سنجش از دور
و
GIS ایران

سنجش از دور و GIS ایران
Iranian Remote Sensing & GIS

سال دهم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۷
Vol.10, No. 2, Summer 2018

۶۱-۷۴

کاربرد نمایه‌های ژئومرفومتری در مدل‌سازی مکانی رخداد چشمه‌های آب زیرزمینی در منطقهٔ البرز میانی، با رویکرد احتمالی وزنی شاهد

حسین امامی[۱]، میثم جعفری[۱]، علی‌اکبر نظری سامانی[۲*]، آرش ملکیان[۲]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد آبخیزداری، گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه تهران

۲. دانشیار گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۲۶

چکیده

مدل‌سازی مکانی رخداد چشمه‌های آب زیرزمینی امکان شناسایی چشمه‌های جدید را، برای مصارف شرب و کشاورزی و صنعت، فراهم می‌آورد. هدف از این تحقیق مدل‌سازیِ مکانی رخداد چشمه‌های آب زیرزمینی، با استفاده از نمایه‌های ژئومرفومتری مؤثر در رخداد آنها و مدل احتمالی وزنی شاهد و بررسی کارآیی این مدل در منطقهٔ البرز میانی است. به‌طورکلی، ۵۸۴ چشمه در منطقهٔ مورد مطالعه مشخص شدند که ۴۰۹ (۷۰٪) چشمه‌ها برای آموزش و ۱۷۵ (۳۰٪) چشمه‌ها برای اعتبارسنجی مدل وزنی شاهد به‌کار رفتند. چهارده شاخص مهم ژئومرفومتری مؤثر در رخداد چشمه‌ها، در قالب رویکرد مدل وزنی شاهد برای مدل‌سازی مکانی رخداد چشمه‌ها، برگزیده شدند. این عوامل شامل ارتفاع، درجهٔ شیب، جهت، انحنای صفحه‌ای، انحنای پروفیل، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص قدرت جریان، طول شیب، شاخص موقعیت توپوگرافی، سنگ‌شناسی، فاصله از گسل‌ها، تراکم گسل‌ها، فاصله از آبراهه‌ها و تراکم زهکشی می‌شوند. در این تحقیق، براساس مدل وزنی شاهد، عامل‌های جهت شیب و شاخص رطوبت توپوگرافی، به‌ترتیب، دارای کمترین و بیشترین تأثیر در رخداد چشمه‌های آب زیرزمینی‌اند. نقشهٔ به‌دست‌آمده از مدل‌سازی مکانی رخداد چشمه‌ها، در چهار طبقه، با پتانسیل رخداد کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد قرار گرفت. صحت پیش‌بینی مدل مورد استفاده با استفاده از روش ROC بررسی شد. سطح زیرین منحنی ۰/۸۶۶ به‌دست آمد که نشان می‌دهد مدل وزنی شاهد، در برآورد رخداد مکانی چشمه‌های آب زیرزمینی در منطقهٔ مورد مطالعه، دقت بسیار خوبی دارد.

کلیدواژه‌ها: مدل‌سازی مکانی، چشمه‌های آب زیرزمینی، وزنی شاهد، ROC، ژئومرفومتری، البرز میانی.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: دانشگاه تهران، دانشکدهٔ منابع طبیعی، گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی.

Email: aknazari@ut.ac.ir

۱- مقدمه

آب منبعی حیات‌بخش و یکی از عوامل حیاتی تشکیل و بقای زیست به‌شمار می‌رود و بیش از هر زمان دیگری، مورد توجه است. منابع آب زیرزمینی در سازندهای کربناته یکی از منابع مهم آبی در مناطق کوهستانی‌اند که، از لحاظ شرب و کشاورزی و دامداری و صنعت، کیفیت مناسبی دارند. آب زیرزمینی در لایه‌های اشباع زیر زمین تجمع پیدا می‌کند و بر اثر تراوش آب باران و یا آب ناشی از ذوب یخ و برف، از خلل و فرج بین کانی‌ها و سنگ‌های زیرین به داخل زمین، ایجاد می‌شود (Banks and Robins, 2002). جریان آب زیرزمینی در لایهٔ آبخوان به‌سمت نقطهٔ تخلیه است که شامل چاه‌ها، چشمه‌ها، رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و اقیانوس می‌شود. در ایران، چشمه‌های متعدد کوچک و بزرگی وجود دارد که اغلب آنها در نواحی کوهستانی و مرتفع پدید می‌آیند و آب تخلیه‌شده از آنها معمولاً دارای کیفیت خوبی است. مطالعه و شناخت این چشمه‌ها نقش مهمی در حفاظت، برنامه‌ریزی برای بهره‌برداری بهینه از این منابع دارد. روش‌های تعیین پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از امواج صوتی، حفر چاه گمانه و روش ژئوالکتریک نیاز به مهارت، تخصص و صرف هزینه و زمان دارند (Singh and Prakash, 2003). در سال‌های اخیر، با استفاده از سامانهٔ اطلاعات جغرافیایی(GIS)[1] و سنجش از دور (RS)[2]، مدل‌سازی مکانی رخداد آب زیرزمینی به‌روشی نسبتاً آسان تبدیل شده است و استفاده از این روش‌ها می‌تواند در کاهش هزینه‌های بالای شناسایی منابع آب زیرزمینی تأثیرگذار باشد. GIS به کاربران این امکان را می‌دهد که، به‌سادگی، اطلاعات مکانی و داده‌های توصیفی را برای ایجاد نقشه‌ها، جدول‌ها و نمودارها در زمینه‌هایی، ازجمله مدیریت منابع آب و محیط‌زیست، به‌کار گیرند. استفاده از GIS و ترکیب آن با مدل‌های احتمالی برای به‌دست‌آوردن نتایج دقیق‌تر نقشی اساسی در مدل‌سازی مکانی رخداد چشمه‌های آب زیرزمینی دارد.

آرتور و همکاران[3] (۲۰۰۷) در پژوهشی، با استفاده از روش وزنی شاهد، آسیب‌پذیری آبخوان فلوریدا در برابر آلودگی را ارزیابی کردند. آنها نتیجه گرفتند که خروجی مدل وزنی شاهد می‌تواند نقشه‌های آسیب‌پذیری در مقابل آلاینده‌ها را ایجاد کند و ابزار قدرتمندی برای حفاظت از آبخوان باشد. ازدمیر[4] (۲۰۱۱)، در کوه‌های سلطان ترکیه، نقشهٔ پتانسیل چشمه‌های آب زیرزمینی را با استفاده از GIS و مدل‌های رگرسیون لجستیک، نسبت فراوانی و وزنی شاهد تهیه کرد. همچنین، همهٔ عوامل مرتبط که توپوگرافی، زمین‌شناسی، هیدرولوژی، و اقلیمی را دربر می‌گیرند، وارد مدل‌ها شدند. نتایج نشان داد که، به‌ترتیب، مدل‌های نسبت فراوانی، وزنی شاهد و رگرسیون لجستیک برآوردهای نسبتاً خوبی ارائه کرده‌اند. لی و همکاران[5] (۲۰۱۲)، در مطالعه‌ای، از روش وزنی شاهد برای تولید نقشهٔ پتانسیل بهره‌برداری از آب زیرزمینی، در منطقهٔ اطراف پوهانگ کره، استفاده کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که روش وزنی شاهد قادر است نقشهٔ پتانسیل بهره‌برداری از آب زیرزمینی را با دقت نسبتاً خوبی ایجاد کند. پورتقی و پورقاسمی[6] (۲۰۱۴)، در مطالعه‌ای، برای مدل‌سازی مکانی رخداد چشمه‌های آب زیرزمینی در منطقهٔ بیرجند خراسان جنوبی، مدل‌های رگرسیون لجستیک، نسبت فراوانی و وزنی شاهد را به‌کار بردند و کارآیی این مدل‌ها را با یکدیگر مقایسه کردند. آنها دریافتند که برای تهیهٔ نقشهٔ پتانسیل چشمه‌های آب زیرزمینی، به‌ترتیب، مدل‌های نسبت فراوانی، وزنی شاهد و رگرسیون لجستیک برآوردهای تقریباً خوبی ارائه می‌دهند. ال‌آبادی[7] (۲۰۱۵)، در پژوهشی، برای تهیهٔ نقشهٔ پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه‌ای واقع در شمال‌شرق

1. Geographic Information System
2. Remote Sensing
3. Arthur et al.
4. Ozdemir
5. Lee et al.
6. Pourtaghi and Pourghasemi
7. Al-Abadi

عراق، بین استان‌های واسط و میسان، از مدل وزنی شاهد استفاده کرد. نتایج نشان داد که مدل وزنی شاهد قابلیت بالایی در مدل‌سازی آب زیرزمینی در منطقهٔ مورد مطالعه دارد. هدف از این پژوهش مدل‌سازی مکانی رخداد چشمه‌های آب زیرزمینی در منطقهٔ البرز میانی، با استفاده از مدل احتمالی وزنی شاهد[1] است. از نتایج این تحقیق می‌توان برای پیش‌بینی پتانسیل منابع آب زیرزمینی و نیز بهبود مدیریت آن استفاده کرد؛ ضمن اینکه مدل‌سازی مکانی رخداد چشمه‌های آب زیرزمینی برپایهٔ مدل احتمالی و نمایه‌های ژئومرفومتری به مهارت زیادی نیاز ندارد و ازاین‌رو، در زمان و هزینه صرفه‌جویی خواهد شد.

