

شناسایی پتانسیل منابع آب زیرزمینی در سازندهای سخت به عنوان راهکاری در جهت مدیریت بحران آب (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کلات نادری)

علیرضا اولیائی - دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبخیزداری دانشگاه تهران، تهران، ایران
ناصر پرویان^۱ - کارشناس ارشد ارزیابی و آمایش سرزمین، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
عذرا خسروی - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۸/۲۶ تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۳/۲۳

چکیده

بحران آب در بسیاری از کشورهای جهان و از جمله کشورهای واقع در کمربند خشک کره زمین مانند ایران، روز به روز ابعاد پیچیده‌تری به خود گرفته است. با شدت گرفتن مشکل بحران آب بسیاری از پژوهشگران حوزه منابع آب در پی ارائه راهکارهایی جهت مقابله با این بحران هستند. منابع آب در سازندهای سخت، از مهم‌ترین منابع آب شیرین به حساب می‌آیند و با توجه به گسترش زیاد این سازندها در کشور، به طرق مختلف سعی بر شناخت آن‌ها شده است. این پژوهش سعی دارد با بررسی پراکنش چشمه‌های موجود در منطقه به عنوان یکی از نشانگرهای منابع آبی به بررسی منابع آب زیرزمینی در سازندهای سخت بپردازد. بدین منظور جهت تولید نقشه پیش‌بینی منابع آب زیرزمینی در حوضه آبخیز کلات نادری، از مدل‌سازی با نرم‌افزار مکسنت بر پایه رگرسیون لجستیک، تکنیک‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی (ARCGIS) و سنجش‌ازدور (RS) استفاده گردید. نتایج نمودارهای آنالیز حساسیت، نوع رابطه عوامل محیطی و مرفومتريک را با رخنمون چشمه‌ها نشان دادند. همچنین نتایج حاصل از روش متعامد اعتبارسازی منحنی جک نایف، نشان داد که مهم‌ترین عامل در مدل‌سازی پیش‌بینی منابع آب زیرزمینی، پارامتر بارندگی و سنگ‌شناسی بوده است. در نهایت نقشه پیش‌بینی منابع آب زیرزمینی به چهار طبقه کیفی پتانسیل خیلی کم، کم، متوسط و زیاد تقسیم گردید که به ترتیب ۳۳/۰۳، ۱۴/۰۷، ۴/۰۱ و ۴۸/۹ درصد از حوضه آبخیز کلات را در بر می‌گیرد. نتایج در نهایت دقت مدل با استفاده از منحنی ROC، ۹۲/۳ درصد تخمین زده شد که نشان‌دهنده دقت بالای مدل در تحلیل فراوانی چشمه‌ها در منطقه مورد مطالعه است. با توجه به مطالعات اخیر و تطابق خوب این مدل با داده‌های موجود، می‌تواند روشی مطلوب در شناسایی منابع آب زیرزمینی به‌ویژه در سازندهای سخت باشد و استفاده از آن در جهت برنامه‌ریزی‌های محیطی بسیار مفید و کارا باشد.

کلیدواژه: کلات نادری، مکسنت، رگرسیون لجستیک، منابع آب، سازندهای سخت.

۱. مقدمه

بی‌شک امروزه حفظ و صیانت از منابع آب و بهره‌برداری بهینه و اقتصادی و عادلانه از آب یک مسئله جهانی است و به همین جهت در قرن ۲۱ از آب به‌عنوان یک چالش فراگیر بشری یاد می‌شود. افزایش بی‌رویه جمعیت در کشور، محدودیت منابع آب‌های سطحی و بهره‌برداری بیش‌ازاندازه از آب‌های زیرزمینی باعث وارد آمدن خسارات جبران‌ناپذیری به منابع طبیعی کشور در سال‌های گذشته شده است (رامشت و عامری، ۱۳۹۲). در ایران چشمه‌های متعدد کوچک و بزرگ وجود دارد که اغلب آن‌ها در نواحی کوهستانی و مرتفع ظاهر می‌شود و آب تخلیه‌شده از آن‌ها اکثراً از کیفیت خوبی برخوردار است و به لحاظ نقشی که در تأمین آب شرب و کشاورزی بسیاری از شهرهای کشورمان دارند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند (محمئی، ۱۳۸۷). به همین دلیل مطالعه و شناخت این چشمه‌ها نقش مهمی در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری بهینه از منابع آب زیرزمینی دارد. روش‌های مرسوم که برای آماده‌سازی نقشه مناطق پتانسیل آب‌های زیرزمینی استفاده می‌شود، که به‌طور عمده بر اساس مرفولوژی سطح زمین انجام می‌شود (گرینباوم^۱، ۲۰۱۱). به‌طور کلی شکستگی‌ها و تقاطع آن‌ها در سازندهای سخت، نقش مؤثری در حرکت آب زیرزمینی دارند (سوبا راثو، ۲۰۰۶) و محل ذخیره آب زیرزمینی را نشان می‌دهد (داس^۲، ۱۹۹۰؛ فتر^۳، ۱۹۹۹). همچنین حرکت آب زیرزمینی، به‌خصوص در آبخوان‌هایی در سازندهای سخت درز و شکاف دار توسط بسیاری از عوامل از جمله تیوگرافی، سنگ‌شناسی، تراکم شکستگی‌ها، تغذیه آب زیرزمینی، کاربری اراضی، شیب، الگوی زهکشی، شرایط آب و هوایی و روابط متقابل بین آن‌ها کنترل می‌شود (گرینباوم، ۱۹۹۲؛ اوه^۴ و همکاران، ۲۰۱۱). عوامل تراکم گسل، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی، پوشش سطح، بارندگی، انحنا سطح، ارتفاع، زمین‌شناسی، جهات جغرافیایی و شیب بر وقوع چشمه تأثیرگذار است (ازدمیر^۵، ۲۰۱۱). مطالعات بسیاری در مورد آب‌های زیرزمینی با استفاده از ARCGIS و سنجنش‌ازدور صورت گرفته است (گرینباوم، ۱۹۹۲؛ چوداری^۶ و همکاران، ۲۰۰۹؛ ساها و همکاران^۷، ۲۰۱۰؛ آدیات^۸ و همکاران، ۲۰۰۹). استفاده از سنجنش‌ازدور^۸ (RS) و سیستم اطلاعات جغرافیایی^۹ (ARCGIS) نیز یکی دیگر از روش‌های مدیریتی ارزان و مطمئن در ارزیابی منابع آب زیرزمینی است (ژا^{۱۰} و همکاران، ۲۰۰۷). الگوریتم حداکثر آنتروپی نوعی رویه مدل‌سازی وابسته به نقاط صرفاً حضور است که در مقایسه با

