

اصلاح مدل گالدیت با استفاده از روش آنتروپی جهت ارزیابی آسیب پذیری آبخوان ساحلی قره‌سو-گرگان‌رود

مژگان بردبار^۱، امین‌رضا نشاط^{۲*}، سامان جوادی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست،

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

۲. استادیار گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی،

واحد علوم و تحقیقات تهران

۳. استادیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۵/۰۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۰۹/۱۳)

چکیده

با توجه به روند برداشت بی‌رویه منابع آب زیرزمینی در آبخوان ساحلی قره‌سو-گرگان‌رود، تعیین نواحی آسیب‌پذیر و حفاظت از منابع آب زیرزمینی در این منطقه اهمیت زیادی دارد. از این‌رو، در مطالعه حاضر برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان ساحلی از مدل گالدیت و روش آنتروپی در محیط GIS استفاده شد. در مدل گالدیت از پارامترهای مؤثر بر ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان ساحلی شامل نوع آبخوان، هدایت هیدرولیکی آبخوان، ارتفاع سطح آب زیرزمینی بالاتر از سطح دریا، فاصله از خط ساحلی، تأثیر کیفی پیشروی آب شور و ضخامت آبخوان استفاده می‌شود. نقشه‌های این مدل به صورت شش لایه اطلاعاتی با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. سپس به منظور ارزیابی دقیق‌تر نقشه آسیب‌پذیری، وزن پارامترهای گالدیت با استفاده از روش آنتروپی اصلاح شد و نقشه آسیب‌پذیری گالدیت-آنتروپی به دست آمد. برای تعیین مدل بهینه، از ضریب همبستگی بین شاخص‌های آسیب‌پذیری و پارامتر TDS استفاده شد. میزان ضریب همبستگی بین مدل گالدیت-آنتروپی با پارامتر TDS ۰/۵۱ است، در صورتی که مقدار این ضریب برای مدل گالدیت ۰/۴۳ بود. براساس مدل گالدیت-آنتروپی نواحی شمال غرب، جنوب غرب و غرب آبخوان آسیب‌پذیری زیادی به پیشروی آب شور دارد. نقشه این مدل به چهار کلاس آسیب‌پذیری کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد تقسیم شد که به ترتیب ۱۴، ۳۳، ۳۰ و ۲۳ درصد از ناحیه مطالعه شده را شامل می‌شود. مدل گالدیت-آنتروپی موجب کاهش خطای نظر کارشناسی در مدل گالدیت اولیه شد. روش پیشنهادی می‌تواند برای ارزیابی آسیب‌پذیری در آبخوان‌های ساحلی با خصوصیات هیدروژئولوژیکی مشابه به کار رود.

کلیدواژه‌گان: آبخوان، آسیب‌پذیری آب زیرزمینی، آنتروپی، پیشروی آب شور.

مقدمه

منابع آب زیرزمینی، مهم‌ترین منبع تأمین آب در نواحی ساحلی محسوب می‌شوند. به همین دلیل نظارت و مدیریت این منابع آسیب‌پذیر، برای مسئولان منابع طبیعی امری ضروری است. منابع آب زیرزمینی در مناطق پرجمعیت ساحلی، به دلیل تقاضای گسترده در معرض تخریب و آلودگی اند [۱] و رفع آلودگی این منابع فرایندی هزینه‌بر و زمان‌بر است [۲]. بنابراین، بهترین راه حل، جلوگیری از آلودگی منابع آب زیرزمینی است، که این هدف با شناخت مناطق مستعد آلودگی امکان‌پذیر است [۳]. به‌طور کلی، آسیب‌پذیری ذاتی آب زیرزمینی به‌صورت حرکت آلاینده از سطح زمین، رسیدن به آب زیرزمینی و پخش شدن در آن تعریف می‌شود [۴]. آسیب‌پذیری به‌عنوان خاصیت ذاتی یک سیستم آب زیرزمینی محسوب می‌شود که به حساسیت آن به تأثیرات انسانی و طبیعی بستگی دارد [۵]. سه روش کلی برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی و آلودگی وجود دارد: روش‌های آماری، روش‌های شبیه‌سازی مبتنی بر فرایند و روش‌های رتبه‌ای [۶]. مدل‌های رتبه‌ای در مقیاس منطقه‌ای کاربرد دارند [۷]. یکی از مدل‌های رایج رتبه‌ای در تعیین آسیب‌پذیری آبخوان‌های ساحلی به پیشروی آب شور، مدل گالدیت^۱ است [۸]. گالدیت شش پارامتر هیدروژئولوژیکی از جمله نوع آبخوان (G)، هدایت هیدرولیکی آبخوان (A)، ارتفاع سطح آب زیرزمینی بالاتر از سطح دریا (L)، فاصله از خط ساحلی (D)، تأثیر کیفی پیشروی آب شور (I) و ضخامت آبخوان (T) را در نظر می‌گیرد. برای تولید شش لایه اطلاعاتی گالدیت از داده‌های هیدروژئولوژیکی نظیر داده‌های کیفیت و سطح آب زیرزمینی آبخوان استفاده می‌شود. اخیراً از مدل گالدیت به‌منظور بررسی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی در آبخوان‌های ساحلی مختلف استفاده شده است. از جمله مطالعات صورت‌گرفته در زمینه ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی با استفاده از مدل گالدیت می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

گونتارا و همکارانش برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان ساحلی در تونس از مدل گالدیت استفاده کردند. سپس، آنها برای اصلاح وزن پارامترهای این مدل، روش تحلیل حساسیت را به کار بردند. مدل اصلاحی نواحی آسیب‌پذیری را دقیق‌تر

نشان داد [۹]. در مطالعه‌ای دیگر، ماهرز و همکارانش آسیب‌پذیری آبخوان ساحلی کوآترنری در الجزایر را با استفاده از مدل گالدیت بررسی کردند. سپس، مدل گالدیت را با استفاده از روش تحلیل حساسیت اصلاح کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که بیشترین آسیب‌پذیری در نواحی شمالی منطقه مطالعه‌شده وجود دارد [۱۰]. کاردان مقدم و جوادی به‌منظور اصلاح وزن پارامترهای مدل گالدیت از روش تحلیل سلسله‌مراتبی^۲ استفاده کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد بیش از ۳۰ درصد از منطقه آسیب‌پذیری زیاد دارد [۱۱].

