

تحلیل مورفومتریک مخروط افکنه‌ها در مناطق پایکوهی البرز شمالی، مازندران

رضا اسماعیلی* - دانشیار گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه مازندران.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۲۴ تأیید نهایی: ۱۴۰۴/۰۲/۰۱

چکیده

مخروط افکنه‌ها یکی از مهم‌ترین لندفرم‌های رسوبی رودخانه‌ای هستند که عمدتاً در محل خروج از کوهستان تشکیل می‌شوند. عوامل متعددی در شکل‌گیری و تکامل این اشکال نقش دارند. تحقیق حاضر، با هدف ارزیابی مورفومتری مخروط افکنه‌ها در پایکوه‌های البرز شمالی (مازندران)، بررسی عوامل مؤثر در تشکیل آنها و مقایسه آنها با مخروط افکنه‌های سایر مناطق ایران انجام شده است. در ابتدا محدوده مخروط افکنه‌ها با استفاده از شاخص MRVBF شناسایی شد و سپس با استفاده از شکل منحنی تراز حاصل از مدل ارتفاعی رقومی با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر تعیین حدود شدند. پارامترهای مساحت، طول، شیب، حجم و زاویه جاروب مخروط‌ها اندازه‌گیری شدند. مقادیر خصوصیات هندسی حوضه‌های آبریز بالادست، درصد پوشش جنگلی و مقاومت لیتولوژیکی آنها با استفاده از آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA) مورد تحلیل قرار گرفتند. تعداد ۴۵ مخروط افکنه با مساحت‌های ۰/۲ تا ۳۷۰ کیلومتر مربع مورد ارزیابی قرار گرفتند. تحلیل رگرسیونی متغیرهای مختلف بیانگر نقش پارامترهای مساحت، طول و درصد پوشش جنگلی حوضه در تخمین ابعاد مخروط افکنه شامل مساحت، طول، شیب و حجم با ضریب تبیین بالا است. بر اساس این ویژگی‌ها، مخروط‌ها در سه دسته گروه‌بندی شدند. مقایسه ویژگی‌های هندسی مخروط افکنه‌های البرز شمالی با سایر مناطق کشور نشان می‌دهد که مساحت این مخروط‌ها نسبت به سایر مناطق کشور ۳ تا ۴ برابر کوچک‌تر و شیب مخروط‌ها ۱/۲ تا ۱/۶ برابر کمتر است. علاوه بر خصوصیات هندسی حوضه‌های آبریز، درصد پوشش جنگلی و پهنای دره در قسمت‌های انتهایی حوضه هم در ابعاد مخروط افکنه‌ها نقش داشته‌اند.

واژگان کلیدی: مخروط افکنه، مورفومتری، البرز شمالی، مازندران.

مقدمه

فعالیت آب‌های جاری یک عامل مهم شکل‌زایی در بسیاری از مناطق سطح زمین است که لندفرم‌های متعدد فرسایشی و رسوبی را ایجاد می‌نماید. از میان لندفرم‌های رودخانه‌ای، مخروط افکنه‌ها به‌عنوان یکی از اشکال رسوبی ژئومورفیک بیشترین پراکنش را در مناطق مختلف اقلیمی دارند (نورینی^۱ و همکاران ۲۰۱۶). مخروط افکنه یک لندفرم آبرفتی است که در خروجی حوضه‌های کوهستانی و در محل انتقال از دامنه‌های نسبتاً شیب‌دار به مناطق نسبتاً مسطح مانند دره‌ها و دشت‌ها ایجاد می‌شوند (هاروی^۲ ۲۰۰۵). مخروط افکنه‌ها خصوصاً در مناطق پایکوهی ایران از مکان‌های مستعد برای استقرار شهرها و روستاها و فعالیت‌های انسانی هستند. از گذشته دور تاکنون، وجود رودخانه‌ها، تشکیل سفره‌های آب زیرزمینی و خاک حاصلخیز از مهم‌ترین دلایل شکل‌گیری سکونتگاه‌ها و گسترش آنها در این لندفرم‌ها بوده است. مخروط افکنه‌ها آرسینو مهمی از محیط‌های رسوبی هستند که تغییرات محیطی و اقلیمی را ثبت نموده و هم‌چنین تغییرات ناشی از حرکات تکتونیکی یا تغییرات سطح اساس در آنها قابل مشاهده است (فرانک^۳ و همکاران ۲۰۱۴).

تحقیقات مرتبط با مورفومتری مخروط افکنه‌ها از جنبه‌های مختلفی مانند روابط مورفومتری حوضه‌های آبریز و مخروط‌ها، تأثیر تکتونیک بر شکل‌گیری و تکامل مخروط‌ها و مخاطرات طبیعی فعال بر مخروط افکنه‌ها مورد توجه قرار گرفته است که در ادامه به تعدادی از آنها اشاره می‌شود. شناسایی حدود مخروط افکنه‌ها یکی از مسائل مهم است که تحقیقات مرتبط با آن همچنان ادامه دارد (نورینی و همکاران ۲۰۱۶، گورابی و همکاران ۲۰۲۱). این تعیین حدود در مناطق خشک با محدودیت کمتری مواجه است اما در مناطق مرطوب به‌واسطه پوشش جنگلی و اراضی کشاورزی مشکل است. بررسی مورفومتری مخروط افکنه‌ها و ارتباط آنها با ویژگی‌های هندسی حوضه آبریز از موضوعاتی است که پیشینه مطالعاتی گسترده‌ای با تمرکز بر مناطق خشک و نیمه خشک دارد (بول^۴ ۱۹۷۷، هاروی ۲۰۱۱، لوکا و روباستلی^۵ ۲۰۲۰، استوکز و گومز^۶ ۲۰۲۰، و^۷ و همکاران ۲۰۲۳). در ایران هم تحقیقات زیادی در مورد روابط مورفومتری مخروط افکنه‌ها و حوضه‌های آبریز انجام شده است که می‌توان به کارهای انجام شده در پایکوه‌های جنوب البرز (بیومونت^۸ ۱۹۷۲) چاله سیرجان (مقصودی ۱۳۸۰)، کوه‌های میشوداغ (مختاری ۱۳۸۲)، ایران مرکزی (گورابی و یمانی ۱۳۹۱)، کوه‌های باقران بیرجند (امیراحمدی و همکاران ۱۳۹۰)، کوه‌های بینالود (بهنیافر و همکاران ۱۳۹۵)، دامنه‌های جنوبی البرز در استان سمنان (جوکار و فخرالدین ۱۳۹۴)، حاشیه دشت رفسنجان (عباس‌نژاد و همکاران ۱۳۹۰)، کوه‌های تالش (صالحی‌پور و بشکنی ۱۳۹۹) اشاره کرد. عامل تکتونیک و فعالیت گسل‌ها نقش مهمی در مورفولوژی مخروط افکنه‌ها دارد که در تحقیقات مختلف مورد پژوهش قرار گرفته است (رامشت و همکاران ۱۳۸۸، روستایی و همکاران ۱۳۸۸، مقصودی و همکاران ۱۳۸۸، یمانی و همکاران ۱۳۹۱، بهرامی ۲۰۱۳، یمانی و همکاران ۱۳۹۵، موسوی و همکاران ۱۳۹۶، کمالی و همکاران ۱۳۹۷، ایاز^۹ و همکاران ۲۰۱۸). برخی از مطالعات، یک پارامتر از مخروط افکنه‌ها را مورد ارزیابی قرار داده‌اند که

۱ - Norini

۲ - Harvey

۳ - Franke

۴ - Bull

۵ - Luca & Robustelli

۶ - Stokes & Gomes

۷ - Woor

۸ - Beaumont

۹ - Ayaz

می‌توان به بررسی رابطه حجم مخروط افکنه‌ها با تکتونیک (گیلز^۱ ۲۰۱۰، امیراحمدی و همکاران ۱۳۹۴، جمال آبادی و همکاران ۱۳۹۷، رجبی و همکاران ۱۳۹۸)، رابطه حجم مخروط افکنه با جهت دامنه‌ها (شریفی پیچون و شیرانی ۱۳۹۸) و تحلیل تغییرات شیب قسمت‌های مختلف مخروط افکنه‌ها با سایر پارامترهای مورفومتریک (سایت و اُگچی^۲ ۲۰۰۵، قهرمان و همکاران ۱۴۰۱)، مورفومتری مخروط افکنه و فرسایش پذیری حوضه‌های بالادست (مکرم و همکاران ۲۰۲۲) اشاره کرد. علاوه بر فرصت‌ها و مزیت‌هایی که در مخروط افکنه‌ها وجود دارد خطر وقوع زمین‌لرزه، سیلاب و جریان‌های واریزه‌ای هم ساکنین این مناطق را تهدید می‌کند. از این رو برخی از مطالعات، وقوع مخاطرات طبیعی در مخروط افکنه‌ها را مورد ارزیابی قرار داده‌اند (پلیتر^۳ و همکاران ۲۰۰۵، مارچی^۴ و همکاران ۲۰۱۰، بهرامی و بهرامی ۱۳۹۰، شایان و زارع ۱۳۹۲، کاین^۵ و همکاران ۲۰۱۸، اسماعیلی و همکاران ۱۳۹۷، مختاری و همکاران ۱۴۰۰، نگهبان و زارع ۱۴۰۰، آلموند^۶ و همکاران ۲۰۲۳).

البرز شمالی به‌عنوان بخشی از یک کمربند کوهستانی فعال، دارای مخروط افکنه‌های متعددی در نواحی پایکوهی است که تحت تأثیر نیروهای تکتونیکی، اقلیمی و هیدرولوژیکی شکل گرفته‌اند. این مخروط افکنه‌ها نقش مهمی در چرخه رسوب‌گذاری، پایداری دامنه‌ها و توسعه سکونتگاه‌های انسانی در منطقه دارند. با این حال، تاکنون بررسی جامع و سیستماتیکی از ویژگی‌های مورفومتریک این مخروط افکنه‌ها و ارتباط آن‌ها با عوامل محیطی صورت نگرفته است. لذا بررسی ویژگی‌های مورفومتری مخروط افکنه‌های جلگه خزری و پایکوه‌های البرز شمالی و مقایسه آن‌ها با سایر مناطق ایران، می‌تواند درک بهتری از عوامل مؤثر بر شکل‌گیری و تکامل این اشکال ژئومورفولوژیکی فراهم کند. هم چنین، تحلیل ویژگی‌های حوضه‌های آبریز و تغییرات هندسی مخروط افکنه‌ها در این مناطق می‌تواند تفاوت‌های ناشی از شرایط اقلیمی، نوع فرسایش، و فعالیت‌های زمین‌ساختی را نشان دهد. مخروط افکنه‌های پایکوه‌های البرز شمالی به‌واسطه شرایط اقلیمی معتدل و مرطوب و خاک حاصلخیز طی سال‌های طولانی تحت کاربری‌های مختلف شهری و روستایی قرار داشته‌اند. شناسایی مرزهای مخروط افکنه‌ها یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در این خصوص بوده است. پیشرفت تکنولوژی ماهواره‌ای و همگام با آن سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، تهیه مدل‌ها ارتفاعی رقومی (DEM) با کیفیت مناسب را از سطح زمین فراهم آورده است. لذا ژئومورفومتری عوارض با دقت بالاتری امکان‌پذیر شده است که می‌تواند ویژگی‌های هندسی و توپولوژیکی لندفرم‌ها (ژئومورفومتری خاص) را تجزیه و تحلیل کند (ایوانز^۷ ۲۰۱۲). در تحقیق حاضر، با استفاده شاخص MRVBF^۸ و ترکیب آن با خطوط منحنی تراز تعیین مرز مخروط افکنه‌ها و مطالعات مرتبط به آنها در این منطقه فراهم شده است که در تحقیقات گذشته مورد استفاده قرار نگرفته است. هم چنین تاکنون تحلیلی از الگوهای فضایی مخروط افکنه‌های منطقه البرز شمالی و ارتباط آن با سایر عوامل محیطی صورت نگرفته است.

با توجه به مباحث فوق، مهم‌ترین اهداف این تحقیق عبارتند از: (۱) آنالیز ویژگی‌های مورفومتریک مخروط افکنه‌ها و حوضه‌های آبریز آنها در منطقه مورد مطالعه (۲) بررسی عوامل تأثیرگذار در مورفومتری مخروط افکنه‌ها (۳) مقایسه نتایج مورفومتری مخروط افکنه‌ها در پایکوه‌های البرز شمالی با سایر مناطق ایران

۱- Giles

۲ - Saito and Oguchi

۳- Pelletier

۴ - Marchi

۵ - kain

۶-Almond

۷ - Evans

۸- Multi-resolution Valley Floor Flatness (MRVBF)

منطقه مورد مطالعه

رشته کوه البرز به طول ۶۰۰ کیلومتر، عرض ۷۰ تا ۱۴۰ کیلومتر و ارتفاعات ۳۵۰۰ تا ۴۰۰۰ متر در شمال ایران قرار دارد. منطقه مورد مطالعه با در نظر گرفتن حوضه‌های آبریز در عرضهای جغرافیایی ۳۶ تا ۳۷ درجه شمالی و بین طولهای جغرافیایی ۵۰ تا ۵۵ درجه شرقی قرار گرفته‌اند. کوههای البرز بین بلوک ایران مرکزی و حوضه نسبتاً پایدار خزر جنوبی قرار دارد (آلن^۱، ۲۰۰۴). گسل خزر مرز شمالی کوههای البرز است که بیشترین کوتاه شدگی فعلی بین حوضه خزر جنوبی و حوضه دشت کویر توسط آن ایجاد شده است (نظری و همکاران ۲۰۲۱). کوههای البرز در نتیجه فرایندهای کوهزایی پرمکبرین و آلی (مزوزوئیک و سنوزوئیک) شکل گرفته است (درویش‌زاده ۱۳۷۰). لیتولوژی غالب این رشته کوهستانی ترکیبی از سنگ‌های آهکی، دولومیت، شیل و ماسه سنگ دوره‌های مختلف است.

