

ارزیابی پتانسیل نفوذ با استفاده از مدل AHP، APLIS و اصلاح شده (مطالعه موردی): حوضه آبریز روئین اسفراین

محمد معتمدی راد - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری
لیلا گلی مختاری* - استادیار گروه آب و هواشناسی و ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری
شهرام بهرامی - دانشیار گروه جغرافیا، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی
محمدعلی زنگنه اسدی - دانشیار گروه آب و هواشناسی و ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری

پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۱۸ تأیید نهایی: ۱۳۹۷/۰۶/۲۴

چکیده

نیاز روزافزون به آب به ویژه آب شیرین، اهمیت شناسایی مناطق نفوذ و توسعه کارست که از ذخایر ارزشمند آبهای زیرزمینی می‌باشد، را ضروری می‌نماید. لذا هدف پژوهش حاضر بررسی پتانسیل نفوذ آب زیرزمینی حوضه آبریز روئین اسفراین با استفاده از مدل‌های تحلیل سلسله مراتبی، آپلیس و آپلیس اصلاح شده می‌باشد. در این پژوهش، ابتدا لایه‌های اطلاعاتی شامل: لیتولوژی، تراکم خطواره و گسل، پوشش گیاهی، تراکم شبکه زهکشی، بارش، دما، شیب، جهت شیب، ارتفاع از سطح دریا، لندفرم‌های موثر در تغذیه، نوع خاک و فاکتور تصحیح (Fh) تهیه و مدل‌های AHP، APLIS و Modified-APLIS اجرا گردید. نتایج حاصل از اجرای مدل AHP که در ۵ کلاس طبقه‌بندی شد نشان می‌دهد که مساحت ناحیه با پتانسیل نفوذ کم در سطح حوضه ناچیز و نزدیک به صفر است. پتانسیل نفوذ کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد به ترتیب ۰، ۸/۱، ۱۵/۱، ۴۷/۷ و ۲۹/۱ درصد سطح حوضه را به خود اختصاص داده‌اند و طبقه با پتانسیل نفوذ زیاد بیشترین وسعت حوضه و حدود نیمی از آن را پوشانده است. در روش APLIS نیز مساحت نواحی با درصد نفوذ خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد به ترتیب برابر با ۱۵/۱، ۱۷/۹، ۶۵/۱ و ۱/۹ و در مدل اصلاح شده نیز به ترتیب ۱، ۴۰/۹، ۱۳/۴، ۶۳/۴ و ۱/۵ درصد سطح حوضه را به خود اختصاص داده‌اند. به طور کلی می‌توان گفت که نخست مدل APLIS اصلاح شده با (۰/۸۵) و سپس مدل AHP (۰/۸۲)، توانسته‌اند بالاترین ضریب همبستگی بین تعداد چشمه و مساحت طبقه و بیشترین ضریب شناسایی پتانسیل نفوذ در منطقه را به خود اختصاص دهند با این وجود هر سه مدل وضعیت قابل قبولی را از نظر ارزیابی نفوذ بویژه در طبقه زیاد در سطح حوضه به نمایش می‌گذارند. مناطق با نفوذ بالا در هر سه مدل منطبق بر قسمت‌های مرکزی و شرقی حوضه است که با مقایسه آن با زمین شناسی منطقه عمدتاً بر سازند مزدوران-لار که در آنها خلوص آهک و دولومیت بیشتر است مطابقت دارند. همچنین مناطق با پتانسیل بالای نفوذ بر مناطق با تراکم زهکشی کم، منطبق هستند.

واژگان کلیدی: آب زیرزمینی، AHP، APLIS اصلاح شده، سازند مزدوران-لار، حوضه روئین.

مقدمه

امروزه یکی از مهمترین چالش‌های پیشرو، نابودی یا کاهش منابعی است که در محیط طبیعی کره زمین تحت شرایطی خاص و در بستر زمانی طولانی شکل گرفته است. کشور ایران سرزمینی است خشک با نزولات جوی بسیار کم، به طوری که بارندگی آن کمتر از یک سوم متوسط بارندگی در سطح دنیاست (علیزاده، ۱۳۹۴). منابع آب زیرزمینی مهمترین بخش از آب‌های شیرین قابل استفاده و در دسترس بشر به حساب می‌آید. از این گذشته، با توجه به توزیع نامتعادل زمانی و مکانی آب‌های سطحی و پتانسیل بالای آلودگی این آب‌ها، تقاضا برای آب‌های زیرزمینی جهت مصارف شرب، کشاورزی و صنعتی، رو به افزایش است. لذا می‌توان گفت منابع آب زیرزمینی و تغذیه آب زیرزمینی از اهمیت خاصی برخوردار است و شناسایی مناطق نفوذ و تغذیه آب زیرزمینی یک مولفه کلیدی در مطالعات در مناطق خشک و نیمه خشک است (کندی^۱ و همکاران، ۲۰۰۴).

یکی از مهمترین روش‌های مطالعه تغذیه آب زیرزمینی، بررسی عوامل مؤثر بر این فرایند مانند لیتولوژی، درزه و شکستگی‌ها، شیب، درجه حرارت، مقدار بارش و پوشش گیاهی با استفاده از ابزارهای سنجش از دور با پردازش داده‌های ماهواره‌ای، بررسی نقشه‌های زمین شناسی و توپوگرافی است. سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) به دلیل توانایی مدیریت حجم عظیمی از داده‌ها با منابع متفاوت، در این خصوص بسیار مناسب می‌باشد که علاوه بر امکان مطالعه مناطق وسیع، می‌تواند پارامترهای مختلفی را به صورت همزمان مورد بررسی قرار دهد. (سنر^۲ و همکاران، ۲۰۰۴). با کاربرد سنجش از دور هم می‌توان با مشخص کردن پراکندگی خطواره‌ها، تهیه نقشه‌های پوشش گیاهی، کاربری اراضی و استخراج آنها، تغذیه صورت گرفته را مشخص نمود (مورثی^۳، ۲۰۰۰؛ لبلانک^۴ و همکاران، ۲۰۰۳).

مطالعات بسیاری در نقاط مختلف جهان بر روی تغذیه آب زیرزمینی با استفاده از سنجش از دور و GIS صورت گرفته است که از جمله می‌توان کارهای علمی ذیل را بر شمرد:

میلسکی^۵ و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از روش سنجش از دور، میزان رواناب و تغذیه را در مناطق خشک تخمین زدند. راوات^۶ و همکاران (۲۰۱۲) به منظور تخمین تغذیه آب زیرزمینی از ترکیب داده‌های ماهواره‌ای و بارندگی، تبخیر و تعرق واقعی و مدل SCS-CN استفاده کردند. پاتیل و محیط^۷ (۲۰۱۴) نقشه پتانسیل تغذیه را به روش وزن دهی برای حوضه آبریزی در هندوستان تهیه کردند که کلاس‌های تغذیه در سه دسته نامناسب، متوسط و خیلی خوب واقع شدند. ویکار و نیلاوار^۸ (۲۰۱۴) با استفاده از سنجش از دور و GIS زون‌های پتانسیل آب زیرزمینی را در منطقه Charthana هندوستان ارزیابی کردند. کلیراج^۹ و همکاران (۲۰۱۴) در تمیل نادو هند تکنیک AHP در محیط GIS را جهت شناسایی پتانسیل مناطق تغذیه آب زیرزمینی مورد استفاده قرار دادند و این روش را روش مناسبی معرفی نمودند. مایوریکویو^{۱۰} (۲۰۱۶) در مقاله‌ای تحت عنوان ارزیابی مبتنی بر منطق فازی برای نقشه برداری مناطق نفوذ بالقوه در حوضه‌های کوچک صخره‌ای با استفاده از پارامترهایی نظیر تراکم زهکشی، واحدهای ژئومورفولوژیکی، خاک، پوشش زمین، شیب و جهت شیب نقشه نهایی را تهیه نمود و بر اساس این مدل نتیجه گرفت که ۴۲٪ از حوضه در طبقه نفوذ

1 - Kendy

۲ - Sener

۳ - Murthy

۴ - Leblanc

5 - Milewski

6 - Rawat

7 - Patil and Mohite

8 - Waikar and Nilawar

9 - Kaliraj

10 - Mauricio

بسیار پایین، ۱۶٪ نفوذ متوسط، ۴۱٪ در طبقه نفوذ بالا می‌باشد. فویه^۱ و همکاران (۲۰۱۶) نیز در رودخانه هوالین تایوان به ارزیابی پتانسیل تغذیه آبهای زیرزمینی پرداختند. آنها از رویکرد GIS برای ادغام پنج فاکتور سنگ شناسی، پوشش زمین - کاربری زمین، خطواره، شبکه زهکشی و شیب استفاده نمودند. نتایج نشان داد که حدود ۱,۲ درصد از منطقه مورد مطالعه را مناطق با پتانسیل بالای تغذیه و به ترتیب ۱۱,۶، ۱۱,۷، ۲۹,۹ و ۴۵,۶ درصد را مناطق با پتانسیل خوب، متوسط، کم و خیلی کم به خود اختصاص دادند. منطقه با بیشترین پتانسیل تغذیه در دره هواتونگ واقع شده که قشر سنگی و تراکم زهکشی به جریان سیستم آب زیرزمینی کمک می‌نماید. موکادم^۲ و همکاران (۲۰۱۸) در حوضه شمالی گافسا (مرکزی تونس) به ارزیابی مناطق بالقوه برای تغذیه آبهای زیرزمینی با استفاده از ۴ روش 'Fersi equations', 'Chloride', 'ERAS', 'DGRE', 'DGRE' پرداختند و در نهایت نشان دادند که اعتبار روش DGRE جهت ارزیابی مناطق بالقوه برای تغذیه آبهای زیرزمینی، بیشتر از سایر روشها می‌باشد. در ایران نیز در ارزیابی تغذیه آب زیرزمینی با استفاده از روشهای GIS و دورسنجی صورت گرفته است که به عنوان نمونه می‌توان به کارهای ذیل اشاره کرد:

رامشت و عرب عامری (۱۳۹۲) در مقاله‌ای تحت عنوان پهنه بندی حوضه آبخیز بیاضیه به منظور تغذیه مصنوعی آبهای زیرزمینی با استفاده از روش AHP و تکنیک GIS لایه‌های پتانسیل منطقه مطالعاتی را به سه روش Raster Calculator، Weighed Overlay و Weighted Sum تهیه نمودند. نتایج نشان داد که در بین سه روش فوق الذکر روش Raster Calculator حداکثر پهنه را به طبقه پتانسیل بالا و در مقابل روش Weighed Overlay حداقل پهنه را به طبقه پتانسیل بالا اختصاص داده است. اما روش Weighted Sum حداقل بین دو روش قبلی است و نتایج حاصل از آن از اطمینان بالاتری برخوردار است. در این میان پهنه پتانسیل بالا بیشتر منطبق بر رسوبات آبرفتی درشت دانه و منطبق بر مناطقی می‌باشد که دارای بیشترین میزان تراکم آبراهه می‌باشد و پهنه بدون پتانسیل یکی منطبق بر حداکثر ارتفاعات که دارای کمترین میزان نفوذ و شیب زیاد می‌باشد و دیگری منطبق بر مناطق کم ارتفاع می‌باشد که این مناطق دارای رسوبات تبخیری و گچی بوده و میزان درجه حرارت در آن زیاد می‌باشد. یمانی و علی‌زاده (۱۳۹۳) پتانسیل منابع آب زیرزمینی حوضه آباده- اقلید فارس را با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که بیشترین مساحت حوضه از نظر پتانسیل آب زیرزمینی مربوط به طبقه وضعیت خوب و متوسط می‌باشد. نواحی جنوب و جنوب شرق حوضه بیشترین مناطق با پتانسیل بالا و خوب و نواحی کوهستانی جنوب غرب و شمال غرب و مرکزی و شمالی حوضه بدلیل جنس زمین و نفوذ ناپذیری و نوع ساختمان و توپولوژی، مناطق با بدون و پتانسیل کم را به خود اختصاص دادند. سلیمانی ساردو و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی تعیین مناطق پتانسیل دار تغذیه آب زیر زمینی با استفاده از روش تلفیقی GIS-AHP در شهرستان سمنان با استفاده از لایه های مختلف اطلاعاتی به پهنه‌بندی پتانسیل تغذیه آب زیر زمینی حوضه پرداختند و لایه سنگ شناسی را به عنوان موثرترین فاکتور معرفی نمودند و نشان دادند که استفاده از GIS و AHP جهت تعیین مناطق پتانسیل تغذیه آب زیر زمینی عملکرد خوبی را ارائه می‌نماید. تاج آبادی و زارع (۱۳۹۵) در مطالعه ارزیابی پتانسیل تغذیه آب زیرزمینی در محیط GIS و مقایسه آن با نتایج بیلان هیدروکلیماتولوژی در حوضه آبریز رودخانه کر، نقشه‌های موضوعی پارامترهای هفت گانه تراکم خطواره‌ها، تراکم طولی شبکه آبراهه‌ها، لیتولوژی، زمین‌های کارستی، کاربری اراضی - پوشش زمین، شیب زمین و بارش برای حوضه آبریز رودخانه کر تهیه کردند. سپس با در نظر گرفتن بر هم کنش این پارامترها در تغذیه حوضه، نقشه پهنه‌بندی پتانسیل تغذیه در پنج کلاس تغذیه خیلی بالا تا خیلی پایین با استفاده از وزن نهایی پارامترها تهیه نمودند. در نهایت با مقایسه‌ای که بین برآورد تغذیه با استفاده

1 - FuYeh

2 - Mokadem

3 - Estimating the Recharge in Overexploited Aquifers

4 - Direction Générale des Ressources en Eaux

از روش مورد استفاده در این مقاله با مقدار تغذیه برآوردی با روش بیلان هیدروکلیماتولوژی (تورنت وایت) صورت گرفت، مشخص شد حدود ۱۴ درصد اختلاف بین مقدار تخمینی با هر یک از این روش‌ها وجود دارد. واعظی هیر و تبرمایه (۱۳۹۵) در حوضه آلمانه در جنوب غرب شهرستان میروان به بررسی پتانسیل آب زیرزمینی در سازندهای سخت با بکارگیری روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره AHP و SAW پرداختند. مقایسه نتایج حاصل از دو روش با هم پوشانی موقعیت چشمه‌های موجود در منطقه و بررسی ارتباط بین تعداد چشمه‌ها و موقعیت قرارگیری آن‌ها بر روی مناطقی با آسیب‌پذیری متفاوت نشان می‌دهد که در محدوده مورد مطالعه روش AHP نسبت به SAW نتایج بهتری را نشان می‌دهد. بر اساس این روش بیش از ۵۰ درصد منطقه دارای پتانسیل منابع آبی متوسط به بالایی می‌باشد که بیشتر مناطق غربی و مرکزی محدوده را شامل می‌شود. حیدری آفاکل و همکاران (۱۳۹۶) در ارزیابی پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از روش منطبق فازی در استان خراسان جنوبی از ۱۶ عامل در چهار گروه زمین‌شناسی، هیدرولوژی، جغرافیایی و انسانی بهره‌گیری گرفتند و در مجموع پنج منطقه پتانسیلی بسیار بالا تا خیلی کم شناسایی کردند. در پایان ۴۳ حوضه آبی استان بر اساس نقشه پتانسیل آب زیرزمینی کلاس بندی شدند و با نتایج به دست آمده از چاه‌های اکتشافی تطابق داده شد و نقشه پتانسیل آبی حوضه‌های استان تهیه گردید. بر این اساس در حدود ۱۷٪ از مساحت استان دارای کلاس پتانسیل آبی بالا و بسیار بالایی است که منطبق بر رسوبات دوران چهارم و مناطق دارای تراکم شکستگی بالا است، پهنه پتانسیل خیلی کم نیز منطبق بر ارتفاعات، لیتولوژی متراکم و مناطق بیابانی است. اما آندرو^۱ و همکاران (۲۰۰۸) برای بررسی میزان تغذیه به آبخوان‌های جنوب اسپانیا و به طور کلی آبخوان‌های کربناته مدیترانه‌ای روش جدیدی را ابداع کردند و نام آن را با اقتباس از عوامل موثر در تغذیه APLIS گذاشتند. فارفان^۲ و همکاران (۲۰۰۹) نیز روش APLIS را برای ارزیابی نفوذ به آبخوان‌های کارستی در کوبا به کار گرفتند و نتایج قابل قبولی بدست آوردند. مارین^۳ (۲۰۰۹) روش APLIS را اصلاح نموده و نام آن را آپلیس اصلاح شده گذاشت. اسپینوزا^۴ و همکاران (۲۰۱۵) از دو روش APLIS و APLIS اصلاح شده برای ارزیابی تغذیه به آبخوان‌های کارستی در پرو استفاده کرده‌اند. نتایج نشان داد که میانگین سالانه تغذیه با استفاده از روش APLIS ۴۸ درصد و APLIS اصلاح شده ۲۴ درصد از کل بارندگی را شامل می‌شوند. تغذیه بالا در کانالهایی که دولومیت تخلخل بیشتری دارد رخ می‌دهد. در ایران نیز زارعی و جوادی پیربازاری (۱۳۹۶) در مقاله‌ای تحت عنوان پتانسیل یابی منابع آب در سازندهای کارستی در منطقه جانرود کرمانشاه از مدل APLIS استفاده نمودند که طی آن نقشه نهایی با نقشه‌های چشمه و گسل تطبیق و مقایسه گردید. نتایج نشان داد روش APLIS در منطقه با تغذیه خیلی زیاد دارای ۵ چشمه با دبی ۳۸ مترمکعب بر ثانیه و ۴ خط گسل به طول ۸۸۶۹ متر است و در نهایت می‌توان برای انجام عملیات ژئوفیزیک بهترین منطقه را با کمترین هزینه و زمان پیشنهاد داد. یکی از مهمترین مراحل در استخراج و برداشت آب زیرزمینی، شناسایی مکانهای با پتانسیل بالای نفوذ و در نتیجه مستعد آب زیرزمینی می‌باشد. با توجه به کمبود شدید آب به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک، قابلیت بالای روش‌های APLIS و APLIS اصلاح شده در ارزیابی پتانسیل نفوذ که امکان ایجاد توزیع فضایی میزان تخلیه درون آبخوان‌ها را با توجه به ویژگیهای خاص خود ایجاد می‌کند و مقایسه روشهای مختلف، در این مطالعه سعی به شناسایی و ارزیابی پتانسیل نفوذ آب زیر زمینی با استفاده از مدل APLIS، AHP و APLIS اصلاح شده در حوضه آبریز روئین اسفراین دارد.

موقعیت منطقه مورد مطالعه:

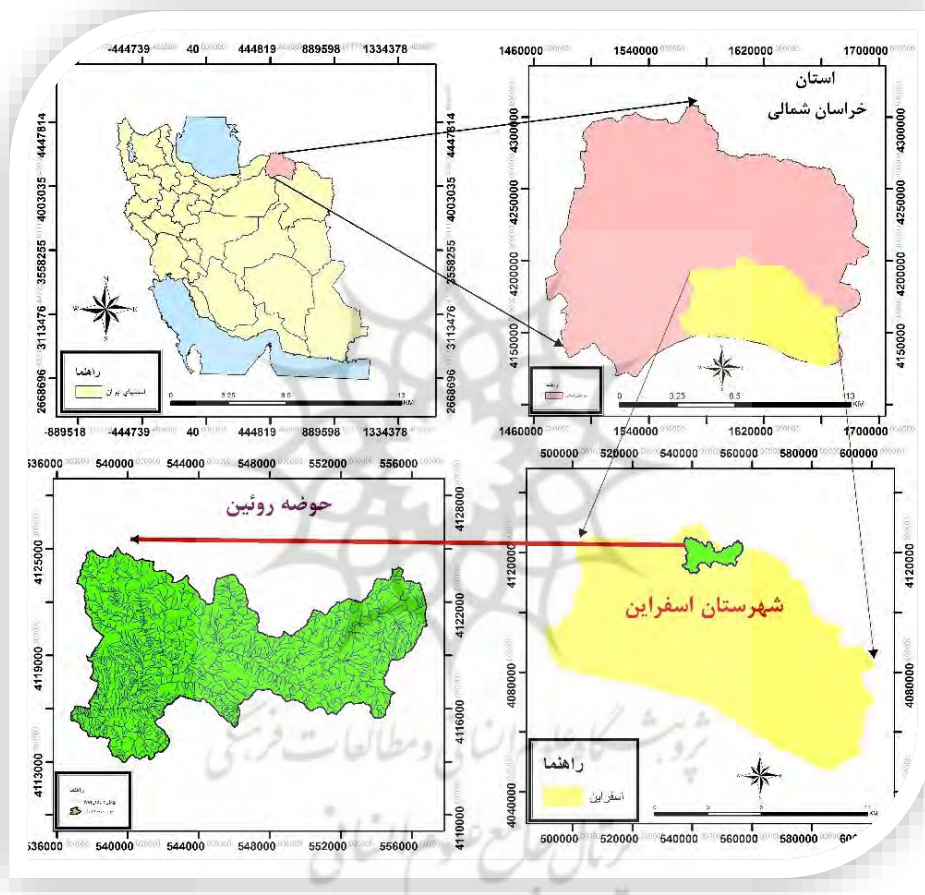
^۱ - Andreo

^۲ - Farfán

^۳ - Marín

^۴ - Espinoza

حوضه آبخیز روئین در شمال شهرستان اسفراین و در فاصله حدود ۲۰ کیلومتری شهر اسفراین قرار دارد از نظر سیستم مختصات UTM در محدوده طولهای ۵۳۶۷۹۲ الی ۵۵۶۷۹۸ و عرضهای ۴۱۱۲۸۵۱ الی ۴۱۲۵۲۵۴ واقع شده است. حوضه مذکور در زون البرز شرقی (زون بینالود- آلاداغ) قرار دارد که در آن تنوع سنگ شناسی قابل توجهی مشهود است. این حوضه به لحاظ زمین ساخت کلان و تکتونیک بخشی از زون زمین ساختی آلاداغ- بینالود است که دارای چین خوردگی، گسلش و بهم ریختگی شدیدی است و گسل تراستی یا معکوس بزرگ زاویه در آنها زیاد دیده می‌شود. شکل شماره (۱) موقعیت حوضه آبریز روئین را در استان خراسان شمالی نشان می‌دهد.



