



دوره‌ی ۳۴، شماره‌ی ۴، شماره‌ی پیاپی ۱۳۳، زمستان ۱۴۰۰، صفحه‌های ۳۳-۱۶  
شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2021.353111.1382

مقاله‌ی پژوهشی



# پژوهش‌های آبخیزداری

## تعیین توان منبع‌های آب زیرزمینی دشت ارومیه با سنج‌ها و شاخص‌های ریخت‌سنجی زمین

سمانه دادآفرید

(نویسنده‌ی مسئول)\* دانشجوی دکترای مدیریت حوزه‌های آبخیز، دانشکده‌ی منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ایران

حبیب نظر نژاد

دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده‌ی منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ایران

امین خسروی

دانشجوی دکترای مدیریت حوزه‌های آبخیز، دانشکده‌ی منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ایران

\*رایانامه‌ی نویسنده‌ی مسئول: s.dadafarid@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۷ دی ۱۳۹۹ تاریخ پذیرش: ۳۰ خرداد ۱۴۰۰

### چکیده

تحلیل‌های ریخت‌سنجی زمین نقش مهمی در شناخت شرایط زمین‌آب‌شناسی آبخیزها مانند توان‌یابی و مدیریت منبع‌های آب زیرزمینی دارد. برای ترسیم شبکه‌ی زه‌کشی در چهار زیرحوزه‌ی دریاچه‌ی ارومیه مدل رقومی ارتفاع آب‌شناختی تهیه شد. سنج‌های ریخت‌سنجی خطی، سطحی و پستی‌بلندی برای اولویت‌بندی توان منبع آب زیرزمینی زیرحوزه‌ها محاسبه شد. مقدار میانگین به‌دست آمده از رتبه‌ی سنج‌ها در هر زیرحوزه نزدیک به هم، و اولویت زیرحوزه‌ها به‌ترتیب نازل‌چای، باراندوزچای، شهرچای و روضه‌چای به‌دست آمد. شاخص‌های ریخت‌سنجی موقعیت پستی‌بلندی، شاخص ناهمواری زمین، قدرت بردار، انحنا‌ی سطح و نسبت سطح برای تهیه‌ی نقشه‌ی ارزش مکانی منبع آب زیرزمینی بررسی شد و هر یک از نقشه‌ها با اندازه‌ی یاخته‌ی یکسان در هفت طبقه تهیه و طبقه‌بندی شد. نقشه‌ی شاخص‌های ریخت‌سنجی با وزن‌های یکسان ترکیب شد. نقشه‌ی منطقه‌های توان‌دار آب زیرزمینی با ارزش ۲/۲ تا ۵ به دست آمد. بیش‌ترین ارزش در نقشه‌ی ارزش مکانی منبع آب زیرزمینی در نقطه‌هایی بود که کم‌ترین TPI، کم‌ترین TRI، بیش‌ترین VRM، کم‌ترین انحنا‌ی سطح، و بیش‌ترین نسبت سطح را داشت. نتیجه‌ی به‌دست آمده با بررسی محل چشمه‌های طبیعی و چاه‌های بهره‌برداری منطقه تأیید شد.

واژگان کلیدی: آب زیرزمینی، ارزش مکانی، اولویت‌بندی، سنج‌های ریخت‌سنجی، شاخص‌های ریخت‌سنجی

## مقدمه

تأمین آب آشامیدنی و سالم و بهداشتی از هدف‌های حرکت در مسیر توسعه‌ی پایدار است و رویارویی با بحران کم‌آبی مسأله‌ی حیاتی دانسته می‌شود. از طرفی بارندگی فصلی و پیش‌بینی‌نشده و تبخیر زیاد در منطقه‌های خشک مانع تحقق این هدف است. روی داد خشک‌سالی در زمان‌های مختلف نیز این مسأله را در این منطقه‌ها تشدید می‌کند. آب‌های زیرزمینی ۹۹٪ کل آب شیرین را تشکیل می‌دهند (هاتفی‌اردکانی و رضایی‌راد ۲۰۱۱). بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی از بعضی دیدگاه‌ها بر آب‌های سطحی ترجیح دارد، از جمله می‌توان از دست‌رسی به آن در منطقه‌های دور از حاشیه‌ی رودخانه‌ها، آلوده‌نبودن مجموعه‌ی آن با آلاینده‌های سطحی، هدررفت کم در اثر تبخیر و بهره‌برداری تنظیم‌شده را نام برد.

یکی از آبخیزهای کشور که آب در آن اهمیت ویژه‌ی دارد آبخیز دریاچه‌ی ارومیه است. در مجاورت دریاچه‌ی ارومیه ۲۳ محدوده‌ی پژوهشی، ۲۸ دشت و ۳۵ آبخوان تعریف شده است. جهت جریان آب در این محدوده‌ها به سوی دریاچه است که نقش تعیین‌کننده‌ی در تعادل آبی آن دارد. کشاورزی در دشت ارومیه به منبع آب زیرزمینی وابسته بوده است و ادامه‌ی خشک‌سالی و کاهش سطح آب زیرزمینی سبب شد تا بررسی منبع آب زیرزمینی در این منطقه ضروری باشد. از جمله پژوهش‌هایی که در دشت ارومیه اجرا شده است پژوهش کریمی اصل و حساری (۲۰۱۹) است که در زیرحوزه‌های نازلوچای، روضه‌چای، شهرچای و باراندوزچای به تحلیل کیفیت آب زیرزمینی پرداختند.

تحلیل‌های ریخت‌سنجی در جنبه‌های مختلف پژوهش‌های حوزه‌ها از جمله پژوهش‌های منبع آب به‌کاربرده می‌شود، و نقش مهمی در شناخت شرایط زمین‌شناسی آب حوزه‌ها مانند ظرفیت‌یابی و مدیریت منبع آب زیرزمینی دارد. ارزیابی کمی سنج‌های ریخت‌سنجی حوزه کمک می‌کند که اطلاعات سنگ‌شناسی، وضعیت آب‌شناسی و فرآیندهای درونی و بیرونی حوزه مشخص شود و در شکل‌گیری آب‌های زیرزمینی و پژوهش وضعیت آن‌ها بسیار مفید و مؤثر است (ژانگ و همکاران ۲۰۱۵). محققان زیادی در دنیا روش‌های مختلفی را برای تعیین منطقه‌های احتمالی آب‌های زیرزمینی و منطقه‌های تغذیه‌ی آب‌های زیرزمینی به‌کار برده‌اند. از آن جمله می‌توان به روش‌های ارزیابی چند معیاره (حسن و همکاران ۲۰۱۸)، مدل‌های آماری (دس و همکاران ۲۰۱۹) و مدل‌های یادگیری ماشین (موسوی و همکاران ۲۰۲۰؛ چوبین و همکاران ۲۰۱۹؛ کلانتر و همکاران ۲۰۱۸)

اشاره کرد. پژوهش‌های متعددی بر پایه‌ی تحلیل ریخت‌سنجی حوزه‌های مختلف به روش‌های سنتی شکل گرفته است (هورتون ۱۹۴۵؛ استراهلر ۱۹۶۴) و تحلیل‌های ریخت‌سنجی با GIS و RS، به شکل جامع برای مدیریت منبع آب و شناسایی ظرفیت منبع آب زیرزمینی به‌کار برده شده است (الفتا و همکاران ۲۰۲۰). محققان مختلف اجراپذیری و مطمئن بودن این روش‌ها را اثبات کرده‌اند. نقشه‌ی هر یک از شاخص‌های ریخت‌سنجی  $VRM^3$ ،  $TPI$ ،  $TRI^2$ ، نسبت سطح و انحنا دامنه با مدل رقمی ارتفاع در پژوهش صمدی و همکاران (۲۰۱۶) در حوزه‌ی آبخیز چهل‌چای گلستان ترسیم شد. نتیجه‌ی تحقیق نشان‌دهنده‌ی تأثیر شاخص‌های بررسی‌شده در تعیین ظرفیت نفوذ روان آب در منطقه بود. اسماعیل و کلارک (۲۰۱۶) برای ظرفیت‌یابی منبع آب زیرزمینی در حوزه‌ی به مساحت ۳۴۱ کیلومتر مربع در جنوب استرالیا از سنج‌های ریخت‌سنجی تعداد آب‌راه، طول آب‌راه، نسبت انشعاب، ضریب شکل، ضریب کشیدگی، تراکم زه‌کشی و شیب در محیط GIS بهره بردند. نتیجه نشان داد که منبع آب زیرزمینی بیش‌تر با زمین‌ریخت‌شناسی، شیب، زمین‌شناسی و تراکم زه‌کشی مهار می‌شود که بر پایه‌ی آن ظرفیت منبع آب زیرزمینی به سه ناحیه‌ی کم، متوسط و خوب طبقه‌بندی شد. اسکنتوس و اورانیا (۲۰۱۷) برای طبقه‌بندی شکل‌های زمین در جزیره‌ی ایکاریا در دریای اژه شاخص‌های ریخت‌سنجی  $TRI$ ،  $TPI$ ، عمق دره، و شیب را با QGIS و SAGA GIS محاسبه کردند. طبقه‌بندی‌های به‌دست آمده در این پژوهش با زمین‌شناسی، شیب و ناهمواری‌های پستی‌بلندی منطقه مرتبط بودند. طبقه‌بندی آن‌ها از شکل زمین با  $TPI$  موفق بود. نتیجه‌ی تحقیق لاوال و اومیودوجی (۲۰۱۷) در دلتای نایگر نیجریه برای شناسایی منطقه‌های مستعد سیل با QGIS و SAGA GIS نشان داد که با ترکیبی از چهار شاخص ریخت‌سنجی  $VRM$ ،  $TPI$ ،  $TRI$  و  $TWI^4$  می‌توان منطقه‌های سیل‌زده و ناسیلابی را به‌درستی مشخص کرد. نایرنیتها و همکاران (۲۰۱۹) در آبخیز چیتار هند از سنج‌های زمین‌شناسی، خطواره‌ها، زمین‌ریخت‌شناسی، شیب، تراکم زه‌کشی، خاک و بارش باران و بر پایه‌ی نظر کارشناسان در AHP برای شناسایی آب‌های زیرزمینی احتمالی بهره‌بردند، و آن را در پنج طبقه جا دادند. مقایسه‌ی نتیجه‌ی به‌دست آمده با چاه‌های منطقه صحت تحقیق را تأیید کرد.