از نظر ناهمواری بیش از ۷۸ درصد مساحت استان مازندران در قلمرو کوهستانی قرار دارد. واحد دشت ۲۰٫۶ درصد مساحت استان مازندران را شامل می‌شود. دامنه ارتفاعی محدوده مورد مطالعه از حداکثر ۵۶۱۰ (قله دماوند) تا ۲۷- متر در ساحل دریای خزر متغیر است.

جلگه مازندران بخشی از جلگه خزر است که بین دریای خزر و رشته‌کوههای البرز واقع شده است. طول جلگه مازندران ۳۰۰ کیلومتر و عرض آن از ۱ تا ۴۵ کیلومتر متغیر بوده و مساحت آن ۴۸۰۰ کیلومترمربع است. جلگه مازندران در زون زمین‌ساختی خزر و البرز قرار دارد. این زون از رسوبات دوره کواترنری پوشیده شده است. در محدوده پایکوههای البرز رسوبات مخروط افکنه‌ای و رودخانه‌ای غلبه دارد و در قسمت‌های میانی و انتهایی ترکیبی از نهشته‌های دریایی، لاگونی و ساحلی است. در قسمت‌های جنوبی جلگه مازندران، تعداد زیادی مخروط افکنه بزرگ و کوچک شکل گرفته‌اند (شکل ۱). این واحد ژئومورفیک تقریباً ۳۶ درصد مساحت جلگه را دربر گرفته و شامل رسوبات آبرفتی در اندازه‌های مختلف از قله‌سنگ‌ها تا رس با جور شدگی ضعیف است. شهرهایی مانند ساری، آمل، چالوس، قائم‌شهر، نکا، بهشهر بر روی این واحد ژئومورفیک مستقر هستند.

بیش از ۵۰ درصد از مساحت حوضه‌های آبریز مازندران دارای پوشش جنگلی متراکم است. بیشترین گستره پوشش جنگلی در محدوده حوضه‌های آبریز تجن و تالار با عرض بیش از ۶۰ کیلومتر مشاهده می‌شود. از نظر اقلیمی، تنوع آب و هوایی معتدل خزری تا آب و هوای بسیار سرد کوهستانی در این محدوده جغرافیایی وجود دارند که فرایندهای ژئومورفیک مناطق کوهستانی را تحت تأثیر قرار داده‌اند.

روش تحقیق

مورفومتری حوضه‌های آبریز و مخروط افکنه‌ها بر اساس مدل ارتفاعی رقومی (DEM) با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR^۲ انجام شده است. برای شناسایی مرز مخروط افکنه‌ها ابتدا از شاخص^۳ MRVBF استفاده شد. این شاخص یک الگوریتم مبتنی بر شیب است که با محاسبات همسایگی در چند مقیاس و تبدیل آن به یک عدد عرض کف دره‌ها را که با رسوبات انباشته شده‌اند شناسایی می‌کند (گالانت و داوولینگ^۴، ۲۰۰۳). لذا این شاخص برای تعیین مناطق رسوبی طراحی شده است (مولر^۵ و همکاران ۲۰۱۶) و می‌تواند یک تصویر بصری از عرض کف دره و نواحی برجسته کم ارتفاع ارائه نماید. محاسبه این شاخص در نرم‌افزار SAGA GIS انجام شد و محدوده تقریبی مخروط افکنه‌ها با آن

۱ - Allen

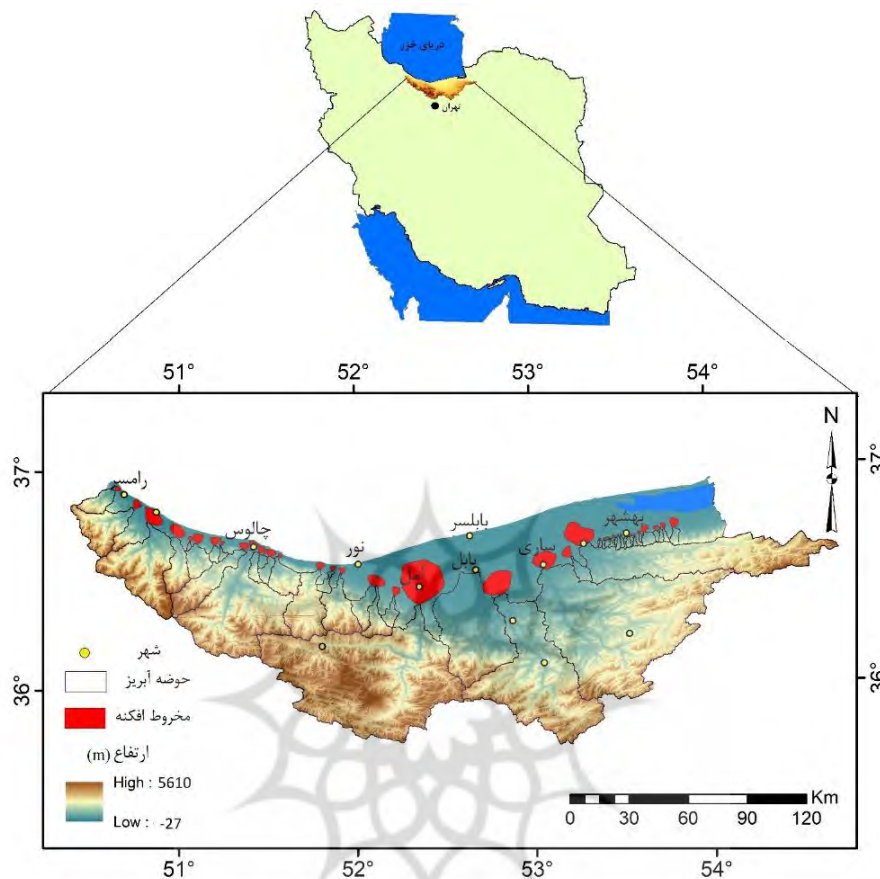
۲ - ALOS (The Advanced Land Observing Satellite) PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar)

۳- Multi-resolution Valley Floor Flatness (MRVBF)

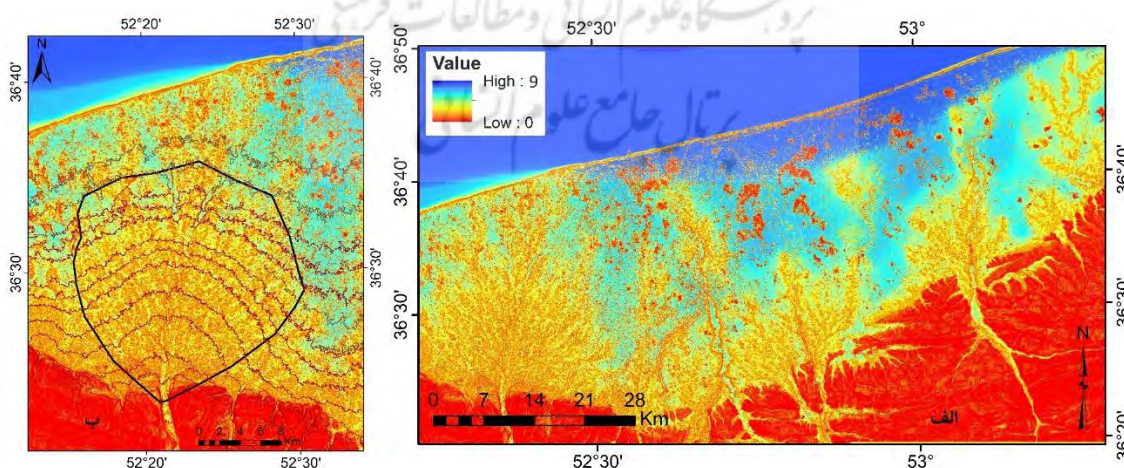
۴ - Gallant & Dowling

۵- Mueller

شناسایی شد (شکل ۲ الف). سپس با ایجاد منحنی‌های میزان از مدل ارتفاعی رقومی و شکل منحنی‌های میزان محدوده مخروط افکنه‌ها ترسیم شدند (شکل ۲ ب).



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه



شکل ۲: (الف) تصویر ایجاد شده با شاخص MRVBF، مقدار کمتر از ۵، نشان دهنده مناطق ناهموار و مقادیر بالاتر نشان دهنده مناطق هموار و کف دره‌ها هستند، (ب) ارتفاعات و مقدار ترسیم مرز مخروط افکنه با ترکیب تصویر و منحنی تراز

مورفومتری مخروط افکنه‌ها با اندازه‌گیری متغیرهای مساحت، طول، حجم، شیب و زاویه جاروب انجام شد. برای حوضه‌های بالادست مخروط افکنه‌ها هم متغیرهای مورفومتری شامل مساحت، محیط، طول، شاخص ناهمواری ملتون، ضریب

فشرده‌گی حوضه و فرم تطویل اندازه‌گیری شدند. مناطق جنگلی حوضه‌ها از نقشه پوشش سطح زمین استان مازندران استخراج شدند. برای ایجاد لایه مقاومت سنگ‌ها نسبت به فرسایش از روش طبقه‌بندی پیروان و همکاران (۲۰۱۲) استفاده شد. بر این اساس سنگ‌ها به ده کلاس مقاومت از فوق العاده مقاوم (۱) تا کاملاً ضعیف، سست و منفصل (۱۰) طبقه‌بندی شدند.

آنالیز مؤلفه‌های ۱ صلی^۱ (PCA): پارامترهای مورفومتریک حوضه‌های آبریز بالادست مخروط افکنه‌ها با روش PCA مورد ارزیابی قرار گرفتند. تحلیل مؤلفه‌های اصلی یک روش ریاضی برای کاهش حجم داده‌ها است و به فراوانی در علوم مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش مجموعه متغیرهای اصلی به مجموعه کوچک‌تری تبدیل می‌شوند به طوری که بیشترین واریانس موجود در داده‌ها را توجیه نمایند (عساکره و بیات ۱۳۹۳). در انجام این روش ابتدا ماتریسی از همبستگی متغیرها ایجاد می‌شود. آماره KMO^2 شاخصی است که می‌تواند مناسب بودن همبستگی داده‌ها برای تحلیل عاملی را نشان دهد. مقدار این آماره از صفر تا یک متغیر است. مقدار کمتر از ۰/۵ بیانگر این است که داده‌ها برای تحلیل عاملی مناسب نیستند و مقادیر بالاتر از ۰/۷ نشان دهنده همبستگی خوب داده‌ها برای تحلیل عاملی است (زارع چاهوکی ۱۳۹۲). آزمون کرویت بارلت^۳ آماره دیگری است که برای تست فرضیه صفر و تصادفی بودن نمونه‌ها به کار می‌رود و رد فرضیه صفر، مناسب بودن داده‌ها را برای تحلیل عاملی نشان می‌دهد.

پس از مراحل فوق، استخراج عامل‌ها انجام می‌شود. در روش PCA به صورت نظری می‌تواند به تعداد متغیرها مؤلفه وجود داشته باشد، اما عامل‌هایی استخراج می‌شوند که بیشترین مقدار واریانس را تبیین کنند. اما تعداد مؤلفه با ایجاد نمودار اسکرین قابل شناسایی است. در محور عمودی این نمودار مقادیر ویژه^۴ و در محور افقی تعداد مؤلفه‌ها مشخص شده است. مقدار ویژه هر عامل، نسبتی از واریانس کل متغیرهاست که توسط آن عامل تبیین می‌شود (زارع چاهوکی ۱۳۹۲). محل تلاقی مقدار ویژه ۱ با محور افقی، تعداد مؤلفه‌های پیشنهادی را نشان می‌دهد.

معمولاً در روش PCA برای به حداقل رساندن پیچیدگی اجزاء، از روش چرخش استفاده می‌شود که تفاوت بین واریانس ثبت شده توسط مؤلفه را به حداکثر می‌رساند. روش واریماکس رایج‌ترین چرخش مورد استفاده در تحلیل عاملی است. در نهایت میزان مشارکت متغیرها در هر مؤلفه بعد از چرخش استخراج و آنالیز می‌شود.

