

مورفومتری پروفیل طولی دره‌های سه‌پند

سینا صلحی - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان.
عبداله سیف* - دانشیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۰۹ تأیید نهایی: ۱۳۹۷/۰۲/۲۰

چکیده

مورفومتری رویکرد جدیدی در بررسی و تحلیل‌های کمی لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی محسوب می‌گردد. مورفومتری پروفیل طولی دره‌های کوهستانی، نشان از رفتار فرمی و فرآیندهای حاکم بر آنها داشته و شاخص‌های کمی می‌تواند در جهت تحلیل‌های فرم - فرآیند و تفسیر وضعیت تکامل و تحول واحدهای ناهمواری مورد استفاده قرار گیرد. در این پژوهش از ۱۳ دره کوهستانی سه‌پند واقع در شمال غرب ایران استفاده شد که از نظر لیتولوژیکی شرایط همگن و متقارنی را دارا است. شاخص‌های مورفومتریکی در ۳ سطح پائین، میانی و بالا (تخصصی) تبیین، و در محیط پایتون برنامه نویسی گردید. ۵ شاخص مورفومتریکی سطح پائین (ژئومتریک، توپولوژیک)، ۲۰ شاخص مورفومتریکی سطح میانی (آماری، توپوگرافیک) و ۴ شاخص سطح بالا (نسبت طول دوبعدی به سه‌بعدی، شاخص درصد تقعر پروفیلی، شاخص تقعر و تحدب، شاخص نسبت برجستگی ارتفاعی) مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که دره‌های واقع بر دامنه‌های شمال و شمال شرقی سه‌پند از تکامل پروفیل طولی متفاوتی نسبت به دامنه‌های جنوب تا جنوب غربی برخوردارند، که حاکی از تفاوت در سیستم‌های اقلیمی، فرسایشی و نیز رژیم‌های رطوبتی - حرارتی متفاوت در این دو جناح از ارتفاعات سه‌پند است. در انتها تمامی شاخص‌های مورفومتریکی در محیط برنامه‌نویسی پایتون، برنامه نویسی و واسط گرافیکی کاربر با استفاده از کتابخانه Tkinter طراحی و نرم افزار گرافیکی Longi-Profile Analyzer V.1 تهیه و ارائه شد.

واژگان کلیدی: مدلسازی، مورفومتری، پروفیل طولی، شاخص تقعر پروفیلی، دره‌های یخچالی سه‌پند.

مقدمه

ژئومورفومتری علم تجزیه و تحلیل کمی سطح زمین است (پایک^۱، ۱۹۹۵، ۲۰۰۰؛ راسمان^۲، ۲۰۰۴) که رویکرد نسبتاً جدیدی در بازسازی سطوح توپوگرافی زمین به وسیله پردازش کامپیوتری ارتفاع سطح زمین است (توبلر^۳، ۱۹۷۶-۲۰۰۰). ژئومورفومتری یک زمینه بین رشته‌ای است که به کمک ریاضیات، علوم زمین و عمدتاً علوم کامپیوتری متکامل شده است که به وسیله فعالیت‌های علمی متعددی پشتیبانی می‌شود که شامل طیفی از جغرافیا، ژئومورفولوژی، علوم خاک و علوم مهندسی نظامی می‌گردد و چیزی جز مجموعه‌ای از تکنیک‌های عددی که با نظم و روند خاصی ایجاد شده اند (پایک^۱، ۱۹۹۵)، نیست. دو نوع فراگیر تحلیل‌های ژئومورفومتری وجود دارد که شامل ارزیابی عوارض محلی و کلی عوارض زمین^۴ در ارتباط با مبحث سطوح پیوسته زمین می‌باشند (اوانس^۵، ۱۹۷۲). مورفومتری لندفرم‌ها (ژئومورفومتری) با استفاده از اطلاعات دیجیتالی و یا بدون آن، دارای دقت بسیار بالایی به عنوان بخشی از ژئومورفولوژی کمی است (تورن^۶، ۱۹۸۸، شیدگر^۷، ۱۹۹۱، لیپولد و همکاران^۸، ۱۹۹۵، رودز و تورن^۹، ۱۹۹۶). نمایش عددی سطح زمین به شکل‌های مختلفی همچون مدل‌سازی سطح زمین^{۱۰}، آنالیز رویه سطحی زمین^{۱۱}، در علم توپوگرافی شناخته شده است. توصیف‌کننده‌های کمی^{۱۲} یا اندازه‌گیری فرم سطح زمین شامل: برسی و اندازه‌گیری پارامترهای لندفرمی، متغیرهای مورفومتری، اطلاعات رویه سطحی، صفات رویه سطحی و ویژگی‌های ژئومورفومتری است و ژئومورفومتری در واقع علم توپوگرافی کمی سازی شده است، که تمرکز خاصی بر استخراج ویژگی‌ها و اجزا سطح زمین، از مدل رقومی ارتفاعی دارد (هنگل و روتر^{۱۳}، ۲۰۰۹). سازمان زمین شناسی آمریکا^{۱۴} در سال ۱۹۷۴ برای اولین بار شروع به انتشار مدل‌های رقومی ارتفاعی با دقت سه دقیقه قوسی نمود، که از آن زمان تاکنون مدل رقومی ارتفاعی به عنوان یک ابزار پرکاربرد برای بیشتر ورودی‌های رایج ژئومورفومتری مورد استفاده قرار گرفته است. ژئومورفولوژیست‌ها، که با پیچیدگی سطح زمین در کمی‌سازی^{۱۵} روبه‌رو هستند، بایستی سطح زمین را در اجزای قابل کنترل تحلیل و اندازه‌گیری نموده و یا در جهت تحلیل سطح پیوسته و ناهموار زمین به وسیله یک سری ویژگی‌های نقاط نمونه تلاش کنند. ژئومورفومتری، روش ارزیابی و تحلیل مشخصات سطحی یک یا چند فرآیند خاص است که طبق معیارهای مشخصی، بخش‌هایی از سطح زمین را تشخیص داده و تحلیل و توصیف می‌کند (اوانس^{۱۶}، ۱۹۷۴).

مدلسازی‌های کمی، عددی و ریاضی در پژوهش‌های ژئومورفولوژیکی و به طور عام در حیطه علوم زمین، نقش کمتری به خود اختصاص داده است که توجه بیشتر محققان علوم زمین از جمله ژئومورفولوژیست‌ها را طلب می‌کند. بهترین

۱ - (Pike, 1995)

۲ - (Rasemann, et.al, 2004)

۳ - (Tobler, 1976; 2000)

۴ - Local and global terrain features

۵ - (Evans, 1972)

۶ - (Thorn, 1988)

۷ - (Scheidegger, 1991)

۸ - (Leopold, 1995)

۹ - (Rhoads and Thorn, 1996)

۱۰ - Terrain Analysis

۱۱ - Terrain Surface Analysis

۱۲ - Quantitative descriptor of the terrain

۱۳ - (Hengl, Reuter, 2009)

۱۴ - United States Geology Survey

۱۵ - Quantify

۱۶ - (Evans, 1974)

روش، برای تجزیه و تحلیل داده‌ها در مورفومتری، استفاده از یک برنامه کامپیوتری خودکار و دیجیتالی برای پردازش داده‌های رقمی است. مطالعات کمی و عددی که تناسب بالاتری با الگوریتم‌سازی و برنامه‌نویسی کامپیوتری دارد، می‌تواند در راستای تهیه و تدوین نرم‌افزارهای کاربردی و مورد نیاز مطالعات بنیادین در زمینه علوم زمین راهگشا باشد. بینگویی و همکاران^۱ (۲۰۰۱a) مورفولوژی مقاطع عرضی دره‌های یخچالی کوه‌های تیان شان چین را با استفاده از معادلات توانی، کوادراتیک و برازش منحنی به پروفیل‌های عرضی انجام داده و رفتار فرمی آنها را تفسیر و تحلیل نمودند. بینگویی و همکاران^۲ (۲۰۰۱b) به مطالعه نوسانات طولی مورفولوژی سطح مقطع یک دره یخچالی واقع در تیان شان چین پرداختند. آنها از نوسان نسبت عرض به عمق بدین منظور استفاده کردند. هاربر^۳ (۲۰۰۹) به مدلسازی تکامل و توسعه دره‌های یو-شکل^۴ یخچالی پرداخت. وی با استفاده از مدل المان محدود^۵ به مدلسازی جریان یخ در پروفیل عرضی دره‌های یخچالی و الگوی فرسایش در آنها پرداخت. اسکات^۶ (۲۰۱۵) به مطالعه پروفیل طولی رودخانه‌ها با استفاده از معادلات و توابع برازش منحنی بر روی پروفیل طولی رودخانه‌ها، به تحلیل و بررسی آنها در واحدهای مختلف ژئومورفیک پرداخت. فرهان و همکاران^۸ (۲۰۱۵) به آنالیز کمی پارامترهای ژئومورفومتریکی وادی کراک اردن با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور پرداختند. آنها از تحلیل‌های ژئومورفومتریکی برای بررسی و تحلیل ویژگی‌های مورفومتریکی شبکه‌های زهکشی استفاده کردند.

