

ارزیابی آسیب پذیری آب های زیرزمینی در برابر آلودگی بر اساس روش های جدید ترکیبی

امین رضا نشاط^{۱*}، معصومه عابد^۲، مهدی رضائی^۳

۱. استادیار گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۳. دانشیار گروه علوم محیط زیست و جنگل، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

مسئله ی مهم در مورد منابع آب زیرزمینی، آگاهی از میزان آلودگی سفره آب زیرزمینی است که منجر به مدیریت مناطق مستعد آلودگی می شود. ارزیابی آسیب پذیری آبهای زیرزمینی می تواند نقشی حیاتی در حفاظت، بهره برداری و اولویت بندی مناطق جهت کنترل و استفاده از طرح های پیشگیرانه ایفا نماید. با توجه به ماهیت منطقه، فعالیت های کشاورزی و افزایش غلظت نیترات، روش DRASTIC نیاز به اصلاح دارد. هدف پژوهش حاضر اصلاح وزن های اولیه مدل DRASTIC است که با در نظر گرفتن اهمیت اصلاح رتبه بندی و تأثیر روش های وزن دهی در آبخوان یاسوج است. از چارچوب نسبت فرکانس برای کالیبره کردن نرخ های شاخص DRASTIC استفاده شد. در ادامه اصلاح وزن پارامترهای DRASTIC در دو مرحله پژوهش، که مرحله اول شامل روش های آنتروپی شانون و SPSA و مرحله دوم شامل روش های (BWM) بهترین- بدترین و تحلیل نسبت ارزیابی وزن دهی تدریجی (SWARA) است انجام شد. بنابراین نه چارچوب شامل FR_DRASTIC، DRASTIC_Entropy، DRASTIC_SPSA، DRASTIC_SWARA، DRASTIC_BWM، DRASTIC_SWARA، FR_Entropy، FR_SPSA، FR_BWM، FR_SWARA بدست آمد. از غلظت نیترات نمونه چاهها برای اعتبارسنجی شاخص های آسیب پذیری استفاده شد. اعتبار سنجی با روش ROC Curve انجام شد. FR_SWARA با سطح زیر منحنی 0/80 عملکرد بهتری نسبت به سایر روش ها داشت.

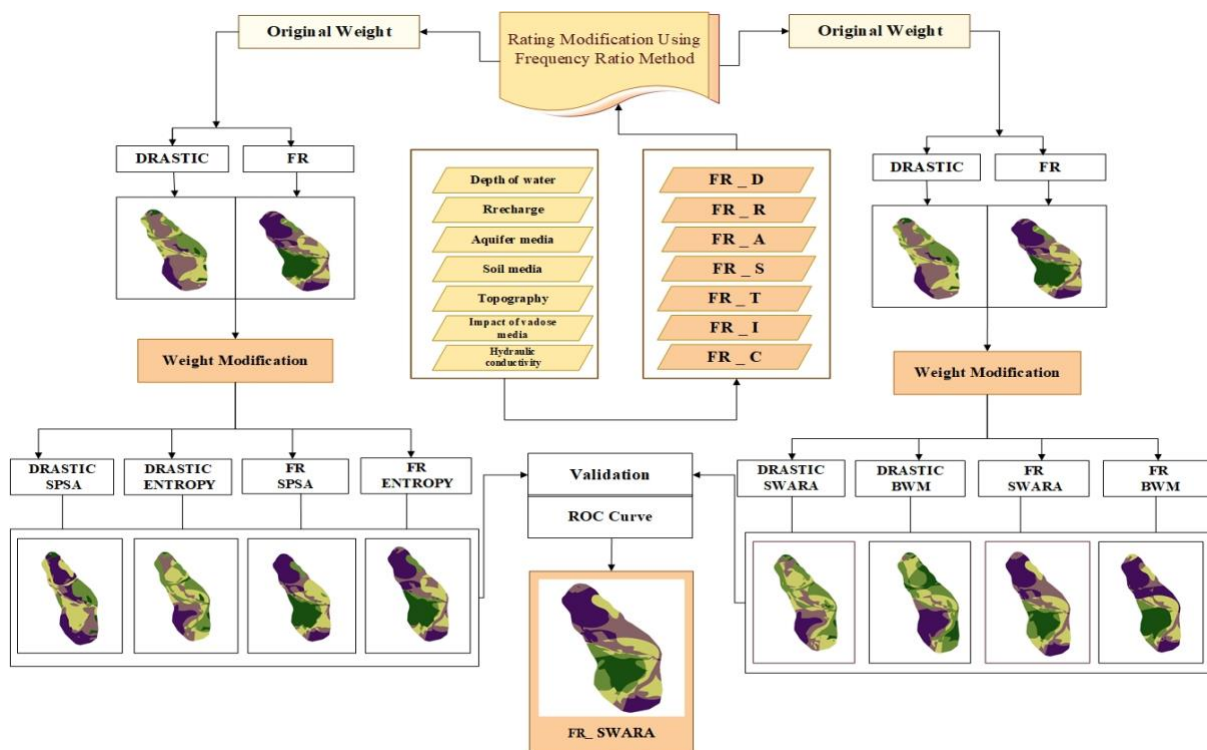
کلمات کلیدی: SWARA, Nitrate, Entropy, BWM

در بیشتر کشورها آب های زیرزمینی یک منبع مهم و برجسته هستند، به ویژه کشورهایی که در مناطق خشک نیمه خشک قرار دارند در مدیریت آب های زیرزمینی، بر کیفیت آب تاکید بیشتری شده است (Li, Karunanidhi, Subramani, & Srinivasamoorthy, 2021; Manap et al., 2014; Neshat, Pradhan, Pirasteh, & Shafri, 2014). در حال حاضر مدیریت موثر منابع آب زیرزمینی به یک موضوع جهانی نگران کننده تبدیل شده است زیرا توسعه سریع در صنعت و بخش های کشاورزی بر کیفیت آب های زیرزمینی و مقدار آن تاثیرگذار هستند (Ahmed, 2009; Jhariya, 2019). ارزیابی آسیب پذیری آب های زیرزمینی در برابر فعالیت های مخرب انسانی یک چالش بزرگ در هیدروژئولوژی کاربردی است (Gorelick & Zheng, 2015). بدین منظور ¹GVA برای حفاظت از آب های زیرزمینی در برابر آلودگی ها توسعه پیدا کرده است (Torkashvand, Neshat, Javadi, & Yousefi, 2021) (Kumar, Bansod, Debnath, Thakur, & Ghanshyam, 2015) (Kumar, Bansod, Debnath, Thakur, & Ghanshyam, 2015) و حتی گاهی غیرممکن می باشد (Expósito, Esteller, Paredes, Rico, & Franco, 2010) (Rezaei, Safavi, & Ahmadi, 2013) (Hao et al., 2017). بنابراین پیشگیری از آلودگی آب های زیرزمینی امری ضروری است. طبق جدول 2 پارامترهای DRASTIC با توجه به اهمیت نسبی آنها در کمک به پتانسیل آلودگی از یک تا پنج وزن دهی می شوند (Aller, Lehr, & Petty, 1987). شاخص DRASTIC، متشکل از هفت پارامتر هیدروژئولوژیکی تاثیرگذار مستقل، برای ارزیابی آسیب پذیری سفره های زیرزمینی به صورت ذاتی استفاده می شود (Aminreza Neshat, Pradhan, & Dadras, 2014). تعدادی از محققان در نقاط مختلف جهان به بهبود چارچوب DRASTIC در رابطه با آلودگی موجود و با استفاده از انواع روش های آماری و ریاضی پرداخته اند (Li et al., 2021) (Torkashvand et al., 2021) (Shrestha & Luo, 2018) (Busico et al., 2020).

نیترا ت به عنوان یک شاخص مناسب برای ارزیابی آلودگی آب های زیرزمینی استفاده می شود (Neshat & Pradhan, 2015). نیترا ت کاملاً در آب محلول است و به عنوان یک آلاینده بسیار متحرک با منشأ انواع منابع نقطه ای و غیر نقطه ای عمل می کند (Iqbal, Gorai, Katpatal, & Pathak, 2015) (Neshat & Pradhan, 2015). از این رو، بسیاری از محققان از نیترا ت به عنوان شاخص کیفیت آب زیرزمینی برای بررسی خطر آلودگی آب های زیرزمینی ناشی از سطح زمین استفاده کرده اند. سفره های آبی منابع مطمئن تری نسبت به آب های سطحی هستند بنابراین شناسایی میزان آسیب پذیری و به دنبال آن مدیریت آنها برای سال های خشکسالی ضروری به نظر می رسد. در این مطالعه سعی بر آن است که به کمک روشهای آماری به بررسی آسیب پذیری آبخوان یاسوج پرداخته شود. شهر یاسوج که در جنوب غربی ایران واقع است در سال های اخیر با افزایش جمعیت و به دنبال آن با رشد فعالیت های صنعتی و کشاورزی روبه رو بوده است. سفره آب یاسوج به عنوان منبع حیاتی آب مصرفی در منطقه، با بهره برداری بی رویه در معرض آسیب پذیری بیشتری قرار دارد. بنابراین ارزیابی دقیق آسیب پذیری آب زیرزمینی سفره آب یاسوج گامی اساسی برای مدیریت و حفاظت از آب آشامیدنی منطقه است. با توجه به مطالعاتی که در گذشته انجام شده و در دسترس بودن داده ها، چارچوب DRASTIC با ترکیب رویکردهای آماری قدرتمند با در نظر گرفتن غلظت نیترا ت در منطقه مورد مطالعه فعلی، اعمال و بهبود می یابد. استفاده از رویکردهای جدید برای تغییرات مدل، عملکرد بهتری نسبت به روش هایی که فقط رتبه بندی یا وزن دهی را انجام می دهند دارد. مجموعه های نسبت فراوانی، آنتروپی، و تجزیه و تحلیل حساسیت تک پارامتری (SPSA) ² توسط ترکاشوند و همکاران توسعه پیدا کرد (Torkashvand, Neshat, Javadi, Yousefi, & Berndtsson, 2023).

