظت املاح آب را تشکیل داده باشد این آب ناشی از تهاجم آب شور بوده و در صورتی که غلظت Ca^{2+} و HCO_3^- غالب باشد آب محدوده آب شیرین تلقی می شود (۲۴). ترکیب این آب ها سبب افزایش غلظت کلر در آبخوان می شود. یکی از معادلات اساسی در تهاجم آب شور و شیرین توسط دو دانشمند به نام های هرزبرگ و گین طرح ریزی شد (۱۸). در این روابط که براساس چگالی آب شور و شیرین و ضخامت آبخوان برای هر محدوده برقرار است. در این روابط چگالی آب شیرین با ρ_f و چگالی آب شور با ρ_s ارائه می شود. معمولاً چگالی آب شیرین $1/0.25 \text{ g/cm}^3$ و چگالی آب شور متغیر و بصورت کلی $1/0.25 \text{ g/cm}^3$ در نظر گرفته می شود. با توجه به سبک بودن آب شیرین نسبت به آب شور، آب شیرین روی آب شور بصورت شناور قرار دارد. همچنین تغذیه ناشی از بارندگی سبب پایین افتادن آب شور شده و مرز بین آب شور و شیرین به عنوان یک مرز قابل تشخیص مشخص نیست. رابطه ارائه شده از سوی این دو دانشمند بصورت زیر است (۱۸):

$$H = \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_f} X \cdot h = 40X \cdot h \quad (1)$$

در هنگام هجوم جبهه های آب شور بطرف آب شیرین تداخل صورت گرفته و سبب بهم خوردن شرایط بیولوژیکی و واکنش هیدروشیمیایی بصورت خیلی پیچیده در مرز مشترک دو ناحیه می شود که شامل فرآیندهای کاتیونی، جریان آبخوان، کاهش سولفات، واکنش کربناتی و کلسیتی و تغییرات دولومیتی می شود. واکنش های شکل گرفته در این تداخل آب شور و شیرین بصورت روابط ۲ تا ۶ می توان تعریف کرد.

بالازدگی آب در آبخوان ساحلی و نقش آبیاری در اراضی کشاورزی پرداخت که نتایج او نشان داد که روش RBF^۱ به عنوان مناسب ترین روش درون یابی و آبیاری بی رویه در آخرین دوره زراعی سبب بالازدگی تا ۲ متر در آبخوان منطقه خواهد داشت. گرین و همکاران (۸) در سال ۲۰۱۴ شبیه سازی اثرات بالآ آمدن آب دریا و شور شدن اراضی در اثر تغییر اقلیم با استفاده از آنالیز مولفه های اصلی (PCA) طی دوره سال های ۲۰۱۱ تا ۲۱۰۰ را انجام دادند. استفاده از مدل های عددی در شبیه سازی هجوم آب شور به آب شیرین در سالیان اخیر مورد توجه محققین زیادی قرار گرفته است که از آن جمله به مطالعات لویسیگا و همکاران (۲۶) در سال ۲۰۱۲، سیواسنکار و همکاران (۲۶) در سال ۲۰۱۳ در شبیه سازی بالازدگی آب دریا و تاثیرات شور شدن اراضی اشاره کرد. لانگوین (۱۵) با استفاده از دو مدل MT3DMS و SEAWAT شبیه سازی حرکت املاح را با بالازدگی آب در چاه ها انجام دادند (۱۵ و ۳۰). همچنین والیاس (۲۹) با استفاده از دو مدل MT3DMS و PHT3D تشریح روش های مختلف شبیه سازی را برای حرکت املاح انجام دادند.

طی بررسی های انجام شده در سالیان اخیر نشان می دهد که کلیه مطالعات بالازدگی آب شور و شور شدن اراضی بیشتر در نواحی ساحلی بررسی شده و سناریوهای مختلف اعم از اقلیمی و غیر اقلیمی مورد تحلیل و قرار گرفته است. اما در مناطق خشک که کمبود آب بسیار مشهود بوده و تنها منبع تامین آب در بخش های مختلف تنها آب زیرزمینی بوده و تغذیه این منبع با توجه به پراکنش نامناسب زمانی و مکانی بارش کم انجام می شود و از سوی دیگر استخراج بیش از حد آب زیرزمینی سبب افت شدید آبخوان ها و کاهش کیفیت آب شده است. مطالعات در خصوص اثرات برداشت بی رویه و بالازدگی آب شور در مناطق خشک بصورت مدون و در دسترس انجام نشده و در این مطالعه سعی بر آن است که این معضل که علاوه بر کاهش کیفیت، سبب هجوم جبهه های آب شور به سمت آبخوان است مورد بررسی قرار گیرد. مطالعات انجام شده در نوار ساحلی با استفاده از مدل های عددی مختلف از جمله SEAWAT صورت گرفته که براساس چگالی آب شور و شیرین در منطقه و خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوان و ... غلظت املاح را شبیه سازی کرده و اثرات آب شور دریا را بر نوار ساحلی ارائه می دهد (۲۸). اما در این مطالعه به منظور بررسی جبهه های آب شور و تعیین مرز آب شور و شیرین از مدل کیفی MT3D استفاده و شبیه سازی غلظت کل مواد جامد محلول (TDS) انجام پذیرفته است. با توجه به نتایج مدل سناریوهای مدیریتی کاهش برداشت آب براساس حجم برای منطقه پیشنهاد می شود. نتایج این مطالعه به منظور مدیریت جامع کمی- کیفی در مناطقی که پتانسیل بالایی از نظر برداشت آب از آبخوان را دارد بسیار

2- Intrusion
3- Wedge

1- Radial Basis function



جدول ۱- کلاس بندی آب برحسب غلظت کلر، TDS و هدایت الکتریکی (۱۳ و ۲۳)

Table 1- Classification of water by Cl, TDS, Ec

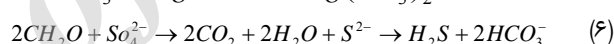
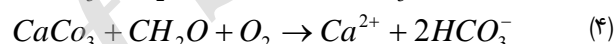
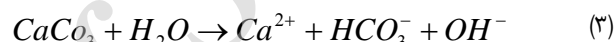
تقسیم بندی Class	Cl ⁻ (meq/l)	TDS (ppm)	Ec (ds/m)
آب شیرین Fresh water	<2.8	0-500	<700
آب زیرزمینی با اندکی شوری Slightly saline groundwater	2.8-7.1	500-1500	700-2000
آب زیرزمینی با شوری متوسط Moderately saline groundwater	7.1-14.1	1500-7000	2000-10000
آب زیرزمینی نسبتاً شور Highly saline groundwater	14.1-28.2	7000-15000	10000-25000
آب زیرزمینی با شوری خیلی بالا Very highly saline groundwater	28.2-282.2	15000-35000	25000-45000
آب دریا Seawater	>282.2	>35000	>45000

لحاظ شده است.

پایپر (۲۱) نمودار خود را برای وضعیت کیفیت آب زیرزمینی ارائه داد که نتایج قابل استخراج زیادی با توجه غلظت کاتیون ها و آنیون های آن می توان برآورد کرد. این نمودار از دو مثلث و یک لوزی تشکیل شده که بر روی اضلاع آن غلظت کاتیون و آنیون ها قرار می گیرند. این نمودار نتایج متعددی از آب زیرزمینی یک منطقه را ارائه می دهند که قابلیت های آن منطقه را از نظر بهره برداری نشان می دهد. این نمودار قابلیت ارائه نتایج حاصل از بالا زدگی آب شور را بصورت کامل شماتیک ارائه می دهد که بصورت شکل (۱) ارائه شده است (۵ و ۲۵).

منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی سرایان از محدوده های کویر لوت ایران در شمال غرب استان خراسان جنوبی واقع شده است. این دشت تقریباً لوزی شکل بوده با مساحت دشت ۲۷۱۰ کیلومتر مربع در یک اقلیم خشک و سرد با ضخامت متوسط آبخوان ۷۵ متر که ۶۵ کیلومتر مربع از مساحت آبخوان را مناطق تبخیری (عمق آب زیرزمینی کمتر از ۴ متر) تشکیل می دهد قرار دارد (شکل ۲). در این محدوده بیش از ۱۷۰ حلقه چاه، حجم ۹۰ میلیون مترمکعب و جبهه های خروجی نیز ۴/۲ میلیون مترمکعب آب را سالیانه از آبخوان منطقه خارج می کند (۱۹). براساس رابطه (۷) و با اختلاف حجم ورودی به آبخوان و حجم خروجی از آبخوان کسری مخزن (۲۶/۶) میلیون متر مکعب در سال) و سیر سریع افت به طور متوسط سالانه ۰/۶۲ متر آن را در زمره دشتهای فوق بحرانی قرار داده است. شکل (۳) هیدروگراف آب

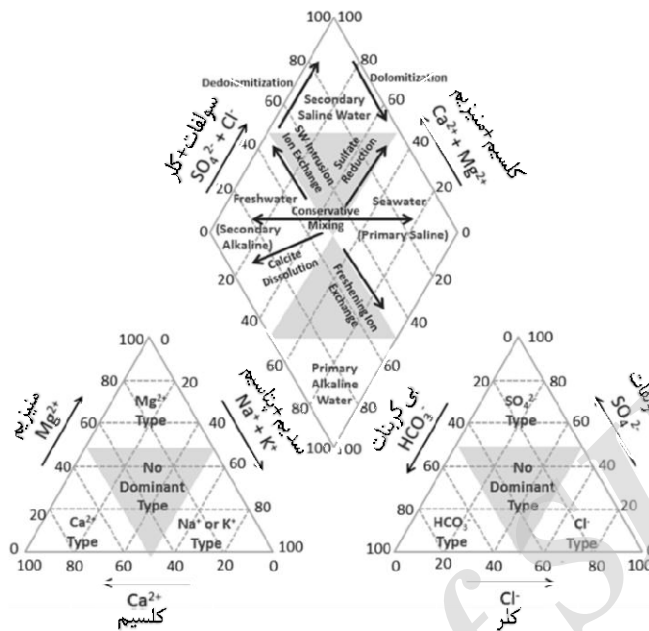


براساس روابط ارائه شده در رابطه ۲ تغییر و تعویض کاتیون ایجاد شده، در روابط ۳ و ۴ انحلال کلسیت، در رابطه ۵ واکنش دولومیت شدن^۱ و واکنش سولفات بصورت رابطه ۶ ارائه شده است. تعویض کاتیون در یک شرایط پایدار در آب زیرزمینی در هنگام هجوم جبهه آب شور رخ می دهد. برخلاف تغییرات سطحی، رسوبات در یک آبخوان تمایل به جذب سدیم و آزادسازی کلسیم براساس رابطه یک دارند (۴). عکس این واکنش در آبخوان های شیرین با جایگزینی یون شرکت کننده در کلسیم فرسایش شونده و آزاد سازی یون سدیم انجام می شود که منجر به تقویت آب بصورت تشکیل NaHCO₃ می شود. عمل دولومیت شدن با ترکیب شیمیایی کلسیت منجر می شود که در آبخوان های کربناتی سبب افزایش غلظت کاتیون کلسیم نسبت به منیزیم می شود (۹ و ۱۲). بطور کلی کاهش سولفات بطور معمول در تداخل آب چاه و مواد معدنی صورت می گیرد (۲۰ و ۲۴). بطور معمول افزایش TDS یا هدایت الکتریکی آب (Ec) به عنوان یک شاخص در بالا رفتن شوری آب محسوب می شود (۲۳ و ۲۵). از این نظر طبقه بندی دقیق برای بررسی کیفیت آب برای غلظت کلر، TDS، EC در آبخوان ها بصورت جدول (۱) ارائه شده که در سال ۱۹۸۵ توسط هم ارائه شده که تاثیر تهاجم آب شور نیز در آن

1- Dolomitization

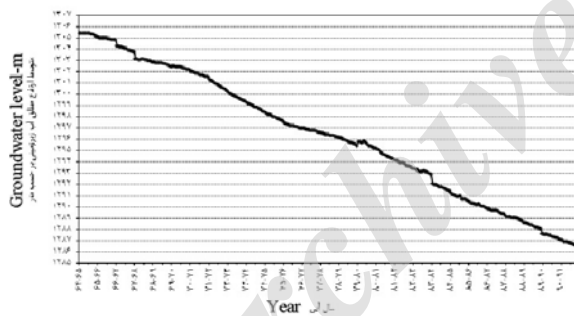
$$\Delta h = \frac{\Delta v}{A.Sy} = \frac{53 \times 10^6}{1709 \times 10^6 \times 0.05} = 0.62 \quad (Y)$$

زیرزمینی را طی یک دوره ۲۵ ساله در آبخوان نشان می دهد.

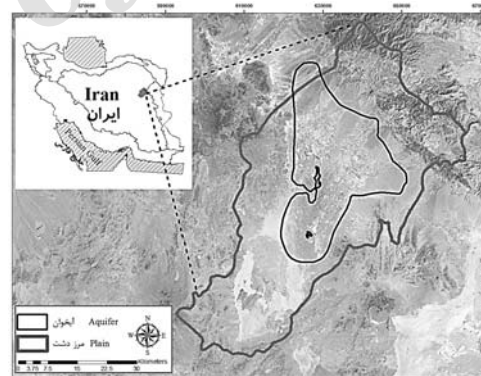


شکل ۱- نمودار پایپر و تقسیم بندی از نظر هجوم جبهه های آب شور (۲۱)

Fig 1- Piper diagram illustrating general classifications of waters and seawater intrusion reaction pathways



شکل ۳- هیدروگراف آب زیرزمینی آبخوان سرایان
Fig 3- Groundwater hydrograph in sarayan aquifer



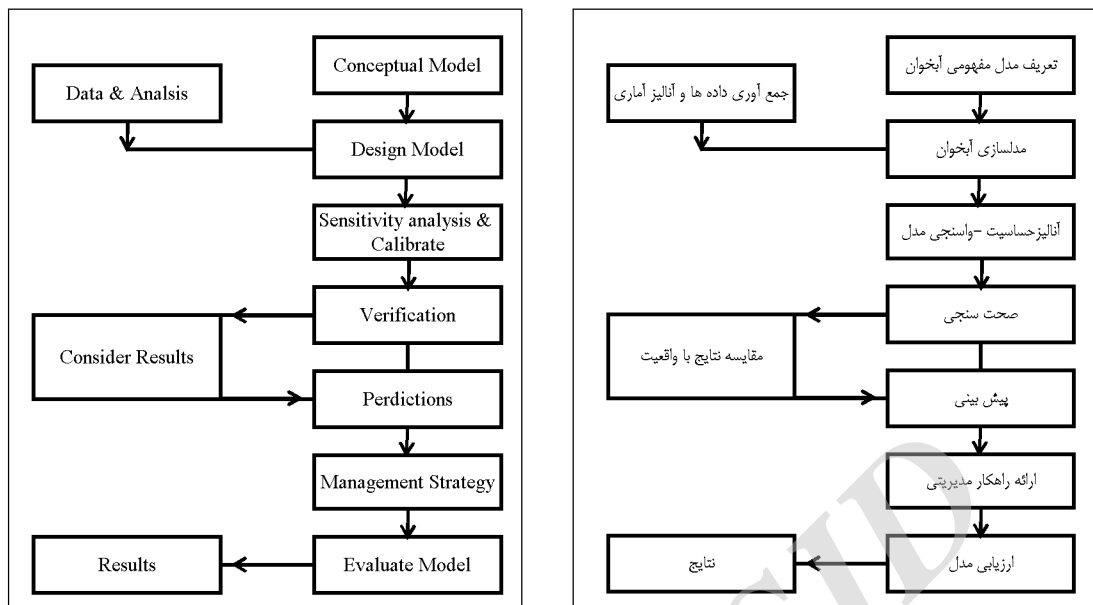
شکل ۲- موقعیت آبخوان سرایان در محدوده مطالعاتی
Fig 2- Sarayan aquifer in Basin

مناطق جنوبی آبخوان که خروجی آبخوان نیز می باشد بحرانی تر شده و در کلاس کیفی C_4S_3 و C_4S_4 قرار بگیرند.

۳- مدلسازی آبخوان سرایان

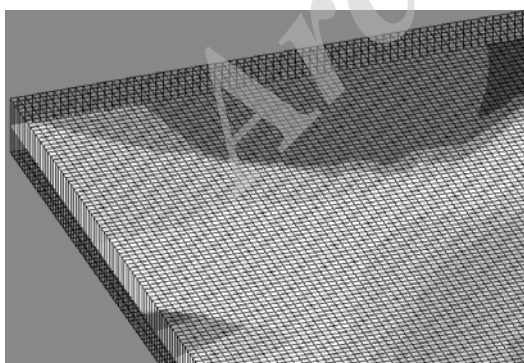
یکی از مهمترین اهداف در مدلسازی استفاده از توان هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی منطقه جهت به تعادل رسیدن و اصلاح الگو در جهت رفتار بهینه برای مدیریت منابع آب زیرزمینی است. یکی از مهمترین فواید مدلسازی، استفاده از سناریوهای مختلف برای تصمیم گیری در شرایط مختلف تنش می باشد.

