

تهیه نقشه‌های آسیب پذیری ماندابی شدن با استفاده از سنجش از دور و اطلاعات میدانی (مطالعه موردی: دشت قزوین)

حمیدمنصوریان^۱، وحید یزدانی^{۲*}

تاریخ دریافت: ۹۴/۳/۱۵ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۲/۱۴

چکیده

حفاظت کیفی از آب‌های زیرزمینی، به دلیل کاربرد فراوان این منابع در بخش‌های مختلف از جمله کشاورزی، صنعت و شرب، از اهمیت زیادی برخوردار است. یکی از راه‌های مناسب برای جلوگیری از آلودگی‌های آب زیرزمینی، شناسایی مناطق آسیب‌پذیر آبخوان، و مدیریت کاربری اراضی است. در این مقاله برای تعیین توان بالقوه آلودگی آب‌های زیرزمینی از چهار شاخص AVI، GOD، DRASTIC و SINTACS در قسمتی از دشت قزوین استفاده شده است. داده‌ها و اطلاعات مورد استفاده مقاله شامل: تصاویر ماهواره‌ای جهت تهیه نقشه‌های کاربری اراضی و تعیین مناطق ماندابی، نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ برای زمین مرجع نمودن تصاویر ماهواره‌ای و نقاط نظارت، عمق آب زیرزمینی در سالهای مختلف، میزان بارندگی در منطقه، قابلیت انتقال و مقاومت ویژه لایه‌ی آبدار، عمق سنگ بستر، بافت خاک سطحی، نفوذ پذیری منطقه، شیب منطقه، جنس لایه‌ی آبدار، ضخامت لایه‌ی آبدار، فراسنج هدایت هیدرولیکی، جنس ناحیه‌ی غیر اشباع، فراسنج تغذیه‌ی خالص و کاربری اراضی می‌باشند. به دلیل اهمیت شرایط ماندابی شدن و فراسنج کاربری اراضی در تعیین توان بالقوه خطر و آسیب‌پذیری، شرایط مربوط با به کارگیری تصاویر ماهواره‌ای مشخص شده‌اند. از روش حد آستانه و نقاط نظارتی، مناطق ماندابی دشت مشخص گردیده‌اند. عمق آب زیرزمینی با استفاده از اطلاعات چاه‌های منطقه و روش کریجینگ معمولی تعیین شده و پایین‌تر از حد بحرانی به دست آمده است. آسیب پذیری طبیعی به دلیل فراسنجهای موثر بیشتر، به عنوان شاخص برتر برای طبقه‌بندی آسیب‌پذیری انتخاب گردید. طبقه‌های آسیب‌پذیری منطقه براساس این شاخص به ۶ دسته بدون خطر آلودگی، آسیب‌پذیری خیلی کم، کم، کم تا مبه وسیله، مبه وسیله تا زیاد و زیاد تقسیم گردیده‌اند که نسبت هر طبقه به کل منطقه به ترتیب برابر ۲۰/۷۳، ۲۲/۲۲، ۲۰/۵۰، ۵/۹۵ و ۰/۰۵ درصد شد.

واژه‌های کلیدی: آسیب پذیری آبخوان، تحلیل حساسیت، سنجش از دور، ماندابی شدن، GIS

^۱ گروه علوم و مهندسی آب- مجتمع آموزش عالی تربت جام

^۲ گروه علوم و مهندسی آب- مجتمع آموزش عالی تربت جام

Email: V.yazdany@yahoo.com

مقدمه

زمین و تمام پدیده‌هایی که در آن اتفاق می‌افتد به نحوی زندگی بشر را تحت تاثیر قرار می‌دهد؛ پیش‌بینی تغییرات و شناسایی پدیده‌های آن، نیاز بشر را برای برنامه ریزی آسان می‌نماید؛ در این راستا به کارگیری تمامی علوم لازم و مفید می‌باشد. از ابزارهای مؤثر در زمینه‌ی مطالعات زیست محیطی و علوم زمین استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و فن‌آوری سنجش از دور و بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای است. فناوری سنجش از دور از جمله ابزارهای نوینی است که دست‌یابی و استخراج اطلاعات پایه را برای مدیریت منابع زمین میسر می‌سازد (ویلیامسون، ۲۰۰۱). خاکی را ماندابی می‌نامند که در آن سطح ایستابی آب به ناحیه ریشه گیاه صعود کرده و آن را اشباع می‌کند؛ در این صورت انتشار هوا کم شده و مقدار اکسیژن با افزایش CO₂ کاهش پیدا می‌کند (جعفری، ۱۳۸۲). بارندگی زیاد و زهکشی ضعیف در سطح (که باعث نفوذپذیری آب به عمق و بالا آمدن سطح آب زیرزمینی می‌شود) از عوامل تشکیل مانداب در یک ناحیه است. همچنین بر اثر آبیاری بیش از حد، نشست به درون زمین افزایش می‌یابد و باعث تشدید شرایط ماندابی می‌گردد. علاوه بر موارد یاد شده، جریان‌های زیرسطحی از ارتفاعات بالا دست نیز می‌توانند عامل پدیده‌ی ماندابی شدن باشد. نواحی با شیب هیدرولیکی پایین و ساختار ضعیف خاک نیز مکان‌های مستعد برای تشکیل مانداب به شمار می‌روند (IDNP, 2002). از مناطق مستعد در مواجهه با ماندابی شدن، اراضی فرورفته و یا مناطقی با لایه‌های نفوذ ناپذیر با عمق کم را که زیر لایه‌های دیگر قرار گرفته اند را می‌توان نام برد. لازم به ذکر است در نواحی آبیاری نشده، و یا کمتر آبیاری شده، این شرایط اتفاق نمی‌افتد (راتر و همکاران، ۲۰۰۱). اصطلاح آسیب پذیری آبهای زیرزمینی به آلودگی، نخستین بار در اواخر دهه ۱۹۶۰ از سوی جین مارگات ارائه شد (هاسینیان و همکاران، ۲۰۱۰).

گوسن و دولیگر (۱۹۹۷) در منطقه اسماعیلیه در مصر در مورد شرایط ماندابی و شوری تحقیقات زیادی را انجام دادند، نامبردگان از اطلاعات میدانی، میزان سطح آب زیرزمینی و کیفیت آن استفاده نموده و به این نتیجه رسیدند که سطح آب زیرزمینی عامل بسیار مهمی برای

شوری خاک و سطح آن است. آنها به این نتیجه دست یافتند که در صورت نزدیک بودن بیشتر سطح آب زیرزمینی به سطح خاک تغییرات شوری بسیار متفاوت بوده و رشد نمایی دارد. ایشان عمق بحرانی سطح آب را برای حالتی که در خاک شوری رشد نمایی نداشته باشد برابر با ۶۰ سانتیمتر به دست آوردند. مانند مطالعه‌ی گوسن و دولیگر (۱۹۹۷)، افراد دیگری همچون هالورسون در سال ۱۹۷۴، رهوداس و کودا در سال ۱۹۷۵ مطالعاتی را انجام داده و به نتایج مشابهی دست یافته بودند. این تحقیقات تنها در میزان عمق بحرانی تفاوت‌هایی با هم داشتند که مربوط به مشخصات منطقه‌ی مطالعاتی هر کدام بود. از بررسی‌های دیگر صورت گرفته برای شناسایی مسئله ماندابی شدن به مطالعات موسسه‌ی بین‌المللی آبشناسی هند در سال ۲۰۰۰ برای برخی از مناطق این کشور می‌توان اشاره کرد. در این مطالعات از تصاویر ماهواره‌ی ISR برای تهیه‌ی نقشه‌ی مناطقی که حالت ماندابی در آنها وجود داشت استفاده شد. کاستاندا و هررو (۲۰۰۵) بر روی دریاچه‌هایی که به دلیل نفوذپذیری کم با اندک باران تالاب ایجاد می‌شود، در اسپانیا کار کردند. هدف اصلی آن‌ها شناسایی مناطق در معرض خطر ماندابی شدن و شور شدن، و تشخیص مشکلات آینده موجود منطقه بود. در این تحقیق از ۲۶ تصویر سنجنده‌های TM و ETM+ ماهواره‌ی Landsat از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۰۰ استفاده نمودند؛ در نهایت با محدودیت‌های اعمال شده به وسیله تصاویر موجود، ۵ طبقه از شرایط منطقه را به دست آوردند. دانش کار آراسته (۱۳۸۵) خاک‌های تحت شوری و آب ماندگی را برای ناحیه‌ای از دشت سیستان، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ی Landsat و سنجنده‌های TM و ETM+ مورد بررسی قرار داد. بررسی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی به طور جدی از سال ۱۹۷۰ به وسیله آلینت و مارگات شروع شد و سپس به وسیله آست و همکاران در سال ۱۹۸۰ پیگیری گردید. بعد از آن روش‌های مختلفی جهت برآورد آسیب‌پذیری و همچنین تهیه نقشه برای مناطق مختلف با توجه به شرایط آب و زمین شناسی آبخوان‌ها پیشنهاد شد. آلر و همکاران (۱۹۸۷) روش DRASTIC را ارائه دادند، که بعدها به عنوان روش توصیه شده به وسیله سازمان محیط زیست آمریکا در سال ۱۹۹۳ انتخاب گردید. راندکویست و همکاران (۲۰۰۱) روشی را برای اجرای مدل آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در محیط رستری GIS

۰/۸۴ تا ۱) بین غلظت نیتروژن و نیترات و شاخص آسیب‌پذیری ویژه برقرار شد. بای و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از مدل DRASTIC به ارزیابی آبهای زیرزمینی منطقه بائوتو در چین پرداختند. در این مطالعه ابتدا برای بررسی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه از مدل DRASTIC استفاده و نتایج آن را با کیفیت آب زیرزمینی آن منطقه مقایسه کردند. نتایج این بررسی نشان دادند که در ارزیابی آسیب‌پذیری منطقه، نتایج حاصل از مدل DRASTIC اصلاح شده نسبت به نتایج حاصل از مدل DRASTIC بهنجار مطابقت بیشتری را با شرایط واقعی دارد. سینر و داواراز (۲۰۱۲) به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی حوضه دریاچه اجیردیر در ترکیه از مدل DRASTIC بهینه‌سازی شده استفاده کردند. برای این منظور، فراسنجهای درز و شکافتگی و کاربری اراضی را که در انتقال مواد آلاینده به آبخوان نقش دارند به فراسنجهای مدل افزودند. بدین ترتیب علاوه بر مدل DRASTIC بهنجار، دو مدل بهینه‌سازی شده برای آبخوان مورد مطالعه توسعه یافت. آنها به علت گسترده بودن فعالیتهای کشاورزی در منطقه از غلظت نیترات آبخوان به منزله معیار اصلاح مدل استفاده کردند. برای انتخاب مدل بهینه، با استفاده از تحلیل رگرسیون خطی ساده، یک همبستگی بین غلظت نیترات آبخوان و آسیب‌پذیری تعیین شد.

هدف از این مطالعه تهیه و مقایسه‌ی نقشه‌ی آسیب‌پذیری به وسیله شاخص‌های DRASTIC، SINTACS، GOD و AVI در منطقه‌ی قزوین می‌باشد. در نهایت، نقشه‌های آسیب‌پذیری منطقه با ترکیب کاربری اراضی، که از تصاویر ماهواره‌ای تهیه شده است با نقشه‌های آسیب‌پذیری حاصل از شاخص‌های SINTACS بهنجار و DRASTIC طبیعی تهیه، و با نقشه‌های آسیب‌پذیری مقایسه می‌گردند.

مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه

منطقه‌ی مورد مطالعه قسمتی از دشت قزوین واقع در استان مزبور می‌باشد. این قسمت، در حوضه مرکزی ایران با مساحتی معادل ۲۱۹۲۵۵ هکتار در موقعیت جغرافیای بین ۴۹ درجه و ۵۷ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۲۸

بیان کردند. در این تحقیق مناطقی از نبراسکا که استعداد آلودگی آب‌های زیرزمینی را داشته‌اند مشخص شده و الگوریتمی که مراحل تهیه‌ی نقشه توان بالقوه آلودگی را به وجود می‌آورد، تهیه کردند. روش مذکور با کمترین حجم عملیاتی همراه بود.

ناپولیتانو و فابری (۱۹۹۶) از تحلیل حساسیت جهت بررسی فراسنجهای به طور جداگانه، بر ارزیابی آسیب‌پذیری به کمک روش DRASTIC و SINTACS استفاده کردند. این تحقیق در محلی به نام پیاناکامپانا واقع در جنوب ایتالیا صورت گرفت. GIS و شرایط خاص منطقه انجام تحلیل را سریع تر و ساده تر ساخت. آسیب‌پذیری آبخوان کارستی در سوئیس با استفاده از روش EPIK به وسیله دوئرفلایگر و زولن (۱۹۹۷) تعیین شد. در این بررسی چهار نوع آسیب‌پذیری بالا (۹-۱۹) و میه وسیله (۲۰-۲۵) و کم (۲۶-۳۴) و بسیار کم را برای مناطقی که حداقل ۸ متر پوشش حفاظتی خاک شامل مواد ترکیبی و رسوبی فرسایشی که دارای کمترین هدایت هیدرولیکی بودند، تعیین کردند. لی (۲۰۰۳) مکان مناسب دفع زباله و ضایعات را برای جلوگیری از آلوده شدن آب زیرزمینی با کاربرد روش DRASTIC مشخص کرد. وی از فراسنج اثر ناحیه‌ی غیراشباع، به دلیل کمبود داده صرف نظر نمود و فراسنج عوارض زمین را با روش DRASTIC اضافه نمود که در تحقیق خود به صورت ساختارهای زمین شناسی مانند درز و شکاف تعریف کرد. وی مطرح نمود که منبع حرکت آلودگی و جریان آب به این فراسنج وابسته است، به طوری که هر چه مقدار عوارض زمین بیشتر باشد توان بالقوه آلودگی آب زیرزمینی بالاتر می‌باشد. العدامت و همکاران (۲۰۰۳) آسیب‌پذیری آبخوان بازالتیک را در حوضه‌ی آبخیزی واقع در اردن با استفاده از GIS، سنجش از دور و روش DRASTIC انجام دادند. توان بالقوه آسیب‌پذیری آب زیرزمینی نسبت به آلودگی با استفاده‌ی کاربری اراضی به اضافه‌ی فراسنجهای DRASTIC به دست آمدند. تیرمالیاواسان و همکاران (۲۰۰۳) نرم افزار AHP-DRASTIC را برای برآورد نسبتها و وزن‌های مورد استفاده در روش DRASTIC اصلاح شده تهیه کردند. در این تحقیق از روش آمار خوشه‌ای برای محاسبه نسبت‌ها و وزن‌های روش DRASTIC اصلاح شده استفاده گردید. مدل مذکور به وسیله داده‌های کیفی آب زیرزمینی واسنجی شد، و همبستگی بالایی (ضریب همبستگی بین

کوهزایی مختلفی بوده که علاوه بر گسل‌ها و چین خوردگی‌های فراوان، ناپیوستگی‌هایی را نیز به وجود آورده‌اند. در مجموع حدود ۵۵۳۴ کیلومتر مربع که عمدتاً شامل نواحی مرکزی می‌باشد، از رسوبات دوران چهارم پوشانده شده و دشت مرکزی قزوین و آبرفت‌های مجاور را تشکیل داده است. شکل ۱ منطقه‌ی مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

دقیقه طول شرقی، و ۳۵ درجه و ۴۴ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۱۳ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. به طور کلی این منطقه در دو بخش زمین ساخت متفاوت البرز مرکزی (ارتفاعات شمال دشت قزوین) و بخش آتشفشانی ارومیه-دختر (ارتفاعات جنوب دشت قزوین) قرار دارد؛ به همین دلیل خصوصیات متفاوتی از نظر زمین ساختی و زمین شناسی ساختمانی، نوع و جنس تشکیلات، ژئومورفولوژی و غیره را از خود نشان می‌دهد. همچنین این منطقه متاثر از فازهای



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه.

به طور کلی، در این مطالعه بررسی‌های زمین ریخت شناسی از دیدگاه آب و زمین شناسی و منابع آبی انجام شده است؛ به همین دلیل شکستگی‌ها و گسل‌ها و دره‌های منطقه از این نظر که تنها راه نفوذ آب به درون سامانه آب زیرزمینی است، نقش مهمی را در انتقال و کانالیزه شدن جریان و خروج آب به صورت چشمه و یا انتقال آن به آبرفت مجاور دارند. منطقه‌ی مورد مطالعه از نظر کوهزایی بسیار فعال بوده و خصوصاً در بخش‌های آتشفشانی ارومیه-دختر بسیار خرد شده و گسله می‌باشد. بازشدگی درزها از یک میلیمتر تا بیش از یک متر متغیر بوده که عمدتاً از مواد ماسه‌ای - لایی پر شده‌اند. در سنگ‌های آذرین منطقه، اگر چه تراکم درزها زیاد بوده و باز شدگی مناسبی دارند، ولی به لحاظ پرشدگی آن‌ها به وسیله مواد نسبتاً دانه‌ریز و عدم عملکرد انحلال در آن‌ها، همچنین توسعه نیافتن عمقی درز و شکاف‌ها، آبخوان‌های مناسبی تشکیل نشده است و چشمه‌های با بده بسیار کمی رویت می‌شوند؛ کیفیت آب چشمه‌ها به دلیل انحلال پذیری کم تشکیلات آذرین بسیار مناسب می‌باشد. سازندهای رسوبی منطقه نیز به دو دسته عمده‌ی سازند سخت و رسوبات دوران چهارم

زمین ریخت شناسی

در منطقه‌ی مورد مطالعه، با توجه به تنوع آب‌وهوایی، سنگ شناسی، پستی و بلندی و ساخت‌های کوهزایی، انواع پدیده‌ها و عوارض زمین ریخت شناسی به چشم می‌خورد؛ از میان آنها می‌توان به لغزش زمین در امتداد دامنه‌های پر شیب و سست، فرسایش‌های آبی که منجر به ایجاد سامانه‌های خاص آبراهه (با توجه به شیب و جنس تشکیلات) شده، عوارض انحلالی و غیره اشاره کرد. ارتفاعات شمال دشت قزوین عمدتاً از سنگ‌های آتشفشانی مقاوم ساخته شده‌اند، ولی در بعضی نقاط توف‌های آتشفشانی مشاهده می‌گردد که عوامل فرساینده، تا حدودی بر روی ناهمواری‌های آن‌ها تاثیرگذار بوده‌اند. به طور کلی، مشخصات این نواحی به وسیله‌ی حوضه‌های آبخیز طویل با شیب نسبتاً تند و دره‌های عمیق مشخص می‌گردد. تخریب سنگ‌ها در این قسمت نسبتاً شدید بوده و اغلب به شکل پدیده ژلیفراکسون موجب خرد شدن سنگ‌ها به ابعاد کوچک می‌گردد؛ در دامنه‌های پر شیب این عمل موجب بروز زمین لغزش شده است.

در این طرح براساس نوع نیاز تهیه نقشه‌های ماندابی و کاربری اراضی، از تصاویر ماهواره‌ی LANDSAT TM که در تاریخ ۱۹۸۵/۰۳/۰۱ به فضا پرتاب شده بهره‌وری گردیده است. در انجام این تحقیق از باندهای ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۷ که در تاریخ ۲۰۰۷/۰۵/۰۲ تصویربرداری شده و با نمایه مسیر ۱۶۵ و سطر ۳۵ مشخص گردیده، استفاده شده است.

شاخص‌های آسیب‌پذیری

روش‌های متفاوتی برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی موجود می‌باشند و اندازه‌ی ارزیابی که از روش‌های مختلف حاصل می‌گردد، مشخصه‌ای نیست که به صورت مستقیم از اندازه‌گیری‌های میدانی حاصل گردد؛ بلکه براساس این نظریه که برخی از مناطق نسبت به آلودگی آب‌های زیرزمینی مستعدتر از مناطق دیگر می‌باشند استوار است.

شاخص AVI^۳

در این روش از برآورد دو فراسنج شاخص آسیب‌پذیری سفره تعیین می‌شود. با دانستن ضخامت هر یک (n تعداد لایه) از واحدهای رسوبی در آبخوان (d) و ضریب هدایت هیدرولیکی هر یک از لایه‌ها (k)، مقاومت هدایت هیدرولیکی (عمودی) آبخوان طبق رابطه زیر تعیین می‌شود (استمورت و همکاران، ۱۹۹۳).

$$C = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{k_i} \quad (1)$$

وزن‌های دو فراسنج این شاخص به صورت اختیاری نبوده و بر اساس فیزیک نظری هستند. بعد مقاومت هیدرولیکی (C) زمان می‌باشد که بیان‌کننده‌ی زمان حرکت آب زیرزمینی از لابه‌لای خلل و فرج سطح فوقانی اشباع به سمت پایین به وسیله پخشودگی می‌باشد. عوامل از قبیل شیب هیدرولیکی، انتشار و جذب قابل توجه نمی‌باشند. با استفاده از جدول تنظیم شده مقادیر C و یا Log C این روش، مقدار شاخص آسیب‌پذیری سفره تعیین می‌شود (استمورت و همکاران، ۱۹۹۳). ضخامت لایه‌های رسوبی (شنی، رسوبات یخچالی، ماسه) از لوگ‌های چاه و یا داده‌های آزمایشگاهی عمومی زمین‌شناسی چاه گرفته می‌شود. یک آبخوان شامل واحدهای شنی یا ماسه‌ای است

سخت نشده (آبرفت) تقسیم می‌گردد. آن قسمت از سازند سخت رسوبی که انحلال‌پذیری آن‌ها ناچیز است، مانند کنگلومراها عملکردی را شبیه سنگ‌های آذرین داشته، و آبخوان مناسبی در آنها تشکیل نگردیده است؛ ولی در سراسر کرتاسه‌ی منطقه، به دلیل عملکرد انحلال و توسعه‌ی درز و شکاف‌ها، که زمینه‌ی نفوذ آب‌های سطحی را به درون سامانه فراهم کرده است، و زمین و ریخت‌شناسی خاص مناطق کارستی از قبیل درزه‌های انحلالی کارن و حفرات انحلالی رویت می‌گردد. در صورتی که رخنمونی این تشکیلات، و همچنین ضخامت آنها قابل توجه باشد، می‌تواند به عنوان آبخوانی برای آب زیرزمینی اهمیت فراوانی داشته باشد. در منطقه‌ی مورد مطالعه، رسوبهای آبرفتی به دلیل وسعت زیاد، و همچنین نفوذپذیری مناسب آن‌ها در کوهپایه‌ها و حاشیه‌ی دشت، قسمت عمده‌ی منابع آب زیرزمینی را در خود جای داده‌اند؛ اگرچه وجود سازند قم و تغذیه آبرفت‌ها را از سازندهای مجاور نیایستی نادیده گرفت.