شکل ۱: موقعیت حوضه آبریز روئین اسفراین

مواد و روشها:

برای ارزیابی تغذیه آب زیرزمینی حوضه روئین استفاده از modified-APLIS و APLIS، در این مطالعه از سه روش شد و در انتها نتایج هر سه روش هم با هم مقایسه گردید. جهت صحت سنجی و مقایسه نتایج از پراکندگی فضایی چشمه‌ها استفاده شد. نحوه و متغیرهای بکارگرفته شده توسط هر روش به اختصار تشریح می‌گردد:

الف- تهیه پایگاه داده و لایه های اطلاعاتی

بر اساس مطالعات مختلف صورت گرفته در زمینه تغذیه منابع آب زیرزمینی، عوامل کنترل کننده تغذیه در منطقه مورد مطالعه شامل لیتولوژی، تراکم خطواره و گسل، پوشش گیاهی، تراکم شبکه زهکشی، بارش، دما، شیب، جهت شیب، ارتفاع از سطح دریا، لندفرم‌های موثر در تغذیه، نوع خاک و فاکتور تصحیح (F_h) مورد ارزیابی قرار گرفته است. اطلاعات مذکور

از نقشه‌های زمین‌شناسی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور با مقیاس ۱:۱۰۰,۰۰۰، نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵,۰۰۰ سازمان نقشه برداری، داده‌های بارش و دمای سالانه وزارت نیرو (۹ ایستگاه)، نقشه کاربری اراضی سازمان منابع طبیعی، تصاویر ماهواره‌ای لندست مربوط به سنجنده ETM+ از فریم با گذر و ردیف ۱۶۱-۰۳۴ مربوط به May ۲۰۱۷- خرداد ۱۳۹۶ (در زمان مناسب که تصاویر بدون پوشش ابر و غبار باشد) استخراج و در بسته‌های نرم افزاری ArcGIS 10.4، ERDAS IMAGINE 9.1 و EXPERT CHOICE 11.0 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و نقشه‌های موضوعی تهیه گردید. نقشه‌های موضوعی تهیه شده، کلاس بندی شده و به هر کلاس یک وزن متناسب با اهمیت آن با توجه به نظرات کارشناسی و روش بکار گرفته اختصاص داده شد. در وزن دهی به روش تحلیل سلسله مراتبی نیز معیار نسبت سازگاری^۱ کمتر از ۰/۱ برای صحت کار در طی فرایند مقایسات زوجی برای لایه‌های مختلف لحاظ گردید. پس از تولید تمامی لایه‌های اطلاعاتی در قالب نقشه‌های موضوعی، از روش‌های همپوشانی و با استفاده از فرمول‌های مربوط به هر روش برای تلفیق لایه‌ها و تهیه نقشه نهایی نفوذ آب زیرزمینی استفاده گردید.

ب- مدل‌های مورد استفاده در مطالعه:

۱- مدل تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) توسط ساعتی (۱۹۸۰) ابداع گردید. راهکار مرسوم در این روش برای کمی‌سازی متغیرهای کیفی، استفاده از تکنیک مقایسه زوجی است. با این راهکار پیچیدگی‌های زیاد مربوط به تصمیم‌گیری در ارتباط با متغیرها به گونه قابل توجهی کاهش می‌یابد. چرا که در هر لحظه فقط با دو متغیر سر و کار داریم. به طور کلی در این روش یک ماتریسی از عامل‌ها ساخته شده که در آن عامل‌ها به صورت زوجی با هم مقایسه شده و اهمیت آنها نسبت به یکدیگر تعیین می‌گردد (مالچوفسکی، ۱۹۹۹). روش سلسله مراتبی معمولاً در سه مرحله زیر انجام می‌گیرد:

۱. تهیه ماتریس مقایسه زوجی از تمامی متغیرهای مورد بررسی

۲. محاسبه وزن نسبی هر متغیر با توجه به سایر متغیرها

۳. تخمین نرخ سازگاری به منظور اطمینان از صحت وزن دهی انجام شده

خروجی روش تحلیل سلسله مراتبی نیز وزن نسبی عامل‌ها نسبت به یکدیگر بوده که در آن معیار ناسازگاری^۲ در وزن نسبی عامل‌ها باید کمتر از ۰/۱ لحاظ شده باشد (دی و رامچران^۳، ۲۰۰۸). برای تعیین سازگاری مقایسه‌های زوجی انجام شده از نسبت سازگاری (CR) که با محاسبه اندیس سازگاری (CI) بدست می‌آید، استفاده می‌شود. اندیس سازگاری (CI) با توجه به رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن λ میانگین بردار سازگاری و n تعداد معیارهای تحت بررسی می‌باشد.

سپس با استفاده از اندیس سازگاری مقدار نسبت سازگاری (CR) محاسبه می‌شود:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad \text{رابطه (۲)}$$

1 - Consistency Ratio

2 - inconsistency ratio

۳ - Dey and Ramcharan

که در آن RI اندیس تصادفی بوده که به تعداد معیارهای مورد بررسی وابسته است و برابر با میانگین اندیس سازگاری از ماتریس های تصادفی زوجی می باشد. مقادیر RI در منابع مختلف ارائه شده است. به عنوان مثال می توان از مقادیر RI محاسبه شده توسط آلانسو و لاماتا (۲۰۰۶) که بستگی به تعداد متغیرها یا عامل ها در ماتریس مقایسه زوجی دارد، استفاده کرد. چنانچه نسبت سازگاری بیشتر از ۰/۱ باشد بیانگر قضاوت های نادرست بوده و مقادیر کمتر از ۰/۱ سطح قابل قبول برای مقایسه های زوجی را نشان می دهد (قدسی پور، ۱۳۸۲). در پژوهش حاضر در مدل AHP، از لایه های لیتولوژی (L)، شیب (S)، جهت شیب (A)، بارش (P)، تراکم خطواره و گسل (F)، دما (T)، پوشش گیاهی (V)، تراکم شبکه زهکشی (D) و پتانسیل تغذیه (RP) استفاده شده است.

۲- مدل آپلیس (APLIS):

آندرو و همکاران در سال ۲۰۰۸ برای بررسی میزان تغذیه به آبخوان های جنوب اسپانیا و به طور کلی آبخوان های کربناته مدیترانه ای روش جدیدی را ابداع کردند و نام آن را با اقتباس از عوامل موثر در تغذیه APLIS گذاشتند (آندرو و همکاران، ۲۰۰۸). خصوصیات اقلیمی و زمین شناسی این آبخوان ها دارای طیف گسترده ای بود و آنها با توجه به این موضوع پنج متغیر یا عامل ارتفاع از سطح دریا (عامل A)، شیب (عامل P)، لیتولوژی (عامل L)، لندفرم های موثر در تغذیه (عامل I) و نوع خاک (عامل S) را شناسایی کرده و سپس با انجام پروسه سعی و خطا رابطه زیر را بین این عوامل و میزان تغذیه بدست آوردند (آندرو و همکاران، ۲۰۰۸):

$$R = (A + P + 3*L + 2*I + S)/0.9 \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن R میزان تغذیه آبخوان بر حسب درصد بارش سالانه بر سطح منطقه می باشد. در جدول زیر وزن ها و کلاس های مختلف عوامل موثر بر تغذیه در روش APLIS ارائه شده است (جدول ۱).

جدول ۱- رتبه بندی استاندارد متغیرها در روش APLIS (Andreo et al, 2008)

ارزش	P(%) شیب	ارزش	ارتفاع به متر (A)
۱۰	≤۳	۱	≤۳۰۰
۹	۳-۸	۲	۶۰۰-۳۰۰
۸	۸-۱۶	۳	۹۰۰-۶۰۰
۷	۱۶-۲۱	۴	۱۲۰۰-۹۰۰
۵	۲۱-۳۱	۵	۱۵۰۰-۱۲۰۰
۴	۳۱-۴۶	۶	۱۸۰۰-۱۵۰۰
۳	۴۶-۷۶	۷	۲۱۰۰-۱۸۰۰
۲	۷۶-۱۰۰	۸	۲۴۰۰-۲۱۰۰
۱	>۱۰۰	۹	۲۷۰۰-۲۴۰۰
		۱۰	>۲۷۰۰

ارزش	لندفرمهای نفوذپذیر	ارزش	زمین شناسی
۱۰	لندفرمهای نفوذپذیر بسیار	۹ یا ۱۰	آهک ها و دولومیت های کارستی شده
۱	لندفرمهای نفوذپذیر کم	۷ یا ۸	آهک‌ها و دولومیت‌های شکسته شده و کمی کارستی شده
		۵ یا ۶	آهک ها و دولومیت‌های درز و شکافدار
		۴	ماسه‌ها و گراول‌ها
		۳	کنگلومرها
		۲	سنگهای پلوتونیک و دگرگونی
		۱	شیل‌ها، سیلت‌ها و رس‌ها
		ارزش	خاک
		۱۰	لپتوسولها
		۹	آرنوسول و زروسولها
		۸	فلوویسولها و رگوسولهای آهکی
		۷	سولنچاک و رگوسولهای اوتریک
		۶	کامبیسولها
		۵	کامبیسولهای اوتریک
		۴	هیستوسولها و لوویسولها
		۳	لوویسولهای کرومیک
		۲	پلنوسولها
		۱	ورتی سولها

۳- مدل آپلیس اصلاح شده (Modified-APLIS):

مارین^۱ (۲۰۰۹) با معرفی عامل جدیدی به نام فاکتور تصحیح^۲ (F_h) و همچنین بسط دامنه عامل "لندفرم‌های موثر در تغذیه^۳ (I)" روش APLIS را اصلاح نموده و نام آن را آپلیس اصلاح شده (Modified-APLIS) گذاشت. با توجه به این موضوع رابطه ۳ نیز به صورت زیر تغییر می‌کند.

$$R = [(A + P + 3*L + 2*I + S)/0.9] * F_h \quad \text{رابطه (۴)}$$

جدول ۲ وزن‌ها و کلاس‌های مختلف عوامل موثر بر تغذیه در روش آپلیس اصلاح شده و شکل (۲) مراحل اجرایی مدل‌های پتانسیل نفوذ آب زیرزمینی در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

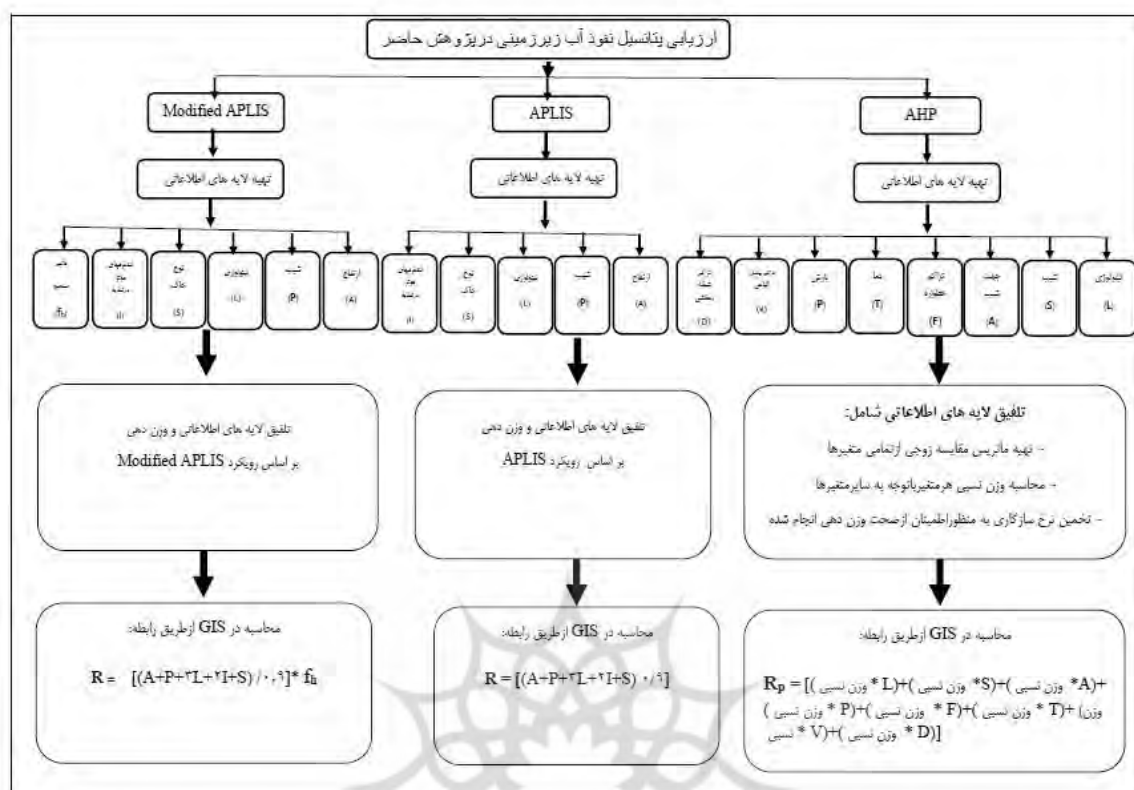
1- Marín (2009)

