جغرافیا(فصلنامه علمی ـ پژوهشی و بین المللی انجمن جغرافیایی ایران)

سال نوزدهم، شماره 68، بهار 1400

بررسی ویژگی های فرمی سطح زمین براساس شاخص های مورفومتری و با استفاده از GIS مطالعه موردی: حوضهٔ آبخیز فهلیان

حمید بابلی‌مؤخر[1]، سعید نگهبان[2]

تاریخ وصول: 1397/12/25، تاریخ تأیید: 1398/10/19

چکیده

شناخت خصوصیات فیزیکی حوضهٔ آبخیز از اولین گام‌هایی است که در بررسی‌های مورفولوژیکی و هیدرولوژیکی ضرورت دارد. این پژوهش سعی دارد با استفاده از شاخص های مورفومتریک ویژگی های فیزیکی و وضعیت شکلی سطح زمین در حوضه آبخیز فهلیان را مورد بررسی قرار دهد. به همین منظور 6 شاخص‌های ژئومورفومتریک؛ انحنای کل، انحنای نیمرخ، انحنای سطح، شاخص TRI، شاخص TPI و شاخص TWI انتخاب و با استفاده از روابط مربوط به هر شاخص و با بهره‌گیری از اکستنشن‌های مربوطه در نرم‌افزار ArcGis 10/3 نقشه‌های هریک از این شاخص‌ها تهیه شد. نتایج حاصل از محاسبه انحنای کل نشان می‌دهد که بیش از نیمی از سطح حوضه(52/80) دارای انحنای مقعر و 47/20 درصد آن از انحنای محدب برخوردار می‌باشد. همچنین حد پایین و بالا برای انحنای سطح به ترتیب 2/99- و 3/96 و برای انحنای نیمرخ به ترتیب 4/87- و 4/2 بدست آمد. بر همین اساس حد پایین و بالای شاخص TPI که حالت گودی و برآمدگی را از یکدیگر تفکیک می‌کند، به ترتیب 4/2-> و 6 < محاسبه شد. مقادیر شاخص TRI که به نوعی اختلاف ارتفاع یک پیکسل با هشت پیکسل مجاور خود می‌باشد از 0 تا 14< محاسبه شد. و در نهایت مقادیر شاخص TWI که نشان‌دهندهٔ وضعیّت رطوبت خاک می‌باشد به ترتیب از 1/5-> تا 5/5< محاسبه گردید. درصد مساحت هر یک از مقادیر این شاخص‌ها در سطح حوضه که در نتایج حاصل از این تحقیق بدست آمد می‌تواند در برنامه‌ریزی مختلف مربوط به حوضه آبخیز از جمله فرسایش و رسوب، طبقه بندی لندفرم ها، شناسایی و معرفی مناطق درگیر با خطر زمین‌لغزش، مطالعه سیلاب، بررسی و مطالعه منابع آب زیرزمینی و ... مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژگان: مورفومتری، انحناء، لندفرم، شاخص TRI، حوضهٔ آبخیز فهلیان.

1 - دکترای ژئومورفولوژی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، نویسنده مسئول(ایمیل: h.baboli52@yahoo.com)

2 - استادیار ژئومورفولوژی، بخش جغرافیا، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

مقدمه

فعالیت‌های تکتونیکی همراه با فرآیندهای هیدرولوژی و ژئومورفولوژی و همچنین تغییرات اقلیمی منجر به تغییر در لندفرم‌ها و سیر تکاملی آنها شده است. مورفومتری رویکردی جدید در بررسی و تحلیل کمی لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی محسوب می‌گردد(صلحی و سیف، ۱۳۹۷: ۵۳) و ژئومورفومتری روشی مدرن با رویکرد کارتوگرافی- تحلیلی برای نمایش پستی و بلندی‌های سطح زمین با استفاده از ارتفاع زمین در کامپیوتر است. به‌عبارتی ژئومورفومتری علم کمی‌سازی عوارض توپوگرافی، با تمرکز بر استخراج پارامترهای عوارض سطح زمین براساس مدل رقومی ارتفاع و بر پایه معادلات ریاضی و اشکال هندسی میباشد(صمدی و همکاران، ۱۳۹۵: ۶۸). اندازه‌گیری‌های کمی به ژئومورفولوژیست‌ها اجازه می‌دهد تا بطور واقعی و معقول لندفرم‌های مختلف را با یکدیگر مقایسه کنند(ایلانلو، ۱۳۹۹: ۱۶۸). مقادیر کمی عوارض سطح زمین به ویژگیهای توپوگرافی برمی‌گردد(تنیس[1]، ۲۰۰۵: ۸۷). این دانش(ژئومورفومتری) به نوعی یک دانش تلفیقی در زمینه علوم مختلفی همچون ریاضیات، علوم زمین و کامپیوتر میباشد. این علم زمینه ارتباط علوم مختلفی مثل ژئومورفولوژی و جغرافیا را با مدلهای عددی و ریاضی برقرار کرده است. مدلهای مختلف ژئومورفومتری اولین بار توسط (ایوانس[2]، ۱۹۷۲: ۲۵) بصورت خلاصه در زمینه تحلیل ریاضی عوارض سطح زمین در حالت کلی و در تفکیک عوارض سطح زمین بصورت خاص مورد استفاده قرار گرفت. مورفومتری عوارض سطح زمین نیز در قالب ژئومورفولوژی کمی قبلا توسط (سوانسون[3]، ۱۹۸۸: ۹۶)، (دی[4]، ۱۹۹۵: ۵) و (رایدز و تورن[5]، ۱۹۹۶) مورد بررسی قرار گرفته بود. تاکنون مطالعاتی در این زمینه انجام شده که به مواردی از آنها اشاره می‌شود. مکرم و حجتی(۲۰۱۶) به مقایسه طبقه‌بندی لندفرم‌های ارتفاع، شیب و انحناء با شاخص TPI [6] در جنوب بجنورد پرداخته‌اند و به این نتیجه رسیدند که مدل TPI جزئیات بیشتری را نمایش می‌دهد. مکرم و همکاران(۲۰۱۵) نسبت به طبقه‌بندی لندفرم‌های گنبد نمکی کرسیا دشت داراب با استفاده از شاخص موقعیت توپوگرافی(TP) اقدام کرده‌اند. سیف(۲۰۱۴) در پژوهشی برای طبقه‌بندی لندفرم‌های کوه گرین از شاخص موقعیت توپوگرافی(TP) استفاده کرد.

چارتین[7] و همکاران (۲۰۱۱) نسبت به طبقه‌بندی لندفرمها با استفاده از مدل رقومی ارتفاع و ضخامت خاک در جنوب غربی پاریس اقدام کردند. نتایج نشان داد که با استفاده از علم مورفومتری میتوان لندفرمها را طبقه‌بندی و خاکهای منطقه را بر اساس ضخامت از یکدیگر متمایز نمود. موسوی و همکاران (۲۰۰۷) در پژوهشی به این نتیجه رسیدند که با استفاده از پارامترهای ارتفاع، شیب، جهت، انحنای مماس و انحنای عمودی استخراج شده از مدل رقومی ارتفاع میتوان پی به ویژگی لندفرمها و طبقه‌بندی آنها برد. لوکا[8] و همکارانش(۲۰۰۷) ارتباط بین خیسی خاک(TWI)[9] و خصوصیات توپوگرافی را بررسی و اثبات کردند که توپوگرافی کنترل کنندهٔ توزیع مکانی رطوبت خاک، پوشش گیاهی، شوری خاک و بافت خاک است. وایز[10] (۲۰۰۶) با استفاده از شاخص موقعیت توپوگرافی طبقه‌بندی اتوماتیک لندفرمها را انجام داد و به این نتیجه رسید که این روش بسیار آسان‌تر و دقیق‌تر از روشهای معمولی برای طبقه‌بندی لندفرمهاست. صلحی و سیف(۱۳۹۷) مورفومتری پروفیل طولی دره‌های سهند را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. مکرم و همکاران(۱۳۹۶) در پژوهشی