بیاتی خطیبی و رجبی (۱۳۸۵) به بررسی تحولات نیمرخ طولی دره‌های کوه سه‌هند با استفاده از تحلیل‌های رگرسیونی و معادلات مختلف خطی، توانی و لگاریتمی پرداختند، و با توجه به معادلات رگرسیونی، دره‌ها را در کلاس‌های مختلف از نظر شرایط تکامل و تحول، گروه‌بندی کردند. خطیبی و رجبی (۱۳۸۵) به تحلیل ژئومورفولوژیکی نیمرخ طولی دره‌های اصلی توده کوهستانی سه‌هند با استفاده از معادلات مختلف رگرسیونی و ریاضی پرداختند. رجبی و همکاران (۱۳۸۷) با استفاده از شاخص‌های مورفومتری و هیپسومتری پروفیل‌های عرضی و طولی دره‌های کوه سه‌هند، درجه تکاملی دره‌های یخچالی را تفسیر کردند. رجبی و خطیبی (۱۳۸۷) به بررسی لندفرم‌های دره‌های یخچالی کوهستان سه‌هند پرداختند، دره‌ها را از لحاظ نیمرخ‌های عرضی مورد مطالعه قرار داده، از مدل‌های مورفولوژیکی در تحلیل آنها استفاده کردند. کرمی (۱۳۸۸) به بررسی فعالیت‌های تکتونیک حوضه اوجان چای واقع در ارتفاعات سه‌هند پرداخت. وی با استفاده از تحلیل‌های مورفومتریکی به این نتیجه رسید که تقریباً کل حوضه دارای فعالیت تکتونیک بالایی است و وی به شواهدی چون ویژگی‌های لرزه‌ساختی و تمرکز کانون‌های زمین لرزه‌ای در این منطقه به عنوان تائیدی بر نتایج خود اشاره داشت. کرمی (۱۳۹۱) با استفاده از شاخص‌های مورفومتریکی به ارزیابی نسبی تکتونیک جنبه^۹ در حوضه‌های شمال و شرق کوه سه‌هند پرداخت. وی از شاخص‌های مورفومتریکی، استفاده نمود تا بر این اساس فعالیت‌های زمین‌ساختی را در چهار طبقه کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد ارزیابی و طبقه‌بندی نماید. یمانی و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از برخی شاخص‌ها و شواهد مورفومتریکی به ارزیابی و بررسی تاثیرات تکتونیک جنبه بر مخروط افکنه شمال دامغان به بررسی روابط و نسبت‌های مورفومتریکی بین حوضه‌ها و مخروط افکنه‌ها پرداخته و همبستگی‌های آماری بین برخی از این اجزا را تایید

۱- (Yingkui, Gengnian, Zhijiu, 2001a)

۲- (Yingkui, Gengnian, Zhijiu, 2001b)

۳- VWDR

۴- (Horbor, 2009)

۵- U-ness shape

۶- Finite Element

۷- (Scott, 2015)

۸- (Farhan, et.al, 2015)

۹- Active Tectonic

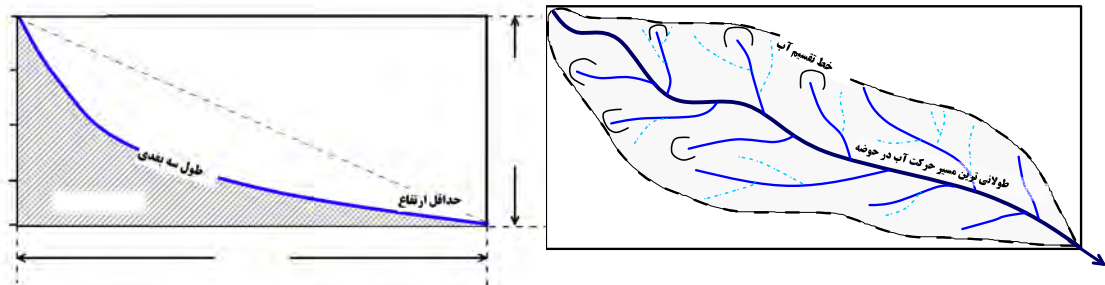
کردند. گورابی و یمانی (۱۳۹۱) به تحلیل روابط بین ویژگی‌های مورفومتری حوضه‌های زهکشی و مخروط افکنه‌ها پرداختند، آنها اعلام نمودند که تفاوت‌های چشم‌گیری بین حوضه‌های زهکشی و ویژگی‌های مورفومتریکی مخروط افکنه‌های ایران مرکزی، مشاهده می‌شود. جباری و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از شاخص‌های مورفومتریک، همچون منحنی هیپسومتریک، انتگرال هیپسومتریک، شاخص سینوسیته جبهه کوهستان، شاخص عدم تقارن حوضه زهکشی، شاخص گرادیان و پیچ و خم طولی رودخانه، وضعیت تکتونیکی را ارزیابی کردند. صیاد و همکاران (۱۳۹۳) به بررسی مورفومتریکی دهانه آتش فشان سهند با روش‌های مورفومتریک، پرداخته و دهانه‌های آتش فشانی کوه سهند را به چهار گروه دایره‌ای، شکاف دار، کشیده و متغیر طبقه‌بندی کردند. جعفری و رستم خانی (۱۳۹۴) به بررسی تحولات کواترنری دره‌های کوهستانی سبلان با استفاده از مورفومتری و مورفولوژی خطوط منحنی میزان پرداختند. آنها با استفاده از روش‌های ریاضی و آماری ضرایب خمیدگی منحنی میزان را بررسی و جدول و روابط مربوط به هر یک از دره‌ها را محاسبه و ارائه کردند. ابراهیمی و سیف (۲۰۱۶) به مورفومتری دره‌های یخچالی زردکوه پرداختند و با استفاده از معادلات توانی و کوادراتیک به توصیف رفتار این دره‌ها پرداخته و نتایج مدل‌های ریاضی را در ارتباط با درجات توسعه یافتگی دره‌ها و میزان تکامل آنها مطالعه و بررسی کردند. ابراهیمی و سیف (۲۰۱۷)، به بررسی ویژگی‌های مورفومتریک سیرک‌های یخچالی در ارتفاعات زاگرس پرداختند. آنها سیرک‌های احتمالی را با استفاده از طبقه‌بندی شیب و تشخیص چشمی، ترسیم و با استفاده از معادلات توانی برازش شده به پروفیل‌های طولی، به چند گروه طبقه‌بندی کردند.

هدف اصلی این پژوهش در راستای کمی‌سازی، مدل‌سازی و استفاده از ابزار و الگوریتم‌های پردازش خودکار مدل‌های مورفومتریک در شناسایی و تحلیل یکی از مهمترین عوارض ژئومورفولوژیک کوهستانی (دره‌ها) می‌باشد. در پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، جای پژوهش‌های هندسی، ریاضی و محاسباتی دقیق به کمک الگوریتم‌های پردازش کامپیوتری از نظر نوین‌سندگان خالی بوده و به همین دلیل در جهت ارتقا و بهبود چرخه مدل‌سازی‌های مورفومتریکی گام برداشته شده است. اهداف مورد نظر در این پژوهش به طور کلی شامل: ۱- استفاده از برنامه‌نویسی پایتون در مدل‌سازی و تحلیل پروفیل طولی دره‌های کوهستانی. ۲- ترکیب و مدلیزه کردن شاخص‌های مورفومتریک و استفاده از مدل‌های مورفومتریک خلاقانه. ۳- کمی‌سازی و استفاده از الگوریتم‌های مختلف ریاضی و آماری و خودکار سازی الگوریتم‌های محاسباتی آنها. ۴- تشخیص درجات تکامل پروفیل‌های طولی دره‌های کوهستانی و تطابق و مقایسه آنها به یکدیگر. ۵- تحلیل مورفومتریکی پروفیل طولی و ارتباط آنها با درجات تحول - تکامل فرسایش یخچالی و مجاور یخچالی. ۶- تهیه نرم افزارهای کامپیوتری در مدل‌سازی و الگوریتم‌سازی‌های قابل استفاده در مطالعات ژئومورفولوژیکی و خصوصاً حوزه مطالعات ژئومورفولوژی یخچالی. در این مطالعه پروفیل طولی دره‌های کوهستانی مورد بررسی قرار گرفته و داده‌های مکانی و فضایی مربوط به هر دره به عنوان ورودی به مدل‌های مورفومتریکی داده می‌شود. ارتفاعات سهند به صورت مطالعه موردی انتخاب شد. این توده کوهستانی بین طول جغرافیایی ۴۵ و ۵۴ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۴۷ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۲۲ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۲ دقیقه شمالی در استان آذربایجان شرقی قرار دارد.

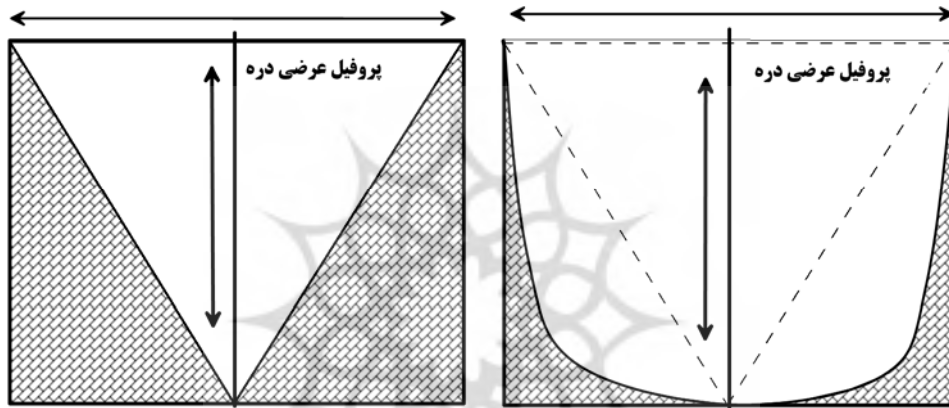
۲- مبانی نظری

اصلی‌ترین مسیر زهکشی در این دره که معمولاً منطبق با طولانی‌ترین مسیر حرکت آب بوده و از نظر رتبه آبراهه، دارای بالاترین رتبه زهکشی است، با در نظر گرفتن تغییرات ارتفاعی در مسیر جریان معرف پروفیل طولی می‌باشد. نیمرخ طولی دره‌های کوهستانی و نوع رفتار آنها می‌تواند معرف برخی از ویژگی‌ها و سیستم‌های فرسایشی حاکم بر آنها باشد که با در نظر گرفتن تجانس لیتولوژیک و با استفاده از شاخص‌های کمی ریخت‌شناسی، می‌توان به تحلیل و بررسی سیستم‌ها و رفتارهای فرسایشی و تکاملی دره‌های کوهستانی پرداخت. مطالعات مورفومتریکی دره‌های یخچالی غالباً در سه بخش کلی، شامل مطالعات مورفومتریکی مقاطع پلان، مقاطع عرضی و مقاطع طولی می‌گردد. این سه بخش در حیطه مطالعات ژئومورفومتریکی قرار گرفته و در ارتباط با مولفه‌های جریانی و فلوویال، ارزیابی‌های تکتونیکی و نیز

سیستم‌های فرسایش یخچالی و مجاور یخچالی مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکل (۱) نمای پلان و پروفیل طولی و شکل (۲) نمای عرضی یک دره کوهستانی را به طور شماتیک نشان می‌دهد.