مشکل اصلی مدل گالدیت، اعمال نظرهای کارشناسی برای رتبه‌بندی و وزن‌دهی پارامترهای ارزیابی شده است. از این‌رو، این مدل باید با توجه به خصوصیات هیدروژئولوژیکی هر منطقه تصحیح شود. تا کنون روش‌های مختلفی برای اصلاح شاخص‌های آسیب‌پذیری ارائه شده است. در مطالعه حاضر برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر آسیب‌پذیری از روش آنتروپی استفاده شد.

روش وزن‌دهی آنتروپی^۳ یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه (MADM) است که می‌تواند اهمیت هر پارامتر در آسیب‌پذیری را تعیین کند. روش آنتروپی با حل مدل‌های ریاضی و بدون در نظر گرفتن دیدگاه‌های کارشناسان، موجب بهبود مدل‌های آسیب‌پذیری می‌شود [۱۳]. این روش با توجه به خصوصیات هیدروژئولوژیکی منطقه، وزن‌های اصلاحی برای هر پارامتر را تعیین می‌کند. این روش در برخی مطالعات مربوط به آسیب‌پذیری آبخوان به‌منظور بهبود مدل‌های رتبه‌ای به کار رفته است. به‌طور مثال، در مطالعه‌ای یو و همکارانش برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوانی در شمال چین، مدل‌های وزن‌دهی - آنتروپی^۴ و بهینه‌سازی-فازی^۵ را به کار بردند و نتایج به‌دست‌آمده را با مدل دراستیک^۶ مقایسه کردند. نتایج مطالعه آنها نشان داد مدل‌های بهینه‌سازی توزیع آسیب‌پذیری نسبی را به صورت دقیق‌تر تعیین می‌کنند [۱۲]. ساهو و همکارانش برای اصلاح وزن‌های مدل دراستیک در هند روش‌های آنتروپی، فازی و تحلیل حساسیت تک‌پارامتری^۷ را به کار بردند. سپس، مدل‌های

2. AHP

3. Entropy

4. Entropy-weighted

5. Fuzzy-optimization

6. DRASTIC

7. Single Parameter Sensitivity Analysis

1. GALDIT

منطقه از جنوب به سمت شمال و شرق به سمت غرب کاهش می‌یابد. میزان تبخیر در این ناحیه به ۱۹۰۰ میلی‌متر در سال می‌رسد. میانگین سالانه دما در این منطقه ۱۷ درجه سانتی‌گراد است. کمترین و بیشترین رطوبت نسبی ماهانه به ترتیب ۴۷ تا ۸۹ درصد است. از نظر هیدروژئولوژیکی، آبخوان‌های موجود در منطقه مطالعه شده از نوع آبخوان‌های آبرفتی واقع در نواحی کم‌عمق و آبخوان‌های سازندهای سخت واقع در نواحی مرتفع هستند. آبخوان‌های آبرفتی از شن، ماسه، رس و رسوبات لسی تشکیل شده است. ضخامت متوسط آبخوان آبرفتی از ۱۵ تا ۱۵۰ متر متغیر است. در دشت گرگان و گنبد، رقوم تراز عمق سطح آب زیرزمینی از ۲۶- تا ۱۸۸ متر است. به‌طور کلی، در این دشت منحنی‌های تراز آب روند شرقی- غربی دارند و رقوم آنها از جنوب به سمت شمال کاهش می‌یابد. علاوه بر این، جهت جریان آب زیرزمینی از جنوب به سمت شمال و از شرق و جنوب شرق به سمت غرب است. در اراضی مخروط‌افکنه‌ای شیب هیدرولیکی آب زیرزمینی بیش از ۱۵ در هزار است که با حرکت به سمت شمال شیب هیدرولیکی کاهش می‌یابد و به چهار در هزار می‌رسد.

روش تحقیق

در مقاله حاضر، مدل گالدیت مبنای تعیین آسیب‌پذیری آبخوان ساحلی قره‌سو-گرگان رود است. شش لایه این مدل برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان از منابع اطلاعاتی مختلف تهیه شدند. با تجزیه و تحلیل این اطلاعات نقشه نهایی آسیب‌پذیری آبخوان در محیط نرم‌افزار ArcGIS به دست آمد. سپس، با در نظر گرفتن خصوصیات هیدروژئولوژیکی منطقه مطالعه شده وزن‌های این مدل با بهره‌گیری از روش آنروپی اصلاح شد. در نهایت، برای صحت‌سنجی مدل‌ها از مقادیر داده‌های TDS استفاده شد و مدل مناسب برای منطقه مطالعه شده تعیین شد. مراحل کلی کار در شکل ۲ نشان داده شده است.