1. Tennis
2. Evans
3. Swanson
4. Day
5. Rhoads and Thorn
6. Topographic Position Index
7. Chartin
8. Luca
9. Topographic Wetness Index
10. Weiss

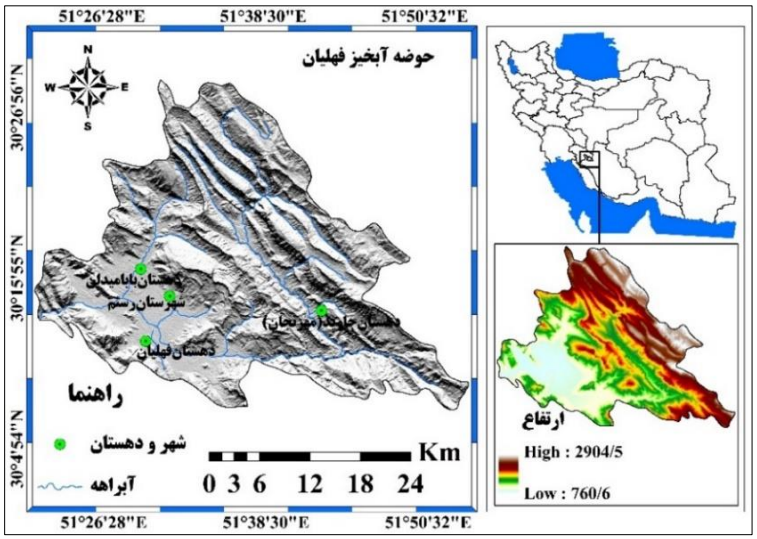
استفاده از مدل جاذبه در سنجش از دور را به منظور بررسی شاخص توپوگرافی خیسی در شمال استان فارس مورد بررسی قرار دادند. جعفری رودسری و همکاران(1395) شاخص‌های مورفومتری قدرت بردار(VRM)[1] نسبت سطح، موقعیت توپوگرافیکی(TP)، انحنای دامنه و شاخص ناهمواری زمین(TRI)[2] را در حوضه گرگانرود با استفاده از GIS بررسی کره اند. صمدی و همکاران(1395) به بررسی شاخص‌های مورفومتری در حوزه آبخیز چهل‌چای استان گلستان بااستفاده از GIS پرداخته اند. تازه و همکاران(1394) در پژوهشی قابلیت شاخص‌های ژئومورفومتری در استخراج نقشه شبکه آبراهه را در حوزه سه قلعه-همبو سرایان ارزیابی کرده اند. نگهبان و مکرم(1394) به طبقه‌بندی لندفرم‌ها براساس شاخص موقعیت توپوگرافی(TPI) و ارتباط آن با ویژگیهای زمین‌شناسی در حوضه آبخیز حکان شهرستان جهرم پرداختند.

اخیرا استفاده از پارامترهای زبری سطح در موارد زیادی از جمله برای توصیف لندفرمها در مقیاسهای مختلف و همچنین برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی و مخاطرات طبیعی مثل سیل و انواع زمین‌لغزش‌ها بکار میرود(اولیایی و همکاران، 1392). هدف از این پژوهش، بررسی ویژگی های فرمی سطح زمین در حوضه آبخیز فهلیان بر مبنای شاخص‌های مورفومتری و ژئومورفومتری می‌باشد. به همین منظور از شاخص های؛ انحنای‌کل، انحنای سطح، انحنای نیمرخ، شاخص وضعیّت توپوگرافی، شاخص ناهمواری توپوگرافی و شاخص رطوبت توپوگرافی به منظور طبقه‌بندی، توصیف و معرفی لندفرم‌ها در این حوضه استفاده شده است.

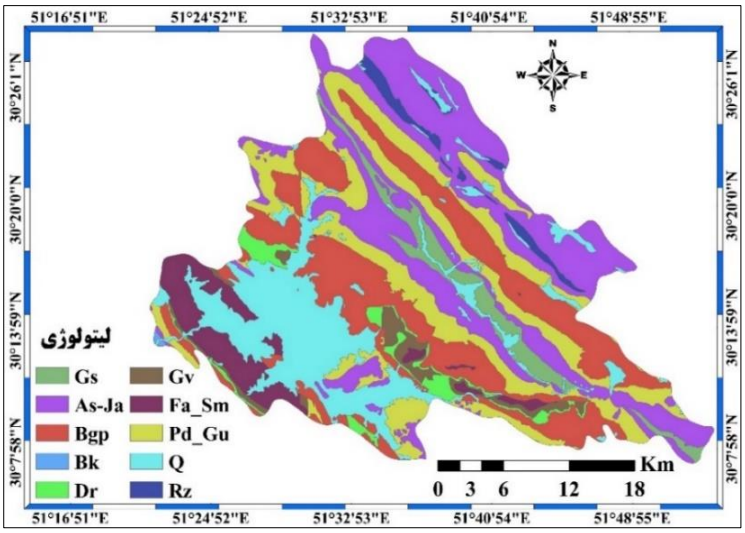
موقعیت جغرافیایی و زمین‌ساختی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز فهلیان با مساحت 1040/86 کیلومترمربع در شمال‌غرب استان فارس و در طول جغرافیایی ″25 ′21 °51 تا ″35 ′53 °51 و عرض جغرافیایی ″15 ′7 °30 تا ″41 ′28 °30 واقع شده است. حداقل و حداکثر ارتفاع حوضه به ترتیب 760 و2904 می‌باشد. شهرستان رستم، دهستان های فهلیان، بابامیدان و جاوید(مهرنجان) و همچنین روستاهای زیادی در این حوضه واقع شده اند(شکل 1). این حوضه از نظر موقعیّت ژئومورفولوژیکی در زون زاگرس چین‌خورده واقع شده و به دلیل عبور گسل‌ها کازرون و اردکان-فهلیان و بازوهای منشعب از آنها از تکتونیک فعال برخوردار می‌باشد. همچنین بخش عمده حوضه در زیر پهنه ساختاری فارس و بخش کمی از غرب آن در زیر پهنه ایذه واقع شده است. رخنمون‌هایی از واحدهای سنگ‌های ژوراسیک تا کواترنر در این محدوده گسترش دارند که از قدیم به جدید شامل سازندهای: فهلیان-سورمه (ژوراسیک)، گدوان و داریان (کرتاسه زیرین)، سازند گورپی و گروه بنگستان شامل سازندهای: کژدمی، سورگاه، سروک و ایلام(کرتاسه) می‌باشند. علاوه بر آن واحدهای ترشیاری شامل سازندهای؛ جهرم، پابده، آسماری و سازند رازک و گچساران در حوضه گسترش دارند. واحدهای جوان‌تر نیز کنگلومرای بختیاری و رسوبات کواترنر می‌باشند(شکل 2). در جدول(1) خصوصیات سنگ شناسی و درصد مساحت واحدهای سنگی حوضه نشان داده شده است.