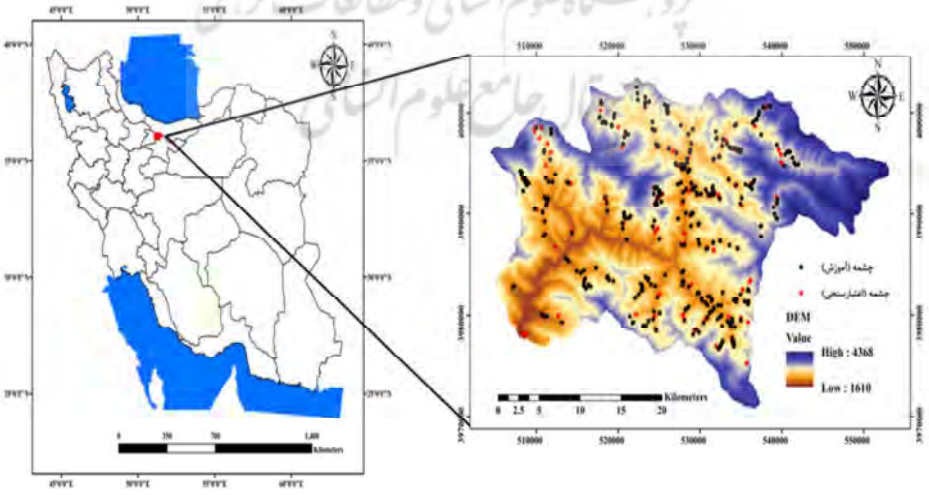
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقهٔ مورد مطالعه

منطقهٔ البرز میانی، دارای مساحت ۸۵۴/۴۱ کیلومترمربع، در محدودهٔ جغرافیایی '۰۵ °۵۱ تا '۵۱ °۵۹ طول شرقی و '۸۸ °۳۵ تا '۱۷ °۳۶ عرض شمالی و در بین استان‌های البرز، تهران و مازندران قرار دارد (شکل ۱). این منطقه، به‌دلیل قرارگرفتن در دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه البرز، کوهستانی محسوب می‌شود. منطقهٔ مورد مطالعه ارتفاعی بین ۱۶۱۰ تا ۴۳۶۸ متر از سطح دریا دارد و از نظر اقلیمی، با توجه به تقسیم‌بندی دومارتن، نیمه‌مرطوب است. در این ناحیه، چشمه‌های بسیاری وجود دارد که این چشمه‌ها رودخانهٔ دائمی و پرآب کرج را پدید آورده و از دلایل انتخاب این منطقه برای پژوهش حاضر به‌شمار می‌رود.

۲-۲- روش پژوهش

براساس داده‌های دریافت‌شده از سازمان مدیریت منابع آب ایران، به‌طورکلی، ۵۸۴ چشمه در این منطقه مشخص شده‌اند (شکل ۱). با استفاده از تفکیکی تصادفی، ۴۰۹ چشمه (۷۰٪) در تهیهٔ نقشهٔ رخداد مکانی چشمه‌های آب زیرزمینی (نقطه‌های سیاه‌رنگ در شکل ۱) و ۱۷۵چشمه (۳۰٪) برای اعتبارسنجی (نقطه‌های قرمز در شکل ۱) استفاده شد (Ozdemir, 2011; Pourtaghi and Pourghasemi, 2014). با استفاده از نقشهٔ موقعیت مکانی چشمه‌ها، تعدادی از عوامل مؤثر در وقوع چشمه‌ها ارزیابی شد. سپس، رخداد چشمه‌های آب‌زیرزمینی برای منطقهٔ مورد مطالعه، با استفاده از مدل وزنی شاهد، مدل‌سازی شد (Ozdemir, 2011; Lee et al., 2012; Al-Abadi, 2015; Pourtaghi and Pourghasemi, 2014). چهارده شاخص مهم ژئومرفومتری مؤثر در رخداد چشمه‌ها، که



شکل ۱. موقعیت منطقهٔ مورد مطالعه

1. Weights-of-Evidence (WofE)

در این مطالعه ارزیابی شده‌اند، شامل ارتفاع، درجهٔ شیب، جهت، انحنای پلان، انحنای پروفیل، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)[1]، شاخص قدرت جریان (SPI)[2]، طول شیب (LS)[3]، شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)[4]، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل، تراکم زهکشی، تراکم گسل و سنگ‌شناسی می‌شوند. هریک از این پارامترها، به‌گونه‌ای، در نفوذ آب و تغذیهٔ منابع آب زیرزمینی و نیز رخداد چشمه‌ها دخالت دارد.

با استفاده از خطوط تراز ارتفاعی، که از نقشهٔ توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ استخراج شده‌اند، مدل رقومی ارتفاع (DEM)[5] با اندازهٔ پیکسل‌های ۲۰×۲۰ متر تهیه شد. از DEM منطقهٔ مورد مطالعه به‌منزلهٔ ورودی برای استخراج نقشه‌های ارتفاع، درجهٔ شیب، جهت، انحنای پلان، انحنای پروفیل، شاخص موقعیت توپوگرافی، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص قدرت جریان، طول شیب، فاصله از آبراهه و تراکم زهکشی استفاده شد. در این پژوهش، عوامل مؤثر براساس روش‌های گوناگونی مانند فاصلهٔ برابر، شکست طبیعی، استانداردهای نرمال یا مشترک و بررسی منابع مطالعه طبقه‌بندی شده‌اند (Lee et al., 2012; Al-Abadi, 2015; Pourtaghi and Pourghasemi, 2014; Ozdemir, 2011).

شیب، جهت و ارتفاع، به‌دلیل تأثیر در میزان تغذیهٔ سازندها و مقدار آبدهی چشمه‌ها، اهمیت دارند (شکل ۲- الف، ب و پ). انحنای پلان برای سلول‌های دارای خطوط مقعر مثبت، سلول‌های دارای خطوط محدب منفی و سلول‌های دارای خطوط صاف صفر است. در انحنای پلان، که آن را «نرخ تغییرات جهت» تعریف می‌کنند، در پیکسل‌های دارای ارزش مثبت، جریان واگراست و ارزش‌های منفی به انحنایی اشاره دارد که، در آن پیکسل‌ها، جریان همگراست و به‌سمت یک نقطه متمرکز می‌شود (Schmidt et al., 2003; Wilson and Gallant, 2001) (شکل ۲- ت). انحنای پروفیل به‌معنای تغییر در وضعیت گرادیان شیب در طول یک دامنه است؛ بنابراین، این انحنا تأثیر بسیاری در سرعت جریان و حالت تقعر و تحدب دامنه‌ها دارد و با افزایش میزان آن (مقادیر مثبت) حالت دامنه مقعر می‌شود، سرعت جریان کاهش می‌یابد و سرعت نفوذ بیشتر می‌شود (شکل ۲- ث). توپوگرافی در تنوع مکانی شرایط هیدرولوژیکی، همچون رطوبت خاک و جریان آب زیرزمینی، نقش حیاتی دارد؛ ازاین‌رو، از شاخص توپوگرافی ثانویه برای توصیف الگوهای مکانی رطوبت خاک استفاده می‌شود (Moore et al., 1991). TWI عامل توپوگرافی ثانویه‌ای است که براساس رابطه (۱) به‌دست می‌آید (Ibid.) (شکل ۲- ج)):

$$TWI = \ln\left(\frac{\beta}{\tan\alpha}\right)$$ رابطه (۱)

β مساحت تجمعی بالادست زهکشی یک نقطه (مساحت بالادست در واحد طول خط تراز) و α درجهٔ شیب در همان نقطه است. شاخص قدرت جریان (SPI) را می‌توان با رابطهٔ زیر تعیین کرد (Ibid.) (شکل ۲- چ):

$$SPI = A_s \times \tan\alpha$$ رابطه (۲)

که در این رابطه، A_s مساحت ویژهٔ حوضه (m^2) و α درجهٔ شیب است. LS عامل توپوگرافی و ترکیبی از فاکتورهای L طول شیب و S تندی شیب حوضه است. این عامل در معادلهٔ جهانی فرسایش خاک (USLE)، برای اندازه‌گیری ظرفیت انتقال رسوب ازطریق جریان زمینی، به‌کار می‌رود. با رابطهٔ زیر، می‌توان عامل ترکیب‌شدهٔ LS را محاسبه کرد (Moore and Burch, 1986) (شکل ۲- ح):

$$LS = \left(\frac{B_s}{22.13}\right)^{0.6}\left(\frac{\sin\alpha}{0.0896}\right)^{1.3}$$ رابطه (۳)

1. Topographic Wetness Index
2. Stream Power Index
3. Slope Length
4. Topographic Position Index
5. Digital Elevation Model

شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) با استفاده از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود (Wilson and Gallant, 2001؛ Weiss, 2001) (شکل ۲- خ):

$$TPI = Z_0 - \frac{1}{n_R}\sum Z_i$$

رابطه (۴)

در رابطهٔ بالا، Z_0 ارتفاع در نقطهٔ مرکزی، n تعداد کل نقاط اطراف درنظر گرفته‌شده در ارزیابی و Z_i ارتفاع از شبکه‌اند. در این پژوهش، نقشه‌های TWI، SPI، LS و TPI با استفاده از نرم‌افزار SAGA-GIS تهیه شد. با به‌کارگرفتن نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ شیت تهران و مرزن‌آباد، منطقهٔ مورد مطالعه روی آنها انتخاب و پس از مشخص‌کردن محدودهٔ واحدهای سنگ‌شناسی موجود در آن، نقشهٔ این واحدها تهیه شد (شکل ۲- د). پس از استخراج گسل‌ها از نقشهٔ زمین‌شناسی، نقشهٔ فاصله از گسل‌ها و تراکم گسل‌ها به‌دست آمد (شکل‌های ۲- ذ و ۲- ر). نقشه‌های فاصله از آبراهه‌ها، با استخراج شبکهٔ آبراهه‌ها از مدل رقومی ارتفاع، تهیه شد (شکل ۲- ز). نقشهٔ تراکم زهکشی به‌صورت نسبت مجموع طول کلیهٔ آبراهه‌ها در یک حوضهٔ زهکشی برحسب کیلومتر، به مساحت کل حوضهٔ زهکشی برحسب کیلومترمربع، حاصل شد (شکل ۲- ژ).