منابع آب

میانگین بارندگی سالانه استان در حدود ۳۳۰ میلی‌متر است. بررسی کلیموگرام نشان می‌دهد بارانی‌ترین ماه سال فروردین و خشک‌ترین ماه تیر بوده است؛ میزان بارش با شرایط پستی و بلندی متغیر است، به نحوی که مناطق کوهستانی نسبت به کوه‌پایه و اراضی واقع در دشت از بارش بیشتری برخوردارند. آب‌های سطحی استان در ۲ حوضه آبخیز جاری هستند: الف) حوضه شمالی که از رودخانه‌های طالقان‌رود و الموت‌رود، که در منطقه‌ی شیرکوه به هم می‌پیوندند، و رود پر آب شاهرود را به وجود می‌آورند؛ رود خارود، نینه‌رود، اربدیان، وجینک، سردرود، تارولات، گرمارود و اندج‌رود نیز در مسیر به سوی سد سپیدرود به آن می‌ریزند، تشکیل شده است. شاهرود با حجم حدود ۱۱۵۰ میلیون مترمکعب در سال در شهر لوشان از استان خارج می‌شود. ب) حوضه آبخیز جنوبی (شور) که رود حاجی‌عرب، ابهررود و خررود را شامل گشته و بیش از چهل رود فصلی دامنه‌های جنوبی البرز، از جمله ارزک و دیزج نیز در آن جاری‌اند.

سنجش از راه دور

³ Aquifer Vulnerability Index

این روش برای ارزیابی آسیب‌پذیری سفره‌های کارستی مورد استفاده قرار گرفت و دارای چهار فراسنج اپی‌کارست^۴ (E)، پوشش حفاظتی منطقه (P)، شرایط نفوذپذیری (I) و شبکه‌ی توسعه‌ی یافته کارست (K) می‌باشد

که ضخامت اشباع حداقل ۰/۶ متر را داشته، و دارای حداقل یک چاه آبی فعال باشد. در جدول (۱) طبقات آسیب‌پذیری لایه آبدار بر اساس شاخص AVI بیان شده است و در جدول (۲) میزان هدایت هیدرولیکی برای شاخص مزبور مشخص گردیده‌اند.

شاخص EPIK

جدول ۱ - میزان آسیب‌پذیری آبخوان (AVI) (استمورت و همکاران، ۱۹۹۳).

مقاومت هیدرولیکی به سال	Log C	طبقه‌های آسیب‌پذیری شاخص AVI
۰-۱۰	۱>	خیلی زیاد
۱۰-۱۰۰	۱-۲	زیاد
۱۰۰-۱۰۰۰	۲-۳	مبه وسیله
۱۰۰۰-۱۰۰۰۰	۳-۴	پایین
۱۰۰۰۰<	۴<	خیلی پایین

جدول ۲ - میزان هدایت هیدرولیکی بر اساس نوع رسوب (استمورت و همکاران، ۱۹۹۳).

نوع رسوب	کد استاندارد	هدایت هیدرولیکی
شن	A	۱۰۰۰
ماسه	B	۱۰
ماسه لای	C	۱
لای	D	۰/۱
رس، شیل و رسوبات یخچالی مطبق (۵ تا ۰) متر از سطح زمین	E	۰/۰۰۱
رس، شیل و رسوبات یخچالی غیر مطبق (۵ تا ۰) متر از سطح زمین	F	۰/۰۰۰۱
رس، شیل و رسوبات یخچالی غیر مطبق ۱۰ متر از سطح زمین و هوزدگی بر اساس رنگ قهوه ای یا زرد	F	۰/۰۰۰۱
رسوبات یخچالی توده ای یا ترکیبی از رس، لای و ماسه	G	۰/۰۰۰۰۱
رس شیل توده ای	H	۰/۰۰۰۰۰۱

مبه وسیله (۲۵-۲۰) و زیاد (۱۹-۹) تقسیم می‌شود (دور فلائگر و زالن، ۱۹۹۸).

شاخص GOD

این روش از روش‌های تجربی و سریع محاسبه‌ی آسیب‌پذیری سفره از نظر کیفی است. سه فراسنج اصلی آن عبارتند از: پایش آب زیرزمینی (از نظر نوع سفره آزاد، تحت فشار) سنگ شناسی آبخوان (از نظر نوع تشکیلات، آبرفتی یا آهکی و یا آذرین و زیرمجموعه آن‌ها)، و عمق سطح آب زیرزمینی (فوستر، ۱۹۹۸).

شاخص DRASTIC

این شاخص به وسیله سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا در سال ۱۹۸۷ توسعه یافت. نام این شاخص از هفت

(دور فلائگر و زالن، ۱۹۹۸). عامل وزنی هر فراسنج نیز با توجه به منطقه مورد مطالعه از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$E_p = (\alpha + E_i) + (\beta + P_j) + (\gamma + I_k) + (\delta * K_l) \quad (2)$$

که در آن E_p شاخص آسیب‌پذیری بر اساس روش EPIK، E_i فراسنج مربوط به Epikarst، P_j فراسنج پوشش حفاظتی منطقه، I_k فراسنج شرایط نفوذپذیری و K_l فراسنج مربوط به توسعه شبکه کارستی می‌باشند. عامل‌های وزنی فراسنج‌ها در این روش مقادیر α ، β ، γ و δ می‌باشند. معمولاً $\alpha=3$ ، $\beta=1$ ، $\gamma=3$ و $\delta=2$ در نظر گرفته می‌شوند (دور فلائگر و زالن، ۱۹۹۸). مقادیر فراسنج‌های این روش با توجه به منطقه و نقشه‌ها و اطلاعات برآورد می‌گردد و منطقه آسیب‌پذیر به سه دسته کم (۳۴-۲۶)،

⁴ Epikarst

این روش بر اساس وزن‌دهی روش SINTACS در نظر گرفته می‌شود، که با توجه به شرایط سه‌گانه اراضی (شرایط بهنجار، متأثر از آلودگی‌های کشاورزی و متأثر از زهکشی سطحی) وزن‌بندی می‌شوند. شاخص آسیب‌پذیری با کاربرد روش ISIS طبق رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$IV = PInf * FInf + PSu * FSus * FSu + PIns * FSi * FIns + PSat * FSS * FSat \quad (5)$$

که در آن PInf تغذیه‌ی خالص (سانتی متر در هر متر خاک)، FInf ضریب نفوذپذیری (تابعی از نحوه‌ی کاربری اراضی)، PSu نوع خاک، FSus ضریب خاک (براساس نوع کاربری)، FSu ضریب وزنی خاک، Pins ناحیه‌ی غیراشباع، FSi ضریب وزنی ضخامت ناحیه‌ی غیراشباع، Fins ضریب وزنی کاربری اراضی ناحیه‌ی غیراشباع، PSat ناحیه‌ی اشباع سفره، FSS ضریب وزنی ضخامت ناحیه‌ی اشباع و FSat ضریب کاربری اراضی ناحیه آبخوان می‌باشند. میزان آسیب‌پذیری در این شاخص از ۲۴ تا ۱۸۰ متغیر بوده و براساس آن برای هر منطقه آسیب‌پذیری در یکی از گروه‌های خیلی کم (۲۴-۴۳)، کم (۴۳-۶۳)، متوسط (۶۳-۸۷)، زیاد (۸۷-۱۲۳) و خیلی زیاد (۱۲۳-۱۴۰) قرار می‌گیرد (سیویتا و دی رجبیوس، ۱۹۹۵).

جدول ۳- محدوده شاخص آسیب‌پذیری کاربرد روش SINTACS

محدوده شاخص SINTACS	طبقه آسیب‌پذیری
۹۰ >	بدون خطر آلودگی
۹۰ - ۱۰۹	خیلی کم
۱۱۰ - ۱۲۹	کم
۱۳۰ - ۱۴۹	کم تا مبه وسیله
۱۵۰ - ۱۶۹	مبه وسیله تا زیاد
۱۷۰ - ۱۸۹	زیاد
۱۹۰ - ۲۰۹	خیلی زیاد
۲۰۹ <	کاملاً مستعد آلودگی

فراسنج که بر آسیب‌پذیری تأثیر گذارند، ایجاد شده است، که عبارتند از: D: عمق سطح آب زیر زمینی، R: میزان تغذیه آب‌های زیرزمینی، A: محیط آبخوان، S: بافت خاک، T: پستی و بلندی، I: تراکم منطقه‌ی غیراشباع و C: هدایت هیدرولیکی (رابطه شماره‌ی ۳). چهار فرضیه‌ای که در این مدل در نظر گرفته می‌شوند عبارتند از: ۱- آلودگی که در سطح زمین تولید می‌گردد. ۲- آلودگی که از طریق نفوذ به زمین وارد می‌شود. ۳- عامل حرکت آلودگی، آب می‌باشد. ۴- منطقه‌ی مورد مطالعه بایستی بزرگ‌تر از ۰/۴ کیلومتر مربع، یا به عبارتی، بزرگ‌تر از ۱۰۰ ایکر باشد (آلر و همکاران، ۱۹۸۷). میزان تأثیر فراسنج‌های فوق بر شدت آسیب‌پذیری متفاوت بوده و به همین دلیل به هر کدام از آنها یک ضریب اختصاص داده شده است. برای محاسبه شاخص DRASTIC از رابطه زیر استفاده می‌گردد.

$$D_I = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w \quad (3)$$

که در این رابطه اجزای با نمایه r مربوط به ۷ فراسنج ذکر شده می‌باشند و اجزای با نمایه w وزن مربوط به هر کدام از این فراسنج‌ها است. در شاخص DRASTIC، وزن هر یک از فراسنج‌ها با توجه به دو نوع کاربرد طبیعی و اراضی کشاورزی، براساس آلر و همکاران (۱۹۸۷) برآورد گردید. مقدار عددی هر فراسنج در محدوده‌ی ذکر شده ارزشی را بین ۱ تا ۱۰ دارد.

شاخص SINTACS

این روش بر اساس روش DRASTIC تهیه شده است، با این تفاوت که فرآیند وزن‌بندی در آن انعطاف‌پذیرتر می‌باشد. به این صورت که وزن‌ها را می‌توان با توجه به شرایط نقطه‌ای آبخوان در هر منطقه تعیین کرد. شاخص آسیب‌پذیری در این روش براساس رابطه‌ی زیر حاصل می‌گردد (سیویتا، ۱۹۹۴).

$$I_v = \sum P(1,7) * W(i,n) \quad (4)$$

شاخص ISIS

این روش تلفیقی از روش‌های DRASTIC، وزن‌بندی GOD و SINTACS می‌باشد. فراسنج‌های این روش شامل متوسط تغذیه سالانه، پستی و بلندی، نوع خاک، ضخامت آبخوان، سنگ شناسی ناحیه غیراشباع، ضخامت لایه‌ی غیراشباع، نوع و ضخامت سفره می‌باشد. کاربری اراضی در

جدول ۴- ضریب مربوط به فراسنج‌ها بر اساس شرایط در

روش SINTACS.					
فراسنج	پهنجار	کارستی	کسلی و ترک خورده ^۷	زهکشی ^۸	مهم ^۹
S	۵	۲	۳	۴	۵
I	۴	۱	۳	۴	۵
N	۵	۱	۳	۴	۴
T	۳	۳	۴	۲	۵
A	۳	۵	۴	۵	۳
C	۳	۵	۵	۵	۲
S	۳	۵	۴	۲	۲

کاربری اراضی و آسیب‌پذیری

برای تهیه آسیب‌پذیری در یک آبخوان نیاز به تعیین

جدول ۵- رتبه بندی مربوط به عمق سطح ایستابی (S).

