



تحقیقات آب و خاک ایران | دوره ۵۳ | شماره ۱ | فروردین ۱۴۰۱ (ص ۳۱-۱۵)

<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2022.323930.668975>

(مقاله علمی - پژوهشی)

Comparison of the SINTACS Aquifer Vulnerability Model to Nitrate with Three-Dimensional Numerical Model (Case Study of Varamin Plain Aquifer)

AREZOO NOGHREYAN¹, JAMAL MOHAMADVALI SAMANI¹, MEHDI MAZAHERI^{1*}

1. Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
(Received: May. 17, 2021- Revised: Dec. 26, 2021- Accepted: Jan. 30, 2022)

ABSTRACT

Groundwater in arid regions such as Iran plays a very large role in drinking water supply and agriculture. One of the threats to the future of groundwater exploitation, could be the contamination of these resources by harmful substances. At present, about 60% of the water consumption of Varamin plain region and the total volume of water consumption in the drinking sector is provided from groundwater sources. One of the best ways to prevent groundwater pollution is to identify vulnerable aquifer areas. The SINTACS model has been used to assess the vulnerability of the Varamin plain aquifer. This method consists of seven parameters that after combining the parameters, the vulnerability index map is obtained. The index of this method varies between 92 and 168. Results show that the north of the plain is very vulnerable and vulnerability is low in the south-eastern parts of Jalilabad village and downstream areas of the plain, while the rest of the plain has moderate vulnerability. A three-dimensional numerical model was used to evaluate the results of the model and the model was validated for a period of one year. The accuracy of the constructed model was evaluated as appropriate. In this model, nitrate contaminant was considered as an aquifer contaminant. In order to validate the inherent and special vulnerability of the SINTACS model, the nitrate output of the model was used, The correlation square of the results was about 65%, which shows a good agreement between the two models even though the numerical model is considered as micro- model compared to SINTACS one. Considering the role of the aquifer of Varamin plain in supplying the required water of the region, the quantitative and qualitative protection of this aquifer is a necessary and strongly recommended. Also, in order to reduce the nitrate ion concentration in the study area, long-term solutions such as improving the agricultural structure and cultivation pattern of the area and constructing a collection network and wastewater treatment plant are proposed.

Keywords: Nitrate, Vulnerability, Groundwater, Evaluation, 3D Numerical Model.

مقایسه مدل ارزیابی آسیب پذیری آبخوان (سینتکس) به نیترات با مدل عددی سه بعدی (مورد مطالعاتی آبخوان دشت ورامین)

آرزو نقریان^۱، جمال محمد ولی سامانی^۱، مهدی مظاهری^{۱*}

۱- گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۲/۲۷ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۰/۵ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱۱/۱۰)

چکیده

آب‌های زیرزمینی در مناطق خشکی همچون ایران، سهم بسیار زیادی در تأمین آب آشامیدنی و کشاورزی دارند. یکی از خطرهایی که آینده بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی را تهدید می‌کند، آلودگی این منابع توسط مواد زیان‌آور است. در حال حاضر حدود ۶۰ درصد از مصارف آب منطقه دشت ورامین و کل حجم آب مصرفی در بخش شرب از منابع زیرزمینی تأمین می‌گردد. یکی از راه‌های مناسب جهت جلوگیری از آلودگی آب‌های زیرزمینی شناسایی مناطق آسیب‌پذیر آبخوان است که از مدل SINTACS برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت ورامین استفاده شده است. این روش از هفت پارامتر تشکیل شده که پس از ترکیب پارامترها، نقشه شاخص آسیب‌پذیری به دست می‌آید. شاخص این روش بین ۹۲ تا ۱۶۸ متغیر می‌باشد که در رسوبات جاجرود واقع در شمال دشت آسیب‌پذیری زیاد و در اراضی جنوب شرقی روستای جلیل‌آباد در شرق دشت و اراضی پایاب دشت آسیب‌پذیری کم و مابقی دشت دارای آسیب‌پذیری متوسط می‌باشد. برای ارزیابی نتایج مدل مذکور از مدل عددی سه بعدی استفاده شد و مدل برای یک دوره یک‌ساله اعتبارسنجی شد که دقت مدل ساخته شده مناسب ارزیابی گردید. در این مدل آلاینده نیترات به‌عنوان عامل آلوده‌کننده آبخوان در نظر گرفته شد. به‌منظور صحت‌سنجی آسیب‌پذیری ذاتی و ویژه مدل SINTACS، از خروجی نیترات مدل استفاده گردید، مقدار مجذور همبستگی نتایج حدود ۶۵ درصد به دست آمد که همبستگی خوبی را نشان می‌دهد. باتوجه به اهمیت نقش آبخوان دشت ورامین در تأمین آب موردنیاز منطقه، حفاظت کمی و کیفی این آبخوان از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. همچنین جهت کاهش غلظت یون نیترات منطقه مورد مطالعه راهکارهای درازمدت از جمله اصلاح ساختار کشاورزی و الگوی کشت منطقه و احداث شبکه جمع‌آوری و تصفیه‌خانه فاضلاب پیشنهاد می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: نیترات، آسیب‌پذیری، آب زیرزمینی، ارزیابی، مدل عددی سه بعدی.

مقدمه

امروزه در مناطق خشک و نیمه‌خشک دنیا که با کمبود منابع آب سطحی مواجه می‌باشند، منابع آب زیرزمینی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. از طرف دیگر توسعه روزافزون جوامع بشری و گسترش فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی سهم عمده‌ای در آلودگی محیط‌زیست به‌خصوص در بخش آب دارد (Rahman, 2008). در این بین آبخوان‌های محصور نشده و نفوذپذیر پتانسیل بالایی جهت آسیب‌پذیری دارند، از این‌رو حفاظت کیفی آب‌های زیرزمینی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Javadi et al., 2011). از اقدامات اولیه جهت کنترل کیفی منابع آب زیرزمینی تعیین پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان است.

یکی از راه‌های مناسب جهت جلوگیری از آلودگی آب‌های زیرزمینی ارزیابی و شناسایی مناطقی است که استعداد آسیب‌پذیری را دارند و با شناخت پهنه‌های آسیب‌پذیر می‌توان

وضعیت کاربری اراضی را طوری تعیین نمود که آبخوان تاحدامکان از آلودگی مصون بماند. (Shahrokhniya., 2009). آسیب‌پذیری نوعی خصوصیت نسبی، بدون بعد و غیرقابل اندازه‌گیری است و به ویژگی‌های آبخوان، زمین‌شناسی محیط و هیدروژئولوژی آن بستگی دارد (Antonakos et al., 2007). در میان روش‌های مختلفی که برای ارزیابی آسیب‌پذیری به کار می‌رود، SINTACS، DRASTIC، GODS و AVI روش‌های شناخته‌شده و مناسب برای آبخوان‌ها در محیط‌های رسوبی هستند (Van Stempvoort et al., 1993). روش SINTACS شامل روش DRASTIC اصلاح‌شده می‌باشد که فرآیند وزن و رتبه دهی مؤلفه‌ها در این روش انعطاف‌پذیری بیشتری دارد. (Jani et al., 2015).

از طرفی به دلیل پیچیدگی‌های موجود در طبیعت سیستم آب‌های زیرزمینی، شبیه‌سازی آن‌ها به‌مراتب مشکل‌تر از آب‌های

این نتیجه رسید که مدل DRASTIC به علت استفاده از پارامترهای بیشتر از دقت بالاتری برخوردار می‌باشد (Shahrokhniya., 2009).

در ارزیابی که در سال ۱۳۸۹ پیرامون بررسی آسیب پذیری آبخوان دشت بهبهان با استفاده از GIS، DRASTIC و SINTACS انجام شد؛ نتیجه گرفتند که پارامتر عمق تا سطح ایستابی مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر آسیب پذیری آبخوان دشت بهبهان بوده است (Bagherzade et al., 2010). در پژوهشی آسیب پذیری آبخوان دشت ملایر با استفاده از مدل‌های SINTACS و SI و DRASTIC مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد روش SINTACS با ضریب همبستگی ۰/۷۸ و روش SI اصلاحی با ضریب همبستگی ۰/۷۳ می‌تواند به‌عنوان روش ارزیابی آسیب پذیری منطقه قرار بگیرد (Marofi et al., 2012).

در پژوهشی مدیریت کاربری اراضی دشت خویس، با استفاده از مدل DRASTIC و SINTACS آسیب پذیری آبخوان مورد ارزیابی قرار گرفت که میزان همبستگی نقشه هم نیترا ت آب زیرزمینی با مدل DRASTIC و SINTACS به ترتیب ۴۰ و ۸۰ درصد بود (Moosavi et al., 2016). در سال ۲۰۱۵ در مقاله‌ای تحت عنوان ارزیابی آسیب پذیری آب‌های زیرزمینی با استفاده از مدل SINTACS و روش‌های سنجش‌ازدور و GIS دیندیگال بلوک در هند مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد نقشه آسیب پذیری ذاتی ناحیه مطالعه شده در مدل SINTACS مشابه مدل DRASTIC است، با این تفاوت که مدل SINTACS از نظر ویژگی‌های وزن‌دهی منحصر به فرد است (Jani et al., 2015). محققان به منظور بررسی آلودگی نیترا ت و آسیب پذیری آب‌های زیرزمینی در دشت بوئین - داران اصفهان، مدل کمی MODFLOW را در حالت پایدار و ناپایدار برای یک دوره دوساله و مدل کیفی آبخوان (MT3DMS) را برای بررسی عامل آلوده‌کننده نیترا ت ساخته است؛ همچنین به منظور بررسی آسیب پذیری دشت بوئین - داران در برابر عوامل آلاینده از مدل DRASTIC استفاده شد که جهت صحت‌سنجی خروجی‌های مدل DRASTIC، از یون نیترا ت و خروجی‌های مدل MT3DMS استفاده شد و مشخص گردید تمامی نقاطی که دارای مقدار نیترا ت بالا می‌باشند، در محدوده آسیب پذیری زیاد قرار دارند که می‌تواند دقت و صحت مدل را تأیید نماید (Harroni, 2016).

به‌طور کلی تاکنون از دو مدل MODFLOW و MT3DMS برای مدل‌سازی جریان و شبیه‌سازی غلظت نیترا ت در آبخوان‌ها استفاده گردیده است؛ همچنین در خصوص ارزیابی آسیب پذیری آبخوان نیز از روش‌های DRASTIC، SINTACS، SI و GODS

سطحی است (Etebari et al., 2008). از این‌رو مدل‌های عددی مختلفی برای تحلیل چگونگی حرکت آلودگی در آب‌های زیرزمینی توسعه یافته است. به‌طور کلی مدل‌های مختلفی به صورت دوبعدی و سه‌بعدی برای شبیه‌سازی جریان و آلودگی آب زیرزمینی به‌صورت عمومی یا محدود تهیه شده و در دسترس عموم قرار گرفته که می‌توان به مدل WA.RANDOM، SWIFT، SUTRA، HST3D، CFEST، AQUA، MODFLOW، AVERA.LK و غیره اشاره کرد.

