

مدل سازی و پیش‌نگری تغییرات غلظت TDS در آبخوان ورامین با استفاده از نرم افزار GMS

محمد نخعی

گروه زمین شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

امین محبی تفرشی

باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

غزاله محبی تفرشی

باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۱/۱۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۱۵

a.mohebbi63@gmail.com

چکیده

در این تحقیق جهت بررسی تغییرات کیفی و مدل‌سازی تغییرات غلظت و پیش‌بینی TDS در آبخوان ورامین، نرم افزار GMS 10.0.11 استفاده شد. در این راستا، پس از جمع‌آوری اطلاعات زمین‌شناسی، هواشناسی، هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی، آزمایشات ژئوفیزیکی و گمانه‌های اکتشافی، آمار بارندگی و تراز سطح آب زیرزمینی در چاه‌های بهره‌برداری یک پایگاه داده در نرم افزار ArcGIS 10.5 تشکیل و با انتقال این اطلاعات به محیط نرم افزار GMS، مدل مفهومی ساخته شد. سپس براساس مدل مفهومی ایجاد شده، اقدام به شبیه‌سازی، واسنجی و صحت‌سنجی سطح آب زیرزمینی با استفاده از کد Modflow2000 در نرم افزار GMS گردید. نتایج واسنجی گویای انطباق بسیار مناسب داده‌های سطح آب مشاهده‌ای و محاسبه‌ای توسط مدل در حد $R^2=0.999$ می‌باشد. پس از این مرحله، مدل انتقال آبخوان به منظور بررسی تغییرات غلظت TDS توسط زیربرنامه MT3DMS تهیه گردید. نتایج مطالعه نشان داد که اگر وضعیت بهره‌برداری و همچنین ورود فاضلاب به مناطق غربی و جنوب غربی آبخوان به همین صورت ادامه داشته باشد در انتهای بازه پیش‌بینی، غلظت حتی به ۷۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر نیز خواهد رسید و وضعیت نامناسبی برای استفاده از آب‌های این مناطق جهت مصارف شرب و کشاورزی بوجود خواهد آمد.

کلمات کلیدی: مدل انتقال، مدل جریان، GMS، MT3DMS، TDS

مقدمه

مرکز شهر، همچنان غلظت نترات زیاد خواهد بود. در مناطق جنوب غربی شهر ری، به علت تأثیر شبکه فاضلاب، مقدار نترات آبخوان به کمتر از ۳۰ میلی‌گرم در لیتر کاهش پیدا خواهد کرد و به تدریج، دامنه کاهش نترات آبخوان، از سمت غرب و جنوب غربی به سمت مناطق مرکزی شهر گسترش خواهد یافت. رهنما و زمزم در سال ۱۳۹۰ مدل‌سازی و پیش‌بینی میزان TDS وجود در آب زیرزمینی توسط مدل MT3DMS در دشت رفسنجان کرمان را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که میزان روند TDS آب زیرزمینی هم در زمان گذشته و هم برای زمان‌های آینده، روند افزایشی دارد و در برخی نقاط دشت مقدار این پارامتر به ۱۲۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر رسیده است. بنابراین منابع آب زیرزمینی دشت رفسنجان به توجه بیشتری نیاز دارد. کاردان مقدم و بنی حبیب (۱۳۹۶) از زیربرنامه MT3DMS در نرم افزار GMS اثرات زیست محیطی هجوم جبهه‌های آب شور به آبخوان‌های کویری را در آبخوان سرایان خراسان جنوبی مورد بررسی قرار داده و با تعریف سناریوهای مدیریت برداشت، راهکارهای جلوگیری از پیشروی نفوذ جبهه شور را ارائه نمودند. همچنین از دیگر تحقیقات انجام شده در زمینه مدل‌سازی کیفی می‌توان به: Prommer Christian and Weeixing, Lautz et al., 2005; et al., 2003 Morway et al., Almasri and Kaluarachchi, 2007; 2006 Mohammadi et al., 2015; 2013 اشاره نمود.

هدف از انجام این تحقیق، شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی آبخوان ورامین جهت مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات غلظت TDS با استفاده از نرم افزار GMS است.

از آنجایی که آب‌های زیرزمینی در معرض آلودگی‌های شدید قرار دارند، استراتژی‌های مؤثر برای مدیریت و حفاظت منابع آب‌های زیرزمینی برای اجتناب از اثرات محیطی برگشت‌ناپذیر مانند کاهش شدید کیفیت این آب‌ها و نابودی آنها لازم است (Harden, 2000). لذا جهت حفاظت و صیانت از محیط زیست و منابع طبیعی باید به پایش دقیق و ارزیابی و استفاده از مدل‌سازی‌های ریاضی و عددی مبادرت نمود تا مدیران بتوانند بر مبنای این مدل‌ها راهکارهای مناسب جهت تصمیمات مدیریتی آینده محور اتخاذ نمایند.

سوابق تحقیقی متعددی در ایران و سایر نقاط جهان در این زمینه وجود دارد که از آن جمله می‌توان به تحقیق Don et al, 2005 که با استفاده از مدل MODFLOW و MT3D، فرونشست زمین و انتقال املاح در زمین‌های آبرفتی را شبیه‌سازی کردند، اشاره نمود. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که فرونشست به سرعت در کل ناحیه اتفاق افتاده بود. آنها در ادامه آنالیز حساسیت و آلودگی شوری را نیز بررسی کردند و راهکارهایی مانند افزایش راندمان آبیاری، کاهش تقاضا را پیشنهاد نمودند. Abu-El-Sha'r and Hatamleh, 2007 در تحقیقی در حوضه آبریز از رگ کشور اردن از مدل MODFLOW و MT3D بعنوان یک ابزار مدیریتی جهت تنظیم میزان بهره‌برداری از منابع آبی بمنظور کاهش آلودگی شوری استفاده نمودند. در این مطالعه آنها جهت بررسی شوری آبخوان از پارامتر TDS استفاده نمودند. احتشامی و شریفی (۱۳۸۵) در مطالعه‌ای در آبخوان شهر ری به مطالعه آلاینده‌های یون نترات در آب‌های زیرزمینی با استفاده از مدل MT3D پرداختند. نتایج مدل نشان داد به علت فقدان شبکه جمع‌آوری فاضلاب در

منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی دشت ورامین در جنوب شرقی تهران واقع شده و ۱۵۸۴ کیلومتر مربع مساحت دارد. این دشت از شمال به ادامه رشته کوه‌های البرز، از جنوب به تپه ماهورهای جنوبی دشت، از غرب به رودخانه شور و از شرق به دشت ایوانکی منتهی می‌گردد (مختاری، ۱۳۸۶). غالب نوع مصرف تخلیه آب زیرزمینی دشت ورامین کشاورزی است (Mahmoudi et al., 2017). مهم‌ترین منبع آب برای تأمین نیاز کشاورزی منطقه رودخانه جاجرود است (نجاتی جهرمی و همکاران، ۱۳۹۶). علاوه بر دریافت رودخانه جاجرود بالادست محدوده مطالعاتی، زهکش‌های مسیل‌های تهران، که عموماً از طریق کانال پیروزی جمع‌آوری می‌شود، و همچنین رودخانه کن به محدوده مطالعاتی می‌ریزد. محدوده مطالعاتی از آبخوانی آبرفتی و آزاد با وسعت ۱۰۷۵ کیلومتر مربع، که گستره دشت را فراگرفته، تشکیل می‌شود (Mahmoudi et al., 2018).

آب و هوای منطقه غالباً تحت تأثیر جبهه‌های مدیترانه‌ای از غرب و شمال غرب و جبهه‌های سیبری از شمال قرار دارد (مختاری و اسپهبد، ۱۳۸۸). متوسط ارتفاع دشت از سطح دریای آزاد ۹۵۰ متر می‌باشد که بیشترین ارتفاع در بخش شمالی برابر ۱۰۲۰ متر و کمترین ارتفاع در جنوب و جنوب شرقی دشت با ۸۲۰ متر می‌باشد (نخعی و همکاران، ۱۳۹۵). متوسط بارندگی سالانه دشت ورامین حدود ۱۶۵ میلی‌متر (رنگزن و همکاران، ۱۳۸۷) و اقلیم منطقه ورامین بر اساس طبقه‌بندی دومارتن اصلاح شده از نوع خشک بیابانی است (حکمت پور و همکاران، ۱۳۸۶). به طور کلی سازند آتشفشانی ائوسن و سازند الیگومیوسن در منطقه به علت گستره کم در تغذیه آب زیرزمینی اهمیت