1 Greenbaum

2 Das

3 Fetter

4 Oh

5 Ozdemir

6 Chowdhury

7 Adiat

8 Remote Sensing

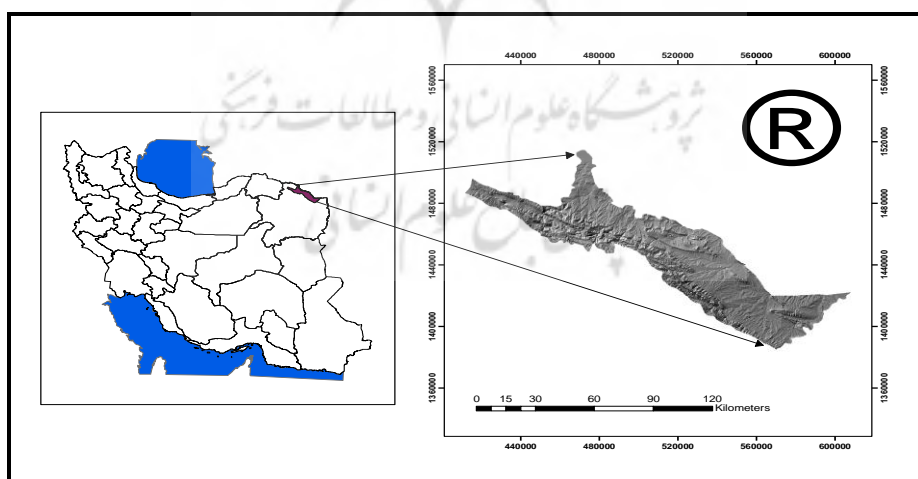
9 Geographic Information System

10 Jha

سایر روش‌های مدل‌سازی دارای عملکرد بهتری در پیش‌بینی حضور گونه‌ها می‌باشد. همچنین مدل‌سازی بر اساس این رویکرد و با بهره‌گیری از نرم‌افزار MAXENT دارای مزایای قابل‌اعتنایی است. این روش تنها نیازمند نقاط حضور گونه‌ها می‌باشد، می‌توان هم متغیرهای وابسته پیوسته و هم کلاسه‌بندی شده را در مدل‌سازی مورد توجه قرار داد. همچنین تعیین اینکه کدام یک از متغیرهای محیطی، مهم‌ترین عوامل تشریح‌کننده نحوه توزیع گونه می‌باشند، از مهم‌ترین نقاط قوت این روش می‌باشد (فیلیپ^۱ و همکاران، ۲۰۰۶؛ الیت^۲ و همکاران، ۲۰۱۱؛ خلاصی و همکاران، ۱۳۹۴). در این پژوهش سعی بر آن شده است که با یک مطالعه جامع و با شناسایی و انتخاب حداکثر عامل‌های مؤثر بر رخنمون چشمه‌ها در سازندهای سخت، اقدام به شبیه‌سازی پتانسیل پراکنش چشمه‌ها با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی، نرم‌افزار مکسنت بر پایه رگرسیون لجستیک و سنجش‌ازدور در حوزه آبخیز کلات نادی شود.

۲. منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز کلات به لحاظ تقسیمات سیاسی در شمال شرق کشور و در استان خراسان رضوی بین طول جغرافیایی "۵۸°۳۱'۶۳" تا "۶۰°۳۵'۷۹" شرقی و عرض جغرافیایی "۳۷°۰۹'۵۳" تا "۳۶°۲۵'۳۲" شمالی قرار گرفته است. به لحاظ موقعیت زمین‌شناسی این حوضه در صفحه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بجنورد و شیروان قرار گرفته است و غالب مساحت آن در زون کپه‌داغ قرار می‌گیرد. چینه‌شناسی منطقه مورد مطالعه از دوره اردویسین مربوط به دوران پالئوزوئیک تا رسوبات دوره کواترنر را شامل می‌شود. مساحت این حوضه آبخیز ۵۸۶۵ کیلومتر مربع می‌باشد که بالاترین و پایین‌ترین ارتفاع این حوضه به ترتیب ۲۳۶ متر و ۳۰۶۹ متر از سطح دریا می‌باشد. موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است.



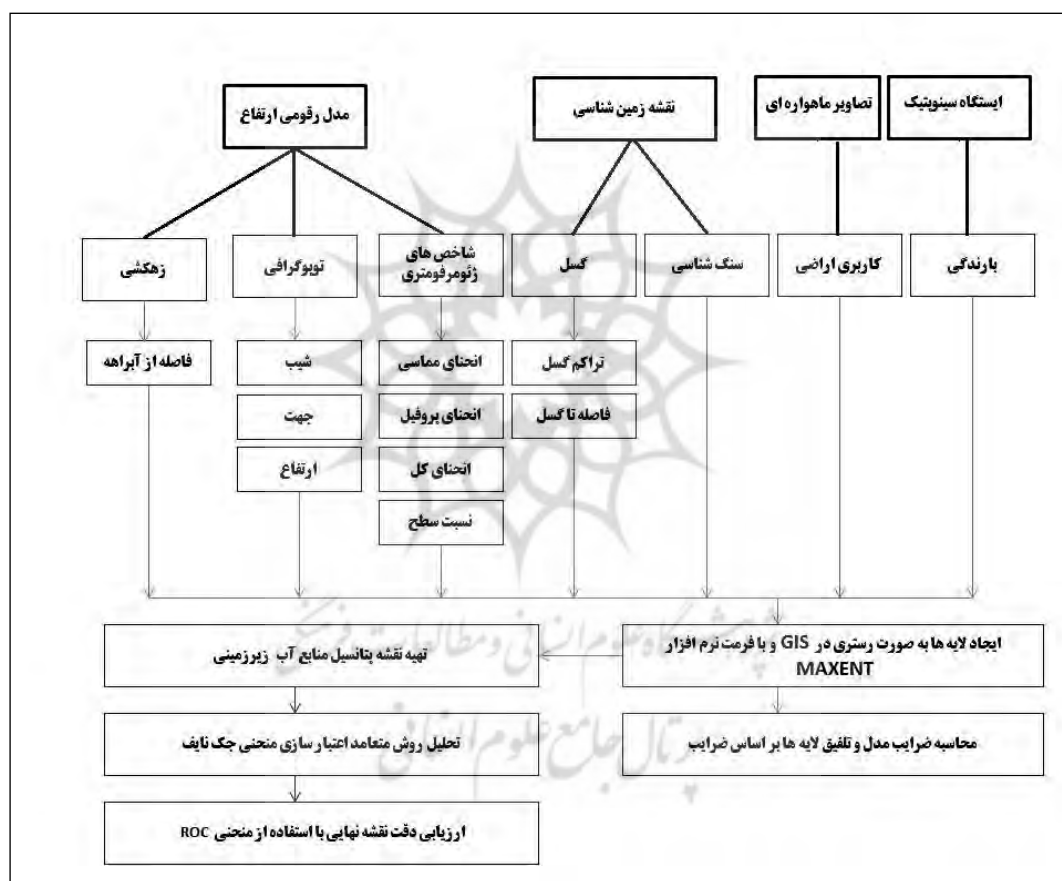
شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