۲ - Correction Factor

3 - Infiltration Landforms

جدول ۲- عوامل و وزن آنها در رویکرد آپلیس اصلاح شده (Farfan et al., 2009)

ارزش	P(%) شیب	ارزش	ارتفاع به متر (A)
۱۰	≤۳	۱	≤۳۰۰
۹	۵-۳	۲	۶۰۰-۳۰۰
۸	۱۰-۵	۳	۹۰۰-۶۰۰
۷	۱۵-۱۰	۴	۱۲۰۰-۹۰۰
۶	۲۰-۱۵	۵	۱۵۰۰-۱۲۰۰
۵	۳۰-۲۰	۶	۱۸۰۰-۱۵۰۰
۴	۴۵-۳۰	۷	۲۱۰۰-۱۸۰۰
۳	۶۵-۴۵	۸	۲۴۰۰-۲۱۰۰
۲	۱۰۰-۶۵	۹	۲۷۰۰-۲۴۰۰
۱	>۱۰۰	۱۰	>۲۷۰۰
ارزش	لندفرمهای نفوذپذیر	ارزش	زمین شناسی
۱۰	لندفرمهای نفوذپذیر بسیار	۹ یا ۱۰	آهک ها و دولومیت های کارستی شده
۵	لندفرمهای نفوذپذیر متوسط	۷ یا ۸	آهک ها و دولومیت های شکسته شده و کمی کارستی شده
۱	لندفرمهای نفوذپذیر کم	۵ یا ۶	کارستی شده
		۴	آهک ها و دولومیت های درز و شکافدار
		۳	ماسه ها و گراول ها
		۲	کنگلومرها
		۱	سنگهای پلوتونیک و دگرگونی
			شیل ها، سیلت ها و رس ها
ارزش	ضریب تغذیه (F _n)	ارزش	خاک
۱	آبخوان	۱۰	لیتوسولها
۰,۱	غیر آبخوان	۹	آرنوسول و زروسولها
		۸	فلوویسولها و رگوسولهای آهکی
		۷	سولنچاک و رگوسولهای اوتریک
		۶	کامبیسولها
		۵	کامبیسولهای اوتریک
		۴	هیستوسولها و لوویسولها
		۳	لوویسولهای کرومیک
		۲	پلنوسولها
		۱	ورتی سولها



شکل ۲: مراحل اجرایی مدل‌های پتانسیل نفوذ آب زیرزمینی در پژوهش حاضر

یافته‌ها و بحث:

جهت اجرای مدل‌های تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، آپلیس و آپلیس اصلاح شده (Modified-APLIS) مراحل بدین شرح صورت گرفت:

الف: تهیه لایه‌های داده‌ای متغیرهای موثر بر نفوذپذیری:

لیتولوژی منطقه: لیتولوژی منطقه عمدتاً از آهک‌ها، دولومیت تا آهک‌های مارنی ژوراسیک-کرتاسه (مزدوران-لار)، ژوراسیک (چمن بید-دلیچای)، کرتاسه (تیرگان)، مارن و کنگلومرای کرتاسه (شیرگشت و شوربجه)، آهک، دولومیت، ماسه سنگ و شیل‌های کامبرین (سازندهای زایگون، باروت و میلا)، شیل و ماسه سنگ‌های اردوویسین (شیرگشت)، کنگلومرای نئوژن و پلیستوسن، و آبرفت‌های عهد حاضر تشکیل شده است (شکل ۳).

نوع سنگ رخنمون یافته در سطح زمین به طور بسیار موثری تغذیه آب زیرزمینی را تحت تاثیر قرار می‌دهد (شبان و همکاران، ۲۰۰۶). این لایه اطلاعاتی با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ برگه‌های شیروان و بجنورد سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور تهیه گردید. پس از رقومی کردن سازندها به هر سازند با توجه به اهمیتی که در پدیده تغذیه آب زیرزمینی می‌تواند داشته باشد وزن مناسبی داده می‌شود (شکل ۴). در اینجا وزن‌ها بر اساس جدول ۱ انتخاب گردید.

ارتفاع: معمولاً هر چه ارتفاع بالاتر باشد میزان بارش بیشتر و میزان تبخیر و دما کمتر است. برای تهیه نقشه طبقات ارتفاعی، ابتدا نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ تبدیل به DEM با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر گردید. سپس با توجه به رتبه‌بندی استاندارد ارائه شده در جدول ۱ طبقات ارتفاعی ارزشگذاری شد (شکل ۵).

شیب منطقه: شیب نرخ تغییر در ارتفاع را نشان می‌دهد و معمولاً به صورت درصد یا بر حسب درجه بیان می‌شود. نقشه شیب از روی DEM منطقه ساخته شد. با توجه به این که در شیب‌های کم، فرصت نفوذ بیشتر است به شیب‌های کم، ارزش بیشتری داده شد. رتبه‌بندی بر اساس جدول ۱ بر روی طبقات شیب اعمال و نتیجه آن در شکل ۶ ارائه شده است. مقدار شیب منطقه از صفر تا ۱۵۵۰ درصد در نوسان است.

پوشش خاک: نوع پوشش خاک نقش مهمی در میزان تغذیه دارد. آب بارش در خاک‌های با بافت دانه درشت سریع‌تر و بیشتر از خاک‌های با بافت دانه ریز مانند رس و سیلت نفوذ می‌کند. به دلیل در دسترس نبودن نقشه دقیق خاک منطقه مورد مطالعه جهت تهیه این نقشه از نقشه کاربری اراضی تهیه شده توسط سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور و اعمال نظرات کارشناسان برای تعیین نوع خاک استفاده گردید (شکل ۷).

فاکتور نفوذ: یکی از عوامل مهم در تغذیه آب زیرزمینی، وجود عواملی است که نفوذ آب بارش به زمین را تشدید می‌کنند. در مناطق با توسعه بالایی کارست و تکنونیک شدید این عوامل در میزان نفوذ نقش مهمی را بر عهده دارند. جهت تهیه این نقشه از نقشه‌های موضوعی نظیر شیب، جهت شیب، بارش، دما، تراکم شبکه زهکشی، تراکم شکستگی‌ها، تراکم پوشش گیاهی و لیتولوژی استفاده شد.

شیب منطقه جهت تهیه فاکتور نفوذ: یکی از فاکتورهای در نظر گرفته تهیه نقشه فاکتور نفوذ عامل شیب می‌باشد لذا لایه شیب نیز به چهار طبقه از شیب خیلی کم برای با ارزش بالا برای نفوذ زیاد تا شیب خیلی بالا با ارزش پایین برای نفوذ کم تهیه گردید (شکل ۸).

جهت شیب منطقه: جهت شیب یکی از پارامترهای مهم در میزان نفوذ است که معمولاً در ارزیابی تغذیه مورد توجه قرار نگرفته است. در برخی جهت‌های شیب مانند جهت شمال که در بیشتر مواقع سایه‌گیر است، میزان تابش مستقیم خورشید کمتر بوده و بنابراین میزان ماندگاری رطوبت و در نتیجه میزان تغذیه بیشتر خواهد بود. جهت شیب یا جهت حداکثر شیب منطقه در ده طبقه کلاس بندی شد. ارزشگذاری نقشه جهت شیب با نظر کارشناسی و با توجه به این موضوع که دامنه‌های رو به شمال سایه بیشتر بوده و تبخیر کمتر است و در نتیجه نفوذ بیشتر است، انجام گرفت. بدین ترتیب بالاترین ارزش‌ها به دامنه‌های شمالی و پایین‌ترین آنها به دامنه‌های رو به جنوب اختصاص داده شد (شکل ۹).

تراکم شبکه زهکشی: تراکم یا چگالی شبکه آبراهه برابر با کل طول تمامی شبکه آبراهه تقسیم بر کل مساحت منطقه است. شبکه آبراهه نقش معکوس در نفوذ آب به داخل زمین دارند. چون آبراهه‌ها نقش انتقال رواناب را داشته و

مانع از ماندگاری زیاد آب در سطح زمین و در نتیجه نفوذ آب به داخل زمین می‌شوند. به این ترتیب پس از تهیه نقشه تراکم شبکه زهکشی، به نواحی با تراکم بالا ارزش پایین و به مناطق با تراکم شبکه آبراهه کم ارزش بالا تخصیص داده شد (شکل ۱۰).

نقشه دما: هر چه دما بیشتر باشد میزان تبخیر بیشتر بوده و بنابراین میزان نفوذ کمتر می‌شود. بنابراین این لایه نیز در تهیه لایه فاکتور نفوذ لحاظ شد. برای تهیه لایه دما ابتدا با توجه به ایستگاه‌های اقلیمی در منطقه و اطراف آن (۹ ایستگاه) رابطه زیر میان دما و ارتفاع محاسبه شد (رابطه ۵).

$$T = -0.005 * H + 20.925 \quad ; \quad R^2 = 0.70 \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در آن T دما بر حسب درجه سانتیگراد و H ارتفاع از سطح دریا بر حسب متر می‌باشد.

در ادامه با توجه به اینکه هر چقدر که دما بالاتر باشد میزان تبخیر بیشتر بوده و در نتیجه میزان نفوذ کاسته می‌شود، ارزشگذاری انجام و نقشه مربوطه ترسیم گردید (شکل ۱۱).

نقشه بارش: هر چه میزان بارش بالاتر باشد میزان نفوذ نیز به تبع آن بالاتر خواهد بود. برای تهیه نقشه بارش نیز از طریق آمار ایستگاه‌های اقلیمی در منطقه و اطراف آن (۹ ایستگاه) رابطه بارش-ارتفاع محاسبه شد (رابطه ۶). سپس از این رابطه و نقشه توپوگرافی منطقه لایه بارش تهیه و ارزشگذاری گردید (شکل ۱۲).

$$P = 0.1767 * H + 29.562 \quad ; \quad R^2 = 0.74 \quad \text{رابطه (۶)}$$

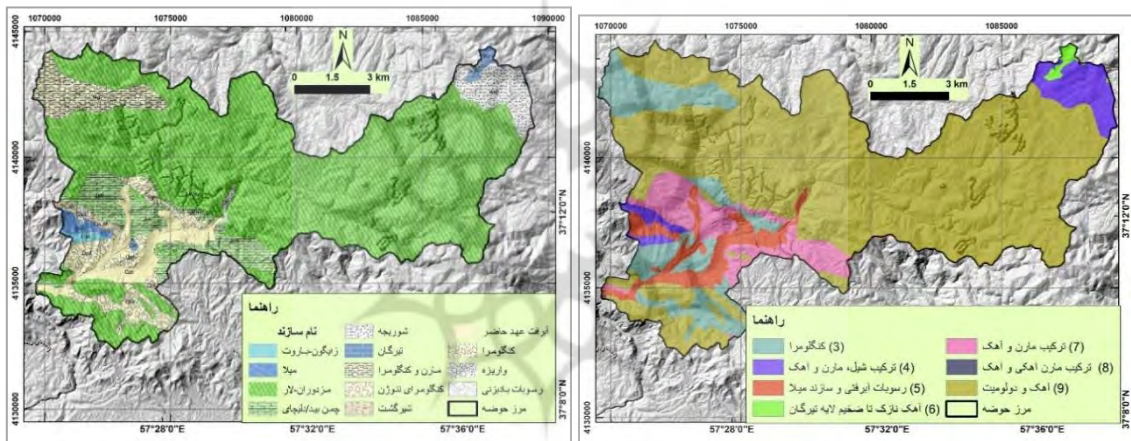
که در این معادله P میزان بارش بر حسب میلیمتر و H ارتفاع از سطح دریا بر حسب متر می‌باشد.