نتیجه‌ی تحقیق رحمتی و همکاران (۲۰۱۹) در آبخیز آسارا در کوه‌های البرز ایران عمل کرد هر یک از سنج‌های

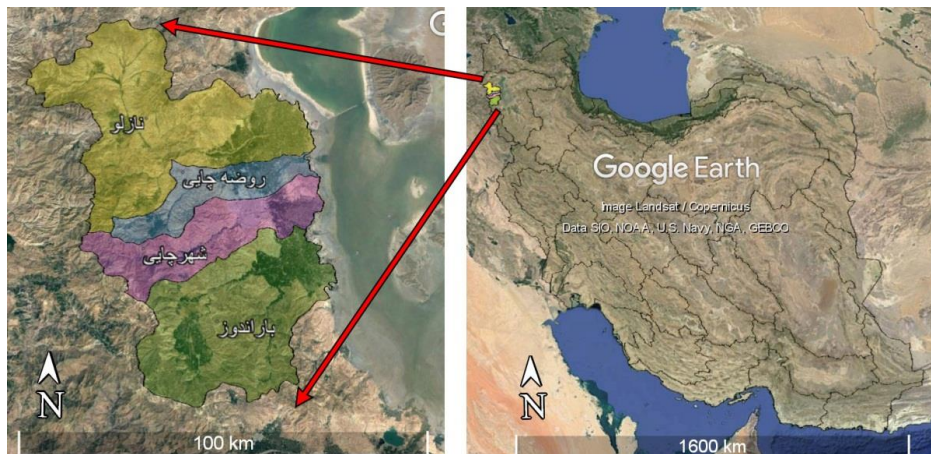
- 1 - Topographic Position Index
- 2 - Terrain Ruggedness Index
- 3 - Vector Ruggedness Measure
- 4 - Topographic Wetness Index

جغرافیایی ۲۳° ۴۴' تا ۱۹° ۴۵' غربی است (شکل ۱). بلندی‌های مشرف به دریاچه بیش‌تر از جنس سنگ‌های آذرین-دگرگونی و کربناته است. آبخوان‌های آب‌زفتی منطقه حاصل فرسایش و حمل سازندهای زمین‌شناسی اطراف است که به سوی دریاچه روند نسبتاً منظمی از تغییر اندازه‌ی ذره‌های آب‌زفتی است. مخروط‌افکنه‌های وسیعی در دامنه‌ی بلندی‌های مشرف به دریاچه در اثر فعالیت رودخانه‌ها ایجاد شده است که دانه‌بندی آن مناسب و نفوذپذیری آن زیاد است. آبخوان‌های منطقه بیش‌تر از نوع آزاد است. شرایط طبیعی خاص منطقه از جمله کوتاه بودن فاصله‌ی حد حوزه‌ها از دریاچه و شیب بسیار زیاد منطقه باعث خروج سریع سیلاب‌ها می‌شود و در نتیجه فرصت نفوذ و تغذیه از سیلاب به کمینه رسیده است (فتحی و همکاران ۲۰۱۱).

ارتفاع TPI، TRI، TWI، LS<sup>۵</sup>، RSP<sup>۶</sup>، VRM<sup>۷</sup>، WEI<sup>۷</sup> جهت، شیب، فاصله از آبراه، انحناى دامنه، سنگ‌شناسی و کاربری زمین را در ترسیم نقشه‌ی منطقه‌های مستعد خطر نشان داد. عمل کرد هر یک از سنجه‌های بررسی شده به نوع خطر بستگی داشت و ترکیب داده‌شده برای بررسی چند خطر در منطقه‌های کوهستانی مفید است. هدف این پژوهش، ظرفیت‌یابی منبع آب زیرزمینی محدوده‌ی پژوهش برپایه‌ی شناخت عوامل‌های ریخت‌سنجی به روشی ساده، سریع و هم‌زمان مطمئن، و ارزیابی آن با نسبت فراوانی است.

### مواد و روش‌ها

منطقه‌ی پژوهش شامل چهار زیرحوزه‌ی نازلوچای، روضه‌چای، شهرچای و باراندوزچای ارومیه در آبخیز دریاچه‌ی ارومیه است که بین عرض جغرافیایی ۶° ۳۷' تا ۵۹° ۳۷' شمالی و طول

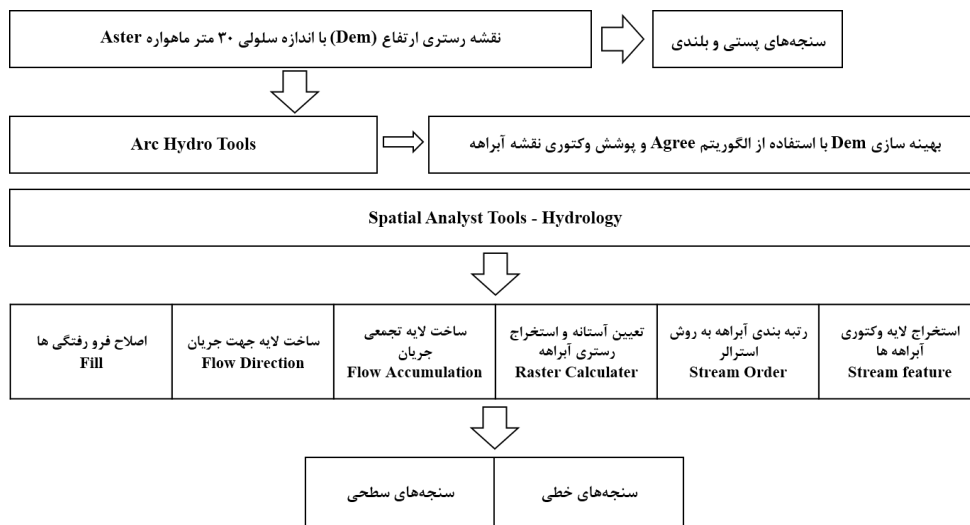


شکل ۱- جای جغرافیایی منطقه‌ی پژوهش.

الگوریتم به ماهیت مدل رقومی ارتفاع و آزمایش و خطا بستگی دارد. برای اطمینان از این‌که بلندی‌ها به‌درستی اندازه‌گیری می‌شود تجزیه‌تحلیل پستی‌بلندی بر مدل رقومی ارتفاع اصلی و قبل از اصلاح اجرا شد. با مدل رقومی ارتفاع ۳۰ متر و بهره‌گیری از پیوست ArcGIS در Spatial Analyst Tool شبکه‌ی زه‌کشی حوزه ترسیم شد. از روش استرالر برای رتبه‌بندی آبراه‌ها بهره برده شد، و سنجه‌های ریخت‌سنجی خطی، سطحی و پستی‌بلندی شمرده شد (شکل ۲).

مدل رقومی ارتفاع منطقه از تصویرهای دریافت‌شده از سنجنده‌ی ASTER با اندازه‌ی یاخته‌ی ۳۰ متر تهیه شد. در بررسی اولیه مشخص شد که به‌خاطر خطا، مسیر آبراه‌ها و شبکه‌ی جریان تجمع‌ی هم‌خوانی زیادی ندارند، بنابراین از روی مدل رقومی ارتفاع خام منطقه مدل رقومی ارتفاع آب‌شناختی تهیه شد. برای رفع خطای آن با پیوست ArcHydro و با الگوریتم Agree گودی‌ها پُر، و بلندی‌ها حذف کرده شد (حصاری و کریم‌زادگان ۲۰۱۹). این الگوریتم با تحمیل ویژگی‌های خطی، مدل ارتفاع رقومی را اصلاح می‌کند. مقدار بهره‌برده شده برای سنجه‌های

- 5 - Length-slope
- 6 - Relative slope position
- 7 - Wind exposition index



شکل ۲- چهار چوب کلی محاسبه‌ی سنجه‌های ریخت‌سنجی.

سنجه‌های ریخت‌سنجی در Microsoft Excel برای هر چهار زیرحوزه‌ی پژوهش محاسبه شد (جدول ۱) (احمدی و ظاهری ۲۰۰۹؛ هاجام و همکاران ۲۰۱۳؛ اسدی نلیوان و همکاران ۲۰۱۵؛ مشرام و همکاران ۲۰۱۹؛ رحمتی و همکاران ۲۰۱۹؛ دوکه و همکاران ۲۰۲۰).

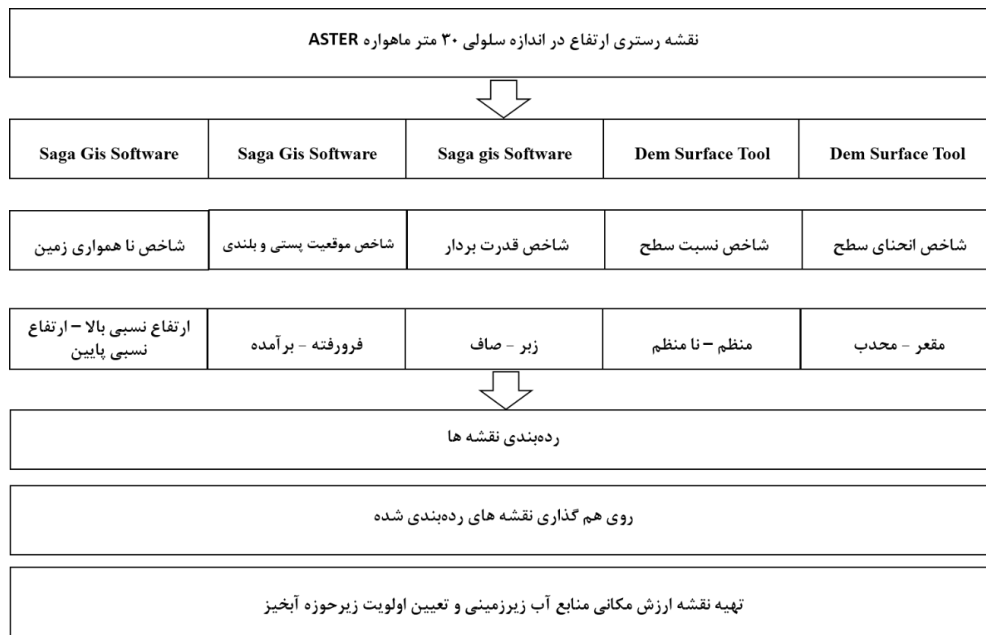
خصوصیت‌های هندسی یا زمین‌سنجی حوزه به مجموعه عامل‌های ساختمانی گفته می‌شود که مقدار آن‌ها برای هر حوزه نسبتاً ثابت، و نشان‌دهنده‌ی وضع ظاهری حوزه است. این عامل‌ها از این نظر مهم است که بین آن‌ها و روان‌آب حوزه هم بستگی هست، و در حوزه‌هایی که در آن‌ها داده‌های اندازه‌گیری آب‌دهی نیست می‌توان از این رابطه‌ها بهره برد.