1 Phillips

2 Elith

۳. مواد و روش‌ها

روش تحقیق در این پژوهش به صورت پیمایشی و تحلیل است بدین منظور ابتدا با هدف تهیه نقشه فراوانی چشمه‌ها از ۱۳ عامل، تراکم گسل، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، کاربری اراضی، انحنای پروفیل، انحنای مماسی، انحنای کلی، نسبت سطح، بارندگی، ارتفاع، زمین‌شناسی، جهت جغرافیایی و شیب به دلیل تأثیر عمده در نفوذ و تغذیه و استحصال آب استفاده گردید. سپس آمار مربوط به موقعیت چشمه‌های منطقه (۸۹۵ چشمه) از سازمان مدیریت و منابع آب ایران تهیه گردید. در گام بعدی لایه‌های مربوط به هر یک از عوامل ۱۳ گانه به صورت زیر استخراج و فراهم شد.

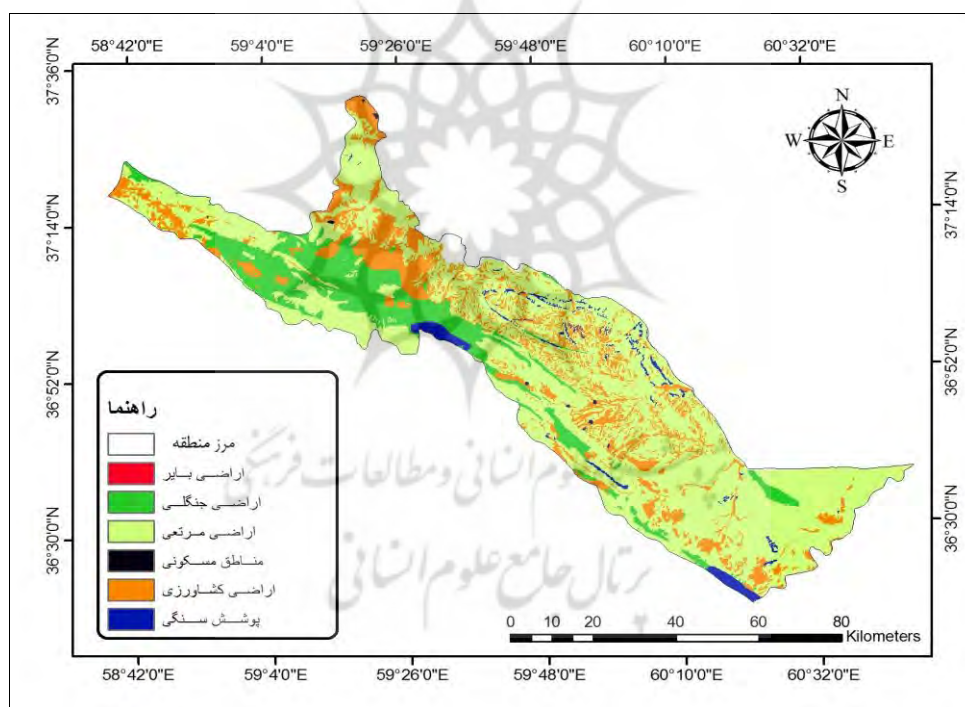


شکل ۲. روند مراحل پژوهش

کاربری اراضی

به منظور استخراج لایه کاربری اراضی، ابتدا تصاویر ماهواره‌ای ماهواره Landsat مربوطه به منطقه مورد مطالعه تهیه گردید و سپس در محیط نرم‌افزار ENVI4.7، تصحیحات اولیه شامل تصحیح رادیومتريک و تصحیح هندسی بر

روی این تصویر اعمال و سپس جهت افزایش کنتراست و وضوح داده‌های اولیه ماهواره‌ای و تشخیص بهتر پدیده‌های مختلف زمینی، تصاویر رنگی کاذب (FCC) تهیه شد. سپس به منظور پردازش و طبقه‌بندی به محیط نرم‌افزار IDRISI Selva منتقل گردید. در نهایت ۵ طبقه کاربری اراضی (شامل: ۱- اراضی جنگلی، ۲- اراضی مرتعی و کشاورزی، ۳- اراضی بایر، ۴- منابع آبی، ۵- مناطق مسکونی) برای منطقه در نظر گرفته شد و سپس بر اساس شناخت و بازدید از منطقه مورد نظر نمونه‌های تعلیمی برای آن‌ها در سطح منطقه تهیه گردید. از آنجا که یکی از مهم‌ترین و رایج‌ترین طبقه‌بندی‌ها در اکثر تحقیقات و مطالعات الگوریتم حداکثر احتمالات می‌باشد (جانسن، ۲۰۱۲). از الگوریتم مذکور در طبقه‌بندی کاربری اراضی به روش نظارت شده استفاده گردید و سپس شاخص کاپا و میزان صحت برای طبقه‌بندی مورد نظر محاسبه گردید که نتایج حاصل از این بررسی در جدول (۲) ارائه شده است. لازم به ذکر است که طبق نظر اندرسون (۲۰۰۱) دقت قابل قبول برای طبقه‌بندی پوشش و کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، ۸۵ درصد می‌باشد.



شکل ۳. نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه

جدول ۱. ویژگی‌های تصاویر مورد استفاده در پژوهش

تاریخ	توصیف داده‌ها	داده‌های مورد استفاده
۲۰۱۲/۶	سنجنده TM ماهواره Landsat	تصاویر ماهواره‌ای مربوط به سال ۲۰۱۲

جدول ۲. نتایج حاصل از بررسی صحت طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای

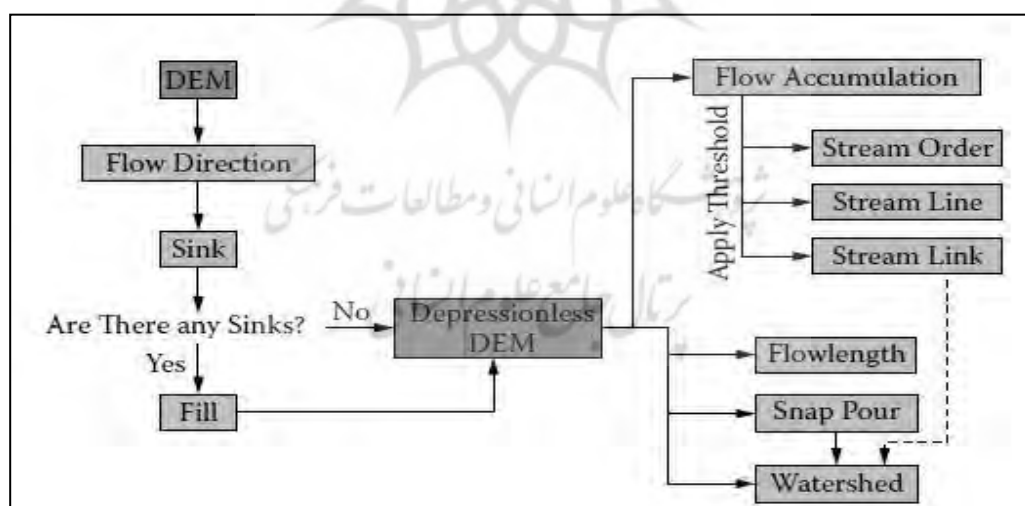
شاخص کاپا	صحت کلی	نقشه‌های کاربری زمین
۰/۹۷۰۷	۰,۹۸۱	کاربری اراضی ۲۰۱۲