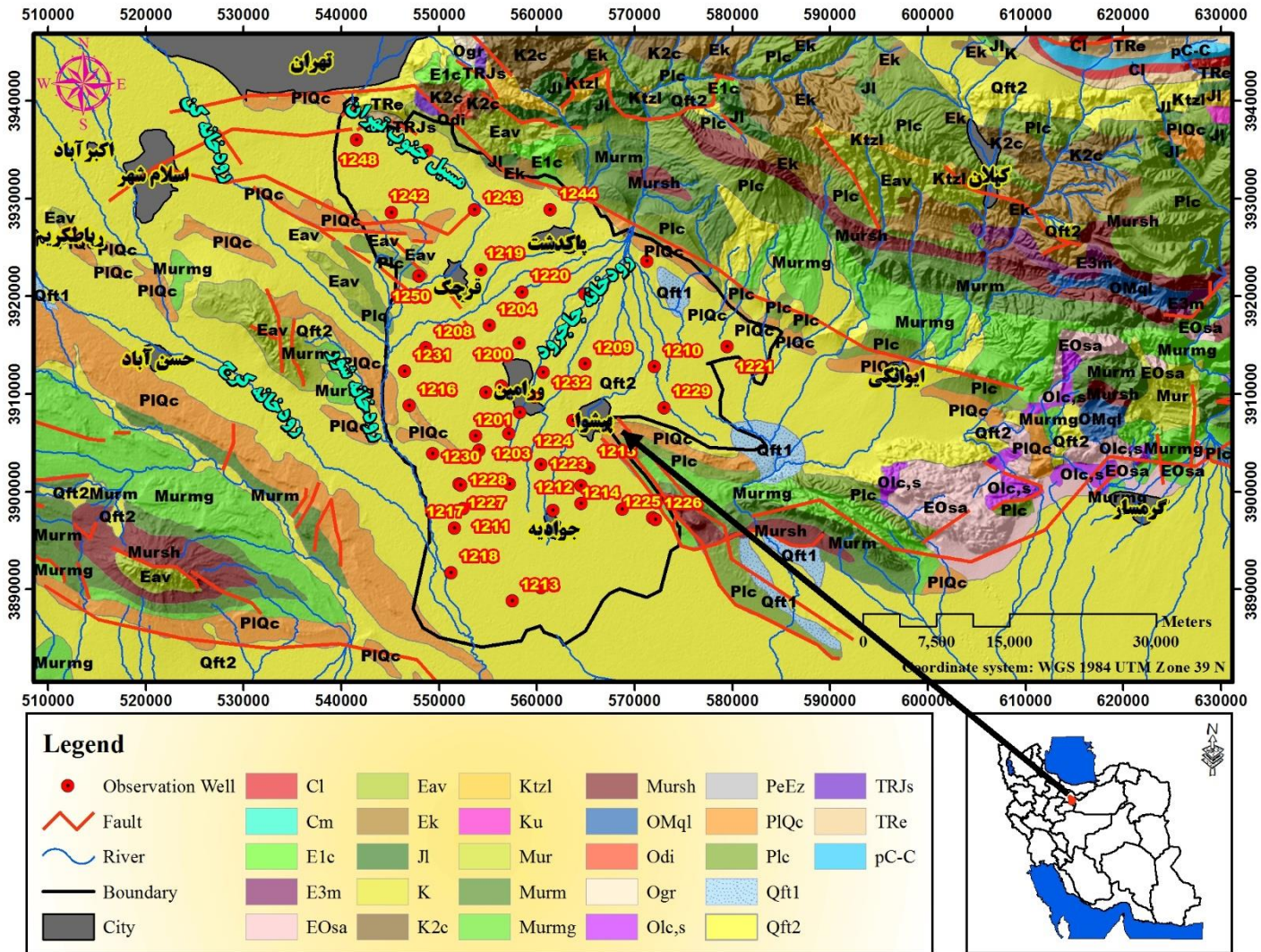
چندانی نداشته و همچنین سازند میوسن در منطقه به علت وجود لیتولوژی مارن، رسوبات تبخیری نظیر گچ و نمک و مادستون، در مسیر جریان آب‌های سطحی موجب افزایش املاح آب و تخریب کیفیت آبخوان گردیده، ضمن اینکه در تغذیه آب زیرزمینی فاقد اهمیت می‌باشند (صادقی و همکاران، ۱۳۸۵).

مواد و روش‌ها

با توجه به اینکه مدل‌های انتقال و آلودگی نیاز به یک مدل کالیبره شده جریان آب‌های زیرزمینی دارند (Hill et al., 2004) لذا ابتدا مدل جریان آب برای محدوده مورد مطالعه تهیه گردید. برای مدل‌سازی سیستم جریان آب زیرزمینی از مدل ریاضی و GIS بهره گرفته شد. برای همین منظور از تمامی اطلاعات موجود از قبیل نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ (صادقی و همکاران، ۱۳۸۵) منطقه مورد مطالعه (شکل ۱)، آمار ماهانه هواشناسی و هیدرولوژی سال ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۷، تصاویر ماهواره ای ETM، بررسی‌های اکتشافی ژئوفیزیکی، مطالعات هیدروژئولوژیکی و بیلان با استفاده از سطح آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهداتی از سال ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۷، یک پایگاه اطلاعاتی در محیط ArcGIS v.10.5 تهیه شد. اطلاعات ذخیره شده در پایگاه اطلاعاتی GIS با استفاده از نرم افزار Brigham Young University, 2014) Aquaveo GMS 10.0.11 به مدل مفهومی تبدیل و سپس مدل مفهومی تهیه شده به آرایه‌های مدل عددی تبدیل و مدل با استفاده از زیربرنامه MODFLOW2000 در نرم افزار GMS اجرا و مورد واسنجی و صحت سنجی قرار گرفت.

جدول ۱- واحدهای زمین شناسی منطقه مورد مطالعه.

UNIT	DESCRIPTION	UNIT	DESCRIPTION
Cl	Dark red meddium - grained arkosic to subarkosic sandstone and micaceous siltstone (LALUN FM.), Cambrian	Murmg	Gypsiferous marl, Miocene
Cm	Dark grey to black fossiliferous limestone with subordinate black shale (MOBARAK FM.), Carboniferous	Mursh	Varigated shale, gypsiferous marl and sandstone, Miocene
E1c	Pale-red, polygenic conglomerate and sandstone, Paleocene-Eocene	Odi	Diorite, Oligocene
E3m	Marl, sandstone and limestone, Late Eocene	Ogr	Granite, Oligocene
Eav	Andesitic volcanic, Eocene	Olc,s	Conglomerate and sandstone, Oligocene
Ek	Well bedded green tuff and tuffaceous shale (KARAJ FM.), Eocene	OMql	Massive to thick - bedded reefal limestone, Oligocene-Miocene
EOsa	Salt dome, Eocene-Oligocene	pC-C	Late proterozoic - early Cambrian undifferentiated rocks, Pre Cambrian
Jl	Light grey, thin - bedded to massive limestone (LAR FM.), Jurassic-Cretaceous	PeEZ	Reef-type limestone and gypsiferous marl (ZIARAT FM.), Paleocene-Eocene
K	Cretaceous rocks ingeneral, Cretaceous	Plc	Polymictic conglomerate and sandstone, Pliocene
K2c	Conglomerate and sandstone, Late Cretaceous	PlQc	Fluvial conglomerate, Piedmont conglomerate and sandstone, Pliocene-Quaternary
KtZl	Thick bedded to massive, white to pinkish orbitolina bearing limestone (TIZKUH FM.), Early Cretaceous	Qft1	High level piedmont fan and vally terrace deposits, Quaternary
Ku	Upper cretaceous, undifferentiated rocks, Late Cretaceous	Qft2	Low level piedment fan and vally terrace deposits, Quaternary
Mur	Red marl, gypsiferous marl, sandstone and conglomerate (Upper red FM.), Miocene	TRe	thick bedded grey o'olitic limestone ; thin - platy, yellow to pinkish shaly limestone with worm tracks and well to thick - bedded dolomite and dolomitic limestone (ELIKAH FM.), Early-Middle Triassic
Murm	Ligth - red to brown marl and gypsiferous marl with sandstone intercalations, Miocene	TRJs	Dark grey shale and sandstone (SHEMSHAK FM.), Triassic-Jurassic



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی چاه‌های مشاهده‌ای و نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه.

در این فرمول K_{xy} مولفه هدایت هیدرولیکی در جهات x, y مشتق جزئی مرتبه دوم بار هیدرولیکی در جهت x ، مشتق جزئی مرتبه دوم بار هیدرولیکی در جهت y ، $\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}$ مشتق جزئی مرتبه دوم بار هیدرولیکی در جهت z ، S_y آبدهی ویژه و R مولفه تغذیه (+) یا تخلیه (-) به آبخوان است (Anderson and Woessner, 1992). به منظور تهیه مدل اولیه، ابتدا یک پایگاه داده‌ها در محیط نرم افزار ArcGIS10.5 ایجاد گردید. با توجه به محدوده آبخوان ورامین، داده‌های موجود، هدف مطالعه و شکل هندسی آبخوان، و پس از تهیه مدل مفهومی، شبکه تفاضل محدود با ابعاد ۱۲۴ ستون و ۱۰۱ ردیف ایجاد گردید. در این تحقیق ابعاد سلول‌ها برای هر دو مدل جریان و انتقال، یکسان و به صورت ۵۰۰ متر در ۵۰۰ متر در نظر گرفته شد. براساس این گسسته‌سازی، کل سلول‌های تشکیل‌دهنده شبکه ۱۲۵۲۴ عدد می‌باشد که از این تعداد با توجه به مرزهای مدل، ۵۷۴۰ سلول فعال و ۶۷۸۴ سلول غیرفعال به مدل معرفی شد (شکل ۲). بر مبنای مطالعات ژئوفیزیکی و لوگ‌های حفاری (شرکت آب منطقه‌ای تهران، معاونت مطالعات پایه منابع آب، ۱۳۸۰) و توپوگرافی سطح بالایی و زیرین آبخوان (شکل ۳) ضخامت آبخوان از حداکثر ۹۹۰ متر در ورودی آبخوان تا حداقل ۶۹۰ متر در بخش‌های جنوبی

جهت مدل‌سازی انتقال در منطقه مورد مطالعه از زیربرنامه MT3DMS استفاده گردید. این زیربرنامه یک مدل انتقال جرم سه بعدی است که برای شبیه‌سازی تغییرات غلظت آلاینده‌های انحلال‌پذیر در آب زیرزمینی به کار می‌رود (Zheng and Wang, 1999). برای این منظور داده‌های TDS سال ۱۳۸۳ به عنوان مبدأ مدل‌سازی به مدل معرفی و سپس جهت واسنجی یک دوره ۱۰ ساله، جهت صحت‌سنجی یک دوره ۴ ساله و سپس جهت پیش‌بینی یک دوره ۶ ساله، مورد مدل‌سازی قرار گرفت.