1. Vector Ruggedness Measure
2. Terrain Ruggedness Index



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی حوضه



شکل ۲: نقشه سنگ شناسی حوضه

جدول ۱: خصوصیات سنگ شناسی و درصد مساحت واحدهای سنگی حوضه

واحد	توصیف سنگ شناسی	مساحت KM^2	درصد مساحت	واحد	توصیف سنگ شناسی	مساحت KM^2	درصد مساحت
Gs	مارن، ژیپس، انیدریت	۴۳/۴	۴/۱۷	Gv	آهک، مارن، شیل	۲۳/۹۳	۲/۲۹
As-Ja	آهک، دولومیت، شیل	۲۶۶/۲	۲۵/۵۸	Fa-Sm	آهک، دولومیت و مارن	۵۹/۲۳	۵/۶۹
Bgp	آهک رسی و شیل	۲۳۰/۳	۲۲/۱۳	Pd-Gu	مارن، شیل، آهک	۱۹۴/۶	۱۸/۷۰
Bk	کنگلومرا و ماسه‌سنگ	۰/۷۳	۰/۰۷	Q	آبرفت و رسوبات کواترنر	۱۷۷/۶	۱۷/۰۶
Dr	آهک	۲۶/۹۵	۲/۵۸	Rz	مارن سیلتی	۱۷/۶	۱/۶۹

روش تحقیق

در پژوهش حاضر ابتدا مطالعات کتابخانه ای به منظور استنباط و تحلیل مباحث نظری موضوع و سپس بررسی های میدانی جهت شناسایی دقیق منطقه صورت گرفت. همچنین بااستفاده از نقشه های زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ویژگی زمین ساختی و لیتولوژی منطقه مورد شناسایی قرار گرفت. از آنجاکه مدل ارتفاعی رقومی (DEM) از ابزارهای مهم در

مطالعه ناهمواریهای سطح زمین است، استخراج این شاخص‌ها با بهره‌گیری از مدل رقومی ارتفاعی(DEM) با دقت ۳۰ متر و بااستفاده از امکانات موجود در نرم افزارArc GIS10/3 انجام گرفته است. در نهایت نقشه نهایی این شاخص ها با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ تهیه و تنظیم شد. در ادامه شیوه استخراج و نحوه محاسبه هر کدام از این شاخص‌ها تشریح می شود.

انحنای دامنه و انواع آن

دامنه‌ها نه تنها بخش اعظم مناظر طبیعی را شامل میشوند، بلکه قسمت کاملی از سیستم زهکشی، آب و رسوبات را برای رودخانه تأمین میکنند. انحنا به‌منزله یک خاصیت سه‌بعدی از سطح دوبعدی تعریف می‌شود و نشان‌دهندهٔ میزان انحراف سطح از صاف‌بودن و یا به‌عبارت دیگر محدب و مقعربودن دامنه را نشان می‌دهد. با افزایش انحنا، نیروی کششی در طول سطح افزایش می‌یابد و باعث تولید شکستگی‌ها می‌شود. بااستفاده از مقادیر عددی و مشتقات حاصل از DEM از قبیل شیب، انحنای پروفیل، انحنای پلان، انحنای عرضی و انحنای کلی دامنه، ویژگی‌های مورفومتری لندفرم‌ها استخراج می‌گردد (فیشر[1] و همکاران، ۲۰۰۴: ۱۱۵؛ پایک[2] ۲۰۰۰: ۹؛ وود[3] ۱۹۹۶: ۱۶۶). مشتقات درجه دوم در ارتباط با تحدب و تقعر و بطورکلی شکل سطح هستند که با نام انحناء شناخته می‌شوند و می‌توان از انحناء برای اندازه‌گیری میزان ناهمواری سطح زمین استفاده نمود. انحنای دامنه تأثیر زیادی برروی سرعت جریان و حالت تقعر و تحدب دامنه ها دارد و با افزایش آن حالت مقعر شده و سرعت جریان کاهش می‌یابد و سرعت نفوذ بیشتر می شود. بنابراین در دامنه های مقعر و همگرا احتمال نفوذ آب بیشتر است که منجر به ایجاد منابع آب زیرزمینی می‌شود(ویلسون و گالانت[4]،۲۰۰۰؛ اشمیت[5] و همکاران، ۲۰۰۳). محاسبه انواع انحناء در مدل رقومی ارتفاع رستری به‌صورت پیکسل به پیکسل محاسبه و برای هر سلول از یک معادله چندجمله‌ای درجه چهار استفاده می‌شود (روابط ۱ تا ۳). در یک پنجره با ابعاد ۳*۳ محاسبه می‌شود. باتوجه به اینکه محاسبه انحناء در یک پنجره متحرک و با استفاده از هشت همسایه یک سلول انجام می‌گیرد امکان تشخیص سلول‌ها و سطوح محدب و مقعر وجود دارد. در این تحقیق شاخص‌های انحنا بااستفاده از روش زونبرگر–تورن از مدل رقومی ارتفاع و در محیط ArcGIS تهیه شده‌اند(اشکال ۳ تا ۵).

(رابطه۱): انحناء کلی $Z=Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy +I$

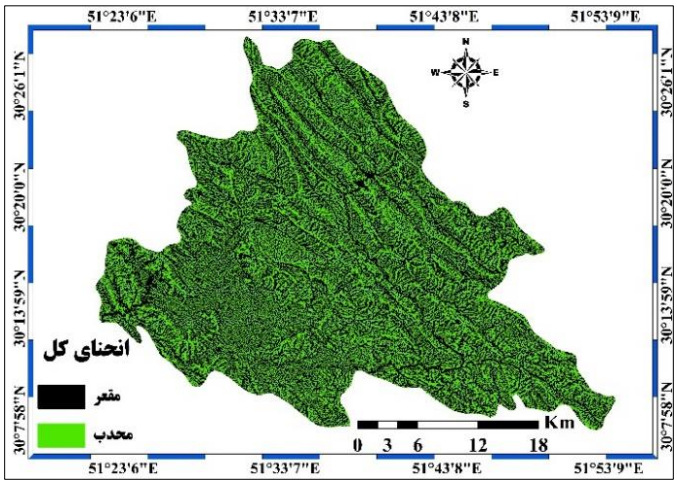
از بین انواع انحناء می‌توان به انحنای پلان و پروفیل به عنوان دو شاخص ژئومورفومتریک اشاره کرد که براساس روابط زیر تهیه و استخراج شده اند.

(رابطه۲): انحناء پلان $n^* g^*(b^* d^2+ a^* e^2- c^* d^* e)/(d^2+ e^2)^{1..5}$

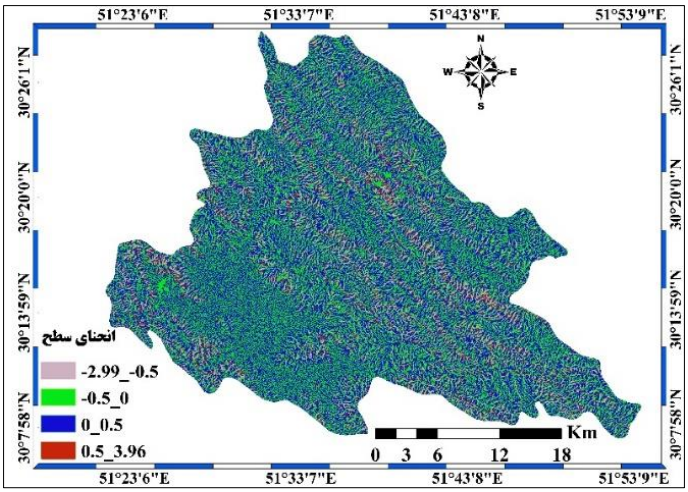
(رابطه۳): انحناء پروفیل $n^* g^* (a^* b^* e^2+ c^* d^* e) / (d^2 + e^2)(1+(d^2+e^2)^{1..5} d^2 +$

در کلیه این روابط g: قدرت تفکیک مدل رقومی ارتفاع، n: ابعاد پنجره متحرک می‌باشد(احمدآبادی و رحمتی، ۱۳۹۴: ۲۰۳).