شکل ۱: منظر پلان از یک دره کوهستانی (راست) منظر نیمرخ طولی یک دره کوهستانی (چپ) - منبع: نویسندگان



شکل ۲: منظر عرضی از دره‌های کوهستانی به طور شماتیک (مآخذ نویسندگان)

۳- روش تحقیق

در این پژوهش از داده‌های ارتفاعی سطحی^۱، منتشر شده توسط آژانس فضایی ژاپن در ماه می و اکتبر ۲۰۱۵ با قدرت تفکیک افقی در حدود ۳۰ متر استفاده شد. این داده‌ها از تصاویر ماهواره آلس^۲ به دست آمده است (تاکاکو، ۲۰۱۴). این پایگاه داده بر اساس داده‌های ارتفاعی سطحی (نسخه شبکه ۵ متری) توپوگرافی سه بعدی که در حال حاضر دقیق‌ترین داده‌های ارتفاعی در مقیاس جهانی هستند، به دست آمده است (تادونو، ۲۰۱۴). برای استخراج نام و اسامی رودخانه‌ها، دره‌ها و مراکز روستایی و شهری از نقشه‌های توپوگرافی ۵۰۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور استفاده شد. حوضه‌های زهکشی هر یک از دره‌ها با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی، نقشه‌های توپوگرافی و مدل سایه و روشن و به کمک مدل هیدرولوژیکی آرک هیدرو^۳ در محیط نرم افزاری جی‌آی‌اس تهیه و ترسیم شد (شکل ۳). بعد از تهیه و ترسیم لایه هیدرولوژیکی هر دره، طولانی‌ترین زهکش سطحی از نقطه خروجی هر حوضه تا مرتفع‌ترین ارتفاع موجود به صورت لایه‌های برداری ترسیم شد. هر یک از لایه‌های برداری خطی به گره‌هایی با فواصل منظم و با تراکم بالا تبدیل شد. بدین صورت برای هر خط تعدادی گره^۴ با ارزش طول، عرض و ارتفاع^۵ تهیه گردید تا مختصات مکانی نقاط واقع بر

۱- Digital Surface Model (DSM)

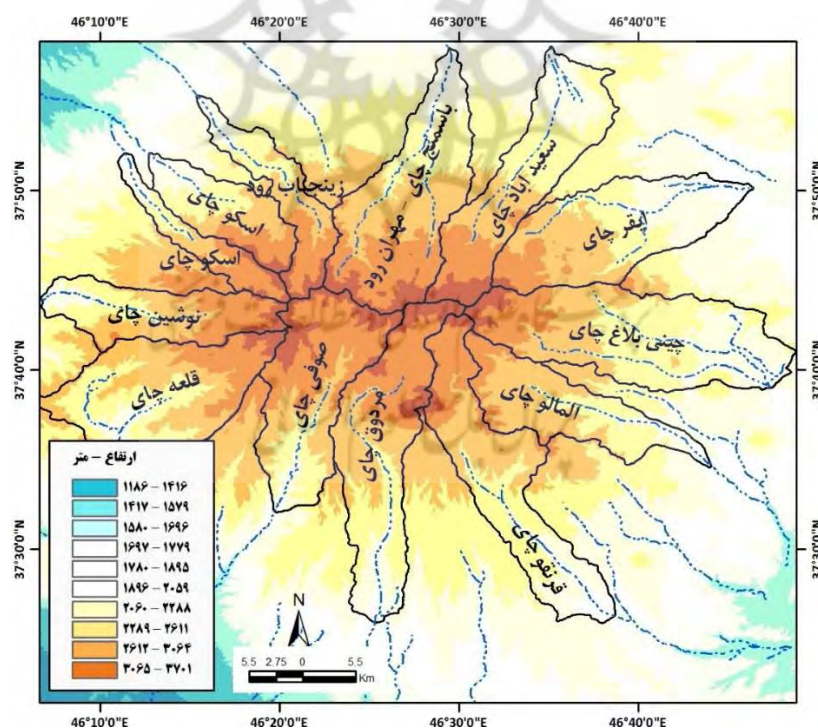
۲- ALOS

۳- Arc Hydro 10.3

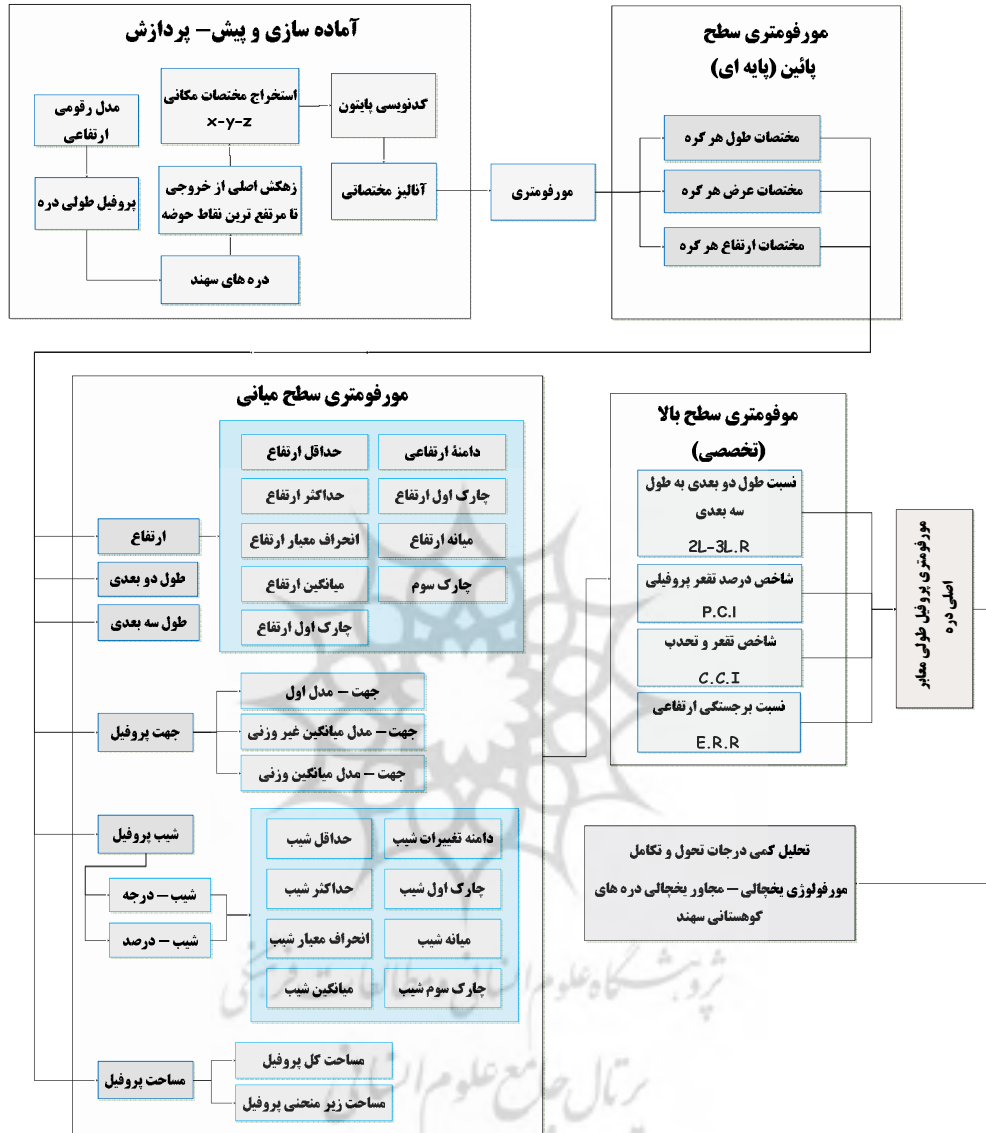
۴- Vertex

۵- xyz

پروفیل مشخص شوند. اطلاعات مکانی به دست آمده در قالب فایل‌های نوشتاری^۶ و اسکی^۷ به بخش دوم، یعنی برنامه‌نویسی پایتون وارد شدند. در این بخش از طریق کدنویسی و اتوماتیک‌سازی فرایندهای مورفومتریکی و محاسباتی و ایجاد الگوریتم‌های پیش‌رونده کنترل شده در جهت اهداف مورفومتریکی پروفیل‌های طولی و مدلسازی آنها اقدام گردید. در گام اول داده‌های مختصات مکانی (طول و عرض و ارتفاع) هر نقطه برداشت گردید. با استفاده از روابط ریاضی، آماری، و هندسی، اندازه‌گیری‌های اولیه انجام پذیرفت. با آنالیز داده‌های مکانی پایه (طول، عرض و ارتفاع هر نقطه از پروفیل طولی)، شاخص‌های اولیه و پیش‌نیاز مورفومتریکی و در واقع اندازه‌گیری‌های اولیه هندسی با کدنویسی پایتون، محاسبه گردید. این شاخص‌ها به عنوان ورودی‌های مورد نیاز مدل‌سازی‌های مورفومتریکی در مرحله بعد مورد استفاده قرار گرفت. سپس با استفاده از این شاخص‌ها که در مرحله نخست محاسبه شده‌اند، شاخص‌های مورفومتریکی مشتق به دست آمد. این بخش شروع مرحله مدلسازی در تحلیل درجه تکامل یخچالی دره‌های کوهستانی از نقطه نظر شاخص‌های مورفومتریکی پروفیل طولی زهکش‌های اصلی حوضه می باشد. شکل (۳) حوضه هیدرولوژیک دره‌های ۱۳ گانه منتخب و معابر زهکشی اصلی که به مرتفع‌ترین قله و نقاط هر حوضه منتهی می‌گردد را نشان می‌دهد. نقاط خروجی هر یک از حوضه‌ها به دلیل همگن‌سازی شرایط در ارتفاع ثابت ۱۸۰۰ متر که تقریباً با مرز کنیک واحد ناهمواری منطبق است، تعیین شد. به دلیل کاهش تأثیرات ناهمگن لیتولوژی این واحد کوهستانی انتخاب و مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر توزیع همگن لیتولوژی در بدنه این واحد کوهستانی، لایه‌بندی و توزیع چینه‌شناسی و زمین‌ساختار و زیرساختارهای این واحد کوهستانی نیز به دلیل مکانیسم شکل‌گیری از یکنواختی مورد نظر برخوردار بود. شکل (۴) مراحل تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۳: دره‌های ۱۳ گانه مورد مطالعه در ارتفاعات سه‌پند



شکل ۴: مراحل تحقیق
شکل ۴: مراحل تحقیق

۳-۱- مورفومتری سطح پائین^۸

در جهت تحلیل مورفومتریکی پروفیل طولی دره‌های کوهستانی کوه سه‌سهند از شاخص‌های مورفومتریکی مختلفی استفاده شد. این مرحله شامل استخراج مولفه‌های مورفومتریکی پایه در محاسبات مورفومتریکی و مدل‌های سطوح میانی و بالا می‌شود. اطلاعات مکانی پروفیل طولی دره‌های مورد مطالعه به مجموعه مختصات xyz تبدیل، کدگذاری و آماده‌رود به پردازش مورفومتریکی ماشینی در سطوح بعدی شد.

