

ارزیابی آسیب‌پذیری کیفی آبخوان دشت مشهد با استفاده از تلفیق مدل‌های GODS و SINTACS

وجیهه قلی زاده* - دانشجوی دکتری مخاطرات ژئومورفولوژی دانشگاه خوارزمی.
امیر صفاری - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی.
علی احمدآبادی - دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی.
امیر کرم - دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۱۸ تأیید نهایی: ۱۴۰۲/۰۸/۲۱

چکیده

در حال حاضر آبخوان دشت مشهد به علت شرایط خاص خود و وجود واحدهای صنعتی و فعالیت‌های کشاورزی و شهرها و شهرک‌های متعدد از مناطق بحرانی و آسیب‌پذیر می‌باشد. هدف از این پژوهش، ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت مشهد به جهت پایش کیفی و مدیریت منابع آب زیرزمینی و جلوگیری از آلودگی‌های آتی آن است. داده‌ها و لایه‌های اطلاعاتی جهت استفاده در مدل‌های SINTACS و GODS از شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی تهیه گردید. در مدل SINTACS از هفت پارامتر و در مدل GODS از چهار پارامتر هیدروژئولوژیکی استفاده شده و پس از وزن دهی و رتبه‌بندی و تلفیق لایه‌ها در محیط نرم‌افزار ArcGIS، نقشه آسیب‌پذیری آبخوان دشت مشهد به دست آمد. نتایج حاصله از مدل SINTACS نشان می‌دهد که محدوده مطالعاتی در پنج پهنه با آسیب‌پذیری خیلی کم (۰/۴۴٪)، کم (۲۵/۵۷٪)، متوسط (۲۸/۵۸٪)، زیاد (۲/۷۹٪)، خیلی زیاد (۴۲/۶۱٪) قرار می‌گیرد. همچنین بر اساس نتایج مدل GODS محدوده مطالعاتی در پنج پهنه با آسیب‌پذیری خیلی کم (۰/۹۳٪)، کم (۳۱/۱۱٪)، متوسط (۱۱/۴۵٪)، زیاد (۱/۵۶٪) و خیلی زیاد (۵۴/۹۵٪) قرار می‌گیرد. مقایسه نتایج مدل‌ها نشان می‌دهد که به‌طور کلی میزان آسیب‌پذیری آبخوان از سمت جنوب شرق به سمت شمال غرب محدوده افزایش می‌یابد. صحت سنجی نقشه‌های تهیه شده با استفاده از روش آماری و محاسبه ضریب همبستگی بین نقشه‌های آسیب‌پذیری و لایه TDS در محیط نرم‌افزار TerrSet انجام شد. ضریب همبستگی برای مدل SINTACS و GODS به ترتیب ۰/۹۱ و ۰/۸۵ بدست آمد که این نتایج نشان دهنده دقت بالای هر دو مدل در پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان دشت مشهد می‌باشد.

واژگان کلیدی: آسیب‌پذیری، آبخوان دشت مشهد، SINTACS، GODS.

مقدمه

افزایش جمعیت، توسعه کشاورزی و صنایع باعث افزایش شدید در مصرف آب و به تبع آن کاهش کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی شده است. افت گسترده در سطح تراز منابع آب زیرزمینی شیرین و نفوذ آبهای سطحی و بارش‌ها به این منابع، جریان‌های سطحی را با کاهش دراماتیک مواجه کرده است و در اکثر مناطق ایران، آب زیرزمینی مهمترین منبع تامین کننده آب کشاورزی، شرب و صنعت گردیده است (اصغری مقدم و همکاران، ۱۳۹۶). برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی در کشور سبب افت شدید سطح ایستابی آبخوان و از بین رفتن لایه‌های آبدار زمین گردیده است. (رضائی توابع و همکاران، ۱۴۰۱) همچنین فعالیت‌های انسانی اخیر، محیط آسیب‌پذیری را به وجود آورده، بطوری که آب زیرزمینی را به عنوان منبعی طبیعی در معرض آلاینده‌های صنعتی و کشاورزی قرار داده اند (تاپینتا و هوداک^۱، ۲۰۰۳). در حال حاضر، بخش قابل ملاحظه‌ای از مصارف آب کشور بخصوص در بخش شرب، توسط منابع آب زیرزمینی تامین می‌شود که عمدتاً آبخوان‌های آزاد می‌باشد و این آبخوان‌ها از آسیب‌پذیری^۲ بالاتری نسبت به آلاینده‌های ناشی از فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و شهرنشینی برخوردار هستند. ارزیابی آسیب‌پذیری و آلودگی آبخوان برای مدیریت، توسعه و تخصیص کاربری اراضی، نحوه پایش کیفیت، پیشگیری و حفاظت از آلودگی آب‌های زیرزمینی ضروری است (صمدی^۳، ۲۰۱۵).

تا کنون تعاریف مختلفی از آسیب‌پذیری ارائه شده است از جمله (ترنر^۴ و همکاران، ۲۰۰۳) آن را به‌عنوان درجه‌ای از احتمال آسیب دیدن سیستم به دلیل قرار گرفتن در معرض خطر تعریف می‌کند. همچنین آسیب‌پذیری به‌عنوان استعداد حساسیت پذیری به خسارت و پتانسیل تغییر یا تحول در نظر گرفته می‌شود (گالوپین^۵، ۲۰۰۶). آسیب‌پذیری، در واقع برآورد نوع (مدیریتی و محیطی) و میزان (مقدار) آسیب‌های وارده به یک سیستم که در معرض آشفتگی و اختلال برون‌ی یا درونی قرار گرفته، می‌باشد (برند و جکس^۶، ۲۰۰۷). ارزیابی آسیب‌پذیری فرایندی است که طی آن اطلاعات مشخص‌کننده آسیب‌پذیری با یکدیگر تلفیق و نواحی با آسیب‌پذیری بالا از نواحی با آسیب‌پذیری کم از هم متمایز می‌شوند (سیویتا و دلا^۷، ۱۹۹۴). در ارزیابی کمی آسیب‌پذیری آبخوان به مدل‌های انتقال و جریان در ناحیه اشباع و غیر اشباع توجه می‌شود و اثر ویژگی‌های فیزیکی و آبی خاک، تغذیه و عمق نفوذ را در انتقال آلودگی ارزیابی می‌کند. این روش فرایندهای فیزیکی حرکت آب و مسیر مربوط به انتقال آلودگی را شبیه‌سازی و توزیع منطقه‌های حساس یا آسیب‌پذیر را مشخص می‌کند (المصری^۸، ۲۰۰۸).

تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌ها انجام گرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به مواردی که در ادامه می‌آید اشاره نمود: (بردبار^۹ و همکاران، ۲۰۱۹) آسیب‌پذیری آبخوان ساحلی قره‌سو-گرگانرود را در مقابل پیشروی آب شور بررسی نموده و نتیجه گرفتند که مدل GALDIT نسبت به روش‌های دیگر از جمله SINTACS و DRASTIC برتری دارد. (ابوبکر^{۱۰}، ۲۰۲۰) آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در انواع سفره‌های زیرزمینی را در مصر مطالعه کردند؛ نتایج این مطالعه وضعیت آسیب‌پذیری آبخوان در سه منطقه المینیا، وادی الترون و واحه الخارگا را در پهنه‌های کم تا متوسط نشان داده است. (آنیش^{۱۱} و همکاران، ۲۰۲۲) آسیب‌پذیری یک سفره آبی ساحلی شهری در هند را با استفاده از مدل DRASTIC مبتنی بر GIS بررسی نمودند. این مطالعه نشان می‌دهد که آلودگی و آسیب‌پذیری در برابر آلاینده‌ها یکی از دلایل اصلی نگرانی برای بیش از ۳,۸۲ میلیون نفر ساکن در این منطقه است. (خدائی و