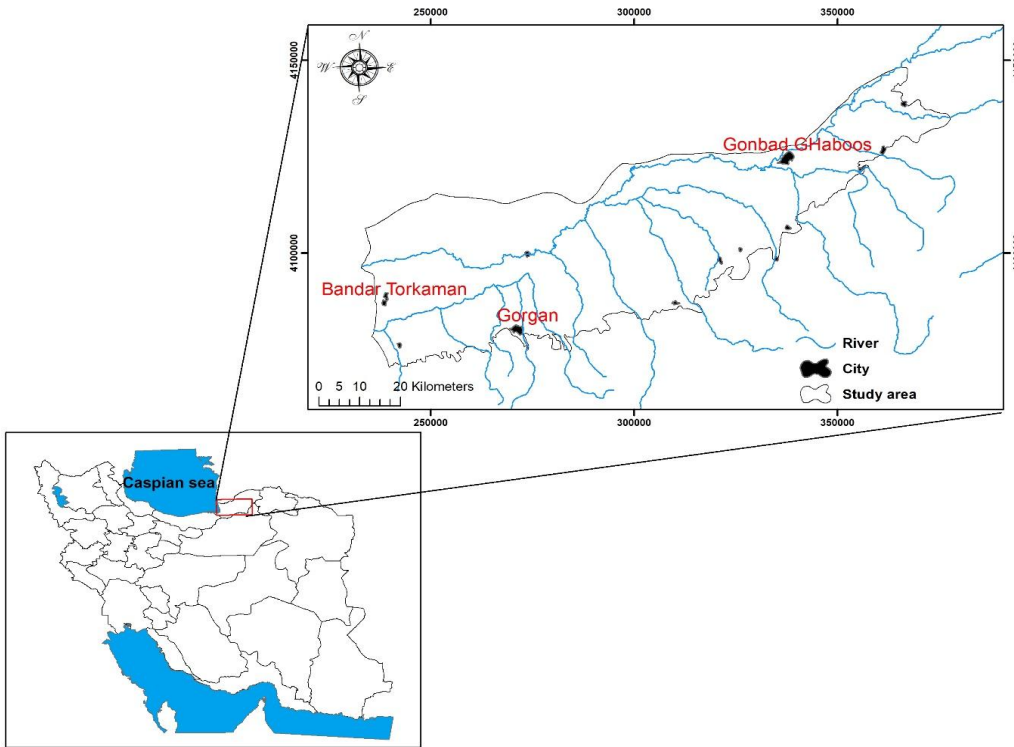
به‌دست‌آمده را با پارامترهای کیفی آب مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که عملکرد مدل‌های مختلف با پارامترهای کیفی متفاوت شبیه هم نیستند [۱۳]. با وجود مطالعات فراوان صورت گرفته، تا کنون ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان ساحلی با استفاده از روش آنروپی به‌منظور تعیین وزن‌های دقیق مدل گالدیت انجام نشده است.

آبخوان ساحلی قره‌سو-گرگان رود در استان گلستان، یکی از مناطق ساحلی کشور، قرار دارد. منابع آب زیرزمینی مهم‌ترین منبع تأمین آب در آبخوان ساحلی قره‌سو-گرگان رود است. در این دشت نواحی غرب منطقه به‌دلیل بهره‌برداری‌های بی‌رویه، فعالیت‌های کشاورزی و مجاورت با خط ساحلی دریای خزر در معرض پیشروی آب شور قرار دارند. بنابراین، در مطالعه حاضر به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر و شناخت نواحی آسیب‌پذیر در آبخوان ساحلی از مدل گالدیت استفاده شد. سپس، وزن‌های این مدل با روش آنروپی اصلاح شده و نتایج با مدل گالدیت اولیه مقایسه شد. مزیت اصلی مدل گالدیت اصلاحی این است که نتایج آسیب‌پذیری را به‌صورت دقیق‌تر نشان می‌دهد و موجب بهبود مدل گالدیت اصلی می‌شود.

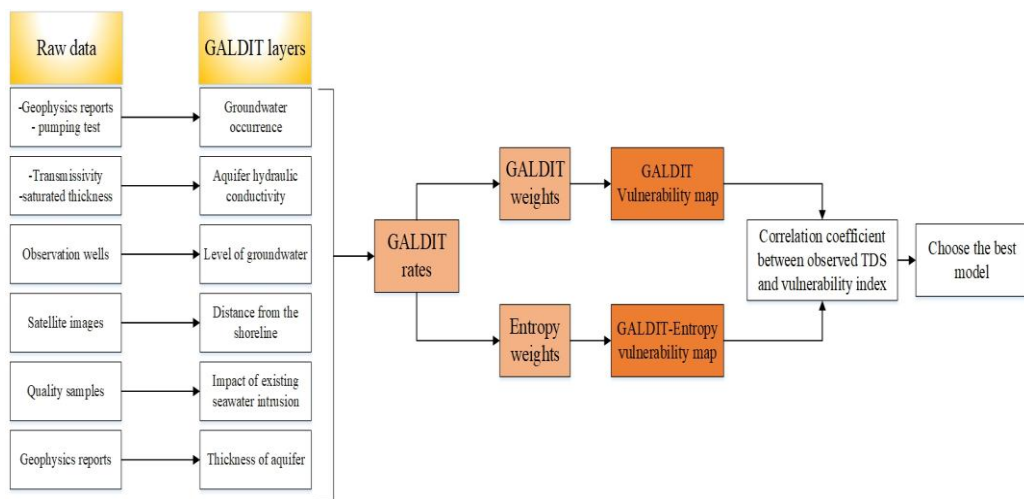
مواد و روش‌ها

ناحیه مطالعه شده

آبخوان ساحلی قره‌سو-گرگان رود در استان گلستان در بخش شرقی رشته‌کوه البرز بین طول‌های جغرافیایی ۰۰- تا ۵۴° تا ۲۹-۵۶° شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۶- تا ۴۷- شمالی با مساحت ۴۳۷۹ کیلومتر مربع واقع شده است (شکل ۱). آبخوان آزاد با آب شیرین حدود ۵۷ درصد وسعت دشت گرگان-گنبد را تشکیل می‌دهد. طول دوره مرطوب در این دشت بیشتر از هفت ماه و طول دوره خشک کمتر از پنج ماه است. روند بهره‌برداری در دشت گرگان در اواخر دهه ۱۳۷۰ افزایش یافته و موجب خشک و متروکه شدن قنوات و کاهش سایر منابع آب زیرزمینی شده است. کیفیت شیمیایی منابع آب زیرزمینی در این



شکل ۱. محدوده مطالعه شده



شکل ۲. چارچوب روش کار

آن تعیین می‌شود. رتبه‌بندی این مدل مقادیر ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ است. هرچه مقادیر رتبه‌بندی زیادتر باشد، آسیب‌پذیری آبخوان نیز بیشتر است. جدول ۱ سه بخش وزن، محدوده و رتبه‌های این مدل را نشان می‌دهد [۱۴]. شاخص آسیب‌پذیری گالدیت از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$GI=(1 \times G)+(3 \times A)+(4 \times L)+(4 \times D)+(1 \times I)+(2 \times T) \quad (1)$$