برنامه MODFLOW برای مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی و برنامه MT3DMS برای شبیه‌سازی تغییرات غلظت نیترا ت و انتقال آن در منطقه اشباع، در مناطق مختلف ایران برای استان همدان، شهر تویسرکان (Jalali, 2011)، غرب ایران (Jalali, 2011) و استان کرمان شهر زرنند (Moosavirad et al., 2013) انجام شده است، محققانی به بررسی انتقال آلاینده نیترا ت در آبخوان شاهرود با استفاده از مدل MODFLOW برای یک دوره سه ساله پرداختند که نتایج نشان می‌دهد که جهت جریان آب زیرزمینی و هدایت هیدرولیکی منطقه، بیش‌ترین تأثیر را در انتقال آلاینده نیترا ت دارند (Jafari & Valizadeh., 2014).

در مطالعه‌ای با استفاده از مدل ترکیبی DRASTIC و نوع کاربری اراضی در آبخوان دشت ورامین، علاوه بر پارامترهای مدل DRASTIC از پارامتر کاربری اراضی نیز استفاده نمودند. در ابتدا مدل DRASTIC اصلی با داده‌های غلظت نیترا ت آب زیرزمینی واسنجی و سپس ضرایب پارامترهای آن تصحیح شدند. پس از تعیین بهترین مدل ارزیابی آسیب پذیری منطقه و ترکیب نمودن لایه کاربری اراضی، نقشه نهایی آسیب پذیری دشت ورامین تهیه و مشخص گردید نواحی شمال شرق و جنوب غربی منطقه از پتانسیل آلودگی بالاتری نسبت به قسمت‌های میانی دشت برخوردار هستند (Rangzan et al., 2008).

در مطالعه‌ای به پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی دشت ورامین با استفاده از روش ترکیبی تحلیل سلسله‌مراتبی و منطق فازی پرداخته شد که نتایج آن نشان داد مناطق با پتانسیل بالا بیشتر در نیمه شمالی دشت که پوشیده از رسوبات درشت‌دانه دوران کواترنر هستند قرار گرفته‌اند (Razandi et al., 2015).

در مطالعه‌ای به بررسی نحوه انتقال نیترا ت برای سال‌های آتی در دشت ورامین با استفاده از دو مدل MODFLOW و MT3DMS پرداخته شد که به این نتیجه رسیدند غلظت نیترا ت در بخش‌هایی از آبخوان آزاد از شرایط استاندارد برای تخصیص به آب شرب خارج می‌شود (Valivand et al., 2017)، یکی از محققان در سال ۱۳۸۸ به بررسی آسیب پذیری آبخوان دشت ورامین با استفاده از دو مدل DRASTIC و GODS پرداخت و به

کیلومترمربع است که مساحت ارتفاعات و دشت در این محدوده به ترتیب ۵۵۲/۶ و ۱۰۸۹/۶ کیلومترمربع و حداقل و حداکثر ارتفاع نیز به ترتیب ۲۳۱۰ و ۸۰۸ متر می‌باشد. از ارتفاعات منطقه می‌توان به کوه‌های سه‌پایه، باغ شاه، چنارک و پاچالک در بخش شمال دشت اشاره نمود. از جمله خصوصیات این محدوده مطالعاتی وجود شبکه‌های آبی در سطح آن است که شبکه آبیاری ورامین از جمله آن‌ها می‌باشد.

جریان‌های سطحی ورودی به این محدوده مطالعاتی را، جریان‌های سطحی خروجی از محدوده‌های مطالعاتی دماوند، لوسانات و بخشی از خروجی‌های سطحی محدوده مطالعاتی تهران - کرج (شامل خروجی از رودخانه کن و فاضلاب‌های سطحی سرخه‌حصار و نهر فیروزآباد) تشکیل می‌دهند. جریان‌های سطحی خروجی از محدوده مطالعاتی ورامین به دو بخش، جریان‌های سطحی خروجی از طریق رودخانه شور امیرآباد (جاجرود) و جریان‌های خروجی از طریق آبراهه‌ها و مسیل‌های جنوب جوادآباد تقسیم می‌شوند.

همچنین در شکل (۲) توزیع مکانی چاه‌های بهره‌برداری آب زیرزمینی در آبخوان ورامین نمایش داده شده است.

آبخوان آبرفتی دشت ورامین یکی از مهم‌ترین منابع آب زیرزمینی استان تهران بوده که از دیرباز نقش تعیین‌کننده‌ای را در تأمین آب موردنیاز مصارف منطقه از جمله کشاورزی - شرب و صنعت بر عهده داشته است. به دلیل موقعیت خاص جغرافیایی این دشت و مجاورت آن با کلان‌شهر تهران و روند روبه‌رشد جمعیت در این شهر و شهرک‌های اقماری مجاور آن سبب شده تا نیاز روزافزون به آب بیشتر شود و بهره‌برداری بی‌رویه از آبخوان از طریق حفر چاه‌های عمیق شدت بگیرد که علی‌رغم اعلام وضعیت ممنوعیت توسعه بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی جهت مصارف کشاورزی از سال ۱۳۴۵، متأسفانه بهره‌برداری‌های غیرمجاز از سفره همچنان ادامه دارد.

بر اساس بررسی‌های انجام‌شده علاوه بر عدم تعادل آبخوان و کاهش مستمر حجم مخزن، کیفیت آب زیرزمینی نیز در حال کاهش می‌باشد. به‌نحوی که با افزایش عمق سطح آب و ورود جریان‌های سطحی آلوده به دشت سطح کیفی آب زیرزمینی دشت نیز نسبت به سال‌های گذشته کاهش یافته است. در تحقیق پیش‌رو که در بخش‌های گذشته هم ذکر شد به بررسی آلاینده نیترات در آبخوان دشت ورامین با استفاده از دو مدل SINTACS و MODFLOW پرداخته شد، در این بخش ابتدا مبانی تئوری هر یک را توضیح داده و سپس انواع پارامترهای موردنیاز هر یک از دو مدل را شرح داده و روش جمع‌آوری و پردازش آن گفته می‌شود.

استفاده شده است که برای افزایش دقت روش‌های آسیب‌پذیری در آینده می‌توان وزن هر پارامتر را نسبت به منطقه مورد مطالعه تغییر داد تا نتایج با واقعیت هم‌پوشانی بیش‌تری داشته باشد. حفاظت از منابع آب زیرزمینی در کشوری چون ایران (که جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان است) از دو نظر کمی و کیفی باید مدنظر قرار گیرد که باتوجه به این که در خصوص حفاظت کمی فعالیت‌های زیادی از جمله کنترل‌های شدید و ممنوعیت بهره‌برداری دشت‌ها به عمل آمده، اما در خصوص حفاظت کیفی این منابع در گذشته کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

از مدل‌های آسیب‌پذیری که کیفی می‌باشند، در بحث‌های آمایشی برای تعیین پتانسیل مناطق مختلف و در برنامه‌ریزی‌های کلان استفاده می‌گردد و از مدل‌های عددی در سطح کوچک‌تر (مقیاس بزرگ‌تر) که نیاز به دقت بالایی دارد، استفاده می‌گردد. از آنجایی که متأسفانه مقرراتی در بحث آمایش سرزمین برای موضوع آسیب‌پذیری و درجه آن برای مناطق مختلف مدنظر قرار نمی‌گیرد و به‌عنوان مثال برای الگوی کشت و نوع کود و سمومی که وارد مناطق آسیب‌پذیر می‌شود، بحث آسیب‌پذیری آبخوان که منبع مهم و اصلی تأمین آب منطقه هست وجود ندارد و به‌طور کلی عامل اصلی آلودگی آب‌های زیرزمینی، کاربری اراضی در منطقه می‌باشد.

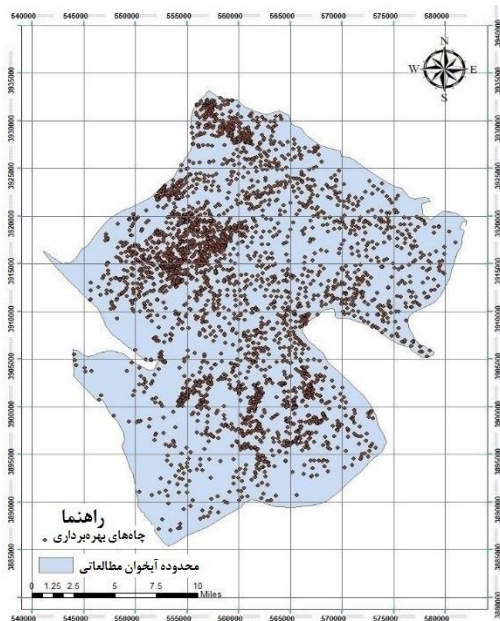
مقایسه روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری با روش‌های دقیق دترمینستیک (مدل‌های عددی) تا حالا انجام نشده و در این تحقیق برای اولین بار است که انجام می‌شود. در این صورت مشخص می‌شود که این روش‌ها چقدر کارایی دارند و دقیق هستند و این نوآوری اصلی این مقاله است.

مواد و روش‌ها

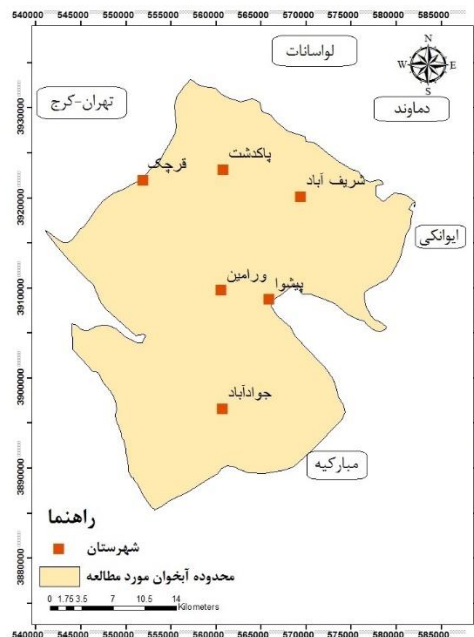
معرفی منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی ورامین در دامنه جنوبی سلسله جبال البرز و در فاصله ۴۰ کیلومتری جنوب شرق شهر تهران، مابین طول‌های جغرافیایی ۲۰° ۵۱' الی ۵۵° ۵۱' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۰۶° ۳۵' الی ۳۸° ۳۵' شمالی واقع گردیده است. این محدوده از شرق به محدودهای مطالعاتی ایوانکی، از غرب به محدوده مطالعاتی تهران - کرج، از جنوب به محدوده مطالعاتی مبارکیه و از شمال به محدوده‌های مطالعاتی دماوند و لوسانات محدود می‌گردد (شکل ۱).

محدوده مطالعاتی ورامین دارای مساحت ۱۰۶۴



شکل ۲- موقعیت چاه‌های بهره‌برداری ورامین



شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی ورامین

مبانی نظری

مدل SINTACS

مدل SINTACS یک مدل رتبه‌بندی عددی است که توسط Civita (1990) به منظور ارزیابی قابلیت آسیب‌پذیری در جنوب ایتالیا به کار برده شد. این مدل تکامل یافته از مدل DRASTIC می‌باشد که بر اساس مفهوم و وضعیت هیدروژئولوژیکی استوار است. وضعیت هیدروژئولوژیکی در واقع بیانگر ترکیبی از همه فاکتورهای زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی است که حرکت آب‌های زیرزمینی را در یک منطقه کنترل می‌کند (Kalantari et al., 2007). روش SINTACS از ترکیب هفت پارامتر هیدروژئولوژیک قابل اندازه‌گیری و مؤثر در انتقال آلودگی به آب‌های زیرزمینی که شامل عمق آب زیرزمینی^۱ (SO)، تغذیه خالص^۲ (I)، اثر منطقه غیراشباع^۳ (N)، نوع خاک^۴ (T)، مواد تشکیل‌دهنده آبخوان^۵ (A)، هدایت هیدرولیکی^۶ (C) و توپوگرافی^۷ (S) آبخوان می‌باشد، تشکیل شده است که به صورت شکل (۳) لایه‌ها باهم تلفیق می‌شوند.