گسل

عوامل تکتونیکی نظیر درزه‌ها و گسل‌ها به عنوان نقاط ضعف واحدهای زمین‌شناسی به شمار رفته و به عنوان راهی برای عبور آسان آب و محلی برای تجمع آب به عنوان مخازن آب زیرزمینی می‌باشد (صابری و همکاران، ۱۳۹۱). این عامل به طور قابل ملاحظه‌ای بر روی هیدروژئولوژی سازندهای سخت تأثیر می‌گذارد. این نقشه از طریق رقوم‌سازی گسل‌ها، تاق‌دیس‌ها و ناودیس‌ها در نقشه‌های زمین‌شناسی، استخراج شد و در محیط Arc Map اصلاح گردید. در نهایت نقشه‌های تراکم گسل و فاصله از گسل به دست آمد.

نقشه آبراهه‌ها

جهت استخراج آبراهه‌های منطقه مورد مطالعه ابتدا مدل رقوم‌ی ارتفاع (DEM) منطقه با دقت ۳۰ متر از سایت تهیه و سپس با استفاده از اکستنشن ArcHydro در محیط ArcGIS 10.3 آبراهه‌های منطقه مورد مطالعه استخراج گردیدند که به دلیل محدودیت در ارائه حجم مطالب، مراحل تهیه آن به صورت تیتروار و در قالب نمودار ارائه گردیده است (شکل ۴).



شکل ۳. نمودار مربوط به عملیات استخراج آبراهه‌ها در محیط نرم‌افزار ArcGIS (حسین‌زاده ۱۳۹۶: ۴۳۵ به نقل از لین، ۲۰۰۹: ۸۹).

عوامل مورفومتری

پارامترهای مورفومتری بر مبنای استخراج اطلاعات از مدل‌های رقومی ارتفاعی بر پایه معادلات ریاضی و اشکال هندسی می‌باشد. مورفومتری دانش کمی کردن عوارض سطح زمین بوده و یک رویکرد نوین در زمینه تحلیل‌های کارتوگرافیک عوارض سطح زمین بر پایه محاسبات کامپیوتری و تغییرات ارتفاعی عوارض سطح زمین می‌باشد. انحنای پروفیل، انحنای سطح، انحنای کل، نسبت سطح، جهت، ارتفاع و شیب از مدل رقومی ارتفاع (DEM) با دقت ۳۰ متر، در محیط نرم‌افزار ARCGIS تهیه شدند.

سنگ‌شناسی

تغییرات سنگ‌شناسی و زمین‌شناسی ساختاری، اغلب منجر به تفاوت در قدرت نفوذپذیری خاک و سنگ می‌گردد و وقوع چشمه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به منظور تهیه نقشه سنگ‌شناسی و پراکنش سازندها، از نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور استفاده گردید و واحدهای زمین‌شناسی دو نقشه یکسان سازی شده و واحدهایی با سنگ‌شناسی مشابه با همدیگر تلفیق گردیدند. جدول شماره ۳ نوع سازند، سنگ‌شناسی و سن سازندهای منطقه را نشان می‌دهد.

جدول ۳. سنگ‌شناسی و سن سازندهای موجود در منطقه

نوع سازند	سن	سنگ‌شناسی	اسم سازند	مساحت	درصد مساحت
Q1	کواترنر	لس‌ها	لس	۴۲۷/۲۳	۷/۲۸
Q	کواترنر	تراس‌ها و پادگانه‌های آبرفتی، سیلت، ماسه و گراول	پادگانه آبرفتی	۵۷۴/۹۲	۹/۸۱
Kh	پالئوژن	شیل سبز	خانگیران	۲۲۲/۰۸	۳/۷۸
Ab	کرتاسه	مارن، شیل آبی خاکستری	آبدراز	۲۸۸/۷۱	۴/۹۲
Ad	کرتاسه	سنگ آهک و گچ سفید خاکستری	آب تلخ	۶۸۳/۵۷	۱۱/۶۵
At	کرتاسه	ماسه سنگ گلوکونی سبز زیتونی	اتمیر	۵۹۸/۹۲	۱۰/۲۱
Kl	کرتاسه	سنگ آهک ماسه‌ای دانه متوسط و چند لایه ماسه سنگ و شیل	کلات	۲۸۲/۸۴	۴/۸۲
Nz	کرتاسه	ماسه سنگ، شیل سبز و خاکستری	نیزار	۱۴۲/۰۴	۲/۴۴
Sj	کرتاسه	مارن سبز و ماسه سنگ قرمز	شوریجه	۵۸۹/۹۳	۱۰/۵۹
Sn	کرتاسه	شیل	سنگانه	۴۴۹/۶۴	۷/۶۶
Tr	کرتاسه	آهک اربیتولین دار	تیرگان	۶۴۸/۶۷	۱۱/۵۹
Sr	کرتاسه پایینی	مارن سبز، آهک مارنی و آهک اربیتولین دار	سرچشمه	۲۷۴/۱۴	۴/۶۷
Mz	ژوراسیک	آهک خاکستری روشن تا سفید و آهک اربیتولین دار	مزدوران	۶۸۲/۳۳	۱۱/۶۳

بارش

جهت تهیه نقشه بارش سالانه، ابتدا داده‌های بارش و ارتفاع ایستگاه‌های مورد بررسی در نرم‌افزار MINITAB فراخوانی گردید، سپس داده‌های مورد نظر با توجه به ضرایب رگرسیون خطی میان یابی گردید. در ضمن از آمار و اطلاعات بعضی از ایستگاه‌های خارج از محدوده مطالعاتی به جهت داشتن آمار بلند مدت و نزدیکی به منطقه مورد مطالعه، به عنوان نقاط کمکی و نشانه برای پیدا کردن مناطق هم باران استفاده شده است. برای بررسی همگنی داده‌ها از آزمون (Run Test) استفاده گردید و از همگنی داده‌ها اطمینان حاصل شد. به منظور افزایش دقت عملیات و به کار بردن آمار واقعی، همچنین به دلیل اینکه تقریباً همه مدل‌های بازسازی داده‌ها با خطا همراه هستند، از آمارسازی خودداری شد.