در مطالعه حاضر از روش های نسبت فراوانی، تحلیل نسبت ارزیابی وزن دهی تدریجی (SWARA) ³ و روش بهترین-بدترین (BWM) ⁴ برای بهبود عملکرد چارچوب اصلی DRASTIC استفاده شده است. FR برای اصلاح نرخ های DRASTIC به عنوان یک مدل آماری مبتنی بر احتمالات استفاده می شود. مطالعه انجام شده نشان داد که روش SWARA عملکرد بهتری نسبت به روش BWM دارد. مراحل انجام کار بر اساس شکل 1 انجام شد.

Figure 1. Flowchart of the study



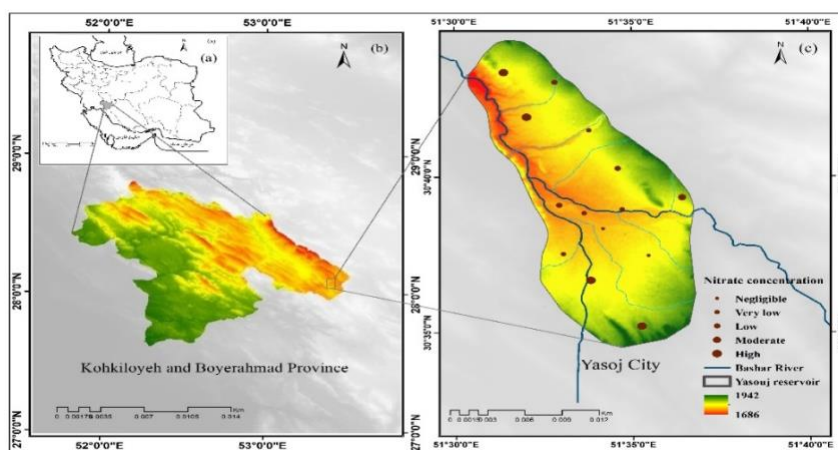
2- مواد و روش ها

2-1- منطقه مورد مطالعه

دشت یاسوج در جنوب غربی ایران واقع شده است و تقریباً بین عرض های جغرافیایی 30 درجه و 35 دقیقه شمالی تا 30 درجه و 45 دقیقه شمالی و طول جغرافیایی 51 درجه و 30 دقیقه شرقی تا 51 درجه و 40 دقیقه شرقی قرار دارد (شکل 2). اگرچه رشته کوه زاگرس یاسوج را احاطه کرده است اما توپوگرافی منطقه مورد مطالعه بسیار ملایم و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا 1860 متر است. بر اساس گزارش سازمان هواشناسی کشور، میانگین دمای سالانه منطقه مورد مطالعه 15/30 درجه سانتی گراد و مجموع بارندگی سالانه 820 میلی متر برآورد شده است. آبخوان یاسوج به عنوان برجسته ترین آبخوان منطقه 92 کیلومتر مربع وسعت دارد. با توجه به رطوبت زیاد و وزش بادهای مرطوب در منطقه مورد مطالعه، میزان بارندگی، بیشتر از میانگین بارندگی ایران (280 میلی متر) است که باعث ایجاد رودخانه ها می شود. رودخانه بشار به عنوان مهمترین رودخانه منطقه مورد مطالعه یکی از جریان های اصلی ورودی رودخانه کارون است. بر اساس اعلام سازمان آب کهگیلویه و بویراحمد 215 حلقه چاه بهره برداری در حوزه آبخوان یاسوج وجود دارد. با وجود چشمه ها و رودخانه های فراوان در اطراف یاسوج، به دلیل رشد جمعیت و توسعه شهری، این منابع بخش زیادی از آب شرب شهر یاسوج و روستاهای حومه شهر را تشکیل می دهند.

شکل کنونی منطقه مورد مطالعه ناشی از فعالیت کوهزایی در اواخر قرن سوم و کاهش تدریجی تراکم تاقدیس ها و ناودیس ها در جهت شمال غربی - جنوب غربی است. در دشت یاسوج، بستر آبخوان عمدتاً از ماسه سنگ و بازالت عظیم تشکیل شده است که به دلیل نفوذپذیری بالا، خطر نفوذ نیترات را افزایش می دهد. در نتیجه فعالیت های کشاورزی و استفاده گسترده از کودها، باعث افزایش قابل توجه غلظت نیترات در سراسر منطقه مورد مطالعه شده است. اخیراً رشد جمعیت باعث گسترش فعالیت های کشاورزی در دشت یاسوج شده است و استفاده گسترده از کودها نیترات را به سطح زمین وارد می کند. در مطالعه حاضر توزیع نیترات با استفاده از الگوریتم درونیایی کریجینگ معمولی بر اساس نمونه های آموزشی به دست آمده است.

Figure 2. Location of the study area and sampling points



2-2- روش ها

شاخص DRASTIC: روش DRASTIC یک چارچوب ساده است و به طور کلی، در جایی که داده های هیدروژئولوژیکی و هیدروژئولوژیکی در دسترس باشد قابل استفاده است. منابع داده های مورد استفاده برای تولید پارامترهای این روش در جدول 1 ارائه شده است. پارامترهای روش شامل عمق آب زیرزمینی (D)، تغذیه خالص (R)، محیط آبخوان (A)، محیط خاک (S)، توپوگرافی (T)، تأثیر ناحیه غیر اشباع (I)، و هدایت هیدرولیک (C) هفت پارامتر هیدروژئولوژیکی و هیدروژئولوژیکی هستند که بر حرکت آب زیرزمینی و فرآیندهای آلودگی تأثیر می گذارند (Aller et al., 1987). معیارها از "یک" تا "10" طبقه بندی و رتبه بندی می شوند، همچنین با توجه به سهم نسبی آنها در آلودگی ذاتی از "یک" تا "پنج" وزن دهی می شوند. شاخص DRASTIC با استفاده از ترکیب خطی همه عوامل مطابق با رابطه 1 ارزیابی می شود.

$$DI = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w \quad \text{رابطه 1:}$$

DI شاخص DRASTIC و زیرنویس های "r" و "w" به ترتیب مربوط به نرخ ها و وزن های DRASTIC هستند. اگرچه آبخوان مورد مطالعه شامل شن و ماسه، آذرین دگرگونی، و آذرین دگرگونی هوازده است که با نفوذپذیری نسبتاً ناچیز از برخی از قسمت های آب های زیرزمینی در برابر آلودگی محافظت می کند. وجود ماسه و خاک رس با پتانسیل شستشوی بالا علاوه بر میزان تغذیه تأثیر معنی داری بر آسیب پذیری ذاتی منطقه مورد مطالعه داشت.

لایه های روش DRASTIC: داده های مورد نیاز برای به دست آوردن پارامترهای هیدروژئولوژیکی مدل DRASTIC در جدول 2 آمده است و لایه های رستری مربوط به هفت معیار DRASTIC در GIS تهیه شده است. عمق آب زیرزمینی که نشان دهنده فاصله عمودی سطح زمین و سطح آب زیرزمینی است به پنج طبقه با کمترین مقدار 4/5 متر در جنوب غربی آبخوان تقسیم شد. تغذیه خالص از داده های بارندگی و رواناب در منطقه مورد مطالعه با در نظر گرفتن نفوذپذیری و توپوگرافی به دست می آید. در دشت یاسوج نقشه تغذیه خالص به سه کلاس، طبقه بندی می شود که بیشترین میزان آن مربوط به قسمت غربی آبخوان است. محیط آبخوان تخلخل، اندازه دانه و نفوذپذیری را مورد بحث قرار می دهد. قسمت شمالی آبخوان با شن و ماسه با بیشترین نفوذپذیری ساخته شده است. خاک تأثیر قابل توجهی بر توانایی یک آلاینده برای حرکت به صورت عمودی در ناحیه غیر اشباع دارد. توپوگرافی که بر میزان نفوذ تأثیر می گذارد، از مدل ارتفاعی دیجیتال (DEM) تولید و بر اساس نظریه آلر و همکاران به پنج کلاس تقسیم شد (Aller et al., 1987). شیب ملایم زمین با افزایش زمان باقی ماندن آلودگی در سطح، احتمال افزایش نفوذ آلودگی و به دنبال آن افزایش پتانسیل آلودگی را در پی دارد. در آبخوان یاسوج، ناحیه غیر اشباع دارای ماهیتی یکنواخت با بسترهای شن و ماسه در سراسر منطقه مورد مطالعه است. هدایت هیدرولیکی نقش اساسی در سرعت مهاجرت آلاینده ها از طریق آبخوان دارد. در این تحقیق نقشه توزیع هدایت هیدرولیکی تهیه و در پنج گروه طبقه بندی شد.