به منظور تحلیل این افت و تاثیر آن بر روی کیفیت آب زیرزمینی به عنوان تنهاترین منبع تامین آب، از آمار موجود در شرکت آب منطقه ای خراسان جنوبی استفاده شد. براین اساس روند تغییرات کیفیت آب طی ۵ سال (۱۳۸۶-۱۳۹۰) به عنوان شاهد انتخاب شد. بررسی های کیفی نشان می دهد که اکثر چاههای آبخوان سرایان در قسمت شمالی آبخوان براساس تقسیم بندی ویلکاکسون در کلاس C_3S_1 و چاههای قسمت جنوبی در کلاس C_4S_2 در سال ۱۳۸۵ قرار دارند. پس از گذشت ۵ سال، تغییرات کیفی بر اثر کاهش حجم آبخوان و برداشت بی رویه سبب شده تا وضعیت کیفی آبخوان بخصوص در



شکل ۴- فلوجارت مدل سازی آب زیرزمینی
Fig 4- Flow chart of Groundwater modeling

شبکه بندی می باشد. اندازه ابعاد شبکه در آب زیرزمینی به منظور شبیه سازی تابع مستقیمی از انحناى سطح آب و تغییرات خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوان می باشد. در شرایطی که تغییرات سطح آب زیرزمینی در بعد افقی زیاد باشد فواصل کوچکتر انتخاب می شود و برعکس. به منظور مدیریت بهینه به لحاظ کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی با توجه به محدوده آبخوان و شرایط موجود منطقه شبکه بندی مدل ریاضی با فواصل 250×250 مترمربع در سطح آبخوان تعریف شد. شکل (۵) شبکه بندی آبخوان را با توجه به خصوصیات آبخوان ارائه شده است.



شکل ۵- شبکه بندی آبخوان
Fig 5- Aquifer network

جهت تحلیل و آنالیزمحدوده و واسنجی دقیق پارامترهای هیدروژئولوژیکی آبخوان شبیه سازی در دو حالت جریان ماندگار و

استفاده از مدل ریاضی بخصوص در حرکت املاح مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته و شبیه سازی های متعددی جهت تصمیم گیری در امور منابع آب انجام شده است (۲۲). به منظور مدل سازی، تعیین هدف به عنوان اولین فرآیند در پروتکل مدل سازی محسوب شده و براساس آن نوع مدل، پارامترهای مدل، روش های حل و سایر بخش ها طرح ریزی می شود. فلوجارت مدل سازی در یک طرح مدل آب زیرزمینی بصورت شکل (۴) ارائه شده که نمایش مصوری از سیستم جریان آب زیرزمینی را در قالب یک مدل مفهومی ارائه می کند. بطور کلی در مدل های آب زیرزمینی به دلیل عدم وجود شرایط ایده آل و دارا بودن کلیه اطلاعات هیدرودینامیکی آبخوان از مدل ریاضی استفاده می شود. این مدل ها که در بررسی شرایط کمی و کیفی آبخوان قابلیت شبیه سازی را دارند، بطور عمده از دو روش حل با استفاده از بسط تیلور بصورت تقریب تفاضلات محدود^۱ و تقریب اجزای محدود^۲ مدل می شوند. بطور کلی اکثر روش های تفاضلات محدود از نوع Block center هستند که در آنها خصوصیات در مرکز هر شبکه تقریب زده می شود (۳).

شبیه سازی آبخوان سرایان با هدف بررسی بیلان آب زیرزمینی به عنوان هدف اولیه و بررسی تغییرات کیفی آب زیرزمینی منطقه در اولویت دوم هدف قرار دارد. یکی از مهمترین گام های اصلی در مدل سازی مشخص کردن چارچوب فیزیکی آبخوان در قالب یک

- 1- Finite Difference Method
- 2- Finite Element Method

استخراجی وارد مدل کیفی MT3D می شود. این مدل توسط شرکت مهندسی مشاور پادوپولوس در سالهای ۱۹۸۹-۱۹۹۹ تهیه و ارائه شد. این مدل جریان آلودگی را بصورت دو بعدی و سه بعدی در یک آبخوان به روش تلفیقی از روش کاراکترستیک و اصلاح شده آن و روش تفاضل های محدوده مدل سازی می کند. شبیه سازی جریان آلودگی به کمک این ماژول با استفاده از نتایج نهایی مدل ناماندگار انجام پذیرفت. حرکت املاح در محدوده اشباع با توجه به در نظر گرفتن خواص فیزیکی محیط متخلخل یکی از معادلات کاربردی در بحث کیفیت آب زیرزمینی مطرح است. بیشتر مدل های عددی آب زیرزمینی بر پایه حل دو معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی که عبارتند از معادله سه بعدی حرکت آب زیرزمینی و معادله انتقال املاح می باشند. معادله سه بعدی حرکت آب زیرزمینی با چگالی ثابت در محیط متخلخل بصورت معادله ۸ بیان می شود (۳):

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (8)$$

که در این معادله K هدایت هیدرولیکی، h بار پتانسیل، W شار حجمی در واحد حجم که نشانگر تخلیه و تغذیه می باشد، S_s ضریب مخصوص مواد متخلخل، t زمان، x, y, z بیانگر مختصات کارتیزی می باشند. معادلات دیفرانسیل جزئی انتقال مواد در سیستم سه بعدی در یک سفره آب زیرزمینی بصورت معادله ۹ می باشد:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} [D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j}] - \frac{\partial}{\partial x_i} (CV_i) + \frac{q_s}{\theta} C_s + \sum_{k=1}^n R_k \quad (9)$$

C: غلظت آلاینده های غیر محلول، t: زمان، x_i : مختصات کارتیزین، D_{ij} : ضریب انتشار هیدرودینامیکی، θ : تخلخل بدون بعد، C_s : غلظت مواد محلول ورودی و خروجی، q_s : جریان حجمی آب در واحد حجم آبخوان، V_i : سرعت متوسط آب در محیط متخلخل و $\sum_{k=1}^n R_k$: بخش مربوط به واکنش شیمیائی می باشد (۱۸). شکل (۶) دیاگرام چرخشی مراحل مدل سازی کمی و کیفی را در این طرح ارائه می دهد.

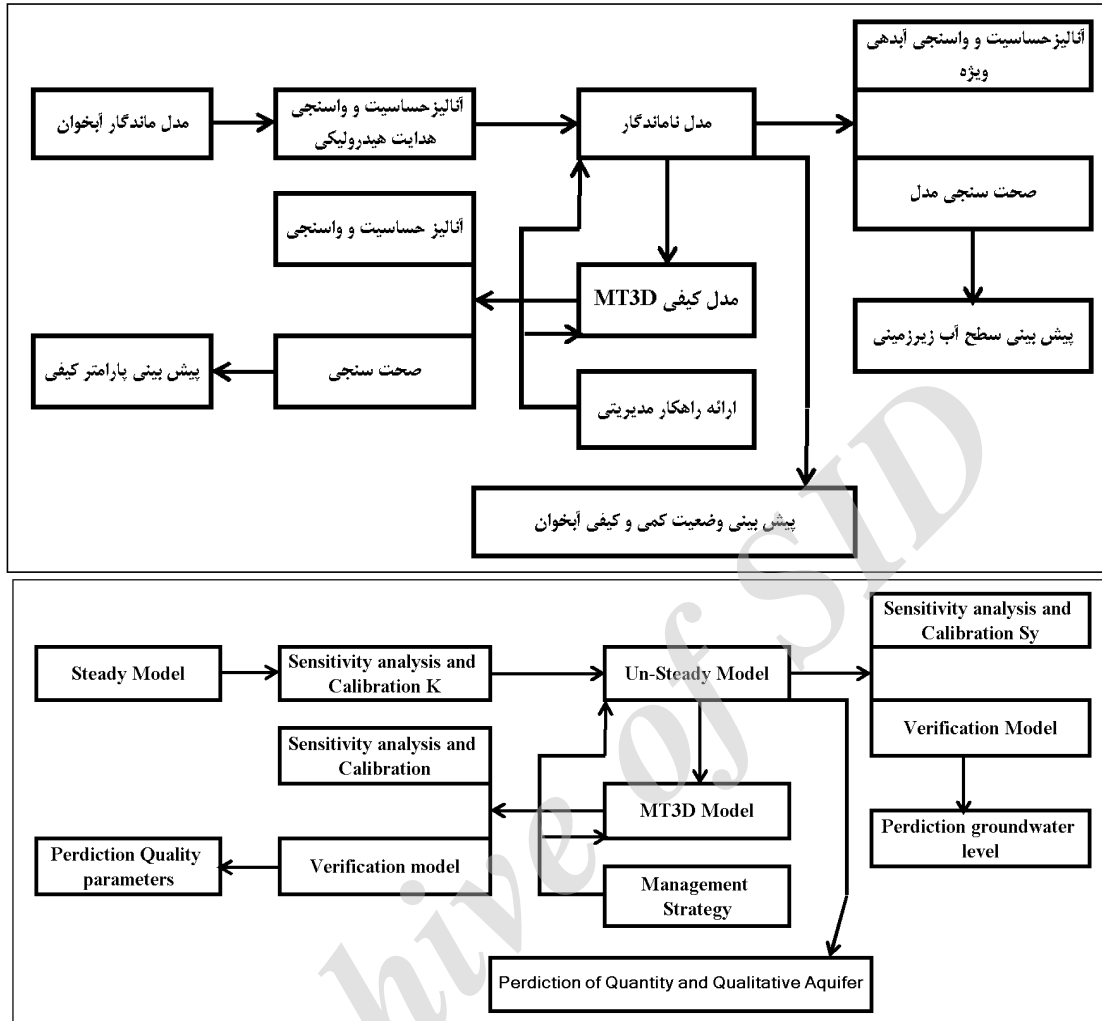
نتایج و بحث

۱- آنالیز حساسیت، واسنجی مدل کمی و کیفی

معمولاً به دلیل مشخص نبودن پارامترهای ورودی مدل و شناخت جزئی و ناقص نسبت به فرایندهای حاکم بر سیستم هیدرولوژیکی منطقه مورد مطالعه، عدم قطعیت در مقادیر پارامترهای ورودی به مدل وجود دارد. اهمیت هر یک از این پارامترها و اثرات آن بر نتایج شبیه سازی را می توان از طریق آنالیز حساسیت ارزیابی کرد. از این طریق ارزش یک پارامتر طی مراحل متعدد در مقادیری بالاتر و

