پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، سال سیزدهم، شماره ۴، بهار ۱۴۰۴
صص. ۲۰۳ - ۱۸۱

تحلیل ژئومورفولوژیک با استفاده از تئوری گسیختگی سطحی، منطقه مورد مطالعه: کپه داغ مرکزی و شرقی

مرتضی رضایی عارفی– دانشجوی دکترای ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
ابراهیم مقیمی *– استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
منصور جعفر بگلو – دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
سید موسی حسینی– دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
مجید فخری– سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، تهران، ایران.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۱۹ تائید نهایی: ۱۴۰۳/۱۱/۲۶

چکیده

منطقه کپه داغ، یک ناحیه فعال تکتونیکی در شمال شرق ایران، چشم‌اندازی منحصر به فرد برای مطالعه پتانسیل گسیختگی سطحی و فرآیندهای هیدروژئومورفولوژیکی ارائه می‌دهد. این مطالعه با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته تحلیل ژئومورفومتری به بررسی تعامل پیچیده بین توپوگرافی، تکتونیک و فرآیندهای سطحی در این محیط نیمه‌خشک می‌پردازد. با بهره‌گیری از مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEM) با وضوح بالا، پارامترهای کلیدی ژئومورفومتری از جمله ارتفاع، شیب و جهت شیب را استخراج و تحلیل می‌کنیم تا ویژگی‌های توپوگرافی منطقه و پیامدهای آن برای گسیختگی سطحی و مدیریت منابع آب را مشخص کنیم. در این روش‌شناسی ما به دنبال پردازش DEM، تحلیل‌های آماری و تکنیک‌های تجسم‌سازی با ادغام آنها و استفاده از اسکریپت های پایتون می باشیم. ما از روش‌های نمونه‌برداری کاهشی برای پردازش کارآمد مجموعه داده‌های بزرگ با حفظ یکپارچگی داده‌ها استفاده می‌کنیم و معیارهای آماری قوی را برای کمی‌سازی عدم قطعیت در یافته‌هایمان به کار می‌بریم. منطقه مورد مطالعه، با پوشش تقریبی ۳۵،۵۹۵ کیلومتر مربع، دامنه ارتفاعی ۲،۶۰۸ متری را از ۳۵۴ تا ۲،۹۶۲ متر بالاتر از سطح دریا نشان می‌دهد. نتایج، چشم‌اندازی متنوع با میانگین ارتفاع ۱،۳۶۵،۹۷ متر و میانگین شیب ۴،۸۸° ± ۰،۰۱° (خطای استاندارد میانگین) را آشکار می‌کند. وجود شیب‌های بسیار تند (تا ۸۹،۶۰°) نشان‌دهنده مناطقی با پتانسیل ناپایداری و خطر فرسایش بالا است که احتمالاً با فعالیت تکتونیکی اخیر یا رویدادهای گسیختگی سطحی مرتبط است. جهت شیب غالب به سمت حدود جنوب، بینش‌هایی درباره کنترل‌های ساختاری بر توپوگرافی و الگوهای بالقوه گسیختگی سطحی ارائه می‌دهد. ترکیب تکنیک‌های پیشرفته ژئوسپیشیال(مکانی-فضایی) با تحلیل ژئومورفولوژیکی، رویکردی نوآورانه برای مطالعه مناطق فعال تکتونیکی ارائه می‌دهد که کاربردهای بالقوه‌ای در محیط‌های مشابه در سراسر جهان دارد. لذا با عنایت به درک صحیح از ژئومورفولوژی و چارچوب های روش شناختی پیشنهاد می شود که با رویکردهای پژوهشی نوین گامی در جهت شناخت سیستمی، برنامه ریزی منطقه ای، کاهش خطر و مدیریت منابع آب در این منطقه پیچیده زمین‌شناختی و حساس زیست‌محیطی برداشته شود.

واژگان کلیدی: تئوری گسیختگی سطحی، تحلیل ژئومورفولوژیک، ژئواسپیشیال، منطقه کپه داغ.