Table 1. Sources of data used for producing the parameters of the DRASTIC method.

نوع داده	منابع	نوع داده	منابع
داده های هیدروژئولوژیکی	سازمان هواشناسی کهگیلویه	هدایت هیدرولیکی	سازمان آب شهرستان کهگیلویه
نقشه زمین شناسی	سازمان زمین شناسی ایران	مشخصات زمین شناسی	سازمان آب شهرستان کهگیلویه
نقشه خاک	پژوهشکده خاک و آب کهگیلویه	تعادل بخشی آب زیرزمینی	سازمان آب شهرستان کهگیلویه

روش نسبت فراوانی (FR): مدل FR می تواند همبستگی بین توزیع نمونه های نیترات و هر یک از هفت پارامتر DRASTIC را تعیین کند (Neshat, A., & Pradhan, B. (2015); Bordbar et al., 2021). برای محاسبه نسبت فراوانی، نیاز است نسبت مساحت برای وقوع آلودگی و عدم وقوع آن برای کلاس یا نوع هر عامل محاسبه شود. در تعیین نسبت فراوانی، نسبت غلظت نیترات برای محدوده هر پارامتر DRASTIC با در نظر گرفتن غلظت کل نیترات مشاهده شده در هر کلاس از هر پارامتر از نمونه های نیترات درونبای شده در مقایسه با غلظت کل نیترات در منطقه مورد مطالعه محاسبه شد. در نهایت، FR ها برای هر محدوده فاکتور با تقسیم نسبت غلظت نیترات بر نسبت سطح به دست آمده به دست آمد. مقدار FR در هر کلاس از ضریب آسیب پذیری آب های زیرزمینی را می توان بر اساس رابطه 2 بیان کرد.

$$FR = \frac{A/B}{C/D} = E/F$$

رابطه 2:

که در آن "A" مساحت یک کلاس برای هر عامل DRASTIC است. "B" مساحت کل هر عامل است. "C" مجموع غلظت نیترات رخ داده در کلاس هر عامل است. "D" کل غلظت نیترات در منطقه مورد مطالعه است. "E" درصد نیترات در کلاس هر عامل است. "F" درصد مساحت در کلاس هر عامل است. با توجه به تعریف نسبت فراوانی، می توانیم مقدار یک را به عنوان یک مقدار متوسط در نظر بگیریم. مقدار بیشتر از یک همبستگی بالاتری را بین فاکتور مربوطه و غلظت نیترات نشان می دهد. از سوی دیگر، مقدار کمتر از یک به یک همبستگی کمتر اشاره دارد (Manap et al., 2014; Pradhan & Lee, 2010). حداکثر مقدار نرخ DRASTIC اولیه محدوده هر پارامتر در منطقه مورد مطالعه به حداکثر مقدار FR به عنوان نرخ اصلاح شده آن اختصاص داده شد. سپس نسبتی برای محاسبه نرخ های تعدیل شده سایر محدوده های پارامتر DRASTIC بر اساس مقادیر FR و حداکثر نرخ اعمال شد (شکل 3).

روش آنتروپی: طرح وزن دهی اصلاح شده ممکن است برای به حداقل رساندن تأثیر قضاوت ذهنی انسان مورد استفاده قرار گیرد (Yu, Zhang, Yao, Meng, & Zheng, 2012)، اصل آنتروپی می تواند با محاسبات بهینه سازی کارآمد باشد. به عبارت دیگر، آنتروپی اندازه گیری عدم قطعیت در سیستم است. مقدار آنتروپی کمتر در داده ها نشان می دهد که نتایج غیرمنتظره کمتر است و مقدار آنتروپی بیشتر به معنای عدم قطعیت بیشتری در ارتباط با داده ها است (Chen, Pourghasemi, Kornejady, & Zhang, 2017).

روش تحلیل حساسیت تک پارامتری (SPSA): روش تحلیل حساسیت تک پارامتری تجزیه و تحلیل «وزن مؤثر» هر پارامتر را در مقایسه با «وزن های نظری» آن ها است که توسط مدل DRASTIC تخصیص داده شده است و تأثیرگذارترین پارامترها را نشان می دهد (Brindha & Elango, 2015).

اعتبار سنجی: نیترات یک آلاینده شناخته شده است که آب های زیرزمینی را در مناطق کشاورزی تهدید می کند، که عمدتاً منشاء آن از سطح زمین است و به دلیل استفاده از کودها در مناطق تغذیه طبیعی رخ می دهد (Chen et al., 2017). غلظت نیترات در 14 چاه در منطقه مورد مطالعه در بررسی دوم اندازه گیری شد تا یک مجموعه داده آزمایشی تشکیل شود. یکی از متداول ترین روش ها برای ارزیابی عملکرد مدل سازی فضایی، منحنی ROC⁵ است (Paryani et al., 2021; Islam et al., 2021; Paryani et al., 2022). نتایج این روش در پژوهش حاضر از طریق منحنی ROC اعتبار سنجی شدند.

2-3- یافته ها

نقشه DRASTIC: طبقه بندی هفت پارامتر از جمله نرخ نسبی و وزن معیارها بر اساس روش آلر در مطالعه موردی حاضر در جدول 3 نشان داده شده است. هفت لایه DRASTIC پس از طبقه بندی مجدد با استفاده از سیستم رتبه بندی اصلی انجام شد. بر اساس نقشه عمق، عمق تا سطح ایستابی در دشت یاسوج از جنوب غربی به شرق به تدریج در حال افزایش است. همچنین بیشترین میزان تغذیه خالص در قسمت جنوبی آبخوان یاسوج با نرخ بالای شش اندازه گیری می شود. بیشتر قسمت های منطقه مورد مطالعه دارای توپوگرافی بسیار صافی هستند و رتبه های نه و 10 را به خود اختصاص داده اند. ناحیه وادوز شامل شن و ماسه در سراسر منطقه مورد مطالعه است، بنابراین یک طبقه با رتبه بندی هشت وجود دارد. شاخص آسیب پذیری DRASTIC با ضرب نرخ و وزنه های اصلی هفت عامل که در رابطه 1 معرفی شده است، محاسبه شد. نقشه به دست آمده بر اساس روش طبقه بندی طبیعی (Jenks, 1977) از خیلی کم تا خیلی زیاد با دامنه 79 تا 186 طبقه بندی شده است. بر اساس این طبقه بندی، جنوب غربی منطقه مورد مطالعه بیشترین آسیب پذیری را با ارزش 152 تا 186 دارد در حالی که کلاس آسیب پذیری بسیار کم متعلق به شمال و بخش های کوچک جنوب شرقی با ارزش 79 تا 103 است.

نقشه FR-DRASTIC: نسبت فراوانی دامنه هر پارامتر DRASTIC از رابطه 2 در رابطه با توزیع نیترات در منطقه مورد مطالعه از نمونه های آموزشی به دست آمد. جدول 3 مقادیر FR و نرخ های اصلاح شده را در منطقه مورد مطالعه نشان می دهد. در مورد محیط غیر اشباع، منطقه مورد مطالعه به یک کلاس طبقه بندی شده است و FR مقدار یک را به دست آورد که مقدار متوسط است و رتبه هشت به آن اختصاص داده شد. نقشه آسیب پذیری آبخوان یاسوج از شاخص FR-DRASTIC با ترکیب خطی نرخ FR و وزن DRASTIC هفت پارامتر بدست آمد (شکل 5b). همانطور که نقشه بیان می کند، آسیب پذیری منطقه مورد مطالعه به پنج کلاس از خیلی کم تا خیلی زیاد طبقه بندی شد که محدوده مقدار شاخص بین 126/6 تا 181/9 است. کمترین میزان آسیب پذیری مربوط به جنوب غربی آبخوان است، در حالی که شمال و بخش کوچکی از جنوب آسیب پذیری آلودگی بسیار بالایی را نشان می دهند.

Figure 3. Seven layers of the modified DRASTIC ratings using FR approach.