مدل گالدیت

مدل گالدیت توسط چاچادرو در سال ۲۰۰۱ برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های ساحلی به پیشروی آب شور، پیشنهاد شد [۸]. این مدل پتانسیل پیشروی آب شور در یک آبخوان را تعیین می‌کند. نقشه آسیب‌پذیری گالدیت، نتیجه هم‌پوشانی شش نقشه رتبه‌بندی‌شده پارامترهای این مدل است که با توجه به اهمیت نسبی هر عامل، وزن

جدول ۱. رتبه بندی و وزن های مدل گالدیت [۱۴]

رتبه	محدوده	کلاس	وزن	پارامتر
۲/۵		آبخوان محدود	۱	نوع آبخوان
۵		آبخوان نشتی		
۷/۵		آبخوان آزاد		
۱۰		آبخوان محبوس		
۲/۵	<۵	بسیار کم	۳	هدایت هیدرولیکی آبخوان
۵	۱۰-۵	کم		
۷/۵	۴۰-۱۰	متوسط		
۱۰	>۴۰	زیاد		
۲/۵	>۲	بسیار کم	۴	ارتفاع سطح آب زیرزمینی
۵	۲-۱/۵	کم		
۷/۵	۱/۵-۱	متوسط		
۱۰	<۱	زیاد		
۲/۵	>۱۰۰۰	بسیار کم	۴	فاصله از خط ساحلی
۵	۱۰۰۰-۷۵۰	کم		
۷/۵	۷۵۰-۵۰۰	متوسط		
۱۰	<۵۰۰	زیاد		
۲/۵	<۱	بسیار کم	۱	تأثیر کیفی پیشروی آب شور
۵	۱/۵-۱	کم		
۷/۵	۲-۱/۵	متوسط		
۱۰	>۲	زیاد		
۲/۵	<۵	بسیار کم	۲	ضخامت آبخوان
۵	۷/۵-۵	کم		
۷/۵	۱۰-۷/۵	متوسط		
۱۰	>۱۰	زیاد		

۱. تشکیل ماتریس: در این روش فرض می شود که ناحیه هدف به n ناحیه تقسیم شده و m تعداد پارامترهای ارزیابی شده است. اگر داده های مربوط به رتبه ها به صورت ماتریس X باشد، ماتریس تصمیم گیری می تواند به صورت رابطه ۲ تعریف شود.

$$\begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{pmatrix} \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m \quad (2)$$

۲. نرمال سازی ماتریس: نرمال سازی به این صورت است که درایه هر ستون بر مجموع ستون تقسیم می شود، که از رابطه ۳ به دست می آید.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (3)$$

۳. محاسبه آنتروپی هر شاخص: آنتروپی e_j از رابطه ۴ محاسبه می شود. واریانس بیشتر (آنتروپی کمتر)

تئوری آنتروپی برای اصلاح وزن های مدل گالدیت

مطالعه حاضر به بررسی روش وزن دهی آنتروپی برای اصلاح وزن پارامترهای مدل گالدیت می پردازد. تئوری آنتروپی توسط شانون در سال ۱۹۴۸ در مقاله «یک نظریه ریاضی از ارتباطات» معرفی شد [۱۵]. روش آنتروپی براساس اصول اساسی تئوری اطلاعات است که مقدار اطلاعات موجود در داده ها را نشان می دهد. علاوه بر این، آنتروپی عدم قطعیت یک سیستم را اندازه گیری می کند. در صورتی که مقادیر آنتروپی کمتر باشد، نشان دهنده کمتر بودن عدم قطعیت داده های مربوط به آن است [۱۶]. یکی از عوامل تعیین کننده دقت و اطمینان مشکلات تصمیم گیری، تعداد یا کیفیت اطلاعات به دست آمده از تصمیم گیری براساس ایده اطلاعات آنتروپی است [۱۷]. از روش آنتروپی برای تعیین اهمیت نسبی هر پارامتر بر آسیب پذیری استفاده شد. برای وزن دهی به روش آنتروپی به صورت زیر عمل می شود.

$$k = \frac{T}{B} \quad (7)$$

اینجا، k هدایت هیدرولیکی آبخوان با واحد متر بر ثانیه، B ضخامت آبخوان به متر و T قابلیت انتقال مترمربع بر ثانیه است که از داده‌های تست پمپاژ، اندازه‌گیری می‌شود. نقشه هدایت هیدرولیکی با توجه به جدول ۱ در ۴ محدوده رتبه‌بندی ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ تقسیم شد. بیشترین میزان هدایت هیدرولیکی در محدوده ۱۰-۴۰ متر بر روز را شامل می‌شود.

عمق سطح آب زیرزمینی بیشتر از سطح دریا؛ این پارامتر، سطح آب زیرزمینی را با توجه به متوسط ارتفاع دریا در بسیاری از نقاط نشان می‌دهد. ارتفاع سطح ایستایی بیشتر از سطح دریا، یکی از پارامترهای مهم برای ارزیابی پیشروی آب شور است، به این علت که شیب هیدرولیکی عامل اصلی کنترل‌کننده جریان آب زیرزمینی است. پارامتر ارتفاع سطح آب زیرزمینی از داده‌های مربوط به تراز سطح آب زیرزمینی منطقه مطالعه شده تهیه شد. مقدار این پارامتر از ۳۱/۳- تا ۹۵/۱ متر متغیر است. کمترین مقدار ارتفاع آب زیرزمینی در غرب منطقه مطالعه شده است که در مجاورت دریا قرار دارد.

فاصله از خط ساحلی: پارامتر فاصله از خط ساحلی از مهم‌ترین پارامترها برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان ساحلی است. نقشه فاصله از خط ساحلی با استفاده از ابزار بافر در محیط ArcGIS به دست آمد. نقشه پهنه‌بندی این پارامتر به چهار دسته آسیب‌پذیری از ۲/۵ (آسیب‌پذیری کم) تا ۱۰ (آسیب‌پذیری زیاد) تقسیم شد. ناحیه نزدیک به خط ساحلی بیشترین آسیب‌پذیری به پیشروی آب شور را دارد. هر چه از خط ساحلی دورتر (فاصله بیشتر از یک هزار متر)، آسیب‌پذیری منطقه به پیشروی آب شور کاهش می‌یابد.