1. Thapinta. and Hudak

2. Vulnerability

3. Samadi

4. Turner

5. Gallonin

6. Brand & Jax

7. Civita & della

8. Almasri

9. Bordbar

10. Abu-Bakr

11. Aneesh

همکاران، ۱۳۸۵) در پژوهشی با عنوان ارزیابی آسیب پذیری آبخوان دشت جوبین به روش های GODS و DRASTIC، پهنه بندی آسیب پذیری آبخوان دشت جوبین را به انجام رسانده اند. مقایسه نتایج حاصل از مدل های GODS و DRASTIC نشان داده است که در هر دو روش، آسیب پذیری آبخوان دشت جوبین در دو گروه آسیب پذیری کم و متوسط قرار می گیرد. در روش GODS محدوده آسیب پذیری کم ۳۵ درصد و آسیب پذیری متوسط ۶۵ درصد و در روش DRASTIC آسیب پذیری کم ۴۹ درصد و آسیب پذیری متوسط ۵۱ درصد از مساحت دشت را به خود اختصاص داده است. (سیف و همکاران، ۱۳۹۳) در مطالعه خود به ارزیابی و تهیه نقشه آسیب پذیری آبخوان های کارستی با استفاده از مدل COP پرداخته اند که با استفاده از سه پارامتر لایه پوشاننده، غلظت جریان و رژیم بارش به میزان آسیب پذیری آبخوان کلین در کرمانشاه دست یافته اند. نتایج نشان داده است که به ترتیب ۱۲/۲۲٪ و ۴۸/۳۲٪ و ۳۹/۴۶٪ از مساحت منطقه در پهنه های با آسیب پذیری خیلی کم، کم و متوسط قرار گرفته اند. (برزگر و همکاران، ۱۳۹۳) در پژوهشی منشاء ناهنجاری غلظت نیترات و آسیب پذیری منابع آب زیرزمینی دشت تبریز را با استفاده از روش های GOD و AVI را بررسی نمودند که مشخص گردید بیشترین و کمترین غلظت نیترات به ترتیب مربوط به نمونه های آب از چاه های واقع در انتهای غربی شهر تبریز (منطقه قراملک) و انتهای غربی دشت (منطقه ساتلو) می باشند. (فعال اقدام و همکاران، ۱۳۹۶) در پژوهشی آسیب پذیری آبخوان دشت ییلوردی آذربایجان شرقی را با روش های DRASTIC و SINTACS مورد مطالعه قرار داده و دریافته اند که از کل مساحت منطقه مطالعاتی ۳۶/۵ درصد در پهنه با آسیب پذیری متوسط، ۲۰ درصد در پهنه با آسیب پذیری زیاد و ۴۳/۵ درصد در پهنه آسیب پذیری متوسط قرار دارد و با وجود کارایی بالاتر مدل SINTACS برای بررسی آسیب پذیری، روش های ترکیبی نتایج بهتری را ارائه می کند. (ملکی و همکاران، ۱۳۹۸) در پژوهش خود آسیب پذیری آبخوان های کارستی دشت کرمانشاه و توده بیستون - پراو را با استفاده از مدل COP بررسی و مطالعه نمودند که نتایج آن نشان می دهد که ۳۱/۴٪ مساحت منطقه در پهنه آسیب پذیری متوسط و ۳۰/۷٪ مساحت منطقه در پهنه آسیب پذیری کم واقع شده و ۳۷/۹٪ در پهنه با آسیب پذیری خیلی کم واقع شده است. (آقارزی آشتیانی و همکاران، ۱۳۹۸) پژوهشی با عنوان تعیین علل تغییر کیفیت آب زیرزمینی با روش های ایزوتوپی و شیمیایی در آبخوان شبستر - صوفیان انجام دادند؛ نتایج نشان داد که آب دریاچه ارومیه عامل شوری آبخوان نیست. (ندیری و همکاران، ۱۳۹۸) در مقاله ارزیابی آسیب پذیری آبخوان دشت خوی با استفاده از روش ترکیبی و نیز با تلفیق مدل های DRASTIC و SINTACS و صحت سنجی با استفاده از مقادیر نیترات اندازه گیری شده، به این نتیجه رسیده اند که روش ترکیبی، شاخص همبستگی و ضریب همبستگی بیشتری نسبت به روش های DRASTIC و SINTACS دارد و از این رو برای ارزیابی آسیب پذیری این منطقه مناسب تر است. در روش ترکیبی ۱۹، ۴۲ و ۳۹ درصد از مساحت آبخوان دشت خوی به ترتیب در محدوده آسیب پذیری کم، متوسط و زیاد قرار دارند. (افتخاری و همکاران، ۱۳۹۸)، در مقاله ای با عنوان ارزیابی آسیب پذیری کیفی آبخوان دشت بیرجند به روش SINTACS، به این نتیجه دست یافته اند که ۱۲/۸۱ درصد از مساحت منطقه مطالعاتی دارای آسیب پذیری در محدوده متوسط تا زیاد، ۸۰/۴۷ درصد از مساحت منطقه دارای آسیب پذیری زیاد و ۶/۷۱ درصد از مساحت منطقه دارای آسیب پذیری خیلی زیاد می باشد. (فعال و همکاران، ۱۴۰۰) کاربرد تغذیه سطحی آبخوان در اصلاح روش GALDIT برای ارزیابی خطر پیشروی آب شور در آبخوان قم را بررسی و مطالعه کردند. نتایج پژوهش نشان داد که نواحی با آسیب پذیری زیاد و متوسط در بخش شرقی آبخوان قم با وسعت حدود ۱۴ درصد از کل مساحت آبخوان مستعد پیشروی آب شور بوده و می توانند به عنوان محدوده گسترش آب شور برای پایش و مدیریت بهینه آبخوان ساحلی در نظر گرفته شوند.

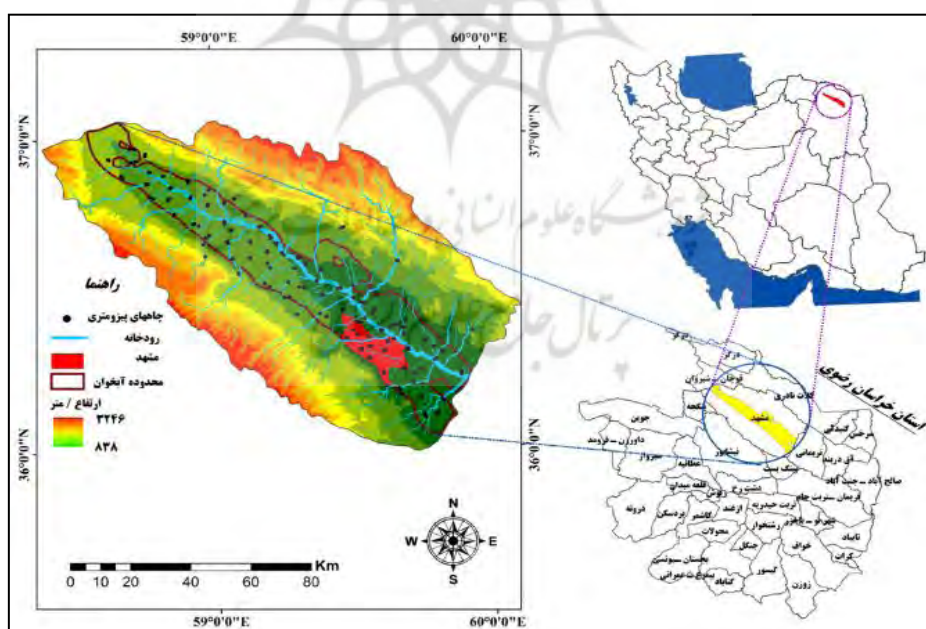
محدوده مورد مطالعه در این پژوهش با عنوان آبخوان دشت مشهد به عنوان مرکز عمده فعالیت های صنعتی و کشاورزی استان است که از سال ۱۳۴۷ به دلیل افت سطح آب زیرزمینی به عنوان دشت ممنوعه اعلام شده بود، امروزه علاوه بر اینکه از لحاظ کمی در وضعیت ممنوعه بحرانی قرار دارد، از لحاظ کیفی نیز با چالش های جدی مواجه شده است؛ بنابراین

هدف کلی از انجام این تحقیق، شناخت و تحلیل وضعیت آسیب‌پذیری کیفی آبخوان دشت مشهد است که سبب می‌شود پتانسیل آسیب‌پذیری نسبت به آلودگی با دقت بیشتری قابل تعیین باشد که در این پژوهش با استفاده از مقایسه نقشه‌ها و نتایج دو مدل GODS و SINTACS به انجام می‌رسد.

روش تحقیق

معرفی منطقه مورد مطالعه

دشت مشهد به صورت دره‌ای وسیع در شمال شرقی ایران بین رشته‌کوه‌های بینالود و هزار مسجد واقع شده است. آبخوان دشت مشهد با مختصات جغرافیایی $58^{\circ}29'$ تا $59^{\circ}56'$ طول شرقی و $35^{\circ}58'$ تا $37^{\circ}03'$ عرض شمالی در حوضه آبریز رودخانه کشف رود واقع شده است. وسعت محدوده مطالعاتی مشهد-چناران ۹۹۵۷ کیلومتر مربع، وسعت آبخوان آن ۲۷۰۰ کیلومتر مربع و وسعت شهر مشهد حدود ۳۵۲ کیلومتر مربع می‌باشد. زهکش اصلی این محدوده رودخانه کشف رود است که از جهت شمال غرب به سمت جنوب شرق در دشت مشهد جریان دارد. در این منطقه سازندهای مختلف دوران اول تا کواترنر دیده می‌شود. دشت مشهد از آبرفت‌های کواترنر پو شیده شده است که حاصل فعالیت رودخانه کشف رود و سیلاب‌های فصلی رودخانه‌هایی نظیر رادکان، کارده، طرهبه و شاندیز است که از کوه‌های هزار مسجد و بینالود سرچشمه می‌گیرند (لشگری پور و همکاران، ۱۳۸۴). در سرتاسر دشت مشهد یک آبخوان آزاد گسترش یافته، که تا حاشیه ارتفاعات بینالود ادامه دارد. به علت ناهمواری سنگ کف و وجود نواحی تغذیه از کوه‌های بینالود و هزار مسجد، این آبخوان همگن نبوده و از نظر آبدهی نیز وضع یکسانی ندارد (اکبری و همکاران، ۱۳۸۸).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

روش شناسی

روش های مختلفی برای بررسی و ارزیابی پتانسیل آلودگی در یک آبخوان وجود دارد که از آن جمله می توان به روش های مبتنی بر شبیه سازی، روش های آماری و روش های شاخص همپوشانی اشاره کرد (المصری و کالوارچی، ۲۰۰۵). اصولاً روش های شاخص و همپوشان از ترکیب پارامترهای هیدروژئولوژیک مؤثر در انتقال آلودگی به آب های زیرزمینی تشکیل می شوند. در این روش ها برای تعیین اهمیت نسبی، هر کدام از پارامترها نسبت به سایرین ارزیابی می شوند. همچنین روش های مختلفی برای ارزیابی آسیب پذیری ارائه شده که می توان آن ها را به سه دسته کلی شامل: رتبه دهی توصیفی، آماری و تحلیلی و روش ترکیبی تقسیم کرد (نیکنام و همکاران، ۲۰۰۷). از مهم ترین روش های رتبه دهی می توان به روش های GOD، AVI، DRATIC، SINTACS و SI اشاره نمود. این روش ها بر پایه تلفیق لایه های حاصل از پارامترهای مختلف بنا نهاده شده اند و اساس کار یکسانی دارند. همچنین این روش ها در بکارگیری نوع و تعداد پارامترها با هم تفاوت داشته ولی در نهایت منجر به ثبت یک شاخص عددی یا امتیاز برای هر ویژگی می گردند (اصغری مقدم و همکاران، ۱۳۹۶). در این پژوهش، ارزیابی آسیب پذیری آبخوان دشت مشهد با مدل های SINTACS و GODS انجام شده و محیط ArcGIS به دلیل توانایی بسیار زیاد در مدیریت حجم انبوهی از داده های مکانی، جهت تحلیل پارامترهای مدل SINTACS و GODS و تهیه نقشه آسیب پذیری مورد استفاده قرار گرفته است.

در پژوهش حاضر برای تهیه لایه عمق سطح ایستابی از آمار میانگین سطح آب اندازه گیری شده در چهار نوبت در هر سال برای یک دوره ۱۰ ساله (۱۳۹۱-۱۴۰۰) از ۳۹ چاه پیژومتری به دست آمده، استفاده شد. از روش پیسکوپو (۲۰۰۱) برای تهیه لایه تغذیه خالص استفاده شد. نقشه این پارامتر از هم پوشانی سه لایه بارندگی، شیب (درصد) و نفوذپذیری در محیط نرم افزار ArcGIS تهیه شد. جهت تهیه نقشه محیط آبخوان و منطقه غیر اشباع، از داده های ۳۹ مقطع حفاری و لوله گذاری و کاوش های ژئوفیزیکی و زمین شناسی تهیه شده توسط شرکت آب منطقه ای خراسان رضوی استفاده گردید. نقشه شیب از DEM ۱۲/۵ متری همچنین نقشه بافت خاک از نتایج تجزیه و تحلیل شیمیایی و فیزیکی نمونه های برداشت شده توسط جهاد کشاورزی تهیه گردید. جهت تهیه نقشه بارندگی محدوده مورد مطالعه از آمار ۳۴ ایستگاه سینوپتیک، اقلیمی و بارانسنجی برای یک دوره ۲۰ ساله استفاده شده است.