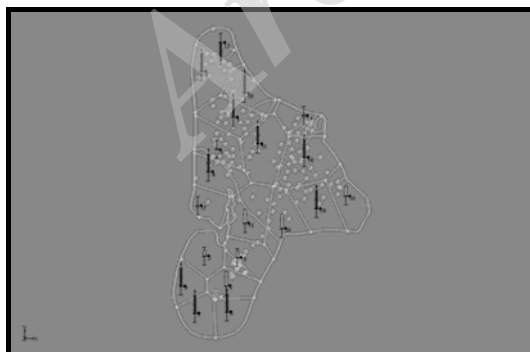
ناماندگار انجام و مدل سازی توسط ماژول MODFLOW در نرم افزار v.10 GMS انجام شد. به منظور اجرای صحیح مدل شرایط مرزی و بیلان آب زیرزمینی منطقه با توجه به شرایط اولیه آبخوان در زمان شهریور سال ۱۳۸۵ وارد مدل شد. شرایط اولیه مدل سازی با توجه به نوسانات کم آب زیرزمینی و سطح اطمینان داده های ورودی به عنوان گام زمانی نخست مدل سازی در زمان شهریور سال ۱۳۸۵ انتخاب شد. در این مطالعه از پارامترهای توپوگرافی، سنگ بستر و سطح آب زیرزمینی به عنوان چارچوب اصلی و شکل دهنده مدل استفاده شد. نفوذ ناشی از بارندگی، نفوذ ناشی از سیلاب های منطقه ای، آب برگشتی و جریان ورودی زیرزمینی از آبخوان مجاور به عنوان ورودی های مدل و تخلیه از منابع آب، تبخیر و آب خروجی زیرزمینی به عنوان پارامترهای خروجی از آبخوان با استفاده از روش های مختلف آماری و زمین آماری وارد مدل شد. تحلیل نتایج استخراجی از مطالعات ژئوفیزیک منطقه این امکان را برقرار کرد تا هدایت هیدرولیکی اولیه برای آبخوان ایجاد و براساس آن مدل سازی کمی و کیفی آبخوان انجام پذیرفت. همچنین با توجه به اینکه در طی وارد کردن داده ها احتمال خطای شخص وجود داشت، نهایتاً برای تمامی داده ها منحنی های مربوطه به ماژول 2D scatter data نرم افزار GMS کنترل و داده های غلط اصلاح گردید. یکی از مهمترین پارامترهای ورودی به مدل آب زیرزمینی برای شبیه سازی ورود دقیق شرایط مرزی در آبخوان است. لزوم ورود این پارامتر بدلیل ماهیت معادلات تفاضلات محدود بسیار حائز اهمیت است. در این مطالعه حجم آب زیرزمینی ورودی و خروجی به آبخوان تنها پارامترهایی هستند که به عنوان شرایط مرزی در نظر گرفته شدند که با توجه به مقاطع ورودی و مقدار ضریب انتقال در آبخوان این حجم برآورد شد. پس از ورود کلیه داده های ورودی به مدل، شبیه سازی جریان آب زیرزمینی ابتدا در حالت ماندگار و پس از آنالیز حساسیت و واسنجی مدل ماندگار، شبیه سازی در حالت ناماندگار به مدت ۶۰ گام زمانی ماهانه معادل ۵ سال انجام پذیرفت. یکی از معیارهای مهم جهت مدیریت مدل سازی حداقل اختلاف بین سطح آب مشاهده شده در پیژومترها و سطح آب برآورد شده از مدل می باشد که دقت ۹۵ درصدی به عنوان معیار، انتخاب شود. به منظور بررسی شرایط آتی آبخوان آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی در مدل ناماندگار انجام و پس از مشخص شدن ضریب ذخیره ویژه آبخوان، واسنجی این پارامتر انجام پذیرفت. همچنین به منظور انطباق دقیق مدل صحت سنجی مدل به مدت ۵ سال انجام و پس از همبستگی قابل قبول بین مقادیر مشاهده شده و شبیه سازی شده مدل به مدت ۵ سال پیش بینی سطح آب زیرزمینی را انجام داد. این پیش بینی به منظور شناسایی دوره های تنش آبی در ۵ سال آینده و هدف ثانویه مطالعه که بررسی روند کیفی آبخوان از نظر شور شدن و تهاجم جبهه های آب شور است بسیار حائز اهمیت است. پس از مدل سازی کمی آبخوان نتایج

پایین تر از مقدار واسنجی شده تنظیم و با اجرای دوباره مدل، بزرگی تغییرات به وجود آمده در سطوح خطا تعیین می گردد. برای انجام آنالیز حساسیت مدل، مراحل ذیل صورت گرفته است:

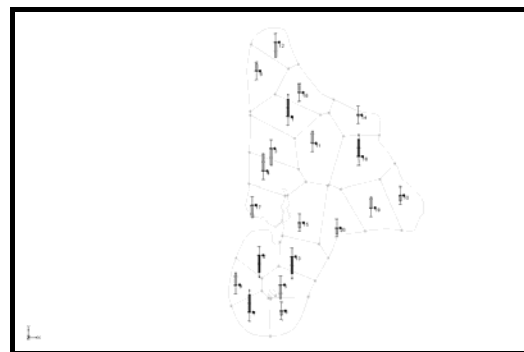


شکل ۶- فلوچارت مراحل مختلف مدلسازی کمی و کیفی

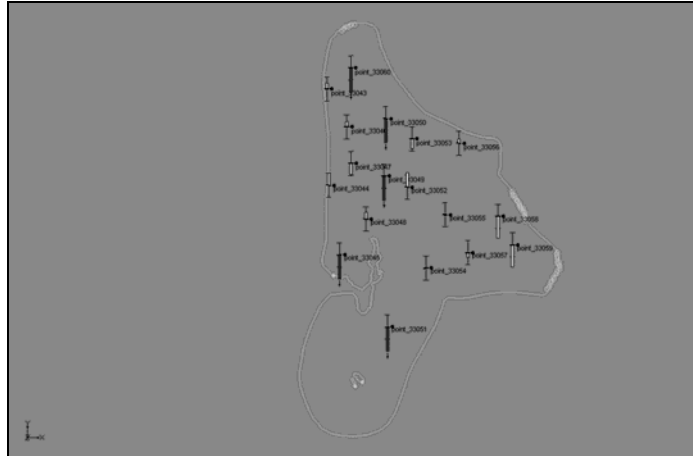
Fig 6- Flow chart of modeling stages



شکل ۸- مدل ناماندگار اجرا شده در آبخوان
Fig 8- Unsteady model in aquifer



شکل ۷- مدل ماندگار اجرا شده در آبخوان
Fig 7- Steady model in aquifer



شکل ۹- مدل کیفی اجرا شده در آبخوان برای پارامتر TDS
Fig 9- Quality model in aquifer by TDS parameter

هدایت هیدرولیکی و آبدی ویژه می‌باشد که با توجه به مطالعات صورت گرفته در مدلسازی نیز همخوانی دارد. در مدل کیفی نیز ضریب پخشیدگی طولی و عرضی به عنوان عوامل حساس انتخاب شد. با توجه به مشخص شدن عوامل حساس در هر مدل واسنجی به دو روش مستقیم (سعی و خطا) و غیرمستقیم با توجه به پارامترهای انتخابی انجام شد. در مدل کمی از روش واسنجی خودکار Pest که با ترکیب متغیرهای حساس مدل عمل می‌کند و در مدل کیفی با توجه به محدودیت چاه‌های انتخابی جهت تحلیل کیفی از روش مستقیم استفاده شد. شکل ۱۰ و ۱۱ به ترتیب نتایج نهایی واسنجی هدایت هیدرولیکی و آبدی ویژه و در جدول (۲) ضرایب معادلات کیفی واسنجی شده را نشان می‌دهد.