پارامتر تأثیر کیفی پیشروی آب شور: داده‌های مرتبط با غلظت کلراید و بی‌کربنات برای چاه‌های مختلف، به دست آمده است. برای تهیه نقشه تأثیر کیفی پیشروی آب شور از نسبت Cl/HCO_3 به منظور تعیین گسترش آب شور به آبخوان ساحلی استفاده شد. کمترین میزان Cl/HCO_3 در نواحی جنوب و شرق آبخوان مشاهده شد. پارامتر ضخامت آبخوان: این پارامتر، ضخامت منطقه اشباع را تعیین می‌کند. از این‌رو، از تفاوت بین سطح آب

نشان می‌دهد نواحی در هر پارامتر ز تفاوت بیشتری دارد. معمولاً در شرایط میدانی مختلف، واریانس پارامترهای مختلف متفاوت است.

$$e_j = -\frac{1}{\ln(m)} \sum_{i=1}^n p_{ij} \quad (4)$$

۴. مقدار d_j (درجه انحراف): این مقدار بیان می‌کند که شاخص مربوط به آن چه میزان اطلاعات مفید برای تصمیم‌گیری در اختیار تصمیم‌گیرنده قرار می‌دهد. با مشخص بودن آنتروپی در هر شاخص، پراکندگی مقادیر در هر شاخص از رابطه ۵ به دست می‌آید.

$$d_j = 1 - e_j \quad (5)$$

۵. با در نظر گرفتن تفاوت‌ها در رتبه‌بندی پارامترها در مدل گالدیت و اختلاف واریانس‌ها، وزن‌های اصلاحی پارامترها از رابطه ۶ به دست می‌آید. وزن زیاد یک پارامتر اهمیت نسبی آن را در میان پارامترهای دیگر نشان می‌دهد. پارامتر با واریانس بزرگ‌تر وزن بیشتری دارد. در صورتی که مقدار آنتروپی کوچک‌تر باشد، وزن آن پارامتر بیشتر می‌شود. w_j وزن اصلاح‌شده، W_j وزن اصلی گالدیت و m تعداد گزینه‌هاست.

$$w_j = W_j (1 - e_j) / \sum_{j=1}^m (1 - e_j) \quad (6)$$

نتایج

به منظور تهیه لایه‌های مدل گالدیت، از رتبه‌ها و وزن‌های جدول ۱ استفاده شد. هر نقشه به فرمت رستری در محیط نرم‌افزار ArcGIS به دست آمد (شکل ۳). چگونگی تهیه لایه‌های اطلاعاتی مختلف به صورت خلاصه ارائه می‌شود.

نوع آبخوان: طبق جدول ۱ نوع آبخوان به چهار گروه آبخوان محدود، نشتی، آزاد و محبوس تقسیم می‌شود. آبخوان منطقه مطالعه شده از دو نوع آبخوان آزاد و محبوس به ترتیب با رتبه‌های ۷/۵ و ۱۰ پوشیده شده است. بیشتر بخش منطقه مطالعه شده را آبخوان آزاد تشکیل می‌دهد.

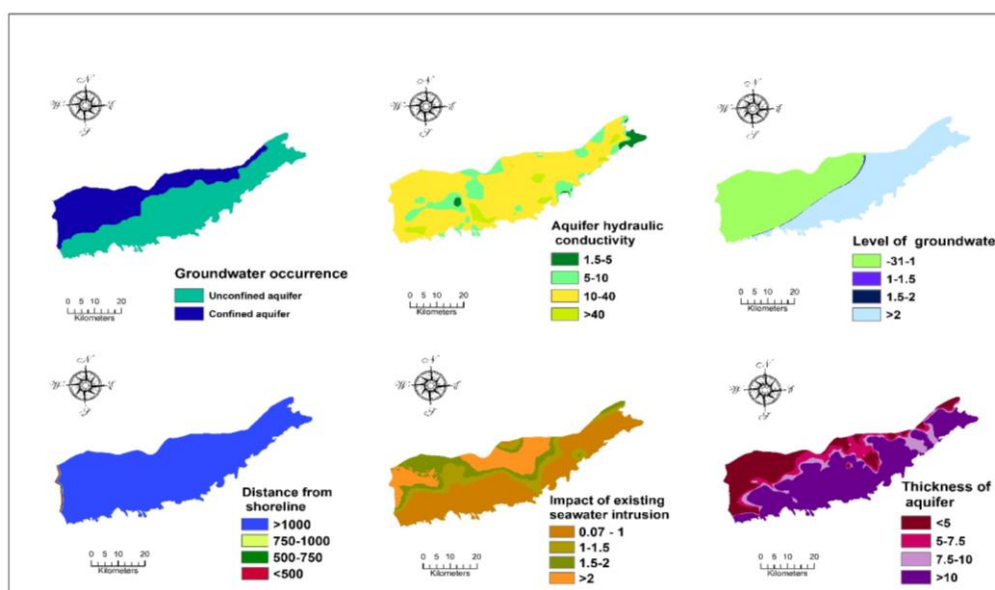
هدایت هیدرولیکی آبخوان: هدایت هیدرولیکی توانایی انتقال آب در آبخوان را نشان می‌دهد که براساس رابطه ۷ محاسبه می‌شود.

سپس، وزن‌های مدل گالدیت با استفاده از روش آنتروپی اصلاح شد (جدول ۲). نتایج نشان داد پارامترهای هدایت هیدرولیکی آبخوان و ارتفاع سطح آب زیرزمینی وزن بیشتری را به خود اختصاص دادند. در صورتی که پارامتر نوع آبخوان کمترین وزن را دارد. با استفاده از وزن‌های اصلاحی روش آنتروپی و جایگزینی آن با وزن‌های استاندارد مدل گالدیت در رابطه ۱ نقشه گالدیت-آنتروپی تهیه شد. نقشه یادشده به چهار کلاس آسیب پذیری کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد که به ترتیب ۱۴، ۳۳، ۳۰، ۲۳ درصد از ناحیه را شامل می‌شود، طبقه‌بندی شد. بیشترین درصد آسیب‌پذیری آب زیرزمینی مربوط به کلاس آسیب‌پذیری متوسط است که نواحی جنوبی و مرکزی آبخوان را می‌پوشاند. در صورتی که، نواحی شمال غرب، غرب و جنوب غرب در کلاس آسیب‌پذیری زیاد و بسیار زیاد قرار دارند و ۵۳ درصد از منطقه را به خود اختصاص می‌دهند (شکل‌های ۴ و ۵).