رتبه	0
۹	۰-۳
۸	۳-۵
۷	۵-۷
۶	۷-۱۰
۵	۱۰-۱۳
۴	۱۳-۲۰
۳	۲۰-۳۰
۲	>۳۰

جدول ۶- رتبه بندی مربوط به تغذیه خالص (I).

رتبه	تغذیه خالص (I)
۸	۰-۵۰
۵	۵۰-۱۰۰
۳	۱۰۰-۱۷۵
۱	>۱۷۵

جدول ۷- رتبه بندی مربوط به جنس منطقه غیراشباع (N).

رتبه	محیط غیر اشباع (N)
۹	رسوبات آبرفتی دانه درشت (ماسه و گراول)
۷	ماسه
۵	رسوبات آبرفتی دانه ریز (لای و رس همراه با ماسه‌های ریز دانه)
۲	رس و لای

جدول ۸- رتبه بندی مربوط به جنس لایه خاک (T).

رتبه	محیط خاک (T)
۱۰	گراول
۹	ماسه
۷	ماسه رس دار
۶	لوم ماسه ای
۵	لوم
۳	لای و رس
۲	لوم رسی

جدول ۹- رتبه بندی مربوط به محیط آبخوان (A).

رتبه	محیط آبخوان (A)
۹	رسوبات آبرفتی دانه درشت (ماسه و گراول)
۷	ماسه
۶	رسوبات آبرفتی دانه ریز (لای و رس همراه با ماسه‌های ریز)
۳	رس و لای

جدول ۱۰- رتبه بندی مربوط به هدایت هیدرولیکی (C).

رتبه	هدایت هیدرولیکی (C)
۹	۸۶/۴-۳۶۶/۳۹
۸	۴۳/۲-۸۶/۴
۷	۸/۶۴-۴۳/۲
۶	۴/۳۲-۸/۶۴
۵	۰/۸۶۴-۴/۳۲
۴	۰/۱-۰/۸۶۴
۳	۰/۰۷-۰/۱

جدول ۱۱- رتبه بندی مربوط به شیب زمین (S).

رتبه	پستی و بلندی (شیب % S)
۱۰	۰-۳
۹	۳-۵
۸	۵-۷
۷	۷-۱۰/۵
۶	۱۰/۵-۱۳/۵
۵	۱۳/۵-۱۶/۵
۴	۱۶/۵-۱۹/۵
۳	۱۹/۵-۲۳
۲	۲۳-۲۷/۵
۱	> ۲۷/۵

کاربری اراضی (شکل ۲) در محدوده‌ی آبخوان می‌باشد. بر اساس کاربرد زمین توان بالقوه آسیب‌پذیری تحلیل یا افزایش می‌یابد. در زمانی که نوع کاربری زمین مهم باشد بر اثر آلودگی لایه‌های آبدار خسارت بیشتری حاصل می‌گردد؛ و این امر نشان دهنده‌ی تاثیر نوع کاربرد زمین در مورد آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی یک منطقه است. از ترکیب نوع کاربری زمین با شاخص آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی حاصل می‌گردد (رابطه‌ی ۶).

$$MDI = DI + Lr * Lw \quad (6)$$

در این رابطه MDI میزان آسیب‌پذیری اصلاح شده، DI میزان آسیب‌پذیری، Lr نرخ مربوط به نوع کاربری اراضی و Lw وزن مربوط به کاربری اراضی می باشد که برابر با ۵ در دو شاخص آسیب منظور می‌گردد. بر اساس مطالعات ساکاندا^{۱۰} و همکاران (۱۹۹۸) با توجه به نوع کاربری زمین، ضرایب خاصی برای تهیه نقشه کاربری

⁸ Seepage

⁹ Severe

¹⁰ Secunda

⁵ Normal

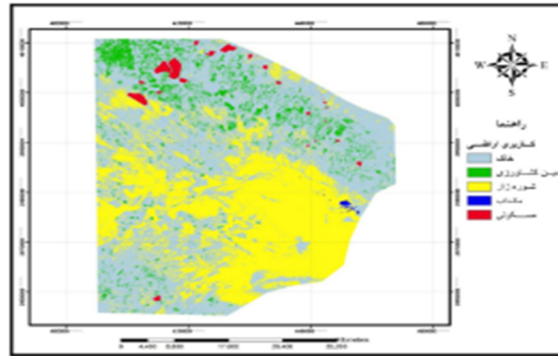
⁶ Karst

⁷ Fissured

استفاده کرد و ارزیابی‌ها در مقیاس کوچکتری صورت گیرد (رمسان و پاندا^{۱۱}، ۲۰۰۸).

تهیه نقشه زمین‌های ماندابی

برای توصیف آب توزیع شده در منطقه، از دانش و فن تصاویر دیجیتالی مختلف مانند آستانه‌گذاری و شیوه‌ی طبقه‌بندی استفاده می‌شود. برای تفکیک مناطق ماندابی



شکل ۲- کاربری اراضی.

بازدید میدانی و برداشت داده‌های اطلاعاتی از مناطق ماندابی با استفاده از GPS، نقاط نظارتی جهت تعیین حد آستانه ثبت شد.

تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری و آسیب‌پذیری

جهت تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری نیاز به تهیه چندین لایه‌ی اطلاعاتی است که بر اساس نوع شاخص انتخاب شده برای تعیین آسیب‌پذیری متفاوت می‌باشند. وزن هر کدام از لایه‌ها برای شاخص‌های مختلف بر اساس جداول مربوط (راندکویست و همکاران، ۲۰۰۱) به هر کدام تخصیص داده شده و نقشه‌های مربوط به هر کدام از لایه‌ها تهیه گردید. با ترکیب لایه‌های ایجاد شده نقشه‌ی آسیب‌پذیری برای هر کدام از شاخص‌ها تهیه شد. در نهایت، با تهیه لایه‌ی کاربری اراضی و الحاق آن به نقشه‌های آسیب‌پذیری، نقشه‌های خطرپذیری برای منطقه مورد نظر تهیه گردید. با توجه به کاربرد بعضی از فرانسج‌های کاربردی در چند شاخص آسیب‌پذیری، ابتدا برای هر یک از شاخص‌ها بر اساس فرانسج‌های موثر، نقشه‌های مورد نیاز تهیه، و سپس شاخص آسیب‌پذیری محاسبه شد.

اراضی برای هر کاربرد منظور می‌گردد. کاربری اراضی از سالی به سال دیگر دگرگون می‌شود. مخصوصاً در اراضی کشاورزی دارای الگوی کشت که به طور چرخشی از مزارع کشت آبی و باغ‌های میوه گرفته تا استخرهای پرورش ماهی تغییر می‌کند، بنابراین اجرای این روش نیازمند گسترش بانک اطلاعاتی داده‌ها می‌باشد. برای دستیابی به خطای کمتر و دقت بالاتر بایستی از داده‌های بیشتری

از سایر مناطق، از روش حد آستانه استفاده گردید (چاوداری و همکاران، ۲۰۰۸). بر این اساس از داده‌های باندهای NIR و G برای مناطق در معرض مسئله-ی ماندابی بهره‌وری شد. ترکیب دو باند مزایای مختلفی از قابلیت انعکاس طول موج‌های مختلف را در بالا بردن ویژگی‌های خاص ماهواره‌ای در اختیار قرار می‌دهد به عبارت دیگر، ترکیب دو باند و روی هم قرار گرفتن آنها باعث می‌گردد آن ویژگی نمود بیشتری پیدا کرده و در واقع واضحتر شود. برای هنجار کردن شاخص‌های مختلف آب از شاخص^{۱۲} NDWI استفاده شده است. این مشخصه به صورت زیر محاسبه می‌گردد (مکفارلانه، ۲۰۰۲).

$$NDWI = \frac{R_G - R_{NIR}}{R_G + R_{NIR}} \quad (7)$$

که در آن R_G بازتابش باند سبز و R_{NIR} بازتابش باند مادون قرمز می‌باشند. بازه، تغییرات شاخص NDWI بین صفر و یک است. انتخاب این شاخص به دلایل بیشینه کردن قابلیت انعکاس ویژگی‌های آب با استفاده از باند G، کمینه کردن اثر بازتاب‌های کم باند NIR به وسیله‌ی ویژگی‌های آب، بهره بردن از بازتابش‌های بالای NIR در خاک و وضعیت پوشش گیاهی زمین می‌باشد. با انجام

¹²Normalized Difference Water Index

¹¹ Remesan & Panda

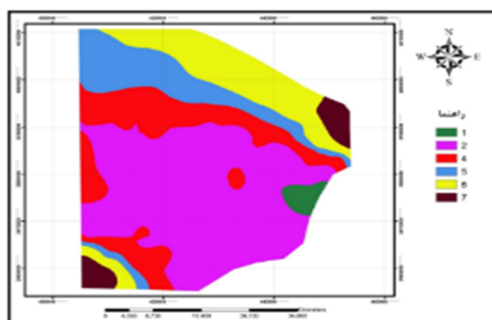
فراسنج عمق آب زیرزمینی

جهت تهیه لایه‌ی عمق آب زیر زمینی از داده‌های چاه‌های موجود در محدوده‌ی مورد مطالعه و تا فاصله ۱۵ کیلومتری اطراف محدوده (۱۰۵ چاه) استفاده شد، که این تفکیک به وسیله نرم‌افزار کمکی XTools در محیط نرم‌افزار ArcGIS انجام گرفت. به منظور استفاده از روش‌های میان-یابی زمین آمار، داده‌ها باید به صورت بهنجار توزیع شده باشند، به همین منظور بهنجار بودن داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار MiniTab بررسی شد، که ضریب آمون (اندرسون دارلینگ) برابر با ۰/۷۲۹ به دست آمد. داده‌های بهنجار شده وارد نرم‌افزار GS+ گردیده و نیم تغییرنمای تجربی و مدل مناسب برای داده‌های چاه‌ها رسم گردید. اطلاعات ۲۰ حلقه چاه به عنوان داده‌های آزمایش روش‌های

میان‌یابی کریجینگ مورد استفاده قرار گرفت. برای این منظور ارتفاع محاسبه شده با روش‌های میان‌یابی با داده‌های واقعی مقایسه گردید و معیارهای مختلف ارزیابی محاسبه گردید (جدول ۱۲). با توجه به جدول ۱۲ بهترین روش‌های میان‌یابی شامل کریجینگ معمولی و عام می‌باشد، که با توجه به عمومیت روش کریجینگ معمولی این روش به عنوان روش میان‌یابی عمق آب زیر زمینی انتخاب گردید. در محیط نرم‌افزار ArcGIS و با کاربرد از نرم‌افزار کمکی Geostatistical Analyst و با استفاده از روش کریجینگ معمولی، میان‌یابی میان نقاط بهنجار شده انجام گرفت و نقشه رستری آب‌های زیرزمینی تهیه شد. بر اساس نوع شاخص به کار رفته جهت ارزیابی آسیب‌پذیری، فراسنج عمق آب زیرزمینی وزن‌دهی گردید.

جدول ۱۲- معیارهای مختلف برای روش‌های گوناگون میان‌یابی کریجینگ.

معیار	معمولی ^{۱۳}	ساده ^{۱۴}	عام ^{۱۵}	احتمالی ^{۱۶}	شاخص ^{۱۷}
MBE	۰/۵۸	۰/۵۹	۰/۵۸	۲/۸۲	۲/۷۸
MAE	۶/۵۸	۶/۶۱	۶/۵۸	۱۵/۵۸	۱۲/۳۴
RMSE	۸/۰۸	۸/۱۳	۸/۰۸	۱۷/۰۷	۱۴/۶۴



شکل ۳- رتبه بندی لایه‌ی آبدار بر اساس مقاومت ویژه ظاهری.