۲-۲-۱- مدل وزنی شاهد (WofE)

ایدهٔ WofE می‌تواند چندین الگوی دودویی را ترکیب کند تا بتوان دیگر الگوی‌های دودویی را پیش‌بینی کرد (Bonham-Carter, 1994). با استفاده از لایهٔ مکان چشمه‌ها و داده‌های مکانی عوامل مؤثر در وقوع آنها، WofE(مدل احتمالی بیزی) برای اندازه گیری وزن هریک از عوامل مرتبط به‌کار می‌رود. این وزن‌ها را می‌توان، با تحلیل روابط مکانی بین محل چشمه‌ها و هریک از عوامل مؤثر، استخراج کرد. با استفاده از مدل وزنی شاهد، روابط مکانی بین چشمه‌ها و تمامی عوامل مورد نظر تحلیل شد. در این مطالعه، وزن مثبت (W^+) نشان می‌دهد عاملی در محل چشمه وجود دارد و بزرگی این وزن بیانگر همبستگیِ بین آن عامل و وقوع چشمه است. همچنین، وزن منفی (W^-) حضورنداشتنِ عامل مورد نظر در محل وقوع چشمه و سطح منفی همبستگی را نشان می‌دهد. برای محاسبهٔ وزن‌ها، از روابط (۵) و (۶) استفاده می‌شود (Ozdemir, 2011):

$$W^+ = ln\left[\frac{\frac{\text{تعداد چشمه‌ها در کلاس موردنظر}}{\text{تعداد کل چشمه‌ها}}}{\frac{\text{تعداد چشمه‌ها در کلاس موردنظر} - \text{تعداد پیکسل‌ها در کلاس موردنظر}}{\text{تعداد کل چشمه‌ها در منطقه} - \text{تعداد کل پیکسل‌ها در منطقه}}}\right]$$

رابطه (۵)

$$W^- = ln\left[\frac{\frac{\text{تعداد کل چشمه‌ها در کلاس‌های دیگر}}{\text{تعداد کل چشمه‌ها در منطقه}}}{\frac{\text{تعداد پیکسل‌های چشمه‌ها در دیگر کلاس‌ها} - \text{تعداد پیکسل‌ها در کلاس‌های بدون چشمه}}{\text{تعداد کل پیکسل‌های چشمه‌ها} - \text{تعداد پیکسل‌ها در کلاس‌های بدون چشمه‌ها}}}\right]$$

رابطه (۶)

اختلاف بین وزن مثبت (W^+) و وزن منفی (W^-) مقدار ارتباط مکانی بین متغیری علتی و وقوع چشمه‌ها را نشان می‌دهد (رابطه (۷)):

$$C = W^+ + W^-$$

رابطه (۷)

اگر مقدار C نزدیک به ۱ باشد، به این معناست که طبقه مورد نظر از عوامل مؤثر برای تحلیل است و اگر مقدار آن صفر باشد، یعنی طبقه مورد نظر ازجملهٔ چنین عواملی به‌شمار نمی‌رود. برای محاسبهٔ انحراف استاندارد، از رابطه (۸) استفاده می‌شود:

$$S(C) = \sqrt{S^2(W^+) + S^2(W^-)}$$

رابطه (۸)

در این رابطه، $S^2(W^+)$ و $S^2(W^-)$، به‌ترتیب، واریانس W^+ و واریانس W^- هستند. برای محاسبهٔ وزن نهایی (W_{final})، از رابطه (۹) استفاده می‌شود:

$$W_{final} = \left(\frac{C}{S(C)}\right)$$

رابطه (۹)

پس از اینکه مقدار وزن نهایی (W_{final}) برای هر پیکسل از منطقهٔ مورد مطالعه محاسبه شد، شاخص پتانسیل چشمهٔ آب زیرزمینی برای هر پیکسل، با

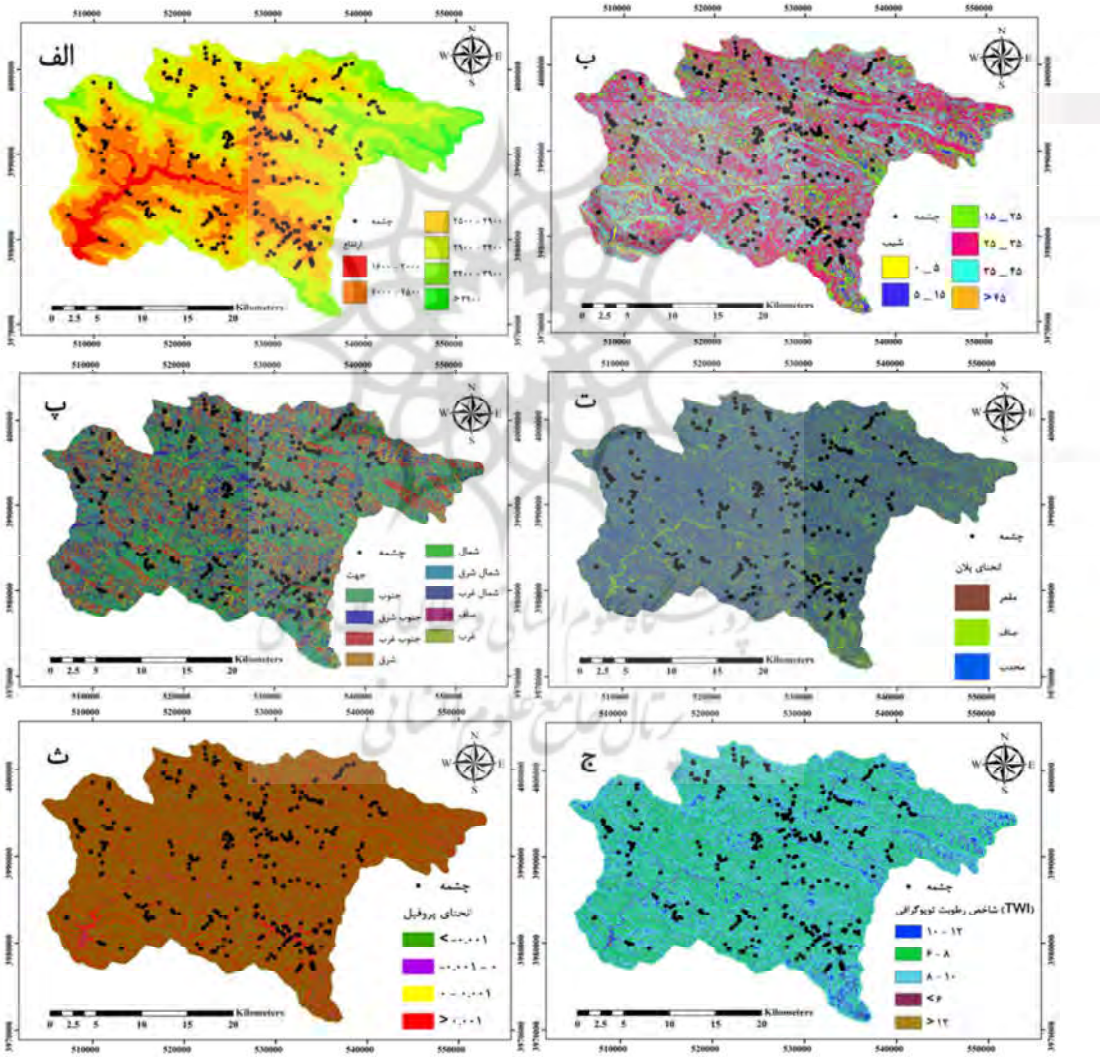
استفاده از رابطه (۱۰)، محاسبه می‌شود:

رابطه (۱۰)