جدول ۱- سنجه‌های ریخت‌سنجی.

عنوان	توضیح	معادله	منبع
مساحت حوزه	آب‌دهی سیلاب‌ها و حجم روان‌آب حوزه مستقیمانه به مساحت حوزه بستگی دارد.	A	علیزاده ۲۰۱۵
محیط حوزه	طول خط تقسیم آب که حوزه را از حوزه‌های مجاور مجزا می‌کند.	P	علیزاده ۲۰۱۵
طول آبراه	مجموع طول همه رودخانه‌ها و آبراه‌های حوزه	$\sum L_i = L_{n1} + \dots + L_{ni}$	هورتون ۱۹۴۵
طول آبراه رتبه یک	مجموع طول همه آبراه‌های درجه‌ی یک حوزه	$L_{n1}$	استرالر ۱۹۴۶
تعداد آبراه رتبه یک	تعداد همه آبراه‌های درجه‌ی یک حوزه	$N_{n1}$	استرالر ۱۹۴۶
تعداد آبراه	مجموع تعداد همه رودخانه‌ها و آبراه‌های حوزه	$N_w = N_{n1} + \dots + N_{ni}$	علیزاده ۲۰۱۵
طول حوزه	طول مسیر آبراه اصلی از نقطه‌ی خروج تا دورترین قله روی خط تقسیم آب	La	علیزاده ۲۰۱۵
نسبت انشعاب	نسبت تعداد آبراه‌ها در هر رتبه به تعداد آبراه یک درجه‌ی بیشتر	$R_b = N_u / N_{u+1}$	شیوم ۱۹۵۶
تراکم زه‌کشی	نسبت طول همه آبراه‌ها در یک حوزه آبخیز به مساحت آن	$D_d = \frac{\sum L}{A}$	هورتون ۱۹۴۵
طول جریان سطحی	مسافت گذرانده با آب قبل از رسیدن به داخل آبراه که به شکل نصف تراکم زه‌کشی بیان می‌شود.	$L_g = 1/D * 2$	علیزاده ۲۰۱۵
ضریب فشردگی	نسبت محیط حوزه به محیط دایره فرضی که مساحت آن برابر با مساحت حوزه باشد.	$C = \frac{0.28P}{\sqrt{A}}$	هورتون ۱۹۴۵
ضریب گردی	نسبت مساحت حوزه به مساحت دایره‌ی که محیط آن مساوی محیط حوزه باشد.	$R_c = 12.57 \frac{A}{P^2}$	میلر ۱۹۵۳
ضریب شکل	نسبت مساحت حوزه به مجذور طول حوزه. شکل حوزه با مربع مقایسه می‌شود.	$FF = \frac{A}{L^2}$	هورتون ۱۹۴۵
ضریب کشیدگی	نسبت قطر دایره‌ی فرضی هم‌مساحت حوزه به طول حوزه	$Re = \frac{2}{Lm} \left(\frac{A}{\pi}\right)^{0.5}$ $= \left(\frac{A}{0.786}\right)^{0.5} \frac{1}{Lm}$	شیوم ۱۹۵۶
فراوانی آب راه	نسبت بین مجموع تعداد شاخه‌های همه درجه‌ها به مساحت آبخیز	$F_s = \sum \frac{Nu}{A}$	هورتون ۱۹۴۵
بافت زه‌کشی	نسبت تعداد آبراه به محیط حوزه. به عامل‌های طبیعی مانند اقلیم، بارش، پوشش، خاک، ظرفیت نفوذپذیری، و مرحله‌ی تکامل ناهمواری بستگی دارد. به نوع سنگ، نفوذپذیری، وضعیت اقلیمی، پوشش گیاهی، پستی‌بلندی و فرسایش وابسته است و منطقه‌هایی که مقدار سنجی C آن بیش‌تر باشد جزو منطقه‌ی فعال تکتونیکی است.	T=N/P	هورتون ۱۹۴۵
ثابت نگه‌داشت آبراه		C=A/L	شیوم ۱۹۵۶
برجستگی حوزه	عاملی مهم در فهم مشخصه‌های برهنگی حوزه، و حاصل تفاوت بین ارتفاع بیشینه و کمینه در حوزه است.	$B_h = H_{max} - H_{min}$	هدلی و شیوم ۱۹۶۱
عدد ناهمواری	از حاصل ضرب ناهمواری حوزه در تراکم زه‌کشی حوزه به‌دست می‌آید که هر دو بی بعد است.	$R_n = B_h * D_d$	شیوم ۱۹۶۳
شیب حوزه	نسبت اختلاف ارتفاع بالاترین و پایین‌ترین نقطه به جذر مساحت حوزه.	$S = \frac{(H_{max} - H_{min})}{\sqrt{A}}$	علیزاده ۲۰۱۵

تهیه‌ی نقشه‌ی ارزش مکانی منبع آب زیرزمینی بررسی شد (شکل ۳، روزیکا و همکاران ۲۰۱۷).

شاخص‌های ریخت‌سنجی انحنای سطح، نسبت سطح، قدرت بردار، موقعیت پستی‌بلندی و شاخص ناهمواری زمین برای



شکل ۳- نمودار جریان‌ی محاسبه‌ی شاخص‌های ریخت‌سنجی.

نقطه‌های اطراف خود کم شد، و برای مثبت کردن این عددها آن‌ها به توان دو رسانده، از آن‌ها میانگین گرفته، و دوباره ریشه‌ی دوم آن حساب شد، و به نقطه نسبت داده شد (صمدی و همکاران ۲۰۱۶). مقدار شاخص ناهمواری ممکن است به شکل نقشه‌هایی ترسیم شود و توزیع ناهم‌گونی زمین را نشان دهد. برای محاسبه نرم‌افزار Saga GIS به کار برده شد (معادله‌ی ۲، ریلی و همکاران ۱۹۹۹).

$$TRI = \sqrt{\sum_{p=1}^8 ZMd}$$

(۲)

$P$  = تعداد نقطه‌ی اطراف

$ZMd$  = میانگین تفاضل هشت نقطه اطراف هر نقطه

#### شاخص قدرت بردار

#### (VRM) Vector Ruggedness Measure

پراکندگی بردار عبارت است از تنوع جهت‌بندی سطح زمین. برای نمایش این سنججه بردارهای عمود بر سطح زمین به کار برده شد. با تغییر پراکندگی بردار در یک سطح، اندازه‌ی بردار برآیندی که از مجموع بردارها به‌دست می‌آید نیز تغییر می‌کند (صمدی و همکاران ۲۰۱۶). شاخص قدرت بردار نیز با در نظر گرفتن تغییر ارتفاع یک نقطه به‌عنوان نقطه‌ی مرکزی، و هشت نقطه‌ی اطراف آن ناهموار بودن مکان را اندازه‌گیری می‌کند. برای محاسبه‌ی شاخص قدرت بردار (معادله‌های ۳) نرم‌افزار Saga GIS به کار برده شد.

شاخص موقعیت پستی‌بلندی ارتفاع هر یاخته در مدل رقومی ارتفاع را با میانگین ارتفاع همسایگی مشخص در اطراف آن یاخته مقایسه می‌کند. از آن‌جا که تنها ورودی مدل ارتفاع رقومی است، شاخص موقعیت پستی‌بلندی تقریباً در هر نقطه تولیدشدنی است. عددهای به‌دست آمده‌ی مقدار شاخص موقعیت پستی‌بلندی مثبت نشان‌گر مکان‌هایی است که زیادتر از میانگین محیط اطراف خود است، که همسایگی تعریف شده است (محدب و یا ستیغ‌ها). مقدار منفی شاخص موقعیت پستی‌بلندی مکان‌هایی را نشان می‌دهد که از محیط اطراف آن‌ها کم‌تر است (تقعرها و گودال‌ها). مقدار شاخص موقعیت پستی‌بلندی نزدیک به صفر نیز منطقه‌های مسطح (جایی که شیب نزدیک به صفر است) و یا منطقه‌های با شیب ثابت (جایی که شیب نقطه به طور ثابتی بزرگ‌تر از صفر باشد) است (ویس ۲۰۰۱).

برای محاسبه‌ی شاخص موقعیت پستی‌بلندی در نرم‌افزار Saga GIS ارتفاع هر یاخته در مدل رقومی ارتفاع با میانگین ارتفاع یاخته‌های همسایه بررسی شد (معادله‌ی ۱). ارتفاع میانگین از مقدار ارتفاع در مرکز کم می‌شود (مکرم و نگهبان ۲۰۱۴).

$$TPI = Z0 - \sum n - 1 \frac{Zn}{n} \quad (1)$$

$Z0$  = ارتفاع نقطه‌ی مدل با ارزیابی

$Zn$  = ارتفاع از شبکه

$N$  = تعداد کل نقطه‌ی اطراف در نظر گرفته‌شده در ارزیابی

شاخص ناهمواری زمین اختلاف ارتفاع نقطه با هشت نقطه‌ی اطراف خود است. برای محاسبه‌ی آن ارتفاع هر نقطه از



$$VRM = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2 + \bar{z}^2} \quad (3)$$

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^N xi, xi = \sin \theta \cos \Phi$$

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^N yi, yi = \sin \theta \sin \Phi$$

$$\bar{z} = \sum_{i=1}^N zi, zi = \cos \theta$$

$$\theta = \frac{(90 - \text{latitude})\pi}{180}$$

$$\Phi = \frac{(\text{longitude})\pi}{180}$$

مدل‌های ارتفاعی رقومی به کار برده می‌شود که آن‌ها را روی کرد ایوانز و روی کرد زونبرگن و تورن می‌نامند. هر دو روش پنجره‌ی یاخته‌ی متحرک ۳×۳ به کار می‌برد و انحنا‌ی سطح را از نه یاخته‌ی رستر در پنجره محاسبه می‌کند. تفاوت این روی کردها در این است که روی کرد Evans با چندجمله‌ی شش سنجه‌ی منحنی را به نه نقطه‌ی ارتفاعی متناسب می‌کند، که فقط تناسب خوبی برای نه نقطه است و لزومی ندارد که از همه‌ی نقطه‌ها عبور کند و خطاهای تصادفی کوچک را در ترکیب اصلی DEM حذف می‌کند. از نظر ریاضی روش ایوانز دقیق‌تر از روش زونبرگر و تورن است. روش زونبرگر و تورن از چندجمله‌ی نه سنجه‌ی مرتبه‌ی زیادتر بهره می‌گیرد که در آن همه‌ی نه نقطه به کار برده می‌شود. تورن با گذاشتن منحنی در هر نه نقطه استدلال کرد که این روش در منطقه‌های ناهموار با انحنا‌ی بیش‌تر مناسب‌تر است. در GIS روش زونبرگر و تورن، و در پیوست Dem Surface روش ایوانز به کار برده شد.