فراسنج جنس لایه‌ی آبدار

بدین منظور، در ابتدا با دریافت لایه‌ی اطلاعاتی مربوط به مقاومت ویژه‌ی ظاهری، این لایه جهت استفاده در محیط ArcGIS، در محیط نرم‌افزار AutoCAD آماده شد. لایه‌های دریافتی به صورت خطوط هم مقاومت ویژه ظاهری بودند که بعد از انتقال به محیط ArcGIS به صورت رستری ایجاد گردیدند. در ادامه جنس لایه آبدار ارزش‌دهی، و نقشه‌ی مورد نظر با وزن‌های مربوطه برای هر شاخص ایجاد گردید (شکل ۳).

فراسنج ضخامت لایه آبدار

بر اساس عمق مربوط به سنگ بستر در دشت قزوین و همچنین عمق آب زیرزمینی که در قسمت‌های قبل به وسیله چاه‌های مشاهده‌ای به دست آمده است، ضخامت لایه‌ی آبدار تعیین شد. نقشه خطوط هم عمق سنگ بستر به صورت تصویر عکس برداری شده از کتابخانه‌ی وزارت نیرو تهیه گردید و برای استفاده، ابتدا در نرم‌افزار ArcGIS زمین مرجع شد. سپس تصویر مربوطه Digit گردید و خطوط هم عمق، سنگ بستر ایجاد گردیدند. در ادامه، با

¹⁶ Probability kriging

¹⁷ Indicator kriging

¹³ Ordinary kriging

¹⁴ Simple kriging

¹⁵ Universal kriging

رستری قابلیت انتقال استفاده گردید. در نهایت با تقسیم لایه حاصل به لایه‌ی ضخامت لایه‌ی آبدار، نقشه‌ی رستری هدایت هیدرولیکی منطقه تهیه شد (شکل ۴ الف).

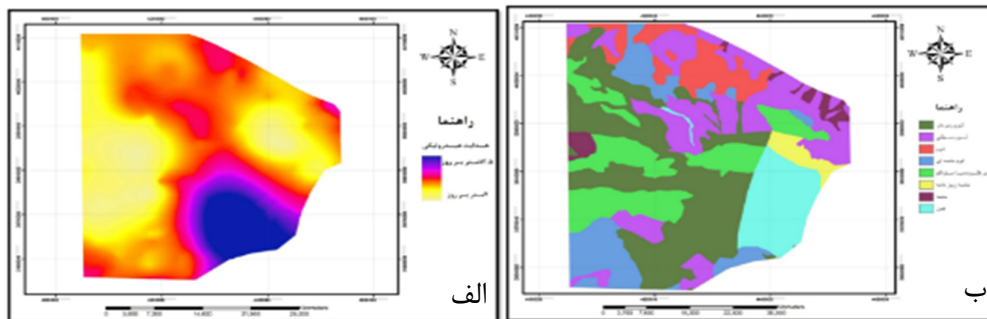
فراسنج نوع خاک

با مراجعه به سازمان خاک شناسی، نقشه‌ی مربوط به تقسیم‌بندی خاک منطقه‌ی مورد مطالعه به صورت عکس برداری تهیه گردید. محدوده و نوع خاک بر روی تصویر مشخص بود. با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS و نرم‌افزار کمکی Georeferencing منطقه به‌عنوان زمین مرجع معرفی و محدوده مربوط به هر نوع خاک digit گردید؛ با استفاده از تصویر پایه‌ی نوع خاک سطحی برای هر قسمت مشخص شد. براساس نوع شاخص کاربردی و نوع خاک وزن‌دهی صورت گرفت (شکل ۴ ب).

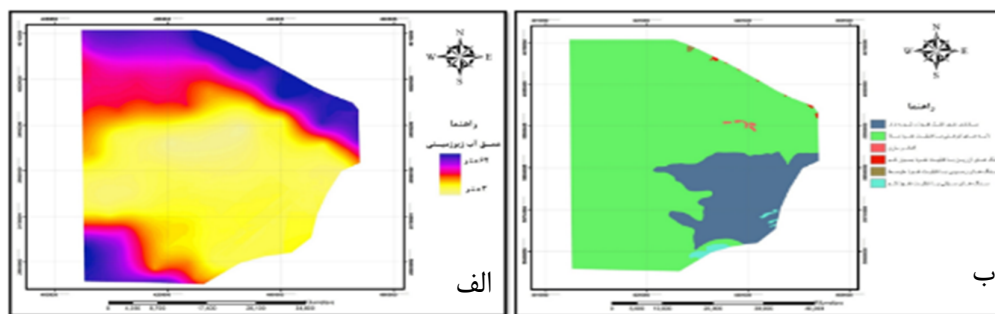
استفاده از روش مربوط به میان‌یابی خطوط تراز نقشه‌ی رستری این لایه ایجاد شد. با به‌کارگیری نقشه‌ی رستری عمق آب زیرزمینی و نقشه‌ی عمق سنگ بستر، نقشه‌ی ضخامت لایه‌ی آبدار حاصل می‌گردد.

فراسنج هدایت هیدرولیکی

برای ایجاد نقشه‌ی هدایت هیدرولیکی نیاز به داشتن نقشه‌ی ضخامت لایه آبدار و نقشه‌ی قابلیت انتقال منطقه می‌باشد (شمسائی، ۱۳۸۱). در قسمت قبل، نحوه‌ی تهیه نقشه‌ی ضخامت لایه‌ی آبدار توضیح داده شد. نقشه‌ی مربوط به قابلیت انتقال (اخذ شده از شرکت آب منطقه‌ای قزوین) به صورت نقشه‌ی خطوط هم‌قابلیت در محیط AutoCAD تهیه گردید. این لایه برای استفاده در محیط ArcGIS آماده و به آن انتقال داده شد. سپس از روش مورد استفاده برای میان‌یابی خطوط تراز جهت تهیه نقشه‌ی



شکل ۴- الف) تغییرات هدایت هیدرولیکی (ب) جنس خاک.



شکل ۵- الف) عمق آب زیرزمینی و (ب) جنس و میزان نفوذ خاک.

(شکل ۵ ب) و عمق آب زیرزمینی (شکل ۵ الف) رتبه‌بندی ناحیه غیر اشباع انجام گرفت.

معیارهای ارزیابی

معیارهای مختلفی برای ارزیابی کارایی روش‌های میان‌یابی وجود دارند که می‌توان به میانگین خطای اریب

تهیه نقشه‌ی نفوذپذیری و عمق آب زیرزمینی

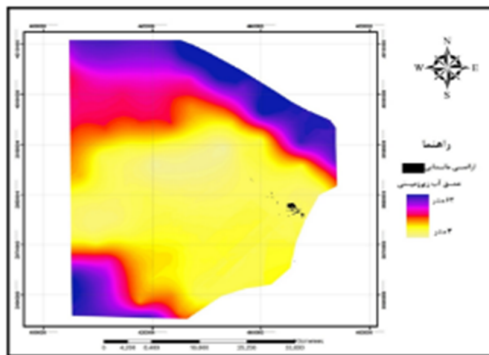
نقشه‌ی نفوذپذیری منطقه مورد مطالعه به صورت لایه-ی GIS تهیه گردید و براساس نتایج پیسکوپو و همکاران (۲۰۰۱) ارزش‌دهی شد. با ترکیب نقشه‌های نفوذپذیری

مسئلاً هر چه کمتر باشد بهتر بوده و بیانگر این مطلب است که مدل فضای مورد نظر را با انحراف کم‌تری برآورد می‌کند. در عمل هیچ گاه این دو مقدار صفر نمی‌شوند. از نظر تئوری هرگاه این دو مقدار برابر صفر شوند، نمایانگر این مطلب است که دقت روش صددرصد بوده و مقدار تخمین زده شده یک کمیت، دقیقاً برابر مقدار واقعی آن است.

نتایج و تجزیه و تحلیل

نقشه‌ی ماندابی

شکل (۶) مناطق ماندابی و عمق آب زیرزمینی دشت قزوین را نشان می‌دهد. با بررسی متوسط عمق آب زیرزمینی منطقه مشخص گردید که تمام مناطق دارای عمق کمتر از حد بحرانی بوده، و مناطقی هم که به عنوان ماندابی مشاهده شده‌اند در محدوده‌ی عمق بسیار کم قرار می‌گیرند. همچنین بر اساس نتایج به دست آمده ضخامت لایه‌ی آبدار بین ۷۸ متر تا ۲۱۶ متر برای منطقه‌ی مورد مطالعه تغییر می‌کند.



شکل ۶- مناطق ماندابی و عمق آب زیرزمینی دشت.

آسیب‌پذیری بر اساس وضعیت کارستی در شاخص SINTACS نشان داده شده است.

وضعیت زهکشی و نفوذ

اگر منطقه‌ی مورد مطالعه دارای وضعیت زهکشی و نفوذپذیری زیاد باشد، در این حالت محدوده‌ی آسیب‌پذیری بین اعداد ۹۷ تا ۱۸۵ تغییر کند، و بیشتر منطقه دارای توان بالقوه آسیب‌پذیری متوسط تا زیاد می‌باشد که تقریباً نیمی از منطقه را شامل می‌شود؛ بعد از آن طبقه آسیب‌پذیری کم تا متوسط با سطحی معادل ۳۷ درصد بیشترین مساحت را به خود اختصاص داده است.

یا انحراف (MBE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ریشه دوم میانگین مربع خطا (RMSE) اشاره کرد. این معیارها با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌گردند:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z(x_i) - Z^*(x_i)| \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |Z(x_i) - Z^*(x_i)|^2}{n}} \quad (8)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ((Z(x_i) - Z^*(x_i))) \quad (9)$$

که در آنها $Z(x_i)$ مقدار مشاهده شده در نقطه‌ی x_i ، $Z^*(x_i)$ مقدار برآورد شده در نقطه‌ی x_i و n تعداد داده‌ها می‌باشند. معمولاً هر چه مقدار این معیارها کمتر باشد، دقت بالاتر است، در واقع MAE، معرف دقت روش و مقدار مبه‌وسيله خطا است که هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد، بیانگر این مطلب است که مقادیر محاسبه شده به وسیله مدل، به مقادیر حقیقی نزدیک‌تر و در نتیجه مدل از خطای کم‌تری برخوردار است. مقدار MBE نشانگر میانگین انحراف مقدار برآوردی از مقدار مشاهده شده است که

نقشه‌های آسیب‌پذیری

وضعیت کارستی

در مناطقی که به صورت کارستی می‌باشند نوع وزن‌دهی به فرانسجها در شاخص SINTACS متفاوت می‌باشد. در این حالت، محدوده‌ی آسیب‌پذیری بین اعداد ۹۱ تا ۲۰۱ تغییر می‌نماید. در صورتی که کل منطقه به صورت کارستی فرض گردد، حدود ۴۴ درصد منطقه در طبقه آسیب‌پذیری متوسط تا زیاد قرار دارد و حدود ۴۳ درصد در طبقه زیاد قرار می‌گیرد. بر این اساس می‌توان بیان کرد که اگر منطقه‌ای کارستی باشد، احتمال آلودگی متوسط به بالا می‌باشد. در شکل (۷ الف) تقسیم‌بندی

شاخص SINTACS متنوع‌ترین شاخص ارزیابی توان بالقوه آسیب‌پذیری می‌باشد به طوری که براساس نوع و حساسیت منطقه ضرایب مختلفی برای هر کدام از فرانسجهای کاربردی در این شاخص، در نظر گرفته می‌شود.