مدل SINTACS

یکی از پر استفاده ترین و شناخته شده ترین روش های شاخص همپوشانی مدل SINTACS می باشد (سیویتا، ۱۹۹۴). این روش اولین بار توسط Civita و همکاران در سال ۱۹۹۰ برای بررسی آسیب پذیری جنوب ایتالیا به کار برده شد. روش SINTACS از روش DRATIC مشتق شده است. در حقیقت پارامترهای این روش همان پارامترهای روش DRATIC است ولی با این تفاوت که فرایند وزن رتبه دهی پارامترها در روش SINTACS انعطاف بیشتری دارد (سیویتا، ۱۹۹۰). یکی از مزیت های اصلی مدل SINTACS انجام ارزیابی آسیب پذیری با استفاده از تعداد زیادی لایه های اطلاعاتی است که تأثیر خطاها و یا عوامل نامعلوم را بر روی خروجی نهایی محدود می کند (پیسویتا و همکاران، ۲۰۱۵). در این مدل به منظور ارزیابی قابلیت آسیب پذیری آلودگی نسبی آب های زیرزمینی، هفت پارامتر هیدروژئولوژیک به کار گرفته می شود. در این روش شاخص آسیب پذیری از مجموع حاصل ضرب وزن و رتبه هفت پارامتر یاد شده، مطابق رابطه ۱ به دست می آید. کلاس بندی و ارزش گذاری کلاس های مختلف مربوط به هر کدام از

1. Almasri and Kaluarachchi

2. Niknam et al

3. Civita, 1994

4. Civita, 1990

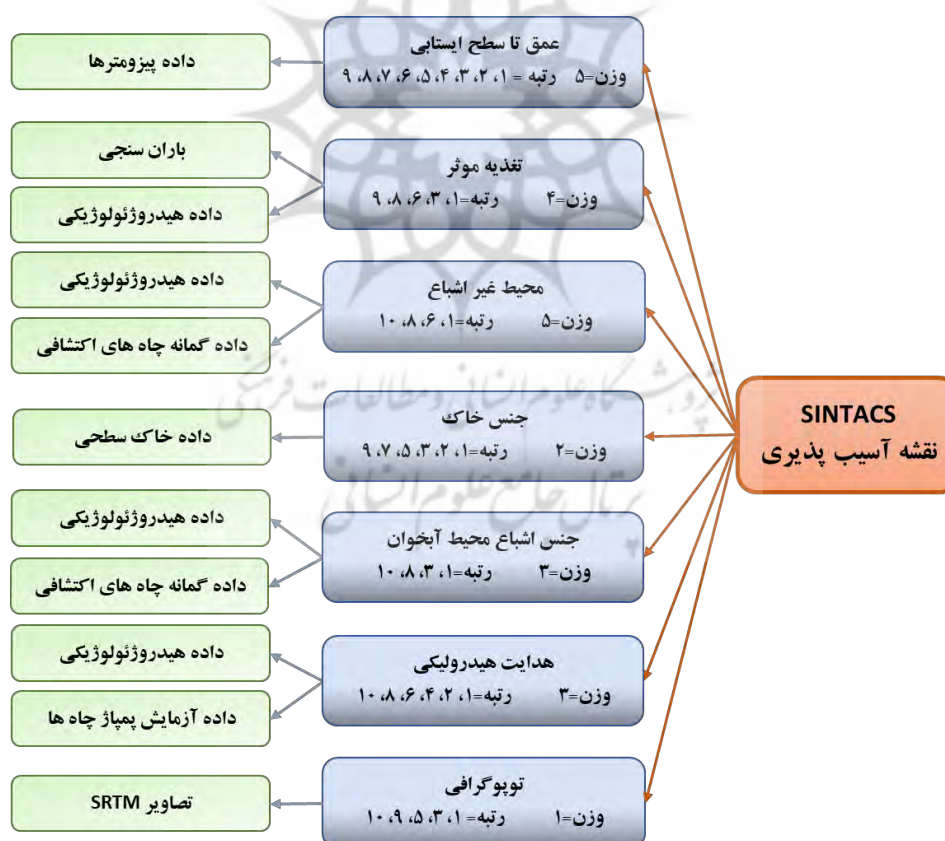
5. Pisciotta

پارامترها در محیط GIS انجام می‌شود. به هر کدام از مشخصه‌ها با توجه به اهمیت تاثیر در آلودگی سیستم آب زیرزمینی یک وزن نسبی از ۱ تا ۵ تعلق می‌گیرد که نشان دهنده تاثیر نسبی هر مشخصه بر انتقال آلودگی در آب‌های زیرزمینی است. در این مدل به بازه‌های هر یک از مشخصه‌های هیدرولوژیک نیز یک رتبه از ۱ تا ۱۰ براساس تاثیر آنها بر آسیب پذیری اختصاص داده می‌شود و به کاربر این امکان را می‌دهد که مدل SINTACS را برای ناحیه مطالعاتی مورد استفاده قرار دهد. برای وزن دهی و رتبه دهی روش SINTACS از رتبه‌ها و وزن‌های ارائه شده توسط (سیویتا^۱، ۱۹۹۴) استفاده شده است.

رابطه (۱): $SINTACS\ Index = S_{Or}S_{Ow} + I_rI_w + N_rN_w + T_rT_w + A_rA_w + C_rC_w + S_{Vr}S_{Vw}$

$$\sum_i^7 I_{SINTACS} = P_i \times W_i$$

که در این رابطه S عمق آب زیرزمینی، I تغذیه خالص، N اثر منطقه غیراشباع، T نوع خاک، A محیط آبخوان، C هدایت هیدرولیکی، SV توپوگرافی (شیب)، W وزن و r رتبه مربوط به هر کدام از پارامترهای مدل می‌باشد. در جدول ۲ وزن‌ها و رتبه‌های مربوط به مدل SINTACS ملاحظه می‌شود. همچنین در شکل ۲ ساختار مدل SINTACS شامل وزن‌ها و رتبه‌های موجود موثر در تهیه نقشه آسیب پذیری کیفی آبخوان دشت مشهد ارائه شده است.



شکل ۲: ساختار مدل SINTACS برای ارزیابی پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان دشت مشهد

¹. CIVITA, M.1994

روش GODS

این روش از چهار پارامتر نوع آبخوان، خصوصیات منطقه غیراشباع، عمق آب زیرزمینی و نوع بافت سطحی خاک استفاده می کند. ارزش کلاس های مختلف پارامترها از صفر تا یک تغییر می کند و به تمامی پارامترها وزن یکسانی اختصاص داده می شود. شاخص آسیب پذیری GODS از حاصل ضرب پارامترها به دست می آید. (خدائی و همکاران، ۱۳۸۵) در این روش، شاخص آسیب پذیری منابع آب زیرزمینی با سه پارامتر اصلی تاثیرگذار در نظر گرفته شده و از طریق رابطه ۲ بدست می آید:

$$I_v = G \times O \times D \times S \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این رابطه I_v شاخص آسیب پذیری، G امتیاز نوع محیط آبخوان، O امتیاز لیتولوژی منطقه غیر اشباع (پارامتر لیتولوژی فقط برای سفره های آزاد محاسبه می شود) و D امتیاز عمق سطح آب زیرزمینی است (فوستر^۱، ۱۹۸۷) شکل ۳ الگوریتم این مدل را نشان می دهد. طبقه بندی شاخص آسیب پذیری مدل GODS مطابق جدول ۳ ارائه شده است. داده های جمع آوری شده وارد محیط GIS شده و با توجه به موقعیت مکانی آنها روی نقشه منطقه پیاده می شوند. با توجه به مقادیر هر یک از پارامترها، نقشه پهنه بندی آنها به دست می آید. نقشه های تهیه شده با استفاده از برنامه جانبی Raster Calculator در محیط ArcGIS و با توجه به ضرایب وزنی مربوط تلفیق شده و نقشه نهایی به دست می آید (نوبین پور و خضری، ۱۳۹۸). در شکل (۳) ساختار مدل GODS برای ارزیابی پتانسیل آسیب پذیری آبخوان دشت مشهد ارائه گردیده است.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

^۱- Foster

یک‌ساله به درون زمین وارد می‌شود. یکی از عوامل اصلی انتقال مواد آلاینده به درون زمین، حرکت عمودی آب می‌باشد که با خود مواد آلاینده را شسته و به صورت محلول یا کلوئیدی و یا معلق به درون زمین حمل می‌کند. شدت و گذر مواد محلول به‌شدت و حرکت عمودی آب به درون زمین بستگی دارد (بوئر^۱، ۱۹۷۸). با افزایش میزان تغذیه خالص در یک منطقه پتانسیل آلودگی آب‌های زیرزمینی آن منطقه افزایش خواهد یافت (ناصری^۲ و همکاران، ۲۰۱۱).

منطقه غیراشباع (N):

این لایه نشان‌دهنده جنس خاک از منطقه زیرین محیط خاک تا سطح ایستابی، یعنی ناحیه غیراشباع است. (خدائی و همکاران، ۱۳۸۵). این محدوده اساساً غیراشباع بوده و یا به صورت ناپوسته اشباع می‌باشد و عبور آلاینده و رقیق شدن آن را کنترل می‌کند (احمدی^۳ و همکاران، ۲۰۰۹). منطقه غیراشباع، طول مسیر و چگونگی روند حرکت آلوده‌کننده را در کنترل دارد و از این رو بر زمان لازم برای مقدار و میرایی موادی که در برخورد با آلودگی هستند، مؤثر است (پلمیل^۴ و همکاران، ۲۰۰۲) ویژگی‌های هیدرولیکی مواد زمین‌شناسی از عوامل کلیدی تعیین‌کننده آسیب‌پذیری آبخوان محسوب می‌شوند (آلر^۵ و همکاران، ۱۹۸۷).

جنس خاک (T):

به بخش هوازده بالایی منطقه غیراشباع گفته می‌شود که تا حد نفوذ ریشه گیاهان ادامه دارد. این بخش از نظر فعالیت‌های بیولوژیکی و وجود مواد آلی اهمیت بسیاری دارد و میزان آب نفوذی و نیز نفوذ آلاینده‌ها را به داخل آبخوان کنترل می‌کند (احمدی و همکاران، ۱۳۹۲). این فاکتور که برای تعیین توزیع مکانی انواع خاک در منطقه استفاده می‌شود، نشان‌دهنده بافت خاک از سطح زمین تا قسمت بالایی منطقه غیراشباع می‌باشد. لایه خاک معمولاً با ضخامتی حدود ۰/۵ تا ۲ متر به دلیل فعالیت نسبتاً زیاد میکروبی، وجود مواد آلی زیاد و وجود ریشه گیاهان، برای حذف و کاهش غلظت آلاینده‌ها پتانسیل زیادی دارد (امیراحمدی و همکاران، ۱۳۹۰). محیط خاک برحسب رده بندی بافتی آن مشخص می‌گردد و بر اساس پتانسیل آلودگی امتیازبندی می‌شود (مردان و یارقلی، ۱۳۹۹). پتانسیل آلودگی آبخوان به خصوصیات خاک مانند نفوذپذیری، بافت و درصد مواد آلی خاک بستگی دارد (کیم^۶، ۱۹۹۹).