تراکم پوشش گیاهی (NDVI): میزان پوشش گیاهی نقش مهمی در میزان تغذیه دارد. مثلاً در مناطق با پوشش گیاهی فقیر نسبت به جنگل، آب بارش به نسبت بسیار کمتری نفوذ می‌کند. در محدوده مورد مطالعه پوشش گیاهی از روی تصاویر ماهواره لندست ۸ تهیه گردید. در این نقشه به پوشش گیاهی متراکم (اعداد نزدیک به +۱) ارزش‌های بالا و پوشش گاهی فقیر (اعداد نزدیک به -۱) ارزش‌هایی پایین تخصیص داده شد (شکل ۱۳).

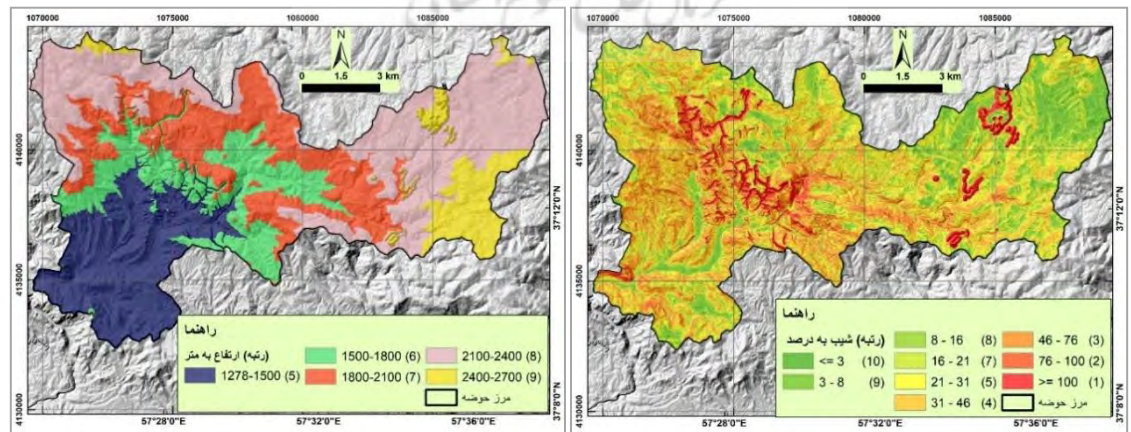
تراکم خطواره و گسل: با توجه به اینکه درزه و شکستگی‌ها با ایجاد فضاهای مناسب برای حرکت عمقی آب، نقش مهمی را تغذیه آب زیرزمینی به ویژه در سازندهای سخت ایفا می‌نمایند، این عامل نیز در تهیه نقشه فاکتور نفوذ بکار گرفته شد. برای تهیه نقشه تراکم خطواره، ابتدا تمامی گسل‌ها و درزه و شکستگی‌ها با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی و تصاویر ماهواره‌ای استخراج شده و سپس در محیط ArcGIS 10.4 نقشه تراکم خطواره و گسل تهیه گردید. سپس با توجه به این موضوع که هر چه تراکم درزه و شکستگی‌ها زیادتر باشد میزان نفوذ نیز بیشتر می‌شود، ارزش‌گذاری انجام شد (شکل ۱۴).

در نهایت با توجه به لایه های شیب، جهت شیب، دما، بارش، شدت پوش گیاهی، تراکم شبکه زهکشی و تراکم خطواره ها، نقشه فاکتور نفوذ تهیه و برای مدل آپلیس در دو کلاس و آپلیس اصلاح شده در سه کلاس ارزشگذاری شد. اشکال ۱۵ و ۱۶ به ترتیب نقشه فاکتور نفوذ برای مدل APLIS و Modified-APLIS را نشان می دهند.

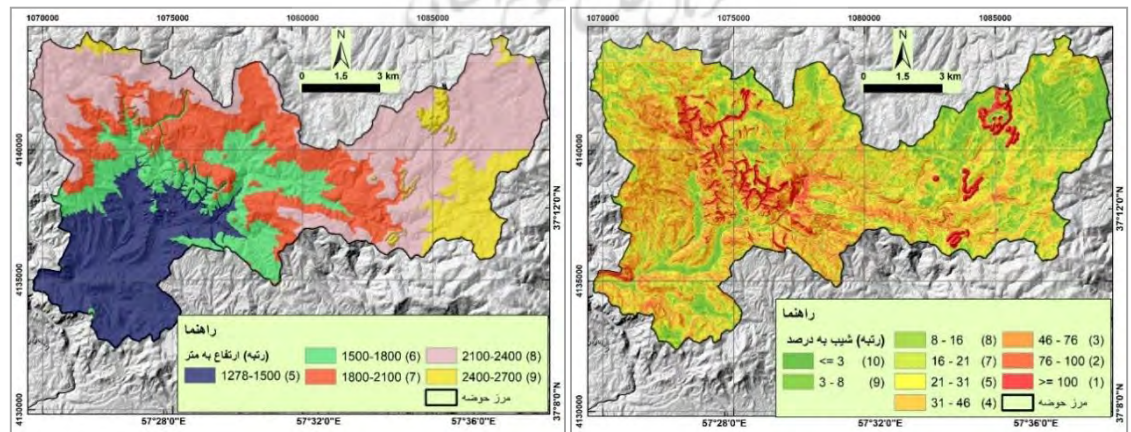
ضریب تغذیه^۱ (F_h): جهت تفکیک آبخوان ها که نماینده واحدهای کربناته هستند، از غیر آبخوان ها که بقیه واحدهای سنگی را تشکیل می دهند این فاکتور در نظر گرفته شده است. (مارین، ۲۰۰۹). مناطق کربناته گسلی، حفرات کارستی کم عمق و نواحی با شاخص کیفی توده سنگ ضعیف به عنوان آبخوان در نظر گرفته می شوند و به آنها ارزش ۱ داده می شود. بقیه مناطق به آنها ارزش ۰/۱ داده می شود (اسپینوزا و همکاران، ۲۰۱۵). در منطقه مورد مطالعه با توجه به لیتولوژی سازندهای رخنمون یافته در سطح حوضه این لایه تهیه و مطابق با جدول ۲ ارزشگذاری گردید (شکل ۱۷).



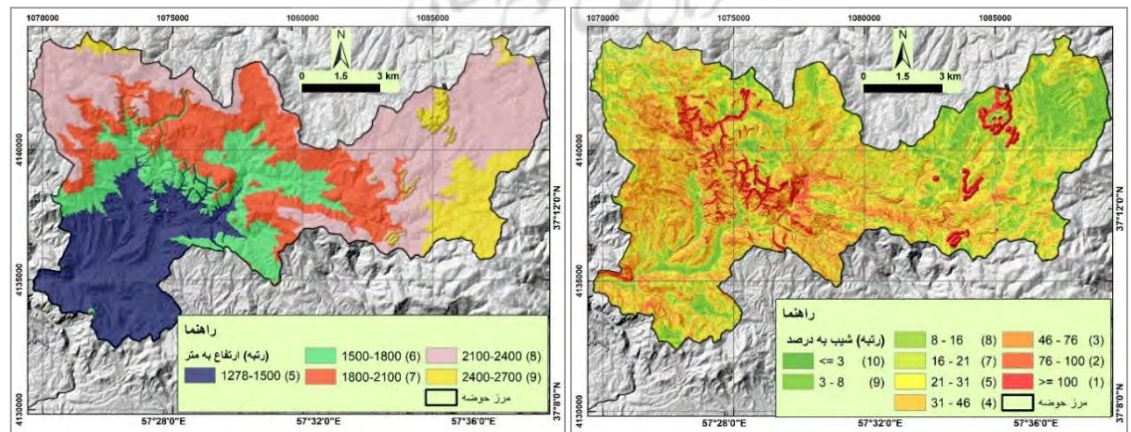
شکل ۳- نقشه سازندهای زمین شناسی حوضه آبریز رویین



شکل ۴- واحدهای لیتولوژیکی منطقه مورد مطالعه

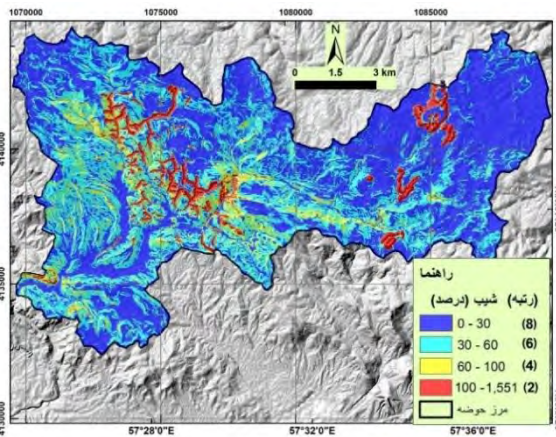
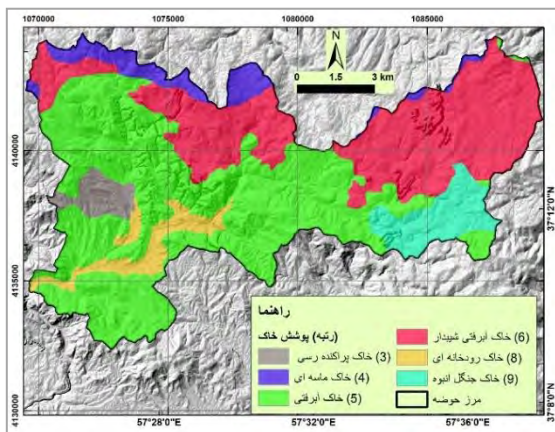


شکل ۵- نقشه طبقات ارتفاعی منطقه مورد مطالعه



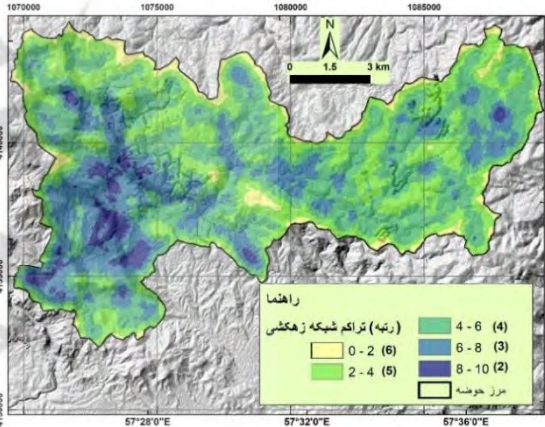
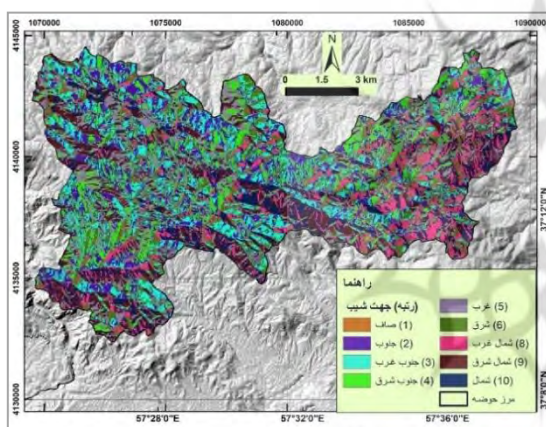
شکل ۶- نقشه طبقات شیب در منطقه مورد مطالعه