وضعیت بهنجار

بر اساس نتایج به دست آمده، بیشترین قسمت از محدوده‌ی مورد مطالعه دارای حساسیت آسیب‌پذیری متوسط تا زیاد می‌باشد، که حدوداً برابر با ۴۵ درصد از کل منطقه را شامل می‌گردد. بعد از آن حدود ۳۹ درصد از منطقه دارای توان بالقوه آلودگی کم تا متوسط می‌باشد (شکل ۸). در صورتی که کل منطقه به صورت کارستی فرض گردد حدود ۴۴ درصد منطقه در طبقه آسیب‌پذیری متوسط تا زیاد قرار داشته و حدود ۴۳ درصد در طبقه‌ی زیاد قرار می‌گیرد (شکل ۸). بر این اساس می‌توان بیان کرد که اگر منطقه‌ای کارستی باشد احتمال آلودگی متوسط به بالاست. اگر منطقه مورد مطالعه دارای وضعیت زهکشی و نفوذپذیری زیاد باشد، در این حالت محدوده‌ی آسیب‌پذیری بین اعداد ۹۷ تا ۱۸۵ تغییر کرده و بیشتر منطقه دارای توان بالقوه آسیب‌پذیری متوسط تا زیاد است که تقریباً نیمی از منطقه را شامل می‌شود؛ بعد از آن طبقه آسیب‌پذیری کم تا متوسط با سطحی معادل ۳۷ درصد بیشترین مساحت را به خود اختصاص داده است. این مقادیر نشان دهنده آسیب‌پذیری متوسط در صورت داشتن چنین وضعیتی در منطقه می‌باشد (شکل ۸). منطقه‌ی مورد مطالعه در وضعیت گسلی و ترک خورده براساس وزن دهی مربوط به این حالت، محدوده‌ی آسیب‌پذیری بین اعداد ۹۲ تا ۱۹۷ تغییر کرده و بیشتر در طبقه آسیب‌پذیری متوسط تا زیاد قرار می‌گیرد. در حالت وضعیت حساس محدوده‌ی آسیب‌پذیری بین اعداد ۷۷ تا ۲۰۷ تغییر می‌نماید. بیشترین قسمت منطقه در این وضعیت، در طبقه کم تا متوسط که حدود نیمی از منطقه را شامل می‌گردد قرار می‌گیرد، و بعد از آن طبقه متوسط تا زیاد با ۲۸ درصد از کل منطقه سطح بالاتری از سایر طبقه‌ها دارد (شکل ۸).

این مقادیر نشان دهنده‌ی آسیب‌پذیری متوسط در صورت داشتن چنین وضعیتی در منطقه می‌باشد. در شکل (۷ ب) تقسیم‌بندی آسیب‌پذیری بر اساس وضعیت زهکشی در شاخص SINTACS نشان داده شده است.

وضعیت گسلی و ترک خورده

منطقه‌ی مورد مطالعه در وضعیت گسلی و ترک خورده براساس وزن‌دهی مربوط به این حالت، محدوده‌ی آسیب‌پذیری بین اعداد ۹۲ تا ۱۹۷ تغییر نمود و بیشتر در طبقه آسیب‌پذیری متوسط تا زیاد قرار می‌گیرد. در شکل (۷ ج) تقسیم‌بندی آسیب‌پذیری بر اساس وضعیت گسلی و ترک خورده در شاخص SINTACS نشان داده شده است.

وضعیت حساس

در این حالت محدوده آسیب‌پذیری بین اعداد ۷۷ تا ۲۰۷ تغییر می‌کند. بیشترین قسمت منطقه در این وضعیت، در طبقه کم تا متوسط که حدود نیمی از منطقه را شامل می‌گردد قرار می‌گیرد، و بعد از آن طبقه متوسط تا زیاد با ۲۸ درصد از کل منطقه سطح بالاتری را از سایر طبقه‌ها دارد. در شکل (۷ چ) تقسیم‌بندی آسیب‌پذیری بر اساس وضعیت حساس در شاخص SINTACS نشان داده شده است.

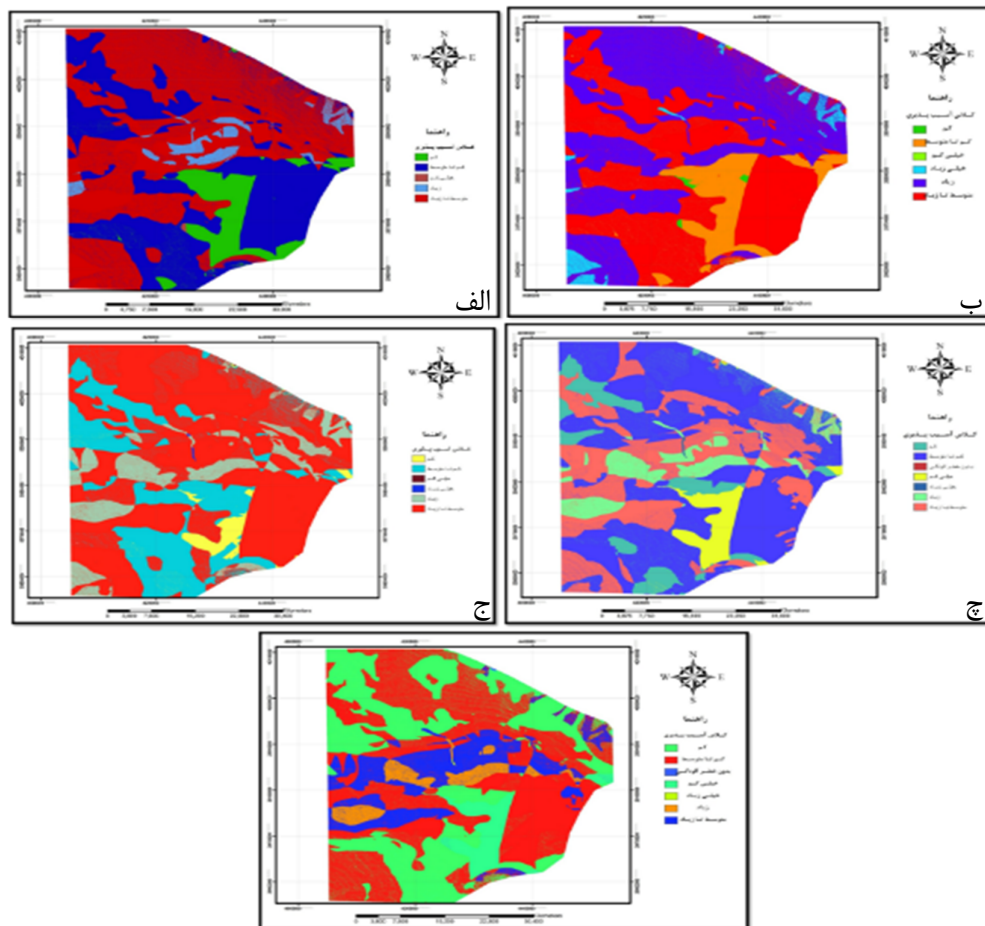
شرایط کشاورزی

در شرایطی که وضعیت کشاورزی حاکم باشد، محدوده آسیب‌پذیری بین اعداد ۶۶ تا ۱۹۳ تغییر می‌کند. بر اساس شکل (۷ د) بیشتر منطقه در محدوده‌های خطرپذیری کم تا متوسط قرار می‌گیرند.

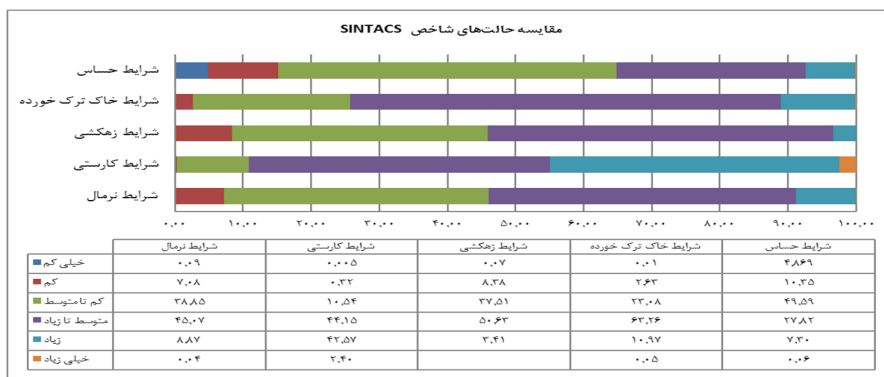
تحلیل شاخص‌ها

براساس نوع کاربرد و حساسیت زمین شرایط وضعیت آسیب‌پذیری تغییر می‌کند، بنابراین با توجه به نوع منطقه باید شاخص مورد نظر انتخاب گردد. در این قسمت هر کدام از شاخص‌های آسیب‌پذیری جداگانه بررسی و شرح داده می‌شوند.

شاخص SINTACS



شکل ۷- الف) طبقه بندی آسیب پذیری شاخص SINTACS در شرایط کارستی، ب) طبقه بندی آسیب پذیری شاخص SINTACS در شرایط زهکشی و نفوذ بسیار، ج) طبقه بندی آسیب پذیری شاخص SINTACS در شرایط گسلی و ترک خورده، د) طبقه بندی آسیب پذیری شاخص SINTACS در شرایط حساس و ه) طبقه بندی آسیب پذیری شاخص DRASTIC در شرایط کشاورزی.



شکل ۸- نمودار مقایسه‌ی حالت‌های شاخص SINTACS.

در مناطق با وضعیت کارستی می‌باشد. در تمام حالت‌ها به جز حالت حساس بیشترین توان بالقوه آسیب‌پذیری منطقه

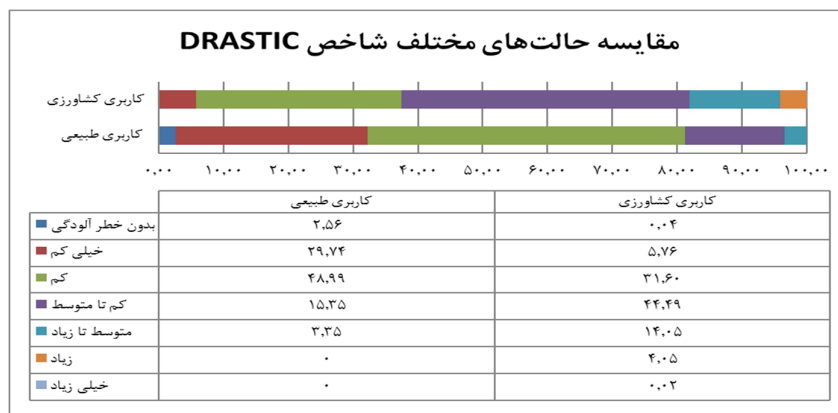
در مقایسه‌ی صورت گرفته بین حالت‌های این شاخص، مشخص گردید که بیشترین احتمال حساسیت به آلودگی

کشاورزی حاکم باشد، محدوده آسیب‌پذیری بین اعداد ۶۶ تا ۱۹۳ تغییر می‌کند. بر اساس شکل ۹ بیشتر منطقه در محدوده‌های خطرپذیری کم تا متوسط قرار می‌گیرد. در حالی که وضعیت منطقه به صورت طبیعی در نظر گرفته شود، میزان خطرپذیری کمتر از حالتی است که کاربری کشاورزی در نظر گرفته شود. در حالت وضعیت طبیعی طبقه‌های آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد در منطقه دیده نمی‌شوند. اما در هر دو وضعیت بیشترین مساحت در طبقه آسیب‌پذیری کم و کم تا متوسط قرار دارد (شکل ۹). همچنین درصد منطقه‌ی بدون خطر در حالت طبیعی خیلی بیشتر از حالت کاربری کشاورزی می‌باشد، بنابراین، می‌توان چنین نتیجه گرفت که بر اساس شاخص DRASTIC منطقه‌ی مورد مطالعه دارای آسیب‌پذیری غالب کم تا متوسط است (شکل ۹). بر اساس نوع منطقه و همچنین کمبود اطلاعات اولیه جهت تفکیک کامل محدوده‌ی مورد مطالعه از نظر وضعیت آب‌های زیرزمینی، شرایط بهنجار شاخص SINTACS به عنوان نقشه‌ی آسیب‌پذیری اصلی این شاخص برای منطقه‌ی مورد مطالعه معین گردید.