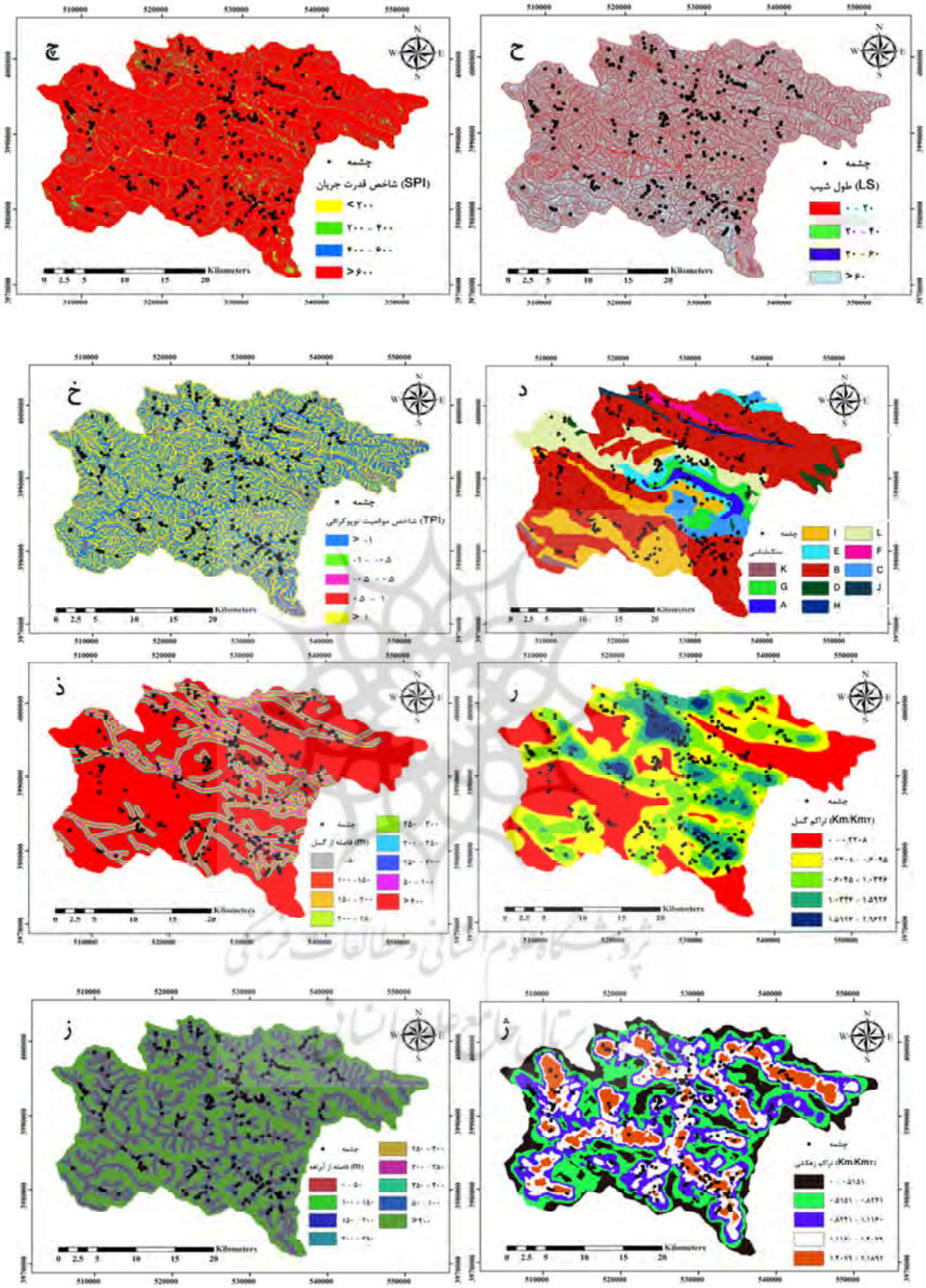
در این تحقیق، به‌منظور بررسی درستی مدل‌سازی مکانی رخداد چشمه‌های آب زیرزمینی، از منحنی ROC[1] استفاده شد و درنهایت، سطح زیر منحنی، که نشان‌دهندهٔ دقت مدل است، به‌دست آمد. این منحنی از کارآمدترین روش‌ها در ارائهٔ ویژگی‌های تشخیصی، شناسایی احتمالات و پیش‌بینی سیستم‌هاست که مقدار دقت مدل را، به‌صورت کمی، برآورد می‌کند (Shuin et al., 2012). از آنالیز منحنی ROC برای تعیین دقت و کارآیی مدل استفاده می‌شود.

۲-۲-۲- نتایج

نتایج به‌دست‌آمده از ارتباط مکانی بین مکان چشمه‌ها و هریک از عوامل مؤثر در رخداد آنها، که با استفاده از مدل وزنی شاهد محاسبه شده، در شکل ۲ و جدول ۱ ارائه شده است.



1. Receiver Operating Characteristics



شکل ۲. لایه‌های ورودی به مدل وزنی شاهد؛ ارتفاع (الف)، درجهٔ شیب (ب)، جهت (پ)، انحنای پلان (ت)، انحنای پروفیل (ث)، شاخص رطوبت توپوگرافی (ج)، شاخص قدرت جریان (چ)، طول شیب (ح)، شاخص موقعیت توپوگرافی (خ)، سنگ‌شناسی (د)، فاصله از گسل (ذ)، تراکم گسل (ر)، فاصله از آبراهه (ز)، تراکم زهکشی (ژ).