۳-۲- مورفومتری سطح میانی^۹

۸ - Basic Morphometry Level

۹ - Mid-Level Morphometry

مورفومتری سطح میانی شامل محاسبات مورفومتریکی ارتفاع، طول، جهت، شیب و مساحت می‌شود. این آماره‌های مورفومتریکی (موردی که در شکل ۴ مشاهده می‌شود) محاسبه و در فرآیند پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. جهت یا امتداد هر دره می‌تواند در میزان و ساعات جذب انرژی تابشی خورشید بر سطوح ناهموار کوهستانی اثر داشته باشد. (سیف و صلحی، ۱۳۹۱ و سیف و همکاران، ۲۰۱۶) جهت دره‌های کوهستانی می‌تواند به عنوان یک شاخص مورفومتریکی در مطالعات عام ژئومورفولوژی و مطالعات ژئومورفولوژی یخچالی مورد استفاده قرار بگیرد. برآورد جهت قرارگیری دره‌های کوهستانی از طریق سه مدل مورفومتریکی به دست آمد. مدل اول بر اساس مختصات نقطه ابتدا و انتهای پروفیل عمل می‌نماید. از این مدل در نرم افزار گلوبالمپر^{۱۰} و بیشتر مجموعه‌های نرم افزاری جی‌آی‌اس در برآورد جهت امتداد یک پاره خط استفاده شده است. در این مدل از نقطه ابتدا به انتهای پروفیل، خطی مستقیم ترسیم و آزیموت این امتداد با توجه به رابطه (۱) به دست آمد. این مدل برای تعیین جهت کلی دره مناسب بوده و در مواقعی که پیچ‌وخم‌های محلی در برآورد جهت کلی مشکل‌ساز است، می‌تواند معرف خوبی برای جهت کلی دره باشد ایده محاسباتی این مدل از نرم افزار گلوبالمپر اخذ شده و با استفاده از زبان پایتون برنامه نویسی شده است.

$$D_{P(Start,End)} = \text{ArcTan}\left(\frac{dy}{dx}\right) \text{ رابطه (۱)}$$

که در این فرمول dx و dy به ترتیب اختلاف مختصات طولی و عرضی بین نقاط ابتدا و انتهای خط پروفیل طولی (معاير زهکش‌های اصلی) می‌باشد.

با توجه به کاستی‌های مدل اول در برآورد جهت دره از مدل مورفومتریکی دیگری که بتواند معرف مناسب تری از وضعیت قرارگیری دره ارائه نماید، استفاده شد. در این مدل جهت بین هر جفت گره مختصاتی^{۱۱} بر روی پروفیل طولی محاسبه و به صورت غیر وزنی میانگین‌گیری شد. الگوریتم تکرار شوند در این مدل توسط کد نویسی پایتون اتوماتیک سازی شد رابطه (۲) (مآخذ: نویسندگان). روش محاسبه را نشان می‌دهد

$$D_{UWM} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{ArcTan}\left(\frac{dy}{dx}\right)}{n-1} \text{ رابطه (۲)}$$

متغیرهای dx و dy مطابق با رابطه (۱) می‌باشد، تنها اختلاف در این مدل متغیر n بوده که تعداد پاره‌خط‌های مورد پیمایش الگوریتم را نشان می‌دهد که برابر با تعداد گره‌های پیمایش شده (n) با کسر یک خواهد بود.

مدل دوم در برآورد جهت دره به دلیل غیر وزنی بودن و عدم تاثیر طول پاره خط‌ها در میانگین در مواقعی خصوصاً زمانی که فواصل بین گره‌های مختصاتی نا یکسان است، می‌تواند به نتایج بعضاً نامنتطبق با شرایط واقعی منتهی گردد. در نتیجه در این بخش از روش سوم استفاده شد. در این مدل از طول بین هر جفت گره مختصاتی به عنوان ضریب تاثیری در میانگین کل استفاده شد (رابطه ۳) (مآخذ: نویسندگان). در نتیجه پاره خط‌هایی که دارای طول بیشتری هستند تاثیرشان در میانگین بیشتر خواهند بود.

$$D_{WM} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{ArcTan}\left(\frac{dy}{dx}\right) \times L}{\sum L} \text{ رابطه (۳)}$$

۳-۳- مورفومتری سطح بالا یا تخصصی^{۱۲}

بعد از محاسبات مورفومتریکی در سطح پائین و میانی، محاسبات مورفومتریکی سطح بالا یا تخصصی انجام گرفت. این مدل‌ها شامل نسبت برجستگی ارتفاع (E.R.R)، شاخص تقعر و تحدب (C.C.I)، شاخص درصد تقعر پروفیلی (P.C.I) و نسبت طول دوبعدی به سه‌بعدی (L2-L3.R) می‌شوند. در ادامه به توضیح در مورد هر یک از موارد فوق پرداخته می‌شود.

۱۰ - Global Mapper v.18

۱۱ - Vertex

۱۲ - High-Level Morphometry

۱-۳-۳- نسبت برجستگی ارتفاع^{۱۳}

نسبت برجستگی ارتفاع (پایک و ویلسون^{۱۴}، ۱۹۷۱) با استفاده از رابطه (۴) محاسبه شد. این شاخص یکی از نمایه‌های مورفومتریکی است که موقعیت میانگین ارتفاعی پروفیل طولی در دامنه تغییرات ارتفاع را نشان می‌دهد. نزدیک شدن موقعیت میانگین به سمت ارتفاعات بالاتر می‌تواند به بالا رفتن این شاخص منتهی گردد. در مورد پروفیل‌های طولی کاملاً خطی که تقریباً کمتری در بخش‌های مرتفع از خود بروز می‌دهند این شاخص در حدود ۰/۵ می‌باشد.

$$E. R. R = \frac{Z_{average} - Z_{min}}{Z_{Max} - Z_{Min}} \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در این فرمول E.R.R نسبت برجستگی ارتفاعی، $Z_{average}$ میانگین ارتفاع، Z_{min} و Z_{Max} به ترتیب حداقل و حداکثر ارتفاع منحنی پروفیل طولی می‌باشند.

۲-۳-۳- شاخص تقعر و تحدب^{۱۵}

شاخص تقعر و تحدب (لی و همکاران، ۱۹۶۰) با استفاده از رابطه (۵) محاسبه شد. این نمایه مورفومتریکی وضعیت و درجه تحدب و تقعر و مسطح بودن پروفیل طولی را نشان می‌دهد.

$$C. C. I = \frac{Z_{Max} - Z_{Min}}{Z_{Mean}} \quad \text{رابطه (۵)}$$

در این رابطه، C.C.I شاخص تقعر و تحدب، Z_{Max} و Z_{Min} به ترتیب حداکثر و حداقل ارتفاع پروفیل طولی را نشان می‌دهند، Z_{Mean} متوسط ارتفاع پروفیل می‌باشد. ضریب C.C.I اگر بزرگتر از صفر باشد، تحدب در صورتی که کمتر از صفر باشد، تقعر و در سطوح مسطح برابر با صفر می‌باشد.

۳-۳-۳- شاخص درصد تقعر پروفیلی^{۱۶}

برای محاسبه این شاخص، مساحت پروفیل طولی در حوضه‌های ۱۳ گانه دره‌های کوه سه‌سند با استفاده از رابطه (۶) (لی و همکاران، ۱۹۶۰) محاسبه شد.

$$A_{Profile} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{Z_i + Z_{i+1}}{2} \times D_{i,i+1} \quad \text{رابطه (۶)}$$

که در این رابطه: $A_{Profile}$ ، مساحت زیر منحنی پروفیل طولی، Z_i ارتفاع نقاط بر روی خط پروفیل طولی Z_{i+1} ارتفاع نقطه بعدی در مسیر خط پروفیلی و $D_{i,i+1}$ فاصله افقی بین i امین نقطه و $i+1$ امین نقطه بر روی خط پروفیل است. سپس با استفاده از رابطه (۷) شاخص درصد تقعر پروفیلی محاسبه شد.

$$A_{Total} = (H_{max} - H_{min}) \times L_{2D} \quad \text{رابطه (۷)}$$

که در این رابطه: A_{Total} مساحت سطح مقطع طولی کل پروفیل با در نظر گرفتن طول مسطحاتی خط پروفیل و دامنه نوسان ارتفاعی آن می‌باشد. H_{min} و H_{max} به ترتیب حداکثر و حداقل ارزش ارتفاعی منحنی پروفیلی بوده و L_{2D} طول مسطحاتی پروفیل طولی است که توسط رابطه (۹) محاسبه شد. درصد تقعر پروفیلی با استفاده از مساحت نیمرخ و مساحت کل محاسبه شد (رابطه ۸).

$$P. C. I = \frac{A_{Profile}}{A_{Total}} \times 100 \quad \text{رابطه (۸)}$$

که در این رابطه: P.C.I، درصد تقعر پروفیلی و $A_{Profile}$ مساحت پروفیل طولی و A_{Total} مساحت کل پروفیل می‌باشد. که به ترتیب توسط روابط (۶) و (۷) محاسبه می‌شوند.

۱۳ - Elevation Relief Ratio (E.R.R)

۱۴ - (Pike and Wilson, 1971)

۱۵ - Concavity - Convexity Index (C.C.I)

۱۶ - Profile concavity Index (P.C.I)

۴-۳-۳- محاسبه شاخص نسبت طول دو بعدی به سه بعدی^{۱۷}

در ابتدا طول دو بعدی (2D-Length) نیمرخ طولی دره از رابطه فیثاغورث محاسبه می‌شود. رابطه (۹) روش محاسبه طول دو بعدی را نشان می‌دهد. با استفاده از برنامه نویسی پایتون و الگوریتم‌های تکرار شونده، طول دو بعدی بین هر یک از گره‌های موجود بر روی نیمرخ طولی محاسبه و مجموع آنها به عنوان طول مسطحاتی پروفیل (تصویر خط پروفیل طولی بر روی محور X,Y) به دست می‌آید.

$$L_{2D} = \sum_{i=1}^n \sqrt{(Y_{vertex_{i+1}} - Y_{vertex_i})^2 + (X_{vertex_{i+1}} - X_{vertex_i})^2} \quad \text{رابطه (۹)}$$