محیط آبخوان (A):

این بخش به خصوصیات مواد تشکیل‌دهنده منطقه اشباع مانند میزان تخلخل، جنس و اندازه ذرات مربوط می‌باشد (براهیم و همکاران^۷، ۲۰۱۲) که میزان پویایی و تحرک آلودگی و به بیانی فرایندهای رقیق‌سازی آلودگی مانند تجزیه شیمیایی، جذب، پخش و تأخیر را کنترل می‌کند (احمدی و همکاران، ۱۳۹۲). محیط آبخوان و مواد تشکیل‌دهنده آن تعیین‌کننده طول و روند مسیر سیستم جریان آب زیرزمینی در سفره است (وودوریس^۸ و همکاران، ۲۰۱۰). محیط آبخوان بیانگر ویژگی میرایی مواد تشکیل‌دهنده آبخوان است. (خدائی و همکاران ۱۳۸۵) هر چه ذرات مواد تشکیل‌دهنده محیط آبخوان دانه‌درشت‌تر باشد، میزان نفوذپذیری در این ناحیه بیشتر خواهد بود و هیچ واکنشی بین آلاینده و خاک صورت نخواهد گرفت و در نتیجه سرعت زیاد انتشار آلاینده‌ها، پتانسیل آلودگی افزایش می‌یابد (نخعی و همکاران، ۱۳۹۲).

1. Bouwer

2. Naseri

3. Ahmadi

4. Plymale

5. Aller

6. kim

7. Brahim

8. Voudouris

هدایت هیدرولیکی (C):

این پارامتر بیان کننده قابلیت هدایت آب و آلاینده های محلول در آن است. اطلاعات مربوط به هدایت هیدرولیکی از محاسبات آزمایش پمپاژ حاصل می گردد (خدائی و همکاران، ۱۳۸۵) این پارامتر انتقال و پراکندگی آلاینده را از نقطه تزریق در داخل منطقه اشباع کنترل می کند (رحمان^۱، ۲۰۰۸). به طور کلی با توجه به اینکه در آزمایش‌های پمپاژ، مقدار پارامتر ضریب قابلیت انتقال آب اندازه گیری می شود، لذا برای تهیه نقشه هدایت هیدرولیکی با استفاده از ضخامت اشباع آبخوان، مقدار هدایت هیدرولیکی از تقسیم ضریب قابلیت انتقال آب بر ضخامت اشباع به دست می آید (حسین زاده و همکاران، ۱۳۹۵). ضریب انتقال یا قابلیت انتقال یک لایه آبدار عبارت است از مقدار آبی که از یک واحد سطح مقطع لایه آبدار تحت شیب هیدرولیکی واحد عبور می کند و واحد آن مترمربع در روز (متر در روز در هر متر ضخامت لایه) است. در مفهوم ضریب انتقال فرض می شود که حرکت آب در آبخوان به صورت افقی است (علی زاده^۲، ۲۰۱۱).

توپوگرافی (SV):

توپوگرافی حرکت آلوده کننده و نگهداری آن را بر سطح زمین در کنترل دارد. شیب های کم، موجب کندي حرکت آلوده کننده ها در سطح زمین شده و آلوده کننده ها شانس بیشتری برای نفوذ می یابند (خدائی و همکاران ۱۳۸۵). توپوگرافی به صورت شیب و تغییر شیب سطح زمین مورد توجه قرار می گیرد. شیب هایی که فرست نفوذ بالاتری را فراهم می کنند، پتانسیل آلودگی بالاتری را دارند (پلیمیل^۳ و همکاران، ۲۰۰۲). متوسط در صد شیب بین دو نقطه از تقسیم فاصله عمودی بر فاصله افقی بین آن‌ها و ضرب این مقدار در عدد ۱۰۰ حاصل می شود (استریگر^۴ و همکاران، ۲۰۰۶).

نوع آبخوان (G):

نوع آبخوان از لحاظ آزاد بودن یا محبوس بودن توسط این پارامتر ارزیابی می گردد. اطلاعات مربوط به نوع آبخوان با استفاده از اطلاعات نقشه منابع آب حاصل می گردد.

لیتولوژی (O)

لیتولوژی به بررسی و پژوهش در خاستگاه، ساختار، ویژگیها و تاریخ سنگ‌های لایه جامد زمین می پردازد و سنگها را از لحاظ منشأ، سن، ترکیب و توزیع مورد مطالعه قرار داده و آنها را از لحاظ خواص فیزیکی و بالینی آنها طبقه بندی می کند. بر این اساس، محدوده آبخوان دشت مشهد از لحاظ خصوصیات لیتولوژیکی شامل سه دسته مواد سخت نشده (رسوبات)، مواد سخت شده (سنگ های متخلخل) و مواد سخت شده (سنگ های متراکم) تقسیم می باشد.

بحث و یافته‌ها

برای رسیدن به اهداف تحقیق و تهیه هر یک از لایه‌های استفاده شده در مدل GODS و SINTACS، از سیستم اطلاعات جغرافیایی و فناوری سنجش از دور استفاده شد که در ادامه، بررسی هر یک از لایه ها و چگونگی تهیه آن ها

1. Rahman
2. Alizadeh
3. Plymale
4. Stigter

تشریح شده است. در جدول (۱) وزن هریک از طبقات لایه‌های استفاده شده در روش SINTACS ارائه گردیده است. همچنین وزن دهی پارامترهای مربوط به روش GODS نیز در جدول ۲ ارائه گردیده است.

عمق سطح آب زیرزمینی (S):

لایه عمق آب زیرزمینی با استفاده از روش درون یابی IDW به دلیل دقت بیشتر نسبت به سایر روش‌ها در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. مطابق جدول (۲) این لایه به ۹ محدوده از ۰-۳ الی >36 طبقه بندی شده و برای هر یک از محدوده‌ها وزن متناسب از ۱ تا ۹ ثبت شده است.

تغذیه خالص (I):

در تحقیق حاضر از روش پیسکوپو^۱ برای تهیه لایه تغذیه خالص استفاده شد. این روش سه عامل بارندگی، شیب (درصد) و نفوذپذیری خاک را مد نظر قرار می‌دهد. برای تهیه نقشه بارندگی از آمار متوسط بارندگی سالانه ایستگاه‌های موجود در منطقه و روش درون‌یابی IDW به دلیل دقت بیشتر استفاده شد. نقشه شیب با استفاده از مدل رقومی ارتفاع تهیه شد و نقشه نفوذپذیری خاک نیز بر اساس نقشه خاک منطقه مورد مطالعه تهیه گردید. رتبه‌بندی نقشه‌های نفوذپذیری خاک، بارش، شیب و تغذیه خالص در جدول (۱) ارائه شده است. با توجه به اینکه مقدار بارش برای منطقه کمتر از ۵۰۰ میلی متر است، بنابراین طبق رتبه‌های ارائه شده در روش پیسکوپو کل منطقه مطالعاتی رتبه یک خواهد داشت. بر اساس معادله پیسکوپو نقشه‌های رتبه‌بندی شیب و نفوذپذیری و رتبه بارش یعنی ۱ در محیط نرم‌افزار ArcGIS جمع شده و نقشه تغذیه حاصل شد.

$$\text{رابطه ۳: درصد شیب} + \text{میزان بارندگی} + \text{نفوذپذیری خاک} = \text{تغذیه خالص}$$

جدول ۱: رتبه‌بندی لایه تغذیه خالص (پیسکوپو، ۲۰۰۱)

تغذیه خالص		شیب / درصد		بارندگی / میلی‌متر		نفوذپذیری خاک	
دامنه / درصد	فاکتور	دامنه / درصد	فاکتور	دامنه / درصد	فاکتور	دامنه / درصد	فاکتور
۱۱-۱۳	۱۰	$2 <$	۴	$850 >$	۴	بالا	۵
۹-۱۱	۸	۲-۱۰	۳	۷۰۰-۸۵۰	۳	نسبتا بالا	۴
۷-۹	۵	۱۰-۳۳	۲	۵۰۰-۷۰۰	۲	متوسط	۳
۵-۷	۳	$33 >$	۱	$500 <$	۱	کند	۲
۳-۵	۱	-	-	-	-	خیلی کند	۱

منطقه غیراشباع (N):

به منظور تهیه لایه محیط غیراشباع، از لاگ حفاری و لوله گذاری ۳۹ مقطع حفاری موجود در آبخوان دشت مشهد استفاده گردید و جهت پهنه بندی با استفاده از روش درونیابی معکوس فاصله^۲ (IDW) به دلیل داشتن کمترین خطا انجام شد (شکل ۵).

نحوه تهیه اطلاعات مربوط به منطقه غیراشباع همانند محیط آبخوان بوده است با این تفاوت که در این مورد، دانه بندی و خصوصیات رسوبات مابین سطح آب زیرزمینی و سطح زمین مورد توجه قرار گرفته است. بر این اساس هر چه منطقه غیر اشباع نفوذپذیری بیشتری داشته است، واکنش کمتری بین آلاینده‌ها و ذرات خاک شکل گرفته و سرعت شستشو به

¹. Piscopo

². Inverse Distance Weighted

سمت آبخوان سریعتر و بیشتر شده است؛ بنابراین نتیجه پتانسیل آلودگی افزایش پیدا کرده است. مطابق آنچه که در جدول (۲) نیز قابل مشاهده است. سازندهای محدوده مطالعاتی شامل رس، مارن و سیلت (وزن ۱)، شیل (وزن ۶)، شن و ماسه (وزن ۸) و گراول (وزن ۱۰) می باشد، بنابراین میزان نفوذپذیری در مناطقی با سازند گراول بیش از سایر نقاط می باشد.

جنس خاک (T):

با استفاده از نتایج تجزیه و تحلیل ۳۹ پروفیل برداشت شده از منطقه، محیط خاک برحسب رده بندی بافتی آن مشخص شده و بر اساس پتانسیل آلودگی امتیازبندی گردیده است. محیط خاک در محدوده مطالعاتی شامل رسی (وزن ۱)، لوم رسی (وزن ۲)، سیلت (وزن ۳)، لوم سیلتی (وزن ۵)، لومی (وزن ۷) و لومی ماسه ای (وزن ۹) طبقه بندی شده است. با توجه به اینکه پتانسیل آلودگی آبخوان به خصوصیات خاک مانند نفوذپذیری، بافت و درصد مواد آلی خاک بستگی دارد، وجود مواد با بافت ریزدانه نظیر سیلت و رس، تراوایی نسبی خاک را کاهش داده و حرکت آلوده کننده‌ها را محدود ساخته اند و مواد درشت دانه مانند ماسه حرکت آلاینده را در بخش هایی از محدوده مطالعاتی تسهیل نموده است.