صحت سنجی

یکی از مراحل مدل جهت استفاده و قابلیت اطمینان داده‌ها صحت‌سنجی می‌باشد که تطبیق مدل را با واقعیت بررسی می‌کند. هدف از انجام این مرحله بدست آوردن اعتماد بیشتر به نتایج مدل کمی و کیفی و کارایی آن می‌باشد. تطبیق مدل با واقعیت نیاز به بررسی بیشتر مدل کمی و کیفی نسبت به زمان دارد، در این مدل جمعاً ۵ سال به عنوان دوره صحت‌سنجی انتخاب شد که در مدل کمی بصورت ۱۰ دوره تنش شش ماهه و در مدل کیفی بصورت ۵ دوره تنش یکساله انجام گرفت. تحلیل صحت سنجی یکی از عملیات مهم مدلسازی قبل از پیش بینی می‌باشد که باعث دقت بالا در پیش بینی در مدلسازی می‌شود. نتایج صحت سنجی در آخرین دوره تنش حالت ناماندگار در مدل کمی و کیفی به ترتیب در اشکال (۱۲) و (۱۳) ارائه شده‌اند که نشان از همبستگی بالا بین مقادیر محاسباتی و مشاهده‌ای می‌باشد.

داده‌های ورودی همراه با دامنه‌های عدم قطعیت آنها که در طی واسنجی مدل ارزیابی شده، مشخص شده است. مدل جریان واسنجی در دامنه تعیین پارامترهای ورودی مختلف دوباره اجرا گردیده است و در هر مرحله آنالیز حساسیت، هر مقدار پارامتری و تنش آبی به طور انفرادی تغییر داده شده است.

تعیین آنالیز حساسیت برحسب اثرات تغییر پارامتری بر روی خطای RMS بار هیدرولیکی گزارش و توسط نمودارهای نشان دهنده نتایج آنالیز حساسیت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند.

واسنجی هر مدل باید از قبل دارای هدفی از خطای قابل قبول باشد که دامنه خطای قابل قبول به هدف مدل بستگی دارد. این مقدار در تهیه مدل سربان یک متر به عنوان ۱ درصد خطا در نظر گرفته شده است. هدف از واسنجی به حداقل رساندن خطا یا معیار واسنجی می‌باشد. عمل واسنجی مدل منطقه پس از ایجاد مدل بر اساس فرضیات زیر آغاز شد.

بدون تغییر بودن شرایط فیزیکی آبخوان از قبیل توپوگرافی سطح زمین و سنگ کف.

غیر قابل نفوذ بودن سنگ کف در کل منطقه مدل.

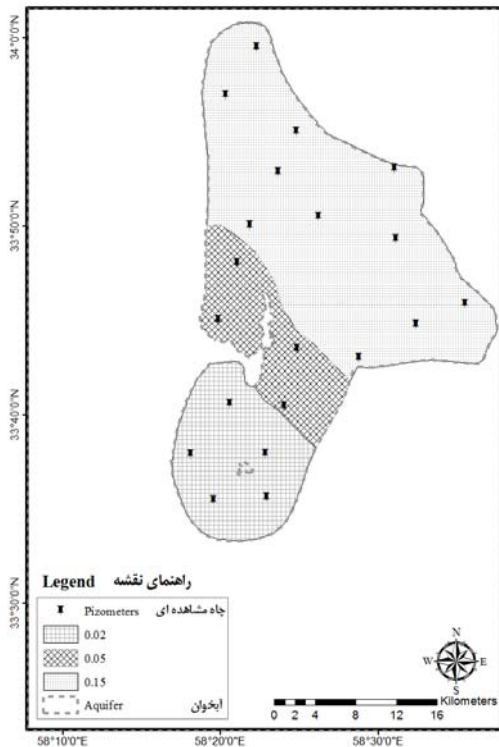
ثابت نگاه داشتن میزان آب خروجی توسط چاه‌های بهره‌برداری.

وجود یک آبخوان آزاد در منطقه.

در نظر گرفتن هدایت هیدرولیکی به عنوان پارامتری با عدم قطعیت زیاد.

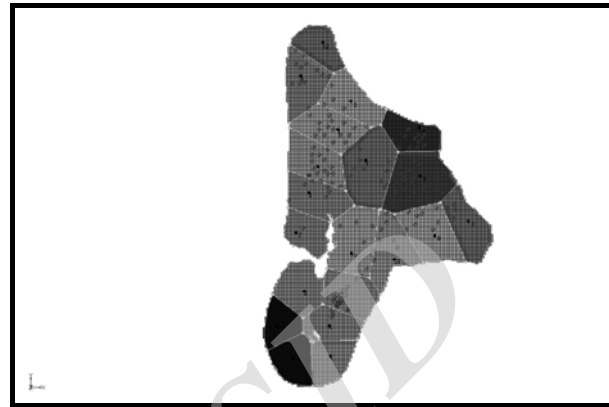
در این مطالعه با توجه به نمودار ۶ که دیاگرام کلی از روند مدلسازی را در مراحل مختلف کمی-کیفی نشان می‌دهد در سه مرحله آنالیز حساسیت و واسنجی انجام می‌شود. آنالیز حساسیت مدل کمی در دو حالت ماندگار و ناماندگار حاکی از حساسیت به پارامترهای

1- Calibration Criterion



شکل ۱۱- ضریب آبدهی ویژه آبخوان پس از واسنجی مدل

Fig 11- Specific yield in aquifer after calibration



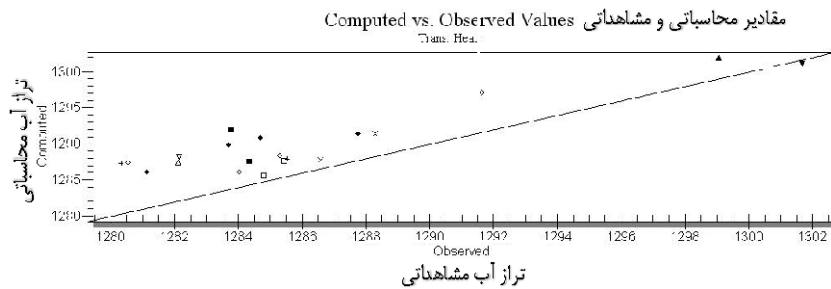
شکل ۱۰- میزان هدایت هیدرولیکی واسنجی شده در آبخوان

Fig 10- Hydraulic conductivity in aquifer after calibration

جدول ۲- ضرایب در نظر گرفته در شده معادله ی پخشیدگی پس از واسنجی مدل کیفی (۲۹)

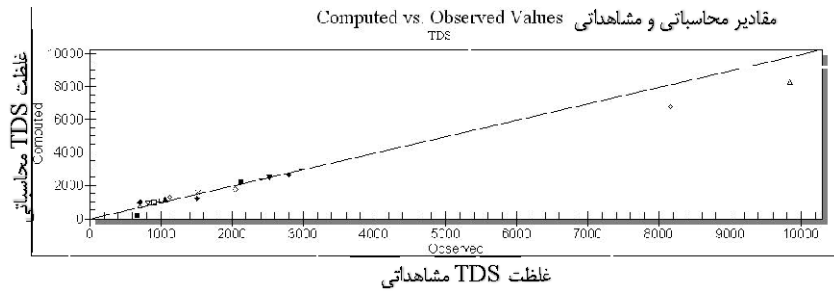
Table 2- Index of dispersion equation after calibrate quality model

ردیف Sort	نام پارامتر Parameter	میزان Value
1	نسبت پخش افقی به پخش طولی TRPT	0.5
2	نسبت پخش عمودی به پخش طولی TRPV	0.2
3	ضریب پخش مولکولی مؤثر DMCOEF	1 m
4	پخشیدگی طولی Longitudinal Dispersivity	30



شکل ۱۲- صحت سنجی دوره دهم تنش در مدل ناماندگار-متر

Fig12- Validation Unsteady model in 10 stage



شکل ۱۳- صحت سنجی دوره پنجم تنش در مدل کیفی-متر
Fig 13- Validation Unsteady model in 5 stage