از انحناها، انحنا‌ی پروفیل، انحنا‌ی پلان، انحنا‌ی کل و انحنا‌ی عمومی است. مقدار انحنا‌ی عمومی (جنیس ۲۰۱۳) و به روش ایوانز محاسبه شد (معادله‌ی ۵). سطح‌های محدب مقدار مثبت و سطح‌های مقعر مقدار منفی دارند.

$$\text{General Curvature} = -2(r + t), \quad \text{گزینشی ضرب در } 100 \quad (5)$$

$$r = \frac{(Z1 + Z3 + Z4 + Z6 + Z7 + Z9 - 2(Z2 + Z5 + Z8))}{3w^2}$$

$$t = \frac{(Z1 + Z2 + Z3 + Z7 + Z8 + Z9 - 2(Z4 + Z5 + Z6))}{3w^2}$$

Z نقطه‌ی بالامدگی و W اندازه‌ی یاخته است.

### شاخص نسبت سطح Surface Ratio

پیوست Dem Surface Tool امکان می‌دهد که از لایه‌ی رستر ارتفاعی، لایه‌ی رستری نسبت سطح ایجاد شود. مقدار یاخته‌ی برای این رستر جدید نسبت مساحت سطح به سطح پلانیمتریک را در محدوده‌ی یاخته‌ها نشان می‌دهد. نسبت سطح شاخص مفید از زبری پستی‌بلندی و پیچ‌وتابی را فراهم می‌کند. نسبت مساحت هر ناحیه‌ی تعریف شده در عارضه را ممکن است با تقسیم کردن مساحت آن ناحیه بر مساحت پلانیمتری محاسبه کرد. این مقدار ممکن است از ۱ تا بی‌نهایت باشد، اما در عمل به‌ندرت به ۳ می‌رسد (جنیس ۲۰۱۳).

نسبت سطح نسبت بین سطح (واقعی) منطقه و سطح هموار در یک سطح مشخص را زیر ارزیابی می‌کند (معادله‌ی ۴، صمدی و همکاران ۲۰۱۶)

$$\text{Ratio} = \frac{C^2}{\cos(S(\frac{\pi}{180}))} \quad (4)$$

C = اندازه‌ی یاخته، S = شیب

### شاخص انحنا‌ی دامنه (General Curvature)

شکل دامنه‌ی محور از درازمدت در پژوهش‌های زمین‌ریخت‌شناسی بررسی شده است. دامنه‌ها نه تنها بخش بزرگی از منظره‌ی طبیعی را شامل می‌شود بل که قسمت کاملی از سامانه‌ی زه‌کشی، آب و رسوب را برای رودخانه تأمین می‌کند. انحنا‌ی خاصیت سه بعدی از سطح دو بعدی تعریف می‌شود، و نشان‌دهنده‌ی اندازه‌ی انحراف سطح از صاف بودن و یا محدب و مقعر بودن دامنه است (صمدی و همکاران ۲۰۱۶). با افزایش انحنا نیروی کششی در طول سطح افزایش می‌یابد و باعث تولید شکستگی‌ها می‌شود (بابلی موخر و همکاران ۲۰۱۹).

دو روش عمومی هست که معمولاً برای محاسبه‌ی انحنا‌ی

فراوانی احتمال ظهور ویژگی یا پدیده‌ی خاص است که هر چه قدر مقدار آن در طبقه بزرگ‌تر باشد بیان‌گر اهمیت یا نقش بیش‌تر آن است (معادله‌ی ۷، عرفانیان و همکاران ۲۰۱۶).

$$FR = \frac{A/B}{C/D} \quad (7)$$

A تعداد منبع آب در طبقه، B تعداد کل منبع آب در پژوهش، C تعداد نقطه‌های طبقه، و D تعداد کل نقطه‌های پژوهش است.

اصلاح مدل رقومی ارتفاع برای مدل‌سازی آب‌شناختی در چهار زیرحوزه‌ی نازلوچای، روضه‌چای، شهرچای و باراندوزچای ارزیابی شد. برای ترسیم مدل رقومی ارتفاع آب‌شناختی که با الگوریتم AGREE و درپوست Arc Hydro اجرا شد، یاخته‌های تجمعی پیوسته و افزایشی در مسیر رودخانه گذاشته شد.

ظرفیت منبع آب زیرزمینی از شرایط ریخت‌سنجی حوزه، و سنجه‌های ریخت‌سنجی خطی از نحوه‌ی اتصال آب‌راه‌ها و شرایط پستی‌بلندی حوزه تأثیر می‌گیرد (هاجم و همکاران ۲۰۱۳) حوزه‌ی زه‌کشی چهار زیرحوزه‌ی نازلوچای، روضه‌چای، شهرچای و باراندوزچای به روش طبقه‌بندی استرالر ترسیم شد (شکل ۴، جدول ۲).

برای ترکیب‌کردن نقشه‌ها مدل شاخص هم‌پوشانی به‌کاربرده شد. این مدل امکان ترکیب‌کردن نقشه‌های مختلف را می‌دهد. روش ارزیابی چندمعیاره به‌کاربرده شد (معادله‌ی ۶).

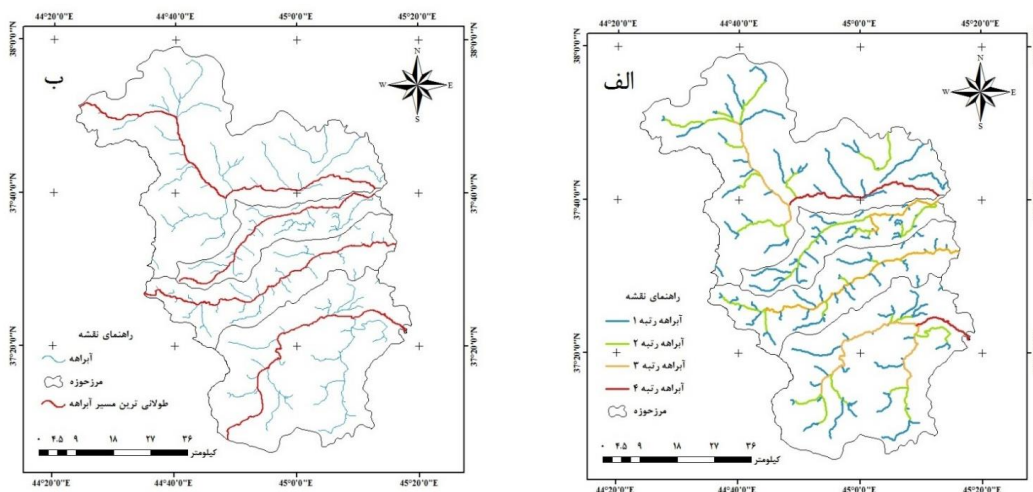
$$S = \frac{\sum S_{ij} W_i}{\sum W_i} \quad (6)$$

S امتیاز سطح‌ها،  $W_i$  وزن لایه‌ی ورودی  $i$  ام، و  $S_{ij}$  امتیاز طبقه‌ی  $j$  ام از لایه‌ی  $i$  ام است.

در این روش هر نقشه برپایه‌ی تأثیر و اهمیت نسبت به دیگری وزنی می‌گیرد. نقشه‌ی شاخص‌های ریخت‌سنجی انحنا سطح، نسبت سطح، قدرت بردار، موقعیت پستی‌بلندی و شاخص ناهمواری زمین با وزن‌های یکسان ترکیب کرده شد. هر نقشه با اندازه‌ی یاخته‌ی یکسان در هفت طبقه با ارزش یک تا هفت تهیه و طبقه‌بندی شد، و به منطقه‌هایی با بیش‌ترین ظرفیت ارزش هفت و با کم‌ترین ظرفیت ارزش یک نسبت داده شد. ترکیب لایه‌ها در Arc GIS با پوست Spatial Analyst و فهرست Raster Calculator انجام شد. حاصل ترکیب لایه‌ها نقشه‌ی نهایی مکان‌یابی منبع آب زیرزمینی است. نقشه‌ی رستری به‌دست آمده ارزش مکانی منطقه از دید ظرفیت منبع آب زیرزمینی را نشان می‌دهد.

برای ارزیابی بین طبقه‌ها در نقشه‌ی ارزش مکانی ظرفیت منبع آب زیرزمینی شاخص نسبت فراوانی به‌کاربرده شد. نسبت





شکل ۴- حوزه زه کشی نازلوچای، روضه چای، شهرچای و باراندوزچای. الف- رتبه بندی آبراه، ب- طولانی ترین مسیر آبراه.

جدول ۲- مقدار سنجه های ریخت سنجی زیرحوزه های بررسی شده.