در این رابطه X و Y به ترتیب مختصات عرضی و طولی نقاط می‌باشد و $vertex_{i+1}$ مختصات طولی یا عرضی $i+1$ امین نقطه و $vertex_i$ مختصات طولی و عرضی i امین نقطه می‌باشد. لازم به ذکر است به دلیل آنکه در کلیه محاسبات نیاز به برآورد فواصل به واحدهای طولی متریک بود، در کلیه ارقام مختصاتی از فرمت مختصاتی یوتی.ام^{۱۸} در زون مختصاتی ۳۸ استفاده شد تا واحد طولی و ارتفاعی هر دو یکسان باشند. سپس طول سطحی یا سه بعدی^{۱۹} از رابطه (۱۰) محاسب شد. در این قسمت نیز از کد نویسی پایتون در ایجاد الگوریتم‌های تکرار استفاده شد. با استفاده از حلقه‌های (Loop) تکرار شونده، طول بین هر یک از گره‌ها محاسبه و سپس مجموع کل آنها به دست آمد.

$$L_{3D} = \sum_{i=1}^n \sqrt{(Y_{vertex_{i+1}} - Y_{vertex_i})^2 + (X_{vertex_{i+1}} - X_{vertex_i})^2 + (Z_{vertex_{i+1}} - Z_{vertex_i})^2} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

متغیرهای این رابطه کاملاً مشابه رابطه (۹) بوده و $Z_{vertex_{i+1}}$ ارتفاع $i+1$ امین نقطه و Z_{vertex_i} ارتفاع i امین نقطه می‌باشد. از رابطه (۱۱) برای محاسبه نسبت طول دو بعدی به سه بعدی نیمرخ طولی، استفاده شد. که در این رابطه L_{2D} و L_{3D} به ترتیب طول مسطحاتی و سطحی نیمرخ بوده و L شاخص نسبت طول مسطح به منحنی به درصد است.

$$L = \frac{L_{2D}}{L_{3D}} \times 100 \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

در انتها تمامی روش‌های مورفومتریکی فوق‌الذکر در سطوح سه‌گانه مورفومتری، توسط برنامه‌نویسی پایتون در محیط برنامه‌نویسی GUI انجام گرفت و به نرم افزار Longi-Profile Analyzer V.1 تبدیل و ارائه شد. این نرم‌افزار قادر است تمامی روش‌های مورفومتریکی فوق‌الذکر را با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی و فایل SHP پروفیل طولی دره‌ها، محاسبه و ارائه کند.

۴- بحث و یافته‌ها

شاخص‌های مورفومتریکی در سه سطح پائین، میانی و بالا در پروفیل طولی دره‌های ۱۳ گانه ارتفاعات سه‌سهند محاسبه گردید که لیست محاسبات به تفکیک هر یک از دره‌ها در جدول (۲) گردآوری شده است.

بررسی نمایه مورفومتریکی درصد تقعر پروفیلی (P.C.I)، نشان‌دهنده اختلاف کاملاً مشهود بین دامنه‌های شمال تا شمال شرقی کوه سه‌سهند و دامنه‌های جنوب تا جنوب غربی این ارتفاعات می‌باشد. مقدار کمی و عددی این نمایه در دامنه‌های شمال شرقی در حداکثر و در دامنه‌های جنوب غربی در حداقل قرار دارد (شکل ۵). نمایه ضریب تقعر و تحدب پروفیلی (C.C.I) نیز با الگویی مشابه، اختلافات کاملاً مشخصی بین دامنه‌های شمال شرقی و شمال غربی نشان می‌دهد. مقدار عددی این نمایه در دامنه‌های شمال شرقی در حداکثر و در دامنه‌های جنوب غربی به حداقل می‌رسد (شکل ۶). نمایه برج‌سنگی ارتفاعی (E.R.R) کاملاً روندی معکوس داشته و در دامنه‌های جنوب غربی در حداکثر مقدار عددی و در دامنه‌های شمال شرقی در حداقل قرار دارد (شکل ۷). نمایه نسبت طول دو بعدی پروفیل‌های طولی به طول

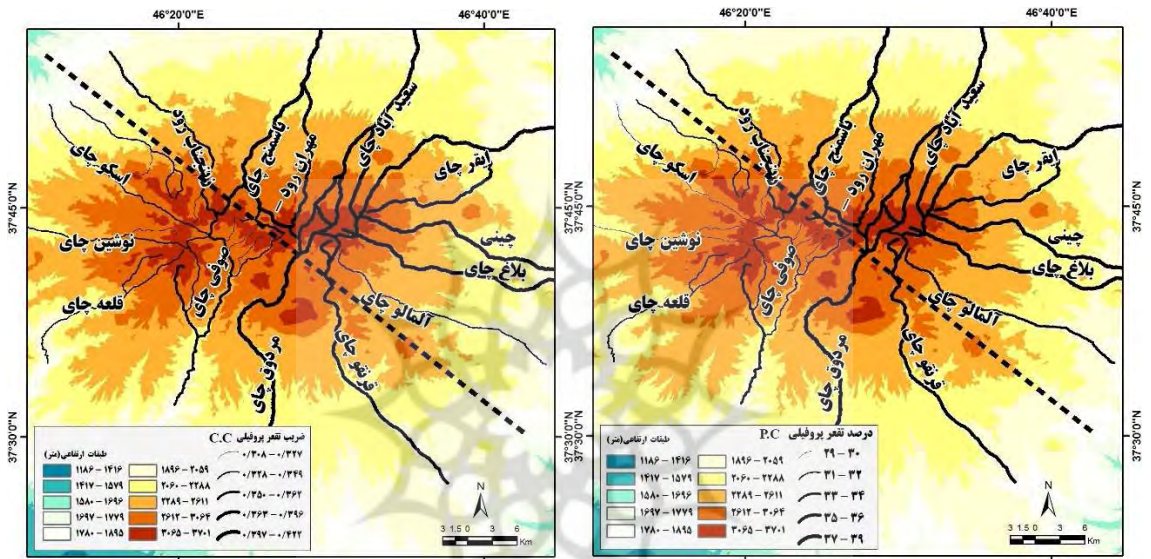
^{۱۷} - 2D length / 3D Length Ratio

^{۱۸} - Universal Transverse Mercator U.T.M

^{۱۹} - 3D-Length

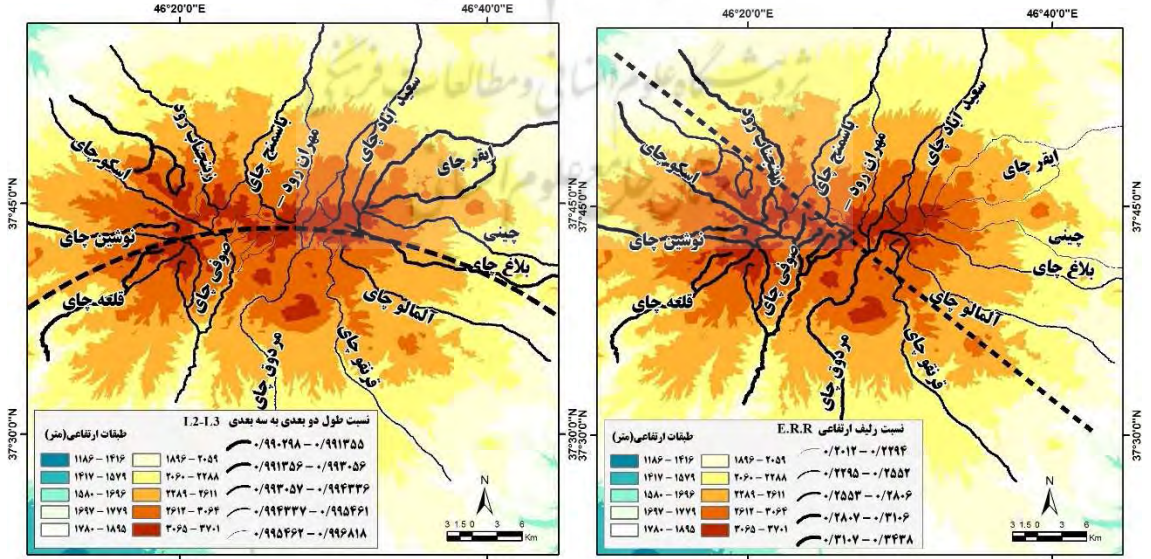
سه بعدی متناظر با آن به طور خاص در دامنه‌های شمال شرقی و به طور کلی در دامنه‌های شمالی مقادیر عددی بالاتری را نشان می‌دهد (شکل ۸).

شاخص‌های درصد تقعر پروفیلی (P.C.I) و شاخص درصد تقعر و تحدب (C.C.I) در دامنه‌های شمال تا شمال شرقی که منطبق با مناطق کم انرژی (از لحاظ انرژی تابش مستقیم خورشیدی) می‌شوند و در جناح مقابل به بادهای مرطوب دریای خزر قرار دارند، مقادیر بالاتری به خود اختصاص داده‌اند. در مقابل شاخص نسبت برجستگی ارتفاعی (E.R.R) و نسبت طول دوبعدی و به سه‌بعدی (L2-L3.R) در دامنه‌های جنوب تا جنوب غربی که منطبق با دامنه‌های آفتابگیر و مناطق پر انرژی هستند، مقادیر بیشتری به خود اختصاص داده است. این مناطق زاویه تابش بیشتری در طول سال تجربه می‌کنند.



شکل ۶: شاخص تقعر و تحدب (C.C.I)

شکل ۵: درصد تقعر پروفیلی (P.C.I)



شکل ۸: نسبت طول دو بعدی به طول سه بعدی (L2/L3D)

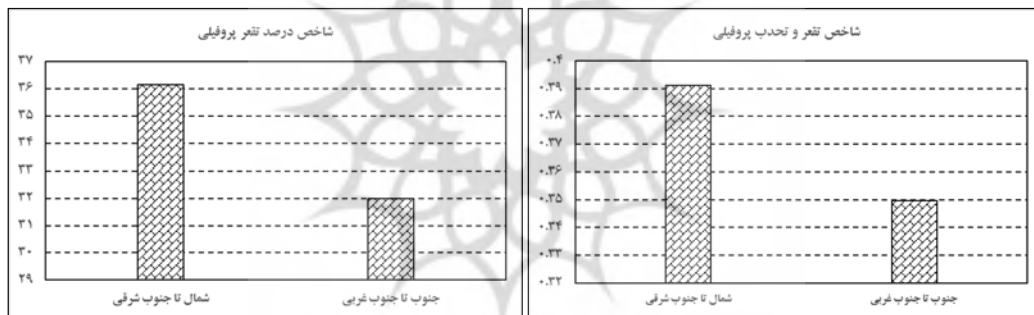
شکل ۷: نسبت برجستگی ارتفاعی (ERR)