جدول۱. نتایج استفاده از مدل وزنی شاهد در منطقهٔ مورد مطالعه

عامل	کلاس	تعداد پیکسل‌ها	تعداد چشمه‌ها	W+	W-	C	(W+) S2	(W-) S2	(C) S	(C) C/S
ارتفاع (متر)	۱۶۰۰-۲۱۰۰	۱۲۶۲۶۲	۲۵	-۰/۱۱	۰/۰۲	-۰/۱۳	۰/۰۴	۰/۰۰۲	۰/۲۰	-۰/۶۶
	۲۱۰۰-۲۴۰۰	۳۲۳۴۵۴	۱۵۶	۰/۷۷	-۰/۲۴	۱/۰۲	۰/۰۰۶	۰/۰۰۳	۰/۱۰	۱۰/۰۱
	۲۴۰۰-۲۶۰۰	۲۹۱۱۹۶	۹۹	۰/۴۲	-۰/۰۶	۰/۴۹	۰/۰۱	۰/۰۰۳	۰/۱۱	۴/۲۷
	۲۶۰۰-۲۹۰۰	۵۲۲۵۴۵	۱۰۰	-۰/۱۴	-۰/۱۳	-۰/۲۸	۰/۰۱	۰/۰۰۳	۰/۱۱	-۲/۴۵
	۲۹۰۰-۳۱۰۰	۲۹۰۶۶۲	۲۳	-۱/۰۳	۰/۱۵	-۱/۱۸	۰/۰۴	۰/۰۰۲	۰/۲۱	-۵/۵۱
	۳۱۰۰-۳۴۰۰	۲۸۵۸۶۵	۶	-۲/۳۶	۰/۱۸	-۲/۵۵	۰/۱۶	۰/۰۰۲	۰/۴۱	-۶/۲۰
	۳۴۰۰-۳۷۰۰	۱۹۴۴۶۰	۰	۰	۰/۱۳	۰	۰	۰/۰۰۲	۰	۰
	۳۷۰۰-۴۳۶۸	۱۰۱۶۰۸	۰	۰	۰/۰۶	۰	۰	۰/۰۰۲	۰	۰
درجهٔ شیب	۰-۵	۳۱۸۷۱	۲۲	۱/۲۸	-۰/۰۴	۱/۳۲	۰/۰۴	۰/۰۰۲	۰/۲۱	۶/۰۳
	۵-۱۵	۱۳۶۲۴۷	۹۲	۱/۲۶	-۰/۱۸	۱/۴۵	۰/۰۱	۰/۰۰۳	۰/۱۱	۱۲/۲۴
	۱۵-۲۵	۳۷۶۳۴۷	۱۲۴	۰/۵۴	-۰/۱۶	۰/۷۱	۰/۰۰۸	۰/۰۰۳	۰/۱۰	۶/۶۰
	۲۵-۳۵	۹۷۰۹۸۶	۱۳۱	-۰/۳۵	۰/۲۲	-۰/۵۷	۰/۰۰۷	۰/۰۰۳	۰/۱۰	-۵/۳۸
	۳۵-۴۵	۵۵۶۳۵۸	۳۷	-۱/۵	۰/۲۰	-۱/۲۶	۰/۰۲	۰/۰۰۲	۰/۱۷	-۷/۳۴
	<۴۵	۶۴۲۴۳	۳	-۱/۴۱	۰/۰۲	-۱/۴۳	۰/۳۳	۰/۰۰۲	۰/۵۷	-۲/۴۸
جهت	صاف	۹۷۴۲	۴	۰/۲۹	-۰/۰۰۲	۰/۳۰	۰/۲۵	۰/۰۰۲	۰/۵۰	۰/۶۰
	شمال	۲۸۰۸۵۶	۶۱	-۰/۳۳	۰/۰۷	-۰/۴۱	۰/۰۱	۰/۰۰۲	۰/۱۳	-۲/۹۶
	شمال‌شرق	۲۹۶۰۹۲	۶۳	-۰/۳۵	۰/۰۸	-۰/۴۴	۰/۰۱	۰/۰۰۲	۰/۱۳	-۳/۲۱
	شرق	۲۲۷۰۰۷	۵۲	-۰/۲۸	۰/۰۴	-۰/۳۳	۰/۰۱	۰/۰۰۲	۰/۱۴	-۲/۴۹
	جنوب‌شرق	۲۲۰۱۳۸	۴۲	-۰/۴۶	۰/۰۷	-۰/۵۳	۰/۰۲	۰/۰۰۲	۰/۱۶	-۳/۳۰
	جنوب	۳۰۹۳۵۱	۴۸	-۰/۶۷	۰/۱۳	-۰/۸۱	۰/۰۲	۰/۰۰۲	۰/۱۵	-۵/۲۸
	جنوب‌غرب	۳۲۰۴۰۴	۴۴	-۰/۷۹	۰/۱۵	-۰/۹۵	۰/۰۲	۰/۰۰۲	۰/۱۵	-۵/۹۸
	غرب	۲۴۴۴۵۵	۴۳	-۰/۵۴	۰/۰۸	-۰/۶۳	۰/۰۲	۰/۰۰۲	۰/۱۶	-۳/۹۶
	شمال‌غرب	۲۲۸۰۰۷	۵۲	-۰/۲۸	۰/۰۵	-۰/۳۳	۰/۰۱	۰/۰۰۲	۰/۱۴	-۲/۲۸
انحنای پلان	مقعر	۷۷۵۷۳۶	۲۱۸	۰/۳۸	-۰/۳۱	۰/۶۹	۰/۰۰۴	۰/۰۰۵	۰/۰۹	۷/۰۰۱
	صاف	۴۵۹۸۰۸	۹۵	۰/۰۷	-۰/۰۲	۰/۰۹	۰/۰۱	۰/۰۰۳	۰/۱۱	۰/۸۳
	محدب	۹۰۰۵۰۸	۹۶	-۰/۵۸	۰/۲۷	-۰/۸۶	۰/۰۱	۰/۰۰۳	۰/۱۱	-۷/۴۱
انحنای پروفیل	<-۰/۰۰۱	۱۰۴۷۲۷۶	۱۲۱	-۰/۵	۰/۳۲	-۰/۸۲	۰/۰۰۸	۰/۰۰۳	۰/۱۰	-۷/۶۵
	-۰/۰۰۱-۰	۴۳۵۷۸	۱۲	۰/۳۶	-۰/۰۰۹	۰/۳۷	۰/۰۸	۰/۰۰۲	۰/۲۹	۱/۲۷
	۰-۰/۰۰۱	۱۵۱۴	۰	۰	۰/۰۰۰	۰	۰	۰/۰۰۲	۰	۰
	<۰/۰۰۱	۱۰۴۳۶۸۴	۲۷۶	۰/۳۲	-۰/۴۵	۰/۷۷	۰/۰۰۳	۰/۰۰۷	۰/۱۰	۷/۳۴
TWI	۶>	۳۰۶۱	۰	۰	۰/۰۰۱	۰	۰	۰/۰۰۲	۰	۰
	۶-۸	۶۲۷۷۰۷	۳۴	-۱/۲۶	۰/۲۶	-۱/۵۲	۰/۰۲	۰/۰۰۲	۰/۱۷	-۸/۵۱
	۸-۱۰	۱۱۵۸۳۶۵	۱۵۸	-۰/۳۳	۰/۲۹	-۰/۶۳	۰/۰۰۶	۰/۰۰۳	۰/۱۰	-۶/۲۴
	۱۰-۱۲	۲۵۵۹۸۹	۱۰۱	۰/۷۲	-۰/۱۵	۰/۸۷	۰/۰۰۹	۰/۰۰۳	۰/۱۱	۷/۶۶
	<۱۲	۹۰۹۳۰	۱۱۶	۱/۸۹	-۰/۲۸	۲/۱۸	۰/۰۰۸	۰/۰۰۳	۰/۱۰	۱۹/۹۳
SPI	۲۰۰>	۷۷۰۳۷	۱۱	-۰/۲۹	۰/۰۰۹	-۰/۳۰	۰/۰۹	۰/۰۰۲	۰/۳۰	-۰/۹۹
	۲۰۰-۴۰۰	۱۰۶۳۷۴	۱۶	-۰/۲۴	۰/۰۱	-۰/۲۵	۰/۰۶	۰/۰۰۲	۰/۲۵	-۰/۹۹
	۴۰۰-۶۰۰	۱۳۵۰۷۲	۲۱	-/۲۰	۰/۰۱	-۰/۲۲	۰/۰۴	۰/۰۰۲	۰/۲۲	-۰/۹۸
	<۶۰۰	۱۸۱۷۵۶۹	۳۶۱	۰/۰۳	-۰/۲۳	-۰/۲۷	۰/۰۰۲	۰/۰۲	۰/۱۵	۱/۷۹

ادامهٔ جدول ۱.

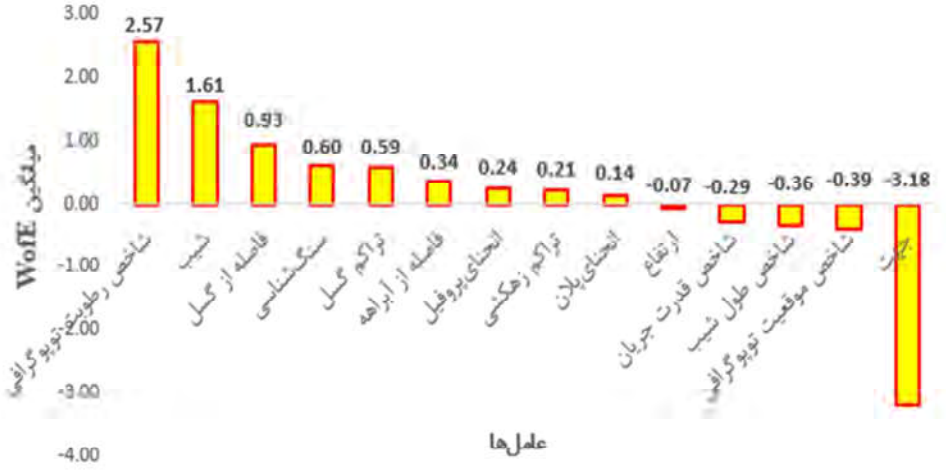
عامل	کلاس	تعداد پیکسل‌ها	تعداد چشمه‌ها	W+	W-	C	(W+) S2	(W-) S2	(C) S	(C) C/S
LS	۰-۲۰	۶۶۶۹۲۴	۱۰۸	-۰/۱۶	۰/۰۶	-۰/۲۳	۰/۰۰۹	۰/۰۰۳	۰/۱۱	-۲/۰۹
	۲۰-۴۰	۲۶۹۶۷۲	۴۴	-۰/۱۶	۰/۰۲	-۰/۱۸	۰/۰۲	۰/۰۰۲	۰/۱۵	-۱/۱۳
	۴۰-۶۰	۲۱۲۷۵۳	۲۷	-۰/۴۱	۰/۰۳	-۰/۴۴	۰/۰۳	۰/۰۰۲	۰/۱۹	-۲/۲۴
	>۶۰	۹۸۶۷۰۳	۲۳۰	۰/۱۹	۰/۲۰	۰/۴۰۳	۰/۰۰۴	۰/۰۰۵	۰/۰۹	۴/۰۴
TPI	>-۱	۹۷۱۴۵۱	۳۶۳	۰/۶۶	-۱/۵۵	۲/۲۲	۰/۰۰۲	۰/۰۲	۰/۱۵	۱۴/۲۰
	-۱ - -۰.۵	۵۸۸۴۵	۶	-۰/۶۳	۰/۰۱	-۰/۶۴	۰/۱۶	۰/۰۰۲	۰/۴۱	-۱/۵۶
	-۰.۵ — ۰.۵	۱۱۸۹۵۴	۱۱	-۰/۷۲	۰/۰۳	-۰/۷۶	۰/۰۹	۰/۰۰۲	۰/۳۰	-۲/۴۸
	۰.۵ — ۱	۵۷۷۷۸	۰	۰	۰/۰۲	۰	۰	۰/۰۰۲	۰	۰
	<۱	۹۲۹۰۲۴	۲۹	-۱/۸۱	۰/۵۱	-۲/۳۳	۰/۰۳	۰/۰۰۲	۰/۱۹	-۱۲/۱۰
سنگ شناسی	(A)آبگنمبریت	۳۹۸۹۳	۵	-۰/۴۲	۰/۰۰۷	-۰/۴۳	۰/۲۰	۰/۰۰۲	۰/۴۵	-۰/۹۵
	آندزیت و (B)آذرآواری	۱۲۰۸۴۷۲	۲۲۰	-۰/۰۵	۰/۰۹	-۰/۱۴	۰/۰۰۴	۰/۰۰۵	۰/۰۹	-۱/۴۵
	آهک و (C)دولومیت	۸۶۹۸۰	۲۸	۰/۵۱	-۰/۰۲	۰/۵۴۸	۰/۰۳۵	۰/۰۰۲	۰/۱۹	۲/۷۹
	آهک و مارن (D)	۳۴۹۰۲	۰	۰	۰/۰۱	۰	۰	۰/۰۰۲	۰	۰
	آهک (E)	۷۸۸۰۰	۲۵	۰/۵۰	-۰/۰۲	۰/۵۳	۰/۰۴	۰/۰۰۲	۰/۲۰	۲/۵۶
	توف و آندزیت (F)	۲۸۱۶۱	۷	۰/۲۶	-۰/۰۰۳	۰/۲۶	۰/۱۴	۰/۰۰۲	۰/۳۸	۰/۶۹
	دولومیت (G)	۷۳۰۵۲	۵	-۱/۰۲	۰/۰۲	-۱/۵	۰/۲۰	۰/۰۰۲	۰/۴۴	-۲/۳۳
	سنگ‌های آتشفشانی (H)	۱۹۰۱۷	۲۰	۱/۷۰	-۰/۰۴	۱/۷۴	۰/۰۵	۰/۰۰۲	۰/۲۲	۷/۶۰
	شیل (I)	۲۹۳۶۸۶	۴۲	-۰/۲۹	۰/۰۴	-۰/۳۳	۰/۰۲	۰/۰۰۲	۰/۱۶	-۲/۰۵
	کنگلومرا، مارن و ماسه‌سنگ (J)	۱۷۹۶۴	۱	-۱/۲۳	۰/۰۰۶	-۱/۲۴	۱	۰/۰۰۲	۱	-۱/۲۴
	گرانیت (K)	۱۵۰۵۶	۰	۰	۰/۰۰۶	۰	۰	۰/۰۰۲	۰	۰
	ماسه‌سنگ و شیل (L)	۲۴۰۰۶۹	۵۶	۰/۱۹	-۰/۰۲	۰/۲۲	۰/۰۱	۰/۰۰۲	۰/۱۴	۱/۵۴
فاصله از گسل (m)	۰-۵۰	۱۲۹۸۰۴	۳۵	۰/۳۴	-۰/۰۲	۰/۳۶	۰/۰۲	۰/۰۰۲	۰/۱۷	۲/۰۸
	۵۰-۱۰۰	۱۲۳۵۴۷	۴۲	۰/۵۷	-۰/۰۴	۰/۶۲	۰/۰۲	۰/۰۰۲	۰/۱۶	۳/۸۲
	۱۰۰-۱۵۰	۹۹۲۶۷	۲۸	۰/۳۸	-۰/۰۲	۰/۴۱	۰/۰۳	۰/۰۰۲	۰/۱۹	۲/۰۹
	۱۵۰-۲۰۰	۱۱۰۲۳۱	۳۵	۰/۵۰	-۰/۰۳	۰/۵۴	۰/۰۲	۰/۰۰۲	۰/۱۷	۳/۰۶
	۲۰۰-۲۵۰	۸۷۷۶۶	۲۰	۰/۱۷	-۰/۰۰۸	۰/۱۸	۰/۰۵	۰/۰۰۲	۰/۲۲	۰/۷۹
	۲۵۰-۳۰۰	۹۳۲۷۴	۱۷	-۰/۰۴	۰/۰۰۲	-۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۰۲	۰/۲۴	-۰/۲۰
	۳۰۰-۳۵۰	۸۰۶۳۴	۲۶	۰/۵۲	-۰/۰۲	۰/۵۴	۰/۰۳	۰/۰۰۲	۰/۲۰	۲/۷۰
	۳۵۰-۴۰۰	۷۴۸۰۲	۱۷	۰/۱۷	-۰/۰۰۶	۰/۱۷	۰/۰۵	۰/۰۰۲	۰/۲۴	۰/۷۱
	>۴۰۰	۱۳۳۶۷۲۷	۱۸۹	-۰/۳۰	۰/۳۶	-۰/۶۶	۰/۰۰۵	۰/۰۰۴	۰/۰۹	-۶/۷۱