¹ - Infiltration coefficient



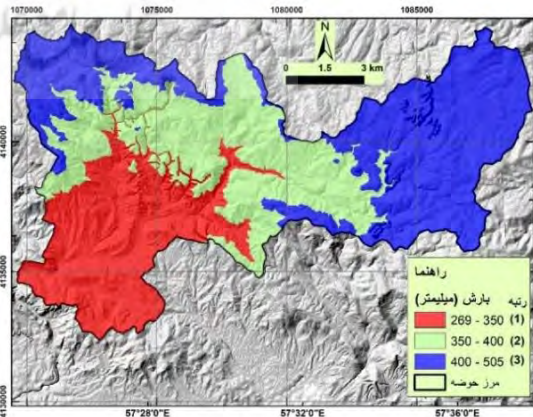
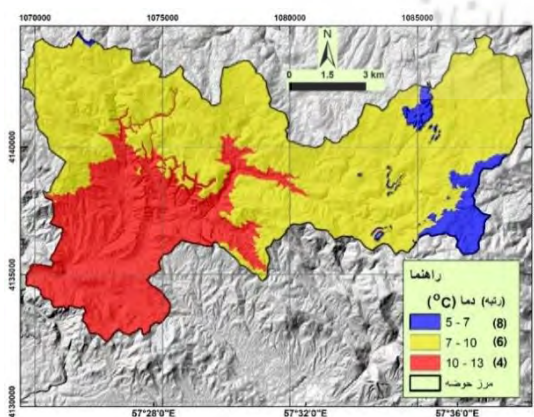
شکل ۸- نقشه طبقات شیب برای تهیه فاکتور نفوذ

شکل ۷- نقشه خاک منطقه مورد مطالعه



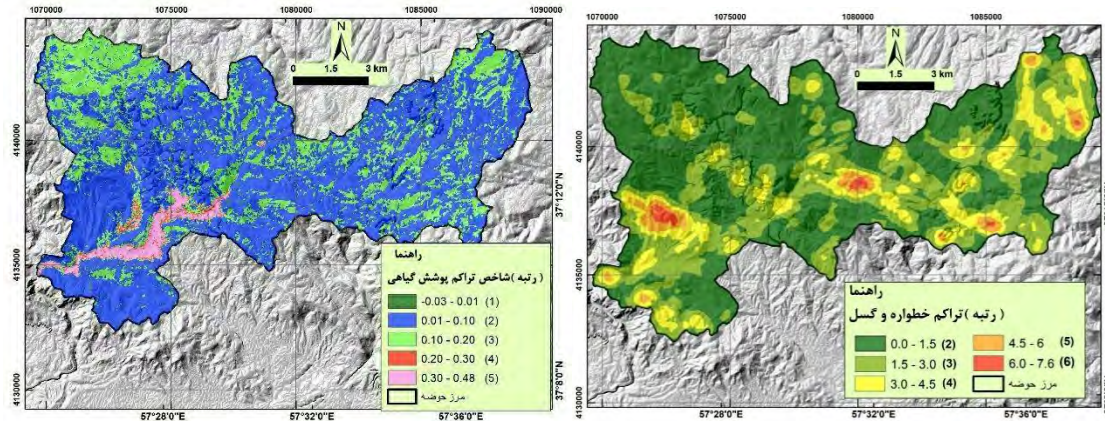
شکل ۱۰- نقشه تراکم شبکه زهکشی در منطقه مورد مطالعه

شکل ۹- نقشه طبقات جهت شیب و ارزشگذاری آن



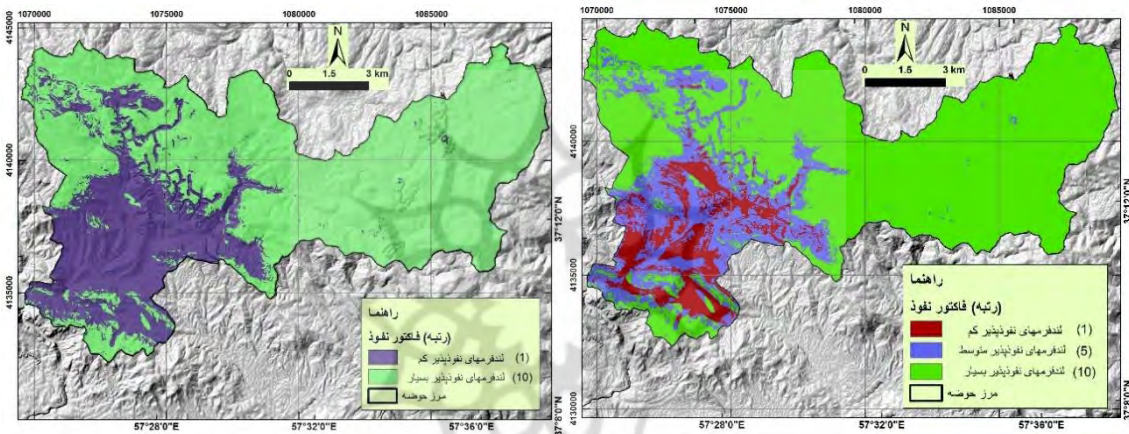
شکل ۱۲- نقشه بارش در منطقه مورد مطالعه

شکل ۱۱- نقشه دما در منطقه مورد مطالعه



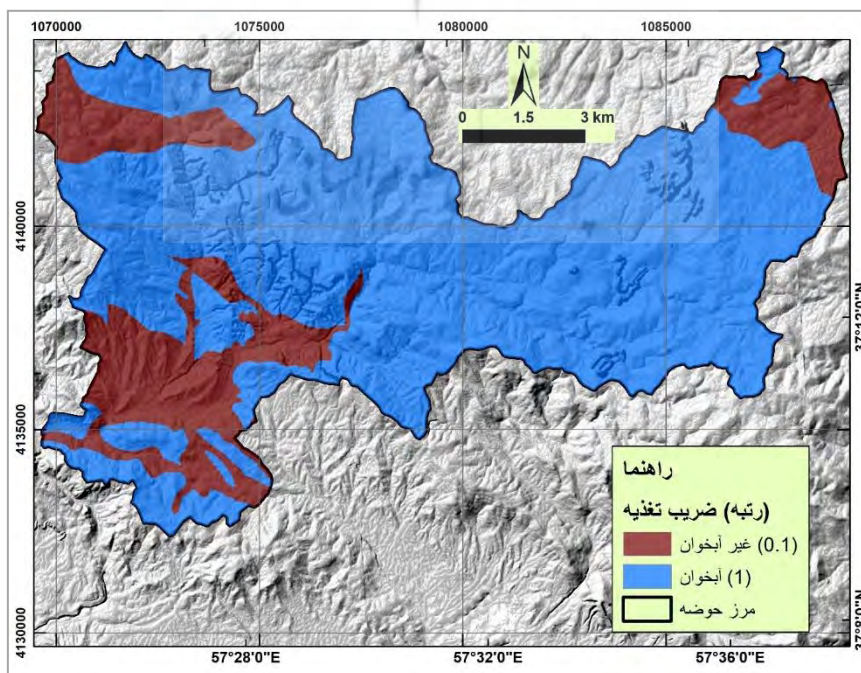
شکل ۱۳- تراکم پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه

شکل ۱۴- نقشه تراکم خطواره و گسل در منطقه مورد مطالعه



شکل ۱۵- نقشه فاکتور نفوذ جهت ورودی مدل آپلیس

شکل ۱۶- نقشه فاکتور نفوذ جهت ورودی مدل آپلیس اصلاح شده



شکل ۱۷- نقشه ضریب تغذیه

ب- تلفیق لایه‌های اطلاعاتی و ارزیابی نفوذ در سطح حوضه رویین

پس از تهیه نقشه‌های موضوعی از لایه‌های اطلاعاتی مختلف، برای تهیه نقشه نهایی لازم است آنها را با هم تلفیق نماییم. یک موضوع مهم در تلفیق این لایه‌ها، تعیین اهمیت نسبی هر یک از لایه‌های اطلاعاتی می‌باشد که بسته به نوع مدل مورد استفاده متفاوت خواهد بود.

این مطالعه در مدل AHP برای وزن دهی از روش مقایسه زوجی استفاده شد. پس از محاسبه وزن نسبی عوامل موثر بر نفوذ به روش مقایسه زوجی در هر لایه این وزن‌ها با هم جمع شدند. نسبت وزن هر لایه به جمع کل وزن‌های تمامی لایه‌ها به عنوان فاکتور موثر آن لایه در نقشه نهایی لحاظ شد (جدول ۳). با ضرب وزن‌ها در عامل مربوط و سپس جمع آنها مطابق با رابطه ۷ نقشه نهایی پتانسیل نفوذ بدست آمد. سپس این نقشه در پنج کلاس کیفی از پتانسیل نفوذ خیلی کم تا پتانسیل نفوذ خیلی بالا طبقه بندی گردید (شکل ۱۸).

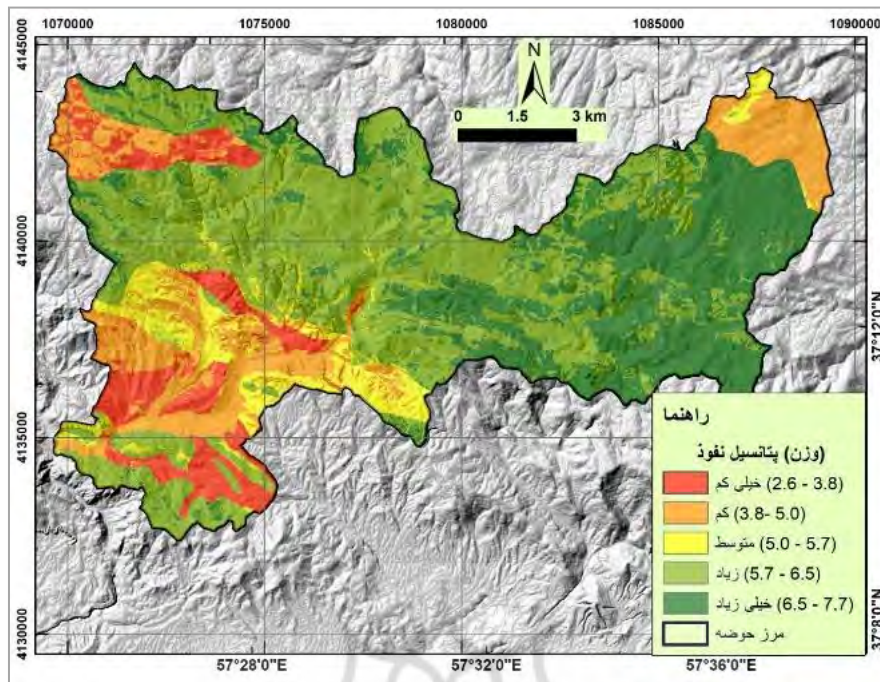
رابطه (۷)

$$+ 0.049 * V + RP = 0.444 * L + 0.080 * S + 0.056 * A + 0.122 * P + 0.203 * F + 0.023 * T + 0.023 * D$$

که در آن L لیتولوژی، S شیب، A جهت شیب، P بارش، F تراکم خطواره و گسل، T دما، V پوشش گیاهی، D تراکم شبکه زهکشی و RP پتانسیل تغذیه می‌باشد.