در طبقه‌ی آسیب‌پذیری متوسط تا زیاد قرار دارد. تنها در شاخص کارستی مساحت قابل توجهی از منطقه مربوط به طبقه آسیب‌پذیری متوسط تا زیاد است. در حالت حساس بیشترین پتانسل آسیب‌پذیری که معادل نیمی از منطقه است در طبقه آسیب‌پذیری کم تا متوسط قرار می‌گیرد. این تفاوت به دلیل وزن دهی مختلف به فراسنج‌ها می‌باشد. در کل، بنا بر مقایسه حالت‌های مختلف، و طبقه‌های آسیب‌پذیری تخصیص داده شده به منطقه‌ی مورد مطالعه در این حالت‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که بر اساس شاخص SINTACS محدوده‌ی مورد مطالعه دارای توان بالقوه آسیب‌پذیری متوسط می‌باشد (شکل ۸).

مقایسه حالت‌های مختلف بر اساس شاخص DRASTIC

بر اساس تحلیل صورت گرفته حدود ۴۹ درصد از منطقه بر اساس وزن‌دهی کاربری طبیعی در شاخص DRASTIC در محدوده‌ی خطرپذیری کم قرار دارد؛ در بعضی مناطق، هیچ گونه خطری آب‌های زیرزمینی را تهدید نمی‌کند. این نشان می‌دهد که استفاده از مناطق مزبور برای مواردی همچون احداث کارخانه و تخلیه پساب‌ها مناسب است (شکل ۹). در شرایطی که وضعیت



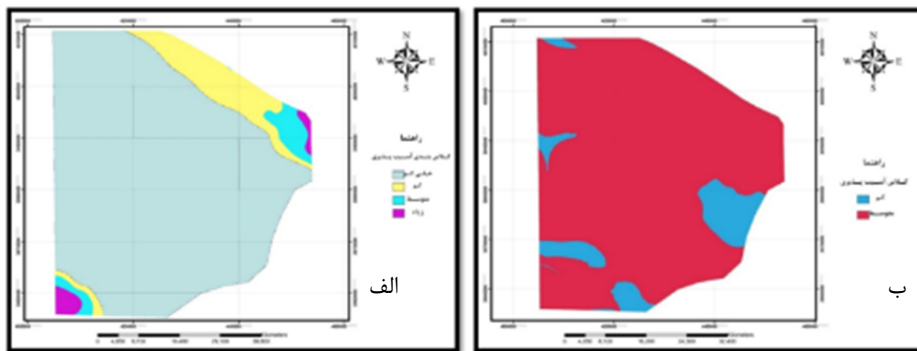
شکل ۹- مقایسه‌ی حالت‌های شاخص DRASTIC.

شاخص GOD

بر اساس نتایج موجود در شکل (۱۰ ب) منطقه‌ی مورد مطالعه از نظر آسیب‌پذیری در دو گروه کم و متوسط قرار می‌گیرد، که بیشترین مقدار با سطحی معادل ۹۰ درصد در طبقه آسیب‌پذیری متوسط، و تنها ۱۰ درصد در طبقه آسیب‌پذیری کم قرار دارد. این مطلب نشان دهنده‌ی توان بالقوه آسیب‌پذیری متوسط در منطقه است.

شاخص آسیب‌پذیری آبخوان AVI

بر اساس نتایج موجود در شکل (۱۰ الف)، حدود ۸۶ درصد از منطقه در طبقه آسیب‌پذیری خیلی کم قرار می‌گیرد، و بعد از آن منطقه‌ی آسیب‌پذیری کم دارد، بنابراین، آسیب‌پذیری منطقه بر اساس این شاخص توان بالقوه آسیب‌پذیری کم و بسیار کم می‌باشد.



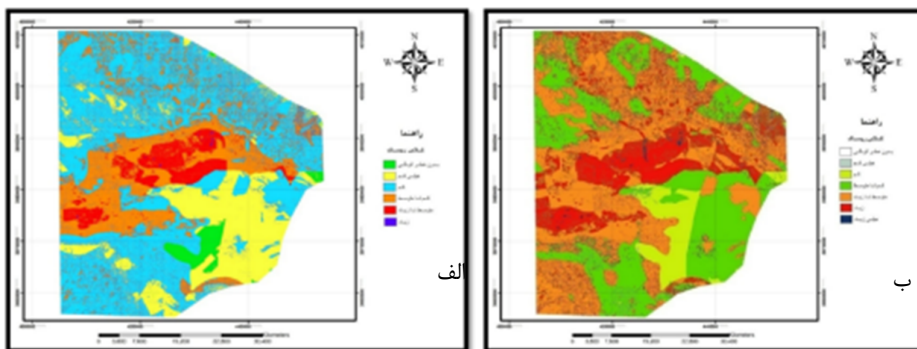
شکل ۱۰- الف) طبقه بندی آسیب پذیری شاخص GOD. ب) طبقه بندی آسیب پذیری شاخص AVI

خطر پذیری منطقه

آسیب پذیری طبیعی

محدوده‌ی خطر پذیری با ترکیب کاربری اراضی و شاخص DRASTIC طبیعی، برای منطقه‌ی مورد مطالعه تغییر عدد آسیب پذیری بین ۸۱ تا ۱۹۲ می‌باشد. با توجه به شکل ۱۱-الف حدود ۷۰ درصد منطقه دارای آسیب پذیری کم و کم تا متوسط می‌باشد و تنها ۰/۰۵ درصد از محدوده مورد مطالعه در طبقه آسیب پذیری زیاد قرار می‌گیرد. بر اساس این تقسیم بندی توان بالقوه آسیب‌پذیری منطقه کم می‌باشد و بنابراین منطقه در کل شرایط مناسبی در برابر آسیب‌پذیری سفره‌های آب زیرزمینی دارا است.

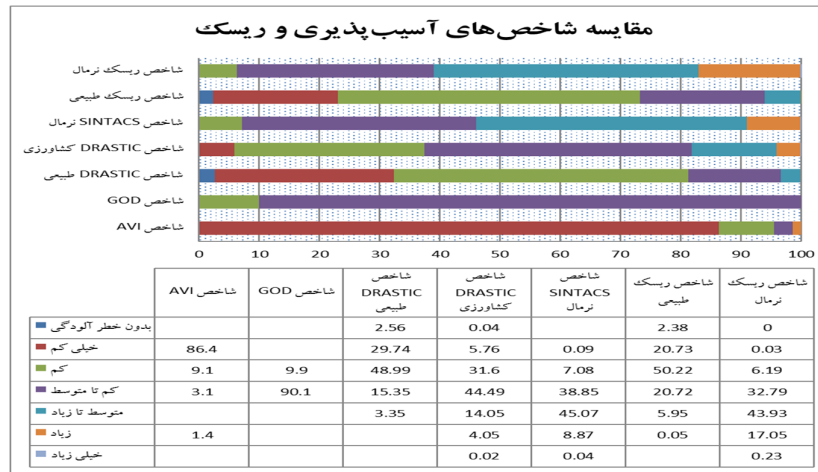
آسیب پذیری بهنجار



شکل ۱۱ - الف) طبقه بندی آسیب پذیری طبیعی ب) طبقه بندی آسیب پذیری بهنجار.

طبقه‌های آسیب‌پذیری منطقه براساس این شاخص به ۶ دسته‌ی بدون خطر آلودگی، آسیب‌پذیری خیلی کم، کم، کم تا متوسط، متوسط تا زیاد و زیاد تقسیم گردید که نسبت هر طبقه به کل منطقه به ترتیب برابر، ۲/۳۸-، ۲۰/۷۳، ۲۲/۷۲، ۵۰/۲۰، ۲۰/۵۰ و ۰/۰۵ درصد شد.

برای ارائه‌ی تصویر روشن تری از نتایج، مقایسه‌ی شاخص‌های آسیب‌پذیری و خطر پذیری، که در بالا تشریح گردیده‌اند، در شکل ۱۲ نشان داده شده است. آسیب‌پذیری طبیعی به دلیل فراسنجهای موثر بیشتر، به عنوان شاخص برتر برای طبقه‌بندی آسیب‌پذیری انتخاب گردید.



شکل ۱۲- نمودار مقایسه‌ی شاخص‌های آسیب‌پذیری و خطر پذیری.

نتیجه‌گیری

هدف از این مطالعه تهیه و مقایسه‌ی نقشه آسیب‌پذیری با کاربرد شاخص‌های DRASTIC، SINTACS، GOD و AVI در منطقه قزوین می‌باشد. لذا برای تعیین توان بالقوه آلودگی آب‌های زیرزمینی از چهار شاخص AVI، DRASTIC، GOD و SINTACS بر روی قسمتی از دشت قزوین استفاده شده است. داده‌ها و اطلاعات مورد استفاده در این مقاله شامل تصاویر ماهواره‌ای جهت تهیه نقشه‌های کاربری اراضی و تعیین مناطق ماندابی، نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ برای زمین مرجع نمودن تصاویر ماهواره‌ای و نقاط نظارت، اطلاعات عمق آب زیرزمینی در سالهای مختلف، تعیین میزان بارندگی در منطقه، قابلیت انتقال و مقاومت ویژه ظاهری لایه آبدار، عمق سنگ بستر، جنس خاک سطحی، نفوذ پذیری منطقه، شیب منطقه، جنس لایه آبدار، ضخامت لایه آبدار، فراسنج هدایت هیدرولیکی، جنس ناحیه غیر اشباع، فراسنج تغذیه‌ی خالص و کاربری اراضی تهیه گردیدند. به دلیل اهمیت شرایط ماندابی و فراسنج کاربری اراضی در تعیین توان بالقوه خطر پذیری و آسیب‌پذیری، این شرایط با به کارگیری تصاویر ماهواره‌ای مشخص شده است. از روش حد آستانه و نقاط نظارتی، مناطق ماندابی دشت مشخص گردیده است. عمق آب زیرزمینی با استفاده از اطلاعات چاه‌های منطقه و روش کریجینگ معمولی تعیین شده و پایین‌تر از حد بحرانی به دست آمده است. بر اساس نتایج به دست آمده، محدوده‌ی مورد مطالعه در شاخص AVI در ۴ طبقه آسیب‌پذیری خیلی کم، کم، متوسط و زیاد قرار