جدول ۱: شاخص‌های مورفومتری پروفیل‌های طولی دره‌های ۱۳ گانۀ ارتفاعات سهند

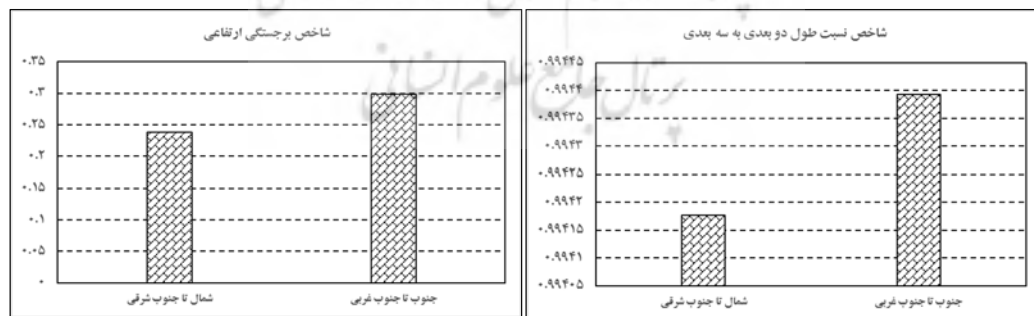
| | میانگین ارتفاع | حد اقل ارتفاع | حد اکثر ارتفاع | دامنه ارتفاع | انحراف معیار ارتفاع | چارک اول ارتفاع | میانۀ ارتفاع | چارک سوم |
|---|----------------|---------------|----------------|--------------|---------------------|-----------------|--------------|----------|
| شاخص‌های مورفومتریک سطح پائین (ارتفاع) | ۲۱۹۹ | ۲۱۶۹ | ۲۲۰۸ | ۲۱۹۹ | ۲۲۶۶ | ۲۲۵۳ | ۲۲۸۵ | ۲۱۵۶ |
| میانگین ارتفاع | ۲۱۹۹ | ۲۱۶۹ | ۲۲۰۸ | ۲۱۹۹ | ۲۲۶۶ | ۲۲۵۳ | ۲۲۸۵ | ۲۱۵۶ |
| حد اقل ارتفاع | ۱۸۰۰ | ۱۷۹۹ | ۱۷۹۹ | ۱۸۰۴ | ۱۸۰۱ | ۱۷۹۸ | ۱۷۹۸ | ۱۷۷۷ |
| حد اکثر ارتفاع | ۳۲۶۲ | ۳۴۸۶ | ۳۴۵۰ | ۳۵۸۶ | ۳۳۵۱ | ۳۶۴۹ | ۳۳۴۵ | ۳۲۸۰ |
| دامنه ارتفاع | ۱۴۶۲ | ۱۶۸۷ | ۱۶۵۱ | ۱۷۸۲ | ۱۵۵۰ | ۱۸۵۱ | ۱۵۴۷ | ۱۵۰۴ |
| انحراف معیار ارتفاع | ۳۳۲/۰ | ۳۳۱/۹ | ۳۳۶/۳ | ۳۳۸/۳ | ۳۴۰/۲ | ۳۸۰/۸ | ۳۶۶/۶ | ۳۰۷/۷ |
| چارک اول ارتفاع | ۱۹۲۵ | ۱۸۹۹ | ۱۹۴۸ | ۱۹۴۷ | ۱۹۸۱ | ۱۹۵۷ | ۱۹۶۹ | ۱۹۰۴ |
| میانۀ ارتفاع | ۲۱۲۰ | ۲۰۸۱ | ۲۱۲۷ | ۲۱۲۰ | ۲۲۰۰ | ۲۱۴۸ | ۲۲۱۳ | ۲۰۸۰ |
| چارک سوم | ۲۳۸۶ | ۲۳۵۵ | ۲۳۹۰ | ۲۳۸۰ | ۲۴۸۲ | ۲۴۷۳ | ۲۵۶۴ | ۲۳۵۱ |
| شاخص‌های مورفومتریک سطح پائین (شیب به درجه) | ۴/۱۷۶ | ۳/۰۳۲ | ۲/۵۵۱ | ۲/۵۸۹ | ۲/۹۱۴ | ۲/۹۷۱ | ۳/۰۴۵ | ۲/۷۳۲ |
| میانگین شیب | ۴/۱۷۶ | ۳/۰۳۲ | ۲/۵۵۱ | ۲/۵۸۹ | ۲/۹۱۴ | ۲/۹۷۱ | ۳/۰۴۵ | ۲/۷۳۲ |
| حد اکثر شیب | ۳۵/۲۷۵ | ۴۵/۰۸۱ | ۳۶/۷۲۶ | ۳۹/۱۶۸ | ۳۵/۳۲۰ | ۳۶/۵۶۹ | ۳۰/۹۲۸ | ۳۷/۷۰۸ |
| حد اقل شیب | ۰/۰۰۴۳ | ۰/۰۰۰۶ | ۰/۰۰۱۵ | ۰/۰۰۱۳ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۰۱۲ | ۰/۰۰۲۶ | ۰/۰۰۱۴ |
| انحراف معیار شیب | ۵/۲۰۵ | ۵/۳۴۶ | ۴/۲۱۳ | ۴/۵۰۰ | ۴/۳۴۴ | ۴/۲۰۴ | ۴/۲۷۵ | ۴/۹۹۶ |
| چارک اول شیب | ۱/۱۴۴ | ۰/۱۷۹ | ۰/۱۳۵ | ۰/۱۲۹ | ۰/۱۴۳ | ۰/۱۳۸ | ۰/۱۵۸ | ۰/۱۲۵ |
| میانۀ شیب | ۳/۱۲۸ | ۲/۰۰۵ | ۲/۹۶۸ | ۲/۸۹۵ | ۲/۲۴۸ | ۲/۰۵۸ | ۲/۴۹۰ | ۱/۸۶۷ |
| چارک سه ه شیب | ۵/۷۰۷ | ۴/۱۰۷ | ۳/۹۸۶ | ۳/۷۰۶ | ۴/۴۸۱ | ۴/۲۶۳ | ۴/۸۵۷ | ۳/۹۱۴ |
| شاخص‌های مورفومتریک سطح پائین (شیب به درصد) | ۷/۴۱۸ | ۵/۴۴۰ | ۴/۵۱۳ | ۴/۶۰۶ | ۵/۱۵۴ | ۵/۲۶۳ | ۵/۳۷۳ | ۴/۸۷۴ |
| میانگین شیب | ۷/۴۱۸ | ۵/۴۴۰ | ۴/۵۱۳ | ۴/۶۰۶ | ۵/۱۵۴ | ۵/۲۶۳ | ۵/۳۷۳ | ۴/۸۷۴ |
| حد اکثر شیب | ۷۰/۸۵۸ | ۱۰۰/۳۵۹ | ۷۴/۹۹۴ | ۸۲/۲۸۰ | ۷۰/۸۵۸ | ۷۴/۶۶۱ | ۶۰/۷۵۸ | ۷۷/۳۱۱ |
| حد اقل شیب | ۰/۰۰۷۵ | ۰/۰۰۱۰ | ۰/۰۰۲۵ | ۰/۰۰۲۳ | ۰/۰۰۰۶ | ۰/۰۰۲۲ | ۰/۰۰۴۵ | ۰/۰۰۲۵ |
| انحراف معیار شیب | ۹/۵۰۸ | ۱۰/۰۶۲ | ۷/۶۳۳ | ۸/۳۱۶ | ۷/۹۷۰ | ۷/۱۶۵ | ۷/۶۷۷ | ۹/۲۱۲ |
| چارک اول شیب | ۱/۹۹۶ | ۰/۳۱۳ | ۰/۲۳۶ | ۰/۵۲۰ | ۰/۷۲۰ | ۰/۶۶۶ | ۰/۷۶۴ | ۰/۲۷۶ |
| میانۀ شیب | ۵/۴۶۵ | ۳/۵۰۰ | ۳/۴۳۶ | ۳/۳۰۸ | ۳/۲۵۵ | ۳/۵۹۴ | ۴/۳۵۰ | ۳/۳۹۴ |
| چارک سوم شیب | ۹/۹۹۴ | ۷/۱۸۰ | ۶/۹۶۹ | ۶/۴۷۸ | ۷/۳۴۶ | ۷/۴۵۴ | ۸/۴۹۹ | ۶/۸۴۳ |
| شاخص‌های مورفومتریک سطح میانی | ۲/۲۸۲ | ۱/۹۶۴ | ۱/۹۲۶ | ۱/۷۰۴ | ۲/۰۳۴ | ۱/۹۴۱ | ۲/۲۱۰ | ۱/۸۷۸ |
| انحراف چارکی درجه شیب | ۲/۲۸۲ | ۱/۹۶۴ | ۱/۹۲۶ | ۱/۷۰۴ | ۲/۰۳۴ | ۱/۹۴۱ | ۲/۲۱۰ | ۱/۸۷۸ |
| انحراف چارکی درصد شیب | ۳/۹۹۹ | ۳/۹۹۹ | ۳/۹۹۹ | ۳/۹۹۹ | ۳/۹۹۹ | ۳/۹۹۹ | ۳/۹۹۹ | ۳/۹۹۹ |
| انحراف چارکی ارتفاع | ۲۳۰/۶ | ۲۳۰/۶ | ۲۳۰/۶ | ۲۳۰/۶ | ۲۳۰/۶ | ۲۳۰/۶ | ۲۳۰/۶ | ۲۳۰/۶ |
| طول دو بعدی | ۱۷۶۹۶ | ۲۷۹۱۰ | ۳۱۵۲۲ | ۳۱۰۸۱ | ۲۶۹۹۸ | ۳۰۲۶۴ | ۲۶۳۹۴ | ۲۸۱۲۱ |
| طول سه بعدی | ۱۷۸۴۴ | ۲۸۱۲۳ | ۳۱۶۷۰ | ۳۱۲۸۱ | ۲۷۱۶۳ | ۳۰۴۳۸ | ۲۶۵۲۵ | ۲۸۲۹۰ |
| متوسط جهت شیب (غیر وزنی) | ۱۳۹/۰ | ۲۳۸/۵ | ۱۹۱/۲ | ۲۷۹/۱ | ۱۵۲/۸ | ۱۹۳/۷ | ۱۴۱/۱ | ۲۸۴/۰ |
| جهت (نقطه ابتدا و انتها) | ۱۴۰/۹ | ۲۳۳/۳ | ۲۱۰/۱ | ۲۹۰/۸ | ۱۵۴/۹ | ۲۰۳/۷ | ۱۱۳/۰ | ۳۰۴/۳ |
| متوسط وزنی جهت | ۱۴۲/۲ | ۲۳۹/۱ | ۱۹۰/۰ | ۲۸۰/۴ | ۱۵۳/۵ | ۱۹۴/۸ | ۱۴۵/۰ | ۲۸۰/۹ |
| شاخص‌های مورفومتریک سطح بالا | ۰/۹۹۲۴ | ۰/۹۹۵۳ | ۰/۹۹۳۶ | ۰/۹۹۴۹ | ۰/۹۹۴۳ | ۰/۹۹۵۰ | ۰/۹۹۴۰ | ۰/۹۹۵۶ |
| نسبت طول دو بعدی به سه بعدی | ۰/۹۹۲۴ | ۰/۹۹۵۳ | ۰/۹۹۳۶ | ۰/۹۹۴۹ | ۰/۹۹۴۳ | ۰/۹۹۵۰ | ۰/۹۹۴۰ | ۰/۹۹۵۶ |
| مساحت کل | ۹۷/۳۲۰ | ۱۰۸/۶۸۸ | ۱۱۱/۴۷۴ | ۹۰/۴۱۶ | ۱۱۰/۴۲۹ | ۱۱۲/۲۸۲ | ۹۲/۲۴۷ | ۱۳۱/۰۵۶ |
| مساحت مقطع | ۱۸/۲۲۹ | ۳۶/۰۴۶ | ۳۷/۶۸۱ | ۴۲/۰۸۱ | ۲۸/۴۷۴ | ۴۰/۴۴۱ | ۲۷/۱۴۴ | ۳۷/۰۰۷ |
| درصد تفرع پروفیل | ۳۱/۳۷۱ | ۳۷/۰۰۴ | ۳۴/۶۴۵ | ۳۷/۷۱۲ | ۳۷/۴۹۷ | ۳۶/۶۳۳ | ۳۰/۷۷۲ | ۳۳/۶۱۳ |
| شاخص تفرع و تحدب | ۰/۳۳۲۲۶ | ۰/۳۸۸۷۶ | ۰/۳۷۳۶۹ | ۰/۴۰۵۳۳ | ۰/۳۴۲۰۸ | ۰/۴۱۰۸۵ | ۰/۳۳۸۴۴ | ۰/۳۴۸۷۰ |
| شاخص رلیف ارتفاع | ۰/۲۷۲۲۴ | ۰/۲۱۹۵۵ | ۰/۲۴۸۵۵ | ۰/۲۲۱۷۱ | ۰/۲۰۳۰۷ | ۰/۲۴۵۸۱ | ۰/۳۱۵۳۳ | ۰/۲۵۲۵۰ |