استفاده از مدل رگرسیون لجستیک در نرم‌افزار مکسنت

از میان روش‌های مدل‌سازی معمول، مدل‌های رگرسیونی همچون رگرسیون لجستیک و یا GLM در تعیین مهم‌ترین فاکتورهای زیستی و فیزیکی مؤثر بر توزیع جغرافیایی و نقشه‌سازی پراکنش گونه‌ها، مورد توجه بسیاری از محققان بوده‌اند (گوسان^۱ و زیمرمان^۲، ۲۰۰۰). همچنین مدل‌های رگرسیونی وابسته به داده‌های حضور و عدم حضور می‌باشند، در حالیکه دستیابی به داده‌های عدم حضور علاوه بر پرهزینه بودن، همواره با عدم قطعیت ناشی از عدم حضور گونه مواجه می‌باشند. الگوریتم حداکثر آنتروپی نوعی رویه مبتنی بر ماشین یادگیری است که به ارزیابی احتمال توزیع مقادیر حداکثر آنتروپی^۳ متأثر از محدودیت‌های^۴ ناشی از متغیرهای محیطی تأثیرگذار بر نحوه توزیع مکانی گونه، می‌پردازد (فیلیس و همکاران، ۲۰۰۶؛ الیت و همکاران، ۲۰۱۱). الگوریتم کار نرم‌افزار بر اساس معده زیر است:

$$P(x) = \exp(c1 * f1(x) + c2 * f2(x) + c3 * f3(x) \dots) / Z$$

در اینجا C_1, C_2, \dots اعداد ثابت هستند

F_1, F_2, \dots از ویژگی‌های متغیرها هستند

و Z مقیاس گذاری ثابت است که برای تمام سلول‌های شبکه که مقادیر P (احتمال وقوع) تا ۱ را در بر می‌گیرد. بدین منظور مدل‌سازی با ۵۰ تکرار و انتخاب ۸۹۵ نقطه تصادفی به عنوان نقاط زمینه انجام گرفت. همچنین از ۷۵ درصد نقاط حضور به عنوان داده‌های تعلیمی^۵ و ۲۵ درصد برای آزمون^۶ مدل استفاده شد (همچنین نقشه‌های

-
- 1 Guisan
 - 2 Zimmermann
 - 3 Entropy
 - 4 Constraints
 - 5 Training Data
 - 6 Test data

سنگ شناسی، کاربری اراضی و جهت بر اساس تأثیر هر طبقه در نفوذ آب و یا رخنمون چشمه‌ها، نمره‌گذاری گردید. ولی سایر نقشه به صورت رستر پیوسته وارد مدل گردید).

همچنین برای شناسایی میزان اهمیت هر یک از متغیرها بر نحوه توزیع گونه از تحلیل جک نایف^۱ استفاده شد. در این روش پس از ساخت مدل کامل با دخالت تمامی متغیرها، مدل‌سازی به تعداد متغیرها تکرار شده و هربار یکی از متغیرها از روند مدل‌سازی حذف گشت. بدین ترتیب امکان ارزیابی میزان تأثیر هر یک از متغیرها در پیش‌بینی نواحی مطلوب فراهم آمد (فیلیس و همکاران، ۲۰۰۶، الیت و همکاران، ۲۰۱۱).

به منظور ارزیابی مدل از منحنی ROC^۲ استفاده شد (اگان^۳، ۱۹۷۵). از آنالیز منحنی - ROC برای تعیین دقت و کارایی مدل استفاده می‌شود. این منحنی از کارآمدترین روش‌ها در ارائه خصوصیات تشخیصی، شناسایی احتمالات و پیش‌بینی سیستم‌هاست که میزان دقت مدل را به صورت کمی برآورد می‌کند (شوین^۴ و همکاران، ۲۰۱۲). سطح زیر منحنی ROC (AUC^۵)، بیانگر مقدار پیش‌بینی سیستم از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخداد (وقوع چشمه) و عدم وقوع رخداد (عدم وقوع چشمه) آن است؛ بنابراین مساحت زیر منحنی به عنوان معیار دقت و صحت مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد (متیو^۶ و همکاران، ۲۰۰۷). در روش ROC، سطح زیر منحنی در محدوده ۰/۵ تا ۱ به منظور بررسی دقت مدل استفاده می‌شود (ناندی^۷ و شاکور^۸، ۲۰۰۹).

۴. بحث و نتایج

در این تحقیق به منظور بیان اهمیت هر یک از پارامترهای محیطی، از روش متعامد اعتبار‌سازی جک نایف استفاده شد. بدین صورت که در هر مرحله آموزش یکی از نمونه‌ها برای تست مدل از ورودی‌ها خارج شده و بقیه به عنوان آموزش بکار گرفته شدند و این عمل به ازای تمامی ورودی‌ها تکرار شد. تخمین‌زننده جک نایف یک نسخه تعادل یافته اعتبار‌سازی متعامد (Cross-Validation) می‌باشد که سری‌های نمونه‌ها دقیقاً هم‌سایز می‌باشند. روش آموزش اعتبار‌سازی متعامد جک نایف نسبت به دیگر روش‌های متعامد دقیقترین ارزیابی را ایجاد کرده است. همانطور که مشاهده می‌شود، میزان تأثیر هر یک از متغیرها در پیش‌بینی نواحی مطلوب ترسیم شده است. همچنین این منحنی بیان می‌دارد، میزان بارش، بیشترین تأثیر را در وقوع چشمه‌ها دارد (شکل ۵).

1. Jackknife
- 2 Receiver Operating Characteristics
- 3 Egan
- 4 Shuin
- 5 Area Under Curve
- 6 Mathew
- 7 Nandi
- 8 Shakur