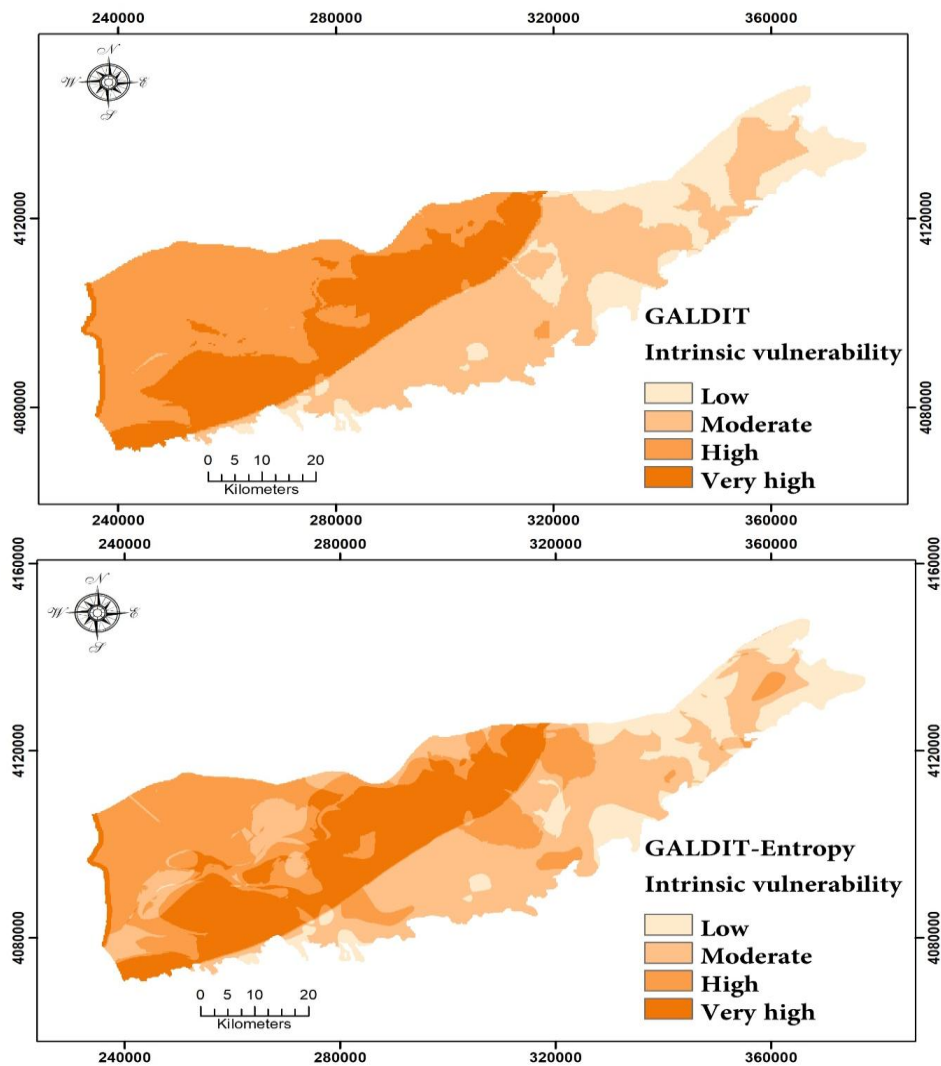
زیرزمینی و انتهای آبخوان تعیین می‌شود. نقشه ضخامت آبخوان نشان داد نواحی غرب آبخوان مطالعه‌شده کمترین ضخامت را دارند. در حالی که بیشترین ضخامت در قسمت شرق و جنوب آبخوان مشاهده شد. نقشه این پارامتر به چهار کلاس آسیب‌پذیری ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ تقسیم شد. نقشه نهایی مدل گالدیت از هم‌پوشانی شش لایه اطلاعاتی این مدل با استفاده از رابطه ۱ به دست آمد. نقشه نهایی به چهار کلاس آسیب‌پذیری کم (۱۴)، متوسط (۳۲)، زیاد (۳۰) و بسیار زیاد (۲۴) تقسیم شد (شکل ۵). براساس نقشه نهایی مشاهده شد نواحی شمال غرب، جنوب غرب و غرب آسیب‌پذیری زیاد-بسیار زیاد نسبت به پیشروی آب شور دارند که ۵۴ درصد از منطقه را می‌پوشاند. بیشترین درصد آسیب‌پذیری آب زیرزمینی مربوط به کلاس آسیب‌پذیری متوسط است، که نواحی جنوبی و مرکزی آبخوان را پوشش می‌دهد (شکل‌های ۴ و ۵).