مدل‌های پارامتری مانند SINTACS متعلق به گروه مدل‌های شمارشی هستند که در آن هر پارامتر علاوه بر اینکه به صورت منفرد رتبه‌بندی می‌شود، به منظور کاهش یا افزایش اهمیت پارامترها، هر پارامتر وزنی متفاوت داشته که در آن فرآیند

تجزیه و تحلیل لحاظ می‌شود جدول (۱) شاخص آسیب‌پذیری در این روش از مجموع حاصل ضرب وزن و رتبه‌های مؤثر در ارزیابی آسیب‌پذیری طبق رابطه (۱) محاسبه می‌گردد که در آن S_i شاخص آسیب‌پذیری SINTACS و R_i و W_i به ترتیب مرتبه و وزن هر کدام از پارامترها می‌باشد.

(Al kuisi, 2006)؛ که با افزودن پارامتر کاربری اراضی (L) به پارامترهای آسیب‌پذیری ذاتی، شاخص آسیب‌پذیری ویژه به دست می‌آید. همچنین در جدول (۲) رتبه دهی هر یک از پارامترها نمایش داده شده است. همچنین آسیب‌پذیری به شرح جدول (۱-۲) تقسیم‌بندی شده است.

$$S_i = \sum_{i=1}^7 (W_i R_i) \quad \text{رابطه (۱)}$$

جدول ۱- وزن‌های اختصاص یافته به هفت مؤلفه مدل SINTACS (Napolitano, 1995)

وزن هر پارامتر	پارامتر
۵	S
۴	I
۵	N
۲	T
۳	A
۳	C
۱	S

۵ . Caratteristiche Acquifero as Aquifer Media

۶ . Conducibilita Idraulica as Hydraulic Conductivity

۷ . Superficie Topografica as Slope Acclivita

۱ . Soggiacenza as Depth to Water

۲ . In filtrazione as Net Recharge

۳ . Non Saturo as Impact of the Vadose Zone

۴ . Tipologia Copertura as Soil Media

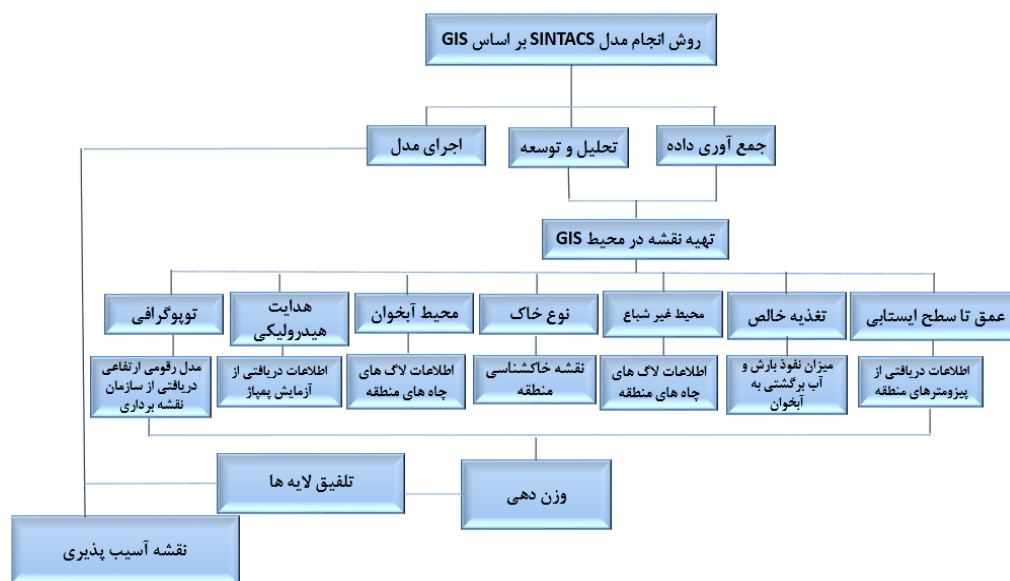
جدول ۲- نحوه وزن دهی به مؤلفه‌های مدل SINTACS

نمره	پارامتر	نمره	پارامتر
۱۰	عمق تا سطح ایستابی	۱۰	توپوگرافی
۳-۲		۹	
۵-۳		۸	
۷-۵		۷	
۱۰-۷		۶	
۱۳-۱۰		۵	
۲۰-۱۳		۴	
۳۰-۲۰		۳	
۵۶-۳۰		۲	
>۵۶		۱	
تغذیه خالص (mm/year)	W=۴	محیط خاک	W=۲
۲۰۰-۰	۶	بدون پوشش یا لایه نازک	۱۰
۳۰۰-۲۰۰	۹	گراول	۱۰
۴۰۰-۳۰۰	۸	ماسه تمیز	۹
۵۰۰-۴۰۰	۵	ماسه	۸
۷۰۰-۵۰۰	۴	پیت	۸
>۷۰۰	۳	رس ماسه‌ای	۷
محیط آبخوان	W=۳	لوم ماسه‌ای	۶
رسوبات آبرفتی درشت‌دانه	۸-۹	لوم سیلتی ماسه‌ای	۵
سنگ آهکی کارستی	۹-۱۰	لوم	۵-۴
سنگ آهک شسته شده	۶-۹	لوم سیلتی	۴
دولومیت شکسته شده	۴-۷	لوم رس سیلتی	۴-۳
رسوبات آبرفتی ریزدانه	۶-۸	لوم رسی	۳-۲
ماسه	۷-۹	رس سیلتی	۲
ماسه کنگلومرا	۴-۹	هوموس	۲
سنگ آذرین شکسته شده	۲-۴	رس	۱
فلیش	۵-۸	محیط غیراشباع	W=۵
سنگ آتشفشانی شکسته شده	۸-۱۰	رسوبات آبرفتی دانه درشت	۸-۹
مارن رس	۱-۳	سنگ آهک کارستی	۹-۱۰
رسوبات درشت‌دانه	۶-۸	سنگ آهک شکسته شده	۶-۹

۳-۶	رسوبات آبرفتی ریزدانه	۴-۶	رسوبات ریزدانه
۴-۷	ماسه	۱-۳	رس، سیلت، پیت
۵-۸	ماسه سنگ، کنگلومرا	۴-۸	رسوبات آذرآواری
۳-۵	سنگ‌های آذرین شکسته شده	۲-۵	سنگ‌های دگرگونی شکسته شده
۲-۵	سنگ‌های ولکانیک شکسته شده	W=۳	هدایت هیدرولیکی (متر بر ثانیه)
۱-۲	مارن و رس	۱۰	$10^{-5} >$
۱-۲	رس، سیلت، پیت	۹	$10^{-5} - 10^{-6}$
۲-۵	رسوبات آذرآواری	۸	$10^{-6} - 10^{-7}$
۲-۶	سنگ‌های دگرگونی شکسته شده	۷	$10^{-6} - 10^{-8}$
W=۵	کاربری اراضی	۶	$10^{-6} - 10^{-5}$
۸	مناطق شهری	۵	$10^{-5} - 10^{-6}$
۸	محصولات زراعی آبیاری	۴	$10^{-6} - 10^{-4}$
۷	باغ مرکبات	۳	$10^{-6} - 10^{-8}$
۵	زمین بایر	۲	$10^{-6} - 10^{-8}$
۴	محصولات زراعی بدون آبیاری (دیم)		
۱	جنگل		

جدول ۱-۲- کلاس‌های آسیب‌پذیری بر مبنای شاخص SINTACS (Civita, 1990)

مقدار شاخص	کلاس آسیب‌پذیری
کمتر از ۶۳	بدون خطر آلودگی
۶۴-۷۷	آسیب‌پذیری خیلی پایین
۷۸-۱۰۰	آسیب‌پذیری پایین
۱۰۱-۱۲۰	آسیب‌پذیری متوسط
۱۲۱-۱۴۰	آسیب‌پذیری متوسط تا زیاد
۱۴۱-۱۶۰	آسیب‌پذیری زیاد
۱۶۱-۱۸۰	آسیب‌پذیری خیلی زیاد
بیش از ۱۸۱	کاملاً آسیب‌پذیر



شکل ۳- مراحل انجام مدل SINTACS

شبه‌سازی عددی سه‌بعدی هدف از تهیه مدل ریاضی یک آبخوان، شبه‌سازی شرایط طبیعی آن با استفاده از یک سری روابط ریاضی می‌باشد. در صورتی که بتوان شبه‌سازی آبخوان را به نحو مطلوب انجام داد و با شرایط طبیعی تطبیق داد، به سهولت می‌توان با انجام تغییر در مقدار هر یک از عوامل مؤثر بر آبخوان، اثر آن را بر روی آبخوان در شرایط فعلی و آینده بررسی کرد. در واقع مدل جریان آب زیرزمینی مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل است که می‌تواند عکس‌العمل

شبه‌سازی عددی سه‌بعدی هدف از تهیه مدل ریاضی یک آبخوان، شبه‌سازی شرایط طبیعی آن با استفاده از یک سری روابط ریاضی می‌باشد. در صورتی که بتوان شبه‌سازی آبخوان را به نحو مطلوب انجام داد و با شرایط طبیعی تطبیق داد، به سهولت می‌توان با انجام تغییر در مقدار هر یک از عوامل مؤثر بر آبخوان، اثر آن را بر روی آبخوان در شرایط فعلی و آینده بررسی کرد. در واقع مدل جریان آب زیرزمینی مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل است که می‌تواند عکس‌العمل

شرکاء توسعه داده شده است. در سال های گذشته ویرایش های مختلفی از این مدل در مدل سازی انتقال آلودگی به کار گرفته شده است که با مدل MODFLOW هم تلفیق شده و با عنوان MT3DMS^۵ جهت استفاده کارشناسان عمومیت پیدا کرده است. معادله دیفرانسیل جزئی (۳) انتقال آلودگی آلاینده k در سیستم جریان آب زیرزمینی ناپایدار در حالت سه بعدی را نشان می دهد:

$$\frac{\partial(\theta C^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C^k) + \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$q_s C_s^k + \sum R_n$$

که در آن:

θ : تخلخل (بدون بعد)، C^k : غلظت محلول آلاینده k (ML^{-3}),
 t : زمان، X_{ij} : فاصله در راستای محورهای مختصات کارتزین (L),
 D_{ij} : ضریب انتشار هیدرودینامیکی ($L^2 T^{-1}$), v_i : سرعت آب در محیط متخلخل یا سرعت جریان دارسی ($L T^{-1}$), q_s : نرخ جریان حجمی در واحد حجم آبخوان (T^{-1}), C_s^k : غلظت آلاینده جریان چاه و چشمه (ML^{-3}), $\sum R_n$: واحد واکنش شیمیایی.