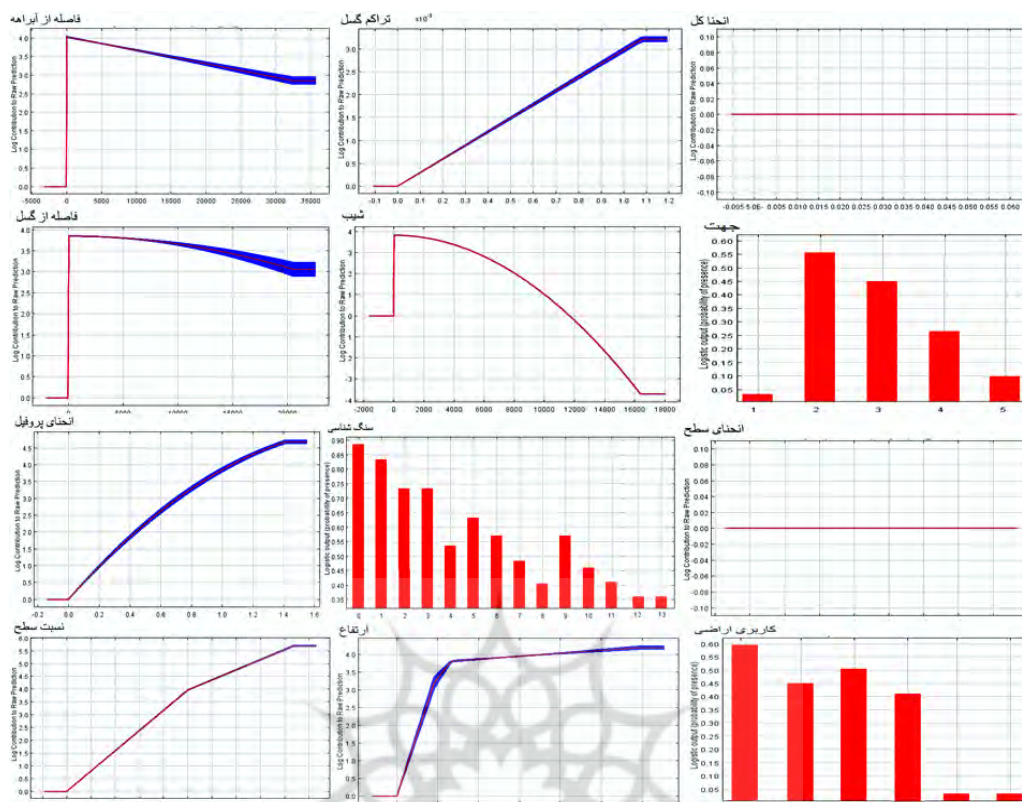


شکل ۵. نمودار جک نایف و تأثیر پارامتر بارندگی بر وجود چشمه‌های آب زیرزمینی

جدول ۴. پارامترهای وارد شده در مدل و تأثیر اهمیت هر یک از پارامترها

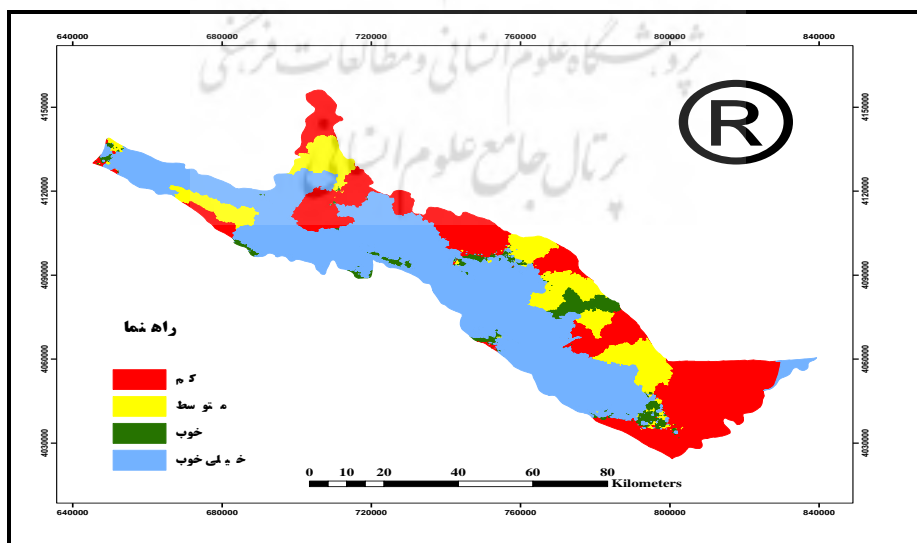
متغیرها	درصد مشارکت	اهمیت جایجایی
بارندگی	۵۸/۳	۷۲/۴
سنگ شناسی	۱۷/۲	۳/۳
نسبت سطح	۷/۵	۱/۹
کاربری اراضی	۵/۹	۲
انحنای پروفیل	۳/۱	۷/۹
ارتفاع	۲/۱	۲/۳
جهت	۲	۱/۵
فاصله از آبراهه	۱/۶	۴
شیب	۰/۷	۲/۲
فاصله از گسل	۰/۶	۱/۱
تراکم گسل	۰/۵	۰/۵
انحنای کل	۰	۰
انحنای سطح	۰	۰

همچنین نمودارهای مربوط به آنالیز حساسیت پارامترهای وابسته، نوع رابطه متغیرهای محیطی و مرفومتريک را در رخنمون چشمه‌ها نشان می‌دهند. محورهای این منحنی‌ها بر پایه لگاریتمی تهیه شده است (شکل ۶).



شکل ۶. نمودار آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر بر وجود چشمه‌های آب زیرزمینی

در نهایت شکل (۷) نقشه نهایی پراکنش محل‌های بالقوه توزیع چشمه‌ها و در نتیجه محل منابع آب در سازندهای منطقه را نشان می‌دهد.



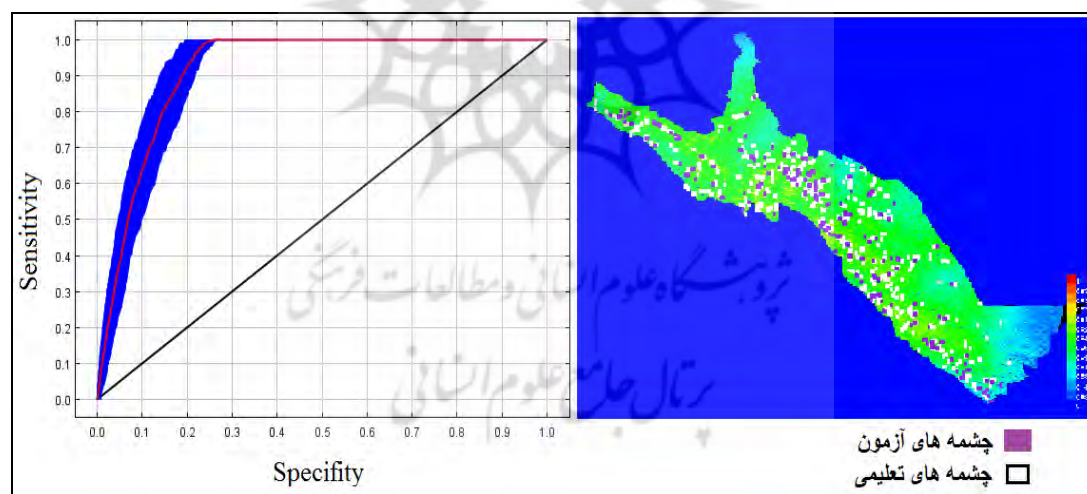
شکل ۷. نقشه پیش‌بینی پتانسیل منابع آب زیرزمینی در سازندهای سخت

جدول شماره (۵) مساحت و نسبت مساحت مربوط به هر طبقه را بیان می‌کند. همانطور که جدول نشان می‌دهد طبقه پتانسیل خیلی خوب منابع آبی بیشترین سهم را در حوزه آبخیز کلات به خود اختصاص داده است.