آنالیز گروه‌بندی: تجزیه و تحلیل گروه‌بندی یک ابزار اکتشافی است و کمک می‌کند تا در مورد ساختارهای زیربنایی در داده‌ها اطلاعات بیشتری حاصل شود. این روش طبقه‌بندی سعی می‌کند خوشه‌های طبیعی را در داده‌ها پیدا کند. بر این اساس گروه‌هایی ایجاد می‌شود که در آن همه ویژگی‌های هر گروه تا حد امکان مشابه باشند و خود گروه‌ها تا حد امکان متفاوت باشند. در تحقیق حاضر، مخروط افکنه‌های منطقه مورد مطالعه بر مبنای متغیرهای مساحت، طول، شیب و حجم گروه‌بندی شدند. این طبقه‌بندی با استفاده از ابزار آمار فضایی در نرم‌افزار Arc GIS انجام شده است.

آنالیز رگرسیون: آنالیز رگرسیون متغیرهای مورفومتریک درک اثرات عوامل خارجی را تسهیل می‌نماید (ماتر^۵ ۲۰۱۶). از این رو، جهت درک بیشتر عوامل تأثیرگذار، ضرایب همبستگی متغیرها و آنالیز رگرسیون متغیرهای حوضه‌های آبریز و مخروط افکنه‌ها در نرم‌افزار SPSS محاسبه شد.

یافته‌ها

۱ - Principal Component Analysis

۲ - Kaiser-Mayer-Olkin (KMO)

۳ - Bartlett's test of sphericity

۴ - Eigenvalues

۵ - Mather

تعداد ۴۵ مخروط افکنه در پایکوه‌های البرز شمالی مورد مطالعه قرار گرفتند. جدول ۱ خلاصه مشخصات هندسی مخروط‌افکنه‌ها و پارامترهای اندازه‌گیری شده حوضه را نشان می‌دهد. مساحت مخروط‌ها از ۰/۲ تا ۳۷۰ کیلومتر مربع متغیر بوده و میانگین آنها ۲۳/۷ کیلومتر مربع محاسبه شده‌است. طول مخروط‌ها از ۰/۵ تا ۲۳ کیلومتر با میانگین ۳/۷۷ کیلومتر بوده‌است. گرادیان طولی مخروط‌ها از ۰/۵ تا ۵/۴ درصد و میانگین آنها ۲/۳ درصد بوده‌است. زاویه جاروب مخروط‌ها از ۶۴ تا ۱۴۰ درجه متفاوت بوده و میانگین آنها ۱۱۰ درجه محاسبه شده‌است. حجم مخروط‌ها از ۰/۸۹ تا ۲۱۴۳۴ میلیون مترمکعب متغیر بوده و میانگین آنها ۸۴۲ میلیون مترمکعب بوده‌است.

گروه‌بندی مخروط افکنه‌ها: برای تعیین گروه‌بندی، پارامترهای مورفومتریکی مخروط افکنه‌ها شامل مساحت، طول، حجم و گرادیان طولی مورد استفاده قرار گرفتند. بر این اساس سه گروه از مخروط افکنه‌ها در پایکوه‌های البرز شمالی شناسایی شدند (جدول ۲). گروه یک که شامل ۹۱ درصد مخروط‌های منطقه می‌شود، به‌طور میانگین مساحت ۸/۵ کیلومترمربع، طول ۲/۷ کیلومتر، حجم ۱۹۳ میلیون مترمکعب و گرادیان طولی ۲/۴۷ درصد داشته‌اند. این مخروط‌ها در قسمت‌های شرقی و غربی مازندران تشکیل شده‌اند. در گروه دوم ۶/۷ درصد مخروط‌ها قرار گرفته‌اند که نسبت به گروه یک، میانگین مساحت، طول و حجم بیشتری داشته، اما گرادیان طولی آنها با مقدار ۰/۵۶ از سایر گروه‌ها کمتر بوده‌است (شکل ۳). مخروط افکنه‌های بخش مرکزی استان مازندران شامل مخروط افکنه‌های رودخانه‌های تالار، تجن و نکا در این گروه قرار گرفته‌اند (شکل ۴). گروه سوم فقط شامل یک مخروط افکنه بوده (مخروط افکنه رودخانه هراز) که مقادیر متغیرهای اصلی با مقادیر بالاتر، تفاوت معناداری با سایر گروه‌ها داشته‌است.

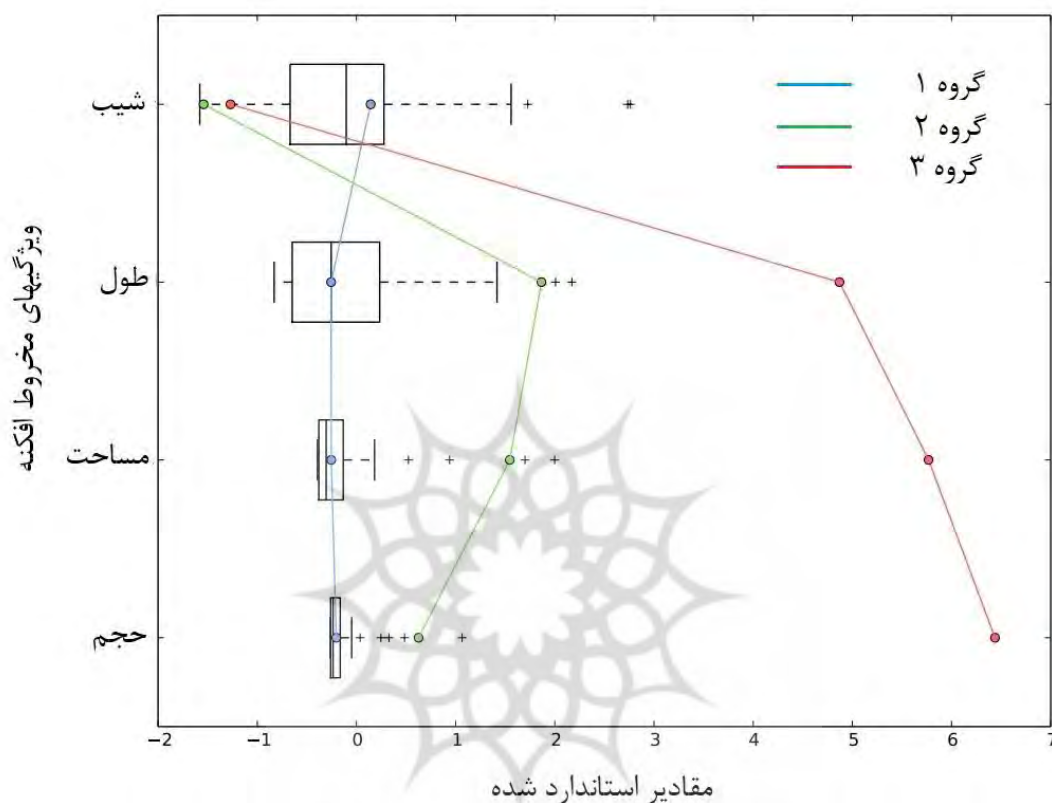
جدول ۱: خلاصه آماری پارامترهای اندازه‌گیری شده مخروط افکنه‌ها و حوضه‌های آبریز بالادست آنها

انحراف معیار	میانگین	حداکثر	حداقل	پارامترهای اندازه‌گیری شده	
۶۰/۸	۲۳/۸	۳۷۰/۷	۰/۲	A_f	مساحت (Km^2)
۴	۳/۷۷	۲۳	۰/۵	L_f	طول (Km)
۱/۱	۲/۳	۵/۴	۰/۵۲	G_f	شیب (%)
۱۹/۸	۱۱۰	۱۴۰	۶۴	SA_f	زاویه جاروب ($^\circ$)
۲۳۳۳	۸۴۲	۲۱۴۳۴	۰/۸۹	V_f	حجم (میلیون متر مکعب)
۹۳۶	۴۰۴	۴۰۷۲	۱	A_b	مساحت (Km^2)
۱۰۴/۶	۷۵/۲	۴۰۲/۴	۵/۲	P_b	محیط (Km)
۳۰/۹	۲۳/۲	۱۳۳	۱/۷	L_b	طول (Km)
۸/۶	۳۲/۳	۵۲/۴	۱۴/۸	S_b	شیب ($^\circ$)
۱۴۶۶	۲۰۲۹	۵۴۰۲	۲۴۹	H_b	اختلاف ارتفاع (m)
۰/۰۹	۰/۲۳	۰/۴۳	۰/۰۶	Mel	عدد ملتون
۰/۲۷	۱/۵	۲/۳۴	۱/۲۳	C.C	ضریب فشردگی
۰/۱	۰/۶۳	۰/۸۹	۰/۳۷	E_b	ضریب تطویل
۲۴/۵	۸۳/۴	۱۰۰	۸	F_b	پوشش جنگلی (%)
۰/۶۳	۴/۴۹	۶	۳/۶	Li	مقاومت سنگ

جدول ۲: گروه‌بندی مخروط افکنه‌های پایکوه‌های البرز شمالی

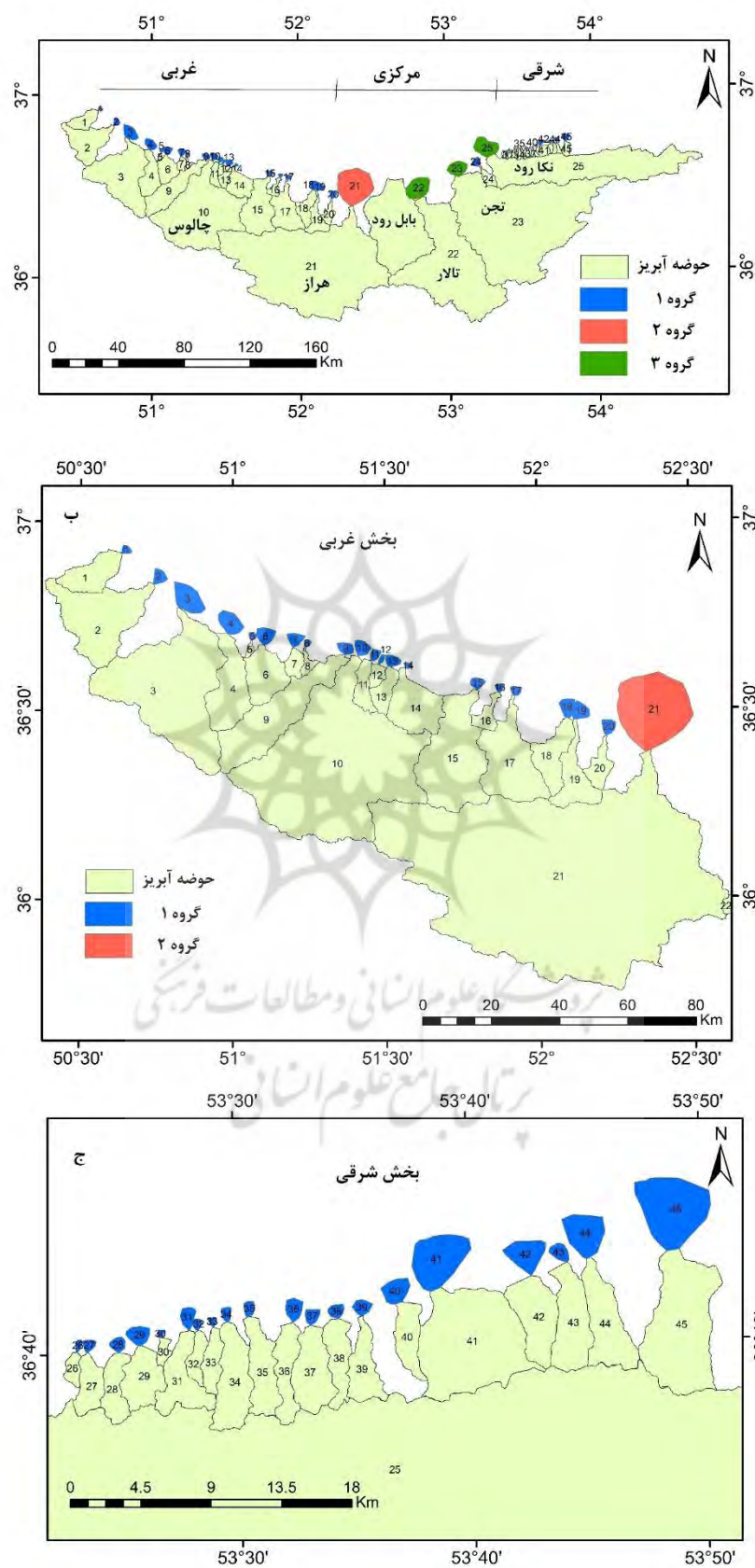
گروه‌بندی	مساحت (Km^2)	طول (m)	حجم (Mm^3)	شیب (%)	تعداد
-----------	------------------	---------	----------------	---------	-------

گروه ۱	۸,۵	۲,۷۶	۱۹۳	۲,۴۷	۴۱
گروه ۲	۱۱۶,۷	۱۱,۱	۲۸۴۴	۰,۵۶	۳
گروه ۳	۳۷,۰	۲۳	۲۱۴۳۴	۰,۸۷	۱
R^2	۰,۹۶	۰,۸۲	۰,۹۸	۰,۲۱	-



شکل ۳: نمودار جعبه‌ای موازی گروه‌بندی پارامترهای مورفومتریک مخروط افکنه‌ها

تحلیل مؤلفه‌های اصلی حوضه: ده متغیر از ویژگی‌های حوضه آبریز برای تحلیل مخروط افکنه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. آماره KMO با مقدار ۰/۷۱ بیانگر همبستگی مناسب متغیرها برای اجرای تحلیل عاملی بوده است. هم چنین، مقدار $Sig=0$ برای آزمون کرویت بارتلت هم با رد فرضیه صفر معناداری اجرای این روش را مورد تأیید قرار داده است. مقادیر عامل‌های استخراج شده بعد از چرخش نشان می‌دهد که متغیرها در سه مؤلفه قابلیت تبیین واریانس‌ها را دارند. مؤلفه اول با ۳۹/۶ درصد واریانس و مؤلفه‌های دوم و سوم به ترتیب با ۲۴/۴ و ۱۸/۸ درصد واریانس در مجموع ۸۲/۸ درصد واریانس را شامل می‌شوند (جدول ۳).