عنوان		طول محاسبه شده ی زیرحوزه (کیلومتر)				
نماد	عنوان	نازلوچای	روضه چای	شهرچای	باراندوزچای	
سنجی	S	زیرحوزه				
	A	مساحت	۱۸۲۲,۰۰۰۵۳	۴۴۰,۰۰۴۷۷	۷۰۳,۶۴۳۳۳	۱۳۴۸,۲۶۰۵۳
	P	محیط	۲۷۴,۶۴۱۰۱	۱۴۱,۲۹۹۴۶	۱۷۰,۷۹۹۹۰	۱۸۶,۶۸۶۸۹
	€L	طول آبراه	۳۳۹,۹۸۱۳۱	۱۷۰,۵۴۱۴۰	۱۸۱,۵۵۶۳۶	۲۵۹,۸۳۸۱۷
	Ln1	طول آبراه رتبه ۱	۱۶۹,۷۲۸	۸۹,۸۶۶	۹۳,۰۷۴	۱۲۱,۴۵۵
	Nn1	تعداد آبراه رتبه ۱	۳۸	۳۰	۳۴	۳۳
خطی	Nw	تعداد آبراه	۷۰	۷۴	۶۳	۶۴
	La	طول حوزه	۹۸,۶۱۵	۶۳,۶۳۸	۷۹,۶۵۷	۷۸,۷۱۰
	BR	نسبت انشعاب	۱,۸۷۴۷	۱,۱۶۶۷	۱,۸۵۱۰	۶,۴۱۰۷
	Dd	تراکم زه کشی	۰,۱۸۶۵۹۷۸	۰,۳۸۷۵۸۹۹	۰,۲۵۸۰۲۳۳	۰,۱۹۲۷۲۱۰
	Lg	طول جریان سطحی	۲,۶۷۹۵۵۹۸	۱,۲۹۰۰۲۳۳	۱,۹۳۷۸۰۹۶	۲,۵۹۴۴۲۳۶
	Cc	ضریب فشردگی	۱,۸۰۱۵۶۱۸۲۱	۱,۸۸۶۱۲۲۳۰۳	۱,۸۰۲۸۹۰۵۱۱	۱,۴۲۳۵۹۰۰۱۴
سطحی	Rc	ضریب گردی	۰,۳۰۳۳۹۴۲۶۲	۰,۲۷۶۷۹۹۹۴۶	۰,۳۰۲۹۴۷۲۳۷	۰,۴۸۵۸۱۷۶۲۳
	Rc	ضریب شکل	۰,۱۸۷۳۵۳۸۵۹	۰,۱۰۸۶۴۷۷۰۴	۰,۱۱۰۸۹۴۰۵۷	۰,۲۱۷۶۲۸۸۶۹
	Re	ضریب کشیدگی	۰,۴۸۸۵۳۵۹۱۱	۰,۳۷۲۰۲۷۸۴۷	۰,۳۷۵۸۵۴۱۱۳	۰,۵۲۶۵۳۰۳۶۸
	Fs	فراوانی آبراه	۰,۰۳۸۴۱۹۳۰۸	۰,۱۶۸۱۷۹۹۹۷	۰,۰۸۹۵۳۳۹۹۷	۰,۰۴۷۴۶۸۵۷۱
	Rtc	بافت زه کشی	۰,۲۵۴۸۷۸۱۷۷	۰,۵۲۳۷۱۰۴۱۵	۰,۳۶۸۸۵۲۶۷۶	۰,۳۴۲۸۲۰۰۱
	C	ثابت نگاه داشت آب- راه	۵,۳۵۹۱۱۹۶۲۵	۲,۵۸۰۰۴۶۶۳۹	۳,۸۷۵۶۱۹۲۶۷	۵,۱۸۸۸۴۷۱۱
پستی بلندی	Bh	برجستگی حوزه	۲,۲۹	۲,۳۰	۲,۳۰	۲,۱۹
	Rn	عدد ناهمواری	۰,۴۲۷۸۶۸۷۸۵	۰,۸۹۳۰۰۷۱۱۳	۰,۵۹۵۷۷۵۷۵۶	۰,۴۲۳۶۰۰۸۴۱
	Sm	شیب	۵,۳۷	۱۰,۹۸	۸,۷۰	۵,۹۹

چای، شهرچای، نازلوچای و باراندوزچای به ترتیب شکل کشیده‌تری دارد، و فرصت بیش‌تری برای تغذیه‌ی منبع آب زیرزمینی خواهد داشت. ضریب فشردگی نشان‌دهنده‌ی انحراف شکل آبخیز از حوزه‌ی دایره‌یی است که مقدار آن هر چه از یک بزرگ‌تر باشد حوزه حالت کشیده‌تر و فرصت بیش‌تری برای نفوذ آب دارد (اسدی نلیوان و همکاران ۲۰۱۵). فراوانی آب‌راه‌ها نشان‌دهنده‌ی بافت شبکه‌ی زه‌کشی است (هاجم ۲۰۱۳) و زیرحوزه‌های با فراوانی کم‌تر آب‌راه، دارای پستی‌بلندی کم‌تر و سطح‌ها نفوذپذیرتر است (فلاح سورکی و همکاران ۲۰۱۶). بافت زه‌کشی سنجی مهمی در تحلیل نفوذپذیری سازند است و هرچه بافت زه‌کشی درشت‌تر باشد، نفوذپذیری بیش‌تر است (احمدی و طاهری ۲۰۰۹). زیرحوزه‌های نازلوچای، باراندوزچای، شهرچای و روضه‌چای (۰,۲۵ - ۰,۳۴ - ۰,۳۶ - ۰,۵۲) به ترتیب دارای درشت‌ترین بافت زه‌کشی بود. سنجی ثابت نگاه‌داشت آب‌راه منعکس‌کننده‌ی نفوذپذیری و مهار انتقال جریان به خروجی آبخیز است (شریفی‌کیا و همکاران ۲۰۱۸). زیرحوزه‌ی نازلوچای با بیش‌ترین ثابت نگاه‌داشت آب‌راه، کم‌ترین نفوذ و زیرحوزه‌ی روضه‌چای با کم‌ترین ثابت نگاه‌داشت آب‌راه، بیش‌ترین نفوذ را داشت.

سنجه‌های پستی‌بلندی حوزه نشان‌دهنده‌ی اندازه‌ی فرسایش و شیب حوزه است. هر چه برجستگی حوزه بیش‌تر باشد نشان‌دهنده‌ی شدت جریان آب، نفوذ کم و مقدار زیاد روان‌آب است (آیدیده و همکاران ۲۰۱۱). زیرحوزه‌ی باراندوزچای با عدد برجستگی ۲/۱۹ شیب ملایم‌تری از زیرحوزه‌های دیگر دارد و احتمال تغذیه‌ی منبع آب زیرزمینی در آن بیش‌تر است. با احتساب عدد ناهمواری، زیرحوزه‌های باراندوزچای و نازلوچای (۰,۴۲) جلگه‌یی، و زیرحوزه‌های روضه‌چای (۰,۸۹) و شهرچای (۰,۵۹) تپه‌ماهوری در نظر گرفته می‌شود. شیب پستی‌بلندی زیاد نیز نشان‌دهنده‌ی نفوذپذیری کم و ضریب روان‌آب زیاد است. کم‌ترین شیب متعلق به زیرحوزه‌ی نازلوچای (۵,۳۷) بود. بر پایه‌ی ظرفیت منبع آب زیرزمینی هر زیرحوزه نسبت به سایر زیرحوزه‌ها رتبه‌ی یک، دو، سه و چهار گرفت. با محاسبه‌ی میانگین رتبه‌های داده‌شده به هر زیرحوزه اولویت‌بندی ظرفیت منبع آب زیرزمینی به‌دست آمد (جدول ۳). کم‌ترین میانگین دارای ظرفیت بیش‌تر و بیش‌ترین میانگین دارای ظرفیت کم‌تر بود.

مساحت و محیط حوزه بر میانگین روان‌آب تأثیر دارد (هاجم و همکاران ۲۰۱۳) و هر اندازه سطح حوزه نسبت به محیط آن بیش‌تر باشد ظرفیت بیش‌تری برای دریافت باران دارد. آب‌راه‌های درجه‌ی کم (تاسه) معمولاً در ناحیه‌های بلند و ناحیه‌های با پستی‌بلندی زیاد جریان دارد، در حالی که آب‌راه‌های درجه‌ی چهار و پنج معمولاً در دشت‌ها جریان دارد (احمدی و طاهری ۲۰۰۹). هرچه تعداد آب‌راه‌های رتبه‌ی کم بیش‌تر باشد نشانه‌ی نفوذپذیری کم است (پروین ۲۰۲۰). تعداد آب‌راه‌های رتبه‌ی یک برای زیرحوزه‌های نازلوچای، روضه‌چای، شهرچای و باراندوزچای به ترتیب ۵۴٪، ۴۱٪، ۵۴٪ و ۵۲٪ از تعداد کل آب‌راه‌ها در هر زیرحوزه بود.

طول آب‌راه نیز در تأثیر شرایط زمین‌ریخت‌شناسی حوزه است، و هر چه طول آب‌راه‌های رتبه‌ی کم بیش‌تر باشد نشانه‌ی شیب کم و سازند نفوذپذیر است (وایکار و نیلاوار ۲۰۱۴). طول آب‌راه‌های رتبه‌ی یک برای زیرحوزه‌های نازلوچای، روضه‌چای، شهرچای و باراندوزچای به ترتیب ۵۰٪، ۵۳٪، ۵۱٪ و ۴۷٪ از طول کل آب‌راه در هر زیرحوزه بود.

نسبت انشعاب نشان‌دهنده‌ی پیچیدگی ساختمان و نفوذپذیری سطح زمین است و با نفوذپذیری رابطه‌ی عکس دارد (فلاح سورکی و همکاران ۲۰۱۶). بیش‌ترین اندازه‌ی نسبت انشعاب در زیرحوزه‌ی باراندوزچای بود که به دلیل تنوع سنگ‌شناختی در زیرحوزه است. اگر تراکم زه‌کشی منطقه کم باشد نشان‌دهنده‌ی این است که ساختار زمین‌شناسی آن سفت و محکمی بوده است و اجازه‌ی تشکیل آب‌راه نداده است، و هر چه تراکم زه‌کشی زیادتر باشد نشان‌دهنده‌ی مستعد بودن به فرسایش است (احمدی و طاهری ۲۰۰۹). هرچه عدد تراکم زه‌کشی کم‌تر باشد نفوذپذیری زیادتر است؛ کم‌ترین تراکم زه‌کشی به ترتیب در زیرحوزه‌های نازلوچای، باراندوزچای، شهرچای و روضه‌چای بود.