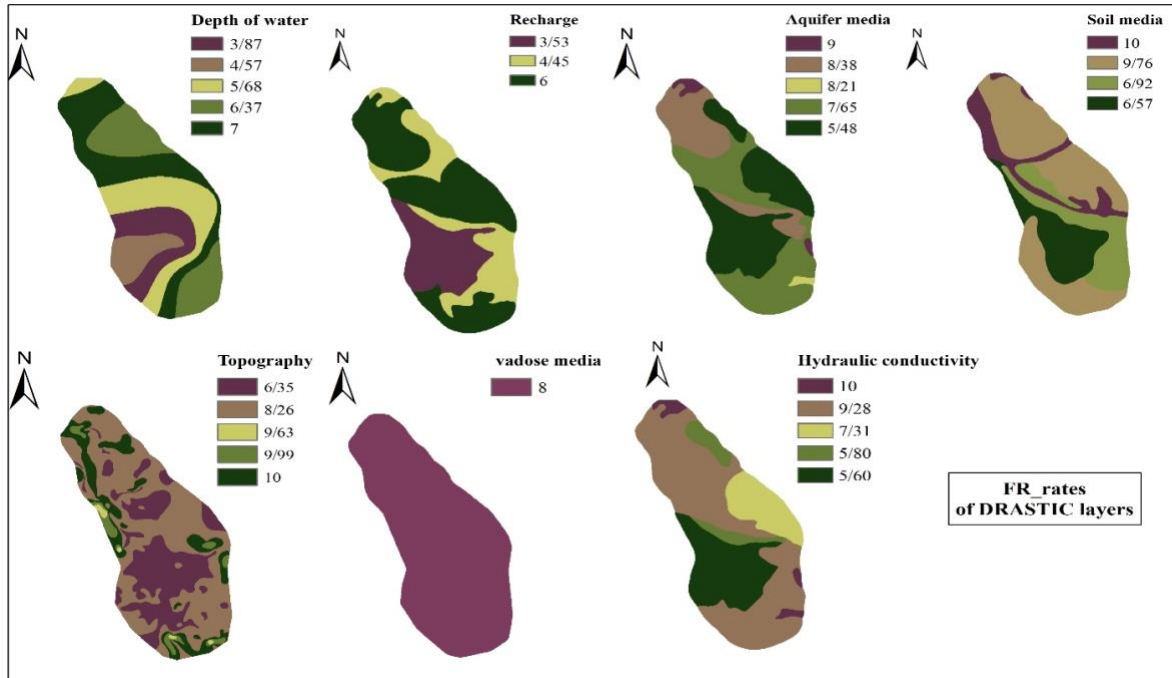


Table 2. The ranges of DRASTIC parameters in the study area based on Aller et al. (1987).

Parameter	Range	DRASTIC rate	DRASTIC weight
Depth of water (m)	>30	1	5
Net recharge (cm/year)	0-5	1	
	5-10	3	4
	10-18	6	
Aquifer media	Metamorphic igneous	3	
	Weathered metamorphic igneous	4	
	Massive sandstone	6	3
	Gravel & sand	8	
	Basalt	9	
Soil media	Clay	1	
	Clay loam	3	
	Loam	5	2
	Sand	10	
Topography (%)	>18	1	
	12-18	3	
	6-12	5	1
	2-6	9	

	0-2	10	
Impact of vadose media	Gravel & sand	8	5
Hydraulic conductivity (m/day)	0.05-5	1	
	5-15	2	
	35-50	6	3
	50-100	8	
	>100	10	

Table 3. Modified and original rate values for each DRASTIC layer based on FR method.

Parameter	Range	Rating	DRASTIC Weight	% of total area (a)	% of nitrate (b)	Frequency ratio (b/a)	Modified rating
Depth of water (m)	>30	1		22.07	24.05	1.09	6.37
	23-30	2		29.66	35.49	1.2	7
	15-23	3	5	24.01	23.3	0.97	5.68
	9-15	5		15	9.93	0.66	3.87
	4.5-9	7		9.26	7.24	0.77	4.57
Net recharge (cm/year)	0-5	1		26.46	23.47	0.89	4.45
	5-10	3	4	50.37	60.21	1.2	6
	10-18	6		23.17	16.32	0.7	3.53
	Metamorphic igneous	3		0.81	0.95	1.17	8.21
	Weathered metamorphic igneous	4		2.04	2.63	1.29	9
Aquifer media	Massive sandstone	6	3	39.46	30.93	0.78	5.48
	Gravel & sand	8		22.05	26.44	1.2	8.38
	Basalt	9		35.64	39.04	1.1	7.65
	Clay	1		12.89	14.87	1.15	10
Soil media	Clay loam	3		17.91	13.57	0.76	6.57
	Loam	5	2	19.41	15.49	0.8	6.92
	Sand	10		49.79	56.07	1.13	9.77
	>18	1		0.63	0.76	1.2	9.63
Topography [Slope] (%)	12-18	3		3.18	3.97	1.25	9.99
	6-12	5	1	13.51	16.89	1.25	10
	2-6	9		53.45	55.2	1.03	8.27
Impact of vadose media	0-2	10		29.23	23.19	0.79	6.35
	Gravel & sand	8	5	100	100	1	8
	0.05-5	1	3	2.85	3.58	1.26	10

	5-15	2	12.71	11.67	0.92	7.31
Hydraulic conductivity (m/day)	35-50	6	22.94	16.13	0.7	5.6
	50-100	8	6.97	5.08	0.73	5.8
	>100	10	54.52	63.54	1.17	9.28

نقشه DRASTIC_Entropy: وزن ها به روش آنتروپی کالیبره شدند. با توجه به قانون "مقدار آنتروپی بیشتر، عدم قطعیت بیشتر"، تاثیر رسانه های وادوزی با بالاترین آنتروپی از اصلاح حذف شد. جدول 4 وزن های بهینه شده هر پارامتر شاخص آسیب پذیری را نشان می دهد. مقدار DRASTIC محاسبه شده بر اساس روش DRASTIC-Entropy بین 1/4 و 7/6 بوده و در پنج کلاس طبقه بندی شده است.

Table 4. Modified weights of DRASTIC parameters based on Entropy method.

Parameters	Entropy	Entropy weight	Modified weight
Depth of water	0.978	0.269	0.392
Net recharge	0.979	0.247	0.288
Aquifer media	0.997	0.031	0.027
Soil media	0.978	0.260	0.152
Topography	0.996	0.047	0.014
Impact of vadose media	1	0	0
Hydraulic conductivity	0.988	0.146	0.128

نقشه DRASTIC-SPSA: جدول 5 وزن موثر بدست آمده از SPSA را بر اساس رتبه بندی اصلی DRASTIC نشان می دهد. وزن موثر کم از توپوگرافی کمترین وزن نظری شیب را تایید کرد. در مقایسه با وزن های نظری تعیین شده توسط چارچوب DRASTIC، شارژ خالص، محیط آبخوان، اثر محیط های وادوزی و هدایت هیدرولیکی وزن های موثر بالاتری داشتند. شاخص آسیب پذیری از رویکرد DRASTIC-SPSA بین 93/95 و 196/23 به دست آمده و در پنج کلاس طبقه بندی شده است.

Table 5. Modified weights of DRASTIC parameters based on SPSA method-

Parameters	Theoretical weight (%)	DRASTIC weight	Modified weight	Min%	Max%	Mean%
Depth of water	21.74	5	2.48	3.41	28.46	10.77
Net recharge	17.39	4	2.15	2.41	19.67	9.36
Aquifer media	13.04	3	3.83	8.11	23.08	16.64
Soil media	8.70	2	2.26	1.46	20.83	9.82
Topography	4.35	1	1.47	0.69	11.49	6.39
Impact of vadose media	21.74	5	6.95	23.12	50.00	30.21
Hydraulic conductivity	13.04	3	3.87	2.44	25.46	16.81

روش DRASTIC_SWARA: وزن ها در روش SWARA بر اساس نظر متخصصان و کارشناسان مشخص می شود به این ترتیب که بالاترین رتبه به مهمترین معیار و کم ترین رتبه به کم اهمیت ترین معیار اختصاص داده می شود (Shakeri, Alijani, & Nassery, 2023). روش SWARA دارای مزایای واقعی نسبت به سایر روش های MADM مشابه مانند AHP و ANP است. در فرآیند SWARA، وزن ویژگی ها بر اساس اولویت های قبلی که با توجه به وضعیت مشخص شده اند، ارزیابی می شوند (Hashemkhani Zolfani, Yazdani, & Zavadskas, 2018) در تحقیق حاضر برای رتبه بندی اولیه معیار ها از نقطه نظرات کارشناسان استفاده شد و بدین ترتیب مقادیر S_j بدست آمد. عمق آب زیرزمینی به عنوان مهم ترین معیار به تکنیک SWARA معرفی شد و بقیه معیار ها باید به ترتیب اهمیت هریک امتیاز دهی شوند مراحل روش به ترتیب زیر است (Shakeri et al., 2023).