شکل ۴: نقشه گروه‌بندی مخروط افکنه‌ها در البرز شمالی

تحلیل مؤلفه‌های اصلی نشان می‌دهد مؤلفه اول به‌جز متغیر پوشش جنگلی عمدتاً بر اساس ویژگی‌های هندسی حوضه است. متغیرهای شیب و ناهمواری حوضه در مؤلفه دوم و ضریب شکل حوضه در مؤلفه سوم قرار گرفته‌اند.

جدول ۳: ماتریس مؤلفه‌های اصلی چرخش یافته از ویژگی‌های حوضه‌های آبریز

متغیرهای حوضه	مؤلفه ۱	مؤلفه ۲	مؤلفه ۳
مساحت	۰/۸۸	-	-
عدد ملتون	-۰/۸۷	-	-
محیط	۰/۸۷	۰/۳۸	-
طول	۰/۸۴	۰/۳۷	-
پوشش جنگلی	-۰/۶۸	-۰/۵۵	-
شیب	-	۰/۹۴	-
ناهمواری	۰/۴۷	۰/۸۵	-
ضریب فشردگی	۰/۴۲	-	-۰/۹۵
نسبت تطویل	-	-	۰/۸۱

مقادیر پر رنگ در هر ستون به آن مؤلفه تعلق دارند.

روابط مورفومتریک مخروط افکنه‌ها و حوضه‌های آبریز

ضریب همبستگی متغیرهای مورفومتریک مخروط افکنه‌ها و حوضه‌های آبریز در جدول ۴ نشان داده شده است. رابطه بسیاری از این متغیرها در سطح معناداری ۰/۰۱ قابل قبول است. با این وجود، استفاده از روابط رگرسیونی می‌تواند به‌طور مؤثرتری این روابط و ضریب تبیین آنها نشان دهد. ارتباط مؤلفه‌های اول حوضه آبریز شامل مساحت، طول حوضه و پوشش جنگلی نقش مهم‌تری را در روابط رگرسیونی نشان داده‌اند. رابطه رگرسیونی مساحت حوضه و مساحت مخروط از رایج‌ترین آنهاست که معمولاً به صورت رابطه توانی بیان می‌شود. مقادیر R^2 برای روابط رگرسیونی مساحت حوضه آبریز با مساحت، طول و حجم مخروط به ترتیب ۰/۷۸، ۰/۸ و ۰/۸ به دست آمد (جدول ۵ و شکل ۵). ضرایب تبیین بالا و مثبت این روابط نشان می‌دهد که با افزایش مساحت حوضه‌ها، مساحت، طول و حجم مخروط افکنه‌ها به‌طور معناداری افزایش یافته‌است. این افزایش با توجه به مقدار توان (b) که کمتر از یک است نشان می‌دهد افزایش ابعاد مخروط در حوضه‌های بزرگ‌تر به‌علت ذخیره رسوبات در حوضه کمتر است. وجود یک رابطه رگرسیونی مثبت بین طول حوضه و مساحت مخروط، با ضریب تبیین ۰/۷۸ ارتباط قوی این دو متغیر را نشان می‌دهد.

شیب مخروط متغیری است که رابطه معکوس با مساحت حوضه و مساحت مخروط دارد. رگرسیون متغیرهای مساحت حوضه و مخروط با شیب مخروط به ترتیب دارای ضریب b برابر با -۰/۱۸ و -۰/۲۲ بوده است. یعنی افزایش مساحت حوضه‌های آبریز و مخروط افکنه‌ها موجب کاهش شیب در مخروط افکنه‌ها شده است. مقدار دبی رودخانه‌ها و انتقال رسوب از عوامل مؤثر در شیب مخروط افکنه‌ها هستند. معمولاً رودخانه‌های با دبی بیشتر و غلبه فرایند رودخانه‌ای، مخروط‌های با شیب کمتر ایجاد می‌نمایند و حوضه‌های کوچک‌تر به‌علت غلبه جریان‌های واریزه‌ای، مخروط‌های

پرشیب‌تری ایجاد می‌کنند (مقصودی و محمدنژاد آروق ۱۳۹۰، نگهبان و زارع ۱۴۰۰، بومن^۱ ۲۰۱۹). عدد ملتون که شاخصی برای نشان دادن ناهمواری حوضه است با ضریب تبیین ۰/۴۷ رابطه مستقیمی را با شیب مخروط دارد. این رابطه مستقیم نشان می‌دهد که حوضه‌های با ضریب ناهمواری بیشتر، دارای مخروط‌های پرشیب‌تری هستند.

جدول ۴: ضرایب همبستگی (پیرسون) متغیرهای مختلف مخروط افکنه‌ها و حوضه‌های آبریز بالادست

متغیرها		مشخصات حوضه آبریز										مورفومتري مخروط افکنه					
		مساحت	محیط	طول	شیب	ناهمواری	ملتون	جنگل	سنگ	فشرده‌گی	تطویل	مساحت	طول	حجم	شیب	زاویه	
مشخصات حوضه آبریز	مساحت	1	.949	.91	.289	.632	-.625	-.703	.362	.501	-.039	.836	.849	.729	-.485	.244	
	محیط		1	.98	.396	.763	-.667	-.793	.424	.642	-.109	.774	.850	.614	-.558	.346	
	طول			1	.380	.762	-.646	-.794	.419	.684	-.187	.758	.843	.589	-.558	.364*	
	شیب				1	.799	-.113	-.517	.171	.249	.066	.277	.396	.265	-.294	.181	
	ناهمواری					1	-.381	-.795	.439	.465	.001	.567	.719	.471	-.542	.412	
	ملتون						1	.587	-.185	-.354	-.090	-.473	-.499	-.363	.451	-.217	
	جنگل							1	-.375	-.490	.082	-.642	-.682	-.570	.412	-.201	
	سنگ								1	.325	-.155	.321	.443	.238	-.368	.290	
	فشرده‌گی									1	-.673	.404	.471	.247	-.262	.304	
مخروط افکنه	تطویل									1	-.055	-.025	-.003	-.128	-.130		
	مساحت										1	.947	.960	-.425	.251		
	طول											1	.856	-.591	.344		
	حجم												1	-.299	.141		
	شیب													1	-.187		
	زاویه														1		
			در سطح معناداری ۰,۰۱					در سطح معناداری ۰,۰۵				بدون رابطه معنادار					

در سطح معناداری ۰,۰۱

در سطح معناداری ۰,۰۵

بدون رابطه معنادار

در صد پوشش جنگلی در حوضه آبریز متغیر دیگری است که یک رابطه رگرسیون معکوس را با مساحت مخروط و با ضریب تبیین ۰/۶۸ نشان می‌دهد (شکل ۵). بر اساس این رابطه، با افزایش در صد پوشش جنگل در حوضه، مساحت مخروط افکنه‌ها کاهش یافته‌است. این رابطه خصوصاً برای حوضه‌های بزرگ‌تر و با تفاوت اقلیمی و پوشش گیاهی بیشتر ملموس است.

متغیرهای مقاومت سنگ با مساحت مخروط رابطه رگرسیون معنادار داشته‌اند اما در منطقه مورد مطالعه ضریب تبیین آنها پایین (۰/۳) بوده است. مساحت مخروط هم از متغیرهای مهم است که با ضریب تبیین بالا، رابطه مستقیمی را با شیب، طول و ناهمواری مخروط دارد (جدول ۵ و شکل ۶). زاویه جاروب از متغیرهای دیگر مخروط افکنه‌ها است که در منطقه مورد مطالعه ضریب تبیین پایینی (۰/۲۵) داشته است.

جدول ۵: روابط رگرسیون توانی ویژگی‌های حوضه‌های آبریز و مورفومتری مخروط افکنه‌ها

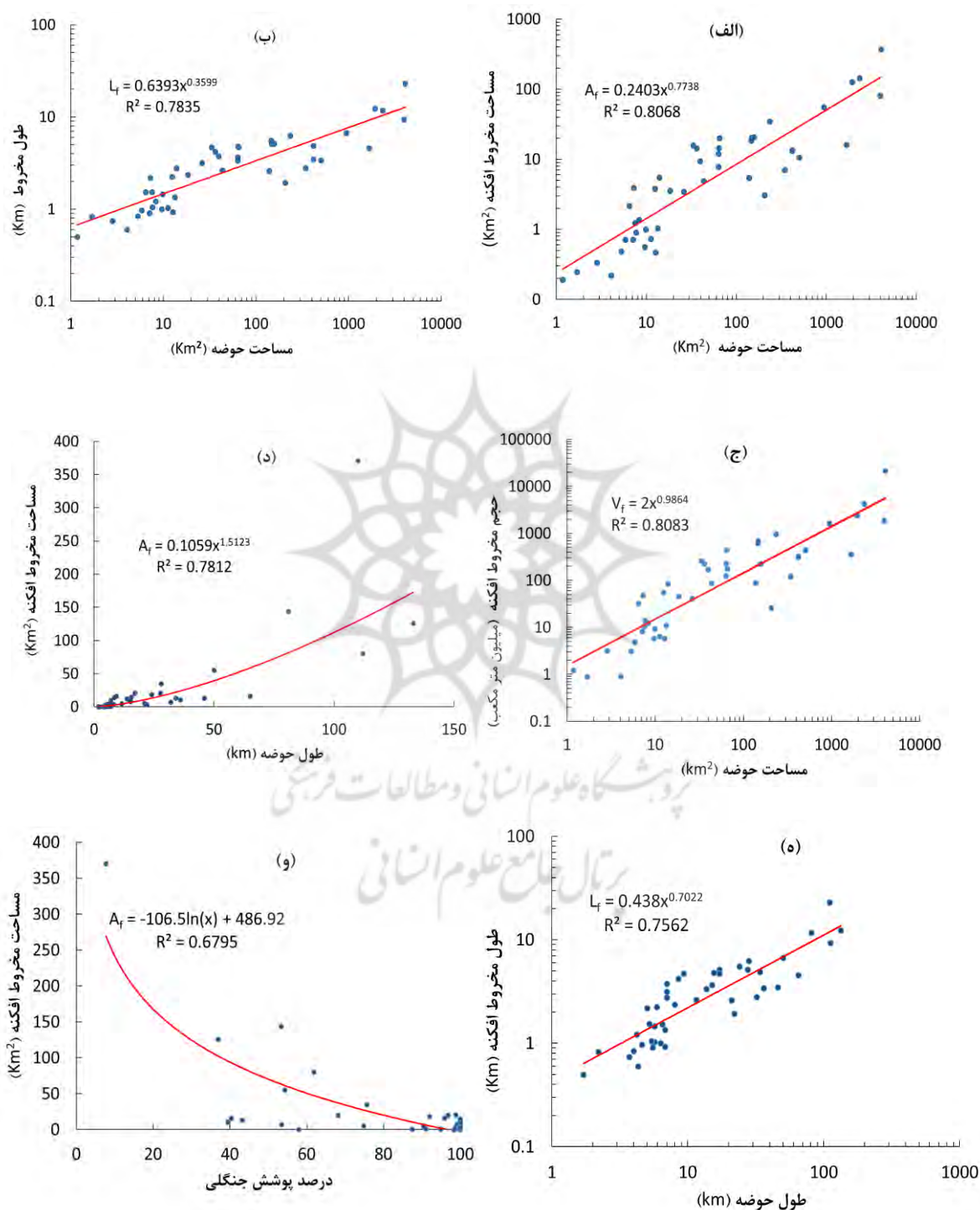
Sig	R ²	b	a	متغیر وابسته	متغیر مستقل
.	۰/۸	۰/۷۷	۰/۲۴	مساحت مخروط (Af)	مساحت حوضه (Ab)
.	۰/۷۸	۰/۳۶	۰/۶۳۹	طول مخروط (Lf)	مساحت حوضه (Ab)
.	۰/۸	۲	۰/۹۸۶	حجم مخروط (Vf)	مساحت حوضه (Ab)
.	۰/۵۳	-۰/۱۸	۴/۱۲	شیب مخروط (Gf)	مساحت حوضه (Ab)
.	۰/۷۸	۰/۱	۱/۵۱	مساحت مخروط (Af)	طول حوضه (Lb)
.	۰/۷۵	۰/۴۳۸	۰/۷	طول مخروط (Lf)	طول حوضه (Lb)
.	۰/۳	-۰/۳۴۵	۲۵/۲	شیب مخروط (Gf)	اختلاف ارتفاع حوضه
.	۰/۳	۷/۶	۰/۰۰۰۵	مساحت مخروط (Af)	مقاومت سنگ (Li)
۰/۰۰۱	۰/۲۳	-۱/۹۴	۰/۲۴	مساحت مخروط (Af)	عدد ملتون (Mel)
.	۰/۴۷	۰/۸	۷	شیب مخروط (Gf)	عدد ملتون (Mel)
.	۰/۵۹	۲/۸۸	-۰/۲۲۴	شیب مخروط (Gf)	مساحت مخروط (Af)
.	۰/۲۵	۹۹/۹۵	۰/۰۵۳	زاویه جاروب (SAf)	مساحت مخروط (Af)
.	۰/۹۸	۰/۴۶۷	۱/۲۳	طول مخروط (Lf)	مساحت مخروط (Af)
.	۰/۶۶	۰/۲۴	۳۵/۶۳	اختلاف ارتفاع مخروط	مساحت مخروط (Af)
.	۰/۹۸	۱/۲۶	۱۰	حجم مخروط (Vf)	مساحت مخروط (Af)