محیط آبخوان (A):

برای تهیه نقشه این فاکتور از اطلاعات مربوط به جنس طبقه اشباع در ۳۹ مقطع حفاری و لوله گذاری و کاوش‌های ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی در محدوده مورد مطالعه استفاده شد. سازندهای محیط آبخوان در محدوده مطالعاتی شامل رس و سیلت (وزن ۱)، آهک (وزن ۳)، شن و ماسه (وزن ۸) و گراول (وزن ۱۰) می باشد، بنابراین میزان نفوذپذیری در مناطقی با سازند گراول بیش از سایر نقاط می باشد. در مناطقی با میزان نفوذپذیری بالاتر، هیچ واکنشی بین آلاینده و خاک به جود نیامده و به علت سرعت زیاد انتشار آلاینده‌ها، پتانسیل آلودگی بیشتر می باشد. جهت پهنه بندی از روش درونیابی معکوس فاصله (IDW) به دلیل داشتن کمترین خطا استفاده شد (شکل ۷).

هدایت هیدرولیکی (C):

در این پژوهش برای تهیه نقشه هدایت هیدرولیکی، ضریب قابلیت انتقال بر ضخامت لایه اشباع تقسیم شده است. نقشه قابلیت انتقال از نتایج آزمایش‌های پمپاژ و با استفاده از روش درونیابی IDW به دست آمد. نقشه ضخامت لایه اشباع نیز از درونیابی داده‌های مربوط به عمق ناحیه اشباع حاصل از مقاطع حفاری به روش IDW حاصل شد. هدایت هیدرولیکی آبخوان دشت مشهد بر اساس مطالعات انجام شده به ۶ محدوده از $1/3-0/08$ تا بیش از ۲۴ و با وزن دهی از ۱ تا ۱۰ مطابق جدول (۲) بدست آمد.

توپوگرافی (SV):

برای تهیه این لایه از مدل ارتفاعی رقومی منطقه (DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر در نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد و سپس نقشه شیب از لایه ارتفاعی رقومی استخراج شد و در نهایت بعد از رتبه دهی با استفاده از رتبه بندی مربوط به هر کدام از روش‌ها، لایه توپوگرافی برای روش SINTACS و GODS تهیه گردید (شکل‌های ۴ و ۵). متوسط درصد شیب بین دو نقطه از تقسیم فاصله عمودی بر فاصله افقی بین آن‌ها و ضرب این مقدار در عدد ۱۰۰ حاصل شده است. با توجه به عامل توپوگرافی، شیب‌هایی که فرصت نفوذ بالاتری را فراهم کرده اند، پتانسیل آلودگی بالاتری را نیز نشان می دهند.

نوع آبخوان (G):

اطلاعات مربوط به نوع آبخوان با استفاده از اطلاعات نقشه منابع آب حاصل گردیده است. نوع آبخوان مطابق جدول ۳ وزن دهی شده است که شامل آبخوان آزاد (وزن ۱)، آزاد با پوشش (وزن ۵/۰)، نیمه محبوس (وزن ۳/۰)، محبوس (وزن ۲/۰)، آرتزین (وزن ۱/۰) و فاقد آبخوان (وزن ۰) می باشد. نوع آبخوان در سرتا سر محدوده مطالعاتی از نوع آبخوان آزاد بوده است.

لیتولوژی (O)

برای تهیه لایه لیتولوژی از نقشه های زمین شناسی محدوده مورد مطالعه استفاده گردید. بر این اساس محدوده مطالعاتی آبخوان دشت مشهد از لحاظ خصوصیات لیتولوژیکی شامل سه دسته مواد می باشد. مواد سخت نشده (رسوبات) که عناصر تشکیل دهنده آن شامل گراول مخروط افکنه، ماسه آبرفتی، ماسه یخچالی، ماسه بادی، سیلت آبرفتی و خاکهای برجا می باشند. مواد سخت شده (سنگ های متخلخل) که عناصر تشکیل دهنده آن شامل سنگ آهک گچ دار، ماسه سنگ، سیلت استون، گل سنگ می باشد و مواد سخت شده (سنگ های متراکم) که عناصر تشکیل دهنده آن شامل سنگ آهک کارستی، گدازه های عصر حاضر، سنگ های آذرین و دگرگونی می باشد. همانطور که در جدول ۴ مشاهده می شود هر یک از این عناصر از ۴/۰ تا ۱ وزن دهی شده اند.

جدول ۲: رتبه و وزن پارامترهای مدل SINTACS (افتخاری و همکاران، ۱۳۹۸)

عمق سطح آب زیرزمینی (متر)						
محدوده	۳-۰	۵-۳	۷-۵	۱۰-۷	۱۳-۱۰	۲۰-۱۳
رتبه	۹	۸	۷	۶	۵	۴
تغذیه موثر (میلی متر)						
محدوده	۵۰-۰	۱۰۰-۵۰	۱۸۰-۱۰۰	۲۵۰-۱۸۰	>۲۵۰	
رتبه	۱	۳	۶	۸	۹	
هدایت هیدرولیکی (متر/روز)						
محدوده	۰/۱-۸/۳	۱/۳-۳/۹	۳/۸-۹/۶	۸/۱۳-۶	۲۴-۱۳	>۲۴
رتبه	۱	۲	۴	۶	۸	۱۰
توپوگرافی (شیب/درصد)						
محدوده	۲-۰	۶-۲	۱۲-۶	۱۸-۱۲	>۱۸	
رتبه	۱۰	۹	۵	۳	۱	
محیط آبخوان						
نوع سازند	رس و سیلت	آهک	شن و ماسه	گراول		
رتبه	۱	۳	۸	۱۰		
محیط غیر اشباع						
نوع سازند	رس، مارن و سیلت	شیل	شن و ماسه	گراول		
رتبه	۱	۶	۸	۱۰		
محیط خاک						
نوع خاک	رسی	لوم رسی	سیلت	لوم سیلتی	لومی	لومی ماسه ای
رتبه	۱	۲	۳	۵	۷	۹

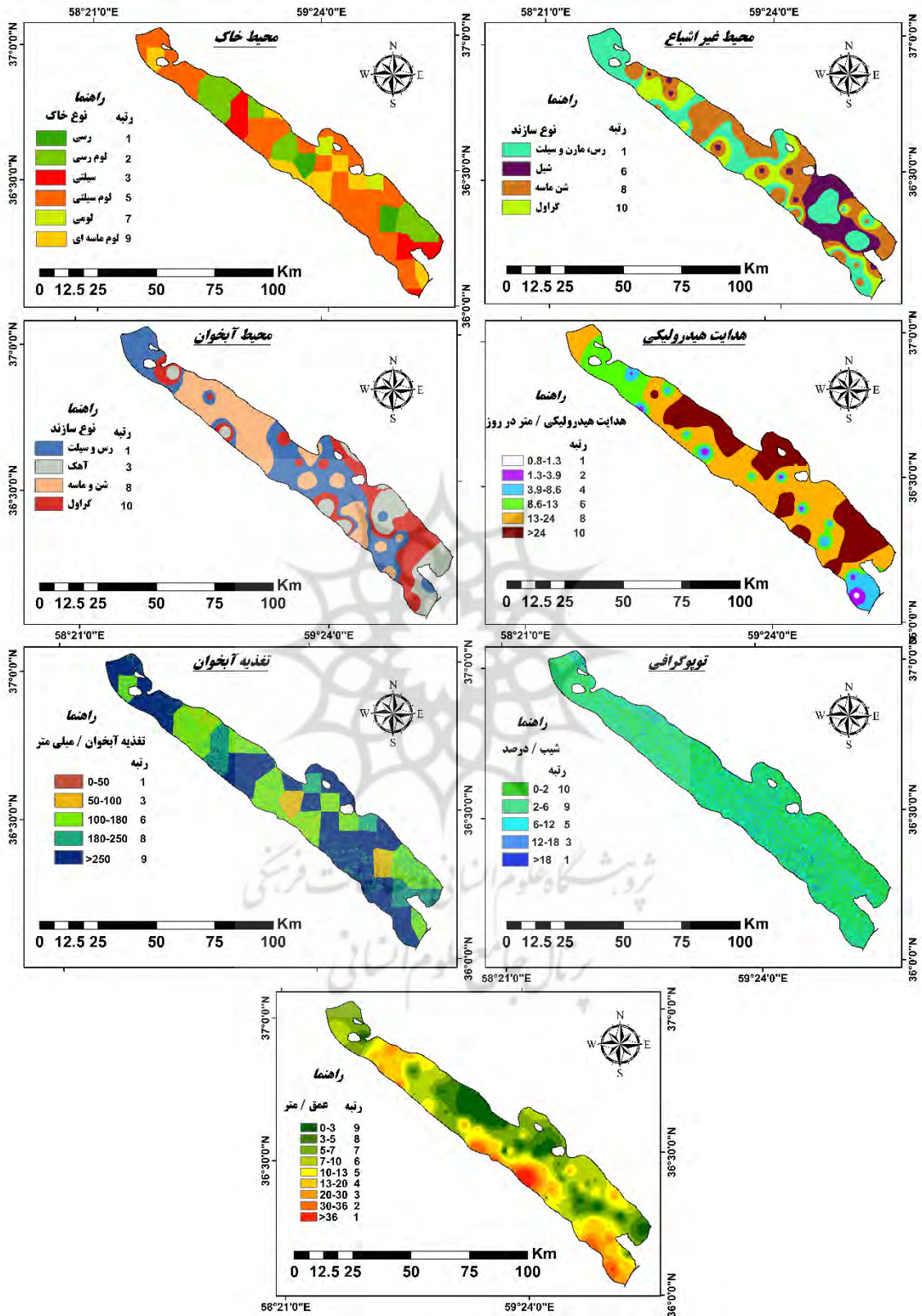
جدول ۳: رتبه و وزن پارامترهای مدل GODS (پانز، ۱۹۹۰)