۳- پیش‌بینی

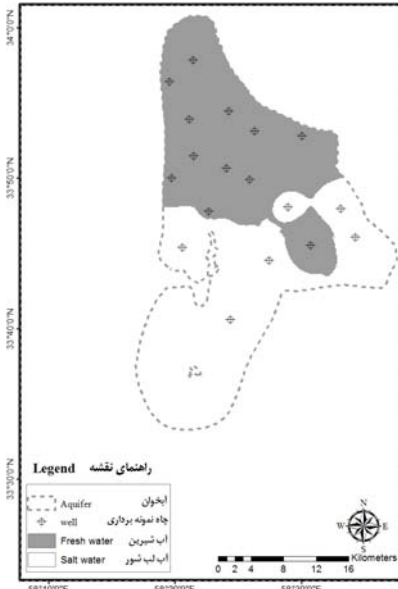
نتایج نهایی حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی حاکی از دقت بالای مدل شبیه‌سازی شده در دو حالت کمی و کیفی را جهت پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی و پارامتر کیفی TDS دارد. به منظور بررسی تغییرات آبخوان از نظر کمی و کیفی یک دوره ۵ ساله برای پیش‌بینی آبخوان در نظر گرفته شد. پیش‌بینی مدل با این شرایط که تغییری در روند کنونی برداشت آب از آبخوان، عدم تغییر در روند بارندگی، عدم اجرای طرح‌های توسعه احتمالی در منطقه و ... صورت پذیرد اجراء شد. نتایج پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در مدل کمی حاکی از افزایش روند افت سطح آب زیرزمینی دارد که این روند افت با توجه به شکل (۳) که هیدروگراف آبخوان را نشان می‌دهد ارائه شده است. نتایج پیش‌بینی غلظت TDS در سطح آبخوان سرایان حاکی از بالا رفتن غلظت TDS می‌باشد. این افزایش غلظت حاکی از عدم قابلیت برداشت آب در نواحی جنوبی آب بخصوص در بخش‌های شرب و کشاورزی است که مطالعات و بررسی‌های به عمل آمده نشان می‌دهد که میزان شوری در این چاهها دارای یک روند صعودی بوده و پمپاژ زیاد آب در این چاهها سبب بالازدگی آب شور می‌باشد. شکل (۱۴) عرصه پهنه بندی کیفی آبخوان سرایان را از نظر کیفی ارائه می‌دهد. در این شکل تغییرات TDS بین ۷۱۲ میلی‌گرم بر لیتر در نوار شمالی آبخوان تا ۸۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در نواحی جنوبی را نشان می‌دهد که با توجه به افزایش غلظت TDS در منطقه مرزبندی برداشت آب برای مصارف مختلف تغییر می‌کند. با توجه به وضعیت کنونی و پیش‌بینی غلظت TDS در منطقه پیشروی آب شور از لایه‌های زیرین آبخوان و مناطق کویری در جنوب آبخوان بیشتر به چشم می‌آید. نتایج حاصل از پیش‌بینی تغییرات کیفی در محدوده‌ی آبخوان حاکی از هجوم جبهه‌های آب شور از سمت جنوب و جنوب غرب به سمت آبخوان در حال پیشروی می‌باشد. از عوامل موثر در شوری آب زیرزمینی در آبخوان سرایان می‌توان به اثرات سازند زمین‌شناسی و عبور آبهای تغذیه‌کننده آبخوان از سازندهای نمکی در منطقه، تبخیر از آب‌های زیرزمینی کم عمق بخصوص در نوار جنوبی که سبب باقیماندن املاح و کاهش حجم آب، قرار داشتن ذرات ریزدانه در

مسیر جریان آب زیرزمینی را نیز اشاره داشت. هجوم جبهه‌های آب شور معمولاً بگونه‌ای می‌باشد که از سمت کویر که به عنوان نمکزار و مخزن آب شور است به سمت آبخوان در حرکت بوده و با توجه به انتقال آلاینده‌ها از غلظت بیشتر به غلظت کمتر براساس فشار اسمزی در لایه‌های خاک، در منطقه خروجی آبخوان نیز هجوم جبهه‌های آب شور را به سمت مناطق داخلی آبخوان را خواهیم داشت. با توجه به جهت حرکت آب زیرزمینی از سمت شمال به جنوب آبخوان و تهاجم جبهه‌های آب شور از سمت جنوب به شمال آبخوان می‌باشد لذا سرعت تهاجم جبهه‌های آب شور از یک طرف کاهش یافته اما برداشت بی‌رویه و بی‌بیلان منفی آبخوان از سوی دیگر سبب افزایش بالازدگی آب شور از لایه‌های زیرین آبخوان می‌شود. به عبارت دیگر برداشت بی‌رویه آب از منابع آب زیرزمینی، سبب افزایش گرادیان هیدرولیکی در جبهه‌ی آب شور نسبت به آب شیرین آبخوان می‌شود. انتقال آب شور از کویر بطرف آبخوان با توجه به چگالی بیشتر آب شور نسبت به آب شیرین، سبب ورود املاح به لایه‌های زیرین آبخوان و تهاجم جبهه‌های آب شور می‌شود. این تهاجم سبب افزایش سطح آب‌های شور و لب شور در آبخوان می‌شود که نتایج پیش‌بینی مدل کیفی نیز این موضوع را تأیید می‌کند. براین اساس و با توجه به نتایج استخراجی از مدل MT3D و پیش‌بینی غلظت TDS پهنه بندی کیفی آب زیرزمینی قابل استخراج در آبخوان سرایان بصورت شکل (۱۵) که مرزبندی آب‌های شور تا شیرین را نشان می‌دهد بدست آمده است.

۴- اعمال سناریوی کاهش برداشت آب

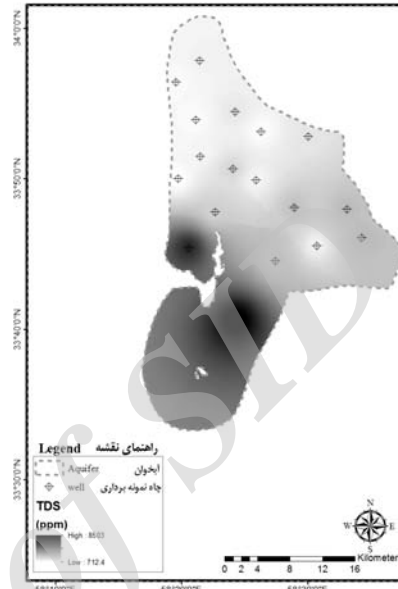
با توجه به نتایج استخراجی از مدل و افزایش شوری آب در منابع آب زیرزمینی، سناریوی کاهش برداشت آب از آبخوان به عنوان راهکار مدیریتی انتخاب شد. کاهش برداشت آب از آبخوان براساس سه حالت ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد کاهش برداشت آب برای مدت سه سال مدلسازی می‌شود. با کاهش حجم برداشت آب و در نظر گرفتن حالت نرمال برای سایر پارامترهای مدلسازی شبیه‌سازی انجام می‌شود. شکل ۱۶ تغییرات هیدروگراف آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. نتایج

مستخرج از شبیه سازی کمی آبخوان در سه حالت کاهش برداشت آب، مدل MT3D جهت بررسی وضعیت کیفی و تعیین مرز جبهه های آب شور و شیرین در منطقه شبیه سازی شد. نتایج حاکی از بهبود غلظت TDS در آبخوان می باشد که در شکل ۱۷ مرز جبهه آب شور و شیرین در سه حالت ارائه شده است.

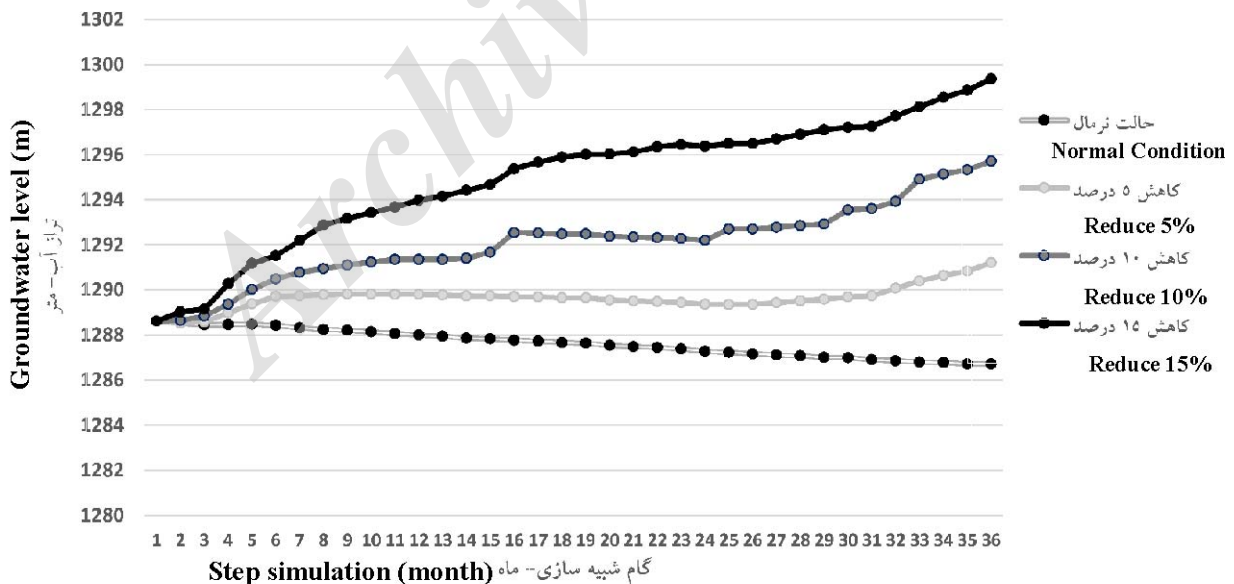


شکل ۱۵- مرز جبهه های آب شور و شیرین
Fig 15- Intrusion in fresh water and saltwater