بحث و نتایج

مدلسازی جریان

روش انجام مدل‌سازی جریان در این تحقیق مطابق با پروتکل مدل‌سازی ارائه شده توسط Wang and Anderson (1982) می‌باشد. به صورت کلی معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی از دیدگاه سیستم جریان به صورت زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial x} h \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} h \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} h \frac{\partial h}{\partial z} = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \pm \frac{R}{1000}$$

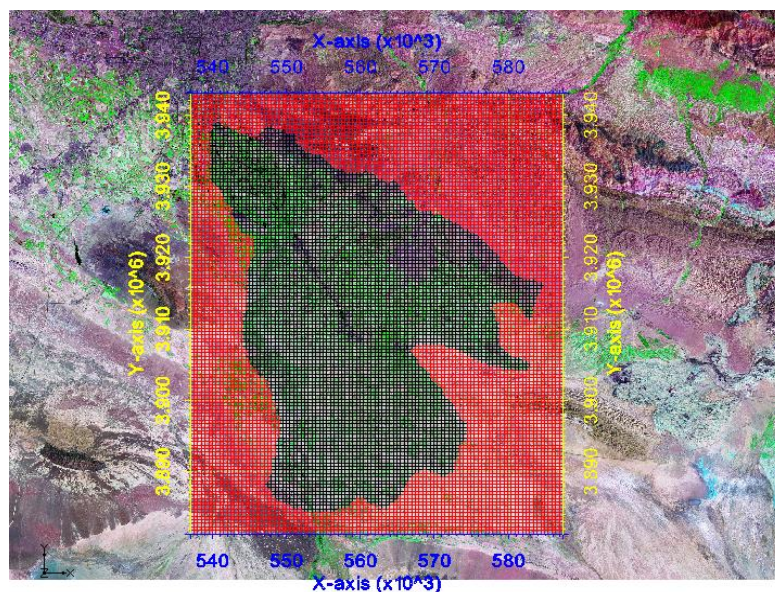
رابطه ۱:

واسنجی مدل

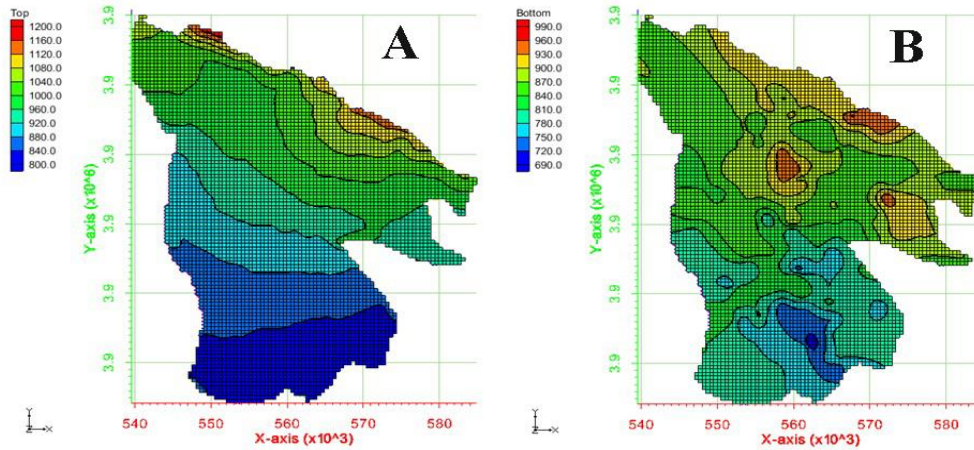
بر اساس استاندارد ASTM D6033,1996 برای واسنجی مدل‌های جریان آب زیرزمینی، در صورتی فرآیند واسنجی صحیح است که مقادیر باقی‌مانده‌ها بخش کوچکی از اختلاف بین بیشترین و کمترین بار هیدرولیکی مشاهده شده در محل باشد. در صورتیکه ۱۰ درصد این اختلاف به عنوان این بخش کوچک در نظر گرفته شود. با توجه به اینکه حداقل بار هیدرولیکی مشاهده شده در محدوده آبخوان آبخوان ورامین ۸۲۰ متر و حداکثر آن ۱۰۸۱ متر می‌باشد لذا مقدار خطای مورد قبول برای واسنجی ۳ متر در نظر گرفته شد. نرم افزار GMS برای نمایش گرافیکی پروسه واسنجی در چاه‌های مشاهده‌ای از میله‌های رنگی که میزان خطای واسنجی را نشان می‌دهند، استفاده می‌نماید (شکل ۶). مرکز این میله‌ها منطبق بر مقدار مشاهده شده است (Kheirkhah Zarkesh et al., 2012). اگر میزان خطا کمتر از حد قابل قبول (۱۰ درصد اختلاف بین بیشترین و کمترین بار هیدرولیکی مشاهده شده در محل) باشد، میله‌های رنگی به رنگ سبز و در صورتی که میزان خطا بیش از حد قابل قبول ولی کمتر از ۲۰٪ آن باشد میله‌های رنگی به رنگ زرد مشاهده می‌شوند. حالت سوم که میله‌های رنگی به رنگ قرمز مشاهده می‌شوند زمانی رخ می‌دهد که خطا بیش از حد قابل قبول و بیش از ۲۰٪ آن باشد (Kheirkhah Zarkesh et al., 2012).

جهت انجام واسنجی در حالت پایدار، مقادیر بهینه شده پارامتر هدایت هیدرولیکی با استفاده از روش آزمون و خطا و همچنین واسنجی خودکار توسط زیر برنامه PEST بدست آمد. دقت واسنجی با توجه به مقدار R^2 بدست آمده (حدود ۰/۹۹) از مقایسه مقادیر سطح آب محاسبه شده توسط مدل و مقادیر مشاهده شده در چاه‌های مشاهده‌ای (جدول ۲ و شکل‌های ۷ و ۸)، بسیار مناسب می‌باشد. در پایان بیان دشت محاسبه و در (جدول ۳) درج گردید.

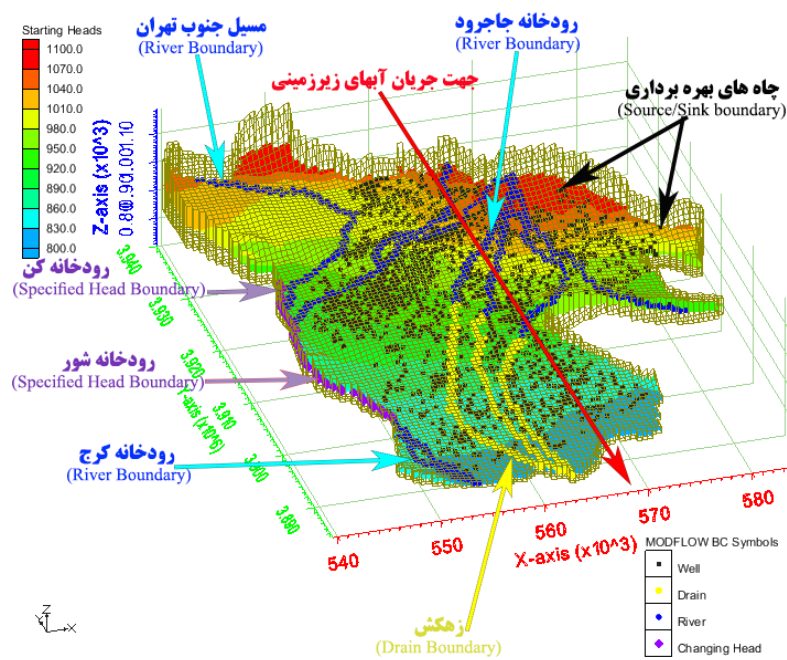
انتهای آبخوان متغیر است. (شکل ۴) مدل مفهومی آبخوان ورامین را نشان می‌دهد. در محدوده مورد مطالعه تعداد ۱۹۰۶ چاه بهره‌برداری وجود دارد که به مدل بعنوان شرایط مرزی از نوع چاه (Source/Sink boundary) معرفی شدند و میزان دبی برداشت آنها در مدل لحاظ شد. پراکندگی چاه‌ها متفاوت بوده و قسمت‌هایی از دشت فاقد چاه می‌باشد. در ادامه رودخانه جاجرود که از هم پیوستن آبراهه‌هایی در شمال و شرق آبخوان آغاز و در انتهای جنوبی از آبخوان خارج می‌شود نیز با توجه خصوصیات هیدرولیکی، به صورت دو بخش رودخانه (از شمال تا مرکز آبخوان) تحت عنوان River Boundary و زهکش (از مرکز تا انتهای جنوبی آبخوان) تحت عنوان Drain Boundary به مدل معرفی گردید. مسیل جنوب تهران در شمال غربی آبخوان و رودخانه کرج در جنوب غربی آبخوان نیز به عنوان River Boundary به مدل معرفی شدند. با توجه به اینکه دو رودخانه کن (در بالا) و شور (در پایین) به موازات مرز غربی آبخوان هستند، این بخش از مدل بعنوان مرز Specified Head به مدل معرفی شد. با توجه به آمار بارندگی، تخییر و تعرق، آب برگشتی کشاورزی و همچنین میزان نفوذپذیری آبخوان، عدد $0/000085$ متر در روز بعنوان تغذیه از نفوذ به مدل ارائه گردید (مختاری، ۱۳۸۶). در این مطالعه برای تخمین و بهینه‌سازی مقادیر هدایت هیدرولیکی از روش پهنه‌بندی استفاده شد. در این روش نقاطی از محدوده آبخوان را که به لحاظ لیتولوژیکی نسبتاً مشابه هستند به صورت یک پهنه‌بندی تعریف و برای آن یک مقدار هدایت هیدرولیکی تعریف می‌شود. بر این اساس پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی بر مبنای اطلاعات حاصل از لوگ‌های حفاری و داده‌های آزمایشات لوفران و لوژان (شرکت آب منطقه ای تهران، معاونت مطالعات پایه منابع آب، ۱۳۸۰) و همچنین مطالعات میدانی شامل آزمایشات پمپاژ (مهندسی مشاور مهتاب قدس، ۱۳۷۶)، برای محدوده مورد مطالعه در مدل تعریف شدند (شکل ۵). بمنظور اجرای مدل در حالت پایدار از آمار ۴۵ چاه مشاهده‌ای دشت مربوط به سال ۱۳۸۳ بعنوان مبدا مدل‌سازی استفاده شد و مدل اجرا گردید (شکل ۱).