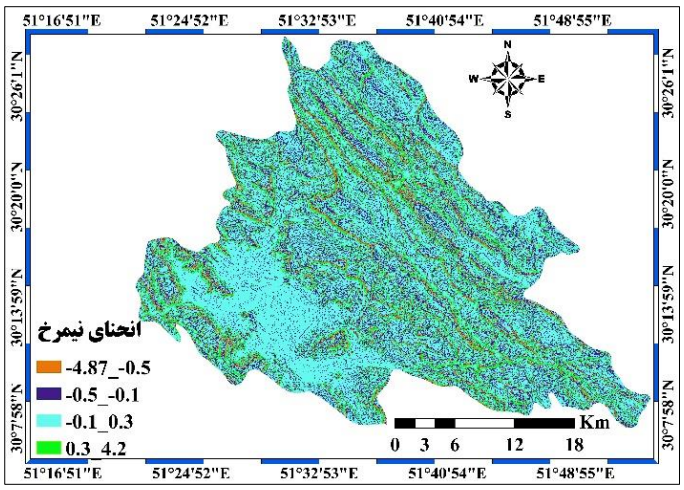
1. Fisher
2. Pike
3. Wood
4. Wilson and Gallant
5. Schmidt et al



شکل ۳: نقشه شاخص انحنای کل



شکل ۴: نقشه شاخص انحنای سطح



شکل ۵: نقشه شاخص انحنای نیمرخ

شاخص موقعیت توپوگرافیکی(TPI)

شاخص TPI یکی از شاخص‌های زبری توپوگرافی است که حالت گودی و برآمدگی را مورد تمایز قرار می‌دهد. این شاخص ارتفاع هر پیکسل در مدل رقومی ارتفاع را با پیکسل مشخص اطراف آن پیکسل مقایسه می‌کند(وایز،

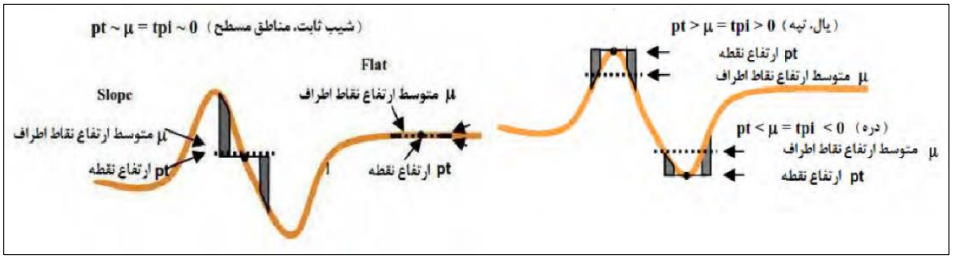
۲۰۰۶)(شکل۶). براین اساس TPI منفی نشان‌دهندۀ توپوگرافی کم ارتفاع(کم) (تعقرها و گودال‌ها) و TPI مثبت نشان‌دهندۀ توپوگرافی زیاد(محدب و ستیغ‌ها) می‌باشد. مفهوم کلی و کاربرد شاخص موقعیت توپوگرافی(TPI) به این است که صورت دقیق و غیر توصیفی مرز لندفرمهایی مانند: ارتفاعات، شیب تند، مناطق مسطح، دره و ...را با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی به صورت اتوماتیک و سریع، تعریف و تعیین نماید. به عبارت دیگر مدل TPI راهکار نوینی جهت تعیین کمی لندفرمها است. اما وابستگی و تابعیت مستقیمی با رزولوشن و شعاع پیکسل‌های همسایه دارد. شاخص TPI طبق (رابطه ۴) بدست آمد و براساس آن منطقه در ۴ کلاس طبقه‌بندی شد شکل(۷).

$$TPI_i = Z_0 - \sum_{n-1} Z_{n/n} \qquad \text{(رابطه ۴)}$$

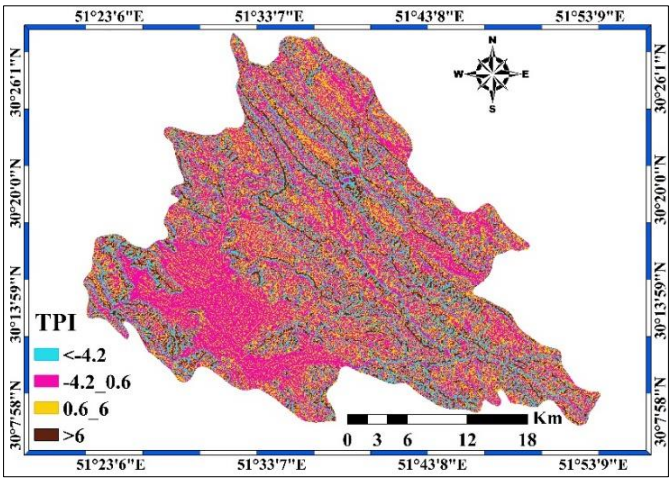
که Z_0= ارتفاع نقطه مدل تحت ارزیابی، Z_n=ارتفاع از شبکه، n= تعداد کل نقاط اطراف درنظر گرفته شده در ارزیابی. ترکیب TPI در مقیاس کوچک و بزرگ اجازه می‌دهد تا انواع اشکال درسطح زمین ایجاد شود(مکرم و نگهبان، ۱۳۹۳: ۶۱)(جدول ۲).

جدول ۲: طبقه بندی انواع لندفرم ها بر اساس شاخص موقعیت توپوگرافی

نوع لندفرم	مقدار TPI
دره های باریک، آبراهه‌ها	TPI≤-1
زهکش های شیب میانی، دره های کم عمق	-1< TPI< 1
زهکش های مناطق مرتفع	TPI≥1
دره های U شکل	TPI≤-1
دشت	-1< TPI< 1, slope≤5°
دشت های باز	-1< TPI< 1,slope>5°
شیب های بالایی، مساها	TPI≥1
یال های موضعی، تپه های موجود در دره	TPI≤-1
یال های شیب میانی، تپه های کوچک موجود در دشت	-1< TPI< 1
قله کوه، یال های مرتفع	TPI≥1



شکل ۶: نمایش شاخص موقعیت توپوگرافی(وایز، ۲۰۰۶)



شکل ۷: نقشه شاخص TPI

شاخص ناهمواری(زبری) زمین (TRI)