بعد از مدل سازی کمی در دشت ورامین با استفاده از برنامه MODFLOW، وارد کردن داده های کیفی به مدل انجام شد و سپس با استفاده از برنامه MT3DMS مدل اجرا شد. بدین منظور آلاینده نیترات با استفاده از غلظت نیترات چاه های شرب دشت ورامین به مدل معرفی شد و دوره زمانی (طول دوره شبیه سازی) از سال ۱۳۸۹ تا سال ۱۳۹۱ در نظر گرفته شد. در برنامه انتقال جرم MT3DMS علاوه بر پدیده جابه جایی، پدیده پخشیدگی^۶ هم برای انتقال آلاینده نیترات در آب زیرزمینی در نظر گرفته شده است. با توجه به گستردگی ناحیه مورد بررسی، تعیین مقدار مناسب برای ضریب پخشیدگی طولی و عرضی دارای پیچیدگی های قابل توجهی است؛ با توجه به مطالعات قبلی نسبت مقدار پخشیدگی افقی به طولی و نسبت مقدار پخشیدگی عمودی به طولی برابر ۰/۱ و ضریب پخش معادل ۵۰ متر بر روز و مقدار تخلخل بین ۰/۲ تا ۰/۳۵ قرار داده شد.

داده های مورد نیاز

مدل SINTACS

عمق تا سطح ایستابی

عمقی که آلاینده باید طی کند تا به سطح ایستابی برسد را عمق تا سطح ایستابی می گویند. هر چه عمق تا سطح ایستابی بیشتر باشد مدت زمان رسیدن آلاینده به آب زیرزمینی و ماندگاری

ذخیره آب زیرزمینی را در مقابل تنش های وارده (تخلیه و تغذیه) نشان دهد (Anderson et al., 2015).

حرکت سه بعدی آب زیرزمینی در محیط متخلخل با رابطه دیفرانسیل جزئی زیر توصیف می شود:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

که در آن:

K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} : ضرایب هیدرولیکی در راستای x , y و z بر حسب واحد طول بر زمان (LT^{-1}), h : سطح آب بر حسب واحد طول (L), W : میزان تخلیه بر حسب حجم (L^3), S_s : ضریب ذخیره بر حسب درصد، t : زمان.

معادله (۲) جریان آب زیرزمینی را در یک محیط غیرهمگن و تحت شرایط ناماندگار^۱ در راستای محورهای اصلی توصیف می کند. در جریان های ماندگار سمت راست رابطه صفر خواهد بود. شبیه سازی جریان آب زیرزمینی در کل محدوده آبخوان آزاد دشت ورامین با استفاده از مدل MODFLOW انجام گردیده است. شبکه بندی مدل اولین نقطه شروع در طراحی واقعی مدل رایانه ای است (Chitsazan., 2006)؛ در نتیجه محدوده مورد مطالعه با توجه به وسعت و شکل هندسی دشت و خصوصیات هیدروژئولوژی به سلول هایی با ابعاد ۲۰۰ متر مربع تقسیم بندی شد؛ سپس اطلاعات جمع آوری شده از مدل مفهومی دشت شامل ارتفاع سنگ کف، سطح آب زیرزمینی، ارتفاع توپوگرافی، تغذیه (آب برگشتی کشاورزی، بارندگی) و مقدار تخلیه چاه ها و مقادیر اولیه هدایت هیدرولیکی وارد مدل شد.

در دشت ورامین تعداد ۵۸ چاه مشاهده ای وجود دارد که میانگین ۵ ساله تراز آب زیرزمینی پیژومترها در نظر گرفته شده است. برای شبیه سازی آبخوان در حالت ماندگار، آمار اردیبهشت ماه سال ۱۳۸۹ در نظر گرفته شده است، همچنین مدل غیرماندگار جریان آب زیرزمینی نیز از فروردین ماه سال ۱۳۸۹ تا اسفندماه سال ۱۳۹۱ واسنجی شد. مقادیر هدایت هیدرولیکی، تغذیه خالص و آبدهی ویژه برای حالت ماندگار و غیرماندگار واسنجی شد و پس از اتمام واسنجی در شرایط ماندگار از فروردین تا اسفندماه ۱۳۹۲ به مدت ۱۲ ماه صحت سنجی شد. نتایج حاصل از واسنجی بیانگر تغییرات هدایت هیدرولیکی از ۱ تا ۱۰۰ متر بر روز و آبدهی ویژه از ۱۰ تا ۲۰ درصد بوده است.

مدل سه بعدی انتقال به صورت خلاصه MT3D^۲ نامیده شده است. در سال ۱۹۹۰ توسط زینگ^۳ در مؤسسه پاپادوپولوس^۴ و

۴. Papadopoulos

۵. Modular Transport 3D Multi Species

۶. Dispersion

۱. Transient

۲. Modular Three Dimensional Transport Model

۳. Zheng

نفوذپذیری و درصد مواد آلی خاک دارد (Nakhaei et al., 2013). وجود مواد با بافت ریز مانند سیلت و رس، درصد مواد آلی و ضخامت خاک بیشتر، تراوایی خاک را کاهش می‌دهد و برعکس مواد درشت‌دانه‌تر مانند شن، نفوذپذیری خاک و در نتیجه قابلیت انتقال آلاینده‌ها را به سیستم آب زیرزمینی افزایش می‌دهد (Mahmoodzade et al., 2013). با استفاده از نقشه خاکشناسی که شرایط سطحی را نشان می‌دهد، تیپ‌های مختلف خاک شناسایی گردید و لایه خاک منطقه استخراج گردید.

محیط آبخوان

محیط آبخوان در واقع جنس مواد تشکیل‌دهنده آبخوان می‌باشد. این پارامتر به خصوصیات مواد تشکیل‌دهنده منطقه اشباع نظیر تخلخل و اندازه ذرات بستگی دارد و نشان‌دهنده حرکت آلاینده‌ها در درون آبخوان می‌باشد (Brahim et al., 2012). هرچه ذرات آبخوان درشت‌تر باشد، فضای بیشتری وجود دارد که حرکت آب درون حفره‌ها راحت‌تر و سریع‌تر گردد. در نتیجه ذرات درشت‌دانه‌تر نفوذپذیری و آسیب‌پذیری بیشتری دارند. به‌منظور تهیه لایه محیط آبخوان، از لاگ چاه‌های مشاهده‌ای و بهره‌برداری موجود در منطقه استفاده گردید که با استفاده از لاگ حفاری هر جنس را به‌صورت رقوم ارتفاعی لایه‌بندی و وزن‌دهی کرده و سپس لایه محیط آبخوان ساخته شده است که به‌طور میانگین تا عمق ۱۰۰ متر تا سطح آب ملاک عمل قرار گرفته است.

هدایت هیدرولیکی

توانایی مواد تشکیل‌دهنده آبخوان در انتقال آب را هدایت هیدرولیکی گویند، که به درصد فضاهای خالی مرتبط به هم در لایه آبدار (تخلخل مؤثر) بستگی دارد (Mahmoodzade et al., 2013). هرچه هدایت هیدرولیکی بیشتر باشد، امکان جریان یافتن آلاینده‌ها در آبخوان بیشتر خواهد بود و آسیب‌پذیرتر خواهد بود (Ahmadi and Abromand., 2009). به‌منظور تهیه هدایت هیدرولیکی ابتدا از داده‌های آزمایش پمپاژ که توسط اداره آب منطقه‌ای استان تهران انجام‌شده، لایه ضریب قابلیت انتقال به دست می‌آید. سپس با تقسیم نقاط نظیر به نظیر این لایه بر ضخامت اشباع آبخوان لایه هدایت هیدرولیکی به دست می‌آید.

لازم به توضیح است به دلیل اینکه حالت تعادل بین منطقه اشباع و غیراشباع وجود دارد و عملاً نفوذ آب از منطقه غیراشباع به منطقه اشباع منتهی می‌شود، از این‌رو از اطلاعات پمپاژ لایه ضریب قابلیت انتقال به دست می‌آید.

توپوگرافی

پارامتر توپوگرافی در مدل SINTACS در واقع شیب سطح زمین است. شیب سطح زمین بر حرکت و نفوذ مواد آلاینده تأثیر می‌گذارد. هر چه قدر که میزان شیب کم باشد، مدت‌زمان تماس

آلاینده در ناحیه غیراشباع بیشتر است و در نتیجه احتمال از بین رفتن آلودگی در طول مسیر حرکت با افزایش عمق سطح ایستابی زیادتر می‌شود (Nasari et al., 2011). برای تهیه این لایه از داده‌های اندازه‌گیری سطح ایستابی در پی‌زومترهای منطقه استفاده شد. عمق تا سطح ایستابی با میانگین‌گیری برای یک دوره ۵ ساله به دست آمد. سپس لایه بر اساس روش کریجینگ نقشه هم‌ارزش عمق تا سطح ایستابی استخراج گردید.

تغذیه خالص

مقدار آبی است که از سطح زمین نفوذ کرده و موجب انتقال آلودگی به‌صورت عمودی تا سطح ایستابی شده و به‌صورت افقی در آبخوان حرکت می‌کند. معمولاً هرچه تغذیه بیشتر باشد پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی بیشتر خواهد بود. تغذیه از سطح در اثر نفوذ آب از رودخانه، بارش مؤثر، آب برگشتی کشاورزی، شرب و صنعت و... می‌باشد. از آمار چاه‌های بهره‌برداری که به‌صورت تخلیه سالانه (MCM) هر چاه با درصد مصرف چاه‌ها در کشاورزی، شرب و... استفاده شد و طبق گزارش‌های آب منطقه‌ای، ۷۵٪ تخلیه چاه‌های شرب و صنعت و نیز ۳۵٪ تخلیه چاه‌های کشاورزی به‌عنوان تغذیه آبخوان محاسبه و پس از تقسیم تغذیه به مساحت تحت پوشش هر چاه، واحد تغذیه را معادل (m/day) به دست آورده و پس از در نظر گرفتن منحنی‌های هم‌بارش و نفوذ رودخانه، به‌عنوان تغذیه آبخوان به مدل وارد می‌شود.

محیط غیراشباع

این لایه شامل محدوده بین سطح ایستابی و محیط خاک - که غیراشباع است - می‌باشد. این محدوده اساساً غیراشباع می‌باشد و یا به‌صورت ناپیوسته اشباع می‌باشد و عبور آلاینده و رقیق شدن آن را کنترل می‌کند (Ahmadi and Abromand., 2009). این بخش از خاک، در نفوذ آب باران و آب سطحی به درون آبخوان نقش اساسی ایفا می‌کند و مسیری است که آلاینده طی می‌کند تا به سطح آبخوان برسد. به‌منظور تهیه لایه محیط غیراشباع، از لاگ چاه‌های مشاهده‌ای و بهره‌برداری موجود در دشت استفاده گردید.

نوع خاک

این بخش شامل قسمت بالایی منطقه غیراشباع می‌باشد که تا حد نفوذ ریشه گیاهان یا فعالیت موجودات ارگانیکی ادامه دارد (Nasari and Sareminejad., 2011). خاک اولین سطحی است که آلودگی با آن در تماس است که بر روی میزان نفوذ و جذب آلودگی در طول لایه خاک نیز تأثیر دارد (Shiva et al., 2011). پتانسیل آلودگی خاک بستگی به خصوصیات مانند بافت،

چاه‌های بهره‌برداری، چشمه‌های آبرفتی و قنوات عمده عوامل تخلیه آب‌های زیرزمینی هستند. از آمار دریافتی آب منطقه‌ای حدود ۲۳۰۰ حلقه چاه بهره‌برداری در نظر گرفته شد. علاوه بر این در محدوده مورد مطالعه ۸ قنات موجود است که تخلیه آن‌ها بر حسب واحد (مترمکعب در روز) به لایه مربوطه منتقل می‌گردد.