بحث

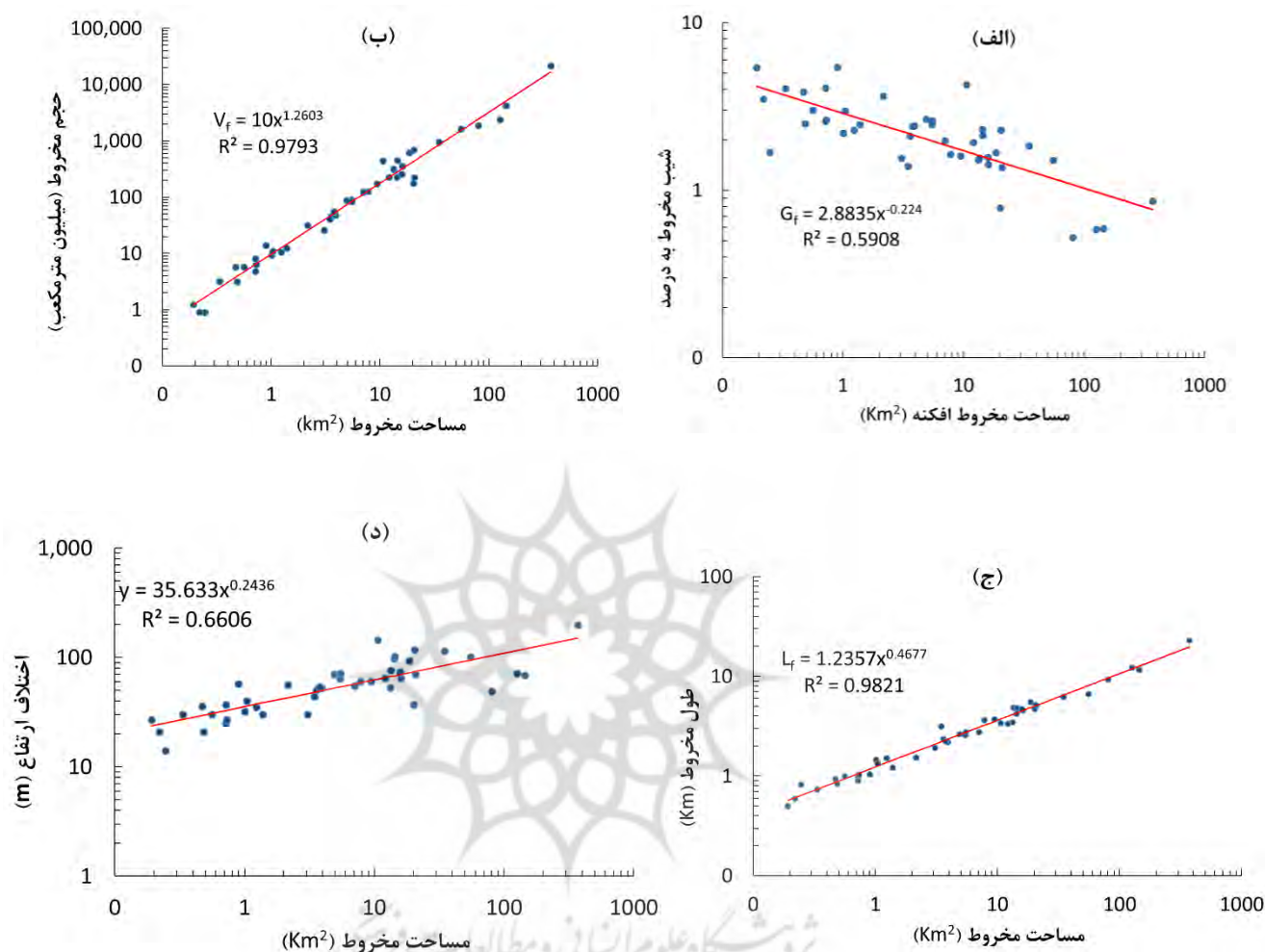
ویژگی‌های حوضه‌های آبریز نقش مهمی در انتقال رسوب و تشکیل مخروط افکنه‌ها در پیشانی کوهستانها دارند. حوضه‌های بزرگ‌تر آب و رسوب بیشتری را به خروجی می‌رسانند لذا می‌توانند مخروط افکنه‌های بزرگ‌تری را ایجاد نمایند. معمولاً بین مساحت حوضه و مخروط افکنه رابطه رگرسیونی قوی وجود دارد. ضریب b که توان معادله است، شیب خط رگرسیون را نشان می‌دهد و در سطح جهانی مقدار آن معمولاً بین ۰/۶ تا ۱/۱ متغیر است (بومن ۲۰۱۹). مطالعات انجام شده در ایران هم در همین دامنه تغییرات قرار دارد (جدول ۶ و شکل ۵). مقدار b در البرز شمالی عدد ۰/۷۷ به دست آمد. مقدار کمتر از ۱ بیانگر ذخیره رسوب در حوضه است. ضریب ثابت a نشان دهنده بزرگی مخروط افکنه نسبت به یک کیلومتر مربع از مساحت حوضه است (بومن ۲۰۱۹). معمولاً دامنه تغییرات این ضریب بین ۰/۱ تا ۱ متغیر است، اگرچه در مقادیر ۲/۵ - ۱ هم وجود دارد. در منطقه مورد مطالعه این مقدار ۰/۲۴ به دست آمد که نشان می‌دهد نسبت مساحت مخروط افکنه‌ها به مساحت حوضه‌های آبریز در البرز شمالی در مقایسه با سایر مناطق ایران کمتر است (جدول ۶ و شکل ۵). با این حال، مساحت مخروط افکنه رود هراز (مخروط ۲۱) به عنوان بزرگ‌ترین مخروط در منطقه مورد مطالعه نسبت به سایر مخروط‌های البرز شمالی تفاوت مشخصی دارد که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

میزان مقاومت سنگ‌ها، شرایط اقلیمی و پوشش گیاهی حوضه عوامل مهم کنترل کننده تولید و انتقال رسوبات هستند. در البرز شمالی، رابطه رگرسیونی مقاومت سنگ‌ها و مساحت مخروط ضریب تبیین نسبتاً ضعیفی (۰/۳) را نشان می‌دهد. در خصوص پوشش جنگلی، اگرچه طی دوره کواترنری تاکنون تغییر نموده است، با این وجود یک رابطه رگرسیونی لگاریتمی بین درصد پوشش جنگلی با مساحت مخروط با ضریب تبیین ۰/۶۷ وجود دارد. حوضه رودخانه هراز با مساحت ۴۰۷۲ کیلومتر مربع دارای مخروطی با مساحت ۳۷۰ کیلومتر مربع است. در حالی که حوضه آبریز تجن با مساحتی معادل ۳۹۵۱ کیلومتر مربع دارای مخروط به مساحت ۸۰ کیلومتر مربع است. پوشش جنگلی در حوضه‌های هراز و تجن به ترتیب

۸ و ۳۷ درصد است. نمونه این مورد برای مخروط افکنه رود نکا هم مصداق دارد. به عبارت دیگر این حوضه‌ها از نظر مقاومت سنگ‌ها تفاوت زیادی ندارند و این نقش بیشتر پوشش جنگلی را در ایجاد رواناب و رسوب نشان می‌دهد.



شکل ۵: روابط رگرسیونی متغیرهای حوضه‌های آبریز و پارامترهای مورفومتریک مخروط افکنه‌ها، (الف) م-مساحت، (ب) مساحت حوضه-طول مخروط، (ج) مساحت حوضه-حجم مخروط، (د) طول حوضه-مساحت مخروط، (ه) طول حوضه-طول مخروط (و) درصد پوشش جنگلی حوضه-مساحت مخروط



شکل ۶: روابط رگرسیونی پارامترهای مورفومتریک مخروط افکنه‌ها، (الف) مساحت - گرادیان طولی (شیب مخروط، ب) مساحت - حجم مخروط، (ج) مساحت - طول مخروط، (د) مساحت - اختلاف ارتفاع مخروط

علاوه بر عامل فوق، پهنای دره هم می‌تواند به‌عنوان یک عامل تأثیرگذار در ابعاد مخروط افکنه محسوب شود. میانگین عرض دره هراز در ۱۰ کیلومتری قبل از خروجی حوضه ۳۳۰ متر اندازه‌گیری شده‌است در حالی که میانگین عرض دره در حوضه تجن ۵۲۰ متر است. در دره‌های با عرض کمتر (رود هراز)، به‌علت انتقال بیشتر رسوبات، مخروط افکنه‌های بزرگتری تشکیل شده‌است و در دره‌های عریض (رود تجن)، به‌علت نهشته‌گذاری و ذخیره رسوبات در کف دره، مخروط افکنه کوچک‌تری تشکیل شده‌اند. نقش عرض دره را در حوضه بابلرود هم می‌توان مشاهده کرد، میانگین عرض دره بابلرود در ده کیلومتر انتهایی تقریباً ۱۰۰۰ متر است که در عمل مانند خلیجی در پیشانی کوهستان دیده می‌شود. رسوب‌گذاری رود در این دره موجب شده‌است که به‌صورت تیپیک، مخروط افکنه‌ای در خروجی کوهستان شکل نگیرد. این موضوع نشان می‌دهد که درصد سنگ‌های مقاوم یا سست به‌تنهایی شاخص مناسبی نیست، بلکه موقعیت قرارگیری و نقش کنترل‌کنندگی آنها خصوصاً در قسمت‌های انتهایی دره مهم است.

جدول ۶: مقایسه مقادیر رگرسیون توانی برای روابط بین مساحت حوضه و مخروط و شیب مخروط در مناطق مختلف ایران

منبع	منطقه	R ²	b	a	
مقصودی (۱۳۸۰)	ایران مرکزی (سیرجان)	۰/۹۱	۰/۹۶	۰/۳۵	مساحت حوضه - مساحت مخروط ^۱
مختاری (۱۳۸۲)	میشوداغ	۰/۸۶	۱/۰۲	۰/۵۱	
عباس‌نژاد و همکاران (۱۳۹۰)	ایران مرکزی (رفسنجان)	۰/۸۶	۰/۶۹	۱/۴۸	
به‌نیافر و همکاران (۱۳۹۵)	کوه‌های بینالود	۰/۴۸	۰/۶	۱/۴۷	
صالحی پور و بشکنی (۱۳۹۹)	کوه‌های تالش (گیلان)	۰/۴۶	۰/۷۱	۰/۶۵	
جوکار و فخرالدین (۱۳۹۴)	البرز جنوبی (سمنان)	۰/۷۹	۰/۸۱	۰/۶۹	
تحقیق حاضر	البرز شمالی (مازندران)	۰/۸	۰/۷۷	۰/۲۴	مساحت حوضه - شیب مخروط ^۲
مقصودی (۱۳۸۰)	ایران مرکزی (سیرجان)	۰/۷۳	-۰/۳۴	۶/۳۱	
عباس‌نژاد و همکاران (۱۳۹۰)	ایران مرکزی (رفسنجان)	۰/۶۲	-۰/۳۳	۱۴	
به‌نیافر و همکاران (۱۳۹۵)	کوه‌های بینالود	۰/۳	-۰/۱۵	۵/۳۳	
مختاری (۱۳۸۲)	میشوداغ	۰/۷۲	-۰/۳۲	۷/۲۸	
تحقیق حاضر	البرز شمالی (مازندران)	۰/۵۳	-۰/۱۸	۴/۱۲	
مقصودی (۱۳۸۰)	ایران مرکزی (سیرجان)	۰/۶۸	-۰/۳۲	۴/۰۶	مساحت مخروط - شیب مخروط ^۳
عباس‌نژاد و همکاران (۱۳۹۰)	ایران مرکزی (رفسنجان)	۰/۶۲	-۰/۳۱	۸/۵	
مختاری (۱۳۸۲)	میشوداغ	۰/۶۸	-۰/۲۸	۵/۵۸	
به‌نیافر و همکاران (۱۳۹۵)	کوه‌های بینالود	۰/۵	-۰/۲۲	۵/۴۹	
صالحی پور و بشکنی (۱۳۹۹)	کوه‌های تالش (گیلان)	۰/۰۷	۰/۰۴	۲/۱۷	
تحقیق حاضر	البرز شمالی (مازندران)	۰/۵۹	-۰/۲۲	۲/۸۸	