ادامهٔ جدول ۱.

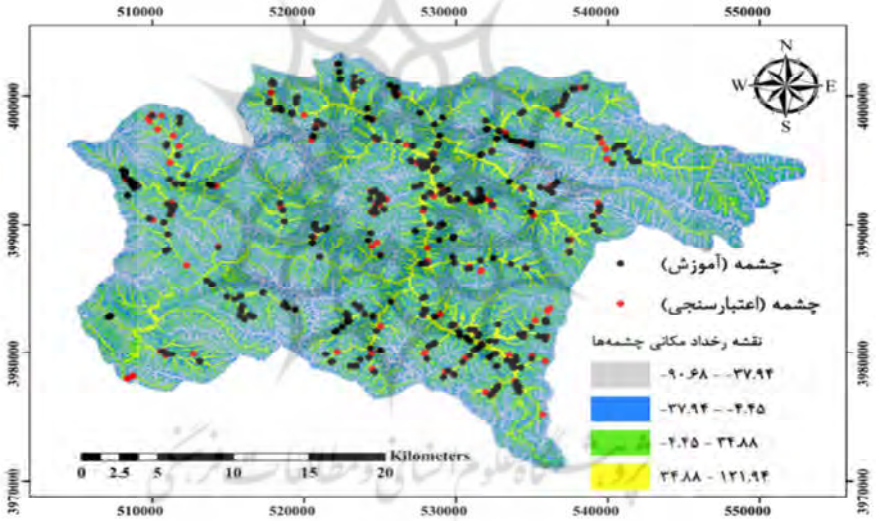
عامل	کلاس	تعداد پیکسل‌ها	تعداد چشمه‌ها	W+	W-	C	(W+) S2	(W-) S2	(C) S	(C) C/S
تراکم گسل	۰-۰/۲۲۰۸	۷۳۶۷۰۷	۴۷	-۱/۰۹	۰/۳۰	-۱/۴	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۱۵	-۹/۰۲
(km/km^2)	-۰/۶۰۴۵ ۰/۲۲۰۸	۵۹۱۱۰۰	۱۴۴	۰/۲۴	-۰/۱۱	۰/۳۵	۰/۰۰۶	۰/۰۰۳	۰/۱۰	۳/۳۸
	-۱/۰۳۴۶ ۰/۶۰۴۵	۴۹۲۵۲۸	۱۲۳	۰/۲۶	-۰/۰۹	۰/۳۶	۰/۰۰۸	۰/۰۰۳	۰/۱۰	۳/۳۵
	-۱/۵۹۲۶ ۱/۰۳۴۶	۲۴۶۷۶۸	۸۲	۰/۵۵	-۰/۱۰	۰/۶۵	۰/۰۱	۰/۰۰۳	۰/۱۲	۵/۲۸
	-۲/۹۶۴۴ ۱/۵۹۲۶	۳۸۹۴۹	۱۳	-۰/۰۱	۰/۰۰۰۵	-۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۰۰۲	۰/۲۸	-۰/۰۵
فاصله از آبراهه‌ها	۰-۵۰	۲۱۴۶۳۹	۲۸۸	۱/۹۴	-۱/۱۱	۳/۰۶	۰/۰۰۳	۰/۰۰۸	۰/۱۰	۲۸/۲۴
(m)	۵۰-۱۰۰	۲۰۱۹۱۲	۴۵	۰/۱۵	-۰/۰۱	۰/۱۶	۰/۰۲	۰/۰۰۲	۰/۱۵	۱/۰۷
	۱۰۰-۱۵۰	۱۵۹۰۹۴	۳۲	۰/۰۴	-۰/۰۰۴	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۰۲	۰/۱۸	۰/۲۸
	۱۵۰-۲۰۰	۱۷۹۶۵۷	۱۵	-۰/۸۳	۰/۰۵	-۰/۸۸	۰/۰۶	۰/۰۰۲	۰/۲۶	-۳/۳۴
	۲۰۰-۲۵۰	۱۴۸۷۳۹	۱۰	-۱/۰۴	۰/۰۴	-۱/۰۹	۰/۱۰	۰/۰۰۲	۰/۳۲	-۳/۴۱
	۲۵۰-۳۰۰	۱۶۰۹۲۲	۱۰	-۱/۱۲	۰/۰۵	-۱/۱۷	۰/۱۰	۰/۰۰۲	۰/۳۲	-۳/۶۸
	۳۰۰-۳۵۰	۱۴۳۴۸۶	۲	-۲/۶۲	۰/۰۶	-۲/۶۸	۰/۵۰	۰/۰۰۲	۰/۷۰	-۳/۷۸
	۳۵۰-۴۰۰	۱۳۴۴۹۷	۲	-۲/۵۵	۰/۰۶	-۲/۶۱	۰/۵۰	۰/۰۰۲	۰/۷۰	-۳/۶۹
	۴۰۰<	۷۹۳۱۰۶	۵	-۳/۴۱	۰/۴۵	-۳/۸۶	۰/۲۰	۰/۰۰۲	۰/۴۴	-۸/۵۹
تراکم زهکشی (km/km^2)	۰-۰/۵۱۵۱	۳۶۸۶۷۳	۱۲	-۱/۷۷	۰/۱۵	-۱/۹۳	۰/۰۸	۰/۰۰۲	۰/۲۹	-۶/۵۹
	-۰/۸۲۴۱ ۰/۵۱۵۱	۵۳۶۰۴۹	۶۱	-۰/۵۲	۰/۱۲	۰/۶۴	۰/۰۱	۰/۰۰۲	۰/۱۳	-۴/۶۶
	-۱/۱۱۶۰ ۰/۸۲۴۱	۵۲۳۷۸۱	۹۷	-۰/۰۳	۰/۰۱	-۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۰۳	۰/۱۱	-۰/۳۷
	-۱/۴۰۷۹ ۱/۱۱۶۰	۴۸۱۱۴۸	۱۷۶	۰/۶۴	-۰/۳۰	۰/۹۵	۰/۰۰۵	۰/۰۰۴	۰/۰۹	۹/۵۶
	-۲/۱۸۹۲ ۱/۴۰۷۹	۲۲۶۴۰۱	۶۳	۰/۳۷	-۰/۰۵	۰/۴۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۱۳	۳/۱۳

میانگین وزن هریک از معیارهای مؤثر در مدل‌سازی مکانی رخداد چشمه‌های آب زیرزمینی، برای منطقهٔ مورد مطالعه، در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، عامل‌های جهت شیب و شاخص رطوبت توپوگرافی، به‌ترتیب، کمترین و بیشترین تأثیر را در رخداد چشمه‌های آب زیرزمینی دارند.