نوع آبخوان						
آزاد	آزاد با پوشش	نیمه محبوس	محبوس	آرتزین	فائد آبخوان	۱
	۰/۵	۰/۳	۰/۲	۰/۱	۰	
خصوصیات لیتولوژیکی						
مواد سخت نشده (رسوبات)	گراول مخروط افکنه	ماسه آبرفتی ماسه یخچالی	ماسه بادی	سیلت آبرفتی	خاک های برجا	
مواد سخت شده (سنگ های متخلخل)	سنگ آهک گچ دار	ماسه سنگ	سیلت استون	گل سنگ		
مواد سخت شده (سنگ های متراکم)	سنگ آهک کارستی	گدازه های عصر حاضر	سنگ های آذرین و دگرگونی			
	۰/۹	۰/۸	۰/۷	۰/۶	۰/۵	۰/۴
عمق آب های زیرزمینی (متر)						
<۲	۲-۵	۵-۱۰	۱۰-۲۰	۲۰-۵۰	۵۰-۱۰۰	>۱۰۰
نوع پوشش خاک						
نبود خاک	گراول و ماسه	ماسه	ماسه سیلتی	سیلت	سیلت رسی	رس
	۱		۰/۹	۰/۸	۰/۶	۰/۵

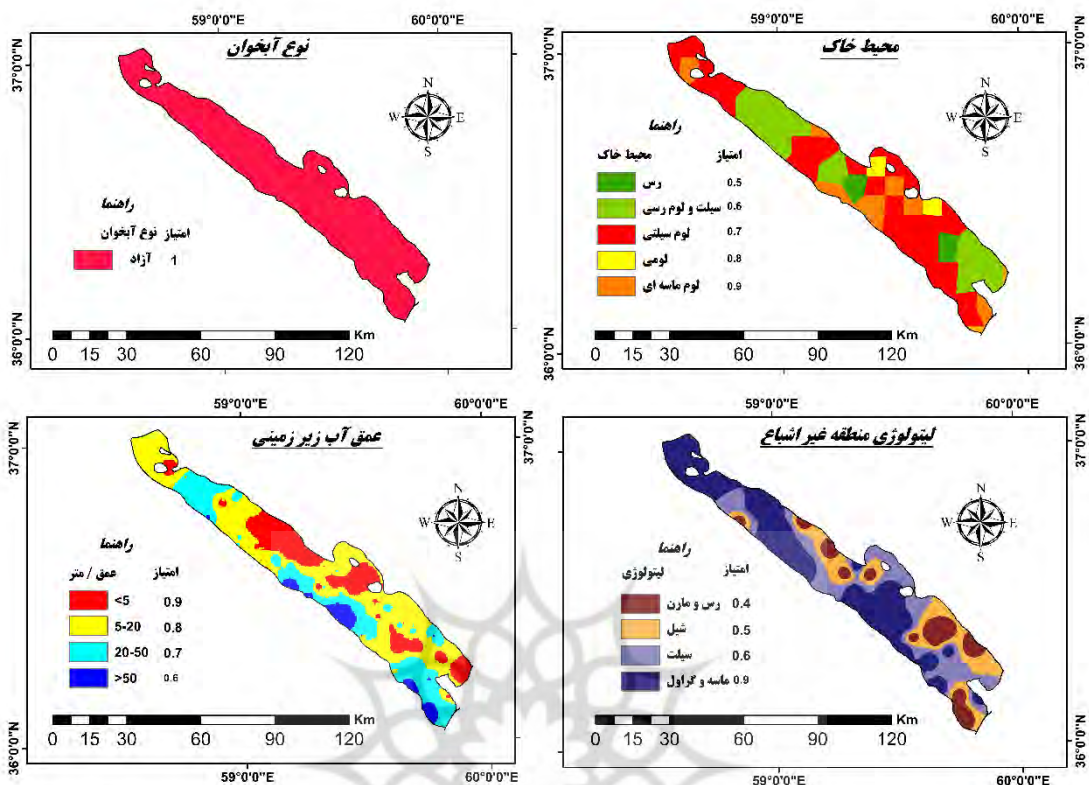
در اشکال (۴) و (۵) نقشه ای هر یک از لایه‌های مدل SINTACS و GODS و رتبه هر یک از طبقات نشان داده شده است. پس از تهیه هر یک از لایه های مدل SINTACS و GODS برای تهیه نقشه آسیب پذیری آبخوان، لایه‌های هر مدل در محیط نرم‌افزار ArcGIS باهم تلفیق شد و نقشه نهایی به دست آمد شکل (۶). سپس مساحت هر یک از طبقات محاسبه گردید جدول (۴).

جدول ۴: مساحت و درصد طبقات آسیب‌پذیری در نقشه‌های مدل SINTACS و GODS

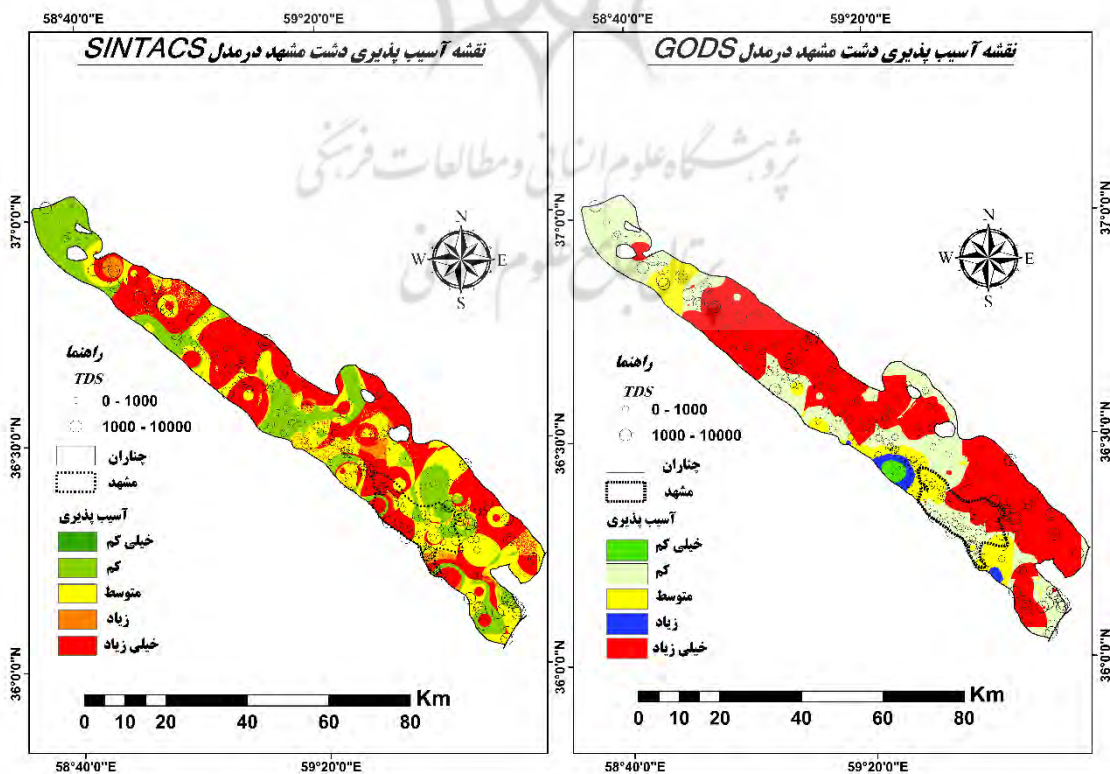
GODS		میزان آسیب پذیری	SINTACS	
مساحت / درصد	Km2/ مساحت		مساحت / درصد	Km2/ مساحت
۰/۹۳	۲۵/۲۱	خیلی کم	۱۱/۹۲	۰/۴۴
۳۱/۱۱	۸۴۰/۰۲	کم	۶۹۰/۵	۲۵/۵۷
۱۱/۴۵	۳۰۹/۲	متوسط	۷۷۱/۷۳	۲۸/۵۸
۱/۵۶	۴۲	زیاد	۷۵/۳۸	۲/۷۹
۵۴/۹۵	۱۴۸۳/۵	خیلی زیاد	۱۱۵۰/۴	۴۲/۶۱



شکل ۴: نقشه لایه‌های مدل SINTACS

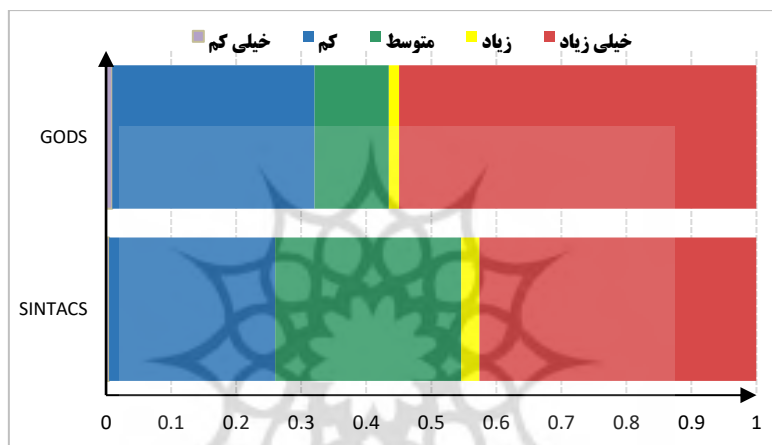


شکل ۵: نقشه لایه‌های مدل GODS



شکل ۶: نقشه پهنه‌بندی پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان دشت مشهد بر اساس مدل SINTACS و GODS

بر اساس نتایج حاصله از مدل های GODS و SINTACS آبخوان دشت مشهد به پنج محدوده با آسیب پذیری خیلی کم تا خیلی زیاد پهنه بندی شده است. بر اساس مدل SINTACS آبخوان دشت مشهد در پنج پهنه با آسیب پذیری خیلی کم (۰/۴۴٪)، کم (۲۵/۵۷٪)، متوسط (۲۸/۵۸٪)، زیاد (۲/۷۹٪)، خیلی زیاد (۴۲/۶۱٪) قرار دارد. همچنین بر اساس نتایج مدل GODS محدوده مطالعاتی در پنج پهنه با آسیب پذیری خیلی کم (۰/۹۳٪)، کم (۳۱/۱۱٪)، متوسط (۱۱/۴۵٪)، زیاد (۱/۵۶٪) و خیلی زیاد (۵۴/۹۵٪) قرار گرفته است. با مقایسه دو مدل مشخص می شود که در هر دو مدل SINTACS و GODS، بیشترین مساحت آبخوان در پهنه با آسیب پذیری خیلی زیاد قرار گرفته است اما از لحاظ پراکنندگی جغرافیایی آنها در دو مدل اختلاف وجود دارد که می تواند ناشی از تفاوت عوامل مورد بررسی در دو مدل مذکور باشد. شکل (۶).