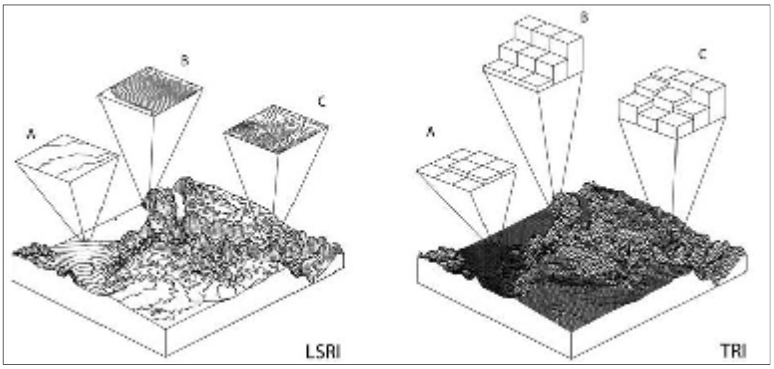
ناهمواری زمین تعریف های مختلفی مثل ناهمواری توپوگرافی، شکستگی، یا صخره ای و شیب دار بودن دارد. به طور کلی خصوصیات قوس ژئومتری سطح، پارامترهای زبری سطح نامیده می شود. در ابتدا ویدلی[1](بربری[2]، ۲۰۰۲) روشی برای کمی سازی زبری ارائه نمود که این کمیت بعداً توسط (بیسوم[3]) توسعه داده شد و به شاخص زبری سطح زمین (LSRI[4]) معروف شد. این شاخص بر این فرض استوار است که زبری تابعی از مجموع طول خطوط تراز در سطح موردنظر است. LSRI و متغیرهای مربوط به آن توسط محققین مختلفی مورد بررسی قرارگرفته شده است و (بلیچ[5] و همکاران، ۱۹۹۷؛ هو ایچ استیتر[6] و همکاران، ۲۰۰۸؛ اولایا[7]، ۲۰۰۹؛ خاندوری و کومار[8]، ۲۰۱۱ و ریلی[9] و همکاران، ۱۹۹۹) از داده های رقومی زمین و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده کردند تا یک شاخص زبری سطحی به نام (TRI) را ایجاد کنند که تغییرات کلی ارتفاع در یک سطح خاص را به صورت کمی بیان کند. در نهایت شاخص ناهمواری زمین(TRI) توسط ریلی و همکاران (۱۹۹۹) ارائه شد. در ژئومرفولوژی کمی، زبری سطح با استفاده از ارزش سطوح ارتفاعی مورد استفاده قرار میگیرد. این شاخص در واقع به نوعی اختلاف ارتفاع یک پیکسل با هشت پیکسل اطراف خود می‌باشد. برای این کار ارتفاع هر پیکسل از پیکسل‌های اطراف خود کم شده و برای مثبت کردن این اعداد آنها را به توان ۲ رسانده، از آنها میانگین گرفته و دوباره ریشه دوم آن حساب می‌شود و به پیکسل موردنظر نسبت داده می‌شود(صمدی و همکاران، ۱۳۹۵: ۷۱). در شکل(۸) نمایش گرافیکی شاخص ناهمواری زمین(TRI) با محاسبه اختلاف ارتفاع یک پیکسل با هشت پیکسل اطراف خود و ناهمواری سطح زمین (LSRI) با استفاده از چگالی خطوط کانتور در یک منطقه نشان داده شده است. همچنین شکل(۹) مقایسه و انطباق نقشه سایه روشن با وضعیت تراکم خطوط تراز در سطح حوضه را نشان می دهد. شاخص ناهمواری زمین(TRI) بااستفاده از نقشه DEM و از طریق (رابطه ۵) و شکل (۱۰) محاسبه می شود. در این پژوهش شاخص زبری سطح در نرم‌افزار ArcGIS و بر پایه مدل ارتفاع رقومی

1- Widdly
2- Berry
3 - Beasom
4 - Land surface ruggedness index
5- Bleich
6- Hoechstetter
7-Olaya
8- Khanduri and Kumar
9- Riley

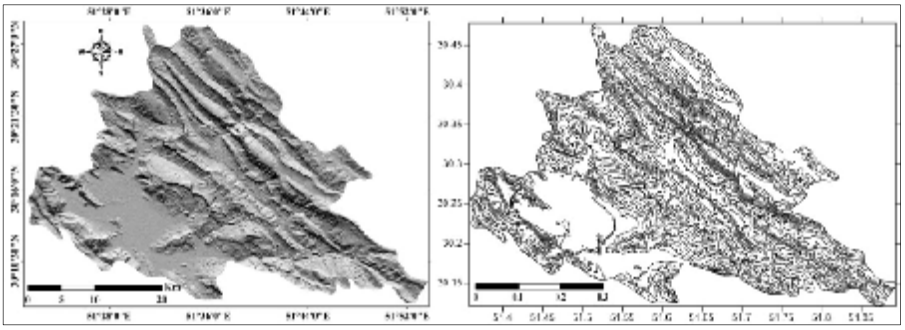
(DEM) با دقت 30 متر محاسبه و در 4 کلاس طبقه‌بندی شد شکل(11). تغییرات این شاخص با نئوتکتونیک و فرسایش در ارتباط است. مناطق دارای بالاآمدگی زیاد مقدار شاخص بالایی را نشان می‌دهند.

$$TRI = \sqrt{\sum_{p=1}^{8} ZMd.} \qquad \text{(رابطه 5)}$$

P: تعداد پیکسل اطراف و ZMd: میانگین تفاضل 8 پیکسل اطراف هر پیکسل می باشد.



شکل 8: نمایش گرافیکی اندازه‌گیری ناهمواری‌ها بااستفاده از شاخص TRI و LSRI (ساپینگتون و همکاران، 2007)

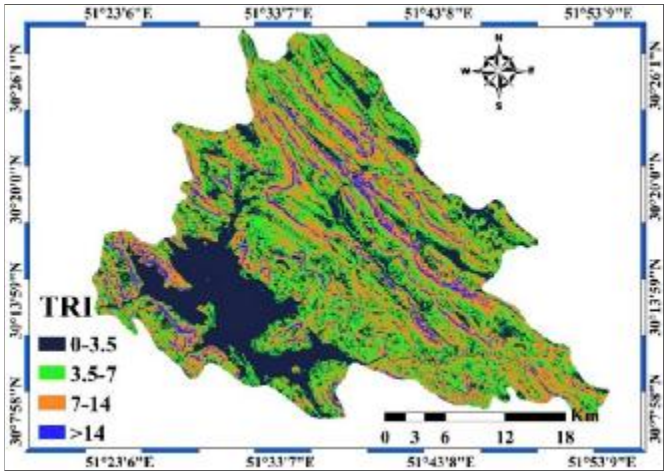


شکل 9: مقایسه و انطباق نقشه برجسته‌نما و وضعیت تراکم خطوط تراز حوضه

-1,-1	**0,-1**	**1,-1**
-1,0	**0,0**	**1,0**
-1,1	**0,1**	**1,1**

If each square represents a grid cell on a digital elevation model, then
TRI = Y [$\Sigma(x_{ij} - x_{00})^2$]$^{1/2}$ where x_{ij} = elevation of each neighbor cell to cell (0,0).
The docell command is:
DOCELL ssdiff = ((sqr(el(0,0) –el(-1,-1)))+
((sqr(el(0,0) –el(0,-1)))+ …((sqr(el(0,0) –el(1,1))).
TRI = sqr(ssdiff)
end
Where: ssdiff = temprorary scalar, square feet, and el= name of elevation grid.

شکل 10: تصویر الگوریتم محاسباتی شاخص TRI (ریلی و همکاران، 1999)



شکل 11: نقشه شاخص TRI

شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)

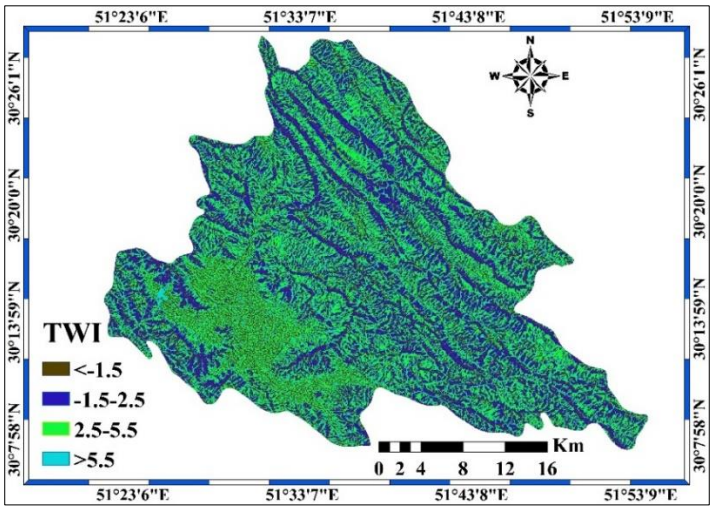
خصوصیات خاک روی تحول و پیدایش رواناب اثر داشته و باید در محاسبات مربوط به آن درنظر گرفته شوند. این خصوصیات میتواند با عامل هیدرولوژیک حداقل سرعت نفوذپذیری در حالت مرطوب بودن طولانی مدت خاک بیان گردد(حسین زاده و نوروزی طیولا، 1396: 155) .رطوبت خاک نقش اساسی را در بسیاری از کاربردهای مرتبط با آب از جمله مدیریت منابع آب، تحلیل خشکسالی، کشاورزی و مطالعات تغییر اقلیم ایفا میکند(متکان و همکاران، 1397: 144). در بین خصوصیات توپوگرافی، شاخص رطوبت توپوگرافی(TWI) ابزار مفیدی برای تعیین وضعیت رطوبت خاک به حساب می آید. این شاخص ارتباط زیادی با میزان سطح آب زیر زمین در یک منطقه دارد(اتکینسن[1]، 1997: 842) و در مطالعات مختلف بکار می رود. بطور نمونه برای بررسی شیب زمین و مواد آلی خاک(ژئو و همکاران[2]، 2009: 761) ویژگیهای هیدرولوژیکی و شیمیایی خاک ها(وانگ و وانگ[3]، 2011: 594)، به‌منظور تعیین مسیرهای هیدرولوژیکی یا حتی فرآیندهای بیولوژیکی(موآد و فودی[4]، 2012: 86) کاربرد دارد.