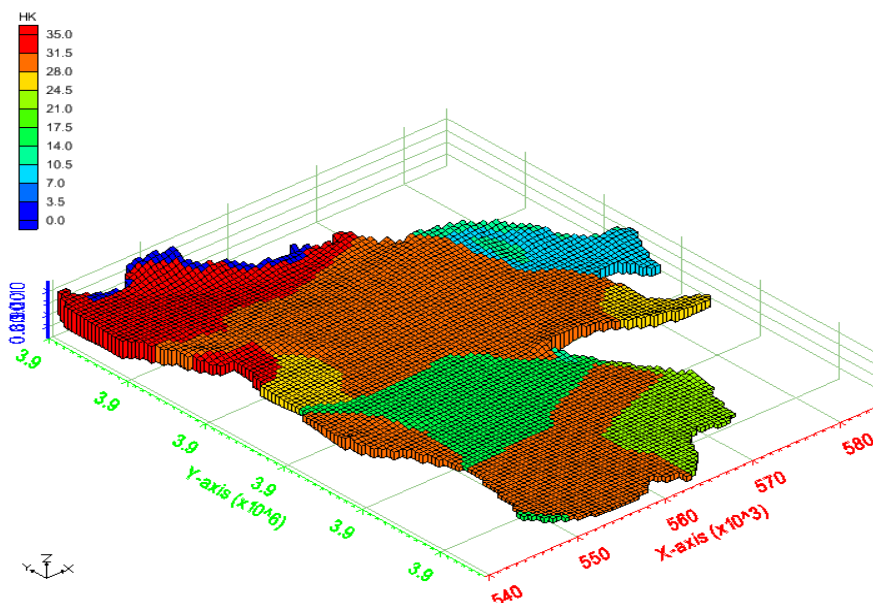
شکل ۲- شبکه بندی و تعیین سلول های فعال (سیاه) و غیرفعال (قرمز) آبخوان ورامین.



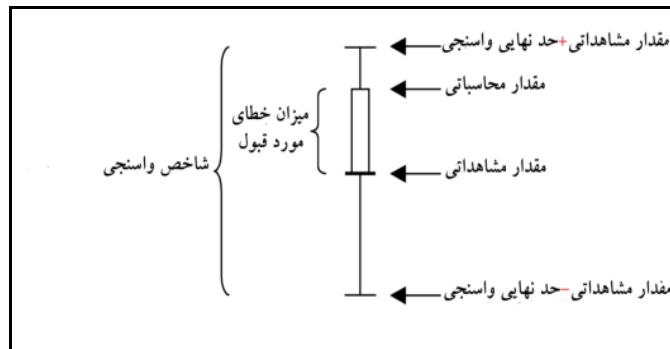
شکل ۳- توپوگرافی سطح بالایی (A) و زیرین (B) آبخوان ورامین.



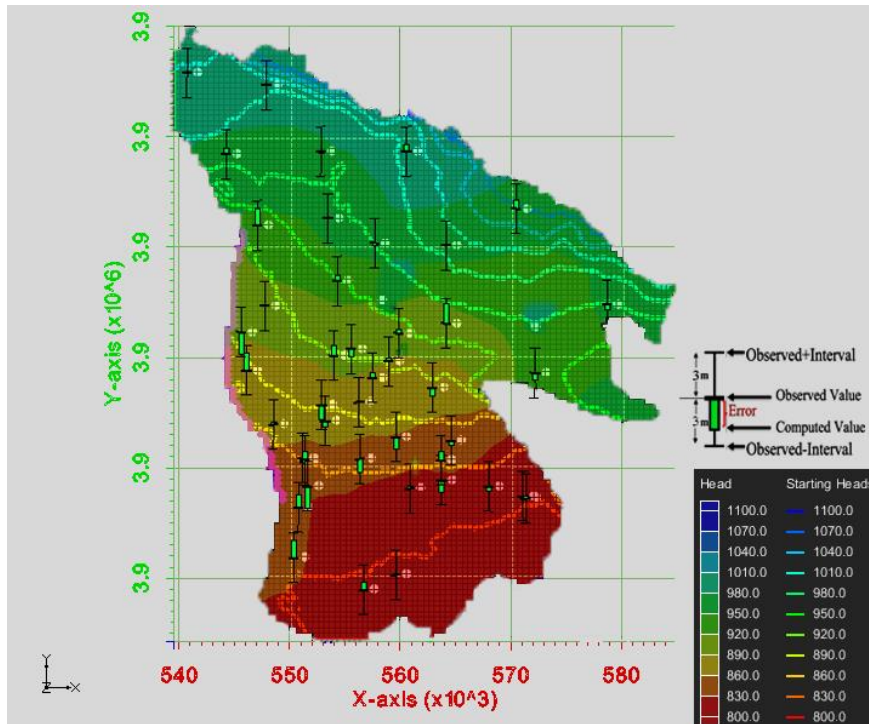
شکل ۴- مدل مفهومی آبخوان ورامین.



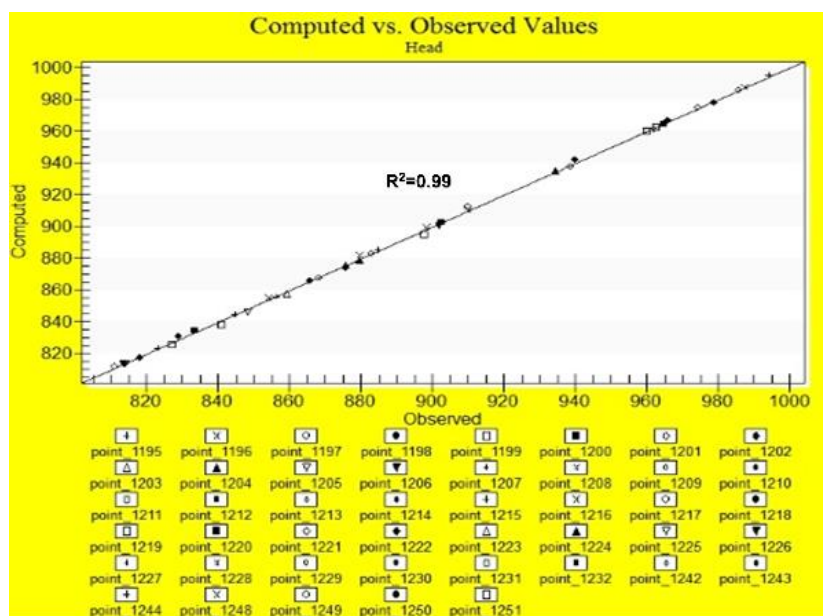
شکل ۵- نمای سه بعدی زون بندی آبخوان از نظر پارامتر هدایت هیدرولیکی.



شکل ۶- نمودار میله ای برای نمایش شاخص واسنجی در نرم افزار GMS.



شکل ۷- نمایی از سطح آب محاسبه شده توسط مدل پس از واسنجی در حالت پایدار (Head) و سطح آب مشاهداتی (Starting Heads).



شکل ۸- مقایسه بین سطح آب محاسبه شده توسط مدل و مقادیر مشاهده شده.

جدول ۲- مقادیر سطح آب محاسبه شده توسط مدل و مقادیر مشاهده شده.