1. انتخاب معیار های مورد نیاز و رتبه بندی آنها با توجه به درجه اهمیت آنها (به طوری که باید برای مهمترین معیار، بالاترین رتبه و برای کم اهمیت ترین معیار پایین ترین جایگاه را در نظر گرفت). رابطه 3

$$S_j = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n}$$

2. محاسبه ضریب K_j که تابعی از اهمیت نسبی هر معیار است. رابطه 4

$$K_j = S_j + 1$$

3. تعیین وزن اولیه هر معیار

$$Q_j = \frac{X_j - 1}{K_j}$$

4. محاسبه وزن نهایی و نرمال کردن معیار ها

$$W_j =$$

$$Q_j / \sum_{j=1}^m Q_j$$

در جدول 6 مراحل انجام این روش ارائه شده است. وزن های اصلاح شده DRASTIC-SWARA از مقادیر W_j و وزن های اصلی روش در ستیک حاصل شد در ادامه نقشه آسیب پذیری نواحی مختلف آبخوان تهیه و طبقه بندی از بسیار کم تا بسیار زیاد انجام شد. شاخص آسیب پذیری از 3/48 تا 186 طبقه بندی شد (شکل 5c).

Table 6. Modified weights of DRASTIC parameters based on SWARA method

Parameters	S_j	K_j	Q_j	W_j	DRASTIC weight	Modified weight
Depth of water	0	1	1	0.18	5	0.26
Net recharge	0.05	1.05	0.95	0.17	4	0.2
Impact of vadose media	0.05	1.05	0.91	0.16	5	0.24
Soil media	0.1	1.1	0.82	0.15	2	0.09
Topography	0.1	1.1	0.75	0.14	1	0.04
Aquifer media	0.37	1.37	0.55	0.1	3	0.09
Hydraulic conductivity	0.03	1.03	0.53	0.1	3	0.08

روش بهترین-بدترین (BWM): BWM از تکنیک های تصمیم گیری چند معیاره است که از جدیدترین و کاراترین روش ها به حساب می آید. این روش برای اولین بار توسط آقای دکتر جعفر رضایی در سال 2015 ارائه شد. هدف این روش محاسبه وزن معیار های پژوهش می باشد که از نظرات متخصصان در تخمین اوزان استفاده می شود (Rezaei et al., 2013). سازگاری و قابلیت اطمینان وزن ها، تعداد مقایسات زوجی کمتر نسبت به روش هایی مانند AHP، این روش را به روشی قدرتمند تبدیل کرده است. این

تکنیک برای حل مسائل با چندین پارامتر بسیار مفید است و در مطالعات مختلف مورد استفاده قرار گرفته است (Ahmad, Rezaei, Sadaghiani, & Tavasszy, 2017). رابطه 7 تا 10 به مراحل روش BWM اشاره دارد.

ابتدا باید رابطه بهترین معیار نسبت به سایر معیارها مشخص شود. بردار به صورت زیر بیان می شود: که در آن α_{B1} ترجیح بهترین معیار، یعنی B را بر معیار j نشان می دهد. طبق رابطه 7. علاوه بر این، $\alpha_{BB} = 1$ رابطه 7:

$$A_B =$$

$$(a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn})$$

در ادامه، تعیین اهمیت بدترین معیار نسبت به سایر معیارها باید در نظر گرفته شود. آخرین مرحله در این روش تعیین وزن بهینه معیارها و محاسبه نرخ سازگاری است. وزن معیارها با استفاده از معادلات خطی زیر محاسبه می شود. طبق روابط 8 و 9:

$$w_j \geq 0, \text{ for } \rightarrow \text{ all } j$$

$$\left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right| \leq \varepsilon$$

$$\left| \frac{w_j}{w_w} - a_{jw} \right| \leq \varepsilon \quad w_j \geq 0, \text{ for } \rightarrow \text{ all } j$$

$$\sum_j w_j = 1 \quad \text{رابطه 10:}$$

شاخص سازگاری = $\frac{\varepsilon}{\text{شاخص سازگاری}}$

نرخ سازگاری در بازه [0, 1] قرار می گیرد و هر چه به صفر نزدیکتر باشد بیانگر این است که مقایسات از سازگاری و ثبات بیشتری برخوردارند و هر چه به یک نزدیکتر باشد مقایسات از سازگاری کمتری برخوردارند. در روش BWM نیز عمق آب زیرزمینی به عنوان بهترین معیار و هدایت هیدرولیکی بدترین معیار شناخته شد. وزن ها به کمک نرم افزار Lingo بدست آمدند. که بر اساس نتایج حاصل شده عمق بیشترین وزن و شیب کمترین وزن را به خود اختصاص دادند. با استفاده از وزن های اصلاح شده، نقشه میزان آسیب پذیری در پنج کلاس بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد از 2/7 تا 7/4 طبقه بندی شد (شکل d5).

Table 7. Modified weights of DRASTIC parameters based on BWM method

Parameters	Value	Weights - Lingo	DRASTIC Index	Modified weights	Modified weights
Depth of water	W1	0.35	D	5	0.45
Net recharge	W2	0.21	R	4	0.21
Impact of vadose media	W3	0.14	I	5	0.18
Soil media	W4	0.10	S	2	0.05
Topography	W5	0.08	T	1	0.02
Aquifer media	W6	0.07	A	3	0.05
Hydraulic conductivity	W7	0.04	C	5	0.03
	Z	0.066			

نقشه FR-Entropy: روش ترکیبی مورد استفاده مبتنی بر روش رتبه بندی FR و وزن های حاصل از روش آنتروپی است. در لایه وادوز به دلیل یکنواختی آبخوان یاسوج، مقدار یک را به دست آورده است. بنابراین، فاکتور «I» با نرخ سنتی DRASTIC بدون تغییر وارد محاسبه شاخص آسیب پذیری شد. با توجه به جدول 8 که آنتروپی های جدید مرتبط با پارامترهای DRASTIC را نشان می دهد، تأثیر محیط وادوز بالاترین آنتروپی (مقدار یک) را به دست آورد که نامشخص ترین پارامتر در منطقه مورد مطالعه است. به دلیل بیشترین عدم قطعیت، این پارامتر به ارزیابی آسیب پذیری کمی نکرد. مقدار آسیب پذیری از 4/70 تا 7/76 متغیر بود که در پنج کلاس طبقه بندی شد.

Table 8. Modified weights of DRASTIC parameters based on FR-Entropy method.

Parameters	Entropy	Entropy weight	Modified weight
Depth of water	0.9976	0.173	0.271
Net recharge	0.9972	0.206	0.259
Aquifer media	0.9979	0.155	0.146
Soil media	0.9981	0.142	0.089
Topography	0.9985	0.113	0.035

Impact of vadose media	1	0	0
Hydraulic conductivity	0.9971	0.211	0.199

نقشه FR_SPSA: در روش FR-SPSA، اصلاح نرخ های DRASTIC با چارچوب نسبت فرکانس به کمک SPSA انجام شد. شاخص آسیب پذیری با ضرب نرخ های اصلاح شده از FR و وزن های مشتق شده از SPSA ایجاد شد. آسیب پذیری منطقه مورد مطالعه از شاخص FR-SPSA در پنج کلاس نشان داده شد و مقدار آسیب پذیری از 132/57 تا 186/89 متغیر است.

Table 9. Statistics of single-parameter sensitivity analysis (FR-SPSA)

Parameters	Theoretical weight %	DRASTIC weight	Modified weights	Min %	Max %	Mean %
Depth of water	21.74	5	4.20	11.83	24.67	18.26
Net recharge	17.39	4	2.87	8.72	16.57	12.47
Aquifer media	13.04	3	3.01	9.95	17.97	13.10
Soil media	8.70	2	2.50	7.60	15.03	10.86
Topography	4.35	1	1.16	3.56	7.20	5.04
Impact of vadose media	21.74	5	5	21.98	31.69	25.43
Hydraulic conductivity	13.04	3	3.41	10.97	19.58	14.84

نقشه FR_SWARA: اهمیت هر پارامتر بر اساس رتبه بندی جدید کارشناسان بدست آمده و در جدول 10 وارد شده است. نتیجه ی ضرب وزن های شاخص آسیب پذیری و W_j ، وزن های اصلاح شده است. نقشه آسیب پذیری در پنج کلاس از 7/74_5/42 طبقه بندی شد. (شکل 5e)

Table 10. Modified weights of DRASTIC parameters based on FR-SWARA method.