جدول ۵. اطلاعات مربوط به طبقات نقشه پیش‌بینی پتانسیل منابع آب زیرزمینی

درصد مساحت	مساحت (کیلومتر مربع)	طبقه‌های نقشه پتانسیل منابع آب
۳۳/۰۳	۱۹۳۱/۳۰	خیلی کم
۱۴/۰۷	۸۲۷/۵۵	کم
۴/۰۱	۲۳۴/۸۰	متوسط
۴۸/۹	۲۸۶۹/۱۵	زیاد
۱۰۰	۵۸۶۵	کل

علاوه بر این، توانایی پیش‌بینی مدل توسط سطح زیر منحنی ROC مشخص شد. در ارزیابی به روش ROC هر-چه سطح زیر منحنی بیشتر باشد دقت مدل بیشتر است. سطح زیر نمودار برابر $0/923$ به دست آمد که معادل دقت $92/3$ درصد دقت پیش‌بینی مدل است. شکل (۸) نمودار میانگین ROC را از آنالیز مدل در نرم‌افزار مکسنت، نشان می‌دهد.



شکل ۸. منحنی ROC مربوط به درصد دقت مدل

۵. نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از آنالیز رگرسیون لجستیک در مدل‌سازی مکسنت درباره وجود یا عدم وجود چشمه‌ها و پهنه‌بندی پتانسیل رخنمون چشمه‌ها نشان داد، متغیرهای بارش و سنگ‌شناسی به ترتیب بیشترین تأثیر را در وجود چشمه‌ها

دارند و با افزایش مقدار آن‌ها فراوانی چشمه‌ها افزایش می‌یابد، با توجه به طبقه‌بندی واحدهای سنگ‌شناسی بر اساس نفوذپذیری، این نتایج نشانگر تطابق نسبی چشمه‌ها با نفوذپذیری واحدهای سنگ‌شناسی می‌باشد. نمودارهای سنگ‌شناسی، کاربری اراضی و جهت که نقشه‌های آن‌ها به صورت طبقه‌بندی تهیه و در مدل آورده شده بیانگر این مطلب است که در واحدهای سنگ‌شناسی آبرفتی و سازندهای کربناته به دلیل تخلخل بالاتر این سازندها، چشمه‌های به مراتب بیشتری دیده می‌شود. همچنین در بین کاربری‌های مختلف، کاربری جنگل و در بین جهات جغرافیایی دامنه‌های رو به شمال و غرب، بیشترین تعداد چشمه را داشته است، که دلیل آن توانایی نفوذ بالاتر در اثر پوشش گیاهی بیشتر می‌تواند باشد. همانطور که نمودارهای آنالیز حساسیت نشان می‌دهد، افزایش فاصله از آبراهه و گسل رابطه منفی با وجود چشمه‌ها دارند به صورتیکه با افزایش فاصله از آبراهه‌ها و گسل‌ها تعداد چشمه‌ها کاسته می‌شود، همچنین این نمودارها بیانگر رابطه مثبت پراکنش چشمه‌ها با افزایش ارتفاع تا ۲۸۰۰ متری می‌باشد که این موضوع با نتایج درواری و همکاران (۱۳۹۰) و غلامی و همکاران (۲۰۰۸) مطابقت دارد. نمودار تغییرات شیب، از رابطه معکوس افزایش شیب با چشمه‌های آب زیرزمینی حکایت دارد، به صورتی که هرچقدر شیب افزایش می‌یابد، به دلیل کاهش فرصت برای نفوذ آب، تعداد چشمه‌ها نیز کاهش می‌یابند.

در میان عوامل مرفومتری دو عامل انحنا پروفیل (مشق دوم ارتفاع نسبت به طول) که به معنی تغییر در وضعیت گردادیان شیب در طول یک دامنه است و نسبت سطح دارای ارزش بالایی شدند؛ بنابراین انحنا پروفیل تأثیر زیادی روی سرعت جریان و حالت تععر و تحدب دامنه‌ها دارد و با افزایش آن حالت مقعر شده و سرعت جریان کاهش می‌یابد و سرعت نفوذ بیشتر می‌شود (ویلسون^۱ و گالانت^۲، ۲۰۰۰، اشمیت^۳ و همکاران، ۲۰۰۳)، بنابراین شرایط بروز چشمه‌ها بیشتر می‌شود. همچنین عامل نسبت سطح بیان‌کننده سطح واقعی منطقه است که این پارامتر می‌تواند در مقدار دریافت باران و مقدار نفوذ آب مؤثر باشد و می‌تواند پارامتر مؤثری بر مقدار منابع آب باشد. به‌طوری‌که در مناطقی که مقدار نسبت سطح بیشتر از یک باشد سطح بیشتری برای دریافت باران و در نتیجه نفوذ خواهد بود. نمودار تراکم گسل نشان می‌دهد، با افزایش تراکم گسل‌ها، تعداد چشمه‌های آب زیرزمینی افزایش می‌یابد، بنابراین هرچه مقدار گسل و شکستگی در منطقه بیشتر باشد، تغذیه آبخوان‌ها در آن منطقه بیشتر است و در نتیجه فراوانی چشمه و مقدار آبدی آن‌ها بالاتر خواهد بود که این نتایج با مطالعات کاظمی و همکاران (۲۰۰۹) مطابقت دارد.

همچنین نتایج منحنی ROC نشان می‌دهد، مساحت سطح زیر منحنی ۰/۹۲۳ می‌باشد که نشان‌گر دقت بسیار خوبی برای مدل تهیه شده، است. مدل‌های مربوط به آنالیزهای اکواژیک هنوز به‌طور فراگیر در شناسایی مناطق دارای پتانسیل آب استفاده نشده است، بنابراین با توجه به وجود ارتباط تنگاتنگ بین ژئومرفولوژی و هیدرولوژی،

1 Wilson

2 Gallant

3 Schmidt

می‌توان با استفاده از روش‌های مبتنی بر شاخص‌های ژئومرفولوژی از هزینه‌های زیاد آب‌یابی دوری جست که با نتایج اولیایی (۱۳۹۳) مطابقت دارد. این امر موجب کاهش هزینه و زمان صرف‌شده برای پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی می‌شود. با توجه به مطالعات اخیر و تطابق خوب مدل مکسنت می‌توان بیان داشت که این مدل در مقایسه با سایر مدل‌های مبتنی بر حضور قابلیت اجرایی بهتری دارد که با نتایج خلاصی اهوازی و همکاران (۱۳۹۴) مطابقت دارد. همچنین داده‌های موجود، می‌تواند روشی مطلوب در شناسایی منابع آب زیرزمینی به‌ویژه در سازندهای سخت باشد و استفاده از آن در جهت برنامه‌ریزی‌های محیطی بسیار مفید و کارا باشد.