شماره چاه	Observed Head	obs. Head interval	Computed Head	Residual Head	شماره چاه	obs. Head	obs. Head interval	Computed Head	Residual Head
point_1195	۸۲۳	۳	۸۲۳/۲۴۷	-۰/۲۴۷	point_1218	۸۲۹	۳	۸۳۰/۸۳۷	-۱/۸۳۷
point_1196	۸۹۸/۵	۳	۸۹۹/۵۵۷	-۱/۰۵۷	point_1219	۹۶۲/۵	۳	۹۶۲/۵۲۷	-۰/۰۲۷
point_1197	۸۶۸	۳	۸۶۷/۵۷۲	-۰/۴۲۸	point_1220	۹۶۴/۵	۳	۹۶۴/۴۶۲	-۰/۰۳۸
point_1198	۸۷۶	۳	۸۷۴/۰۳۹	۱/۹۶۱	point_1221	۹۶۲	۳	۹۶۱/۳۳۳	-۰/۶۶۷
point_1199	۸۲۷	۳	۸۲۵/۵۶۶	۱/۴۳۴	point_1222	۹۶۶	۳	۹۶۶/۸۵۷	-۰/۸۵۷
point_1200	۹۳۱	۳	۹۳۰/۹۸۷	-۰/۰۱۳	point_1223	۸۵۹	۳	۸۵۷/۶۶۷	۱/۳۳۳
point_1201	۸۸۳	۳	۸۸۳/۳۹۳	-۰/۳۹۳	point_1224	۸۷۹/۵	۳	۸۷۸/۵۳۷	-۰/۹۶۳
point_1202	۸۱۴	۳	۸۱۳/۷۶۴	-۰/۲۳۶	point_1225	۸۱۴	۳	۸۱۳/۸۴۴	-۰/۱۵۶
point_1203	۸۷۶	۳	۸۷۵/۸۴۳	-۰/۱۵۷	point_1226	۸۱۳/۵	۳	۸۱۳/۵۸۷	-۰/۰۸۷
point_1204	۹۳۴/۵	۳	۹۳۵/۱۹	-۰/۱۶۹	point_1227	۸۵۶	۳	۸۵۵/۷۲۹	-۰/۲۷۱
point_1205	۸۴۸	۳	۸۴۶/۴۴۵	۱/۵۵۵	point_1228	۸۵۴	۳	۸۵۴/۹۸۵	-۰/۹۸۵
point_1206	۹۰۱/۵	۳	۹۰۰/۷۶	-۰/۷۴	point_1229	۹۳۸/۵	۳	۹۳۷/۶۱۳	-۰/۸۸۷
point_1207	۸۸۵	۳	۸۸۵/۱۶۲	-۰/۱۶۲	point_1230	۸۶۵/۵	۳	۸۶۵/۹۴۵	-۰/۴۴۵
point_1208	۹۱۰	۳	۹۰۹/۹۷۶	-۰/۰۲۴	point_1231	۸۹۷/۵	۳	۸۹۴/۷۴۱	۲/۷۵۹
point_1209	۹۱۰	۳	۹۱۲/۴۸۷	-۲/۴۸۷	point_1232	۹۰۲	۳	۹۰۲/۷۷۹	-۰/۷۷۹
point_1210	۹۶۳	۳	۹۶۲/۸۰۱	-۰/۱۹۹	point_1242	۹۷۴	۳	۹۷۴/۶۶۲	-۰/۶۶۲
point_1211	۸۴۱	۳	۸۳۸/۱۴۸	۲/۸۵۲	point_1243	۹۷۸/۵	۳	۹۷۸/۳۳۸	-۰/۱۶۲
point_1212	۸۳۳/۵	۳	۸۳۴/۵۸۳	-۱/۰۸۳	point_1244	۹۹۴	۳	۹۹۴/۷۹۹	-۰/۷۹۹
point_1213	۸۱۱	۳	۸۱۱/۶۹	-۰/۶۹	point_1248	۹۸۷/۵	۳	۹۸۷/۵۶۸	-۰/۰۶۸
point_1214	۸۱۸	۳	۸۱۷/۲۷۱	-۰/۷۲۹	point_1249	۹۸۶	۳	۹۸۵/۷۴۴	-۰/۲۵۶
point_1215	۸۴۵	۳	۸۴۴/۲۰۸	-۰/۷۹۲	point_1250	۹۴۰	۳	۹۴۱/۷۹۴	-۱/۷۹۴
point_1216	۸۸۰	۳	۸۸۱/۸۲۹	-۱/۸۲۹	point_1251	۹۶۰	۳	۹۵۹/۹۴۸	-۰/۰۵۲
point_1217	۸۲۹	۳	۸۳۰/۵۱۵	-۱/۵۱۵	-	-	-	-	-

جدول ۳- بیلان محاسبه شده توسط مدل پس از واسنجی مدل.

بیلان		
اجزای بیلان	بیلان ورودی (m ³ /d)	بیلان خروجی (m ³ /d)
مرز با بار ثابت	۳۲۸/۱۹۹۱۹	۴۱۲/۱۶۹۰۲۰
چاه	۰	۳۲۸/۱۱۲۲۶۹۹
زهکش	۰	۰۳۶/۶۶۷۴
رودخانه	۸۵۲/۵۴۶۸۲۱	۲۶۱/۱۵۹۶۶۷
تغذیه	۶۹۹/۸۹۱۳۷۹	۰
مجموع	۸۸۰/۱۴۵۸۱۲۰	۰۳۸/۱۴۵۸۰۶۱
مجموع		
ورودی - خروجی	درصد اختلاف	
۸۴۱/۵۹	۰۰۴/۰	

مدل سازی انتقال

معادله دیفرانسیل جزئی توصیف کننده فرایند انتقال آلاینده‌ها در آب زیرزمینی در MT3DMS به صورت عددی حل می شود. فرم کلی این معادله بصورت زیر است (Brigham Young University, 2014):

رابطه (۲)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{v}_i C) + \frac{q_s C_s}{\theta} + \sum_{k=1}^N R_k$$

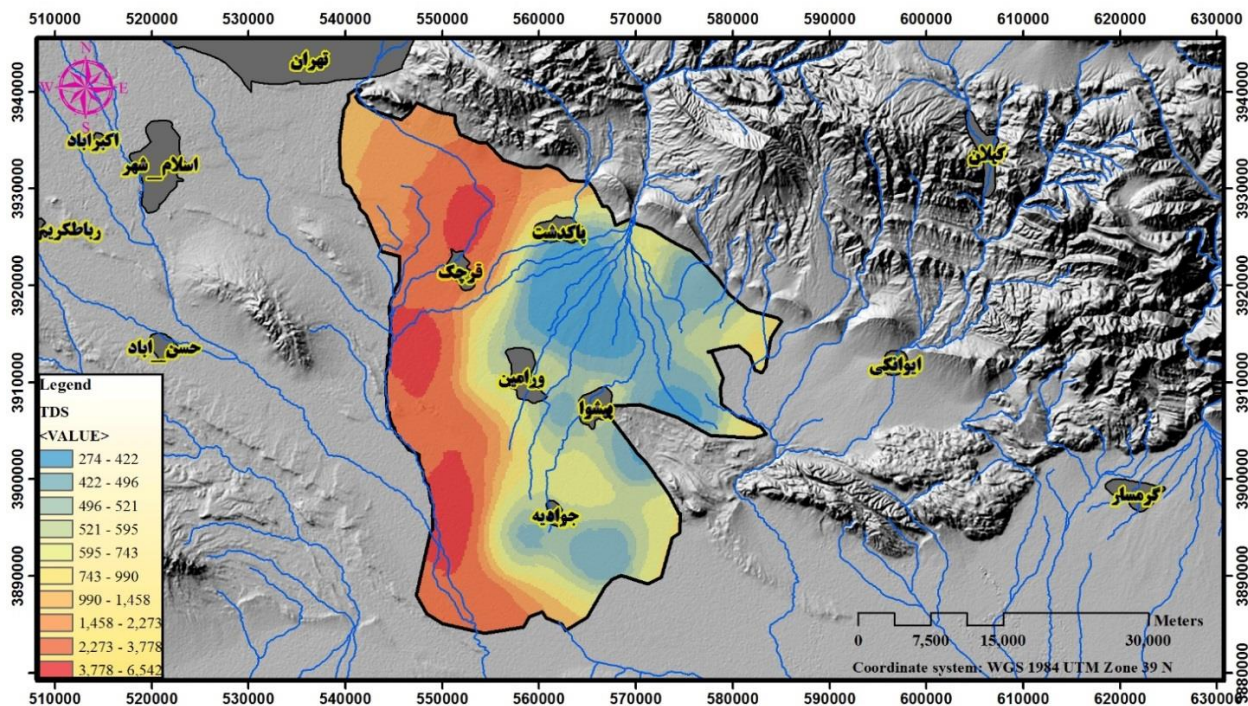
در رابطه بالا، C : غلظت آلاینده محلول در آب زیرزمینی، t : زمان، x_{ij} : فاصله از محور مختصات کارتیزین، q_s : شار حجمی آب در واحد حجم آبخوان که نشان دهنده تغذیه (با علامت مثبت) یا تخلیه (با علامت منفی) می باشد، D_{ij} : ضریب پراکنش هیدرودینامیکی، \bar{v}_i : سرعت متوسط آب زیرزمینی، C_s : غلظت آلاینده در منبع تغذیه یا تخلیه، θ : تخلخل مفید آبخوان، $\sum_{k=1}^N R_k$ ترم واکنش‌های شیمیایی (Fetter, 2001).