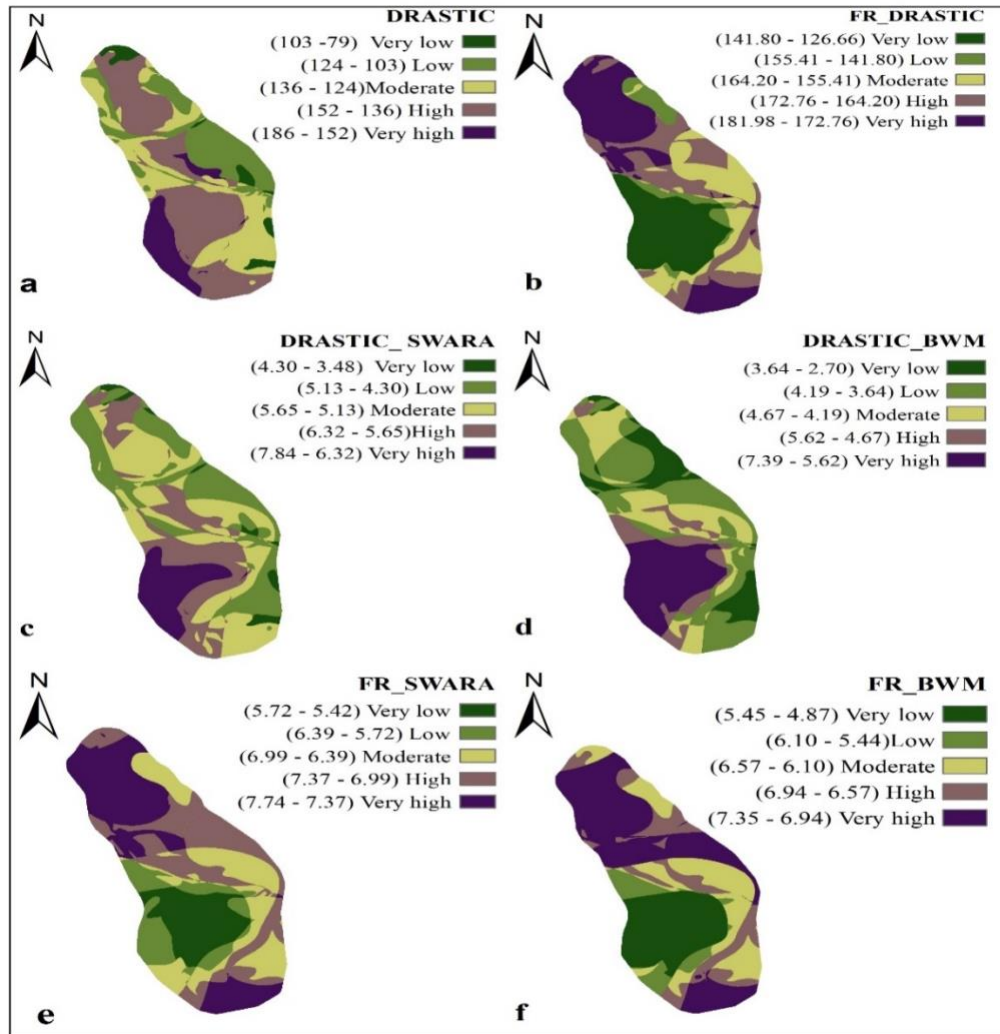
Parameters	Sj	Kj	Qj	Wj	Modified weights	FR-SWARA
Depth of water	0	1	1	0.18	5	0.27
Net recharge	0.09	1.09	0.92	0.17	4	0.19
Impact of vadose media	0.01	1.01	0.91	0.17	5	0.24
Soil media	0.1	1.1	0.83	0.15	2	0.09
Topography	0.1	1.1	0.75	0.14	1	0.04
Hydraulic conductivity	0.39	1.39	0.54	0.10	3	0.09
Aquifer media	0.01	1.01	0.53	0.10	3	0.09

نقشه FR_BWM: بر اساس نظر متخصصان، بهترین معیار عمق آب زیرزمینی و بدترین معیار محیط آبخوان به مدل معرفی شد. پس از پیاده سازی مدل و اعمال وزن های اصلی شاخص درستی، عمق آب زیرزمینی با وزن 0/45 بیشترین و شیب با وزن 0/02 کمترین وزن را به عنوان وزن های اصلاح شده روش FR-BWM به خود اختصاص دادند. در نهایت نقشه آسیب پذیری آبخوان در پنج طبقه از بسیار کم تا بسیار زیاد طبقه بندی شد. (شکل 5f)

Table 11. Modified weights of DRASTIC parameters based on FR-BWM method.

Parameters	Value	Weights - Lingo	DRASTIC Index	Modified weights	Modified weights
Depth of water	W1	0.35	D	5	0.45
Net recharge	W2	0.21	R	4	0.21
Impact of vadose media	W3	0.14	I	5	0.18
Soil media	W4	0.10	S	2	0.05
Topography	W5	0.08	T	1	0.02
Hydraulic conductivity	W6	0.07	C	3	0.05
Aquifer media	W7	0.04	A	3	0.03
	Z	0.057			

Figure 5. Groundwater vulnerability maps of Yasuj aquifer



4-3- اعتبارسنجی

شاخص‌های آسیب‌پذیری (DRASTIC، FR-DRASTIC، FR-BWM، FR-SWARA، DRASTIC-BWM، DRASTIC-SWARA) در برابر مقادیر نیترات منطقه مورد مطالعه اعتبارسنجی شدند. روش ROC برای اعتبارسنجی همبستگی بین چارچوب‌های آسیب‌پذیری پیشنهادی و غلظت نیترات آزمایشی به عنوان شاخص کیفیت آب در منطقه مورد مطالعه استفاده شد. اعتبارسنجی برای ارزیابی دقت و ارزش روش‌ها مورد نیاز است (Obuchowski & Bullen, 2018). نمودار ROC دو محور دارد: محور X نرخ مثبت کاذب و Y نرخ مثبت واقعی را نشان می‌دهد. مقدار ناحیه زیر منحنی (AUC) هر چه بالاتر باشد، دقت پیش‌بینی بیشتر است (Bradley, 1997; Pouyan, Pourghasemi, Bordbar, Rahmanian, & Clague, 2021) در مطالعه حاضر منحنی ROC با در نظر گرفتن مقادیر غلظت نیترات آب‌های زیرزمینی و شاخص‌های آسیب‌پذیری تهیه شد. برای تست مجموعه داده‌ها در این مورد مدل FR-SWARA دارای بالاترین مقدار AUC (0/8) داشت و عملکرد بهتری را نسبت به مدل FR-BWM با مقدار AUC (0/744) نشان می‌دهد. (جدول 12)

Figure 6. ROC curve plotting between vulnerability indices and nitrate test samples

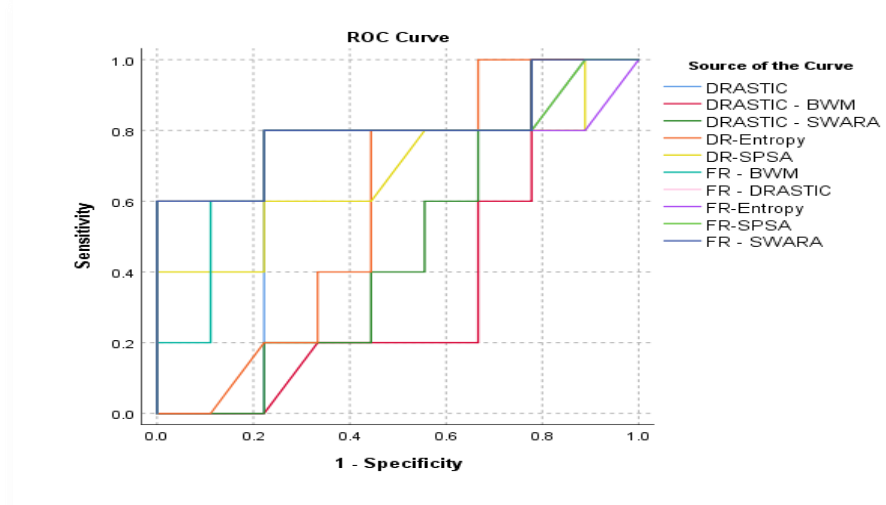


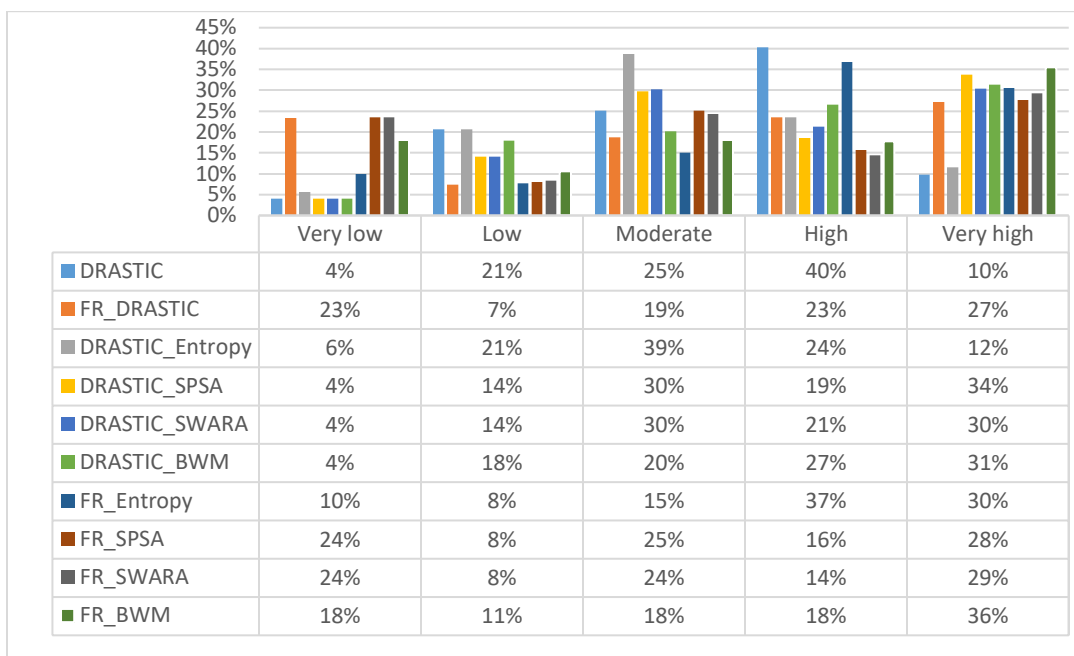
Table 12. ROC curve between vulnerability indices and nitrate test samples