شکل ۷: نمودار مقایسه نتایج حاصل از مدل SINTACS و GODS

صحت سنجی نقشه های آسیب پذیری SINTACS و GODS:

به طور کلی، غلظت مقادیر TDS کل مواد جامد محلول در آب های زیرزمینی آلوده و در آب های قابل شرب به ترتیب زیاد و نسبتاً کم است (اوزلر^۱، ۲۰۰۳ و محمدی^۲ و همکاران، ۲۰۱۲). بنابراین، برای صحت سنجی نقشه های آسیب پذیری تهیه شده از هر دو مدل، ضریب همبستگی بین نقشه های آسیب پذیری و شاخص کیفی TDS محاسبه شد. اطلاعات مربوط به مقادیر TDS چاه های پیژومتری منطقه از اداره آب منطقه ای استان خراسان رضوی تهیه شد. لایه TDS مطابق طبقه بندی (تاد^۳، ۱۹۸۰)، به دو طبقه ۰-۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر (نشان دهنده آب شیرین) و ۱۰۰۰-۱۰۰۰۰ میلی گرم در لیتر (بیان کننده آب شور و آلوده) تقسیم شد. در تحقیق حاضر، صحت سنجی با استفاده از روش آماری و محاسبه ضریب همبستگی بین نقشه های آسیب پذیری و لایه TDS در محیط نرم افزار TerrSet انجام شد. نتایج پژوهش نشان داد هر دو مدل دقت بالایی در پهنه بندی آسیب پذیری آبخوان دشت مشهد دارند جدول (۵).

جدول ۵: ضریب همبستگی مقادیر TDS با نقشه های آسیب پذیری SINTACS و GODS

ضریب همبستگی	مدل
۰/۹۱	SINTACS
۰/۸۵	GODS

¹ - Ozler

² - Mohammadi

³ - Todd

نتیجه‌گیری

در مطالعه انجام شده بر روی آبخوان دشت مشهد، بر اساس مدل SINTACS قسمت‌های شمال غربی، بخش‌هایی از نواحی مرکزی و جنوب شرقی محدوده مطالعاتی از لحاظ میزان آسیب پذیری جزو پهنه‌های با خطر خیلی کم و کم می‌باشند که عمدتاً در انطباق با مناطق غیرسکونتگاهی و غیر صنعتی می‌باشد. سایر نواحی از جمله شرق و شرق شمال شرق و بخش‌هایی از نواحی مرکزی محدوده مطالعاتی جزو پهنه‌های با خطر متوسط و زیاد و خیلی زیاد می‌باشند که عمدتاً با نواحی با تراکم جمعیتی بالا، شهرک‌های صنعتی و اراضی زراعی منطبق هستند. بر اساس مدل GODS بخش‌هایی از شمال غربی و مرکزی محدوده مطالعاتی از لحاظ آسیب پذیری جزو پهنه‌های با خطر زیاد و خیلی زیاد می‌باشند. در حالیکه پهنه با خطر خیلی کم در محدوده شرق و جنوب شرق و به صورت لکه‌های پراکنده در قسمت‌های مرکزی واقع شده‌اند و پهنه‌های با خطر کم و متوسط بخش‌هایی از قسمت‌های داخلی و مرکزی محدوده را شامل می‌شوند. با مقایسه این دو مدل مشخص می‌گردد که در هر دو مدل بیشترین مساحت آبخوان دشت مشهد از نظر آسیب پذیری در پهنه با خطر خیلی زیاد قرار می‌گیرد در حالی که کمترین مساحت در پهنه آسیب پذیری خیلی کم و پس از آن در پهنه آسیب پذیری متوسط واقع شده است. از لحاظ موقعیت پهنه‌های آسیب پذیر، در برخی قسمت‌های محدوده مطالعاتی عدم تطبیق وجود دارد. به عنوان مثال بخش مجاور منتهی الیه شمال غربی محدوده مطالعاتی در مدل GODS در پهنه آسیب پذیری خیلی زیاد واقع شده اما همین ناحیه در مدل SINTACS پهنه با خطر کم و متوسط شناخته شده است. همچنین از لحاظ وسعت پهنه‌های آسیب پذیری در دو مدل تفاوت‌هایی با یکدیگر وجود دارد که علت این عدم تطابق موقعیت و وسعت، به علت تفاوت در نوع و تعداد پارامترهای مورد بررسی در هر یک از مدل‌های SINTACS و GODS می‌باشد. شکل (۷). به طور کلی می‌توان گفت که میزان آسیب پذیری آبخوان از سمت جنوب شرق به شمال غرب افزایش می‌یابد و سپس از نواحی مرکزی محدوده به سمت منتهی الیه شمال غربی آسیب پذیری کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان به مسیر جریان آب زیرزمینی که از شرق به غرب می‌باشد و همچنین زیاد بودن سطح ایستابی در این مناطق نسبت داد. همچنین به طور کاملاً مشخصی پهنه‌های با آسیب پذیری متوسط، زیاد و خیلی زیاد در انطباق با کاربری‌های زراعت آبی و باغات و مراکز جمعیتی و صنعتی می‌باشند. این مورد به وضوح در اراضی کشاورزی مجاور شهرستان چناران و اراضی پیرامونی شهرک صنعتی مشهد قابل مشاهده است. از لحاظ جنس رسوبات در محیط آبخوان، محدوده‌های شنی و ماسه‌ای به علت نفوذپذیری بیشتر، آسیب پذیری متوسط تا زیاد را نشان می‌دهند در حالیکه در محدوده‌های رس و سیلتی کمترین میزان آسیب پذیری را شاهد می‌باشیم. نتایج صحت سنجی نشان داد هر دو مدل SINTACS و GODS دقت بالایی در پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان دشت مشهد دارند به طوری که ضریب همبستگی نقشه‌های آسیب‌پذیری با شاخص کیفی TDS در مدل SINTACS (۰/۹۱) و در مدل GODS (۰/۸۵) می‌باشد؛ بنابراین می‌توان از نتایج پژوهش زیر در ارزیابی‌های زیست‌محیطی و تحلیل آلودگی‌های مختلف استفاده نموده و مبنای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی قرار داد.

پیشنهادات

از آنجائی که تغییرات کوچک در یک سیستم آسیب‌پذیر، تخریب بزرگ ایجاد می‌کند (فولک^۱، ۲۰۰۶)؛ و نتایج این تحقیق نشان داده که پتانسیل آلودگی آبخوان دشت مشهد نسبتاً بالا می‌باشد، بنابراین جهت حفاظت و مدیریت بهینه این منابع با ارزش و جلوگیری از آلودگی بیشتر آبخوان دشت مشهد، می‌بایست اقدامات پیشگیرانه متناسبی انجام گردد. در صورت عدم مدیریت کیفی آب‌های زیرزمینی، بخش‌های مجاور شهر مشهد، و قسمت‌های مرکزی و جنوب شرقی آبخوان که

¹. Folke

دارای بالاترین میزان آسیب پذیری می باشند، ممکن است در آینده با مسائل و مشکلات جبران ناپذیری مواجه شوند. همچنین با توجه به اقلیم منطقه، کمبود بارندگی، خشکسالی های اخیر، افزایش جمعیت و گسترش شهرنشینی، افزایش فعالیت های کشاورزی و صنعتی، در نتیجه افزایش آلودگی های ناشی از فاضلاب های شهری، پساب های کشاورزی و صنعتی و در مقابل افزایش نیازمندی به آب جهت تأمین مصارف آشامیدنی، مدیریت صحیح این امر تنها با مشارکت مردم، کارشناسان و مدیران مربوطه تحقق خواهد یافت. از جمله اقدامات مدیریتی که می تواند تا حدی در کنترل شرایط موجود موثر باشد می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- نظارت دقیق بر میزان برداشت و جلوگیری از اضافه برداشت چاههای مجاز و انسداد چاههای غیرمجاز و کنترل تغذیه و تخلیه آبخوان
- نظارت دقیق بر محل ها و نحوه دفع پسماند و پیشگیری از نفوذ فاضلاب و پساب صنایع به داخل آبخوان
- اجرای طرحهای نظارتی و حمایت از کشاورزان و باغداران جهت به حداقل رساندن مصرف سموم و آفت کشها جهت کاهش نفوذ مواد شیمیایی مضر به داخل آبخوان

منابع

- آقاروسی آشتیانی، م، رحمتی، س ه، خلج امیر حسینی، ی، فریدونی، ف، و بالدره، و، ۱۳۹۸. تعیین علل تغییر کیفیت آب زیرزمینی با روش های ایزوتوپی و شیمیایی در آبخوان شبستر - صوفیان، نشریه آب و فاضلاب، دوره ۳۰، شماره ۳، صص ۸۷-۹۸.
- احمدی، ج، آخوندی، ل، عباسی، ه، خاشعی سیوکی، ع، و علمدیدی، م، ۱۳۹۲. تعیین آسیب پذیری آبخوان با استفاده از مدل درا ستیک و اعمال آنالیز حساسیت تک پارامتری و حذف (مطالعه موردی: دشت سلفچگان-نی زار)، نشریه پژوهش های حفاظت آب و خاک، جلد ۲۰، شماره سوم، صص ۲۷-۱.
- اصغری مقدم، ا، و برزگر، ر، ۱۳۹۳. بررسی منشأ ناهنجاری غلظت نیترات و آسیب پذیری منابع آب زیرزمینی دشت تبریز با استفاده از روش های GOD و AVI و نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۴، شماره ۴، صص ۲۷-۱۱.
- اصغری مقدم، ا، قره خانی، م، ندیری، ع، و گرد، م، ۱۳۹۶. ارزیابی آسیب پذیری ذاتی آبخوان دشت اردبیل با استفاده از روش های SI, SINTACS, DRASTIC، نشریه علمی-پژوهشی جغرافیا و برنامه ریزی، سال ۲۱، شماره ۶۱، صص ۷۴-۵۷.
- افتخاری، م، اکبری، م، و قزل سوفلو، ع، ۱۳۹۸. ارزیابی آسیب پذیری کیفی آبخوان دشت بیرجند به روش SINTACS، محیط زیست طبیعی، منابع طبیعی ایران، دوره ۷۲، شماره ۳، صص ۲۹۴-۲۷۹.
- اکبری، م، جرگه، م ر، و مدنی، س ح، ۱۳۸۸. بررسی افت سطح آب های زیرزمینی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) (مطالعه موردی: آبخوان دشت مشهد)، پژوهش های حفاظت آب و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)، دوره ۱۶، شماره ۴، صص ۷۸-۶۳.
- امیراحمدی، ا، آب باریکی، ز، و ابراهیمی، م، ۱۳۹۰. ارزیابی آسیب پذیری آبخوان دشت داورزن به روش دراستیک با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، مطالعات جغرافیای مناطق خشک، شماره ۶، صص ۶۶-۵۱.
- برزگر، ر، و اصغری مقدم، ا، ۱۳۹۳. بررسی منشأ ناهنجاری غلظت نیترات و آسیب پذیری منابع آب زیرزمینی دشت تبریز با استفاده از روش های GOD و AVI، نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۴، شماره ۴، صص ۲۷-۱۱.
- حسین زاده، م، افرا سیاب، پ، خاشعی سیوکی، ع، رمضانی، ی، و دلبری، م، ۱۳۹۵. بررسی تأثیر کاربری اراضی بر آسیب پذیری آبخوان با استفاده از روش دراستیک و ANP (مطالعه موردی: دشت مشهد)، چهارمین همایش ملی کاربرد فناوریهای نوین در علوم مهندسی دانشگاه تربیت مدرس، چیدریه.
- خدائی، ک، شهسواری، ع ا، و اعتباری، ب، ۱۳۸۵. ارزیابی آسیب پذیری آبخوان دشت جوبین به روش های DRASTIC و GODS، زمین شناسی ایران، سال دوم، شماره ۴، صص ۸۷-۷۳.