بر مبنای معادله بالا که به نام معادله انتقال جرم آلاینده شناخته می شود، باید هر یک از پارامترهای مورد نیاز با توجه به مدل جریان تولید شده، جداول استاندارد و همچنین آزمایشات صحرائی، وارد بسته‌های نرم‌افزاری مرتبط با مدل MT3DMS گردند تا مدل اجرا شود. بر همین مبنا در بسته نرم افزاری porosity، میزان تخلخل مفید در آبخوان از روی جداول استاندارد (Sun, 1994) و شرایط آبخوان، ۰/۱۵ در نظر گرفته شد. در بسته نرم افزاری Advection از روش ULTIMATE یا Third order TVD scheme استفاده شد. این روش، جدیدترین روشی است که در MT3DMS وجود دارد و در آن روش‌های وزن‌دهی و الگوریتم ردیابی ذرات (شامل الگوریتم اویلر مرتبه اول، الگوریتم رانگ-کوتا مرتبه چهارم و یا ترکیبی از دو الگوریتم) به طور خودکار تعیین می‌گردد (نظری و جودوی، ۱۳۹۳). در بسته نرم‌افزاری dispersion مواردی که باید مد نظر قرار گیرند عبارتند از: ۱-TRPT: نسبت پراکنش افقی به پراکنش طولی ۲-TRPV: نسبت پراکنش عمودی به پراکنش طولی ۳-DMCOEF: ضریب انتشار مولکولی. میزان هر یک از این پارامترها نیز بر اساس جداول استاندارد (Sun, 1994) به ترتیب برای TRPT معادل ۰/۲، برای TRPV معادل ۰/۰۲ و برای DMCOEF معادل صفر در نظر گرفته شد. ترم تغذیه/تخلیه (q_s/C_s) در معادله انتقال جرم آلاینده، نشان دهنده جرم آلاینده اضافه یا خارج شده به محدوده مدل از طریق منابع تغذیه و تخلیه می باشد (Zheng and Wang, 1999). در محدوده مورد مطالعه Recharge حاصل از نفوذ سطحی بارش و تبخیر و تعرق، چاه‌های بهره‌برداری و رودخانه جاجرود بعنوان منابع تخلیه و تغذیه وارد بسته نرم‌افزاری Source/Sink Mixing شده و به مدل معرفی گردیدند. تعریف شرایط اولیه برای حل معادله حاکم بر فرایند انتقال جرم ضروری است. شرایط اولیه عمومی به فرم رابطه (۳) است:

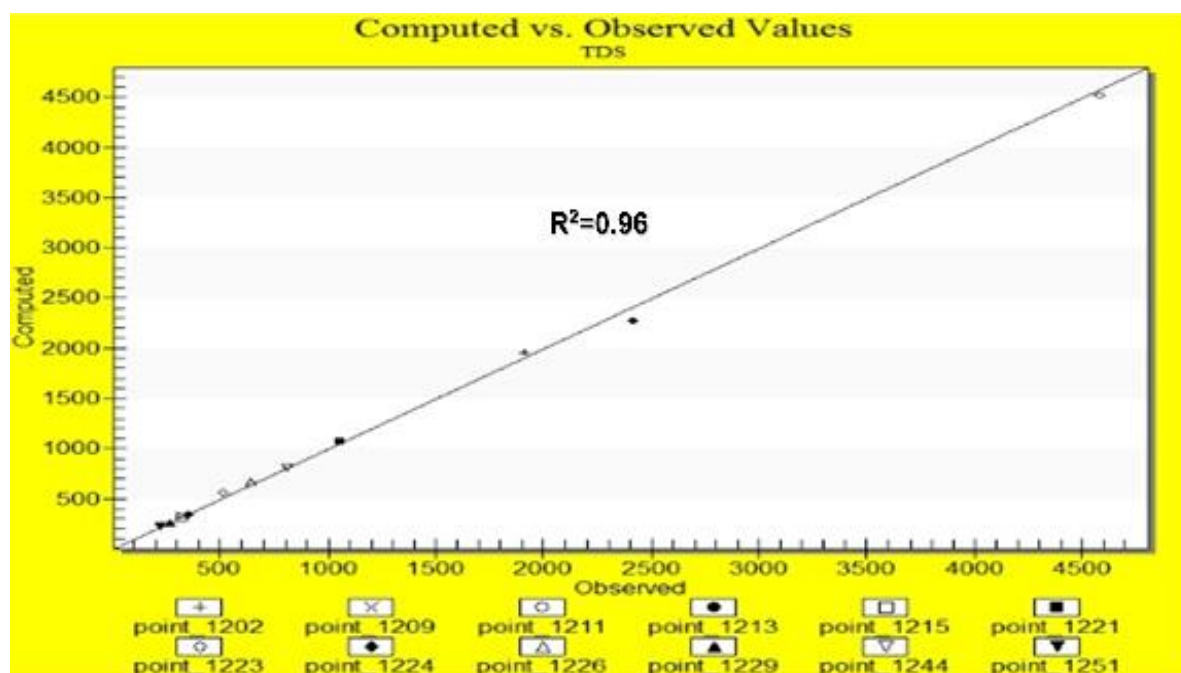
$$C(x, y, z, t) = C_0(x, y, z) \text{ on } \Omega; t = 0 \quad \text{رابطه ۳:}$$

در رابط بالا، $C_0(x, y, z)$ توزیع غلظت و Ω محدوده مدل کیفی است. مدل بر مبنای رابطه بالا، میزان غلظت اولیه را برای محدوده مورد نظر در نظر می گیرد. بر همین اساس جهت تخصیص میزان غلظت اولیه در محدوده مورد مطالعه و بر مبنای آمار جمع‌آوری شده، غلظت TDS مربوط به پاییز

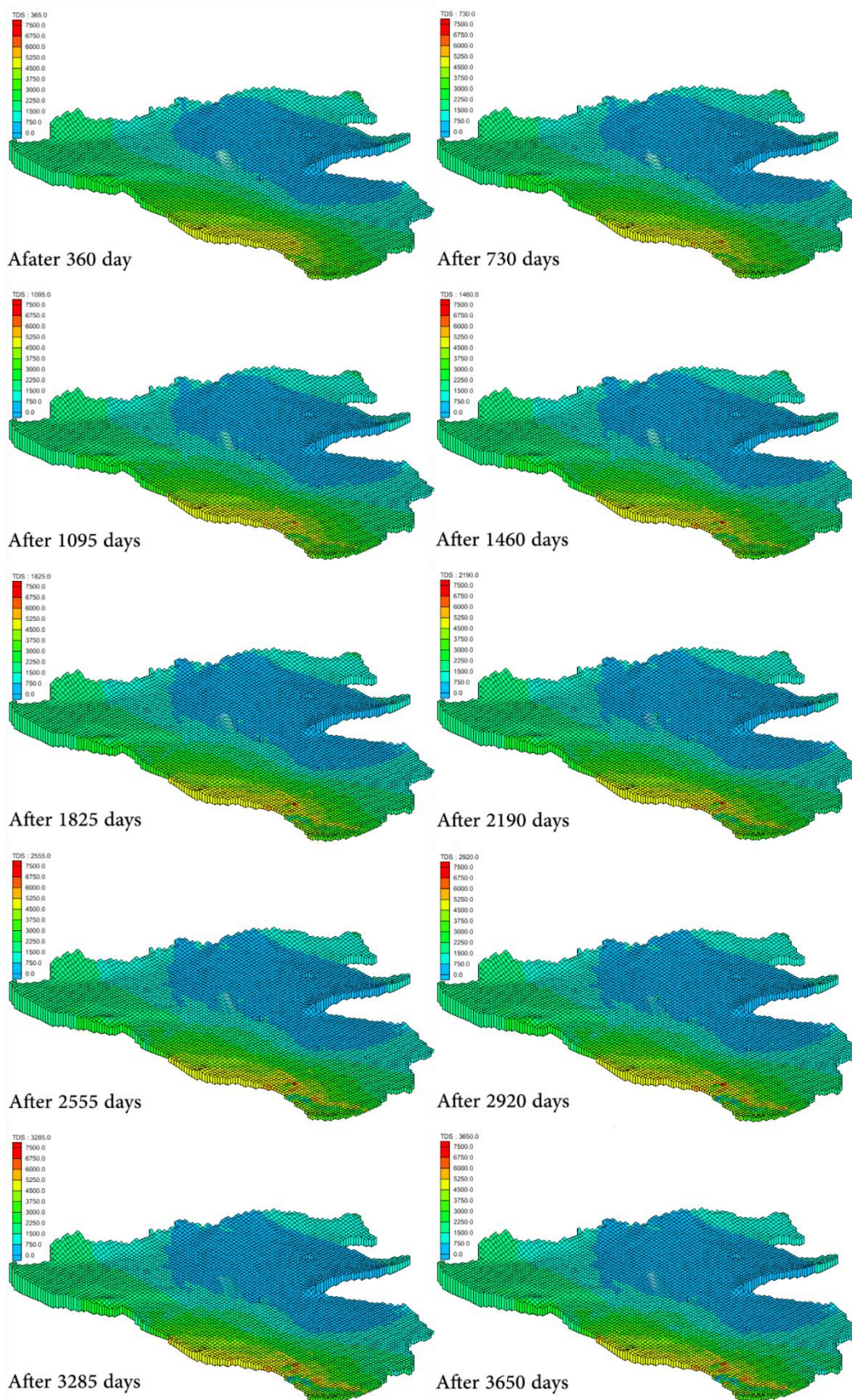
سال ۱۳۸۳ بصورت درون‌یابی شده (شکل ۹) در بسته نرم‌افزاری Starting Concentrations به مدل وارد گردید. همانطور که مشاهده می‌گردد در مناطق غربی و جنوبی (به سمت خروجی آبخوان)، میزان TDS از سایر مناطق بیشتر است که افزایش املاح آب در بخشی از این نواحی به علت بالا بودن سطح آب زیرزمینی و تبخیر از سطح ایستابی منطقه می‌باشد و عامل اصلی کیفیت نامطلوب آب مربوط به رودخانه شور و فاضلاب پایانه تهران است (مختاری و اسپهبد، ۱۳۸۸). همچنین ورود فاضلاب صنعتی از کارخانجات شهرک صنعتی چرمشهر در این مناطق را نیز می‌توان بعنوان دیگر عامل افزایش میزان TDS آب زیرزمینی در نظر گرفت. پس از اجرای مدل، واسنجی مدل در ۱۰ دوره یکساله بر اساس ایجاد تغییر در پارامترهای TRPV، TRPT و porosity انجام گردید (اشکال ۱۰ و ۱۱). یکی از مراحل مدل جهت استفاده و قابلیت اطمینان داده‌ها صحت‌سنجی می باشد که تطبیق مدل را با واقعیت بررسی می‌کند. هدف از انجام این مرحله بدست آوردن اعتماد بیشتر به نتایج مدل و کارایی آن می‌باشد. تطبیق مدل با واقعیت نیاز به بررسی بیشتر نسبت به زمان دارد. تحلیل صحت‌سنجی یکی از عملیات مهم مدل‌سازی قبل از پیش‌بینی می‌باشد که باعث دقت بالا در پیش‌بینی در مدل‌سازی می‌شود (کردان مقدم و بنی حبیب، ۱۳۹۶). در این تحقیق جمعاً ۴ سال به عنوان دوره صحت‌سنجی انتخاب شد که بصورت ۴ دوره تنش ۳۶۵ روزه انجام گرفت (شکل ۱۲). به منظور پیش‌بینی غلظت TDS در سال‌های آینده و تعیین نقاط بحرانی آبخوان، مدل برای یک دوره به مدت ۶ سال با دوره تنش ۳۶۵ روزه (شکل ۱۲) اجرا گردید (با فرض اینکه شرایط هیدرولیکی در آبخوان تغییر قابل ملاحظه‌ای نخواهد داشت). نتایج مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات غلظت TDS در آبخوان ورامین نشان‌دهنده افزایش میزان غلظت TDS در نواحی غربی و بخصوص جنوب غربی آبخوان در طی ۲۰ سال آینده از مبدا مدل‌سازی (سال ۱۳۸۳) از حدود ۴۵۰۰ به حدود ۷۰۰۰ میلی گرم در لیتر می باشد (شکل ۱۲) که رسیدن غلظت TDS به حد بحرانی در مناطق ذکر شده با نتایج مطالعه رنگزن و همکاران (۱۳۸۷) که به بررسی آسیب‌پذیری آبخوان ورامین نسبت به آلاینده‌ها با استفاده از روش دراستیک پرداختند، مطابقت دارد. در تحقیق آنها نیز مناطق غربی و جنوب غربی آبخوان حائز بالاترین حساسیت به آلودگی گردیدند. همچنین نتایج این مطالعه در خصوص پیش‌بینی بحرانی شدن غلظت TDS در مناطق غربی و جنوب غربی آبخوان بوسیله نتایج مطالعه مختاری و اسپهبد (۱۳۸۸) نیز تأیید می‌گردد. طبق بررسی آنها نیز حاشیه غربی و جنوب غربی آبخوان که تحت تأثیر رودخانه شور و فاضلاب تهران قرار دارد، صرف نظر از آلودگی آب، املاح زیادی را به آبخوان وارد نند. نخعی و همکاران (۱۳۹۲) و ملکیان و همکاران (۱۳۹۵) نیز در تحقیقات جداگانه‌ای کیفیت نامناسب آب در مناطق غربی و جنوب غربی آبخوان را تأیید و علت آنرا وجود پهنه‌های رسی نمکی با سولفات سدیم در این مناطق و ضخامت کم آبخوان در این قسمت ذکر نمودند. در مناطق مرکزی و شمالی آبخوان اما خودپالایی آبخوان به وضوح در نتایج مدل‌سازی نمایان است به نحوی که در این مناطق غلظت TDS از حدود ۳۴۵ الی ۴۵۰ در شروع مدل‌سازی (سال ۱۳۸۳) به حدود ۱۶۰ الی ۲۶۰ میلی‌گرم بر لیتر در انتهای بازه پیش‌بینی (سال ۱۴۰۳) کاهش یافته که این نتایج منطبق با مناطق با حساسیت کم آبخوان ورامین در تحقیق رنگزن و همکاران (۱۳۸۷) می‌باشد.