جدول ۲: مقایسه مقادیر عددی نمایه‌های مورفومتریکی دامنه‌های آفتابگیر و پشت به آفتاب

| شاخص نسبت طول دو بعدی به سه بعدی | | | | | |
|----------------------------------|----------|----------|----------|-------|-------------------|
| انحراف معیار | میانه | حد اکثر | حد اقل | تعداد | |
| ۰/۰۰۱۱۴۴ | ۰/۹۹۴۱۷۷ | ۰/۹۹۶۲۷۹ | ۰/۹۹۲۱۹۱ | ۱۶ | شمال تا جنوب شرقی |
| ۰/۰۰۱۶۱۸ | ۰/۹۹۴۳۹۳ | ۰/۹۹۶۸۱۸ | ۰/۹۹۰۲۹۸ | ۲۵ | جنوب تا جنوب غربی |
| شاخص درصد تقعر پروفیلی | | | | | |
| ۱/۸۶۰۰۶۵ | ۳۶/۱۳۸۹۹ | ۳۹/۱۱۵۲۱ | ۳۲/۴۰۰۸۴ | ۱۶ | شمال تا جنوب شرقی |
| ۲/۱۹۱۰۶۳ | ۳۱/۹۸۰۳۱ | ۳۶/۷۱۰۸۷ | ۲۸/۸۹۵۶۵ | ۲۵ | جنوب تا جنوب غربی |
| شاخص تقعر و تحدب پروفیلی | | | | | |
| ۰/۰۲۵۱۲۶ | ۰/۳۹۱۲۱۱ | ۰/۴۲۳۲۴ | ۰/۳۴۰۹۳۴ | ۱۶ | شمال تا جنوب شرقی |
| ۰/۰۲۵۶۹۶ | ۰/۳۴۹۷۵ | ۰/۴۱۵۶۴۱ | ۰/۳۰۷۵۱ | ۲۵ | جنوب تا جنوب غربی |
| شاخص برجستگی ارتفاعی | | | | | |
| ۰/۰۱۷۹۴۸ | ۰/۳۳۷۷۴۹ | ۰/۲۶۲۸۲۷ | ۰/۲۰۱۱۸۸ | ۱۶ | شمال تا جنوب شرقی |
| ۰/۰۲۶۹۹ | ۰/۲۹۹۰۰۹ | ۰/۳۴۳۷۹۹ | ۰/۲۵۵۲۳۱ | ۲۵ | جنوب تا جنوب غربی |



شکل ۹: مقایسه شاخص درصد تقعر پروفیلی (توصیر سمت راست) و شاخص تقعر و تحدب پروفیلی (توصیر سمت چپ) در دامنه‌های آفتابگیر جنوب تا جنوب غربی و دامنه‌های پشت به آفتاب شمال تا جنوب شرقی

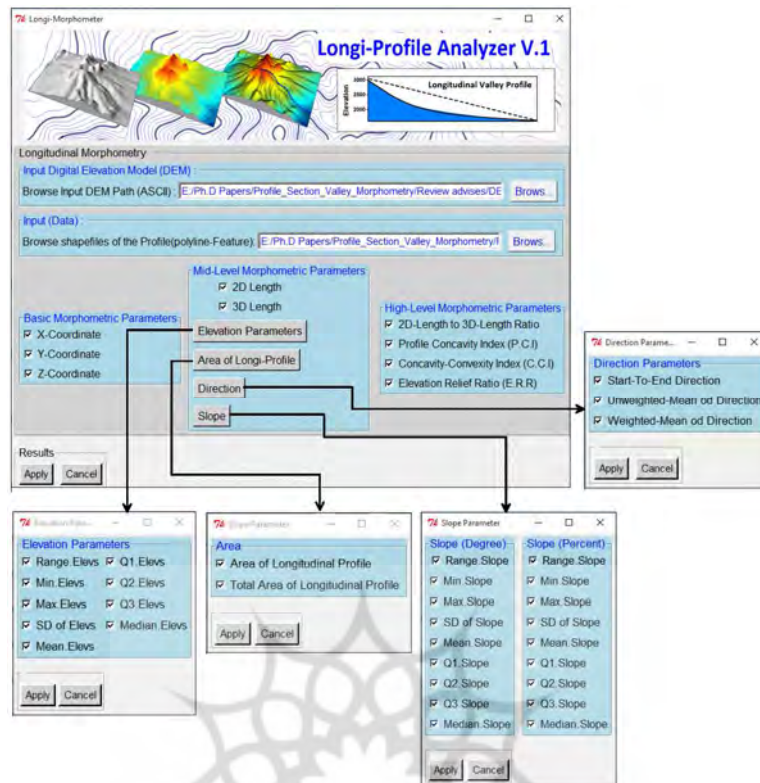


شکل ۱۰: مقایسه شاخص برجستگی ارتفاعی (توصیر سمت راست) و شاخص نسبت طول دو بعدی به سه بعدی (توصیر سمت چپ) در دامنه‌های آفتابگیر جنوب تا جنوب غربی و دامنه‌های پشت به آفتاب شمال تا جنوب شرقی

نتیجه‌گیری

در این مقاله پروفیل طولی دره‌های سه‌سهند با استفاده از چهار نمایه مورفومتریکی (نسبت طول مسطحی به سطحی، شاخص درصد تقعر پروفیلی، شاخص تقعر و تحدب و شاخص برجستگی ارتفاعی) تفسیر گردید. رفتار ۱۳ دره مورد مطالعه با استفاده از این ۴ مدل مورفومتریکی و با کمک برنامه‌نویسی پایتون انجام گرفت. نتایج به دست آمده از نمایه در صد

تقریباً پروفیلی نشان داد که مقاطع واقع در دره‌های شمال شرقی کوه سهند مقادیر بیشتری به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۵) که حاکی از نرخ تقریباً بیشتر و تکامل پروفیلی بیشتر است. نمایه شاخص تقریباً نتایج مشابهی را نشان داد (شکل ۶). شاخص برجستگی ارتفاعی در دامنه‌های جنوب غربی مقدار عددی بالاتری را نشان داد (شکل ۷) و شاخص نسبت طول مسطحاتی به طول منحنی در دامنه‌های جنوب غربی مقادیر بیشتری را نشان داد (شکل ۸). در مجموع با در نظر گرفتن این چهار مدل مورفومتریکی سطح بالا می‌توان اختلاف معنادار تکامل و تحول پروفیل طولی دره‌های دامنه‌های شمال تا شمال شرقی کوه سهند را به نسبت دامنه‌های جنوب تا جنوب غربی ملاحظه کرد. با توجه به اینکه تحولات یخچال‌زایی دوران کواترنری در مورفولوژی و پیکره‌تراشی ارتفاعات اصلی ایران نقش مهمی ایفا کرده است، نقش فرآیندهای یخچالی و مجاور یخچالی در تکامل و تحول ناهمواری‌ها، به خصوص در ارتفاعات بالای ۳۰۰۰ متر و در عرض‌های جغرافیایی بالا از اهمیت خاصی برخوردار است. توده کوهستانی سهند به دلیل قرارگیری در عرض جغرافیایی حدوداً ۳۷ درجه و ارتفاع بیش از ۳۶۰۰ متر تحت تاثیر مورفولوژی و فرسایش یخچالی قرار داشته است. در عرض‌های جغرافیایی بالاتر به دلیل تمایل بیشتر تابش زمستانه، زاویه تابش انرژی خورشیدی در دامنه‌های جنوبی بزرگتر و در نتیجه اختلاف بین دامنه‌های جنوبی و شمالی از نقطه نظر متغیر تابش بیشتر است. دامنه‌های شرقی به نسبت دامنه‌های غربی دریافت انرژی تابشی کمتری را دارا بوده و نهایتاً به بیلان انرژی کمتری منتهی می‌گردند. دامنه‌های شمالی تا شرقی این ارتفاعات به دلیل توانایی بالاتر در نگهداشت بارش‌های جامد، خصوصاً در فازهای یخچالی و فازهای اقلیمی سرد با تقویت فشار مراکز پر فشار سیبری و با انتشار امواج هوای سرد و عبور از پهنه آبی خزر شرایط ریزش‌های سنگین برف و برف‌گیری برفخانه‌ها و حوضه‌های بهمن‌گیر در این جناح کوهستان نیز فراهم بوده است. علی‌رغم جوان بودن توده سهند و ساختار لیتولوژیک که بیشتر از سازندهای رده آذرین تشکیل شده است و همچنین فرصت فرم‌زایی یخچالی کم در این توده کوهستانی (در قیاس با ارتفاعات زاگرس مرتفع و البرز مرکزی)، شرایط مساعد اقلیمی و حجم مناسب برف‌گیری زمستانه در همین زمان نسبتاً کوتاه (در مقیاس تغییرات محیطی)، شواهد تکامل و تحول مورفومتری مقاطع طولی را فراهم نموده و آثار خود را بر بدنه این واحد کوهستانی حکاکی کرده است. تمامی مولفه‌های مورفومتریکی مورد بحث در این پژوهش در نرم‌افزار Longi-Profile Analyzer v.1 گردآوری و برنامه‌نویسی شد. این نرم‌افزار قادر به استفاده از مدل رقومی ارتفاعی و فایل برداری (shapefile) به صورت ورودی مستقیم بوده و می‌تواند آنالیزهای مورد بحث را به طور کاملاً اتوماتیک محاسبه نماید و نتایج خروجی را ذخیره سازی کند. شکل (۱۱) نمایی از این نرم‌افزار را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱: نرم افزار مورفومتری طولی دره‌های کوهستانی (Long-Profile Analyzer.v1)