$$1) A_f = ax^b$$

X: مساحت حوضه آبریز

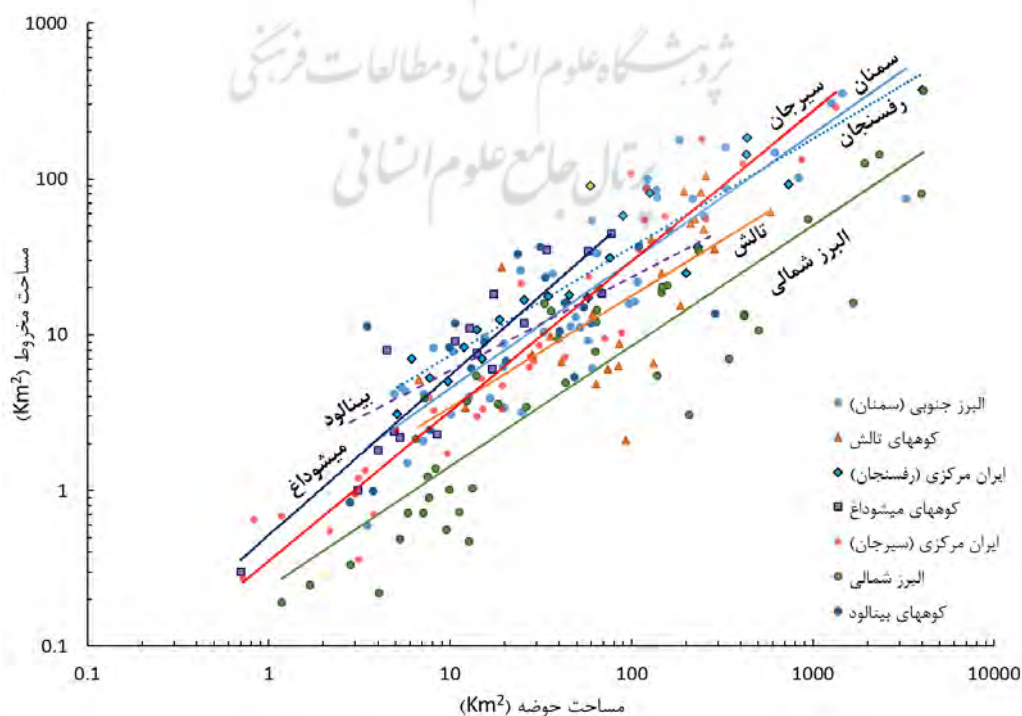
$$2) G_f = ax^b$$

X: مساحت حوضه آبریز

$$3) G_f = ax^b$$

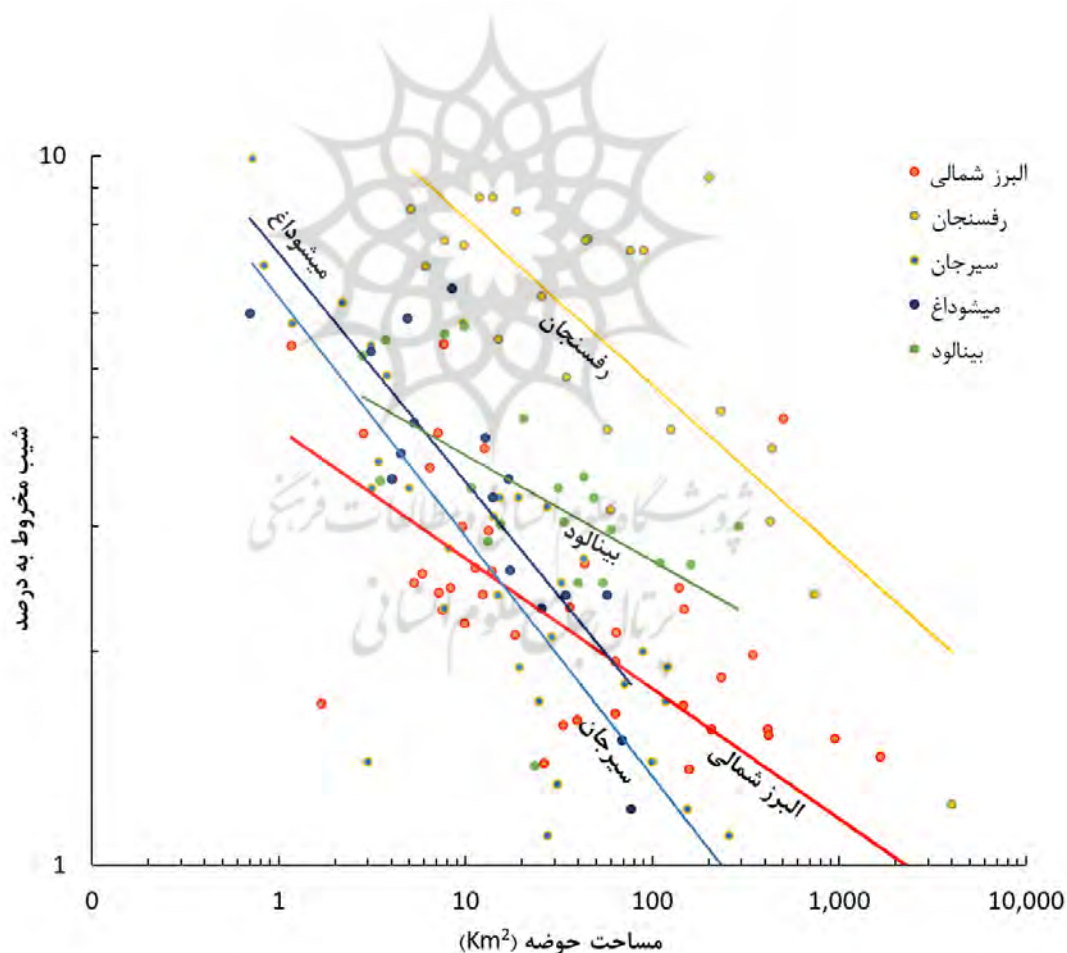
X: مساحت مخروط

** ضرایب مربوط به روابط رگرسیونی از داده‌های خام منابع مذکور استخراج و محاسبه شده‌است.



شکل ۷: مقایسه روابط رگرسیونی مساحت حوضه-مخروط در پایکوه‌های شمالی البرز با سایر مناطق ایران

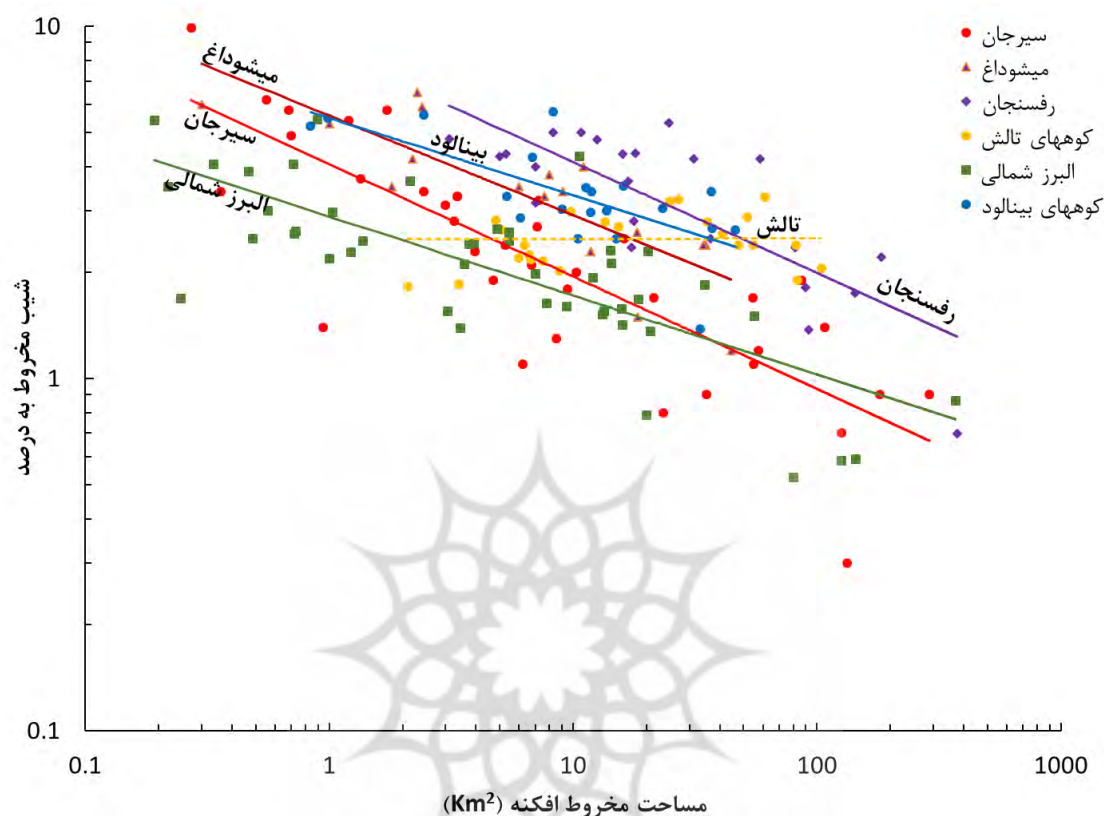
گرادیان طولی مخروط افکنه‌ها: اندازه مساحت حوضه علاوه بر مساحت مخروط افکنه، با شیب مخروط افکنه هم ارتباط معناداری دارد. رگرسیون توانی این دو متغیر در تحقیقات انجام شده در ایران دارای ضریب b بین $-۰/۱۵$ تا $-۰/۳۴$ و ضریب a بین ۴ تا ۱۴ بوده است (جدول ۶ و شکل ۸). شیب خط رگرسیون این دو متغیر در منطقه مورد مطالعه، نسبت به سایر مناطق ایران ملایم‌تر بوده است، به عبارتی دیگر با افزایش مساحت حوضه کاهش شیب مخروط افکنه ملایم‌تر بوده است. دامنه نوسان ضریب b رگرسیون در اغلب مطالعات در سایر مناطق جهان هم بین $-۰/۱$ و $-۰/۳۷$ متغیر بوده است (ور و همکاران ۲۰۲۳). ضریب b رگرسیون بین دو متغیر مساحت مخروط و شیب مخروط در ایران بین $-۰/۲۲$ و $-۰/۳۲$ متغیر بوده است که دامنه تغییرات کمتری نسبت به این ضریب رگرسیون مساحت حوضه و شیب مخروط دارد (شکل ۹). در منطقه مورد مطالعه ضریب b برابر $-۰/۲۲$ با روند مخروط‌های پایکوه‌های بینالود مشابه بوده است. شاخص ناهمواری ملتون هم رابطه مستقیمی را با شیب مخروط افکنه‌های منطقه نشان می‌دهد. وجود چنین رابطه‌ای در سایر مطالعات هم مورد تأیید قرار گرفته است (مختاری ۱۳۸۲؛ صالحی‌پور و بشکنی ۱۳۹۹؛ کاریمبالیس^۱ و همکاران ۲۰۱۶؛ ایاکباسی^۲ و همکاران ۲۰۲۴).



شکل ۸: مقایسه روابط رگرسیونی مساحت حوضه- شیب مخروط در پایکوه‌های شمالی البرز با سایر مناطق ایران

۱- Karimbalis

۲ - Iacobucci



شکل ۹: مقایسه روابط رگرسیونی مساحت مخروط- شیب مخروط در پایکوه‌های شمالی البرز با سایر مناطق ایران

حجم مخروط افکنه‌ها: موقعیت تکتونیکی عامل مهمی در رابطه رگرسیونی مساحت حوضه و مخروط با حجم مخروط است. وجود گسل موجب ناپیوستگی توپوگرافیکی شده و رسوبات در حوضه‌های فرونشینی انباشته می‌شوند (بول ۱۹۷۷، گیلز ۲۰۱۰). با این حال یک رابطه رگرسیونی توانی می‌تواند بین این متغیرها وجود داشته باشد (گیلز ۲۰۱۰). تحقیقات انجام شده در ایران، خصوصاً در مناطقی که مخروط افکنه‌ها تحت تأثیر فعالیت‌های تکتونیکی قرار داشته‌اند، نتایج مختلفی مشاهده می‌شود. در برخی از مناطق مانند طاق‌دیس دنه خشک زاگرس (بهرامی ۱۳۹۳)، کوه‌های بزقوش (رجبی و همکاران ۱۳۹۶) و منطقه سبزوار و اسفراین (امیراحمدی ۱۳۹۴) رابطه معناداری بین مساحت حوضه و حجم مخروط حاصل نشده است. در برخی از مناطق مانند کوه‌های جغتای (جمال و همکاران ۱۳۹۷) و کوه‌های تالش (صالحی‌پور و بشکنی ۱۳۹۹) این رابطه وجود داشته، اما ضریب تبیین آنها پایین بوده است. در کوه‌های آلا‌داغ و بینالود (مکرم و همکاران ۲۰۲۲) ضریب تبیین برای متغیرهای مساحت حوضه با حجم مخروط ۰/۸۲ محاسبه گردید. در تحقیق حاضر هم ضریب تبیین این دو متغیر بالا (۰/۸) بوده است.