Area Under the Curve			
DRASTIC	0.67	FR - BWM	0.74
DRASTIC - SWARA	0.47	FR - SWARA	0.80
DRASTIC - BWM	0.37	FR - DRASTIC	0.79
DRASTIC-SPSA	0.68	FR-SPSA	0.79
DRASTIC-Entropy	0.59	FR-Entropy	0.77

3- نتایج و بحث

ارزیابی آسیب‌پذیری به روش همپوشانی و شاخص از زمان توسعه آن در اواخر دهه 1980 به عنوان یک ابزار مؤثر ثابت شده است. اگرچه چندین اصلاح و پیشرفت برای روش‌های همپوشانی پیشنهاد شده است، اما هنوز یک روش نمی‌تواند در همه شرایط هیدروژئولوژیکی قابل اجرا باشد (Brindha & Elango, 2015). بر اساس نتایج حاصل از تمام روش‌های اصلاح اعمال شده، نسبت مساحت هر یک از کلاس‌های آسیب‌پذیری متفاوت است و درصد آن در شکل 7 نشان داده شده است. منطقه شرق منطقه مورد مطالعه برای تمامی روش‌های اصلاح شده در منطقه آسیب‌پذیر «کم» و «متوسط» قرار می‌گیرد. شاخص آسیب‌پذیری محاسبه‌شده با روش FR-Entropy، بخش غالب آبخوان (37 درصد) را به عنوان یک منطقه آسیب‌پذیر «بالا» در مقایسه با کلاس‌های دیگر تخمین می‌زند. در میان روش‌های ترکیبی متدها با FR، روش FR-Entropy و FR-BWM و به ترتیب با 30 و 36 درصد بخش بالایی از آبخوان را در منطقه آسیب‌پذیری «بسیار بالا» پیش‌بینی کرده‌اند. همچنین، سه مدل FR-Entropy، FR-SPSA و FR-SWARA نشان می‌دهند که تنها 8 درصد از کل منطقه به عنوان منطقه آسیب‌پذیر «کم» طبقه‌بندی می‌شود. رویکرد FR-SWARA شمال غرب و جنوب آبخوان را پتانسیل «بسیار بالا» برای آلودگی نیترات معرفی کرد. کلاس آسیب‌پذیری «بسیار کم» در منطقه غرب و مرکزی محدوده مورد مطالعه در برابر آلودگی برای هر چهار روش اعمال شده توسط چارچوب FR که مشابه نقشه نیترات بر اساس چاه‌های مشاهده‌شده است نشان‌دهنده اثربخشی اصلاح نرخ‌ها نسبت به چارچوب عمومی DRASTIC است.

Figure 7. Comparison of the percentage of vulnerability classes based on combined methods



علاوه بر این، نتایج در جدول 12 نشان می‌دهد عملکرد چارچوب DRASTIC می‌تواند با اصلاح نرخ‌ها بر اساس ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه، بیشتر بهبود یابد. از آنجایی که محدوده‌ی مورد مطالعه در یک منطقه کشاورزی واقع شده است، غلظت نیترات ممکن است در طول زمان تغییر کند. مطالعات بیشتر می‌تواند بر جمع‌آوری نمونه‌های بیشتر برای ارزیابی آلودگی نیترات بارگذاری شده در سطح دشت یاسوج متمرکز شود. ارزیابی احتمال آلودگی آب‌های زیرزمینی به دلیل کنترل و حفاظت از منابع آب زیرزمینی ضروری است. (Chukwuma et al., 2023) نشان دادند مدل اصلاح شده DEMATEL-ANP بر مبنای مدل DRASTIC، در مقایسه با مدل سنتی درستیک عملکرد بهتری دارد. (Liu, Xiao, & Liang, 2022) نیز به اصلاح مدل درستیک سنتی و درستیک با دو عامل کاربری زمین و درجه استخراج آب‌های زیرزمینی پرداختند (AHP-DRASTIC, WOE-DRASTIC, AHP-DRASTIC). و نشان دادند، مدل‌های اصلاح شده می‌توانند میزان آسیب پذیری آب‌های زیرزمینی را با دقت بیشتری انتقال دهند. در مطالعه حاضر، FR-BWM را به عنوان یک روش ترکیبی جدید در پایش آلودگی آب‌های زیرزمینی پیشنهاد می‌کنیم که می‌تواند یک چارچوب کارآمد باشد. روش مورد استفاده در پژوهش فعلی، روشی سریع و کم هزینه برای ارزیابی پتانسیل آب‌های زیرزمینی است. نتایج تحقیق همبستگی بالایی با پژوهش‌های انجام شده در منطقه مورد مطالعه دارد (Torkashvand et al., 2023). نویسندگان معتقدند که روش‌های ترکیبی جدید می‌تواند به عنوان چارچوبی برای تحقیقات آتی در زمینه‌های مختلف و در مناطق دیگر نیز مفید واقع شود. همچنین پیشنهاد می‌شود دیگر آلاینده‌ها در منطقه مورد مطالعه مورد ارزیابی قرار گیرند. ضمناً اضافه کردن فاکتورهای جدید به مدل سنتی درستیک نیز می‌تواند نقش بسزایی در شناسایی مناطق آسیب پذیر داشته باشد. تصمیم‌گیرندگان، مدیران محیط زیست و برنامه‌ریزان رسمی می‌توانند از این رویکردهای فضایی به عنوان مبنایی برای تولید سیاست‌های توسعه پایدار در مورد آلودگی احتمالی آب‌های زیرزمینی استفاده کنند. به منظور دستیابی به شرایط قابل اطمینان‌تر منطقه مورد مطالعه برای مقابله با آلودگی خاص، روش انعطاف‌پذیرتری برای تعیین میزان پارامتر و وزن نسبت به DRASTIC مورد نیاز بود. پنج شاخص آسیب پذیری اصلاح شده شامل FR-DRASTIC، DRASTIC-SPSA، DRASTIC-Entropy، FR-DRASTIC و Entropy با یکدیگر و همچنین با شاخص DRASTIC مقایسه شدند. در ادامه چهار روش ترکیبی DRASTIC_SWARA، DRASTIC_BWM، FR_SWARA، FR_BWM نیز مورد آزمایش قرار گرفتند. اعتبارسنجی مدل‌ها نشان‌دهنده بهبود نتایج مبتنی بر روش‌های ترکیبی است. ارزیابی شاخص DRASTIC اصلاح شده بر اساس مقادیر بالاتر سطح زیر منحنی ROC رویکردهای FR-DRASTIC، FR-SPSA، FR-SWARA و FR-DRASTIC نشان دادند که شمال غرب، شمال و جنوب منطقه مورد مطالعه به طور خاص نیاز به آگاهی بیشتر از تصمیم‌گیرندگان و برنامه‌ریزان محیطی برای کاهش فعالیت‌های انسانی دارند.