این شاخص ترکیب پستی و بلندی بوده که نسبت بین شیب‌ها را در حوضه به نمایش می‌گذارد. این شاخص با جریان های سطحی موجود در حوضهٔ آبخیز و مساحت حوضهٔ آبخیز ارتباط مستقیم و با شیب حوضهٔ آبخیز نسبت عکس دارد. شاخص مذکور بااستفاده از مدل رقومی ارتفاع طبق (رابطه 6) و در نرم‌افزار SAGA-GIS محاسبه در چهار کلاس طبقه‌بندی شد گردید شکل(12).

$$TWI=1n(A_s/\tan(b)) \qquad \text{(رابطه 6)}$$

که در آن؛ A_s: مساحت حوضه آبخیز و b: گرادیان شیب بر حسب درجه است. به کمک این شاخص میتوان گرایش آب به تجمع در هر نقطه از حوضهٔ آبخیز و تمایل به انتقال آب به پایین دست حوضهٔ آبخیز را توصیف کرد.

1. Atkinson
2. Guo et al
3. Wang and Wang
4. Muad and Foody



شکل ۱۲: نقشه شاخص TWI

نتایج و بحث

در منطقه موردمطالعه انحنای کل در دو طبقه مقعر و محدب تقسیم‌بندی شد. براساس نتایج حاصل از محاسبه انحنای کل، ۵۲/۸۰ درصد منطقه دارای انحنای مقعر و ۴۷/۲۰ درصد آن دارای انحنای محدب می‌باشد.

همچنین نقشه انحنای سطح حوضه در چهار طبقه از حداقل ۲/۹۹- تا حداکثر ۳/۹۶ محاسبه و تهیه شد. انحنای سطح، بیانگر تغییرات جهت در طول یک منحنی می‌باشد و بنابراین نشان‌دهندهٔ واگرایی و همگرایی توپوگرافیکی است. مقادیر مثبت انحنای پلان، واگرایی جریان را نشان داده؛ که در برگیرنده خط‌الرأس‌ها و ستیغ‌ها است و مقادیر منفی آن همگرایی جریان(دره‌ها) را نشان می‌دهد. واحد اندازه‌گیری انحناء بر حسب رادیان بر متر یا درجه بر متر(درجه در ۱۰۰متر) بیان می‌گردد. براساس نتایج حدود ۵۲ درصد وسعت حوضه دارای انحنای سطح ۰ تا ۳/۹۶ می باشد که این مسئله نیز نشان دهنده فراوانی خط الرأس ها و ستیغ ها در سطح حوضه است. در مجموع وسعت تقریباً یکسان سطوح محدب و مقعر و به عبارتی واگرا و همگرا براساس دو شاخص انحنای کل و انحنای سطح بیانگر توزیع متعادل آبراهه ها در سطح حوضه به صورت واگرا و همگرا می باشد.

انحنای پروفیل، انحنا در طول خط حداکثر شیب می‌باشد و این را به‌عنوان نرخ تغییر شیب تعریف میکند. به عبارتی انحنای پروفیل معرف اندازه تغییر شیب منحنی میزان، در طول مسیر جریان است و نشان‌دهنده شدت جریان آب و فرآیندهای حمل و رسوبگذاری می‌باشد. مقدارهای مثبت نشان‌دهنده انحنای مقعر است (به‌عنوان مثال هنگامی که آب جاری شود، در این شیبها سرعت کاهش می‌یابد) و ارزش‌های منفی نشان می‌دهد انحنای محدب که در آن سرعت جریان افزایش می‌یابد. حد پایین و بالای این شاخص در حوضه مورد مطالعه به ترتیب ۴/۸۷- و ۴/۲ می‌باشد. براساس نتایج بیش از ۳۰ درصد از سطح حوضه دارای انحنای نیمرخ ۴/۸۷- تا ۰ می‌باشد. بطورکلی انحنای دامنه تأثیر زیادی روی سرعت جریان و حالت تقعر و تحدب دامنه‌ها دارد و با افزایش آن حالت مقعر شده و سرعت جریان کاهش می‌یابد و سرعت نفوذ بیشتر می‌شود. بنابراین در دامنه‌های مقعر و همگرا احتمال نفوذ آب بیشتر است که منجر به ایجاد منابع آب زیرزمینی می‌شود (ویلسون و گالانت، ۲۰۰۰؛ اشمیت و همکاران، ۲۰۰۳).

شاخص موقعیت توپوگرافی که حالت گودی و برآمدگی را مورد تمایز قرار می‌دهد، به عنوان یکی از شاخص‌های مورفومتریک در نظر گرفته شده است. حد پایین و بالای شاخص TPI برای منطقه موردمطالعه به ترتیب ۴/۲- تا ۶< می‌باشد. مناطق با TPI منفی نشان‌دهندهٔ توپوگرافی کم ارتفاع (کم) (تقعرها و گودال ها) و TPI مثبت نشان‌دهنده توپوگرافی زیاد(محدب و یا ستیغ ها) می‌باشد. براساس نتایج ۴۳/۶۳ درصد از مساحت حوضه دارای TPI معادل ۴/۲-

تا ۰/۶ می باشد. مقدار عددی مذکور برای شاخص TPI نشان دهنده لندفرم زهکش های شیب میانی و دره های کم عمق می باشد. شاخص TRI یا شاخص ناهمواری زمین همانطور که اشاره شد به نوعی اختلاف ارتفاع یک پیکسل با هشت پیکسل اطراف خود می‌باشد. این شاخص برای منطقه موردمطالعه از حداقل صفر تا بیش از ۱۴ تقسیم‌بندی شده است. بر اساس نتایج حاصل از محاسبه این شاخص بیش از ۳۸ درصد حوضه از شاخص TRI معادل ۷ تا بیش از ۱۴ برخوردار می‌باشد. از آنجاکه مقدار بالای این شاخص نشان دهنده تکتونیک فعال می‌باشد بنابراین بخش زیادی از حوضه از فعالیت نئوتکتونیک برخوردار است. عمده مناطق با شاخص TRI کمتر از ۳/۵ در جنوب‌غربی حوضه گسترش دارد(شکل ۱۱) که این قسمت بخش دشتی و هموار حوضه را شامل می‌شود.

اطلاعات مربوط به بالادست یک حوضهٔ آبخیز می تواند برای مطالعات هیدرولوژیکی آن حوضه مفید باشد. یکی از شاخص های موجود در ژئومورفولوژی که برای مطالعات کمی حوضهٔ آبخیز بکار می رود، شاخص توپوگرافی مرکب یا شاخص خیسی است. شاخص رطوبت توپوگرافی یا TWI در سطح حوضه نیز محاسبه و بدست آمد. مقدار این شاخص در حوضه مورد مطالعه بین ۱/۵- تا بیش از ۵/۵ بدست آمد. درصد مساحت هر یک از طبقات این شاخص در جدول(۳) محاسبه و نمایش داده شده است.