تغییرات سطح اساس: تغییرات سطح اساس دریا و تکتونیک دو عامل مؤثر در مورفولوژی مخروط افکنه‌ها محسوب می‌شوند. طی دوره کواترنری، تغییرات شدید و گسترده‌ای از نظر مساحت و حجم در دریای خزر رخ داده است. این تغییرات سطح اساس دریا تقریباً با تغییرات اقلیمی دوره‌های یخچالی و بین یخچالی کواترنری همزمان بوده است. به طوری که بخش مهمی از تحولات جلگه خزری بر اثر پیشروی‌ها و پسروی‌ها مکرر این دریا صورت گرفته است. اگرچه

بین زمان‌های وقوع این تغییرات هنوز توافق کاملی وجود ندارد، با این حال می‌توان به برخی از مهم‌ترین تغییرات اواخر پلیستوسن و هولوسن شامل پیشروی‌های مهم خوالینین^۱ پیشین و پسین و پسروی‌های آتلین^۲، انوتاویوکا^۳ و منگیشلک^۴ اشاره کرد. تغییرات تراز دریای خزر در این دوره‌ها از ۵۰ تا تقریباً ۱۳۰- متر از سطح دریاهای آزاد بوده است (کوربیچ^۵ و همکاران ۲۰۲۲).

طی دوره پیشروی با توجه به بالا رفتن تراز دریا، قسمت‌هایی از جلگه خزری زیر نفوذ رسوب‌گذاری دریایی قرار گرفته و محدوده گسترش فضایی مخروط افکنه‌ها با محدودیت روبه‌رو بوده است. طی دوره پسروی که تراز آب دریای خزر پایین رفته و مساحت دریا کاهش یافت، فضای بیشتری برای گسترش شکل‌گیری مخروط افکنه‌ها فراهم شده است. قاعده تعدادی از مخروط افکنه‌های غرب مازندران حداکثر در ارتفاع ۲۰- متری از سطح دریا واقع شده است. تغییرات تراز دریا خزر در هولوسن و سواحل جنوبی دریای خزر نشان می‌دهد که در اواخر هولوسن به‌طور میانگین ۲۵۰۰ سال پیش سطح آب دریا در ترازهای ۲۲- متر (لاهیجانی ۲۰۰۹)، ۲۴- و ۲۱- متر (رمضانی ۲۰۱۶، عبدالمهی کاکرودی ۱۳۹۶) قرار داشته است. قرارگیری قاعده مخروط افکنه در چنین ارتفاعاتی نشان می‌دهد که احتمالاً گسترش آنها در پیشروی ۲۳۰۰- ۲۶۰۰ سال قبل دریای خزر رخ داده است. در دوره یخچالی کوچک (۱۸۰۰-۱۳۰۰ سال قبل) سطح آب دریای خزر حداکثر تا تراز ۴۴- متر از سطح دریا آزاد پایین‌تر رفت (کرونیبرگ^۶ ۲۰۰۹). احتمالاً پسروی دریای خزر حداکثر تا تراز ۴۴- متر حفر بستر رودخانه‌ها (فروسایی) موجب تقطیع جدید مخروط افکنه‌های منطقه شده است. البته در مناطق دورتر از ساحل تغییرات ترازهای قدیمی‌تر دریای خزر موجب شکل‌گیری تراس‌های آبرفتی در سطوح مختلف شده است که تفسیر آنها نیازمند مطالعات سن‌یابی دقیق است.

علاوه بر تغییرات سطح اساس دریای خزر، تغییرات تکتونیکی هم عامل مهمی در مورفولوژی مخروط افکنه‌ها هستند. مرز کوه‌های البرز با جلگه خزری به گسل خزر مشخص می‌شود که در اغلب مناطق به صورت پنهان است. سن‌یابی رادیوکربن نشان می‌دهد سرعت فرایش قائم این گسل 5 ± 2 میلی‌متر در سال است (نظری و همکاران ۱۴۰۰). لذا بالآمدگی ناشی از این بالآمدگی هم پیچیدگی‌های منجر به تقطیع مخروط افکنه‌های منطقه را بیشتر می‌کند.

نتیجه‌گیری

بررسی متغیرهای مورفومتریک مخروط افکنه‌های پایکوه‌های البرز شمالی و حوضه‌های بالادست آنها روابط معناداری را نشان می‌دهد. متغیرهای مورفومتریک مخروط افکنه شامل مساحت، طول، شیب و حجم مخروط روابط معناداری را با پارامترهای مختلف حوضه نشان می‌دهند. با وجود پیچیدگی‌های ناشی از تغییرات تراز دریای خزر در اواخر پلیستوسن و هولوسن و اثرات تکتونیکی گسل خزر، این روابط بین ویژگی‌های حوضه و مورفومتری مخروط افکنه‌های منطقه وجود دارد. بر این اساس مخروط افکنه‌های منطقه در سه گروه طبقه‌بندی شدند. به‌جز مخروط افکنه هراز که ویژگی‌های مورفومتریک آن مانند مناطق نیمه خشک کشور است، سایر مخروط‌های منطقه به‌صورت نسبتاً همگن هستند. مقایسه مورفومتری مخروط‌های پایکوه‌های البرز شمالی با سایر مناطق ایران نشان می‌دهد که مساحت مخروط افکنه‌های منطقه نسبت به البرز جنوبی و بینالود سه برابر و نسبت به مناطق مرکزی ایران چهار برابر کوچک‌تر هستند. روابط

۱ - Khvalynian

۲ - Atelian

۳ - Enotaevka

۴ - Mangyshlak

۵ - Koriche

۶ - Kroonenberg

رگرسیون نشان می‌دهند شیب مخروط افکنه منطقه مورد مطالعه هم نسبت به سایر مناطق کشور به جز سیرجان، به‌طور متوسط ۱/۲ تا ۱/۶ برابر کمتر هستند. لذا به نظر می‌رسد نقش کنترل‌کننده حوضه مانند وجود پوشش جنگلی متراکم، موجب کاهش مقادیر رسوبات انتقالی از حوضه آبریز شده و در نتیجه مخروط‌های کوچک‌تر و با شیب ملایم‌تری نسبت به سایر مناطق کشور تشکیل شده‌است.

در میان خصوصیات هندسی حوضه‌های آبریز متغیرهای مساحت، طول و ناهمواری، نقش بیشتری در مورفومتری مخروط افکنه‌های منطقه داشته‌اند. علاوه بر ویژگی‌های فیزیکی حوضه‌های آبریز، درصد پوشش درختی، تفاوت اقلیمی در حوضه‌های بزرگ‌تر و پهنای دره در قسمت‌های انتهایی حوضه از عوامل مؤثر در ابعاد مخروط افکنه‌های گروه‌های ۲ و ۳ بوده‌اند.

برای درک بیشتر از نحوه تشکیل و تکامل مخروط افکنه‌های پایکوه‌های البرز شمالی و جلگه خزری، مطالعات جامع و تفصیلی از سن‌یابی مخروط افکنه و ارتباط آنها در خصوص تغییرات سطح اساس دریای خزر و میزان بالاآمدگی تکتونیکی البرز، تحلیل سکانس‌های رسوبی مخروط افکنه‌های منطقه و آنالیز محیط رسوبی گذشته و روند تکاملی این مخروط افکنه‌ها پیشنهاد می‌شود.

منابع

- اسماعیلی، ر.، قریشوندی، م.، و جوکار سرهنگی، ع.، ۱۳۹۷. شناسایی و رتبه‌بندی مناطق تحت خطر سیل در مخروط افکنه‌های شمال‌ایذه، استان خوزستان. هیدرو ژئومورفولوژی، دوره ۵، شماره ۱۷، صص ۱۸۳-۱۶۳.
- امیراحمدی، ا.، ابراهیمی، م.، حبیب‌اللهیان، م.، زنگنه اسدی، م.، و شایان یگانه، ع.، ۱۳۹۴. تکتونیک فعال و ارتباط آن با حجم مخروط افکنه‌ها (مطالعه موردی: پنج حوضه آبخیز در شمال شرق ایران مرکزی). فصل‌نامه تحقیقات جغرافیایی، دوره ۳۰، شماره ۴، صص ۲۹-۶.
- امیراحمدی، ا.، ثقفی، م.، و ربیعی، م.، ۱۳۹۰. تحلیل و طبقه‌بندی چند متغیره برای مدل‌سازی متغیرهای مؤثر بر شکل هندسی مخروط افکنه‌های دامنه شمالی کوهستان باقران (جنوب شهر بیرجند). جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی (مجله پژوهشی علوم انسانی دانشگاه اصفهان)، دوره ۲۲، شماره ۴، صص ۹۰-۷۳.
- بهرامی، ش.، ۱۳۹۳. برآورد حجم مخروط افکنه‌های واقع در حاشیه طاق‌دیس دنه خشک و ارتباط آن با تکتونیک، تحقیقات جغرافیایی، دوره ۲۹، شماره ۱، صص ۷۲-۵۹.
- بهرامی، ش.، و بهرامی، ک.، ۱۳۹۰. ارزیابی تکنیک‌های ژئومورفولوژیکی جهت شناسایی مخروط افکنه‌های قدیمی و جدید به‌منظور تعیین مناطق مستعد سیل خیزی در چهار مخروط افکنه در زاگرس چین‌خورده، جغرافیا و توسعه، دوره ۹، شماره ۲۲، صص ۱۰۶-۸۹.
- به‌نیافر، ا.، قنبرزاده، ه.، رکنی، ج.، و رضائی عارفی، م.، ۱۳۹۵. کاربرد ژئومورفومتری در روابط کمی مخروط افکنه‌های پلیوکواترن با استفاده از RS و کنترل صحرایی (مطالعه موردی: پیشانی بینالود جنوبی). فضای جغرافیایی، دوره ۱۶، شماره ۵۵، صص ۲۱۵-۱۹۷.
- جمال‌آبادی، ج.، زنگنه اسدی، م.، و امیراحمدی، ا.، ۱۳۹۷. روابط کمی بین حجم مخروط افکنه‌ها و ارتباط آن با تکتونیک فعال (مطالعه موردی: مخروط افکنه‌های دامنه جنوبی ارتفاعات جغتای). جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی (مجله پژوهشی علوم انسانی دانشگاه اصفهان)، دوره ۲۹، شماره ۳، صص ۵۶-۳۵.

- جوکار سرهنگی، ع. و فخرالدین، س.، ۱۳۹۴. بررسی تأثیر ویژگی‌های هندسی حوضه‌ها در تشکیل مخروط افکنه‌های دامنه جنوبی البرز در استان سمنان با استفاده از روش‌های همبستگی و تحلیل سلسله‌مراتبی، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، دوره ۵، شماره ۲۰، صص ۶۰-۷۰.
- درویش‌زاده، ع.، ۱۳۷۰. زمین‌شناسی ایران، چاپ اول، انتشارات امیرکبیر، تهران.
- را مشیت، م.، سیف، ع.، شاه‌زیدی، س.، و انتظاری، م.، ۱۳۸۸. تأثیر تکتونیک جنب‌بر مورفولوژی مخروط افکنه درختگان در منطقه شهداد کرمان. جغرافیا و توسعه، دوره ۷ شماره ۱۶، صص ۲۹-۴۶.
- رجبی، م.، مختاری، د.، و هاشمیان، م.، ۱۳۹۸. تحلیل روابط کمی بین حجم مخروط افکنه‌ها و ارتباط آن با تکتونیک فعال (مطالعه موردی: مخروط افکنه‌های دامنه شمالی بزقوش). جغرافیا و برنامه‌ریزی، دوره ۲۳، شماره ۷۰، صص ۱۴۳-۱۲۳.
- روستایی، ش.، رجبی، م.، زمردیان، م.، ف. و مقامی مقیم، غ.، ۱۳۸۸. نقش فعالیت‌های تکتونیک در شکل‌گیری و گسترش مخروط افکنه‌های دامنه‌های جنوبی آلا‌داغ. جغرافیا و توسعه، دوره ۷، شماره ۱۳، صص ۱۵۶-۱۳۷.
- زارع چاهوکی، م.، ۱۳۹۲. تجزیه و تحلیل داده‌ها در پژوهش‌های منابع طبیعی با نرم‌افزار SPSS، چاپ دوم، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد تهران.
- شایان، س.، و زارع، غ.، ۱۳۹۲. تعیین محدوده‌های خطر زمین‌لرزه در مخروط افکنه‌های فعال با روش تحلیل فضایی بر بریان مطالعه موردی: مخروط افکنه گرمسار، برنامه‌ریزی و آمایش فضا (مدرس علوم انسانی)، دوره ۱۷، شماره ۲، صص ۹۳-۱۲۰.
- شریفی پیچون، م.، و شیرانی، م.، ۱۳۹۸. بررسی اثرات جهت جغرافیایی دامنه‌ها بر حجم مخروط افکنه (مطالعه موردی: شیرکوه یزد)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۷، شماره ۴، صص ۷۲-۵۴.
- صالحی پور میلانی، ع.، و بشکنی، ز.، ۱۳۹۹. تحلیل روابط کمی بین ویژگی‌های مورفومتری مخروط افکنه‌های ساحلی با حوضه‌های آبخیز (مطالعه موردی، واحد ژئومورفولوژیکی تالش). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۸، شماره ۴، صص ۱۱۲-۱۳۰.
- عباس‌نژاد، ا.، ذهاب‌ناظوری، س.، و توکلی، ر.، ۱۳۹۰. شناسایی مخروط افکنه‌های حاشیه دشت رفسنجان (جنوب شرق ایران) و تعیین روابط مورفومتریکی آنها با حوضه‌های آبگیر مربوطه. فصل‌نامه جغرافیایی چشم‌انداز زاگرس، دوره ۳، شماره ۹، صص ۲۱۷-۲۰۳.
- عبدالهی کاکرودی، ع.، ۱۳۹۶. تغییرات تراز آب دریای خزر در حدود ۲۶۰۰ پیش و دوره‌ی سرد کوتاه و اثرهای آن بر سواحل ایران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی (پژوهش‌های جغرافیایی)، دوره ۴۹، شماره ۱، صص ۱۱۱-۱۰۱.
- عساکره، ح.، و بیات، ع.، ۱۳۹۲. تحلیل مولفه‌های اصلی مشخصات بارش سالانه شهر زنجان. جغرافیا و برنامه‌ریزی، دوره ۱۷، شماره ۴۵، صص ۱۴۲-۱۲۱.
- قهرمان، ک.، زنگنه اسدی، م.، و اکبری، ا.، ۱۴۰۱. مقایسه کمی شاخص‌های مورفومتریکی و تغییرات شیب قاعده مخروط افکنه‌های مناطق خشک با تأکید بر ایران مرکزی، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی (پژوهش‌های جغرافیایی)، دوره ۵۴، شماره ۲، صص ۲۵۶-۲۴۳.
- کمالی، ز.، هیهات، م.، نظری، ح.، و خطیب، م.، ۱۳۹۹. بررسی نرخ فعالیت تکتونیک محدود گسل دورود (جنوب باختر ایران) بر پایه تحلیل داده‌های ژئومورفولوژیک (مخروط افکنه‌ها، حوضه‌ها و شبکه زهکشی). زمین‌شناسی ایران، دوره ۱۴، شماره ۵۳، صص ۳۰-۱۷.