4- پی نوشت

1. Groundwater Vulnerability Assessment
2. Single Parameter Sensitivity Analysis
3. Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis
4. Best Worst Method
5. Receiver Operating Characteristic

- Ahmad, W. N. K. W., Rezaei, J., Sadaghiani, S., & Tavasszy, L. A. (2017). Evaluation of the external forces affecting the sustainability of oil and gas supply chain using Best Worst Method. *Journal of cleaner production*, 153, 242-252 .
- Ahmed, A. A. (2009). Using generic and pesticide DRASTIC GIS-based models for vulnerability assessment of the Quaternary aquifer at Sohag, Egypt. *Hydrogeology Journal*, 17(5), 1203-1217 .
- Aller, L., Lehr, J., & Petty, R. (1987). DRASTIC: a standardized system to evaluate ground water pollution potential using hydrogeologic settings. National water well Association Worthington, Ohio 43085. Truman Bennett. Bennett and Williams. Inc. Columbus, Ohio, 43229 .
- Bradley, A. P. (1997). The use of the area under the ROC curve in the evaluation of machine learning algorithms. *Pattern recognition*, 30(7), 1145-1159 .
- Brindha, K., & Elango, L. (2015). Cross comparison of five popular groundwater pollution vulnerability index approaches. *Journal of hydrology*, 524, 597-613 .
- Bordbar, M., Neshat, A., Javadi, S., & Shahdany, S. M. H. (2021). A hybrid approach based on statistical method and meta-heuristic optimization algorithm for coastal aquifer vulnerability assessment. *Environmental Modeling & Assessment*, 26, 325-338.
- Busico, G., Kazakis, N., Cuoco, E., Colombani, N., Tedesco, D., Voudouris, K., & Mastrocicco, M. (2020). A novel hybrid method of specific vulnerability to anthropogenic pollution using multivariate statistical and regression analyses. *Water Research*, 171, 115386 .
- Chen, W., Pourghasemi, H. R., Kornejady, A., & Zhang, N. (2017). Landslide spatial modeling: Introducing new ensembles of ANN, MaxEnt, and SVM machine learning techniques. *Geoderma*, 305, 314-327 .
- Chukwuma, E. C., Okonkwo, C. C., Afolabi, O. O. D., Pham, Q. B., Anizoba, D. C., & Okpala, C. D. (2023). Groundwater vulnerability to pollution assessment: an application of geospatial techniques and integrated IRN-DEMATEL-ANP decision model. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(17), 49856-49874 .
- Expósito, J. L., Esteller, M. V., Paredes, J., Rico, C., & Franco, R. (2010). Groundwater protection using vulnerability maps and wellhead protection area (WHPA): a case study in Mexico. *Water resources management*, 24, 4219-4236 .
- Gorelick, S. M., & Zheng, C. (2015). Global change and the groundwater management challenge. *Water Resources Research*, 51(5), 3031-3051 .
- Hao, J., Zhang, Y., Jia, Y., Wang, H., Niu, C., Gan, Y., & Gong, Y. (2017). Assessing groundwater vulnerability and its inconsistency with groundwater quality, based on a modified DRASTIC model: a case study in Chaoyang District of Beijing City. *Arabian Journal of Geosciences*, 10, 1-16 .
- Hashemkhani Zolfani, S., Yazdani, M., & Zavadskas, E. K. (2018). An extended stepwise weight assessment ratio analysis (SWARA) method for improving criteria prioritization process. *Soft Computing*, 22, 7399-7405 .
- Iqbal, J., Gorai, A., Katpatal, Y., & Pathak, G. (2015). Development of GIS-based fuzzy pattern recognition model (modified DRASTIC model) for groundwater vulnerability to pollution assessment. *International journal of environmental science and technology*, 12, 3161-3174 .
- Islam, A. R. M. T., Talukdar, S., Mahato, S., Kundu, S., Eibek, K. U., Pham, Q. B., . . . Linh, N. T. T. (2021). Flood susceptibility modelling using advanced ensemble machine learning models. *Geoscience Frontiers*, 12(3), 101075 .
- Jenks, G. F. (1977). Optimal data classification for choropleth maps. *Department of Geography, University of Kansas Occasional Paper* .
- Jhariya, D. (2019). Assessment of groundwater pollution vulnerability using GIS-based DRASTIC model and its validation using nitrate concentration in Tandula Watershed, Chhattisgarh. *Journal of the Geological Society of India*, 93, 567-573 .
- Kumar, P., Bansod, B. K., Debnath, S. K., Thakur, P. K., & Ghanshyam, C. (2015). Index-based groundwater vulnerability mapping models using hydrogeological settings: a critical evaluation. *Environmental Impact Assessment Review*, 51, 38-49 .
- Li, P., Karunanidhi, D., Subramani, T., & Srinivasamoorthy, K. (2021). Sources and consequences of groundwater contamination. *Archives of environmental contamination and toxicology*, 80, 1-10 .
- Liu, M., Xiao, C., & Liang, X. (2022). Assessment of groundwater vulnerability based on the modified DRASTIC model: a case study in Baicheng City, China. *Environmental earth sciences*, 81(8), 230 .
- Manap, M. A., Nampak, H., Pradhan, B., Lee, S., Sulaiman, W. N. A., & Ramli, M. F. (2014). Application of probabilistic-based frequency ratio model in groundwater potential mapping using remote sensing data and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 711-724 .
- Neshat, A., & Pradhan, B. (2015). An integrated DRASTIC model using frequency ratio and two new hybrid methods for groundwater vulnerability assessment. *Natural Hazards*, 76, 543-563 .
- Neshat, A., Pradhan, B., Pirasteh, S., & Shafri, H. Z. M. (2014). Estimating groundwater vulnerability to pollution using a modified DRASTIC model in the Kerman agricultural area, Iran. *Environmental earth sciences*, 71, 3119-3131 .

- Neshat, A., Pradhan, B., & Dadras, M. (2014). Groundwater vulnerability assessment using an improved DRASTIC method in GIS. *Resources, Conservation and Recycling*, 86, 74-86.
- Obuchowski, N. A., & Bullen, J. A. (2018). Receiver operating characteristic (ROC) curves: review of methods with applications in diagnostic medicine. *Physics in Medicine & Biology*, 63(7), 07TR01 .
- Paryani, S., Neshat, A., & Pradhan, B. (2021). Spatial landslide susceptibility mapping using integrating an adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) with two multi-criteria decision-making approaches. *Theoretical and Applied Climatology*, 146(1), 489-509.
- Paryani, S., Neshat, A., Pourghasemi, H. R., Ntona, M. M., & Kazakis, N. (2022). A novel hybrid of support vector regression and metaheuristic algorithms for groundwater spring potential mapping. *Science of The Total Environment*, 807, 151055.
- Pouyan, S., Pourghasemi, H. R., Bordbar, M., Rahmanian, S., & Clague, J. J. (2021). A multi-hazard map-based flooding, gully erosion, forest fires, and earthquakes in Iran. *Scientific Reports*, 11(1), 14889 .
- Pradhan, B., & Lee, S. (2010). Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: backpropagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modelling. *Environmental Modelling & Software*, 25(6), 747-759 .
- Rezaei, F., Safavi, H. R., & Ahmadi, A. (2013). Groundwater vulnerability assessment using fuzzy logic: a case study in the Zayandehrood aquifers, Iran. *Environmental management*, 51, 267-277 .
- Shakeri, R., Alijani, F., & Nassery, H. R. (2023). Comparison of the DRASTIC+ L and modified VABHAT models in vulnerability assessment of Karaj aquifer, central Iran, using MCDM, SWARA, and BWM methods. *Environmental earth sciences*, 82(4), 97 .
- Shrestha, A., & Luo, W. (2018). Assessment of groundwater nitrate pollution potential in Central Valley Aquifer using geodetector-based frequency ratio (GFR) and optimized-DRASTIC methods. *ISPRS international journal of geo-information*, 7(6), 211 .
- Torkashvand, M., Neshat, A., Javadi, S., & Yousefi, H. (2021). DRASTIC framework improvement using stepwise weight assessment ratio analysis (SWARA) and combination of genetic algorithm and entropy. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 46704-46724 .
- Torkashvand, M., Neshat, A., Javadi, S., Yousefi, H., & Berndtsson, R. (2023). Groundwater vulnerability to nitrate contamination from fertilizers using modified DRASTIC frameworks. *Water*, 15(17), 3134 .
- Yu, C., Zhang, B., Yao, Y., Meng, F., & Zheng, C. (2012). A field demonstration of the entropy-weighted fuzzy DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment. *Hydrological Sciences Journal*, 57(7), 1420-1432 .

Assessment of groundwater vulnerability to pollution based on new hybrid approach methods

Aminreza Neshat^{1*}, Masoumeh Abed¹, Mahdi Ramezani²

¹Department of GIS/RS, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

² Department of Environmental and Forest Sciences, Faculty of Natural Resource and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract

The important issue regarding underground water resources is to know the extent of groundwater pollution, which leads to the management of areas prone to pollution. Groundwater vulnerability assessment can play a vital role in protecting, exploiting and prioritizing areas for controlling and using preventive plans. Due to the nature of the area, agricultural activities and nitrate increase, the DRASTIC method needs to be modified. The aim of the current research is to modify the weights of the DRASTIC model, which is considering the importance of modifying the ranking and the effect of weighting methods in the Yasouj aquifer. The frequency ratio framework was used to calibrate the DRASTIC index rates. Then, the weight

correction of DRASTIC parameters was done in two stages of research, the first stage includes Shannon entropy and SPSA methods and the second stage includes BWM (Best Worst Method) and SWARA (Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis) methods. Therefore, nine frames including FR_DRASTIC, DRASTIC_Entropy, DRASTIC_SPSA, DRASTIC_SWARA, DRASTIC_BWM, FR_Entropy, FR_SPSA, FR_BWM, FR_SWARA were obtained. The nitrate concentration of the well samples was used to validate the vulnerability indicators. Validation was done by ROC Curve method. FR_SWARA performed better than other methods with the area under the curve of 0.80.

Keywords: BWM, Entropy, Nitrate, SWARA

نسخه آماده انتشار