جدول ۳: درصد مساحت هر یک از طبقات شاخص های محاسبه شده در سطح حوضه

شاخص	کلاس	مساحت(هکتار)	درصد مساحت
انحنای کل	مقعر	۵۴۹۴۵/۵۴	۵۲/۸۰
	محدب	۴۹۱۳۴/۶	۴۷/۲۰
انحنای سطح	-۲/۹۹_-۰/۵	۱۰۹۹۹/۷۱	۱۰/۵۶
	-۰/۵_۰	۳۹۷۲۴/۰۲	۳۸/۱۶
	۰_۰/۵	۴۸۲۸۸/۱۵	۴۶/۴۰
	۰/۵_۳/۹۶	۵۰۶۸/۱۷	۴/۸۷
انحنای نیمرخ	-۴/۸۷_-۰/۵	۵۸۱۶/۳۴	۵/۵۸
	-۰/۵_-۰/۱	۲۵۰۰۰/۵۶	۲۴/۰۲
	-۰/۱_۰/۳	۵۸۰۴۷/۹۳	۵۵/۷۷
	۰/۳_۴/۲	۱۵۲۱۵/۲۲	۱۴/۶۱
شاخص TPI	< ۴/۲	۱۷۱۹۴/۰۵	۱۶/۵۲
	-۴/۲_۰/۶	۴۵۴۱۶/۵۲	۴۳/۶۳
	۰/۶_۶	۳۰۹۸۴/۴۸	۲۹/۷۶
	> ۶	۱۰۴۸۵/۰۹	۱۰/۰۷
شاخص TRI	۰_۳/۵	۲۹۵۱۱/۹	۲۸/۳۵
	۳/۵_۷	۳۴۴۰۹/۰۷	۳۳/۰۶
	۷_۱۴	۳۳۶۶۸/۴۶	۳۲/۳۴
	> ۱۴	۶۴۹۰/۷۱	۶/۲۳
شاخص TWI	< ۱/۵	۱۸۶۵۵/۱۱	۱۷/۹۲
	۱/۵_۲/۵	۳۷۳۷۶/۱۹	۳۵/۹۱
	۲/۵_۵/۵	۳۹۶۶۵/۷	۳۸/۱۱
	> ۵۵	۸۳۸۳/۱۴	۸/۰۵

نتیجه گیری

بررسی ویژگی‌های حوضه‌های آبخیز و اولویت‌بندی آنها از نظر مدیریت، به ویژگیهای متعددی از جمله وضعیت مورفومتری سطح حوضه آبخیز وابسته است. شناخت این ویژگی‌ها، مدیریت هر چه بهتر حوضه آبخیز را از نظر فرسایش

و رسوب، مطالعه سیلاب، بررسی منابع آب زیرزمینی، نفوذ رواناب و مدیریت و پایداری دامنه‌ها میسر می‌سازد. در این پژوهش پارامترهای مورفومتریک؛ انحنای کل، انحنای نیمرخ، انحنای سطح، شاخص ناهمواری زمین، شاخص موقعیّت توپوگرافی و شاخص رطوبت نسبی در حوضهٔ آبخیز فهلیان استخراج و محاسبه گردید. نتایج بررسی‌ها نشان داد که منطقه مطالعاتی از نظر انحنای کل تقریبا به طور نصف در حالت محدب(۵۲ درصد) و مقعر(۴۸ درصد) قرار دارد که این مورد بیانگر توزیع متعادل آبراهه‌ها در سطح حوضه به صورت واگرا و همگرا می‌باشد. حداقل و حداکثر شاخص محاسبه شده برای انحنای سطح به ترتیب ۲/۹۹- و ۳/۹۶ می باشد.

همچنین نتایج نشان می‌دهد حدود ۵۲ درصد وسعت حوضه دارای انحنای سطح ۰ تا ۳/۹۶ می باشد که این مسئله نیز نشان دهنده فراوانی خط الرأس ها و ستیغ ها در سطح حوضه است. در مجموع وسعت تقریباً یکسان سطوح محدب و مقعر و به عبارتی واگرا و همگرا براساس دو شاخص انحنای کل و انحنای سطح بیانگر توزیع متعادل آبراهه‌ها در سطح حوضه به صورت واگرا و همگرا می باشد. همچنین حداقل و حداکثر شاخص محاسبه‌شده برای انحنای نیمرخ به ترتیب ۴/۸۷- و ۴/۲ می‌باشد. انحنای دامنه تأثیر زیادی برروی سرعت جریان و حالت تقعر و تحدب دامنه‌ها دارد و با افزایش آن حالت مقعر شده و سرعت جریان کاهش می‌یابد و سرعت نفوذ بیشتر می‌شود. بنابراین در دامنه‌های مقعر و همگرا احتمال نفوذ آب بیشتر هست که منجر به ایجاد منابع آب زیرزمینی می‌شود. براساس نتایج ۴۳/۶۳ درصد از مساحت حوضه دارای TPI معادل ۴/۲- تا ۰/۶ می‌باشد. که نشان‌دهندهٔ لندفرم زهکش‌های شیب میانی و دره‌های کم عمق می‌باشد. وجود این لندفرمها با TPI کم موجب افزایش زمان تأخیر جریانهای سطحی در حوضه شده و نفوذ آب را باعث می‌شود که می‌تواند تأثیر به سزایی در ذخیره نزولات و رواناب‌های سطحی داشته باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد بیش از ۳۸ درصد حوضه از شاخص TRI معادل ۷ تا بیش از ۱۴ برخوردار می‌باشد که نشان می‌دهد بخش زیادی از حوضه از فعالیت نئوتکتونیک برخوردار است. شاخص رطوبت توپوگرافی یا TWI در سطح حوضه نیز محاسبه و بدست آمد. مقدار این شاخص در حوضه مورد مطالعه بین ۱/۵- تا بیش از ۵/۵ محاسبه شده است. نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌های مورداستفاده و نقشه‌های حاصل می‌تواند در برنامه‌ریزی مختلف مربوط به حوضه آبخیز که به آنها اشاره شد مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

۱. احمدآبادی، علی؛ رحمتی، مریم (۱۳۹۴): کاربرد شاخص‌های کمی ژئومورفومتریک در شناسایی پهنه‌های مستعد زمین‌لغزش بااستفاده از مدل SVM، (مطالعهٔ موردی: آزادراه خرم‌آباد-پل‌زال)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال چهارم، شماره ۳، صص ۲۱۳-۱۹۷.

۲. اولیایی، علیرضا، نظری سامانی، علی‌اکبر، تیموریان، تیمور و رزندی، یوسف(۱۳۹۲): کاربرد شاخص‌های زبری سطح در مدل‌سازی حوزه آبخیز مطالعه موردی: حوزه آبخیز بجنورد) مجموعه مقالات اولین همایش ملّی مدیریت منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس.

۳. ایلانلو، مریم (۱۳۹۹): بررسی تکتونیک فعال حوضه آبریز دالکی با استفاده از شاخص های ژئومورفیک و شواهد ژئومورفولوژیکی، جغرافیا(فصلنامه علمی ـ پژوهشی و بین‌المللی انجمن جغرافیای ایران)، سال هجدهم، شماره ۶۶، صص ۱۸۵-۱۶۸.

۴. تازه، مهدی، اسدی، مریم و کلانتری، سعیده(۱۳۹۴): ارزیابی قابلیت شاخص‌های ژئومورفومتری در استخراج نقشه شبکه آبراهه (مطالعه موردی :حوزه سه قلعه-همبو سرایان)، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۱، ۱۴۴-۱۳۴.

۵. جعفری‌رودسری، مسعود، جلالی، سعیده، صمدی قشلاقچائی، محمود و صمدی ارقینی، حجت الله (۱۳۹۵): بررسی شاخص های مورفومتری حوضه گرگانرود با استفاده از GIS، همایش ملی ژئوماتیک، دانشگاه آزاد اسلامی.