طول جریان سطحی یکی از سنجه‌های مستقل است که با متوسط شیب آب‌راه رابطه‌ی معکوسی دارد (قادری و فاضلی ثانی ۲۰۱۶). سنجه‌های ضریب شکل، ضریب گردی و ضریب کشیدگی نشان‌دهنده‌ی شکل حوزه، ضریب روان‌آب و اندازه‌ی نفوذ در حوزه است و هر چه بزرگ‌تر باشد شکل حوزه نزدیک به دایره‌یی و زمان تمرکز کم‌تر است و نفوذپذیری نیز کاهش می‌یابد (محمد و همکاران ۲۰۱۸).

عددهای محاسبه شده برای سنجه‌های ضریب گردی، ضریب شکل و ضریب کشیدگی نشان می‌دهد که زیرحوزه‌های روضه

جدول ۳- رتبه‌ی زیرحوزه‌های بررسی‌شده بر پایه‌ی سنجه‌های ریخت‌سنجی.

باراندوزچای	شهرچای	روضه‌چای	نازلوچای	سنجه
۱	۳	۴	۲	مساحت نسبت به محیط
۴	۲	۱	۳	طول آبراه رتبه‌ی ۱ نسبت به کل طول آبراه‌ها
۲	۳	۱	۳	تعداد آبراه رتبه‌ی ۱ نسبت به کل آبراه‌ها
۳	۲	۴	۱	طول حوزه نسبت به مساحت حوزه
۴	۲	۱	۳	نسبت انشعاب
۲	۳	۴	۱	تراکم زه‌کشی
۳	۲	۱	۴	طول جریان روی زمینی
۴	۲	۱	۳	ضریب شکل (فشرده‌گی، گردی، شکل، کشیدگی)
۲	۳	۴	۱	فراوانی آبراه
۲	۳	۴	۱	بافت زه‌کشی
۳	۲	۱	۴	ثابت نگه‌داشت آبراه
۱	۳	۳	۲	برجستگی حوزه
۱	۳	۴	۲	عدد ناهمواری
۲	۳	۴	۱	شیب
۲,۴۳	۲,۵۷	۲,۶۴	۲,۲۱	میانگین

عددها نشان‌دهنده‌ی رتبه‌ی سنجه در هر زیرحوزه است

۹۹٪ از منطقه‌ی دارای پراکندگی بردار کم‌تر از مقدار میانه (۰ تا ۰,۳۹) است. طبقه‌بندی نقشه در هفت طبقه برابر با ارزش یک تا هفت است که ارزش بیش‌تر در منطقه‌هایی با پراکندگی بردار زیادتر است.

محدوده‌ی تغییر مقدار شاخص انحناى سطح میان ۳۷- و ۳۷+ است و طبقه‌بندی نقشه در دو طبقه نشان داد که ۵۹,۵٪ از منطقه دارای انحراف از سطح محدب با مقدار انحناى سطح مثبت (۳۷- ۰) و ۴۰,۵٪ از منطقه دارای انحراف از سطح مقعر با مقدار انحناى سطح منفی (۰- ۳۷-) است. طبقه‌بندی نقشه در هفت طبقه برابر با ارزش یک تا هفت شکل گرفت. بیش‌ترین ارزش به سطح مقعر با کم‌ترین مقدار داده شد.

محدوده‌ی تغییر مقدار شاخص نسبت سطح بین ۱ و ۵,۱۲ است و بیش‌از ۹۹٪ از نقطه‌ها دارای مقدار نسبت سطح بین ۱ و ۱,۵ است و فقط ۰,۰۰۱٪ از نقطه‌ها مقداری زیادتر از ۳ دارد. طبقه‌بندی نقشه در هفت طبقه برابر با ارزش یک تا هفت است. نسبت سطح بیش‌تر دارای ظرفیت بیش‌تر برای دریافت باران است و در نتیجه ارزش زیادی را در طبقه‌بندی دارد.

همه‌ی نقشه‌های وزن‌دهی شده بر پایه‌ی روش ارزیابی چند معیاره‌ی هم‌پوشانی داده شد. وزن‌های محاسبه‌شده نشان‌دهنده‌ی تأثیر یکسان شاخص‌های ریخت‌سنجی انحناى سطح، نسبت سطح، قدرت بردار، موقعیت پستی‌بلندی و شاخص ناهمواری زمین در ظرفیت‌یابی منبع آب زیرزمینی

شکل ۵ به‌ترتیب نقشه‌ی شاخص‌های پستی‌بلندی، ناهمواری زمین، قدرت بردار، انحناى سطح و نسبت سطح را نشان می‌دهد.

محدوده‌ی تغییر مقدار ناهمواری زمین بین ۱۵,۷- و ۲۶,۱+ است، بیش‌از ۹۹٪ از نقطه‌ها دارای ناهمواری زمین بین ۵+ و ۵- است، ۲۹٪ از منطقه دارای مقدار ناهمواری زمین منفی (۵- تا ۰,۵-)، ۵۰٪ از منطقه دارای مقدار ناهمواری زمین صفر و نزدیک به صفر (۰,۵- تا ۰,۵+)، و ۲۱٪ از منطقه دارای ناهمواری زمین مثبت (۰,۵ تا ۲۶,۱) است. منطقه‌های مرتفع دارای ناهمواری زمین مثبت و منطقه‌های مسطح و یا با تغییر شیب کم دارای ناهمواری زمین صفر و نزدیک به صفر و منطقه‌های پست دارای ناهمواری زمین منفی است (شکل ۵-الف). طبقه‌بندی نقشه در هفت طبقه برابر با ارزش یک تا هفت شکل گرفت که با توجه به این‌که احتمال ذخیره‌ی آب در منطقه‌های پست هست هر چه ناهمواری زمین کم‌تر باشد ارزش بیش‌تری می‌گیرد.

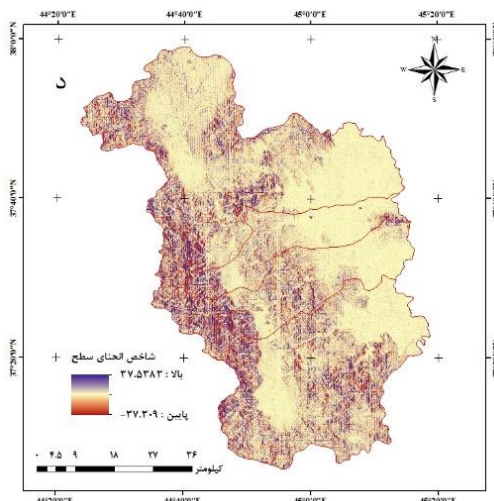
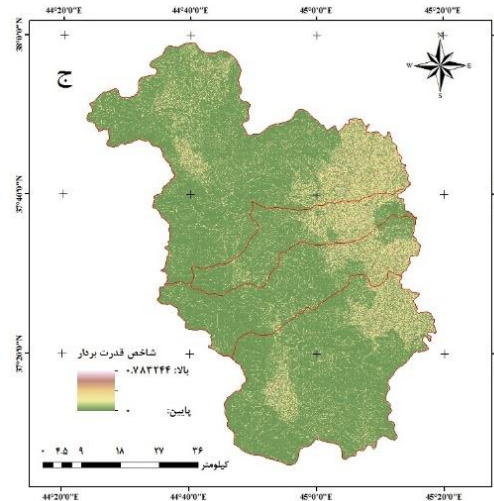
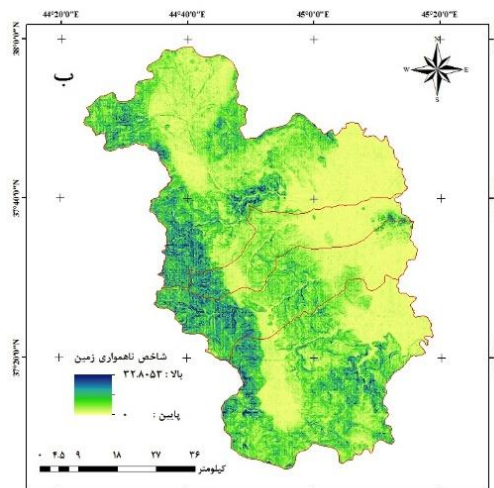
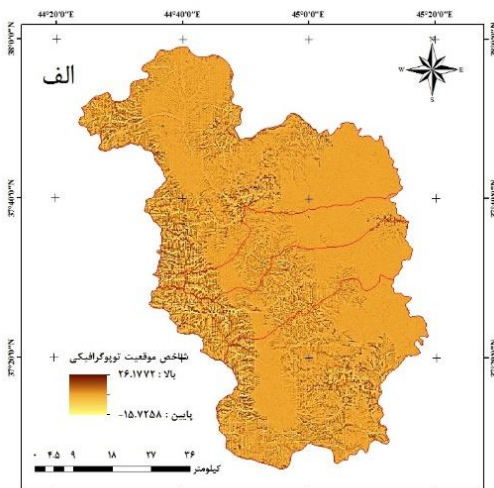
محدوده‌ی تغییر مقدار شاخص ناهمواری زمین بین صفر و ۳۲,۸ است و بیش‌از ۹۷٪ از نقطه‌ها دارای شاخص ناهمواری زمین میان صفر و هشت است. هر چه شاخص ناهمواری زمین کم‌تر باشد ظرفیت منبع آب زیرزمینی بیش‌تری دارد، پس طبقه‌بندی نقشه در هفت طبقه برابر با ارزش یک تا هفت است. محدوده‌ی تغییر مقدار قدرت بردار بین ۰ و ۰,۷۸ است و

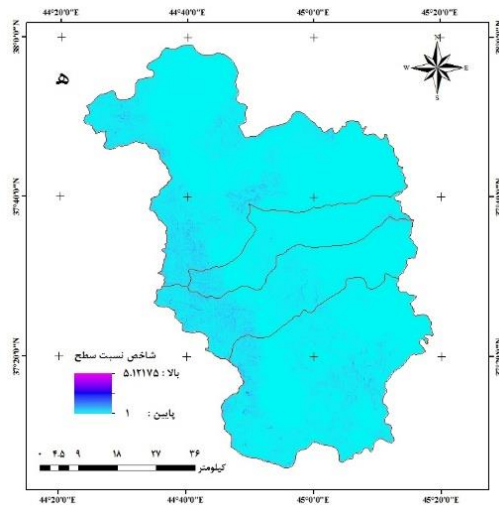
بلندی  $(0,2 \times)$  + (شاخص ناهمواری زمین  $0,2 \times$ )  
 نقشه‌ی منطقه‌های توان‌دار آب زیرزمینی حوزه‌های پژوهش با  
 ارزش ۲,۲ تا ۵ به‌دست آمد، و نتیجه‌ی به‌دست آمده با بررسی  
 محل چشمه‌های طبیعی و چاه‌های بهره‌برداری (شکل ۶-ب) و  
 با شاخص نسبت فراوانی (جدول ۴) تأیید شد.