جدول ۲. وزن‌های اصلاح‌شده گالدیت با روش آنتروپی

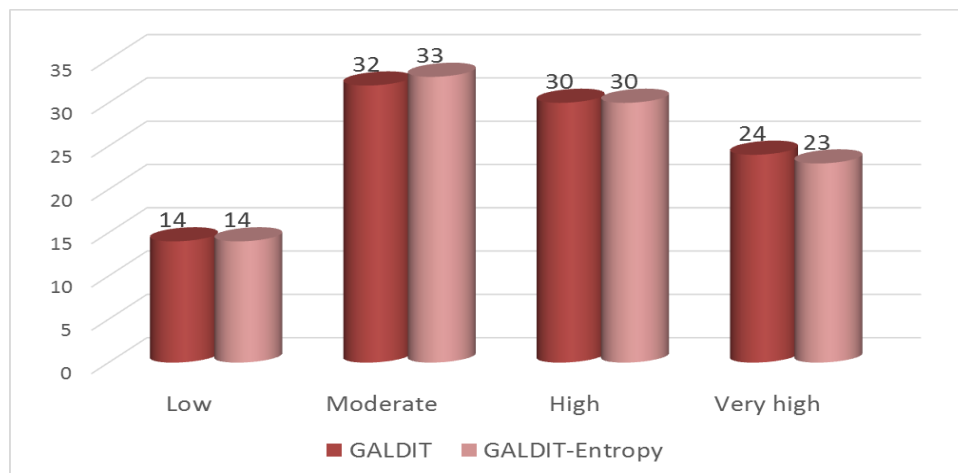
وزن	آنتروپی	پارامتر
۰/۰۲۲	۰/۹۹۸	نوع آبخوان
۰/۶۱۴	۰/۹۸۸	هدایت هیدرولیکی آبخوان
۰/۴۸۹	۰/۹۹۲	ارتفاع سطح آب زیرزمینی
۰/۴۵۶	۰/۹۹۳	فاصله از خط ساحلی
۰/۳۰۸	۰/۹۸۱	تأثیر کیفی پیشروی آب شور
۰/۴۵۵	۰/۹۸۶	ضخامت آبخوان



شکل ۳. پارامترهای گالدیت



شکل ۴. نقشه‌های آسیب‌پذیری گالدیت و گالدیت-آنتروپی



شکل ۵. درصد آسیب‌پذیری مدل‌ها

صحت‌سنجی مدل‌ها

به‌منظور حصول اطمینان از مدل‌های به‌دست‌آمده، صحت‌سنجی مدل‌ها صورت گرفت. با توجه به اینکه منطقه مطالعه‌شده از آبخوان‌های ساحلی کشور است و تحت تأثیر پیشروی آب شور قرار دارد، برای صحت‌سنجی مدل‌ها از پارامتر TDS استفاده شد. داده‌های پارامتر TDS از ۵۳ چاه مشاهده‌ای در سال ۱۳۹۶ نمونه‌برداری شد. برای تعیین همبستگی بین شاخص‌های آسیب‌پذیری و پارامتر TDS از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. این ضریب میزان ارتباط خطی بین دو شاخص را برآورد می‌کند. مقدار ضریب همبستگی بین شاخص گالدیت و پارامتر TDS ۰/۴۳ به دست آمد. پس از اصلاح وزن‌ها با روش آنتروپی، میزان همبستگی ۰/۵۱ به دست آمد که بیان‌کننده تأثیر عملکرد روش آنتروپی برای ارزیابی آسیب‌پذیری در منطقه مطالعه‌شده است.

بحث

مدل گالدیت از مدل‌های رتبه‌ای و براساس دیدگاه‌های کارشناسی است. از این‌رو، با توجه به خصوصیات هیدروژئولوژیکی هر منطقه باید کالیبره شود. بسیاری از محققان این مدل را با روش‌های مختلف اصلاح کرده‌اند. از جمله، گونتارا و همکارانش نشان دادند روش تحلیل حساسیت موجب بهبود مدل گالدیت می‌شود [۹]. علاوه بر این، کاردان مقدم و جوادى وزن‌های مدل گالدیت را با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی اصلاح کردند [۱۱]. یکی از روش‌های اصلاحی مدل‌های رتبه‌ای روش آنتروپی است. این روش در مطالعات مربوط به مدل دراستیک به صورت گسترده به کار رفته است. در صورتی که تا کنون روش آنتروپی برای اصلاح‌سازی مدل گالدیت استفاده نشده است.

در تحقیق حاضر از روش آنتروپی به‌منظور بهبود مدل گالدیت استفاده شد و نتایج دیگر مطالعات نیز نشان‌دهنده عملکرد خوب این مدل برای بهبود مدل‌های رتبه‌ای است. به‌طور مثال، ساهو و همکارانش پس از اصلاح مدل دراستیک به این نتیجه رسیدند ضرایب همبستگی بین پارامتر کلیایی و شاخص‌های دراستیک و آنتروپی از ۰/۷۲۸ به ۰/۸۵۹ افزایش یافت [۱۳]. در مطالعه‌ای دیگر، یو و همکارانش با به‌کارگیری روش‌های فازی و آنتروپی

مدل دراستیک را اصلاح کردند. آنها به این نتیجه دست یافتند که مدل‌های اصلاحی و مدل دراستیک اولیه نتایج مشابهی را نشان دادند و ضریب همبستگی در این مدل‌ها ۰/۹ به دست آمد. روش‌های استفاده‌شده موجب کاهش عدم قطعیت و افزایش قابلیت مدل دراستیک شد [۱۲]. نتایج مطالعه حاضر نشان داد مدل اصلاح‌شده عملکرد بهتری در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان ساحلی دارد. ضرایب همبستگی بین شاخص‌های آسیب‌پذیری و پارامتر TDS از ۰/۴۳ به ۰/۵۱ افزایش یافت.

برای درک بهتر و نشان‌دادن وضعیت آسیب‌پذیری منطقه، شاخص‌های آسیب‌پذیری به چهار کلاس آسیب‌پذیری کم تا بسیار زیاد طبقه‌بندی شد. در هر دو نقشه مدل گالدیت اولیه و گالدیت اصلاحی نواحی شمال غرب، جنوب غرب و غرب منطقه مطالعه‌شده در کلاس آسیب‌پذیری زیاد و بسیار زیاد قرار دارند. در حالی که کلاس آسیب‌پذیری کم، نواحی شرق منطقه را می‌پوشاند. علاوه بر این، بیشترین درصد آسیب‌پذیری مربوط به کلاس آسیب‌پذیری متوسط است و کمترین درصد آسیب‌پذیری به کلاس آسیب‌پذیری کم اختصاص می‌یابد.