منابع

- اصغری سراسکانرود، صیاد؛ محمد نژاد آروق، وحید؛ بلواسی، مهدی، ۱۳۹۳، مورفولوژی و مورفومتری انواع دهانه‌های آتشفشانی در مخروط آتشفشانی سه‌پند، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال سوم، شماره ۱، صص ۴۴-۵۱.
- بیاتی خطیبی، مریم؛ رجبی، معصومه، ۱۳۸۵، تحلیل تحول ژئومورفولوژیک نیمرخ طولی دره‌ها در نواحی کوهستانی مطالعه موردی: یازده دره اصلی توده کوهستانی سه‌پند، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۵۷، صص ۴۳-۵۹.
- جباری، ندا؛ ثروتی، محمدرضا؛ حسین زاده، محمدمهدی، ۱۳۹۱، مطالعه مورفوتکتونیک فعال حوضه آبخیز حصارک (شمال غرب تهران) با استفاده از شاخص‌های مورفومتری، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال اول، شماره ۲، صص ۳۴-۱۷.
- جعفری، غلامحسین؛ رستم خانی، اصغر، ۱۳۹۴، بررسی تحولات کواترنری دره‌های کوهستانی با استفاده از خطوط منحنی میزان مطالعه موردی (ارتفاعات سبلان)، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، سال سی‌ام، شماره ۳، صص ۱۳۸-۱۲۱.
- رجبی، معصومه؛ بیاتی خطیبی، مریم، ۱۳۸۷، بررسی لندفرم دره‌های یخچالی مطالعه موردی: دره‌های یخچالی کوهستان سه‌پند، پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، سال اول، شماره ۰، صص ۱۰۵-۱۲۱.
- رجبی، معصومه؛ بیاتی خطیبی، مریم، ۱۳۸۷، بررسی لندفرم‌های دره‌های یخچالی مطالعه موردی: دره‌های یخچالی کوهستان سه‌پند، پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، سال اول، شماره ۰، صص ۱۰۵-۱۲۱.
- سیف، عبدالله؛ صلحی، سینا، ۱۳۹۱، تحلیل مورفودیشن ارتفاعات غربی اقلید و ارتباط آن با تحولات مورفولوژیک، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال بیست و پنجم، شماره ۴، صص ۲۵۱-۲۶۸.
- کرمی، فریبا، ۱۳۹۱، ارزیابی نسبی تکتونیک فعال با استفاده از روش‌های مورفومتری در حوضه‌های شمالی و شرقی کوه سه‌پند، فصلنامه علمی-پژوهشی فضای جغرافیایی، سال دوازدهم، شماره ۳۷، صص ۱۸-۱.

- کرمی، فریبا؛ ۱۳۸۸، ارزیابی نسبی فعالیت ای تکتونیکی با استفاده از تحلیل های شکل سنجی (مورد نمونه، حوضه اوجان چای، شمال شرقی کوهستان سهند)، جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، سال بیستم، شماره ۳۵، صص ۱۳۵-۱۵۴.
- کرمی، فریبا؛ ۱۳۹۱، ارزیابی نسبی تکتونیک فعال با استفاده از روش‌های مورفومتری در حوضه‌های شمالی و شرقی کوه سهند، فصلنامه علمی پژوهشی فضای جغرافیایی، سال دوازدهم، شماره ۳۷، صص ۱-۱۸.
- گورابی، ابوالقاسم؛ یمانی، مجتبی، ۱۳۹۱، ارتباط کمی ویژگی‌های مورفولوژیک حوضه‌های زهکشی و مخروط‌افکنه‌های آنها در ایران مرکزی، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال اول، شماره ۲، صص ۱۶-۱.
- مدل‌های رقومی سطحی (DSM) به دست آمده از ماهواره (Advanced Land Observing Satellite (ALOS)، تهیه شده در می و اکتبر ۲۰۱۵ توسط آژانس هوا و فضای ژاپن (JAXA).
- نقشه‌های توپوگرافی به مقیاس ۵۰۰۰۰، تهیه شده در سازمان نقشه‌برداری کشور به شماره ایندکس (I) 5164 - 5265 (III) - 5265 (II) - 5265 (I) - 5264 (IV) - 5264 (I) - 5166 (II) - 5165 (II) - 5165 (I) - 5365 (III) - 5365 (II) - 5365 (I) - 5364 (IV) - 5364 (I) - 5266 (III) - 5266 (II) - 5265 (IV) - 5366 (III) - 5366 (II) - 5365 (IV).
- یمانی، مجتبی؛ مقصودی، مهران؛ قاسمی، محمدرضا؛ محمدنژاد، وحید، ۱۳۹۱، شواهد مورفولوژیکی و مورفومتریکی تأثیر تکتونیک فعال بر مخروط‌افکنه‌های شمال دامغان، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، سال چهل و چهارم، شماره ۲، صص ۱۸-۱.
- Amerson, B.E., Montgomery, D.R. and Grant M., 2007. Relative size of fluvial and glaciated valleys in central Idaho. *Geomorphology*, 93(3-4), pp.537-547.
- Ebrahimi, B., Seif, A., 2016. Morphological analysis of glaciated valleys in the Zardkuh Mountains, Iran. *Natural Environment Change*, 2(2), pp.127-142.
- Ebrahimi, B., Seif, A., 2016. Morphological Properties of Glacial Cirques in Zagros Mountain, Iran. *Geopersia*, 7 (1), pp.131-151.
- Evans, I.S., 1972. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. In: Chorley, R.J. (Ed.), *Spatial Analysis in Geomorphology*. Harper and Row, pp.17-90.
- Farhan, Y., Anbar, A., Enaba, O., Al-Shaikh, N., 2015. Quantitative Analysis of Geomorphometric Parameters of Wadi Kerak, Jordan, Using Remote Sensing and GIS. *Journal of Water Resource and Protection*, 7(6), pp.456-475.
- Farhan, Y., Anbar, A., Enaba, O., and Al-Shaikh N., 2015. Quantitative Analysis of Geomorphometric Parameters of Wadi Kerak, Jordan, Using Remote Sensing and GIS. *Journal of Water Resource and Protection*, 7(6), pp.456-475.
- Harbor, J.M., 1992. Numerical Modeling of the development of U-Shape valleys by glacial erosion. *Geological Society of America Bulletin*, 104 (10), pp.1364-1375.
- Harbor, J.M., 2009. Numerical Modeling of the development of U-Shape valleys by glacial erosion. *Geological Society of America Bulletin*, 104(10), pp.1364-1375.
- Hengl, T., Reuter, H., 2009. Development in soil science, *Geomorphometry: concepts, software, Applications*. Amsterdam.
- Larson, R., 2007. *Precalculus: A Concise Course*. Pennsylvania
- Leopold, L.B., Wolman, M.G., Miller, J.P., 1995. *Fluvial Processes in Geomorphology*. New York.
- Li, Z., Zhu., Q and Gold., C, 1960. *Digital Terrain Modeling: Principles and methodology*, United States of America.
- Mangelsdorf, J., Scheurmann, K., Weiß, F.H., 1990. *River Morphology: A. Guide for Geoscientists and Engineers*. Munich
- Pike, R.J., 1995. *Geomorphometry - progress, practice, and prospect*. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 101, pp. 221-238.
- Pike, R.J., 2000. *Geomorphometry - diversity in quantitative surface analysis*. *Progress in Physical Geography*, 24 (1), pp. 1-20.

- Pike, R.J., Wilson, S.E., 1971. Elevation relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area-altitude analysis. *Geological Society of America Bulletin*, 82(4), pp.1079-1084.
- Rasemann, S., Schmidt, J., Schrott, L., and Dikau, R., 2004. *GIS and Mountain Geomorphology*. Berlin.
- Rhoads, B.L., Thorn, C.E. (Eds.), 1996. *The Scientific Nature of Geomorphology. Earth Surface Processes and Landforms*(Wiley), 24(7), pp.571-662.
- Scheidegger, A.E., 1991. *Theoretical Geomorphology*, 3rd edition. London.
- Scott D.P., 2015. *Geomorphometry for Geosciences*. Poznan.
- Seif, A., Bazvand, A., Solhi, S., 2016. Morphoradition of Alvand Heights and Its Relation with Quaternary Glacial Effects. *Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences*, 6(S2), pp.304-314.
- Takaku, J. Tadono, T. Tsutsui, K. 2014. Generation of High Resolution Global DSM from ALOS PRISM, *The International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2(4), pp.71-76.
- Thorn, C.E., 1988. *An Introduction to Theoretical Geomorphology*. Boston.
- Tobler, W.R., 1976. Analytical cartography. *The American Cartographer*, 3(1), pp.21-31.
- Tobler, W.R., 2000. The development of analytical cartography - a personal note. *Cartography and Geographic Information Science*, 27(3), pp.189-194.
- Yingkui L, Gengnian L, Zhijiu C., 2001a. Glacial valley cross-profile morphology, Tianshan Mountains, China. *Geomorphology*, 38 (1-2), pp.153-166.
- Yingkui, L., Gengnian, L., Zhijiu, C., 2001b. Longitudinal variations in cross-section morphology along a glacial valley: a case-study from the Tianshan. China, *Journal of Glaciology*, 47(157), pp.243-250