نقشهٔ رخداد مکانی چشمه‌های آب زیرزمینی، که با استفاده از روش WofE تهیه شده است، به طبقه‌های دارای پتانسیل رخداد پایین، متوسط، بالا و خیلی بالا طبقه‌بندی شد (شکل ۳) (Ozdemir, 2011; Pourtaghi and Pourghasemi, 2014). بیشتر مساحت منطقهٔ مورد مطالعه مربوط به طبقه متوسط است که ۳۵/۵۸٪ از کل منطقه را پوشش داده است. از سوی دیگر، منطقه های مربوط به طبقه کم، بالا و بسیار بالا، به‌ترتیب، ۲۸/۳۵٪ و ۱۲/۲۶٪ و ۹/۹۴٪ از منطقهٔ مورد مطالعه را به خود اختصاص داده‌اند (جدول ۲).



شکل ۳. میانگین WofE هریک از معیارهای مؤثر در مدل‌سازی مکانی رخداد چشمه‌های آب زیرزمینی



شکل۳. نقشهٔ رخداد مکانی چشمه‌های آب زیرزمینی با استفاده از مدل وزنی شاهد (WofE)

جدول۲. کلاس‌های رخداد چشمه‌های آب زیرزمینی در منطقهٔ مورد مطالعه

پتانسیل رخداد چشمه	کلاس	مساحت (km^2)	مساحت (٪)
کم	-۹۰/۶۸ - -۳۷/۹۴	۲۴۱/۳۵	۲۸/۳۵
متوسط	-۳۷/۹۴ - -۴/۴۵	۳۰۲/۸۶	۳۵/۵۸
زیاد	-۴/۴۵ – ۳۴/۸۸	۲۲۲/۳۱	۲۶/۱۲
بسیار زیاد	۳۴/۸۸ – ۱۲۱/۹۴	۸۴/۶۱	۹/۹۴

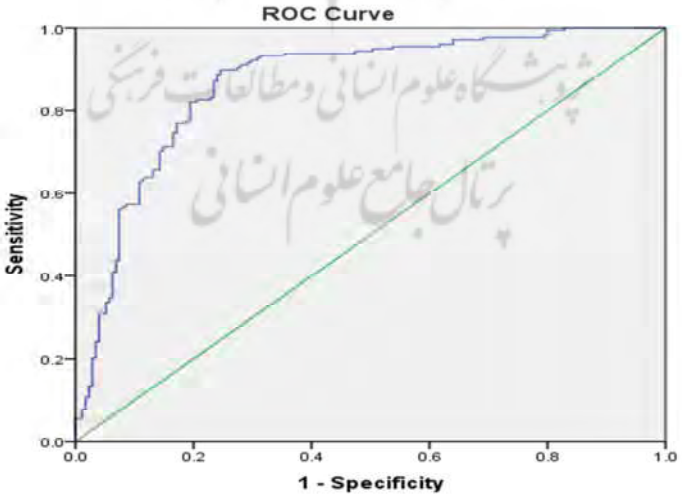
دقت مدل با روش ROC بررسی شد. در روش ROC، سطح زیر منحنی (AUC)[1] در محدودهٔ ۰/۵ تا ۱، به‌منظور بررسی دقت مدل، استفاده می‌شود (Moore, 1991). در ارزیابی به‌روش ROC، هرچه سطح زیر منحنی بیشتر باشد، دقت مدل بیشتر است. مدل ایده‌آل مقدار AUC نزدیک به ۱ را نشان می‌دهد؛ درحالی که مقدار نزدیک به ۰/۵ بی‌دقتی در مدل را می‌رساند (Fawcett, 2006). ارتباط کیفی بین AUC و دقت پیش‌بینی را می‌توان بدین‌صورت طبقه‌بندی کرد: ۱-۰/۹ بسیار عالی، ۰/۹-۰/۸ بسیار خوب، ۰/۸-۰/۷ خوب، ۰/۷-۰/۶ متوسط و ۰/۶-۰/۵ ضعیف (Pourghasemi et al., 2013). نتایج پیش‌بینی منحنی‌ها در شکل ۴ و جدول ۳ نشان آمده است. با توجه به شکل و جدول یادشده، مشخص می‌شود مدل‌سازی مکانی رخداد چشمه‌های آب زیرزمینی، با استفاده از مدل وزنی شاهد، AUC = ۰/۸۶۶ است که صحت پیش‌بینی آن با ۸۶/۶٪ تناسب دارد. بنابراین، می‌بینیم مدل‌سازی مکانی رخداد چشمه‌های آب زیرزمینی در منطقهٔ مورد مطالعه، با استفاده مدل وزنی شاهد، دقت بسیار خوبی دارد.

جدول ۳. نتایج محاسبهٔ منحنی ROC

مساحت زیر منحنی	فواصل اطمینان مجانبی ٪۹۵	
	حد پایینی	حد بالایی
۰/۸۶۶	۰/۸۲۷	**۰/۹۰۵**

۳- بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج جدول ۱، تحلیل WofE ارتباط بین رخداد چشمه‌ها و ارتفاع نشان می‌دهد طبقه ارتفاعی ۲۴۰۰-۲۱۰۰ متر (WofE =۱۰/۰۱) است که این نکته احتمال بسیار بالای رخداد چشمه‌ها در این طبقه ارتفاعی را می‌رساند. با افزایش ارتفاع، از این طبقه ارتفاعی به‌بعد، می‌بینیم که مقدار WofE کاهش می‌یابد و در طبقه‌های ارتفاعی ۳۷۰۰-۳۴۰۰ و ۴۳۶۸-۳۷۰۰، مقدار WofE به صفر می‌رسد. در طبقات بالایی ارتفاع، به‌دلیل تغذیهٔ محدودتر و کم‌شدن سطح گیرش آب، اصولاً چشمه‌های کمتری مشاهده می‌شود. ارزیابی درجهٔ شیب نشان می‌دهد که طبقه ۱۵-۵ درجه بالاترین مقدار (WofE =۱۲/۲۴) را دارد و



شکل ۴. منحنی ROC به‌منظور ارزیابی مدل وزنی شاهد

1. Area Under the Curve

پایین‌ترین مقدار (WofE= -۷/۳۴) به طبقه ۴۵-۳۵ درجه متعلق است. در شیب‌های بسیار زیاد، به‌دلیل افزایش بیش از حد سرعت جریان سطحی آب، نفوذپذیری بسیار کم است. در جهت صاف، کمترین مقدار چشمه‌ها را داریم ولی، به‌دلیل مساحت کمتر آن در مقایسه با دیگر طبقه‌ها، بیشترین مقدار WofE در این طبقه (WofE=۰/۶) قرار دارد. درمورد پلان انحنا، نتایج نشان می‌دهد شکل مقعر، به‌دلیل نفوذ بیشتر آب حاصل از نزولات جوی، بالاترین مقدار (WofE =۷) را دارد و شکل محدب، به‌دلیل نفوذ کمتر آب حاصل از نزولات جوی، دارای پایین‌ترین مقدار (WofE = -۷/۴۱) است. درمورد پروفیل انحنا، طبقه <۰/۰۰۰۱ با مقدار WofE=۷/۳۴، بیشترین مقدار را دارد. درمورد شاخص رطوبت توپوگرافی، در طبقه <۱۲ (WofE=۱۹/۹۳) و همچنین شاخص قدرت جریان، طبقه <۶۰۰ (WofE=۰/۷۹)، به‌دلیل رطوبت بیشتر، دارای بیشترین مقدار WofE هستند. درمورد طول شیب، بسیاری از چشمه ها در طبقه < ۶۰ (WofE=۴/۰۴) رخ داده است. شاخص موقعیت توپوگرافی بالاترین مقدار (WofE=۱۴/۲۰) در طبقه <۱- را دارد. این نشان می‌دهد، در مناطق دره‌ای، احتمال رخداد چشمه‌ها بیشتر است. در سنگ‌شناسی، بالاترین مقدار WofE = ۷/۶۰ متعلق به گروه H (سنگ‌های آتشفشانی) است. ارتباط رخداد چشمه‌ها و فاصله تا گسل‌ها نشان می‌دهد فراوان‌ترین چشمه ها در طبقه ۱۰۰-۵۰ متر، با مقدار WofE = ۳/۸۲، جای می‌گیرند. با توجه به تراکم گسل، نتایج نشان داد که طبقه ۱/۵۹۲۶-۱/۰۳۴۶ بالاترین مقدار WofE = ۵/۲۸ را دارد. درمورد رابطهٔ بین رخداد چشمه ها و فاصله تا آبراهه ها، برای طبقه ۵۰-۰ متر، WofE = ۲۸/۲۴ است. این نکته بیان می‌کند احتمال رخداد چشمه‌ها در این طبقه بیشتر است. با افزایش فاصله از آبراهه‌ها، احتمال رخداد چشمه‌ها کمتر می‌شود. تراکم زهکشی km/km^2 ۱/۴۰۷۹-۱/۱۱۶۰ بیشترین مقدار (WofE =۹/۵۶) را داراست. این طبقه بیشترین رابطه را با رخداد چشمه‌ها دارد. می‌توان نتیجه گرفت که طبقه ۵۰-۰ متر در عامل فاصله از رودخانه، طبقه <۱۲ در عامل شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) و طبقه <۱- در عامل شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)، به‌ترتیب، دارای بیشترین رابطه با رخداد مکانی چشمه‌های آب زیرزمینی‌اند. همچنین، در عامل شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)، طبقه ۱<، در عامل تراکم گسل، طبقه ۰/۲۲۰۸-۰ و در عامل فاصله از رودخانه، ۴۰۰ متر<، به‌ترتیب، کمترین اهمیت را در مدل‌سازی مکانی رخداد چشمه‌های آب زیرزمینی دارند. نتایج این تحقیق نشان داد دقت مدل وزنی شاهد (WofE) بسیار بالاست که این نکته با نتایج مطالعات ازدمیر (۲۰۱۱) و ال‌آبادی (۲۰۱۵) هم‌خوانی دارد.