داده‌های مربوط به سنجش و پایش

عمق سطح آب زیرزمینی دشت‌ها در چاه‌های مشاهده‌ای که بدین منظور حفر شده است، به صورت ماهانه قرائت و ذخیره می‌گردد. از آمار و اطلاعات چاه‌های مشاهده‌ای که تقریباً در همه دشت‌های کشور با تراکم نسبتاً مناسب حفر شده است، جهت مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی استفاده می‌گردد. در محدوده مورد مطالعه ۵۸ حلقه چاه مشاهده‌ای موجود است که از تراز سطح آب این چاه‌ها برای مقایسه تراز مشاهداتی و محاسباتی برای کالیبراسیون سایر پارامترها از جمله ضریب هیدرولیکی آبخوان، میزان تغذیه سطحی (بارش مؤثر و آب برگشتی) و غیره استفاده می‌شود.

یافته‌ها

پارامترهای مؤثر در هریک از روش‌های شبیه‌سازی منتج به نقشه-ها و نمودارهایی شد که تفسیر آن به این صورت است که مناطق آسیب‌پذیر و همچنین مناطق مستعد به آلاینده نیترات را نشان می‌دهد. در ذیل نتایج هر یک از روش‌ها به صورت جداگانه و همچنین مقایسه بین نتیجه دو روش بیان می‌شود.

نتایج مدل SINTACS

جهت بررسی آسیب‌پذیری آبخوان ورامین به روش SINTACS هفت لایه اطلاعاتی شامل پارامترهای عمق تا سطح ایستابی و تغذیه خالص و محیط غیراشباع و نوع خاک و محیط آبخوان و هدایت هیدرولیکی و توپوگرافی و کاربری اراضی در محیط GIS تهیه و در شکل (۴) ارائه شده است و سپس شاخص نهایی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان مورد مطالعه محاسبه شد که با در نظر گرفتن پارامتر کاربری اراضی منطقه شکل (۸-۴)، نقشه آسیب‌پذیری ویژه آبخوان حاصل گردید. شاخص آسیب‌پذیری ذاتی و ویژه مدل SINTACS مطابق رابطه (۱) در شکل (۱-۵) و (۲-۵) آورده شده است. براین اساس، شاخص نهایی آسیب‌پذیری ذاتی، به ترتیب برای آسیب‌پذیری ذاتی SINTACS بین ۹۲ تا ۱۶۸ و برای آسیب‌پذیری ویژه SINTACS بین ۱۱۹ تا ۲۰۸ قرار گرفت. همان‌طور که مشاهده می‌شود با در نظر گرفتن لایه کاربری اراضی میزان آسیب‌پذیری به میزان چشم‌گیری افزایش می‌یابد که این نشان‌دهنده تأثیرپذیری این لایه در بررسی آسیب‌پذیری آبخوان می‌باشد. این پهنه‌بندی نشان می‌دهد که پتانسیل

آلاینده با سطح زمین افزایش می‌یابد و به دنبال آن احتمال نفوذ آن به درون زمین نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه با کاهش شیب سطح زمین، امکان آسیب‌پذیری آبخوان افزایش می‌یابد (Fadae nobakhtegan et al., 2014). به منظور تهیه لایه توپوگرافی، مدل رقومی ارتفاعی منطقه تهیه گردید. سپس نقشه شیب از این مدل رقومی منطقه استخراج گردید.

شبیه‌سازی عددی

در شبیه‌سازی MODFLOW داده‌های مختلفی اعم از فیزیک آبخوان، هیدرودینامیک آبخوان و تغذیه و تخلیه آبخوان مورد نیاز است، بنابراین روش تهیه و پردازش هریک از این پارامترها به تفصیل در ذیل شرح داده می‌شود.

داده‌های فیزیک و هندسه آبخوان

با شناخت مرز حوضه آبریز یا مرز محدوده مطالعاتی، تعیین مرز مدل، تراز سطح زمین، تراز سنگ کف می‌توان هندسه آبخوان را تهیه و به صورت سه‌بعدی بررسی نمود. شرایط مرزی سفره‌های آب زیرزمینی در مدل MODFLOW به صورت‌های مختلف، ناتراوا^۱ با سطح ثابت^۲، با سطح کلی^۳، با سطح مشخص^۴ و غیره شبیه‌سازی می‌شود. در شرایط مرزی که به خط مرزی آبخوان اعمال می‌گردد، مقادیر سطح تراز آب زیرزمینی به دو گره ابتدا و انتهای آن وارد می‌شود. در سلول‌های بین دونقطه و بر روی آن خط، مقادیر دو گره به صورت خطی درون‌یابی می‌شود.

داده‌های مربوط به مشخصات هیدرودینامیکی آبخوان

ضریب هدایت هیدرولیکی (افقی و عمودی)، ضریب ذخیره در آبخوان‌های تحت فشار یا ضریب آبدهی ویژه در آبخوان‌های آزاد، تخلخل کل آبخوان، ضریب پخش طولی (در شبیه‌سازی آلاینده‌ها کاربرد دارد) از مشخصه‌های هیدرودینامیکی آبخوان به شمار می‌رود. با استفاده از نقشه قابلیت انتقال آب و نقشه ضخامت اشباع آبرفت، لایه اطلاعاتی ضریب هدایت هیدرولیکی به دست می‌آید. با استفاده از گزارش‌های ژئوفیزیک و ژئوالکترونیک، ضریب تخلخل کل آبخوان بین ۰/۲ تا ۰/۳ در نظر گرفته شد و ضریب پخش طولی ۳۰ متر بر روز قرار داده شده است که به روش سعی و خطا با تغییر این ضرایب مدل کیفی واسنجی شد.

داده‌های مربوط به تغذیه آبخوان

تغذیه از سطح در اثر نفوذ آب از رودخانه، بارش مؤثر، آب برگشتی کشاورزی، شرب و صنعت و... می‌باشد؛ که در بخش قبل نحوه محاسبه تغذیه آبخوان شرح داده شده است.

داده‌های مربوط به منابع مصارف و بهره‌برداری

تحلیل حساسیت حذف پارامتر

تحلیل حساسیت حذف پارامتر، حساسیت نقشه آسیب‌پذیری را به حذف یک یا چند پارامتر نشان می‌دهد و از طریق رابطه (۴) محاسبه می‌گردد (Lodwick et al., 1990).

$$S = \left(\frac{\frac{V}{N} - \frac{V'}{n}}{\frac{V}{N}} \right) \times 100 \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن S میزان حساسیت، V و V' به ترتیب، شاخص‌های خطر آلودگی بدون حذف و با حذف پارامتر می‌باشند، N و n تعداد لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده برای محاسبه V و V' هستند. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت حذف پارامتر نشان می‌دهد که پارامتر عمق تا سطح ایستابی با ضریب حساسیت ۰/۱۴۵ مؤثرترین پارامتر بر روی شاخص آسیب‌پذیری ذاتی و پارامتر کاربری اراضی با ضریب حساسیت ۰/۱۰۸ مؤثرترین پارامتر بر روی شاخص آسیب‌پذیری ویژه می‌باشد (جدول (۲)).

پارامتر عمق تا سطح ایستابی بیشترین تأثیر را در آسیب‌پذیری آبخوان دارد زیرا هرچه عمق تا سطح ایستابی کمتر باشد مدت‌زمان رسیدن آلاینده به آب زیرزمینی و ماندگاری آلاینده در ناحیه غیراشباع کمتر است که با نمونه‌برداری‌های متعدد از چاه‌های مشاهده‌ای و استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری با دقت بالاتر می‌توان به تهیه و جمع‌آوری این پارامتر پرداخت.

آسیب‌پذیری در این دشت متغیر و بین کم تا زیاد می‌باشد. اراضی مخروط‌افکنه‌ای و بستر رودخانه جاجرود از پتانسیل آسیب‌پذیری زیادی برخوردار است. درحالی‌که این پتانسیل آسیب‌پذیری در بخش‌های شرقی و جنوب شرقی منطقه پایین می‌باشد و قسمت اعظم دشت از پتانسیل آسیب‌پذیری متوسط برخوردار است. برای درک بهتر و نشان دادن مناطق حفاظتی آب زیرزمینی، منطقه به ۳ کلاس حفاظتی کم، متوسط، زیاد، مطابق شکل (۳-۵) طبقه‌بندی گردید.

تحلیل حساسیت

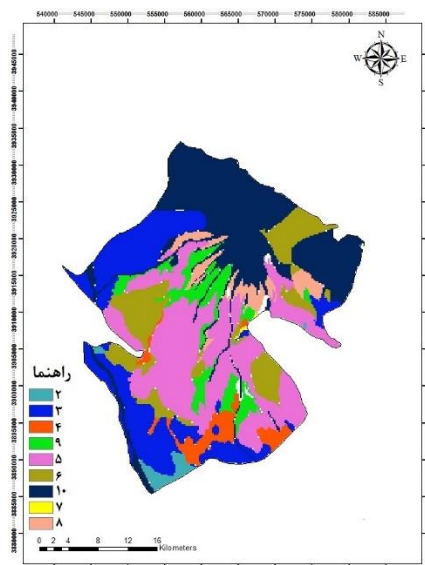
تحلیل حساسیت اطلاعات مفیدی در مورد تأثیر مقادیر رتبه‌ها و وزن‌های اختصاص‌یافته به هر پارامتر فراهم می‌کند و به تحلیلگر در مورد قضاوت درباره اهمیت عناصر کمک می‌کند (Huan et al., 2012). به‌طور کلی تحلیل حساسیت به مطالعه سهم متغیرها و پارامترهای ورودی به‌صورت منفرد در خروجی مدل تحلیلی می‌پردازد (Napolitano and Fabbri., 1996). بدین منظور می‌توان به دو نوع تحلیل حساسیت حذف پارامتر و تحلیل حساسیت تک پارامتری که در اکثر تحقیقات انجام شده است اشاره نمود:

جدول ۲- نتایج آماری تحلیل حساسیت حذف پارامتر نقشه آسیب‌پذیری ذاتی و ویژه SINTACS
۱-۲- تحلیل حساسیت حذف پارامتر نقشه آسیب‌پذیری ذاتی SINTACS

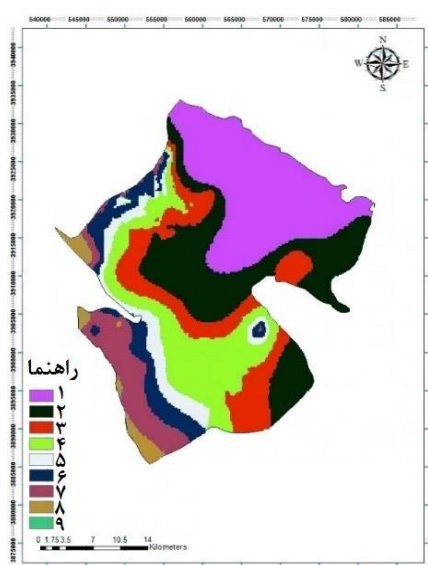
پارامتر حذف‌شده	شاخص حساسیت به روش حذف پارامتر (%)		
	حداقل	میانگین	حداکثر
S	۰	۰/۲۲۷	۰/۵۷۱
I	۰/۰۵۱	۰/۲۳۷	۰/۴۵۶
N	۰	۰/۱۳۳	۰/۴۷۳
T	۰	۰/۱۳۲	۰/۳۵۴
A	۰	۰/۰۸۵	۰/۲۳۱
C	۰	۰/۰۸۳	۰/۱۵۶
S	۰/۰۷۵	۰/۱۸۲	۰/۳۲۳