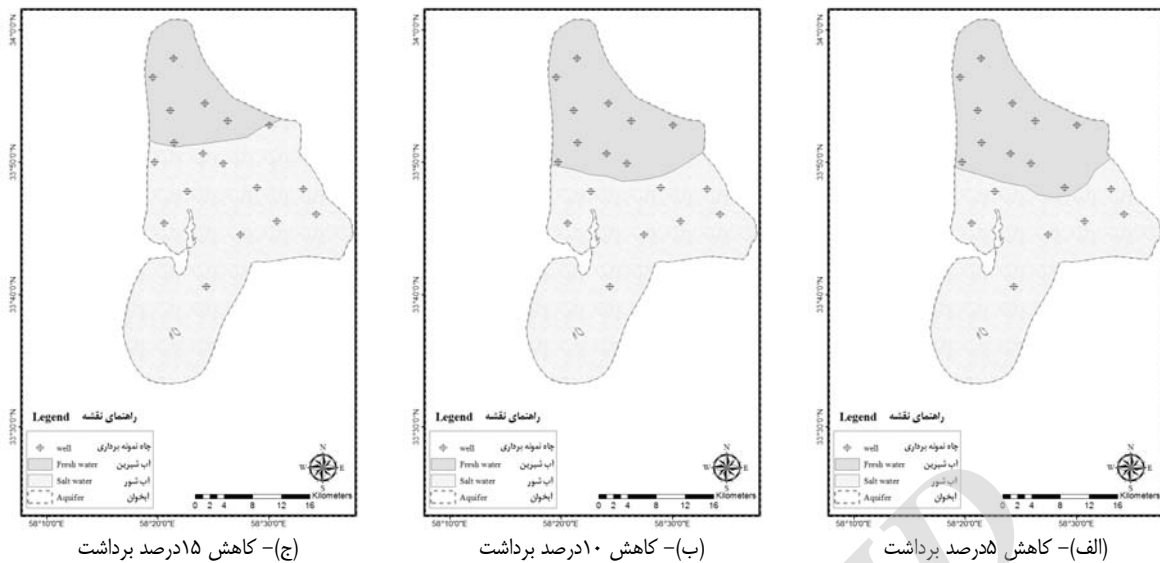
نشان می دهد که شیب هیدروگراف آب زیرزمینی در آبخوان بعد از گذشت ۳ ماه تغییر شیب داده و از روند افت کاسته می شود. در حالت کاهش ۱۰ درصدی برداشت آب، بعد از ۱۵ ماه منحنی هیدروگراف، افزایش شیب جهت تغذیه آبخوان دارد که این روند در حالت کاهش ۱۵ درصدی نیز مشاهده می شود. همچنین بعد از گذشت ۳۰ ماه از شبیه سازی، روند تغذیه آبخوان رشد بیشتری دارد. براساس نتایج



شکل ۱۴- پهنه بندی غلظت TDS در آبخوان سرایان
Fig 14- TDS concentration maps in sarayan map



شکل ۱۶- هیدروگراف آب زیرزمینی با سه حالت کاهش برداشت آب
Fig 16- Groundwater hydrograph by three scenarios of decrease discharge



شکل ۱۷- مرز جبهه های آب شور و شیرین در سه حالت

Fig 17- Intrusion in fresh water and saltwater in three scenarios

پخش طولی، $0/2$ برای نسبت پخشیدگی عمودی به پخش طولی، 1 متر برای ضریب پخش مولکولی موثر و 20 برای پخشیدگی طولی مورد واسنجی نهایی قرار گرفت. پس از صحت سنجی مدل کیفی، پیش‌بینی‌های غلظت TDS در آبخوان حاکی از افزایش غلظت این پارامتر بوده و روند افزایشی این پارامتر را در منابع آب زیرزمینی منطقه نشان می‌دهد. با توجه به نتایج استخراجی عبور منابع تغذیه کننده آبخوان، مناطق تبخیر و بافت ریزدانه‌ی منطقه از جمله عوامل موثر در افزایش غلظت TDS را آبخوان را می‌توان برشمرد. البته با توجه به قرار داشتن یک منبع آب زیرزمینی شور در خروجی آبخوان و ارتباط هیدرولیکی بین آنها فرضیه انتقال آب شور و تهاجم آن به آبخوان مطرح که با توجه به نتایج استخراجی و اثرات کم فاکتورهای بیان شده برای شوری این فرضیه تقویت شد. پس از بررسی و تحلیل جریان آب زیرزمینی اثر تهاجم جبهه ی آب شور و پیشروی آن به سمت مرکز آبخوان به عنوان یک پارامتر در افزایش شوری در منطقه ارائه شد. پیش‌بینی آتی آبخوان نشان می‌دهد که با همین روند برداشت آب و اثرات کاهش بارندگی بیش از پیش مشهود و سبب تهاجم بیشتر جبهه های آب شور کویری می‌شود. با توجه به روند شور شدن منابع آب زیرزمینی سناریو مدیریتی کاهش برداشت آب در سه حالت 5 ، 10 و 15 درصدی برای منطقه شبیه سازی شد. نتایج شبیه سازی در سه حالت حاکی از بهبود کمی و کیفی آبخوان می‌باشد. لذا نتایج این تحقیق نشان می‌دهد مدیریت برداشت از آبخوانهای کویری به منظور بهبود کیفیت آنها و مانع تهاجم آب شور کویری به این آبخوان‌ها، با توجه خشکسالی‌های اخیر ضروری است.

نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه با استفاده از مدل ریاضی، مدل‌سازی کمی و کیفی آبخوان سرایان به منظور مدیریت پایدار و نقش جبهه‌های آب شور کویری مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. با توجه به مطالعات گسترده انجام شده در مورد تهاجم جبهه‌های آب شور در مناطق ساحلی و اثرات آن بر کیفیت آب زیرزمینی، در این مطالعه اثرات آب شور کویری را با توجه به حجم بالای آن و عدم در نظر داشتن این منبع در افزایش شوری آبخوان‌ها مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. به منظور مدل‌سازی کمی و کیفی آبخوان یک دوره آماری 5 ساله جهت مدل‌سازی انتخاب و پس از معرفی و ورود پارامترهای بیلان آب زیرزمینی در منطقه مدل اجرا و به منظور دقت در نتایج آنالیز حساسیت به منظور واسنجی مدل انجام گرفت. نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که پارامتر هدایت هیدرولیکی در حالت ماندگار و آبدهی ویژه برای حالت ناماندگار نسبت به خروجی مدل عکس العمل زیادی نشان داده و می‌بایست مورد واسنجی قرار گیرند. پس از واسنجی این پارامترها به منظور بررسی وضعیت آتی آبخوان، صحت سنجی مدل به منظور اعتبارسنجی پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در آبخوان انجام گرفت و نتایج نشان داد که آبخوان سرایان تحت تنش شدید آبی قرار خواهد گرفت و روند افت آبخوان به شیب بیشتری ادامه خواهد داشت. پس از تکمیل مدل کمی آبخوان، شبیه سازی کیفی آبخوان توسط مدل MT3D در همان دوره زمانی با گام زمانی 6 ماهه انجام پذیرفت. به منظور بررسی اثرات جبهه های آب شور کویری پارامتر TDS در منطقه شبیه‌سازی و به منظور افزایش نتایج خروجی مدل واسنجی این مدل با در نظر گرفتن ضریب $0/5$ برای نسبت پخشیدگی افقی به