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر از مدل گالدیت برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان ساحلی قره‌سو-گرگان‌رود نسبت به پیشروی آب شور استفاده شد. به همین منظور، شش پارامتر گالدیت در محیط نرم‌افزار ArcGIS به صورت شش لایه اطلاعاتی تهیه شد و نقشه نهایی آسیب‌پذیری از تلفیق این لایه‌ها به دست آمد. براساس مدل گالدیت مشاهده شد که قسمت‌های شمال، شمال غرب و جنوب غرب آبخوان در محدوده آسیب‌پذیری زیاد تا بسیار زیاد واقع شده است. ضریب همبستگی بین شاخص آسیب‌پذیری گالدیت و پارامتر TDS ۰/۴۳ به دست آمد. سپس، به‌منظور اصلاح وزن‌های مدل گالدیت روش آنتروپی به کار رفت. لایه‌های گالدیت در وزن‌های حاصل از آنتروپی ضرب و نقشه آسیب‌پذیری گالدیت-آنتروپی تهیه شد. این نقشه نشان داد بیشترین آسیب‌پذیری (زیاد-بسیار زیاد) در نواحی شمال غرب، جنوب غرب و غرب منطقه قرار دارد. به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت در این قسمت‌ها به‌دلیل هدایت هیدرولیکی زیاد، نوع آبخوان محبوس و کم‌بودن عمق سطح آب زیرزمینی مکان‌هایی با بیشترین

- vulnerability assessment. *Natural Hazards*. 2015; 76(1), 543-563.
- [7]. Neshat A, Pradhan B, Pirasteh S, Shafri HZM. Estimating groundwater vulnerability to pollution using a modified DRASTIC model in the Kerman agricultural area, Iran. *Environmental Earth Sciences*. 2014a; 71(7): 3119-3131.
- [8]. Chachadi A.G, Lobo Ferreira JPC. Sea water intrusion vulnerability mapping of aquifers using the GALDIT method. 2001.
- [9]. Gontara M, Allouche N, Jmal I, Bouri S. Sensitivity analysis for the GALDIT method based on the assessment of vulnerability to pollution in the northern Sfax coastal aquifer, Tunisia. *Arabian Journal of Geosciences*. 2016; 9(5): 416.
- [10]. Mahrez B, Klebingat S, Houha B, Houria B. GIS-based GALDIT method for vulnerability assessment to seawater intrusion of the Quaternary coastal Collo aquifer (NE-Algeria). *Arabian Journal of Geosciences*. 2018; 11(4): 71.
- [11]. Kardan Moghaddam H, Javadi S. Evaluation vulnerability coastal aquifer by GALDIT index and calibration by AHP method. *Journal of water and soil conservation*. 2016; 32(2): 163-177. [Persian]
- [12]. Yu C, Zhang B, Yao Y, Meng F, Zheng C. A field demonstration of the entropy-weighted fuzzy DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment. *Hydrological sciences journal*. 2012; 57(7): 1420-1432.
- [13]. Sahoo M, Sahoo S, Dhar A, Pradhan B. Effectiveness evaluation of objective and subjective weighting methods for aquifer vulnerability assessment in urban context. *Journal of Hydrology*. 2016; 541, 1303-1315.
- [14]. Chachadi AG. Seawater intrusion mapping using modified GALDIT indicator model-case study in Goa. *JalvigyanSameeksha*. 2005; 20: 29-45.
- [15]. Shannon CE. A mathematical theory of communication. *e Bell System Technical Journal*. 1948; 27 (3): 379-423.
- [16]. Li G.L, Fu Q. Grey relational analysis model based on weighted entropy and its application. In *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, 2007. *WiCom 2007. International Conference on* (pp. 5500-5503). IEEE.
- [17]. Wu J, Sun J, Liang L, Zha, Y. Determination of weights for ultimate cross efficiency using Shannon entropy. *Expert Systems with Applications*. 2011; 38(5), 5162-5165.
- آسیب‌پذیری وجود دارد. نتایج وزن‌های اصلاحی روش آنتروپی نشان داد پارامتر هدایت هیدرولیکی بیشترین اهمیت در آسیب‌پذیری را دارد. در حالی که پارامتر نوع آبخوان کمترین اهمیت در آسیب‌پذیری آبخوان را دارد. ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص آسیب‌پذیری گالدیت-آنتروپی و پارامتر TDS ۵۱/۰ به دست آمد. روش آنتروپی موجب می‌شود تأثیرات سیستم وزن‌دهی ثابت مربوط به پارامترهای مدل گالدیت کاهش یابد و نتایج دقیق‌تری از آسیب‌پذیری به دست آید. از این‌رو، مطالعه حاضر می‌تواند به‌منظور برنامه‌ریزی و تصمیم‌های مدیریتی برای جلوگیری از آلودگی منابع آب زیرزمینی در مناطق ساحلی مؤثر باشد. به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌های اصلاحی می‌توانند در تعیین نواحی‌ای که تحت تأثیر پیشروی آب شور قرار دارند؛ به کار روند. در نهایت، پیشنهاد می‌شود با یک برنامه‌ریزی صحیح در منطقه مطالعه‌شده از آسیب‌پذیری بیشتر آبخوان جلوگیری شود.

منابع

- [1]. Gorgij A.D, Moghaddam A.A. Vulnerability Assessment of saltwater intrusion using simplified GAPDIT method: a case study of Azarshahr Plain Aquifer, East Azerbaijan, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*. 2016; 9(2): 106.
- [2]. Nadiri A.A, Sedghi Z, Kazemian N. Optimization of DRASTIC method using ANN to evaluating of vulnerability of multiple Varzqan aquifer. *Iranian Journal of ECO Hydrology*. 2018; 4(4): 1089-1103. [Persian]
- [3]. Javanshir G, Nadiri A.A, Sadeghfam S, Novinpour E.A. Introducing a new method to aquifer vulnerability assessment of Moghan plain based on combination of DRASTIC, SINTACS and SI methods. *Iranian Journal of ECO Hydrology*. 2017; 3(4): 491-503. [Persian]
- [4]. Neshat A, Pradhan B, Shafri HZM. An integrated GIS based statistical model to compute groundwater vulnerability index for decision maker in agricultural area. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 2014b; 42(4): 777-788.
- [5]. Neshat A, Pradhan B. Evaluation of groundwater vulnerability to pollution using DRASTIC framework and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*. 2017; 10(22), 501.
- [6]. Neshat A, & Pradhan, B. An integrated DRASTIC model using frequency ratio and two new hybrid methods for groundwater