با توجه به اینکه پیش‌بینی منابع آب زیرزمینی منطقه‌ها، از لحاظ پراکنش مکانی، مشکل است و به منابع اطلاعاتی متفاوتی نیاز دارد؛ مدل‌سازی مکانی رخداد چشمه‌های آب زیرزمینی را می‌توان، با استفاده از عوامل گوناگون مکانی، پیش‌بینی کرد. این تحقیق نشان داد که استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و تکنیک‌های سنجش از دور (RS)، به‌همراه نمایه‌های ژئومرفومتری، برای پیش‌بینی منابع آب زیرزمینی با کمترین اطلاعات، امکان‌پذیر است. درنهایت، با توجه به این یافته‌ها، مشخص شد که دقت روش وزنی شاهد (WofE) در مدل‌سازی مکانی رخداد چشمه‌ها بسیار زیاد است و می‌توان از این روش، به‌صورت کاربردی و با دقت بالا، در مطالعات چشمه‌های آب زیرزمینی بهره برد.

نظر به اینکه وجود منابع آب زیرزمینی، به‌ویژه چشمه‌های مناطق کارستی و آهکی سخت، در دوره‌های خشکسالی، از مطمئن‌ترین منابع برای تأمین آب شمرده می‌شود؛ با بهره‌گیری از نمایه‌های ژئومرفومتری می‌توان مناطق و سازندهای زمین‌شناسی مختلف را در زمینهٔ تأمین منابع آب، اولویت‌بندی کرد. همچنین، مدل‌سازی مکانی رخداد چشمه‌های آب زیرزمینی می‌تواند به برنامه‌ریزان، در افزایش پتانسیل سرزمین، یاری برساند. با توجه به اهمیت آب زیرزمینی که در این پژوهش نیز به آن اشاره شد، پیشنهاد می‌شود محققان و پژوهشگران، در زمینهٔ مدل‌سازی مکانی رخداد این منابع باارزش، از مدل‌های داده‌محور

مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان بهره بگیرند. همچنین شایان ذکر است که، برای دستیابی به دقت بیشتر، باید مناطق مؤثر و پایانه‌های شارژ آب چشمه‌ها، به‌همراه درجهٔ آسیب‌پذیری آنها، بیشتر بررسی شوند.

۴- سپاسگزاری

مراتب سپاس و قدردانی خود را از شرکت مدیریت منابع آب ایران، به‌دلیل تأمین داده‌های لازم برای این تحقیق، ابراز می‌کنیم.

۵- منابع

Al-Abadi, A.M., 2015, **Groundwater Potential Mapping at Northeastern Wasit and Missan Governorates, Iraq Using a Data-Driven Weights of Evidence Technique in Framework of GIS**, Environ Earth Sci., 74, PP. 1109–1124.

Arthur, J., Wood, H.A., Baker, A.E., Cichon, J.R. & Raines, G.L., 2007, **Development and Implementation of a Bayesian Aquifer Vulnerability Assessment in Florida**, Nat. Res., 16, PP. 93–107.

Banks, D. & Robins, N., 2002, **An Introduction to Groundwater in Crystalline Bedrock**, Norges geologiske undersøkelse, Trondheim, P. 64.

Bonham-Carter, G.F., 1994, **Geographic Information Systems for Geoscientists: Modeling with GIS**, Pergamon, Ottawa.

Fawcett, T., 2006, **An Introduction to ROC Analysis**, Pattern Recogn. Lett. 27(8). PP. 861–874.

Lee, S., Kim, Y.S. & Oh, H.J., 2012, **Application of a Weights-of-Evidence Method and GIS to Regional Groundwater Productivity Potential Mapping**, Environ. Manag., 96(1), PP. 91–105.

Moore, I.D. & Burch, G.J., 1986, **Sediment Transport Capacity of Sheet and Rill Flow: Application of Unit Stream Power Theory**, Water Res., 22(8), PP. 1350–1360.

Moore, I.D., Grayson, R.B. & Ladson, A.R,. 1991, **Digital Terrain Modeling: A Review of Hydrological, Geomorphological and Biological Applications**, Hydrol. Process, 5, PP. 3–30.

Ozdemir, A., 2011, **GIS-Based Groundwater Spring Potential Mapping in the Sultan Mountains (Konya, Turkey) Using Frequency Ratio, Weights of Evidence and Logistic Regression Methods and their Comparison**, J. Hydrol., 411(3–4), PP. 290–308.

Pourghasemi, H.R, Moradi, H.R. & Fatemi Aghda, S.M., 2013, **GIS-Based Landslide Susceptibility Mapping with Probabilistic Likelihood Ratio and Spatial Multi-Criteria Evaluation Models (North of Tehran, Iran)**, Arab J. Geosci., doi: 10.1007/s12517-012-0825.

Pourtaghi, Z.S & Pourghasemi, H.R., 2014, **GIS-Based Groundwater Spring Potential Assessment and Mapping in the Birjand Township, Southern Khorasan Province, Iran**, Hydrogeol. J., doi: 10.1007/s10040-013-1089-6.

Schmidt, J., Evans, I.S. & Brinknann, J., 2003, **Comparison of Polynominal Models of for Land Surface Cuvature Calculation**, International Jorunal of Geographical Information Science, V. 178, P. 797–814.

Shuin, Y., Hotta, N., Suzuki, M. & Ogwa, K., 2012, **Estimating the Effects of Heavy Rainfall Conditions on Shallow Landslide Using a Distributed Landslide Conceptual Model**, Physics and Chemistry of Earth, 49, PP. 44–55.

Singh, A.K. & Prakash, S.R., 2003, **An Integrated Approach of Remote Sensing, Geophysics and GIS to Evaluation of Groundwater Potentiality of Ojhala Sub-Watershed, Mirjapur District, U.P., India**, http://www.gisdevelopment.net, Accessed on: 25 Aug. 2007.

Wilson, J.P. & Gallant, J.C. (Eds.), 2000, **Terrain Analysis: Principles and Applications**, Wiley, New York, PP. 51–85.

Weiss, A.D., 2001, **Topographic Position and Landforms Analysis**, Poster Presentation, ESRI Users Conference, San Diego, CA.

سنجش از دور
و
GIS ایران

سنجش از دور و GIS ایران سال دهم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۷
Iranian Remote Sensing & GIS Vol.10, No. 2, Summer 2018

61-74

Application Indexes Geomorphometry Groundwater Springs on Spatial Modeling Occurrence at Central Alborz Probable with the Approach Weights-of-Evidence

Emami, H.[1], Jafary, M.[1], Nazari Samani, A.[*2], Malekian, A.[2]

1. M.Sc. Student of Watershed Management Engineering, Dep, of Arid & Mountainous Region Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran
2. Assosiate Prof., Dep. of Arid & Mountainous Region Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran

Abstract

Spatial modeling of the groundwater springs occurrences allowed the identification of new springs for drinking, agriculture and industry. The objective of this study was spatial modeling of the groundwater springs occurrences using the geomorphometry indexes affecting the groundwater springs occurrences and Weights-of-evidence control model and evaluating this model in Central Alborz. Generally, 584 springs were identified in the study area that 409 (70%) of them were utilized for training and 175 (30%) springs for validation of Weights-of-evidence control model. 14 important geomorphometry indexes includin elevation, degree of slope, aspect, plan curvature, profile curvature, topographic wetnes index, stream power index, slope length, topography position index, lithology, distance of faults, fault density, distance from rivers and drainage density were chosen in the form of Weights-of-evidence control model for spatial modeling of the groundwater springs occurrences. According to Weights-of-evidence control model, aspect and topographic wetness index had the lowest and the highest impact on the ground water springs occurrences respectively. The map resulted from spatial modeling of groundwater springs occurrences were classified into 4 classes including the low, middle, high, and very high potential occurrences. The model was validated using ROC method, which the area under the curve was 0.866. This means the weights-of-evidence control model was accurate enough for estimating the spatial modeling of groundwater springs occurrences in Central Alborz.

Keywords: Spatial modeling, Groundwater springs, Weights-of-evidence, ROC, Geomorphometry, Central Alborz.

Correspondence Address: Dep. of Arid & Mountainous Region Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj.
Email: aknazari@ut.ac.ir