جدول ۳- وزن لایه‌های اطلاعاتی محاسبه شده به روش مقایسه زوجی و با لحاظ نسبت سازگاری ۰/۱

نام لایه	لیتولوژی	شیب	جهت شیب	تراکم خطواره‌ها و گسل	دما	پوشش گیاهی	تراکم شبکه آبراهه
وزن	۰/۴۴۴	۰/۰۸۰	۰/۰۵۶	۰/۱۲۲	۰/۰۲۳	۰/۰۴۹	۰/۰۲۳



شکل ۱۸- نقشه پتانسیل نفوذ حوضه روپین به روش AHP

در جدول ۴ درصد هر کلاس کیفی در سطح حوضه روپین ارائه شده است. قابل ذکر است که این کلاس بندی کیفی به ۵ دسته به روش شکست طبیعی^۱ در نرم افزار ArcGIS 10.4 انجام شده است.

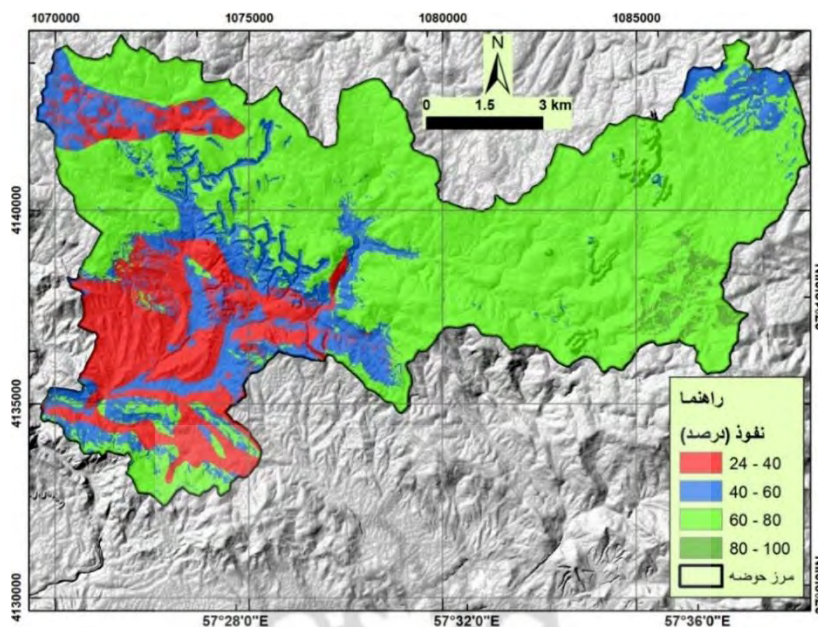
جدول ۴- وزن ها و مساحت طبقات کیفی پتانسیل نفوذ در روش AHP

پتانسیل نفوذ	طبقه کیفی	مساحت	درصد نسبی مساحت
۲/۶-۳/۸	خیلی کم	۰	۰,۰
۳/۸-۵	کم	۱۰/۴	۸/۱
۵-۵/۷	متوسط	۱۹/۳	۱۵/۱
۵/۷-۶/۵	زیاد	۶۰/۸	۴۷/۷
۶/۵-۷/۷	خیلی زیاد	۳۷/۱	۲۹/۱

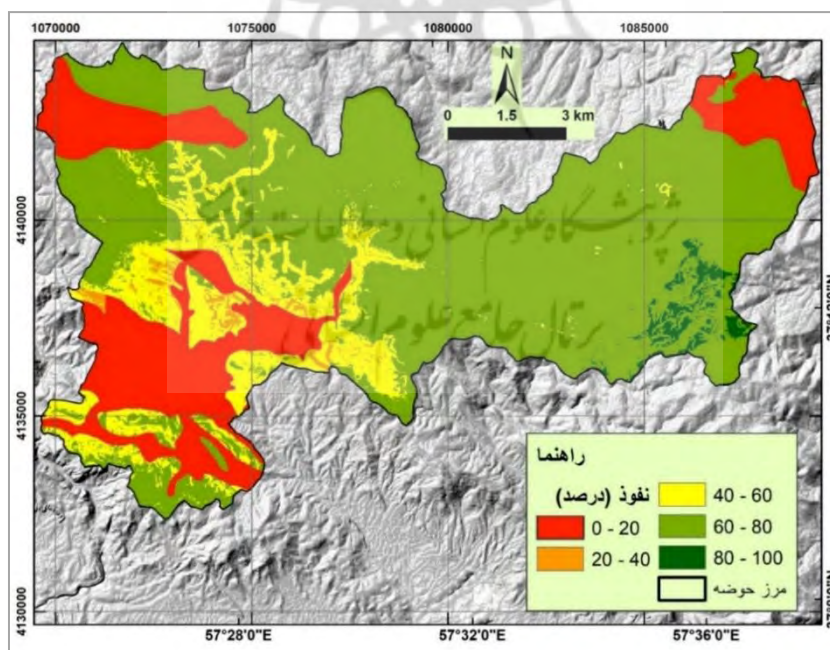
در روش APLIS پس از تهیه لایه‌های فاکتورهای موثر بر میزان تغذیه بر اساس جدول ۱ و بکارگیری معادله (۳) و در روش APLIS اصلاح شده مطابق با جدول ۲، با معادله (۴) نقشه نهایی ترسیم و در پنج کلاس کیفی از خیلی کم تا خیلی زیاد طبقه بندی گردید. اشکال ۱۹ و ۲۰ نقشه پتانسیل نفوذ حوضه روپین به روش APLIS و APLIS اصلاح شده و جداول ۵ و ۶ وزن ها و مساحت طبقات نفوذ در روش APLIS و APLIS اصلاح شده را نشان می‌دهد. در

¹ - natural break

جدول ۷ نیز مقادیر طبقات کیفی سه مدل AHP، APLIS و اصلاح شده جهت مقایسه آنها ارائه شده است و در نهایت جهت صحت سنجی و مقایسه نتایج از پراکندگی فضایی چشمه‌ها استفاده شد.



شکل ۱۹- نقشه پتانسیل نفوذ حوضه رویین به روش APLIS



شکل ۲۰- نقشه پتانسیل نفوذ حوضه رویین به روش اصلاح شده APLIS

جدول ۵- وزن ها و مساحت طبقات نفوذ در روش APLIS

درصد نفوذ	طبقه کیفی	مساحت	درصد نسبی مساحت
۰-۲۰	خیلی کم	۰	۰
۲۰-۴۰	کم	۱۹/۲۹	۱۵/۱
۴۰-۶۰	متوسط	۲۲/۸۷	۱۷/۹
۶۰-۸۰	زیاد	۸۳/۲	۶۵/۱
۸۰-۱۰۰	خیلی زیاد	۲/۴۴	۱/۹

جدول ۶- وزن ها و مساحت طبقات نفوذ در روش APLIS اصلاح شده

درصد نفوذ	طبقه کیفی	مساحت	درصد نسبی مساحت
۰-۲۰	خیلی کم	۲۶/۶	۲۰/۹
۲۰-۴۰	کم	۱/۳	۱
۴۰-۶۰	متوسط	۱۷/۲	۱۳/۴
۶۰-۸۰	زیاد	۸۰/۸	۶۳/۳
۸۰-۱۰۰	خیلی زیاد	۱/۹	۱/۵

جدول ۷- مقایسه درصد مساحت طبقات نفوذ در سه مدل AHP، APLIS و APLIS اصلاح شده

مدل	AHP			APLIS			APLIS اصلاح شده		
	درصد نسبی مساحت	تعداد چشمه	ضریب همبستگی	درصد نسبی مساحت	تعداد چشمه	ضریب همبستگی	درصد نسبی مساحت	تعداد چشمه	ضریب همبستگی
خیلی کم	۰	۰		۰	۰		۲۰/۹	۶	۰/۸۵
کم	۸/۱	۲	۰/۸۲	۱۵/۱	۲	۰/۷۱	۱	۰	
متوسط	۱۵/۱	۶		۱۷/۹	۹		۱۳/۴	۵	

زیاد	۴۷/۷	۷		۶۵/۱	۸		۶۳/۳	۸
خیلی زیاد	۲۹/۱	۴		۱/۹	۰		۱/۵	۰

نتیجه گیری

این پژوهش به منظور ارزیابی پتانسیل نفوذ آب زیرزمینی حوضه آبریز روئین اسفراین با استفاده از مدل‌های تحلیل سلسله مراتبی، آپلیس و آپلیس اصلاح شده انتخاب گردید. نتایج حاصل از اجرای مدل AHP در پژوهش حاضر که در ۵ کلاس طبقه‌بندی شد نشان می‌دهد که مساحت ناحیه با پتانسیل نفوذ کم در سطح حوضه ناچیز و نزدیک به صفر است. پتانسیل نفوذ کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد به ترتیب 8/1، ۱۵/۱، ۴۷/۷ و ۲۹/۱ درصد سطح حوضه را به خود اختصاص داده‌اند و طبقه با پتانسیل نفوذ زیاد بیشترین وسعت حوضه و حدود نیمی از آن را پوشانده است. در روش‌های APLIS و APLIS اصلاح شده نیز پس از تهیه عوامل موثر بر تغذیه نقشه نهایی ترسیم و در پنج کلاس کیفی از خیلی کم تا خیلی زیاد طبقه‌بندی گردید. مطابق با روش APLIS مساحت نواحی با درصد نفوذ خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد به ترتیب برابر با ۱۵/۱، ۱۷/۹، ۶۵/۱ و ۱/۹ و در مدل APLIS اصلاح شده نیز به ترتیب ۲۰/۹، ۱، ۱۳/۴، ۶۳/۴ و ۱/۵ درصد سطح حوضه را به خود اختصاص داده‌اند. در این دو مدل درصد نفوذ زیاد، بیشترین وسعت حوضه و بیش از نصف از آن را پوشانده است و همین امر نشان‌دهنده توافق نسبی دو مدل در تعیین میزان نفوذپذیری حوضه می‌باشد. اما تفاوت‌هایی نیز در این رابطه وجود دارد. بطور کلی در مقایسه مدل‌های AHP، APLIS و APLIS اصلاح شده می‌توان گفت: در مدل AHP و APLIS طبقه نفوذ خیلی کم در منطقه صفر است ولی در مدل APLIS اصلاح شده مقدار آن به حدود ۲۱ درصد کل حوضه می‌رسد که این امر نقش فاکتور نفوذ را مشخص می‌کند. تفاوت دیگر مربوط به طبقه بسیار زیاد است که در مدل AHP ۲۹ درصد و در دو مدل دیگر کمتر از ۲ درصد می‌باشد. مورد دیگر مربوط به طبقه زیاد است که در روش AHP حدوداً نیمی از سطح حوضه و در روش‌های APLIS و APLIS اصلاح شده، طبقه نفوذ زیاد، بخش عمده سطح حوضه را در بر گرفته است که همین امر نشان می‌دهد در هر سه مدل این نتیجه کلی وجود دارد که بخش عمده ای از حوضه نفوذپذیری بالایی دارد. ضریب همبستگی درصد مساحت با تعداد چشمه در مدل AHP برابر با ۰/۸۲ و در مدل‌های APLIS و APLIS اصلاح شده به ترتیب برابر با ۰/۷۱ و ۰/۸۵ می‌باشد که نشان از بیشترین ضریب همبستگی در سه مدل مذکور می‌باشد. می‌توان گفت که نخست مدل APLIS اصلاح شده با بالاترین ضریب همبستگی (۰/۸۵) که در آن لایه ضریب تغذیه وارد شده است و سپس مدل AHP (۰/۸۲)، توانسته‌اند بیشترین ضریب شناسایی پتانسیل نفوذ در منطقه را به خود اختصاص داده است دهند. همچنین قابل ذکر است که ضریب همبستگی بین درصد مساحت‌های سه مدل برابر با ۰/۷۸ می‌باشد که همپوشانی قابل توجهی را نشان می‌دهد. به طور کلی هر سه مدل وضعیت قابل قبولی را از نظر ارزیابی تغذیه در سطح حوضه به نمایش می‌گذارند. چرا که به عنوان نمونه در هر سه مدل مناطق با نفوذ بیشتر بر مناطقی که سازندهای آهکی رخنمون یافته اند منطبق می‌باشند و وجود گسل‌های فراوان و در نتیجه شکستگی‌های شدید توده سنگ، سبب بالا رفتن تراوایی سنگها شده و نفوذپذیری در آنها را افزایش داده است. به علاوه بیشتر مناطق با نفوذ بالا در این سه مدل بر قسمت‌های مرکزی و شرقی حوضه قرار دارد که با مقایسه آن با زمین‌شناسی منطقه عمدتاً بر سازند مزدوران - لار که در آنها خلوص آهک و دولومیت بیشتر است مطابقت دارند. همچنین مناطق با پتانسیل بالای نفوذ بر مناطق با تراکم زهکشی کم، منطبق هستند.