۲-۲- نتایج آماری تحلیل حساسیت حذف پارامتر نقشه آسیب‌پذیری ویژه SINTACS

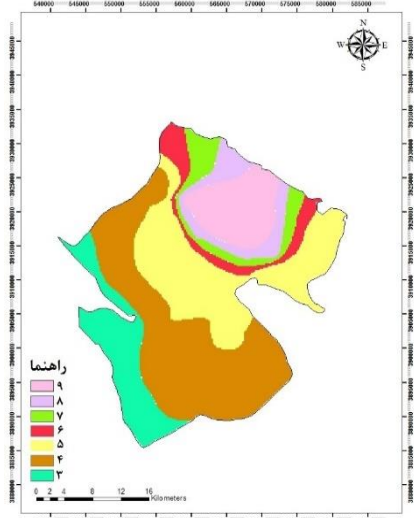
پارامتر حذف‌شده	شاخص حساسیت به روش حذف پارامتر (%)		
	حداقل	میانگین	حداکثر
S	۰/۰۰۳	۰/۲۷۱	۰/۵۷۸
I	۰	۰/۱۰۸	۰/۳۱۹
N	۰	۰/۱۵۹	۰/۳۶۷
T	۰	۰/۲۴۹	۰/۴۸۹
A	۰/۰۰۳	۰/۱۸۲	۰/۳۶۷
C	۰	۰/۰۵۴	۰/۲۱۴
S	۰/۱۶۷	۰/۳۱۴	۰/۴۵۹
L	۰	۰/۳۶۹	۰/۵۰۳



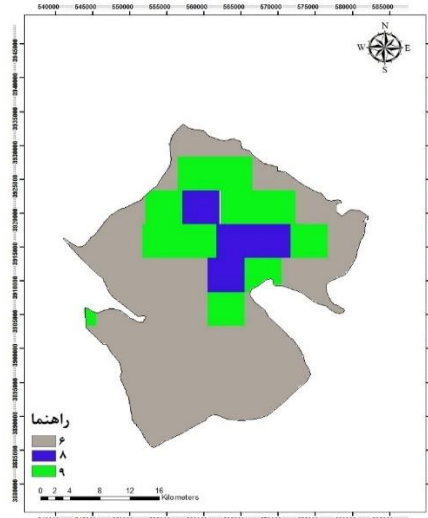
شکل ۴-۵- نقشه پهنه بندی محیط آبخوان دشت ورامین



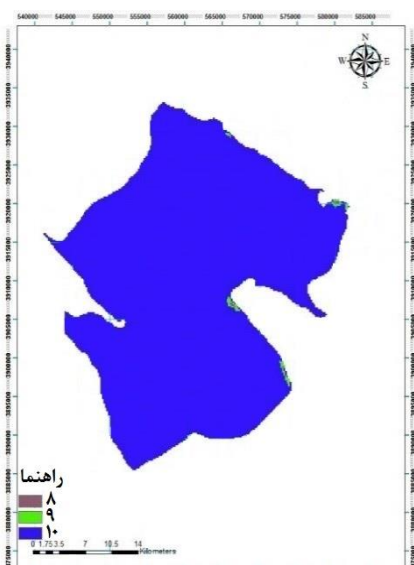
شکل ۴-۱- نقشه پهنه بندی عمق تا سطح ایستابی آبخوان دشت ورامین



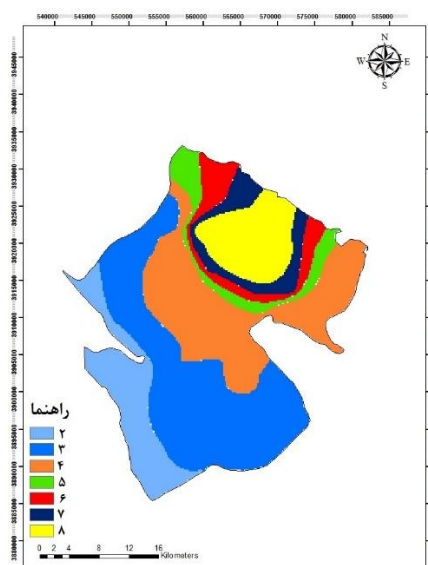
شکل ۴-۴- نقشه پهنه بندی خاک دشت ورامین



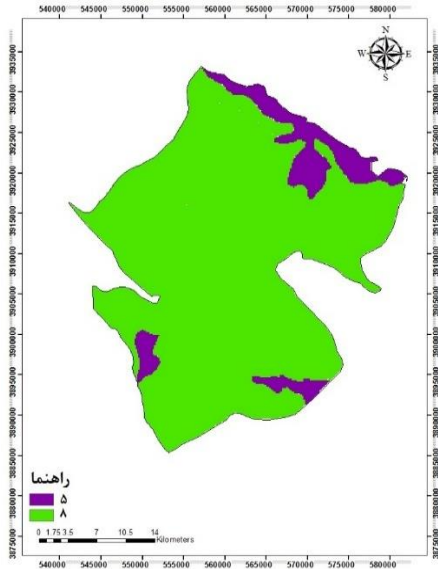
شکل ۴-۲- نقشه پهنه بندی تغذیه خالص آبخوان دشت ورامین



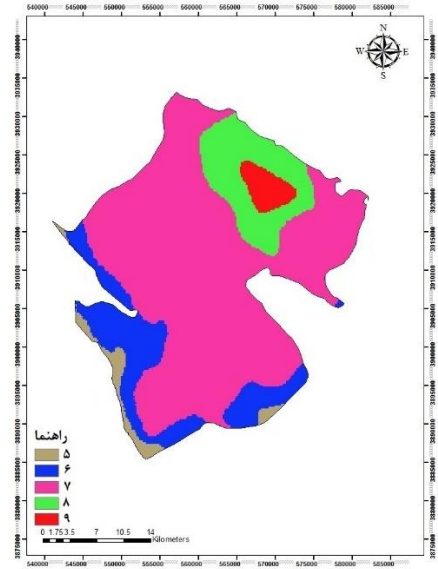
شکل ۴-۶- نقشه پهنه بندی توپوگرافی آبخوان دشت ورامین



شکل ۴-۳- نقشه پهنه بندی محیط غیراشباع آبخوان دشت ورامین

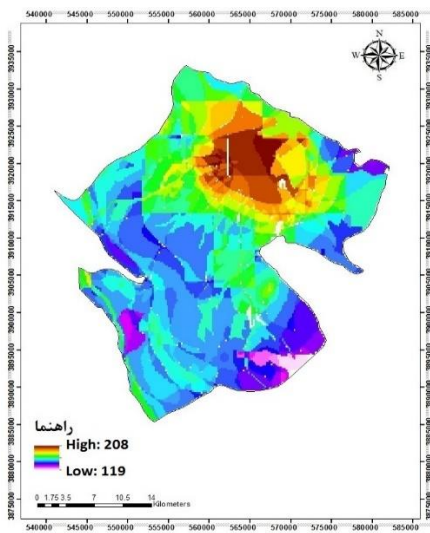


شکل ۴-۸- نقشه کاربری اراضی دشت ورامین

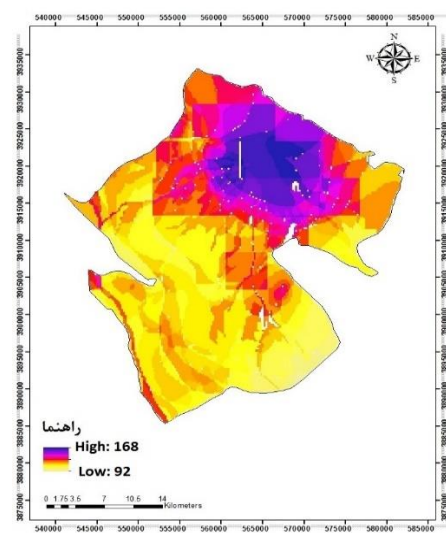


شکل ۴-۷- نقشه پهنه بندی هدایت هیدرولیکی آبخوان دشت ورامین

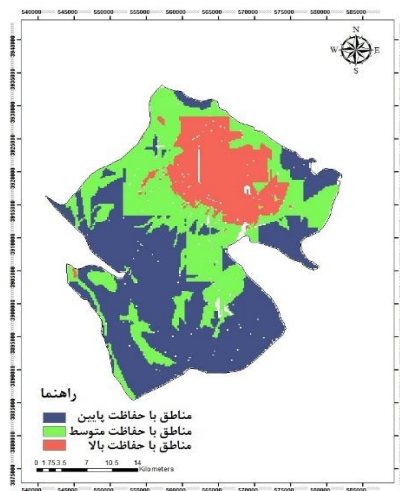
شکل ۴- نقشه پارامترهای روش SINTACS



شکل ۲-۵- نقشه آسیب پذیری ویژه آبخوان دشت ورامین



شکل ۱-۵- نقشه شاخص آسیب پذیری آبخوان دشت ورامین



شکل ۳-۵- نقشه پهنه بندی آسیب پذیری ویژه دشت ورامین

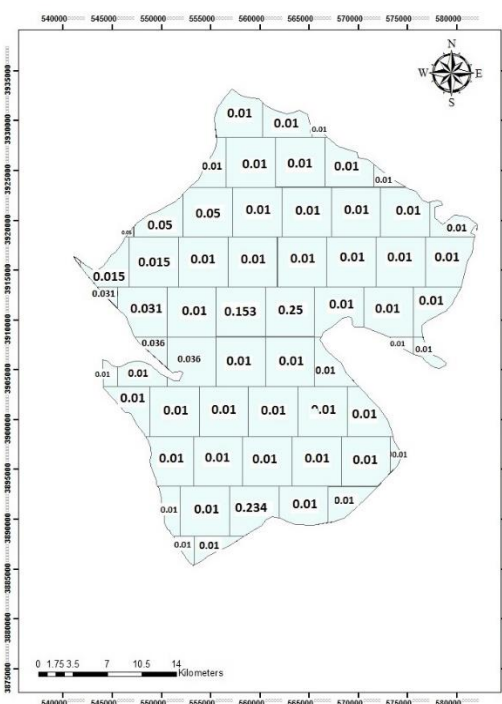
شکل ۵- نقشه شاخص آسیب پذیری ذاتی و ویژه دشت ورامین

واسنجی مدل

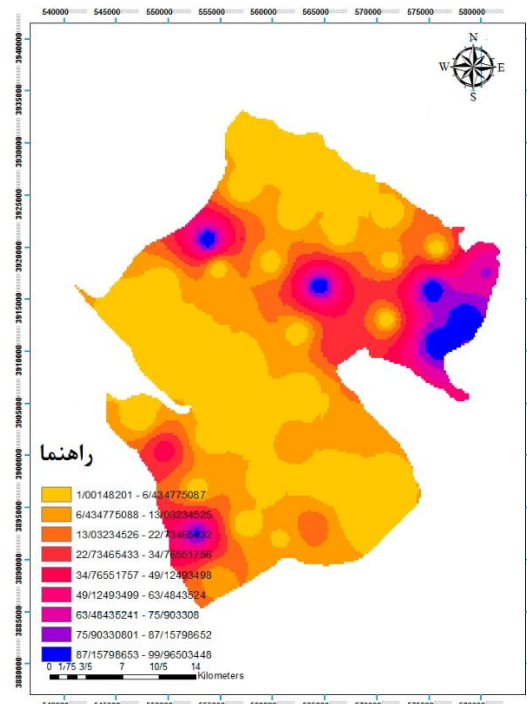
یکی از قسمت‌های مهم مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی، واسنجی پارامترهایی است که با عدم قطعیت همراه بوده و برآورد دقیق آن‌ها در همه قسمت‌های سیستم واقعی امکان‌پذیر نیست. به‌طور کلی فرآیند تغییر در پارامترهای مدل در یک دامنه مورد قبول، تا زمانی که اختلاف بین بار هیدرولیکی شبیه‌سازی شده توسط مدل و مشاهده‌ای (در صحرا) به یک حد قابل قبول برسد، واسنجی مدل آب زیرزمینی نامیده می‌شود. از جمله پارامترهای معمولی که در فرآیند واسنجی مدل در کد MODFLOW اصلاح می‌گردند می‌توان به شرایط مرزی، تغذیه و هدایت هیدرولیکی اشاره نمود. در GIS جهت کالیبراسیون و تخمین مقدار

پارامترهای مورد استفاده در مدل‌سازی آب زیرزمینی از روش PEST استفاده می‌شود. نرم‌افزار PEST^۱ که اختصار کلمات می‌باشد یکی از پرکاربردترین نرم‌افزارهای بهینه‌سازی خطی و غیرخطی است.