است. نقشه‌ی ارزش مکانی (شکل ۶-الف) از ترکیب لایه‌های  
 وزنی به دست آمد که مکان‌های با ارزش زیادتر (رنگ تیره در  
 نقشه) بیش‌ترین ظرفیت منبع آب زیرزمینی دارد.  
 ارزش مکانی منبع آب زیرزمینی = (انحنای سطح  $0,2 \times$ ) +  
 (نسبت سطح  $0,2 \times$ ) + (قدرت بردار  $0,2 \times$ ) + (موقعیت پستی-)

جدول ۴- شاخص نسبت فراوانی طبقه‌های ظرفیت منبع آب زیرزمینی.

طبقه	ظرفیت	تعداد نقطه	تعداد چاه و چشمه	FR
۱	به شدت خشک	۲۲	۰	۰
۲	خیلی خشک	۵۶۸	۰	۰
۳	خشک متوسط	۱۷۰۰۹	۱	۰,۰۰۱۸
۴	طبیعی	۵۲۱۲۵۷۴	۱۵۷۶۸	۰,۹۲۷۱
۵	مرطوب متوسط	۲۸۴۹۵۶	۲۶۰۶	۲,۸۰۲۹
۶	خیلی مرطوب	۱۸۲۲۹	۱۷۶	۲,۹۵۹۲
۷	به شدت مرطوب	۵۹	۲	۱۰,۳۸۹۶



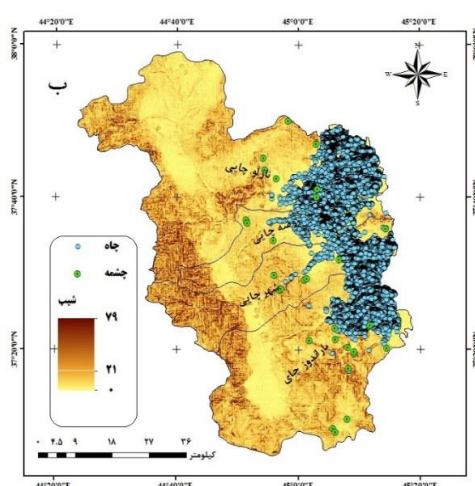
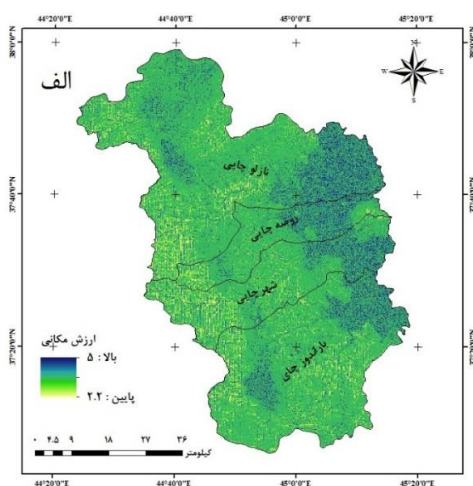


شکل ۵- نقشه‌ی شاخص‌ها در زیرحوزه‌های بررسی شده. الف. پستی‌بلندی، ب. ناهمواری زمین، ج. قدرت بردار، د. نسبت سطح، ه. انحنای سطح.

باراندوز: ۲،۴۳) ولی به‌طور متوسط اولویت‌بندی زیرحوزه‌ها از دید ظرفیت منبع آب زیرزمینی با تأثیر سنج‌های ریخت‌سنجی به‌ترتیب نازلوچای، باراندوزچای، شهرچای و روضه‌چای است. نتیجه‌ی به‌دست آمده از این تحقیق کارآیی تحلیل و مقایسه‌ی سنج‌های ریخت‌سنجی را در رتبه‌بندی زیرحوزه‌ها بر پایه‌ی ظرفیت منبع آب زیرزمینی نشان داد، همان‌طور که اسماعیل و کلارک (۲۰۱۶) برای ظرفیت‌یابی منبع آب زیرزمینی و نایرنتیه‌ها و همکاران (۲۰۱۹) برای طبقه‌بندی منطقه‌های مستعد آب زیرزمینی به این نتیجه رسیدند.

#### نتیجه‌گیری

تحلیل مقدار به‌دست آمده از سنج‌های ریخت‌سنجی خطی، سطحی و ناهمواری در چهار زیرحوزه نشان‌دهنده‌ی تأثیر بسیار زیاد شرایط سنگ‌شناسی بر منبع آب زیرزمینی است، زیرا که اندازه‌ی ذره‌ی آب‌رُفتی در آب‌خوان‌های منطقه دارای روند نسبتاً منظمی از تغییر اندازه‌ی ذره‌ی آب‌رُفتی است که دارای دانه‌بندی مناسب و نفوذپذیری زیادی است. بنابراین مقدار میانگین به‌دست آمده از رتبه‌ی سنج‌ها در هر زیرحوزه نزدیک به هم است (نازلوچای: ۲،۲۱، روضه‌چایی: ۲،۶۴، شهرچایی: ۲،۵۷،



شکل ۶- الف. ظرفیت منبع آب زیرزمینی ب. منبع آب زیرزمینی در زیرحوزه‌های بررسی شده.



نقشه‌ی ارزش مکانی است. بیش‌ترین ارزش در نقشه‌ی ارزش مکانی منبع آب زیرزمینی در نقطه‌هایی است که کم‌ترین شاخص پستی‌بلندی، کم‌ترین ناهمواری، بیش‌ترین قدرت بردار، کم‌ترین انحنای سطح و بیش‌ترین نسبت سطح دارد. همان‌طور که پژوهش‌های اسکونتوس و اورانیو (۲۰۱۷) در طبقه‌بندی شکل زمین، لاوال و اومیودوجی (۲۰۱۷) در شناسایی منطقه‌های مستعد سیل، رحمتی و همکاران (۲۰۱۹) در شناسایی منطقه‌های مستعد خطر و صمدی و همکاران (۲۰۱۶) در تعیین ظرفیت نفوذ روان‌آب، شاخص‌های ریخت‌سنجی را مؤثر و نتیجه‌بخش توصیف کردند، نتیجه‌ی به‌دست آمده از این پژوهش نیز تأثیر شاخص‌ها در شناسایی ظرفیت منبع آب زیرزمینی را نشان داد، که می‌تواند همچون راهنمایی برای برنامه‌ریزی تحقیقات بیش‌تر در اکتشاف آب‌های زیرزمینی در حوزه‌های پژوهش به‌کاربرده شود. تحقیقات فیزیک زمینی را می‌توان در این منطقه انجام داد و با نتیجه‌ی به‌دست آمده از این پژوهش مقایسه کرد تا از روش تحقیق اطمینان حاصل شود.

شاخص‌های ریخت‌سنجی به‌دلیل تأثیر بر نفوذ روان آب در تعیین ظرفیت منبع آب زیرزمینی مهم است. در منطقه‌هایی با شاخص پستی‌بلندی منفی زمان تأخیر جریان‌های سطحی بیش‌تر است. منطقه‌هایی با ناهمواری زمین کم‌تر از اطراف خود ارتفاع نسبی کم‌تری دارد. منطقه‌های نامنظم با قدرت بردار بیش‌تر پراکندگی بردار بیش‌تری دارد. در منطقه‌هایی با انحنای عمومی زیاد سرعت جریان کاهش می‌یابد و ظرفیت نفوذ افزایش می‌یابد. در منطقه‌هایی با نسبت سطح بیش‌تر، سطح بیش‌تری برای دریافت باران هست که هر یک به نوبه‌ی خود تأثیر بسزایی در ذخیره‌ی بارش و روان‌آب‌های سطحی دارد، و این تأثیر در هر نقشه از یک تا هفت طبقه‌بندی شد.

بر پایه‌ی تأثیر هر یک از شاخص‌ها در افزایش یا کاهش ظرفیت منبع آب زیرزمینی در پژوهش، نقشه‌ی ارزش مکانی منبع آب زیرزمینی با ارزش ۲،۲ تا ۵ به دست آمد. مقایسه‌ی نتیجه با چاه‌ها و چشمه‌های منطقه درستی پژوهش را تأیید کرد و هم‌خوانی شاخص نسبت فراوانی که باید از طبقه‌ی به‌شدت خشک تا طبقه‌ی به‌شدت مرطوب افزایش یابد، نشان‌دهنده‌ی درستی ظرفیت منبع آب زیرزمینی در هفت طبقه‌ی ظرفیت