گرفت. بیشترین محدوده در طبقه خیلی کم با مساحتی معادل ۸۶/۴ درصد از کل منطقه قرار می‌گیرد و بعد از آن طبقه آسیب‌پذیری کم با سطحی معادل ۹/۱ درصد قرار دارد. کمترین مساحت در طبقه آسیب‌پذیری زیاد قرار گرفت که سطحی معادل ۱/۴ درصد از کل منطقه را شامل می‌گردد. سایر مناطق با مساحتی معادل ۳/۱ درصد، در طبقه آسیب‌پذیری متوسط قرار دارند، بنابراین، براساس این شاخص بیشتر منطقه دارای توان بالقوه آسیب‌پذیری کم و خیلی کم می‌باشد. براساس شاخص GOD، منطقه‌ی مورد مطالعه در دو طبقه آسیب‌پذیری کم و متوسط طبقه‌بندی می‌گردد. مساحت طبقه آسیب‌پذیری کم برابر با ۹/۹ درصد و طبقه آسیب‌پذیری متوسط برابر با ۹۰/۱ درصد مشخص شد؛ بنابراین، براساس این شاخص توان بالقوه آسیب‌پذیری منطقه در محدوده کم تا متوسط می‌باشد. براساس شاخص DRASTIC آسیب‌پذیری طبیعی منطقه‌ی مورد مطالعه در ۵ طبقه آسیب‌پذیری (از طبقه بدون خطر آلودگی تا طبقه آسیب‌پذیری زیاد) قرار می‌گیرد. بیش از ۷۵ درصد از منطقه در این شاخص در طبقه‌های آسیب‌پذیری کم و خیلی کم قرار دارد، همچنین کمترین مقدار در طبقه‌ی آسیب‌پذیری بدون خطر آلودگی قرار می‌گیرد. براساس طبقه‌های معین شده، آب‌های زیرزمینی منطقه دارای توان بالقوه آسیب‌پذیری کم می‌باشند. در طبقه‌بندی با شاخص آسیب‌پذیری کشاورزی، ۷ طبقه (از طبقه آسیب‌پذیری بدون خطر آلودگی تا طبقه آسیب‌پذیری خیلی زیاد) برای آسیب‌پذیری منطقه مشخص شده است. بیشترین محدوده‌ی در طبقه آسیب‌پذیری کم تا متوسط با سطحی معادل ۴۴/۴۹ درصد

مناسب‌ترین شاخص برای تخمین توان بالقوه آسیب‌پذیری و آسیب پذیری انتخاب گردیده و به عنوان شاخص تعیین آسیب‌پذیری منطقه پیشنهاد می‌شود.

منابع

- 1) Al-adamat, R.A.N., Foster, I.D.L and Baban, S.M.J. 2003. Groundwater vulnerability and risk mapping for the Basaltic aquifer of the Azraq basin of Jordan using GIS and Remote sensing and DRASTIC, *Applied Geography*:32-40.
- 2) 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 hydrogeological settings. National Water Well Association, Dublin, Ohio, 266 pp: 165-173.
- 3) Bai, L., Wang, Y. and Meng, F. 2011. Application of DRASTIC and extension theory in the groundwater vulnerability evaluation. *Water and Environment Journal*: 381-391.
- 4) Bagherzadeh, S., Kalantari, N., Rahimi, M. and Daneshiyan, H. 2011. Using GIS to Analyze Single-Parameter Sensitivity of SINTACS and DRASTIC Methods for Assessing the Vulnerability of Groundwater Resources in Behbahan Plain, Geomatics National Conference. (In Persian).
- 5) Castaneda, C. and Herrero, J. 2005. Landsat monitoring of playa-lakes in the Spanish Monegros desert, *J. Arid Environments* 63: 497-516
- 6) Chowdary, V. M., Chandran, R.V., Neeti, N.; Bothale, R.V., Srivastava, Y.K. and Ingle, P. 2008. Assessment of surface and sub-surface waterlogged areas in irrigation command areas of Bihar state using remote sensing and GIS, *Agricultural Water Management*: 754-766.
- 7) Civita, M. 1994. Le carte dellavulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento] Vulnerability map of aquifer contamination]. *Teoria andpractica*, Pitagora, Bologna, Italy
- 8) Civita, M. and De Regibus, C. 1995. Sperimentazione di alcune metodologie per la valutazione della vulnerabilità degli aquifer, Development of a methodology for the assessment of aquifer vulnerabilità, *Q Geol. Appl Pitagora*, 3:63-71.
- 9) Daneshkar Arasteh, P. 2007. Using Satellite Images to Identify Water Resistance and Soil Salinity (Case Study in Sistan Plain), Proceedings of the Fourth Drainage Workshop, National Irrigation and Drainage Committee of Iran (In Persian).
- 10) Doerfliger, N., Jeannin, P.Y. and Zwahlen, F. 1997. Water vulnerability assessment in karst environments: A new method of defining protection areas.
- 11) Doerfliger, N. and Zwahlen, F. 1998. Practical guide, groundwater vulnerability mapping in karstic

و کمترین محدوده‌ی در طبقه آسیب‌پذیری خیلی زیاد قرار می‌گیرد. بنابراین توان بالقوه آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی با استفاده از این شاخص بیشتر در محدوده‌ی کم تا متوسط و متوسط تا زیاد می‌باشد و خطرپذیری بیشتری را نسبت به آسیب‌پذیری طبیعی نشان می‌دهد. حالت بهنجار شاخص SINTACS به دلیل مطابقت بیشتر با منطقه بررسی گردید. در حالت بهنجار ۶ طبقه آسیب‌پذیری برای محدوده‌ی مورد مطالعه مشخص شده اند. طبقه آسیب‌پذیری متوسط تا زیاد با سطحی معادل ۴۵/۰۷ درصد، و بعد از آن طبقه آسیب‌پذیری کم تا متوسط با سطحی معادل ۳۸/۸۵ درصد، بیشترین محدوده را به خود اختصاص داده اند؛ کمترین محدوده در طبقه‌های آسیب‌پذیری خیلی کم و خیلی زیاد قرار دارد، بنابراین طبقه‌های آسیب‌پذیری غالب برای منطقه کم تا متوسط و متوسط تا زیاد تعیین می‌گردد. براساس نقشه آسیب‌پذیری طبیعی، منطقه‌ی مورد مطالعه در ۶ طبقه آسیب‌پذیری از طبقه آسیب‌پذیری بدون خطر آلودگی، تا طبقه آسیب‌پذیری زیاد قرار می‌گیرد. بیشترین محدوده در طبقه‌های آسیب‌پذیری خیلی کم تا متوسط قرار می‌گیرد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که آسیب‌پذیری غالب محدوده در طبقه خیلی کم تا متوسط است. با ترکیب نقشه کاربری اراضی با حالت بهنجار شاخص SINTACS، نقشه آسیب‌پذیری بهنجار تهیه گردید. نتایج نشان دادند که بیش از ۷۵ درصد از منطقه در طبقه‌ی آسیب‌پذیری کم تا متوسط و متوسط تا زیاد قرار می‌گیرد و مناطق باقی مانده، در ۴ طبقه تقسیم می‌گردند. بنابراین توان بالقوه آسیب‌پذیری غالب در این حالت متوسط می‌باشد. با توجه به نتایج کسب شده، شاخص آسیب‌پذیری بهنجار دارای بیشترین مقدار برای منطقه بوده، و بعد از آن شاخص SINTACS، شاخص DRASTIC کشاورزی، شاخص DRASTIC طبیعی، شاخص آسیب‌پذیری طبیعی، شاخص GOD و در نهایت شاخص AVI به ترتیب مقادیر حساسیت بیشتر تا کمتر را برای منطقه عرضه می‌نمایند. لازم به ذکر است که حساسیت محاسبه شده تابع شرایط هر یک از شاخص‌ها می‌باشد. براساس مقایسه‌ی کلی نمودارها می‌توان بیان نمود که توان بالقوه آسیب‌پذیری غالب در منطقه کم تا متوسط می‌باشد. از میان شاخص‌های آسیب‌پذیری، شاخص خط‌پذیری طبیعی به دلیل کاربرد فراسنج‌های بیشتر، و همچنین تاثیر کاربری اراضی،

- 24) Shamsaee, A. 2003. Hydraulic flow of water in porous media, Amir Kabir University of Technology, groundwater, Volume II. (In Persian).
- 25) Stempvoort, D., Evert, L. and Wassenaar, L. 1993. Aquifer vulnerability index: A GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping, *Can Water Res* 37:18-25
- 26) Remesan, R. and Panda, R.K. 2008. Groundwater vulnerability assessment, risk mapping, and nitrate evaluation in a small agricultural watershed: Using the DRASTIC model and GIS, *Environmental Quality Management* 17:53-75.
- 27) Sener, E. and Davraz, A. 2012. Assessment of groundwater vulnerability based on a modified DRASTIC model, GIS and an analytic hierarchy process (AHP) method: the case of Egirdir Lake basin (Isparta, Turkey). *Hydrogeology Journal*, DOI 10.1007/s10040-021-0947-y.
- 28) Thirumalaivasan, D., Karmegam, M. and Venugopal, K. 2003. AHP-DRASTIC: software for specific aquifer vulnerability assessment using DRASTIC model and GIS. *Environmental Modelling and Software* 18: 645-656
- 29) Williamson, M. 2001. *Cambridge Dictionary of Space Technology*, Cambridge University Press, First Edition.
- 12) Foster, S. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: Duijvenbooden W van, Waegeningh, HG van (Eds) *Vulnerability of soil and groundwater to pollutants, Proceedings and Information*, vol 38. TNO Committee on Hydrological Research, The Hague: 69-86.
- 13) Goossens, R. and Devliegher, B. 1997. Monitoring, simulation and prediction of soil salinity and waterlogging risk using remote sensing and GIS on provincial level (Ismailia, Egypt): 43-50.
- 14) Hasiniaina, F., Zhou, J. and Guoyi, L. 2010. Regional assessment of groundwater vulnerability in Tamtsag basin, Mongolia using drastic model. *Journal of American Science*: 65-78.
- 15) Indo-Dutch Network Project (IDNP), 2002. *A Methodology for Identification of Waterlogging and Soil Salinity Conditions Using Remote Sensing*, Published by Central Soil Salinity Research Institute
- 16) Lee, S. 2003. Evaluation of waste disposal site using the DRASTIC system in southern Korea *Environ Geol* 44: 654-664.
- 17) Jafari A. 2004. *The Great Culture of Gytology (Geographic Terminology)*, GITASHENASI Publishing, Second Edition. (In Persian).
- 18) McFarlane, Don J. and Williamson, D. 2002. An overview of water logging and salinity in southwestern Australia as related to the 'Ucarro' experimental catchment, *Agricultural Water Management* 53:5-29
- 19) Napolitano, P. and Fabbri, A.G. 1996. Single-parameter sensitivity analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS, *HydroGIS 96: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management (Proceedings of the Vienna Conference, April 1996)*. IAHS Publ.235:559-566.
- 20) Piscopo, G., Please, P. and Sinclair, P. 2001. *Macquarie Catchment groundwater vulnerability map Explanatory Notes*. Department of Land and Water Conservation, New South Wales.
- 21) Rundquist, O. T., Camur, M. Z. and Yazicigil, H. 2001. Statewide groundwater-vulnerability assessment in Nebraska using the DRASTIC/GIS Model. *Geocarto Int* 2: 51 – 58.
- 22) Rathore, D.S., Sanjay, K.j. and Chaudhry, A. 2001. Remote Sensing and GIS applications in zonation of water logging in irrigation command, National Institute of Hydrology Jalvigan Bhawan
- 23) Secunda, S., Collin, M. L. and Melloul, A.J. 1998. Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive agricultural land use in Israel's Sharon region. *Journal of Environmental Management*, 54:39-57.