قرار گرفتن بخش وسیعی از منطقه در محدوده نفوذ زیاد نشان دهنده توان بالای آبخوان منطقه جهت دریافت و ذخیره سازی آب زیرزمینی می باشد. با توجه به اهمیت منابع آب کارستی در کشور و قابلیت بالای بخش وسیعی از حوضه مورد نظر در جهت تغذیه آبهای زیرزمینی، نتایج حاصل از این تحقیق می تواند گامی در جهت برنامه ریزی به منظور حفاظت، تغذیه و نیز بهره برداری مناسب از آبهای زیرزمینی منطقه باشد. همچنین با توجه به حساسیت منابع آب کارست نسبت به آلودگی، مناطق با نفوذ بالا ممکن است در معرض آلودگی بیشتری باشند. بنابراین توجه به حفظ سلامت و جلوگیری از انتشار آلودگیهای سطحی در مناطق با نفوذ بالا بخش دیگری از کاربردهایی است که مطالعاتی در این سطح می تواند به همراه داشته باشد. بدین منظور کنترل فعالیتهای صنعتی، نظارت بر استفاده از کودها و سموم شیمیایی در کشاورزی و جلوگیری از ورود روانابهای آلوده به آبهای زیرزمینی از جمله فعالیتهایی است که می تواند در راستای تحقق این هدف به انجام رسد.

منابع

- تاج آبادی، مهدی و زارع، محمد، ۱۳۹۵، پتانسیل تغذیه آب زیرزمینی در محیط GIS و مقایسه آن با نتایج بیان هیدروکلیماتولوژی مطالعه موردی: حوضه آبریز رودخانه کر، مجله پژوهش آب ایران، جلد ۱۰، شماره ۳، پیاپی ۲۲، صص ۱۳۵-۱۴۵.
- حیدری آقاگل، مسعود، غلامی، ابراهیم، رستمی بارانی، حمیدرضا، ۱۳۹۶، پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از روش منطق فازی (مطالعه موردی: استان خراسان جنوبی)، مجله تحقیقات منابع آب ایران، شماره ۳۹، صص ۲۱۱-۲۱۵.
- رامشت، محمد حسین و عرب عامری، علیرضا، ۱۳۹۲، پهنه بندی حوضه آبخیز بیاضیه به منظور تغذیه مصنوعی آب های زیرزمینی با استفاده از روش AHP و تکنیک GIS، جغرافیا و برنامه ریزی - ۱۳۹۲ - دوره: ۱۷ - شماره: ۴۵ - صفحه: ۶۹-۹۶.
- زارعی، مهناز و جوادی پیربازاری، سامان، ۱۳۹۶، پتانسیل یابی منابع آب در سازندهای کارستی با استفاده از مدل APLIS، چهارمین کنفرانس بین المللی برنامه ریزی و مدیریت محیط زیست، تهران، دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران.
- سازمان زمین شناسی کشور، بدون تاریخ، نقشه زمین شناسی با مقیاس یک به صد هزار برگه بجنورد.
- سازمان زمین شناسی کشور، ۱۳۸۳، نقشه زمین شناسی با مقیاس یک به صد هزار برگه شیروان.
- سلیمانی ساردو، الهام، یزدانی، محمد رضا، ذوالفقاری، علی اصغر و دماوندی، علی اکبر(۱۳۹۵)، تعیین مناطق پتانسیل دار تغذیه آب زیر زمینی با استفاده از روش تلفیقی GIS-AHP (مطالعه موردی شهرستان سمنان)، نشریه علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال دهم، شماره ۳۳
- علیزاده، امین، ۱۳۹۴، اصول هیدرولوژی کاربردی، انتشارات دانشگاه امام رضا: مشهد، تعداد صفحات ۹۴۲.
- قدسی پور، حسین، ۱۳۸۲، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP). تهران: دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- واعظی هیر، عبدالرضا و تبرمایه، مهری، ۱۳۹۵، پتانسیل یابی آب زیرزمینی در سازندهای سخت با بکارگیری روش های تصمیم گیری چند معیاره AHP و SAW (مطالعه موردی: حوضه آلمانه)، نشریه آب و خاک، سال سی ام، شماره ۵ صص ۱۴۶۱-۱۴۷۷.
- یمانی، مجتبی و علیزاده، شهناز، ۱۳۹۳، پتانسیل منابع آب زیرزمینی با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی "AHP" (مطالعه موردی: حوضه آبد- اقلید فارس)، هیدروژئومورفولوژی، شماره ۱، صص ۱۴۴-۱۳۱.

- *Andreo, B., Vias, J., Durán, J. J., Jiménez, P., López-Geta, J. A., & Carrasco, F., 2008, Methodology for groundwater recharge assessment in carbonate aquifers: application to pilot sites in southern Spain. Hydrogeology Journal, 16(5), 911-925.*
- *Dey P.K and Ramcharan. E.K. 2008. Analytic hierarchy process helps select site for limestone quarry expansion in Barbados. Journal of Environmental Management. 88(4):1384-1395*
- *Espinoza, K., Marina, M., Fortuna, . H., & Altamirano, F. (2015). Comparison of the APLIS and Modified-APLIS Methods to Estimate the Recharge in Fractured Karst Aquifer, Amazonas, Per. In Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems (pp. 83-90). Springer, Berlin, Heidelberg.*
- *Farfán H, Corvea JL, Bustamante I (2010) Sensitivity analysis of APLIS method to compute spatial variability of karst aquifers recharge at the National Park of Viñales (Cuba), Advance in research in karst media. Springer, Berlin, pp 19–24. doi:10.1007/978-3-642-12486-0.*
- *FuYeh,Hsin.,Youg-SinCheng.,Hung-I.Lin.,Cheng-HawLee,2016, Mapping groundwater recharge potential zone using a GIS approach in Hualian River, Taiwan, Sustainable Environment Research, Volume 26, Issue , January 2016, Pages 33-43*
- *Kaliraj, S. Chandrasekar, N. and Magesh, N. S.2014,Identification Of Potential groundwater recharge zones in Vaigai upper basin, Tamil Nadu, using GISbased analytical hierarchical process (AHP). J Geo SCI. 7:1385-1401.*
- *Kendy, E., Zhang, Y., Liu, C., Wang, J., & Steenhuis, T., 2004, Groundwater recharge from irrigated cropland in the North China Plain: case study of Luancheng County, Hebei Province, 1949–2000. Hydrological Processes, 18(12), 2289-2302.*
- *Leblanc M, Leduc C, Razack M, Lemoalle J, Dagonne D, Mofor L (2003). Application of remote sensingsand GIS for groundwater modeling of large semiarid areas: example of the Lake Chad Basin, Africa. In: Hydrology of Mediterranean and semiarid regions conference, Montpieller, France. Red Books Series, vol 278. IAHS, Wallingford, pp 186–19*
- *Malczewski, J., 1999, GIS and Multicriteria Decision Analysis: Evaluation Criteria and Criterion Weighting (book). John Wiley and Sons. Inc. 392 p.*
- *Malczewski, J., 1999, GIS and Multicriteria Decision Analysis: Evaluation Criteria and Criterion Weighting (book). John Wiley and Sons. Inc. 392 p.*
- *Marín AI (2009) Los sistemas de información geográfica aplicados a la evaluación de recursos hídricos y a la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos carbonatados. Caso de la Alta Cadena (Provincia de Málaga). Bachelor Thesis, University of Malaga*
- *Mauricio, O., Londo~no Q., Romanelli A., Lourdes Lima , Enrique Massone, H., Emilio Martínez, D.,2016, Fuzzy logic-based assessment for mapping potential infiltration areas in low-gradient watersheds,Journal of Environmental Management 176 (2016) 101-111*
- *Milewski A. Sultan M. Yan E. Becker R. Abdeldayem A. Soliman F. and Abdel Gelil K. 2009. Remote sensing solution for estimating runoff and recharge in arid environments. Journal of Hydrology. 373:1-14.*
- *Milewski A. Sultan M. Yan E. Becker R. Abdeldayem A. Soliman F. and Abdel Gelil K. 2009. Remote sensing solution for estimating runoff and recharge in arid environments. Journal of Hydrology. 373:114.*

- Mokadem, Naziha., Emna, Boughariou., Matías, Mudarra., Fatma Ben, Brahim., Bartolome, Andreo., Younes Hamed., Salem Bouri., 2018, Mapping potential zones for groundwater recharge and its evaluation in arid environments using a GIS approach: Case study of North Gafsa Basin (Central Tunisia), *Journal of African Earth Sciences*, Volume 141, May 2018, Pages 107-117
- Murthy KSR (2000). Groundwater potential in a semi-arid region of Andhra Pradesh-a geographical information system approaches. *International Journal Remote Sensing* 21:1867-1884
- Patil S. G. and Mohite N. M. 2014. Identification of groundwater recharge potential zones for a watershed using remote sensing and GIS. *International Journal of Geomatics & Geosciences*. 4(3): 485-498.
- Patil S. G. and Mohite N. M. 2014. Identification of groundwater recharge potential zones for a watershed using remote sensing and GIS. *International Journal of Geomatics & Geosciences*. 4(3): 485-498.
- Rawat K. S. Mishra A. K. Paul G. and Kumar R. 2012. Estimation of Ground Water Recharge in Shankergarh block of Allahabad (India) using Remote Sensing and Statistical Approach. *Global Journal of Science, Engineering and Technology Issue 1*. 34-48.
- Rawat K. S. Mishra A. K. Paul G. and Kumar R. 2012. Estimation of Ground Water Recharge in Shankergarh block of Allahabad (India) using Remote Sensing and Statistical Approach. *Global Journal of Science, Engineering and Technology Issue 1*. 34-48.
- Sener, B., Süzen, M. L., & Doyuran, V. (2006). Landfill site selection by using geographic information systems. *Environmental Geology*, 49, 376-388.
- Shaban, ., Khawlie, M., & Abdallah, C., 2006, Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zones: the case of Occidental Lebano. *Hydrogeology Journal*, 14(4), 433-443.
- Waikar M. L. and Nilawar A. P. 2014. Identification of Groundwater Potential Zone using Remote Sensing and GIS Technique. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 3(5): 12163-12174.
- Waikar M. L. and Nilawar A. P. 2014. Identification of Groundwater Potential Zone using Remote Sensing and GIS Technique. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 3(5): 12163-12174.