- گورابی، ا. و یمانی، م.، ۱۳۹۷. ارتباط کمی ویژگی‌های مورفولوژیک حوضه‌های زهکشی و مخروط افکنه‌های آنها در ایران مرکزی. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱، شماره ۲، صص ۱۶-۱.
- مختاری کشکی، د.، ۱۳۸۲. تحلیل روابط ویژگی‌های مورفومتری مخروط افکنه‌ها با حوضه‌های آبریز مطالعه موردی: حوضه‌ها و مخروط افکنه‌های دامنه شمالی میشوداغ (آذربایجان، شمال غرب ایران). تحقیقات جغرافیایی، دوره ۱۸، شماره ۴، صص ۳۶-۴۶.
- مختاری، د.، رضایی مقدم، م.، و معزز، س.، ۱۴۰۰. تحلیل دینامیکی مخاطره سیلاب در مخروط افکنه‌های فعال با استفاده از مدل هیدرودینامیکی HEC-RAS و تکنیک GIS مطالعه موردی: مخروط افکنه لیلان، شمال غرب ایران). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۹، شماره ۴، صص ۱۸۵-۱۶۹.
- مقصودی، م.، ۱۳۸۰. بررسی متغیرهای مؤثر بر تحول ژئومورفولوژی مخروط افکنه‌های چاله سیرجان، رساله دکتری، دانشگاه تهران.
- مقصودی، م.، باقری سیدشکری، س.، و مینایی، م.، ۱۳۸۸. بررسی نقش تکتونیک در شکل‌گیری و تحول مخروط افکنه‌ها (مطالعه موردی: مخروط افکنه‌های دامنه تاق‌دیس قلاجه). جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، دوره ۷، شماره ۱۲، صص ۱۲۴-۹۹.
- مقصودی، م.، محمدنژاد آروق، و.، ۱۳۹۰. ژئومورفولوژی مخروط افکنه‌ها، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران.
- موسوی، س.، خطیب، م.، و یوسفی، م.، ۱۳۹۶. تأثیر فعالیت‌های تکتونیکی بر مورفولوژی مخروط افکنه‌های شمال بیرجند. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۶، شماره ۳، صص ۷۳-۶۰.
- نظری، ح.، ریتز، ژ.، و آواگیان، آ.، ۱۴۰۰. ریخت زمین ساخت و نرخ لغزش گسله خزر در البرز مرکزی (شمال ایران). علوم زمین، دوره ۳۱، شماره ۱۲۰، صص ۱۱۰-۱۰۱.
- نگهبان، س.، و زارع، غ.، ۱۴۰۰. ژئومورفولوژی مخروط افکنه‌ها، چاپ اول، انتشارات دانشگاه شیراز.
- یمانی، م.، مقصودی، م.، قاسمی، م.، و محمدنژاد، و.، ۱۳۹۱. شواهد مورفولوژیکی و مورفومتریکی تأثیر تکتونیک فعال بر مخروط افکنه‌های شمال دامغان. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی (پژوهش‌های جغرافیایی)، دوره ۴۴، شماره ۲، صص ۱۸-۱.
- یمانی، م.، گورابی، ا.، زمان زاده، س.، و شعبانی عراقی، ع.، ۱۳۹۵. شواهد تغییرات سطح اساس پلایای میقان در کوتاه‌تری و تأثیر آن بر مورفولوژی و توالی مخروط افکنه‌ها، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی (پژوهش‌های جغرافیایی)، دوره ۴۸، شماره ۱، صص ۳۱-۱۵.
- Allen, M., Jackson, J., & Walker, R. (2004). Late Cenozoic reorganization of the Arabia Eurasia collision and the comparison of short term and long term deformation rates. *Tectonics*, 23(2).
- Almond, P. C., Berryman, K., Villamor, P., Read, S., Alloway, B. V., & Tonkin, P. (2023). Alluvial fan response to Alpine Fault earthquakes on the Westland piedmont, Whataroa, Aotearoa New Zealand. *Earth Surface Processes and Landforms*, 48(9), 1804-1829.
- Ayaz, S., Biswas, M., & Dhali, M. K. (2018). Morphotectonic analysis of alluvial fan dynamics: comparative study in spatio-temporal scale of Himalayan foothill, India. *Arab J Geosci* 11 (2): 1-16.
- Bahrami, S. (2013). Tectonic controls on the morphometry of alluvial fans around Danekkhoshk anticline, Zagros, Iran. *Geomorphology*, 180, 217-230.
- Beaumont, P. (1972). Alluvial fans along the foothills of the Elburz Mountains, Iran. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 12(4), 251-273.

- Bowman, D. (2019). *Principles of alluvial fan morphology*. Dordrecht: Springer.
- Bull, W. B. (1977). The alluvial-fan environment. *Progress in Physical geography*, 1(2), 222-270.
- Evans, I. S. (2012). Geomorphometry and landform mapping: What is a landform?. *Geomorphology*, 137(1), 94-106.
- Franke, D., Hornung, J., & Hinderer, M. (2015). A combined study of radar facies, lithofacies and three dimensional architecture of an alpine alluvial fan (Illgraben fan, Switzerland). *Sedimentology*, 62(1), 57-86.
- Gallant, J. C., & Dowling, T. I. (2003). A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas. *Water resources research*, 39(12).
- Giles, P. T. (2010). Investigating the use of alluvial fan volume to represent fan size in morphometric studies. *Geomorphology*, 121(3-4), 317-328.
- Goorabi, A., Karimi, M., & Norini, G. (2021). Semi-automated method for the mapping of alluvial fans from DEM. *Earth Science Informatics*, 14(3), 1447-1466.
- Harvey, A. M. (2005). Differential effects of base-level, tectonic setting and climatic change on Quaternary alluvial fans in the northern Great Basin, Nevada, USA. *Geological Society, London, Special Publications*, 251(1), 117-131.
- Harvey, A. (2011). Dryland alluvial fans. *Arid zone geomorphology: Process, form and change in drylands*, 333-371.
- Iacobucci, G., Delchiaro, M., Troiani, F., & Nadali, D. (2024). Land-surface quantitative analysis for mapping and deciphering the construction processes of piedmont alluvial fans in the Anti-Lebanon Mountains. *Geomorphology*, 453, 109148.
- Kain, C. L., Rigby, E. H., & Mazengarb, C. (2018). A combined morphometric, sedimentary, GIS and modelling analysis of flooding and debris flow hazard on a composite alluvial fan, Caveside, Tasmania. *Sedimentary Geology*, 364, 286-301.
- Kakroodi, A. A., Kroonenberg, S. B., Hoogendoorn, R. M., Khani, H. M., Yamani, M., Ghassemi, M. R., & Lahijani, H. A. K. (2012). Rapid Holocene sea-level changes along the Iranian Caspian coast. *Quaternary International*, 263, 93-103.
- Karymbalis, E., Ferentinou, M., & Giles, P. T. (2018). Use of morphometric variables and self-organizing maps to identify clusters of alluvial fans and catchments in the north Peloponnese, Greece. *Geological Society, London, Special Publications*, 440(1), 45-64.
- Koriche, S. A., Singarayer, J. S., Cloke, H. L., Valdes, P. J., Wesselingh, F. P., Kroonenberg, S. B.,... & Yanina, T. A. (2022). What are the drivers of Caspian Sea level variation during the late Quaternary?. *Quaternary Science Reviews*, 283, 107457.
- Kroonenberg, S. B., Kasimov, N. S., & Lychagin, M. Y. (2008). The Caspian Sea, a natural laboratory for sea-level change. *Geography, environment, sustainability*, 1(1), 22-37.
- Lahijani, H. A. K., Rahimpour-Bonab, H., Tavakoli, V., & Hosseindoost, M. (2009). Evidence for late Holocene highstands in central Guilan–East Mazandaran, south Caspian coast, Iran. *Quaternary International*, 197(1-2), 55-71.
- Lucà, F., & Robustelli, G. (2020). Comparison of logistic regression and neural network models in assessing geomorphic control on alluvial fan depositional processes (Calabria, southern Italy). *Environmental Earth Sciences*, 79, 1-18.
- Marchi, L., Cavalli, M., & D'Agostino, V. (2010). Hydrogeomorphic processes and torrent control works on a large alluvial fan in the eastern Italian Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(3), 547-558.

- Mather, A. E., Stokes, M., & Whitfield, E. (2017). River terraces and alluvial fans: The case for an integrated Quaternary fluvial archive. *Quaternary Science Reviews*, 166, 74-90.
- Mokarram, M., Pourghasemi, H. R., & Tiefenbacher, J. P. (2022). Identification of morphometric features of alluvial fan and basins in predicting the erosion levels using ANN. *Environmental Earth Sciences*, 81(3), 95.
- Mueller, N., Lewis, A., Roberts, D., Ring, S., Melrose, R., Sixsmith, J.,... & Ip, A. (2016). Water observations from space: Mapping surface water from 25 years of Landsat imagery across Australia. *Remote Sensing of Environment*, 174, 341-352.
- Nazari, H., Ritz, J. F., Burg, J. P., Shokri, M., Haghipour, N., Vizheh, M. M.,... & Ensani, M. (2021). Active tectonics along the Khazar fault (Alborz, Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, 219, 104893.
- Norini, G., Zuluaga, M. C., Ortiz, I. J., Aquino, D. T., & Lagmay, A. M. F. (2016). Delineation of alluvial fans from Digital Elevation Models with a GIS algorithm for the geomorphological mapping of the Earth and Mars. *Geomorphology*, 273, 134-149.
- Pelletier, J. D., Mayer, L., Pearthree, P. A., House, P. K., Demsey, K. A., Klawon, J. E., & Vincent, K. R. (2005). An integrated approach to flood hazard assessment on alluvial fans using numerical modeling, field mapping, and remote sensing. *Geological Society of America Bulletin*, 117(9-10), 1167-1180.
- Peyrowan, H. R., & Shariat Jafari, M. (2013). Presentation of a comprehensive method for determining erodibility rate of rock units with a review on Iranian geology. *Watershed Engineering and Management*, 5(3), 199-213.
- Ramezani, E., Mrotzek, A., Mohadjer, M. R. M., Kakroodi, A. A., Kroonenberg, S. B., & Joosten, H. (2016). Between the mountains and the sea: Late Holocene Caspian Sea level fluctuations and vegetation history of the lowland forests of northern Iran. *Quaternary International*, 408, 52-64.
- Saito, K., & Oguchi, T. (2005). Slope of alluvial fans in humid regions of Japan, Taiwan and the Philippines. *Geomorphology*, 70(1-2), 147-162.
- Stokes, M., & Gomes, A. (2020). Alluvial fans on volcanic islands: A morphometric perspective (São Vicente, Cape Verde). *Geomorphology*, 368, 107356.
- Tomczyk, A. M. (2021). Morphometry and morphology of fan-shaped landforms in the high-Arctic settings of central Spitsbergen, Svalbard. *Geomorphology*, 392, 107899.
- Woor, S., Thomas, D. S., Parton, A., & Leenman, A. (2023). Morphology and controls of the mountain-front fan systems of the Hajar Mountains, south-east Arabia. *Earth-Science Reviews*, 237, 104316.