کتابنامه

- اولیایی، علیرضا؛ ۱۳۹۳. بررسی هیدروژئومرفولوژی و پهنه‌بندی مناطق کارستیک در رابطه با پتانسیل منابع آب (مطالعه موردی حوزه آبخیز بجنورد). پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده منابع طبیعی. دانشگاه تهران.
- حسین‌زاده، سیدرضا؛ ۱۳۹۶. مبانی سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS). در حال ویراستاری. چاپ اول. مشهد: انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد.
- خلاصی اهوازی، لیلا، زارع چاهوکی، محمدعلی، حسینی، سیدزین‌العادین؛ ۱۳۹۴. مدل‌سازی پراکنش جغرافیایی رویشگاه گونه‌های *Artemisia aucheri* و *Artemisia sieberi* بر اساس روش‌های مبتنی بر حضور (MaxEnt و ENFA). مجله تحقیقات منابع طبیعی تجدید شونده. دوره ۶. شماره ۱. صفحه ۵۷-۷۳.
- درواری، زهرا، غلام، ی، وحید، جوکار سرهنگی، عیسی؛ ۱۳۹۰. شبیه‌سازی آبدهی چشمه‌های کارستی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (مطالعه موردی ارتفاعات البرز مرکزی). مجله پژوهش‌های جغرافیایی. شماره ۷۷. صفحه ۵۷-۶۸.
- رامشت، محمد حسین، عرب عامری، علیرضا؛ ۱۳۹۲. پهنه‌بندی حوضه آبخیز بیاضیه به منظور تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی با استفاده از روش AHP و تکنیک ARCGIS. مجله علمی پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی. دوره ۱۷. شماره ۴۵. صفحه ۶۹-۹۶.
- صابری، عظیم، رنگزن، کاظم، مهجوری، رضا، کشاورز، محمدرضا؛ ۱۳۹۱. پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با تلفیق سنجش‌ازدور و ARCGIS به روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در تاق‌دیس کمستان استان خوزستان. مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته. شماره ۶. صفحه ۲۰-۱۱.
- محمدی فتیده، محمد؛ ۱۳۷۸. بررسی آبخوان‌ها و عوامل مؤثر بر پتانسیل‌های منابع آب در شرق استان گیلان مطالعه موردی: دشت‌های آبرفتی املش، رودسر و کلاچای. نشریه علوم کشاورزی ایران. شماره ۱. صفحه ۱۵۵ تا ۱۷۱.
- Adiat, K., Olayanju, G., Omosuyi, G., & Ako, B. (2009). Electromagnetic sounding electrical resistance profile and groundwater in the study of complex-case example of ODA underground city in southwestern Nigeria. *Ozean Journal of Applied Sciences*, 2, 333-359.

- Anderson, J. R., Hardy, E., Roach, J. T., & Witmer, R. E. (2001). *A land use and land cover classification system for use with remote sensor data*. Washington: Geological Survey Professional United States. US Government Printing Office.
- Chowdhury, A., Jha, M. K., Chowdary, V. M., & Mal, B. C. (2009). Integrated remote sensing and GIS- based approach for assessing groundwater potential in West Medinipur district, West Bengal, India. *International Journal of Remote Sensing*, 30(1), 231-250.
- Das, D. (1990). Satellite remote sensing in subsurface water targeting. . In *1990 ACSM-ASPRS Annual Convention, Denver, CO Proceedings of ACSM-ASPRS annual convention 99° 103*.
- Egan, J. P. (1975). *Signal detection theory and {ROC} analysis: Series in cognition and perception*. New York: Academic Press.
- Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E., & Yates, C. J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17(1), 43-57.
- Fetter, C. W. (1999). *Contaminant hydrogeology* (2nd ed.). New Jersey: Prentice Hall.
- Ford, D. C., & Williams, P. W. (1989). *Karst geomorphology and hydrology*. London: Unwin Hyman.
- Ganapuram, S., Kumar, G. V., Krishna, I. M., Kahya, E., & Demirel, M. C. (2009). Mapping of groundwater potential zones in the Musi basin using remote sensing data and GIS. *Advances in Engineering Software*, 40(7), 506-518.
- Gholami, V. A. H. I. D., Azodi, M., & Taghvaye Salimi, E. (2008). Modeling of karst and alluvial springs discharge in the central Alborz highlands and on the Caspian southern coasts. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 6(1), 41-45.
- Greenbaum, D. (1992). Structural influences on the occurrence of groundwater in SE Zimbabwe. *Geological Society, London, Special Publications*, 66(1), 77-85.
- Guisan, A., & Zimmermann, N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135(2), 147-186.
- Jansen, L. J., & Di Gregorio, A. (2002). Parametric land cover and land-use classifications as tools for environmental change detection. *Agriculture, Ecosystems, and Environment*, 91(1), 89-100.
- Jha, M. K., Chowdhury, A., Chowdary, V. M., & Peiffer, S. (2007). Groundwater management and development by integrated remote sensing and geographic information systems: Prospects and constraints. *Water Resources Management*, 21(2), 427-467.
- Kazemi, R., Porhemmat, J., & Kheirkhah, M. (2009). Investigation of lineaments related to ground water occurrence in a karstic area; A case study in Lar catchment, Iran. *Research Journal of Environment Research*, 3(3), 367-375.
- Mathew, J., Jha, V. K., & Rawat, G. S. (2007). Weights of evidence modelling for landslide hazard zonation mapping in part of Bhagirathi valley, Uttarakhand. *Current Science Bangalore*, 92(5), 628-638.
- Nandi, A., & Shakoor, A. (2010). A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses. *Engineering Geology*, 110(1), 11-20.
- Oh, H. J., Kim, Y. S., Choi, J. K., Park, E., & Lee, S. (2011). GIS mapping of regional probabilistic groundwater potential in the area of Pohang City, Korea. *Journal of Hydrology*, 399(3), 158-172.
- Ozdemir, A. (2011). Using a binary logistic regression method and GIS for evaluating and mapping the groundwater spring potential in the Sultan Mountains (Aksehir, Turkey). *Journal of Hydrology*, 405(1), 123-136.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3), 231-259.

- Schmidt, J., Evans, I. S., & Brinkmann, J. (2003). Comparison of polynomial models for land surface curvature calculation. *International Journal of Geographical Information Science*, 17(8), 797-814.
- Shuin, Y., Hotta, N., Suzuki, M., & Ogawa, K. I. (2012). Estimating the effects of heavy rainfall conditions on shallow landslides using a distributed landslide conceptual model. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 49, 44-51.