برای واسنجی مدل در حالت ماندگار پارامتر هدایت هیدرولیکی و تغذیه خالص در نظر گرفته شد و برای حالت غیر ماندگار پارامتر ضریب آبدهی ویژه واسنجی شد. نقشه هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه بعد از واسنجی حالت غیرماندگار مدل به‌منظور تفسیر بهتر نتایج اجرای مدل در اشکال (۱-۶) و (۲-۶) آورده شده است.



شکل ۶-۲- نقشه ضریب آبدهی ویژه آبخوان (واسنجی مدل در حالت غیر ماندگار)



شکل ۶-۱- نقشه هدایت هیدرولیکی آبخوان (واسنجی مدل در حالت غیر ماندگار)

سنجی قرار گرفت که متناظر با دوره تنش جدید، داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای و بهره‌برداری در دوره صحت سنجی تهیه و وارد مدل می‌گردد و مدل را پس از ورود داده‌ها اجرا گردید.

بررسی توزیع مکانی نیترات در دشت ورامین با استفاده از مدل MT3DMS

به‌منظور آگاهی از روند تغییرات نیترات در دشت ورامین با استفاده از نتایج تحلیل شیمیایی تعدادی از چاه‌های شرب، غلظت نیترات در دشت ورامین در سال ۱۳۸۹ ترسیم شده است که در

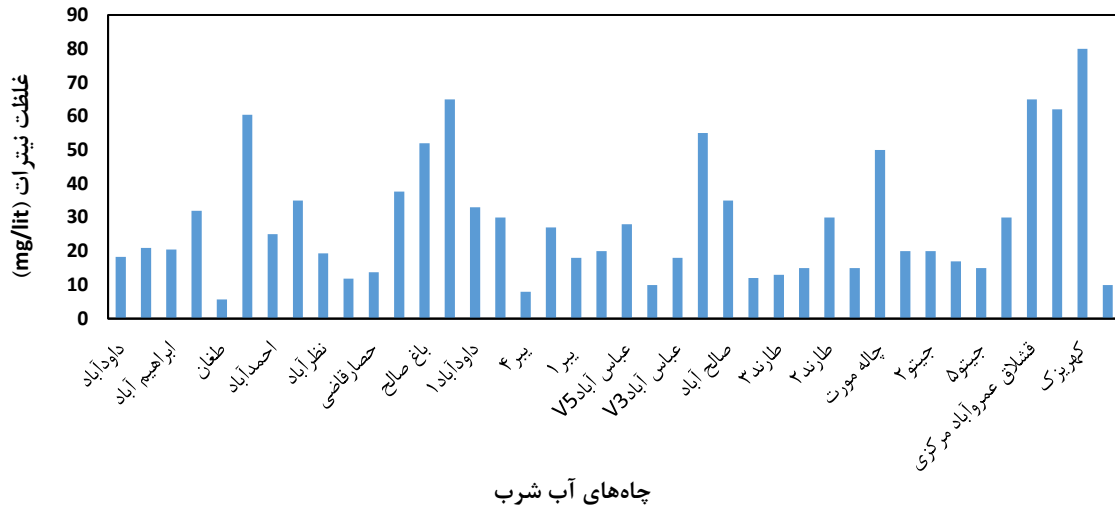
صحت سنجی مدل

صحت‌سنجی در واقع فرآیندی است که پس از بهینه‌کردن پارامترها در واسنجی، پارامترهای ورودی در دوره‌ای غیر از دوره واسنجی به مدل وارد شده و نتایج آن‌ها مقایسه می‌شود؛ صحت مدل با اعمال دوره تنشی متفاوت از دوره تنش مرحله کالیبراسیون مورد بررسی و تأیید واقع می‌شود.

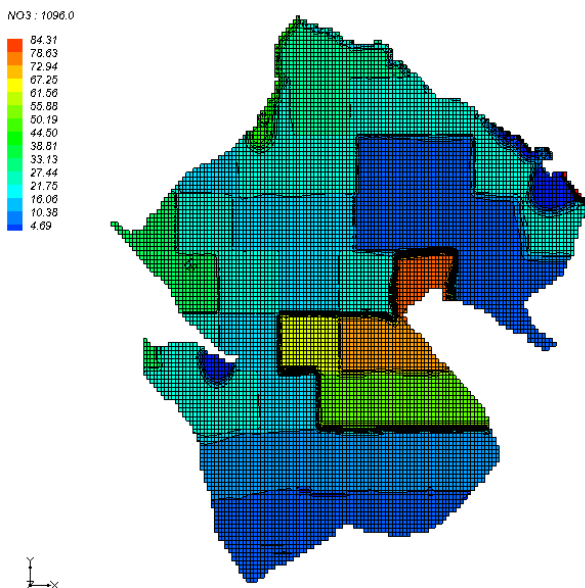
پس از واسنجی مدل در شرایط غیر ماندگار، مدل در یک بازه یک‌ساله (فروردین ۱۳۹۲ تا اسفند ۱۳۹۲) مورد صحت

شکل (۷-۱) آورده شده است. محدوده توزیع مکانی این داده‌ها بیشتر در شهر و اطراف آن بوده که در شکل (۷-۲)

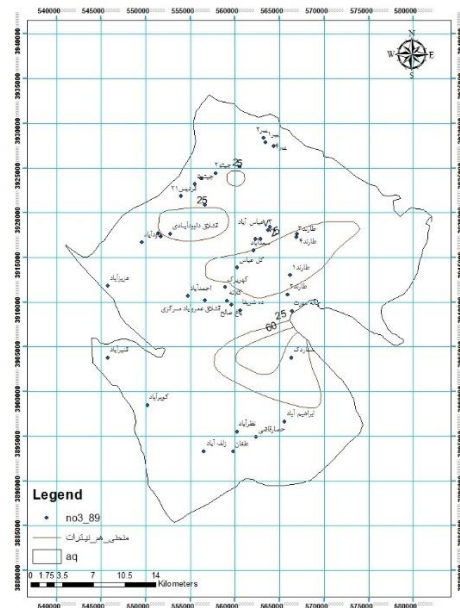
غلظت نیترات در چاه‌های آب شرب



شکل ۷-۱- نقشه غلظت نیترات در سطح چاه‌های شرب محدوده مطالعاتی ورامین (mg/lit) (سال ۱۳۸۹)



شکل ۷-۳- نقشه غلظت یون نیترات در سال ۱۳۹۱ (mg/lit)



شکل ۷-۲- نقشه توزیع مکانی نیترات در سطح چاه‌های شرب محدوده مطالعاتی ورامین (mg/lit) (سال ۱۳۸۹)

درحالی‌که پتانسیل آسیب‌پذیری در بخش‌های شرقی و جنوب شرقی منطقه پایین می‌باشد و قسمت اعظم دشت از پتانسیل آسیب‌پذیری متوسطی برخوردار است.

در مقابل با استفاده از کد MODFLOW به مدل‌سازی کمی آبخوان مذکور پرداخته شد که برای پیش‌بینی مقدار نیترات مدل MT3DMS با مدل MODFLOW تلفیق شد و نتایج حاصل بیانگر این بود که چاه‌های آب شرب سناردک، گل عباس

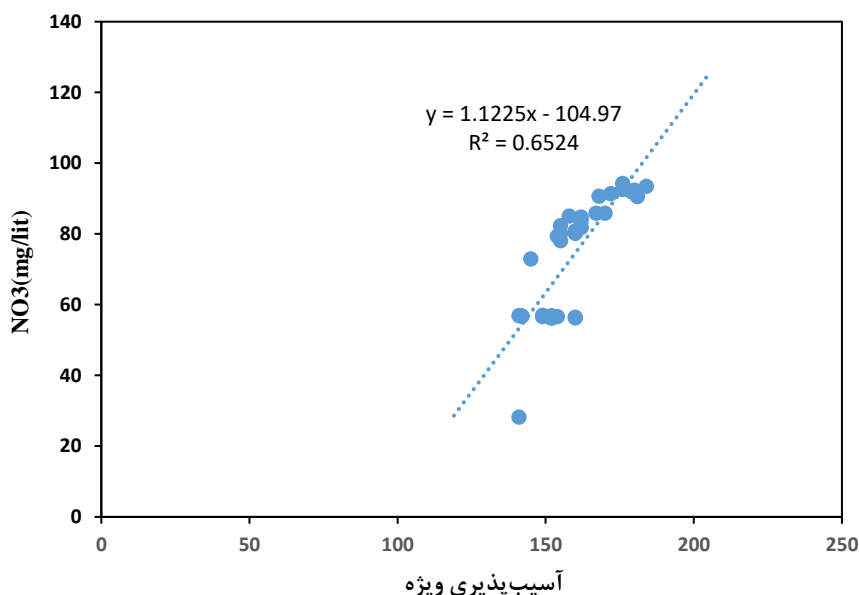
در شکل (۳-۷) نقشه خروجی مدل MT3DMS در سال ۱۳۹۱ آورده شده است.

مقایسه مدل عددی سه‌بعدی (MT3DMS) و مدل SINTACS تفسیر نتایج حاصل از مدل SINTACS به این‌گونه است که پتانسیل آسیب‌پذیری در این دشت متغیر و بین کم تا زیاد می‌باشد. به‌عنوان نمونه اراضی مخروط‌افکنه‌ای و بستر رودخانه جاجرود از پتانسیل آسیب‌پذیری زیادی برخوردار است.