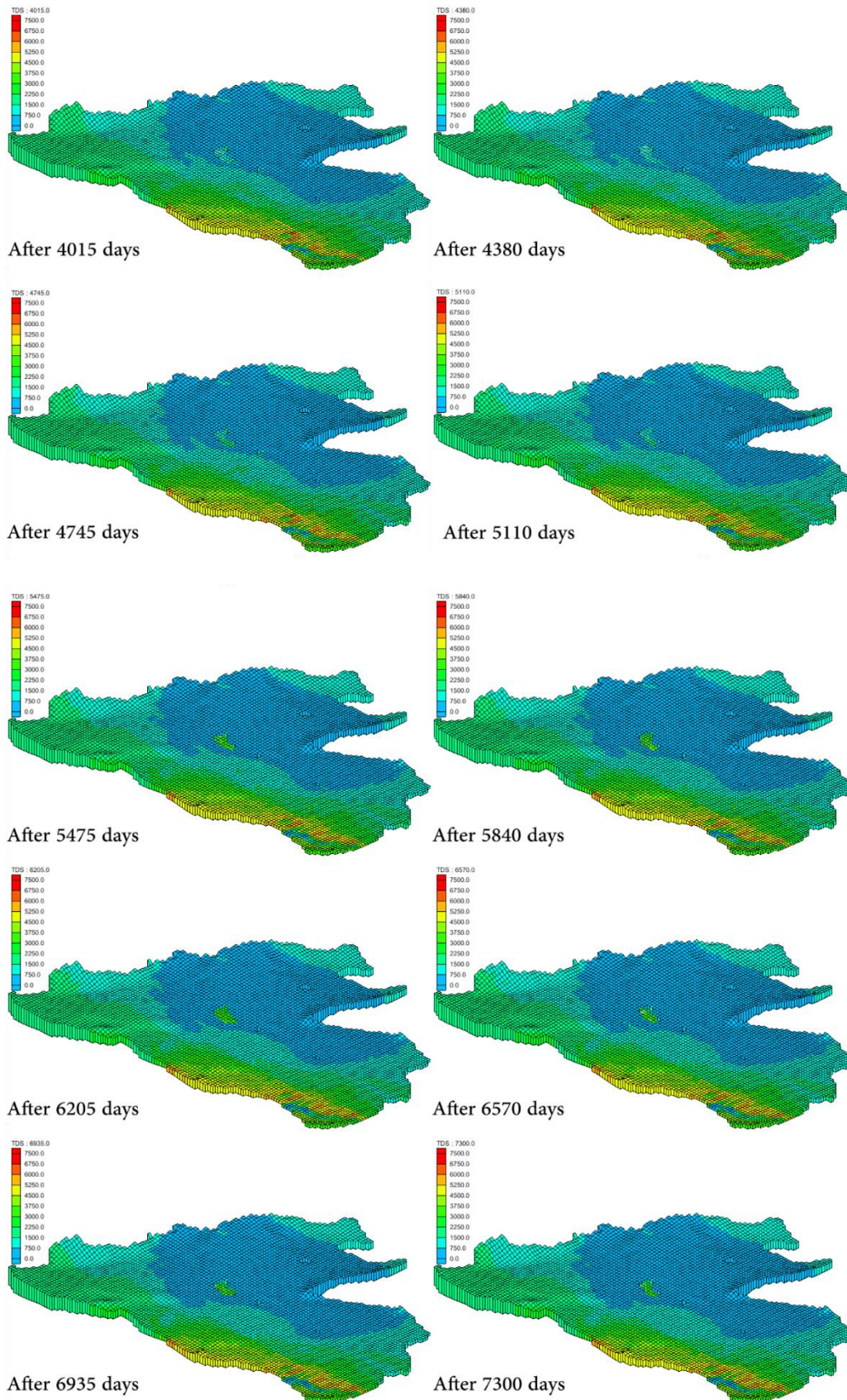
شکل ۹- غلظت اولیه TDS.



شکل ۱۰- مقایسه بین غلظت محاسبه شده توسط مدل و غلظت مشاهده شده.



شکل ۱۱- تغییرات غلظت TDS در بازه واسنجی (پس از ۳۶۵۰، ۳۶۵۰، ۲۹۲۰، ۲۵۵۵، ۲۱۹۰، ۱۸۲۵، ۱۴۶۰، ۱۰۹۵، ۷۳۰، ۳۶۵ روز).



شکل ۱۲- تغییرات غلظت TDS در بازه صحت سنجی (پس از ۴۰۱۵، ۴۳۸۰، ۴۷۴۵، ۵۱۱۰ روز) و پیش بینی (پس از ۵۴۷۵، ۵۸۴۰، ۶۲۰۵، ۶۵۷۰، ۶۹۳۵، ۷۳۰۰ روز).

نتیجه گیری

از منابع آب در این مناطق هیچگونه اثر سوئی بر کیفیت آب زیرزمینی نخواهد داشت بلکه خودپالایی آبخوان سبب کاهش غلظت TDS خواهد شد. این در حالیست که غلظت TDS در مناطق غربی و جنوب غربی آبخوان با توجه به تخلیه فاضلاب تهران به این مناطق، پائین بودن سطح آب و ضخامت کم آبخوان و همچنین مجاورت با رودخانه شور از طرفی و همچنین وجود شهرک صنعتی چرمشهر که کارخانجات صنعتی آن اغلب فاقد تصفیه خانه خروجی هستند، با روند افزایشی مواجه خواهد شد و به حد بحرانی خواهد رسید.