۶. حسین زاده، محمدمهدی و نوروزی طیولا، رعنا(۱۳۹۶): برآورد ارتفاع رواناب با استفاده از روش شماره منحنی و ابزار Arc CN-Runoff ، مطالعه موردی: حوضه آبخیز کشار، تهران، جغرافیا(فصلنامه علمی ـ پژوهشی و بین‌المللی انجمن جغرافیای ایران)، سال پانزدهم، شماره ۵۳، صص ۱۶۳-۱۵۱.

۷. صلحی، سینا و سیف، عبدالله(۱۳۹۷): مورفومتری پروفیل طولی دره های سهند، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۴، ۱۳۹۷، صص ۶۹-۵۳.

۸. صمدی، میثم، جلالی، سعیده، کرنژادی، آیدینگ و صمد قشلاقچائی، محمود(۱۳۹۵): بررسی شاخصهای مورفومتری در حوضه آبخیز چهل‌چای استان گلستان با استفاده از GIS، مجله علمی ترویجی- مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، صص، ۷۴-۶۷.

۹. متکان، علی اکبر، عاشورلو، داود، عقیقی، حسین و گل‌صفتان، غلامرضا(۱۳۹۷): ریزمقیاس‌سازی داده رطوبت خاکESA با استفاده از تصاویر ماهواره NOAA، جغرافیا(فصلنامه علمی ـ پژوهشی و بین‌المللی انجمن جغرافیای ایران)، سال شانزدهم، شماره ۵۷، صص ۱۵۷-۱۴۵.

۱۰. مکرم، مرضیه؛ نگهبان، سعید(۱۳۹۳): طبقه‌بندی لندفرم‌ها بااستفاده از شاخص موقعیت توپوگرافی(TPI) (مطالعه موردی: منطقه جنوبسی شهرستان داراب)، فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی(سپهر)، دوره ۲۳، شماره ۹۲، صص ۶۵-۵۷.

۱۱.مکرم، مرضیه، حجتی، مجید و زارعی، عبدالرسول(۱۳۹۶): استفاده از مدل جاذبه در سنجش از دور به منظور بررسی شاخص توپوگرافی خیسی، اکوهیدرولوژی، دورهٔ ۴، شماره ۱، صص ۲۴۵-۲۳۷.

۱۲.نگهبان، سعید و مکرم، مرضیه(۱۳۹۴): طبقه بندی لندفرم ها براساس شاخص موقعیت توپوگرافی(TPI) و ارتباط آن با ویژگی های زمین شناسی در حوضه آبخیز حکان شهرستان جهرم، پژوهش های فرسایش محیطی، صص ۸۹-۷۵

13. Atkinson PM. 1997, Sub-pixel target mapping from soft-classified, remotely sensed imagery Photogram. Engineering Remote Sensing. 71 (7): 839–846.
14. Berry JK. 2002, Use surface area for realistic calculations. Geoworld. 15(9): 20.
15. Bleich VC, Bowyer RT, Wehausen JD. 1997, Sexual segregation in mountain sheep: resources or predation? Wildlife Monographs. Pp. 134:1–50.
16. Day MJ. 1995, Surface roughness as a discriminator of tropical karst styles. Zeitschrift fu¨r Geomorphologie 32 (Supplement). 1–8.
17. Evans IS. 1972, General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. In: Chorley, R.J. (ed.): In Spatial analysis in geomorphology, Methuen & Co. Ltd, London. Pp. 17-90.
18. Fisher P, Wood J, Cheng T. 2004, Where is Helvellyn? Fuzziness of Multiscal Landscape Morphometry, Transactions of the Institute of British Geograhper. No. 29, pp, 106-128.
19. Guo PT, Liu HB, Wu W. 2009, spatial prediction of soil organic matter using terrain attributes in a hilly area, International Conference on Environmental Science and Information Application Technology. China. (3) 1: 759-762.
20. Hoechstetter S, Walz U, Dang, LH, Thinh, NX. 2008, Effects of topography and surface roughness in analyses of landscape structure – A proposal to modify the existing set of landscape metrics, Landscape Online 3. Pp. 1-14. DOI:10.3097/LO.
21. Khanduri K, Kumar S. 2011, Geomorphological study of Atagad Basin, Chamoli District, Uttarakhand: GIS and Remote Sensing approaches, INTERNATIONAL JOURNAL OF GEOMATICS AND GEOSCIENCES Volume 2. No 2.
22. Luca C, Si BC, Farrell, RE. 2007, Upslope length improves spatial estimation of soil organic carbon content. Canada Journal of Soil Science. (87) 1: Pp. 291-300.
23. Mokarram, M. Roshan, G. and Negahban, S. 2015, Landform classification using topography position index (case study: salt dome of Korsia-Darab plain, Iran), Model. Earth Syst. Environ. DOI 10.1007/s40808-015-0055-9.
24. Mokarram, M and Hojati, M. 2016, Comparison of Landform Classifications of Elevation, Slope, Relief and Curvature with Topographic Position Index in South of Bojnoord, DOI:10.18869/modares. Ecopersia.4.2.1343.
25. Mousavi, SR. Fallah, A. Abbasnejad, RA. And Shabani, M. 2007, The Aster DEM Generation for geomorphometric analysis of central alborz mountains, Iran. www.isprs2007ist.itu.edu.tr/18. pdf.
26. Muad AM, Foody GM. 2012, Super-resolution mapping of lakes from imagery with a coarse spatial and fine temporal resolution. Journal of Applied Earth Observation Geo information. (12) 1: 79–91.

27. Olaya, V., 2009. Basic land-surface parameters. In: Hengle, T., Reuter, H.I. (Eds.), Geomorphometry: Concepts, Software, Applications (Developments in Soil Science), vol. 33. , Elsevier, Amsterdam, pp. 3–30.
28. Pike, R. J., 2000. Geomorphology - Diversity in quantitative surface analysis, Progress in Physical Geography, No. 24, Pp. 1-20.
29. Rhoads, B.L., Thorn, C.E. (Eds). 1996. The Scientific Nature of Geomorphology, 27th Binghamton Symposium in Geomorphology.
30. Riley, S. J., S. D. DeGloria, and R. Elliot. 1999. A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. Intermountain Journal of Sciences 5:1–4.
31. Seif, A. 2014, Using Topography Position Index for Landform Classification (Case study: Grain Mountain), Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences, Bull. Env. Pharmacol. Life Sci., Vol 3 [11], 33-39.
32. Sappington, J.M., Longshore, K.M., Thompson, D.B., 2007. Quantifying landscape ruggedness for animal habitat analysis: a case study using bighorn sheep in the Mojave Desert. The Journal of Wildlife Management 71, 1419–1426.
33. Schmidt, J., Evans, I. S. and Brinkmann, J, 2003. Comparison of Polynomial models for land surface curvature calculation. International Journal of Geographical Information Science, 17: 8, 797-814.
34. Swanson F.J, Kratz T.K, Caine, N, Woodmansee R.G.1988. Landform effects on ecosystem patterns and processes. BioScience 38, 92-98. doi:10.2307/1310614.
35. Tennis, J.T., 2005. Experientialist epistemology and classification theory: embodied and dimensional classification. Knowledge Organization 32, 79–92.
36. Wang Q.M, Wang D.F, 2011. Sub-pixel mapping based on sub-pixel to sub-pixel spatial attraction model. In: Proceedings of the 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS. 593–596.
37. Weiss, A.)2006(. Topographic Position and landforms Analysis. Poster presentation, ESRI userConference, San Diego, C.A.
38. Wilson, J. P. and Gallant, J. C, 2000. Terrain Analysis Principles and Application, Chichester Wiley press.
39. Wood, J., 1996. Scale-based characterization of digital elevation models. In: Parker, D. Innovations in GIS, Tayler and Francis, London, pp. 163-175.