منابع

1. Abd-Elhamid H.F. and Javadi A.A., 2011. A cost-effective method to control seawater intrusion in coastal aquifers. *Water resources management*, 25(11), pp.2755-2780.
2. Almasri M.N., and Kaluarachchi J.J., 2007. Modeling nitrate contamination of groundwater in agricultural watersheds. *Journal of Hydrology*, 343(3), pp.211-229.
3. Anderson M.P., Woessner W.W. 1992. *Applied Groundwater Modeling: Simulation of flow and Advective Transport*. San Diego, California: Academic press, 391pp.
4. Appelo C.A.J., and Postma D. 2004. *Geochemistry, groundwater and pollution*. CRC press.
5. Arslan H., Cemek B., and Demir Y. 2012. Determination of seawater intrusion via hydrochemicals and isotopes in Bafra Plain, Turkey. *Water resources management*, 26(13), pp.3907-3922.
6. Arslan H., 2014. Estimation of spatial distribution of groundwater level and risky areas of seawater intrusion on the coastal region in Çarşamba Plain, Turkey, using different interpolation methods. *Environmental monitoring and assessment*, 186(8), pp.5123-5134.
7. Faust C.R., and Mercer J.W. 1980. *Groundwater Modeling*. *Journal of Groundwater*. 18:486-496.
8. Green N.R., and MacQuarrie, K.T.B., 2014. An evaluation of the relative importance of the effects of climate change and groundwater extraction on seawater intrusion in coastal aquifers in Atlantic Canada. *Hydrogeology Journal*, 22(3), pp.609-623.
9. Hanshaw, B.B., and Back W. 1979. Major geochemical processes in the evolution of carbonate—Aquifer systems. *Journal of Hydrology*, 43(1), pp.287-312.
10. Hem J.D., 1985. *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water* (Vol. 2254). Department of the Interior, US Geological Survey.
11. Jayasekera D.L., Kaluarachchi J.J., and Villholth K.G. 2011. Groundwater stress and vulnerability in rural coastal aquifers under competing demands: a case study from Sri Lanka. *Environmental monitoring and assessment*, 176(1), pp.13-30.
12. Jones B.F., Vengosh A., Rosenthal E., and Yechieli Y. 1999. Geochemical investigations. In *Seawater intrusion in coastal aquifers—concepts, methods and practices* (pp. 51-71). Springer Netherlands.
13. Konikow L.F., and Reilly T.E. 1999. Seawater intrusion in the United States. In *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers—Concepts, Methods and Practices* (pp. 463-506). Springer Netherlands.
14. Langevin C.D., Thorne Jr, D.T., Dausman A.M., Sukop M.C., and Guo W. 2008. SEAWAT Version 4: A computer program for simulation of multi-species solute and heat transport (No. 6-A22). Geological Survey (US).
15. Langevin C.D., 2008. Modeling axisymmetric flow and transport. *Groundwater*, 46(4), pp.579-590.
16. Loáiciga H.A., Pingel T.J., and Garcia E.S. 2012. Sea Water Intrusion by Sea-Level Rise: Scenarios for the 21st Century. *Groundwater*, 50(1), pp.37-47.
17. Lu C., and Werner, A.D., 2013. Timescales of seawater intrusion and retreat. *Advances in water resources*, 59, pp.39-51.
18. McDonald M.G., and AW H. 1988. MODFLOW, A Modular 3D Finite-Difference Ground-Water Flow Model USGS. Tec. Water-Resources Inv.
19. Ministry of Power. 2011. Prohibition discharge in Sarayan plain. (in Persian)
20. Panteleit B., Hamer K., Kringel R., Kessels W., and Schulz H.D. 2011. Geochemical processes in the saltwater–freshwater transition zone: comparing results of a sand tank experiment with field data. *Environmental Earth Sciences*, 62(1), pp.77-91.
21. Piper, A.M., 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 25(6), pp.914-928.
22. Rahnama M.B., and Zamzam A. 2013. Quantitative and qualitative simulation of groundwater by mathematical models in Rafsanjan aquifer using MODFLOW and MT3DMS. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(3), pp.901-912.
23. Rhoades J.D., Kandiah A., and Mashali A.M. 1992. *The use of saline waters for crop production* (Vol. 48). Rome: FAO.
24. Kreitler C.W. 1993. *Geochemical techniques for identifying sources of ground-water salinization*. CRC press.
25. Singhal B.B.S., and Gupta R.P. 2010. *Applied hydrogeology of fractured rocks*. Springer Science & Business Media.
26. Sivsankar V., Ramachandramoorthy T., and Kumar M.S. 2013. Deterioration of coastal groundwater quality in Rameswaram Island of Ramanathapuram District, Southern India. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 35(2), pp.91-98.
27. Todd D.K. 1980. *Groundwater hydrology* 2ed. John Wiley.
28. USGS Groundwater software: MODFLOW 2000. Available at: (<http://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/modflow2000/modflow2000.html>)

29. Wallis I., Prommer H., Post V., Vandenbohede A., and Simmons C.T. 2013. Simulating MODFLOW-Based Reactive Transport Under Radially Symmetric Flow Conditions. *Groundwater*, 51(3), pp.398-413.
30. Wang H.F., and Anderson M.P. 1995. *Introduction to groundwater modeling: finite difference and finite element methods*. Academic Press.
31. Zheng C., and Wang P.P. 1999. *MT3DMS: a modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reactions of contaminants in groundwater systems; documentation and user's guide*. Alabama Univ University.

Archive of SID

Investigation of Interference of Salt water in Desert Aquifers (Case study: South Khorasan, Sarayan Aquifer)

H. Kardan Moghaddam¹ – M. E. Banihabib^{2*}

Received: 22-09-2015

Accepted: 23-04-2017

Introduction: Due to the increase in water consumption resulting from climate change and rapid population growth, overexploitation of groundwater resources take place particularly in arid regions. This increased consumption and reduced groundwater quality is a major problem especially in arid areas of concern among water resources managers and planners. The use of modern simulation tools to evaluate the performance of an aquifer could help the managers and planners to decide. In this research, finite difference method was used to simulate the behavior of the quality and quantity of groundwater.

Materials and Methods: Increasing the concentration of salts in the groundwater aquifers intensifies with severe water withdrawing and causes the uplift of salt water in aquifers. This is much more severe in adjacent aquifers of saline aquifers in deserts and coastal areas. Front influx of saltwater into freshwater aquifers causes interference and disturbance in water quality and complex hydro-chemical reactions occurs in the joint border area including the process of cation, groundwater flow, the reduction of sulfate, the reaction of Carbonatic and changes in the dolomitic calcite. Sarayan Aquifer has a negative balance and the annual groundwater table drawdown of 62 cm.

In this study, Total Dissolved Solids (TDS) as a groundwater quality factor was simulated to investigate the effect of the overexploitation on the saline interface of desert aquifer using MT3D module of GMS model for a period of 5 years with time steps of 6 months. One of the most important steps of the simulation of groundwater quality is to use qualitative model to predict the groundwater level which in this study were performed by quantitative models in two steady and unsteady flow states with time steps of 6 months. The four basic steps of a proper modeling of the groundwater quality are sensitivity analysis of the input parameters, calibration of the sensitive parameters of the model, validation of the time step and groundwater quality forecast for the future periods. These modeling steps were carried out for steady and unsteady states by GMS software.

Aquifer hydraulic conductivity and the specific yield of aquifers were selected as two critical parameters of quantitative model in steady and unsteady states. The model was calibrated based on these two parameters and then using pest method, the value of these parameters was finalized. In order to evaluate the response of the aquifer to different periods of droughts, the verification of the model was conducted during the ten periods. The results show that observed water level has suitable correlation with simulated water level. In the same period, the simulation of water quality for TDS parameter carried out using the results of the quantitative model. After identification of sensitive parameters in the model, calibration of the model was carried out taking into account the factor of 0.5 for the ratio of horizontal to vertical distribution, vertical diffusion length of 0.2, 1 meter for effective molecular diffusion coefficient, and 20 for longitudinal diffusion.

Results and Discussion: In the total area of the aquifer, the water demand of all sectors are supplied using groundwater resources. This water withdrawal trend exacerbated the decline in groundwater levels and reduced water quality. Also in the southern strip of the aquifer, there is a desert saline groundwater aquifer, which causes the intrusion of salt water to the aquifer and negative effects on its quality. The factors influencing the salinity of groundwater in the Sarayan Aquifer are geological formations, supplying the aquifer from salty formations in the region, evaporation from the shallow part of the aquifer especially in the southern strip that leaves salt and reducing the volume of water, existence of fine soil in the media of groundwater flow. Front influx is from saltwater desert aquifer to the Sarayan Aquifer. Due to the osmotic pressure of the soil layers in the aquifer, the pollutants transferred from the higher concentration to lower concentration and an influx of salt water into the aquifer will occur from outside of the aquifer. Since the direction of groundwater flow is from the north to the south of the aquifer and salt water intrusion is from the south to the north, the velocity of saltwater intrusion dropped so quickly water. However, overexploitation of groundwater and negative aquifer balance caused uplift

1 and 2- PhD Candidate and Associate Professor Water Resources Engineering, University College of Aburairhan, University of Tehran, Pakdasht, Tehran

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

of the salt water in aquifer.

Conclusion: Review of the result of forecasted TDS concentration in Sarayan Aquifer, shows an increase in TDS concentration. This increase indicates that there is no potential for more water withdrawing in the southern parts of the aquifer by urban and agricultural sectors. The variety of TDS changes between 712 mg/lit in the northern strip of the aquifer to 8500 mg/lit in the southern strip shows that due to the increased concentration of TDS, the border area of water users will be changed. The forecasting of the future status of aquifer water quality showed that continuing withdrawing of water intensifies salt water interference from the desert and concentration of TDS will increase during the next 5 years. To manage aquifer quality and quantity, three scenarios of water withdraw reduction were used. The results are shown restoration of the aquifer quality and quantity using these scenarios.

Therefore the result of this research shows that the management of groundwater is necessary to improve the quality of desert aquifers and prevent salt water interference from desert considering recent droughts.

Keywords: Aquifer, Calibration, Interference saltwater, MT3D model, Quality

Archive of SID