در این تحقیق مدل سازی جریان بعنوان مقدمه و پیش نیاز مدل سازی انتقال از مبدا سال ۱۳۸۳ در حالت پایدار اجرا گردید. واسنجی مدل جریان با دقت بسیار بالا ($R^2=0/99$) انجام شد تا مدل انتقال برای دوره ۱۳۹۲-۱۳۸۳ کالیبره و برای دوره ۱۳۹۷-۱۳۹۲ صحت سنجی گردد که مقایسه مقادیر غلظت محاسباتی و مشاهداتی، دقت بسیار مناسب مدل را با میزان $R^2=0/96$ نشان داد. در ادامه برای دوره ۱۴۰۳-۱۳۹۷ پیش بینی غلظت TDS در آبخوان ورامین انجام گردید. بر مبنای نتایج بدست آمده مناطق مرکزی و شمالی آبخوان از نظر غلظت TDS در وضعیت مطلوبی قرار دارند و نه تنها بهره برداری

منابع

- احتشامی، م.، شریفی، ع.، ۱۳۸۵. ارزیابی مدل کیفی آبخوان شهر ری، مجله علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره ۸، شماره ۴، ص ۱۰-۱.
- حکمت پور، م.، فیض نیا، س.، احمدی، ح.، خلیل پور، ا.، ۱۳۸۶، پهنه بندی مناطق مناسب برای تغذیه مصنوعی در دشت ورامین به کمک GIS و سامانه پشتیبانی تصمیم گیری DSS، مجله محیط شناسی، سال سی و سوم، شماره ۴۲، ص ۸-۱.
- رنگزن، ک.، ضیائیان فیروز آبادی، پ.، میرزایی، ل.، علیجانی، ف.، ۱۳۸۷، پهنه بندی آسیب پذیری آبخوان دشت ورامین با استفاده از DRATIC و ارزیابی تجربی اثر منطقه غیر اشباع در محیط GIS، فصلنامه زمین شناسی ایران، سال دوم، شماره ۶، ص ۳۲-۲۱.
- رهنما، م.ب.، زمزم، ع.، ۱۳۹۱، بررسی کیفیت آب زیرزمینی با مدل ریاضی MT3D (مطالعه موردی دشت رفسنجان)، مجله پژوهش آب ایران، سال ششم، شماره ۱۰، ص ۲۰۳-۲۰۷.
- شرکت آب منطقه ای تهران، معاونت مطالعات پایه منابع آب، ۱۳۸۰، آمار چاه های اکتشافی، پیژمتری و آمار تغییرات سطح آب چاه های مشاهده ای دشت ورامین. صادقی، ا.، فنودی، م.، داوری، م.، نوروزی، م.، و کیلی، ف.، کیهانی، ا.، ۱۳۸۵، نقشه یکصد هزارم زمین شناسی ورامین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور. کاردان مقدم، ح.، بنی حبیب، م.ا.، ۱۳۹۶، بررسی اثرات زیست محیطی هجوم جبهه های آب شور به آبخوان های کویری (مطالعه موردی: استان خراسان جنوبی - آبخوان سرایان)، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۳۰، شماره ۳، ص ۶۸۸-۶۷۳.
- مختاری، ح.، ۱۳۸۶، بررسی پارامترهای هیدرودینامیکی پتانسیل های آبی دشت ورامین (فن ورامین) با توجه به تغییرات گرادیان شوری، پایان نامه کارشناسی ارشد رشته زمین شناسی، گرایش آبشناسی، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، ۲۰۰ص.
- مختاری، ح.، اسپهبد، م.، ۱۳۸۸، بررسی پارامترهای هیدرودینامیکی پتانسیل های آبی دشت ورامین با توجه به تغییرات گرادیان شوری، فصلنامه زمین، سال چهارم، شماره ۲، ص ۴۷-۲۷.
- ملکیان، ا.، زرنندی، ی.، خلیقی سیگارودی، ش.، فرخ زاده، ب.، ۱۳۹۵، بررسی تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از رویکرد ترکیبی منطق بول، فازی و زمین (آمار) مطالعه موردی: دشت ورامین، نشریه زراعت (پژوهش و سازندگی)، دوره ۲۹، شماره ۱، ص ۱۳۵-۱۲۶.
- مهندسین مشاور مهتاب قدس، ۱۳۷۶، گزارش مطالعات آب های زیرزمینی دشت ورامین.
- نخعی، م.، تلخابی، م.، ودیعی، م.، ۱۳۹۵، برترین روش خوشه بندی C- میانگین فازی در بیان توزیع رخساره های هیدروشیمی آب زیرزمینی دشت ورامین، فصلنامه زمین شناسی ایران، سال دهم، شماره ۳۸، ص ۸۲-۷۱.
- نخعی، م.، ودیعی، م.، اسمعیلی فلک، م.، ۱۳۹۲، پهنه بندی کیفی آب زیرزمین دشت ورامین از نظر کشاورزی به روش تحلیل سلسله مراتبی در محیط GIS، تحقیقات منابع آب ایران، سال نهم، شماره ۳، ص ۹۸-۹۴.
- نجاتی جهرمی، ز.، ناصری، ح.، نخعی، م.، علیجانی، ف.، ۱۳۹۶، ارزیابی کیفیت منابع آب زیرزمینی آبخوان ورامین از نظر قابلیت شرب: آلودگی با فلزات سنگین، مجله سلامت و محیط زیست، دوره ۱۰، شماره ۴، ص ۵۷۲-۵۵۹.
- نظری، ر.، جودوی، ع.، ۱۳۹۳، مدل سازی کاربردی جریان و انتقال در آبخوان، انتشارات آفتاب عالمتاب، مشهد، ۲۴۰ ص.
- Abu-El-Sha'r. W., Hatamleh. R.I., 2007, Using Modflow and MT3D groundwater flow and transport models as a management tool for the Azraq groundwater system, Jordan Journal of Civil Engineering, Vol: 1, No: 2, p: 153-172
- Almasri. M.N., Kaluarachchi. J.J., 2007, Modeling nitrate contamination of groundwater in agricultural watersheds, Journal of hydrology, Vol: 343, p: 211-229
- Anderson. M.P., Woessner. W.W., 1992, Applied groundwater modeling: Simulation of flow and advective transport. San Diego, California: Academic press, 391 p.
- ASTM. 1996, Standard guide for sub-surface flow and transport modeling, code D6033. American society for testing and materials.
- Brigham Young University. 2014, GMS10 Tutorials. Environmental modeling research laboratory. <https://www.aquaveo.com/software/gms-learning-tutorials>
- Christian. D.L., Weixing. G., 2006, MODFLOW/MT3DMS-based simulation of variable groundwater flow and transport, National ground water qssociation, Vol: 44, p: 339-351
- Don. N.C., Araki. H., Yamanishi. H. Koga. K., 2005, Simulation of groundwater flow and environmental effects resulting from pumping, Environmental Geology, Vol: 47, p: 361-374

- Fetter. C.W., 2001, Applied Hydrogeology, Fourth edition prentice hall, Upper Saddle River, New Jersey, 598 p.
- Harden. A., 2000, Brazos G regional water planning area, Carrizo-Wilcox ground water flow model and simulations results. Associates Inc.
- Hill. M. C., Middlemis. H., Hulme. P., Poeter. E., Riegger. J., Neuman. S. P., Williams. H., Anderson. M., 2004, Brief overview of selected groundwater modeling guidelines. In Kovar, K., and Hrkal, Z., (eds.) Finite-element models, MODFLOW, and more 2004– solving ground water problems, proceedings, September 13-16, 2004, Karlovy Vary, Czech Republic, p. 105-120.
- Kheirkhah Zarkesh. M., Mohebbi Tafreshi. A., Kolahchi. A.A., Abbasi. A.A., Majidi. A.R, Mohebbi Tafreshi. G., 2012, Exploitation management of underground dams by using mathematical models of finite difference in GMS7.1 (The case study of Sanganeh underground dam-Iran), Journal of Basic and Applied Scientific Research, Vol: 2, No: 7, p: 6376-6384
- Lautz. L., Siegel. D., 2005, Modeling surface and groundwater mixing in the hypoheric zone using MODFLOW and MT3D, Journal of Advances in Water Resources, Vol: 29, No: 11, p: 1618-1633
- Mahmoudi. N., Nakhaei. M., Porhemmat. j., 2017, Assessment of hydrogeochemistry and contamination of Varamin deep aquifer, Tehran Province, Iran, Environmental Earth Sciences, Vol: 76, No: 370, p: 1-14
- Mahmoudi. N., Nakhaei. M., Porhemmat. j., 2018, Assessment of an arid region soil capacity on natural attenuation of municipal treated wastewater: a column experiment using soil of Varamin area, Iran, Environmental Earth Sciences, Vol: 77, No: 140, p: 1-14
- Mohammadi. Z. Askari. R. Vesali. Z. Keshavarz. F., 2015, An evaluation of groundwater quality with MT3DMS Model: A case study of Arsanjan plain and its environs, Fars province, Iran, International Bulletin of Water Resources & Development, Vol: 3, No: 1, p: 191-198
- Morway. E.D., Niswonger. R.G., Langevin. C.D., Bailey. R.T., Healy. R.W., 2013, Modeling variably saturated subsurface solute transport with MODFLOW-UZF and MT3DMS, Journal of Groundwater, Vol: 51, No: 2, p: 237–251
- Prommer. H., Barry. D.A., Zheng. C., 2003, MODFLOW/MT3DMS-based reactive multicomponent transport modeling, Journal of Groundwater, Vol: 41, No: 2, p: 247–257
- Sun. N.Z., 1994, Inverse problem in ground water modelling. Published by: Kluwer Academic, Netherland, 338 p.
- Wang. H.F., Anderson. M.P., 1982, Introduction to ground water modelling finite difference and finite-element methods. W.M. freeman, 256 p.
- Zheng. C., Wang. P.P., 1999, MT3DMS: A modular three-dimensional multi-species transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reactions of contaminants in groundwater systems; Documentation and user's guide, University of Alabam.