محاسبه R2 به دست آمده است. سپس برای مقایسه نتایج دو مدل SINTACS و MT3DMS، ابتدا لایه کنترل خروجی از مدل MT3DMS را به محیط GIS برده و با لایه رستری خروجی مدل SINTACS به نقاط متناظر در مش بندی ۱۰۰۰ در ۱۰۰۰ تبدیل کرده، به صورتی که نقاط نظیر به نظیر مورد مقایسه قرار گرفت؛ مدل های ارزیابی آسیب پذیری عمدتاً در زمان هایی که آسیب پذیری بالاست به ازای مقادیر بالای نیترات، بهتر عمل می کنند (Asghari و moghadam et al., 2016)؛ لذا از مقایسه مدل SINTACS و غلظت های بالای نیترات، برای آسیب پذیری زیاد و نیترات از بازه ۷۰ تا ۹۵ (mg/lit) تا ۹۵ میزان R² برابر ۰/۶۵، برای نیترات از بازه ۸۰ تا ۹۵ میزان R² برابر ۰/۶۵، به دست آمده که نشان دهنده همبستگی قابل قبولی بین دو مدل است شکل (۴-۷).

و چاه مورت که در بخش پیشوا و چاه های باغ صالح، ده شریف، کهریزک و کلاته که در بخش ورامین قرار دارند دارای بیشترین مقدار نیترات بوده و در مقابل چاه های طغیان و بیر ۴ در نواحی جوادآباد و قسمت شمالی آبخوان (اراضی مخروط افکنه جاجرود) دارای کمترین مقدار نیترات می باشند.

خروجی مدل MT3DMS به صورت کنترل شده که به فرمت Shape file به محیط GIS برده شد و سپس به نقاط متناظر تبدیل کرده؛ همچنین خروجی مدل SINTACS را که به صورت رستر بود با استفاده از دستور Raster to point به نقاط متناظر تبدیل کرده و سپس نقاط متناظر خروجی دو مدل را در مش بندی ۱۰۰۰ در ۱۰۰۰ به محیط اکسل برده و با یکدیگر مقایسه کرده که پس از حذف داده های پرت، میزان همبستگی با



شکل ۴-۷- نمودار مقایسه آسیب پذیری ویژه SINTACS و خروجی مدل MT3DMS

بالا بوده و در مقابل چاه های طغان و بیر ۴ در قسمت های جنوبی و شمال آبخوان دارای مقدار نیترات کمی می باشند. از طرفی در مناطق شمالی دشت به دلیل عدم دسترسی به اطلاعات آب شرب و فاضلاب ورودی به رودخانه از سوی شرکت آب منطقه ای و شرکت آب و فاضلاب و قرارگیری محدوده در طبقه بندی پدافندی و محرمانه؛ نتایج مدل MT3DMS به شدت تحت تأثیر خود قرار گرفت؛ از این رو در آن مناطق داده های واقعی دریافت نشده است و شاهد مقادیر پائین نیترات در مدل و اختلاف بین دو مدل می باشد. همچنین یافته های دو مدل با یکدیگر تا حدودی تطابق مناسبی دارند. از این یافته ها می توان در جهت مدیریت هر چه صحیح تر در انتخاب کاربری اراضی استفاده کرد به گونه ای که چاه های آب شرب را به نواحی خارج از مناطق ذکر شده (خارج از

نتیجه گیری

باتوجه به این که آبخوان آبرفتی دشت ورامین یکی از مهم ترین منابع آب زیرزمینی استان تهران به شمار می رود، این دشت برای مطالعه انتخاب گردید. در این تحقیق با استفاده از دو مدل SINTACS و MODFLOW مناطق آسیب پذیر آبخوان دشت ورامین شناسایی و پهنه بندی شد. در نقشه شاخص آسیب پذیری SINTACS مشاهده می شود که در حوالی چاه های کلاته، کهریزک، چاله مورت و طارند ۲ آسیب پذیری زیاد می باشد. همچنین نتایج حاصل از مدل MODFLOW (برنامه کیفی آن یعنی مدل MT3DMS) بیانگر این است که چاه های آب شرب سناردک، گل عباس و چاه مورت در بخش پیشوا و چاه های باغ صالح، ده شریف، کهریزک و کلاته در بخش ورامین دارای نیترات

سپاس‌گزاری

این مقاله از پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مصوب و دفاع‌شده در دانشگاه تربیت مدرس استخراج شده است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از آب منطقه‌ای استان تهران، اعلام نمایند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

بافت مسکونی) منتقل کرد. از جمله مهم‌ترین دلایل افزایش آلاینده نیترات در چاه‌های نامبرده دفع فاضلاب انسانی و عدم وجود شبکه جمع‌آوری فاضلاب می‌باشد. در مورد حساسیت آسیب‌پذیری نسبت به پارامترها SINTACS هم اشاره شود و در مورد توصیه به استفاده از این روش به‌جای مدل عددی که نیاز به داده‌های بسیار زیاد دارد و مراحل واسنجی و صحت‌سنجی پیچیده دارد.

REFERENCES

- Ahmadi, E., Abroomand, M. (2009). Investigate the potential pollution of Khash plain aquifer using GIS. *Journal of Applied Geology*, 5(1):1-11.
- Al kuisi, M., El-Naqa, A. and Himmouri, N. (2006). Vulnerability mapping of shallow groundwater aquifer using SINTACS model in the Jordan Valley area, Jordan. *Environmental Geology*. 50: 651-667.
- Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R.J. (2015). *Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport*. Academic press.
- Asghari moghadam, A. and Nadiri, A. and Pakniya, V. (2016). Using DRASTIC and SINTACS methods, use the Bostanabad plain. *Journal of Hydrogeomorphology*, 8(3), 21-52. (In Farsi)
- Brahim, F.B., Kanfir, H. & Bouri, S. 2012. Groundwater Vulnerability and Risk mapping of the Northern Sfax Aquifer, Tunisia. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 37(5): 1405-1421.
- Chetan P.S. Ahada, Surindra Suthar. (2018). A GIS based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Southern Punjab, India. *Modeling Earth System and Environment*, vol.4, pp.635-645.
- Chitsazan, M., Kashkoi, H.E. (2006). Ground water modeling and solving hydrological problems. *Shahid Beheshti Chamran University*, 8:300-350.
- Civita, M. (1990). *Legenda unificata per le Carte della vulnerabilitadei corpi idrici sotterranei/Unified legend for the aquifer pollution vulnerability Maps. Studi sulla vulnerabilita degli Acquiferi*, 1, 13.
- Civita M. (1994). *Le carte della vulnerabilita degli acquiferi all inquinamento. Teori and practia (Aquifer vulnerability maps to pollution (in italian): pitagora Ed, Bologna*, 325p.
- Colins Johnny, J., Sashikkumar, M.C., Anas, P.A., Kishan, E.A., 2015. Sintacs Model for Groundwater Vulnerability Mapping using Remote Sensing and GIS Techniques : A Case Study on Dindigul Block, *International Journal of ChemTech Research*, vol.8, no.7, pp. 56-64.
- Etebari, B. and Yaghobzade, M. and Shahabifard, F. and Adeli, H. and Rezaei, M. (2009). Check the aquifer model using GMS software. In: *First International Water Crisis Conference*. 10-12 Mar., Zabol University, Zabol, Iran.
- Fadae nobakhtegan, A. (2014). *Assessment Intrinsic vulnerability Free aquifer of Shiraz plain using DRASTIC models, COMPOSITE DRASTIC (CD) in GIS*, Thesis of Master of Environmental Health Engineering. University Shiraz Medical Sciences.
- Harroni, Y. (2016). *Application of MODFLOW and DRASTIC models to study nitrate pollution and groundwater vulnerability in Buin-Daran plain of Isfahan*, Master Thesis, water resources Department, Isfahan University of Technology.
- Jafari, H., Valizadeh, M. (2014). Modeling the transfer pollutant Nitrate in Shahroud aquifer. *Journal of Geochemistry*, 3(1).
- Jalali, M. (2011). Nitrate pollution of groundwater in Toyserkan, Western Iran. *Environmental Earth Science*, 62, 907-913.
- Grimaldi, C., R., Gaudio, F., Calomino, and A. H., Cardoso. (2009). A numerical groundwater flow model of upper and middle Trinity aquifer, Texas water development board. *Hydrology*, Vol.135, no.5, pp.425-431.
- Kalantari, N. and Faryabi, M. and Rahimi, M. H. (2007). Investigation of groundwater pollution potential of Baghmalek plain using AVI method and GOD and DRASTIC models in GIS. *Journal of Engineering Geology*, 2(2), 431-450. (In Farsi)
- Lodwick W.A., Monson W. and Svoboda L. 1990. *Attribute error and sensitivity analysis of map operation in GIS*.
- Mahmoodzade, A., Rezaian, S. (2013). Analysis Vulnerability of groundwater in Isfahan Meymeh plain using DRASTIC method. *Journal of Ecology*, 39(2):45-60.
- Marofi, S. and Soleymani, S. and Ghobadi, M. and Rahimi, G.H. and Marofi, H. (2012). Vulnerability assessment of Malayer plain aquifer using SINTACS and SI and DRASTIC models. *Journal of Soil and Water Conservation Research*, 3(19). (In Farsi)
- McMahon, A., Heathcote, J., Carey, M., and Erskine, A. (2001). *Guide to Good Practice for the Development of Conceptual Models and the Selection and Application of mathematical models of contaminant transport*.
- Moosavirad, S.M., Janardhana, M.R. & Khairy, H. (2013). Impact of anthropogenic activities on the chemistry and quality of groundwater: A case study from a terrain near Zarand City, Kerman Province, SE Iran. *Environment Earth Sciences*, 69, 2451-2467.
- Nakhai, M., Amiri, M. (2013). Assessment potential pollution and analysis Groundwater sensitivity in Khatton abad aquifer using DRASTIC model. *Journal of Advanced Geology*, 3(8):1-10.

- Napolitano p. (1995). Gis for aquifer vulnerability assessment in the piana campana, southern Italy, using the DRASTIC and SINTACS method. Thesis of Master of Siences in Geology Survey. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences.
- Naseri, H., Sareminejad, F. (2011). Comparison of aquifer vulnerability assessment DRASTIC methods and fuzzy, case study of the plain Suleiman Mosque. *Journal of Natural Geography*, 4(11):17-34.
- Rahman, A. (2008). A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh. India. *Applied Geography*, 28:32-53.
- Rangzan, K., Zeyaiyan, P. & Mirzaei, P. (2008). Zoning of Varamin plain aquifer vulnerability using DRASTIC and experimental evaluation of the effect of unsaturated area in GIS environment.
- Razandi, y., Malekian, A. (2015). Assessment of temporal and spatial changes of groundwater quality using hybrid Boolean, Fuzzy and Geostatical (Case study: Varamin plain). *Watershed Management Research (pajouhesh & Sazandegi) NO 111 PP: 87-99.*
- Shahrokhniya, H. (2009). Assessment of ability DRASTIC and GODS models in vulnerability: A case study of Varamin Plain Aquifer, Master Thesis. Geology Department, Azad University of research sciences, Tehran.
- Shiva, N., Kamali, A. (2011). Assessment of tablecloth contamination potential Groundwater of Zarand plain using the DRASTICS model in GIS. *National Irrigation and Evaporation Reduction Seminar. suitability analysis. Int J Geogr Inf Syst*, 4(4): 413-428.
- Valivand, F., Katibiye, H. (2017). The study of environmental effects of Nitrate transfer in Varamin aquifer using numerical modeling, *Journal of water and wastewater*, Vol. 30, No.4, pp: 130-136.
- Zheng, C., and Wang. P. (1999). MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model. Strategic Environmental Research and Development Program (SERDP).
- Van Stempvoort ,D., Ewert ,L., Wassenaar, L. (1993). Aquifer Vulnerability Index: A GIS - Compatible Method For Groundwater Vulnerability Mapping. *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques. no.18,pp.25-37.*