- رضائی توابع، ک.، حیدری، ا. و سیاح پور، م. ج.، ۱۴۰۱. بررسی تراز آب زیرزمینی و شبیه سازی سناریوهای پیش بینی در حوضه آبریز پریشان، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، سال یازدهم، شماره ۲، صص ۲۲۸-۲۱۰.
- سیف، ع.، جعفری اقدم، م. و جهانفر، ع.، ۱۳۹۳. ارزیابی و تهیه نقشه آسیب پذیری آبخوان های کارستی با استفاده از مدل COP (مطالعه موردی: آبخوان کارستی کلین، استان کرمانشاه)، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، سال سوم، شماره ۳، ۷۹-۶۵.
- فعال، ف.، غفوری، ح. ر. و اشرفی، س. م.، ۱۴۰۰. کاربرد تغذیه سطحی آبخوان در اصلاح روش GALDIT برای ارزیابی خطر پیشروی آب شور در آبخوان قم، نشریه آب و فاضلاب، دوره ۳۲، شماره ۳، صص ۱۱۲-۹۴.
- فعال اقدم، ر.، ندیری، ع. و نوین پور، ا. ع.، ۱۳۹۶. ارزیابی آسیب پذیری آبخوان دشت ییلوردی بر مبنای ترکیب روش های DRASTIC و SINTACS، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، سال ششم، شماره ۳، صص ۱۵۰-۱۳۵.
- لشگری پور، غ.، غفوری، م.، سویزی، ز. و پیوندی، ز.، ۱۳۸۴. افت سطح آب زیر زمینی و نشست زمین در دشت مشهد، نهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، تهران.
- مردان، ح. ا. و یارقلی، ب.، ۱۳۹۹. پهنه بندی آسیب پذیری آبخوان دشت ابرفتی اردبیل با استفاده از تلفیق سامانه اطلاعات جغرافیایی و مدل دراستیک، علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره ۲۲، شماره ۶.
- ملکی، ا.، باقری، س.، شکری، س. و مطاعی، س.، ۱۳۹۸. ارزیابی آسیب پذیری آبخوان های کارستی دشت کرمانشاه و توده بیستون - پراو با استفاده از مدل COP، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال نوزدهم، شماره ۵۲، صص ۱۵۴-۱۲۹.
- نخستین روحی، م.، رضائی مقدم، م. ح. و رحیم پور، ت.، ۱۳۹۶. پهنه بندی آسیب پذیری آب های زیرزمینی با استفاده از مدل DRASTIC و SI در محیط GIS (مطالعه موردی دشت عجب شیر)، نشریه اکوهیدرولوژی، دوره ۴، شماره ۲، صص ۵۹۹-۵۸۷.
- نخعی، م.، امیری، و. و رحیمی شهر بابکی، م.، ۱۳۹۲. ارزیابی آلودگی و آنالیز حساسیت آب زیرزمینی در آبخوان خاتون آباد با استفاده از مدل دراستیک مبتنی بر GIS نشریه زمین شناسی کاربردی پیشرفته، دوره ۳، شماره ۸، صص ۱۰-۱.
- ندیری، ع.، اکبری، ا.، نوین پور، ا. ع. و قره خانی، م.، ۱۳۹۸. ارزیابی آسیب پذیری آبخوان دشت خوی با استفاده از روش ترکیبی، مدیریت آب و آبیاری، دوره ۹، شماره ۲، صص ۲۶۲-۲۵۱.
- نوین پور، ا. ع. و خضری، م.، ۱۳۹۸. ارزیابی آسیب پذیری ذاتی آبخوان دشت میاندوآب نسبت به آلودگی بر مبنای مدل های DRASTIC, GODS, DRASTIC, AVI واسنجی شده، اکوهیدرولوژی، دوره ۶، شماره ۲، صص ۴۶۳-۴۴۷.
- Abu-Bakr, H. A. E. A. (2020). Groundwater vulnerability assessment in different types of aquifers. *Agricultural Water Management*, (240): 106275.
- Ahmadi, A., Aberoumand, M. (2009). Vulnerability of Khash-Plain Aquifer, Eastern Iran, to Pollution Using Geographic Information System (GIS). *Journal of Geotechnical Geology*, 5(1), 1-11(In Persian).
- Alizadeh, A. (2011). *Principles of applied Hydrology*. 33rd edition, Mashhad, Imam Reza University Press (In Persian).
- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J.H., Petty, R.J and Hackett, G. (1987). DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings, EPA/600/2-87/035, U.S. Environmental Protection Agency. Ada, Oklahoma, PP: 19-25.
- Almasri, M.N., & Kaluarachchi, J.J. (2005). Modular neural networks to predict the nitrate distribution in ground water using the on-ground nitrogen loading and recharge data. *Environmental Modelling & Software*. (22), 851- 871.
- Almasri, M. (2008). Assessment of Intrinsic Vulnerability to Contamination for Gaza Coastal Aquifer. *Palestine, Journal of Environmental Management*. (88), 577-593.

- *Aneesh T., DaNair, A., M., Prasad, K. R & Srinivas, R. (2022) .Groundwater vulnerability assessment of an urban coastal phreatic aquifer in India using GIS-based DRASTIC model, Groundwater for Sustainable Development, 100810.*
- *Bordbar, M., Neshat, A & Javadi, S. (2019). A new hybrid framework for optimization and modification of groundwater vulnerability in coastal aquifer, Environmental Science and Pollution Research. 26(21), 21808-21827.*
- *Bouwer, H. (1978). Groundwater Hydrology. McGraw-Hill Company. New York. 480*
- *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, 140-142.*
- *Brand, F.S., & Jax, K. (2007). Focusing the Meaning(s) of Resilience: Resilience as a Descriptive Concept and a Boundary Object. Ecology and Society. (12), 23.*
- *Chilton, P.J., Vlugman, A. & Foster, S. (1990). A groundwater pollution risk assessment for public water supply sources in Barbados, American Water Resources Association International Conference on Tropical Hydrology and Caribbean Water resources, San Juan de Puerto Rico, 279-289.*
- *Civita, M. (1990). Legenda unificata per le Carte della vulnerabilita dei corpi idrici sotterranei/Unified legend for the aquifer pollution vulnerability Maps, Studi sulla Vulnerabilita degli Acqiferi, Pitagora Edite, Bologna.*
- *Civita, M. (1994). Vulnerability maps of aquifers subjected to pollution: theory and practice. Pitagora Editrice, Bologna, p325.*
- *Folke, C. (2006). "Resilience: the emergence of a perspective for social-ecological systems analyses", Global Environmental Change.16(3), 253–267.*
- *Foster SSD, (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. international conference Noordwijk aan Zee. 1-30 April, Netherlands. Pp. 69-86.*
- *Gallopín, Gilberto C. (2006). Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity, Global Environmental Change.16(16), 293-303.*
- *Kim, YJ., Hamm S.Y. (1999). Assessment of the potential for groundwater contamination using the DRASTIC/EGIS technique, Cheongju area, South Korea. Hydrogeology Journal,17.2, 227-235.*
- *Mohammadi, Z., Zare, M & Sharifzade, B. (2012). Delineation of groundwater salinization in a coastal aquifer, Bousheher, South of Iran. Environmental Earth Sciences. 67(5), 1473-1484.*
- *Naseri, H., & Sareminejad, F. (2011). Comparison of the Evaluation of Aquifer Vulnerability by DRASTIC and Fuzzy Logic Models Case Study: Golgir Plain of Masjed Soleyman. Journal of Physical Geography,11(4),17-34. (In Persian).*
- *Niknam, R., Mohammadi, K. & Majd, Vahid. Johari. (2007). "Groundwater Vulnerability Evaluation of Tehran-Karaj Aquifer Using DRASTIC Method and Fuzzy Logic", Iran Water Resources Research. 2, 39-47.*
- *Ozler, M. H. (2003). Hydrochemistry and salt-water intrusion in the Van aquifer, east Turkey. Environmental Geology, 43(7), 759-775.*
- *Paez, G., (1990), Evaluacion de la vulnerabilidad a la contaminacion de las aguas subterranas en el Valle del Cauca, InformeEjecutivo, Corporeginal del Valle del Cauca, Cauca, Colombia, 352(3), 95-120.*
- *Pisciotta, A., Cusimano, G., Favara, R. (2015). Groundwater nitrate risk assessment using intrinsic vulnerability methods: A comparative study of environmental impact by intensive farming in the Mediterranean region of Sicily, Italy. Journal of Geochemical Exploration,156, 89-100.*

- *Piscopo, G. (2001). Groundwater vulnerability map, explanatory notes, Castlereagh Catchment, NSW, Department of Land and Water Conservation, Australia.*
- *Plymale, CL., & Angle, MP. (2002). Groundwater Pollution Potential of Fulton County, Ohio. Ohio Department of Natural Resources Division of Water. Water Resources Section. Groundwater Pollution Potential, Report (45).*
- *Rahman, A. (2008). A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India. Applied geography. 28(1), 32-53.*
- *Samadi, J. (2015). Assessment of Kashan Aquifer-Land Use Composite Vulnerability Impact on Groundwater Pollution Using DRASTIC Method and Degradation Model. IranWater Resources Research. 11(1), 13-21. (in Persian).*
- *Stigter, T. Y., Ribeiro, L., & Dill, A. M. M. (2006). Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal. Hydrogeology journal. 14(1), 79-99.*
- *Thapinta, A., & Hudak, P. (2003). Use of geographic information systems for assessing groundwater pollution potential by pesticides in Central Thailand. Environmental International. 29, 87-93.*
- *Todd, P.K. (1980). Ground water, Hydrology. Kluwer Academic Publisher. p400.*
- *Turner et al. 2003. A framework for vulnerability analysis in sustainability science, Proc. Nat. Acad. Sci, 100(14), 8074-8079.*
- *Voudouris, K., Nazakis. N., Polemio, M., & Kareklas. K. (2010). Assessment of intrinsic vulnerability using the DRASTIC model and GIS in the Kiti aquifer. Cyprus. European Water. 30,13-24.*