- Abdide M, Gharshi M, Rangzan K, Ariyan M. 2011. Relative assessment of active sub-structure using morphometric analysis (Case study: Dez River Basin, Southwestern Iran). *Journal of Earth Sciences*. 20 (80):33–46. (In Persian).
- Ahmadi H, Taheri S. 2009. Importance of morphometric analyzes to obtain areas with groundwater potential by controlling land structure (Case study: Tasuj watershed). 5rd National Conference on Watershed Management Science and Engineering (Sustainable Disaster Management), University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. 10 p. (In Persian).
- Alizadeh A. 2015. Principles of applied hydrology. Imam Reza University Press. 942 p. (In Persian).
- Allafta H, Opp Ch, Patra S. 2021. Identification of groundwater potential zones using remote sensing and GIS techniques: A case study of the Shatt Al-Arab basin. *Journal of Remote Sensing*. 13 (1):112–140.
- AsadiNalivan A, Saghazadeh N, SalahshurDashtgerdi M, Bay M. 2015. Prioritization of sub-basins using morphometric analysis and GIS for watershed management measures (Case study: Maraveh Tappeh Watershed, Golestan Province). *Journal of Ecohydrology*. 2 (1):91–103. (In Persian).
- Baboli Moakhar H, Taghiyan A, Shirani K. 2019. Applying morphometric indices in optimizing landslide sensitivity zoning maps using probabilistic models. *Journal of Natural Geography Research*. 50 (4):747–772. (In Persian).
- Choubin B, Rahmati O, Soleimani F, Alilou H, Moradi E, Alamdari N. 2019. Regional groundwater potential analysis using classification and regression trees. *Spatial modeling in GIS and R for environment sciences*, Elsevier Inc. pp:485–498.
- Das S. 2019. Comparison among influencing factor, frequency ratio and analytical hierarchy process techniques for groundwater potential zonation in Vaitarna basin, Maharashtra, India. *Grounds Sustain Dev* 8 (1):617–629.
- Doke A, Pardeshi S, Das S. 2020. Drainage morphometry and groundwater potential mapping: application of geoinformatics with frequency ratio and influencing factor approaches. *Journal of Environmental Earth Sciences*. 79 (16):1–17.
- Erfanian M, Farajollahi H, Souri M, Shirzadi A. 2015. Comparing efficiency of weight of evidence, logistic regression and frequency ratio methods for mapping groundwater spring potential in Ghelgazi watershed, Kordestan province of Iran. *Water and Soil Sci*. 20 (75):59–72. (In Persian).
- FallahSourki M, Kavian A, Omidvar A. 2016. Prioritization of Haraz watershed sub-basins for soil and water conservation operations based on morphometric and land use parameters. *Journal of Soil and Water Sciences (Agricultural Science and Technology and Natural Resources)*. 20 (77):85–99. (In Persian).
- Fathi F, Negahban S, YeganehKiya Z. 2011. Report on the establishment of drought risk management system in the watershed of Lake Urmia. 155 p. (In Persian).
- Ghaderi K, FazeliSani A. 2016. Quantitative analysis of morphometric parameters of the watershed (Case study: Manjir, Mazandaran). 4rd International Congress of Civil Engineering, Architecture and Urban Planning, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. 16 p. (In Persian).
- Hadley RF, Schumm SA. 1961. *Sediment*

- source and drainage basin characteristics in upper Cheyenne River Basin. US Geological survey water supply paper 1531. 198 p.
- Hajam R, Hamid A, Bhat S. 2013. Application of morphometric analysis for geo-hydrological studies using geo-spatial technology (Case study: Vishav drainage basin). *Journal of Hydrology Current Research*. 4 (157): 2–13.
- Hassan ZU, Kanth TA, Malik MI. 2018. Groundwater potential zonation and prioritization of wular catchment of Kashmir using GIS based multi-criteria evaluation approach. *Water and Energy International*. 60 (11):49–61.
- HatefiArdakani A, RezayiRad N. 2011. Use of RS and GIS techniques in proper location of artificial nutrition of groundwater resources in semnan plain. 7rd National Conference on Watershed Management Science and Engineering, University of Technology, Isfahan, Iran. 7 p. (In Persian).
- Hesari B, Karimzadegan S. 2019. Preparation of hydrological DEM and its application in the production of continuous river flow map (Case study: The basin upstream of Karkheh dam). *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*. 10 (4):85–98. (In Persian).
- Horton RE. 1945. Erosional development of streams and their drainage basins: a hydro-physical approach to quantitative morphology. *Geol Soc Amer Bulletin*. 56 (3):275–370
- Ismail A, Clark L. 2016. Using GIS techniques and quantitative morphometric analysis to evaluate the groundwater resources in the central flinders' ranges, South Australia. 3rd Annual Conference of Research. 6 p.
- Jenness J. 2013. Manual: Dem surface tools for arcgis, Jenness enterprises. 98 p.
- Kalantar B, Pradhan B, Naghibi SA, Motevalli A, Mansor S. 2018. Assessment of the effects of training data selection on the landslide susceptibility mapping: a comparison between support vector machine (SVM), logistic regression (LR) and artificial neural networks (ANN). *Geomatics Nat Hazards Risk* 9 (1):49–69.
- KarimiAsl S, Hesari B. 2019. Groundwater quality zoning of urmia plain. 1rd International Congress and 4rd National Congress of Irrigation and Drainage, Urmia, Iran. 10 p. (In Persian).
- Lawal O, Umeuduji J. 2017. Exploration of hydro-geomorphological indices for coastal flood characterization in rivers state, nigeria. *Ghana Journal of Geography*. 9 (1):67–87.
- Meshram S, Alvandi E, Singh V, Meshram Ch. 2019. Comparison of AHP and fuzzy AHP models for prioritization of watersheds. *Journal of Methodologies and Application*. 23 (24):13615–13625.
- Miller VC. 1953. A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in Clinch Mountain Area, Virginia and Tennessee. Department of Geology Columbia University, New York. 13 p.
- Mohammed A, Adugna T, Takala W. 2018. Morphometric analysis and prioritization of watersheds for soil erosion management in upper gibe catchment. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*. 6 (1):1419–1426.
- Mokaram M, Negahban S. 2014. Classification of landforms using topographic position index (TPI) (Case study: Southern region of Darab city). *Scientific Journal of Geographical Information*. 23 (92):57–65. (In Persian).
- Mosavi A, Sajedi F, Choubin B, Goodarzi M, Dineva AA, Rafiei E. 2020. Ensemble boosting and bagging based machine learning models for groundwater potential predic-

- tion. *Journal of Water Resources Management*. 15 p.
- NairNithya C, Srinivas Y, Magesh N, Kaliraj S. 2019. Assessment of groundwater potential zones in chittar basin, Southern India using GIS based AHP technique. *Journal of Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 15 (1):100248.
- Parvin M. 2020. Investigating the relationship between basin morphometric conditions and groundwater resources (Case study: Kamyaran basin). *Journal of Quantitative Geomorphological Research*. 8 (4):18–33. (In Persian).
- Rahmati O, Yousefi S, Kalantari Z, Uuema E, Teimurian T, Keesstra S, Pham T, Bui D. 2019. Multi-hazard exposure mapping using machine learning techniques: a case study from Iran. *Journal of Remote Sensing*. 11:1943–1963
- Riley S, Degloria S, Elliot R. 1999. A terrain ruggedness that quantifies topographic heterogeneity. *Intermountain Journal of Science*. 5 (1–4):23–27.
- Rozyka M, Migon P, Michniewicz A. 2017. Topographic wetness index and terrain ruggedness index in geomorphic characterisation of landslide terrains, on examples from the Sudetes, SW Poland. *Journal of Zeitschrift fur Geomorphologie*. Germany. 61 (2):61–80.
- Samadi M, Jalali S, Kornejadi A, SamadiGheshlaghchayi M. 2016. Investigation of morphometric indices in chehelchai watershed of goleshtan province using GIS. *Journal of Surveying Engineering and Spatial Information Engineering*. 7 (4):67–74. (In Persian).
- Schumm SA. 1956. Evolution of drainage systems and slopes in Bedlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological Society of America Bulletin*. 67 (5):597–646.
- Schumm SA. 1963. Sinuosity of alluvial rivers on the great plains. *Geol Soc Am Bulletin*. 74:1089–1100.
- Sharifikia M, Shayan S, Yamani M, ArabAmeri A. 2018. Classification of nekarood watershed sub-basins using multi-criteria decision making models TOPSIS, VIKOR, SAW. *Journal of Ecohydrology*. 5 (1):69–83. (In Persian).
- Skentos A, Ourania A. 2017. Landform analysis using terrain attributes. A GIS application on the Island of Ikaria (Aegean Sea, Greece). *Annals of Valiha University of Targovishte, Geographical Series*. 17 (1):90–97.
- Strahler AN. 1964. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks, Section 4-II. *Handbook of applied hydrology*. McGraw-Hill, New York. pp: 439–476.
- Weiss A. 2001. Topographic position and landforms analysis, Director: Ecoregional data management team, The nature conservancy, In Poster presentation, ESRI user conference, San Diego. Vol 200.
- Waikar M, Nilawar A. 2014. Morphometric analysis of a drainage basin using geographical information system: a case study. *International Journal of Multidisciplinary and Current Research*. 2 (1):179–184.
- Zhang H, Shi Z, Fang N, Guo M. 2015. Linking watershed geomorphic characteristics to sediment yield: evidence from the loess plateau of China. *Journal of Geomorphology*. 234 (1): 19–27.



## ***Watershed Management Research***

VOL. 34, No.4, Ser. No: 133, Winter 2022, pp.16-33  
DOI: 10.22092/WMRJ.2021.353111.1382

Research Paper



### **Determination of the Potential of Groundwater Resources in the Urmia Plain Using the Morphometric Parameters and Indices**

#### **Samaneh Dadafarid**

(Corresponding Author)\* Ph.D. Candidate, Department of Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

#### **Habib Nazarnejad**

Associate Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

#### **Amin Khosravi**

Ph.D. Candidate, Department of Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

Corresponding Author's Email: [s.dadafarid@gmail.com](mailto:s.dadafarid@gmail.com)

Received: 6 January 2021

Accepted: 20 June 2021

#### **Abstract**

Morphometric analyses play an important role in understanding the geo-hydrological conditions of basins such as identification of the and potential management of groundwater resources. A hydrological DEM was prepared to draw the drainage network in four sub-basins of Lake Urmia. Linear, surface, and topographic morphometric parameters were calculated to prioritize the potential of groundwater resources in the sub-basins. The mean values obtained from the rank of the parameters in each sub-basin were close and the sub-basins were prioritized as Nazluchai, Baranduzchai, Shaharchai, and Rouzehchai, respectively. Furthermore, the morphometric indices of TPI, TRI, VRM, surface curvature, and surface ratio were studied to prepare the spatial value map of the groundwater resources. Each map was prepared and classified with the same cell size in seven classes and the morphometric index map was combined with the same weights. The map of potential groundwater areas under the study area was obtained with values of 2.2 to 5.0. The highest value in the map of the spatial value of groundwater resources belonged to the pixels that had the lowest TPI, the lowest TRI, the highest VRM, the lowest surface curvature, and the highest surface ratio. The findings were confirmed by examining the location of springs and yielding wells in the study area.

■ **Keywords:** Groundwater, Morphometric indices, Morphometric parameters, Prioritization, Spatial value ■