---

* نویسنده مسئول: E-mail: emoghimi@ut.ac.ir

مقدمه

موقعیت فلات ایران در بین صفحات عربی، آفریقا و اوراسیا باعث شده حرکات این صفحات تاثیرات زیادی بر پوسته قاره ای فلات گذاشته و در نتیجه محیط ایران را تبدیل به یک محیط نا آرام و مخاطره برانگیز به لحاظ تکتونیکی نماید (گورابی و کیا رستمی، ۱۳۹۹). منطقه کپه‌داغ مرکزی و شرقی به‌عنوان یکی از نواحی فعال تکتونیکی در شمال شرق ایران، به دلیل ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی پیچیده و پتانسیل بالای گسیختگی سطحی، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. این منطقه در طول میلیون‌ها سال تحت تأثیر فرآیندهای زمین‌شناختی مختلف از جمله فعالیت‌های تکتونیکی، فرسایش و رسوب‌گذاری قرار گرفته است که منجر به شکل‌گیری چشم‌انداز آن شده است (بربنک و اندرسون[۱]، ۲۰۰۱؛کلر و پینتر[۲]، ۲۰۰۲) پژوهش‌های پیشین در این حوزه، چه در ادبیات فارسی و چه در منابع انگلیسی، بر اهمیت تحلیل مدل‌های رقومی ارتفاع (DEM) در شناخت ویژگی‌های توپوگرافی و ارتباط آن‌ها با فرآیندهای تکتونیکی و هیدروژئومورفولوژیکی تأکید کرده‌اند. به عنوان مثال، مطالعات انجام‌شده توسط زارع و همکاران (۱۳۹۵) در زمینه تحلیل گسل‌های فعال در کپه‌داغ نشان داده است که گسیختگی سطحی در این منطقه با الگوهای توپوگرافی و شیب ارتباط تنگاتنگی دارد. همچنین، پژوهش‌های بین‌المللی (سوینی و همکاران[۳]، ۲۰۱۸) بر استفاده از روش‌های ژئومورفومتریک مبتنی بر DEM برای شناسایی گسل‌ها و تحلیل پایداری شیب‌ها در مناطق تکتونیکی فعال متمرکز بوده است.

با این حال، علی‌رغم پیشرفت‌های صورت‌گرفته در این زمینه، شکاف‌هایی در ادبیات پژوهشی وجود دارد. در منابع پارسی، تمرکز بیشتر بر توصیف کیفی ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی بوده و کمتر به تحلیل‌های کمی مبتنی بر داده‌های رقومی پرداخته شده است (مانند پژوهش حسینی و همکاران، ۱۳۹۸). در مقابل، مطالعات انگلیسی‌زبان اغلب به ارائه روش‌های پیشرفته محاسباتی پرداخته‌اند، اما کاربرد این روش‌ها در مناطق خاص مانند کپه‌داغ کمتر مورد بررسی قرار گرفته است(جکسون و والکر[۴]، ۲۰۰۴). پژوهش حاضر با هدف پر کردن این شکاف‌ها، از یک رویکرد ترکیبی بهره می‌گیرد که شامل تحلیل‌های پیشرفته ژئومورفومتریک با استفاده از مدل‌های رقومی ارتفاع و الگوریتم‌های محاسباتی در پایتون است. این مطالعه نه‌تنها به شناسایی مناطق مستعد گسیختگی سطحی در کپه‌داغ مرکزی و شرقی می‌پردازد، بلکه درک عمیق‌تری از تعامل بین فرآیندهای تکتونیکی و هیدروژئومورفولوژیکی ارائه می‌دهد. بدین ترتیب، این پژوهش ضمن بهره‌گیری از ابزارهای نوین، به غنای ادبیات علمی در هر دو زبان پارسی و انگلیسی کمک می‌کند.

این منطقه تجربه زمین‌لرزه‌ها و گسیختگی‌های سطحی متعددی را داشته است که بر ژئومورفولوژی آن تأثیر گذاشته‌اند (سامرفیلد[۵]، ۱۹۹۱؛ شوم و لیختی[۶]، ۱۹۶۵) درک فرآیندهای ژئومورفولوژیکی در این منطقه برای ارزیابی خطر زلزله، مدیریت منابع آب و کاهش اثرات مخاطرات طبیعی ضروری است.

تاریخ زمین‌شناسی منطقه، که با رسوب‌گذاری مداوم از دوره ژوراسیک تا میوسن و سپس چین‌خوردگی و بالاآمدگی مشخص شده، منجر به شکل‌گیری چشم‌اندازی شده که عمدتاً از مناطق کوهستانی (۶۰٪)، تپه‌ماهورها (۲۵٪)، دشت‌سرها (۱۰٪) و دشت‌ها (۵٪) تشکیل شده است.

---

[۱] Burbank & Anderson

[۲] Keller & Pinter

[۳] Sweeney et al

[۴] Jackson & Walker

[۵] Summerfield

[۶] Schumm & Lichty

مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEMs) به ابزارهای ضروری در تحلیل ژئومورفومتری تبدیل شده‌اند که داده‌های توپوگرافی با وضوح بالا را برای بررسی دقیق ویژگی‌های چشم‌انداز فراهم می‌کنند. در این مطالعه، ما از یک DEM منطقه کپه داغ برای استخراج و تحلیل پارامترهای کلیدی ژئومورفومتری، از جمله ارتفاع، شیب و جهت شیب استفاده می‌کنیم که برای درک پتانسیل گسیختگی سطحی و فرآیندهای هیدروژئومورفولوژیکی حیاتی هستند.

گسیختگی سطحی، که نمودی از گسل‌خوردگی فعال است، در مناطق فعال تکتونیکی مانند کپه داغ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همچنین در این خصوص می توان گفت: الگوی نقشه هم مبنا حوضه ها نیز نشان دهنده تاثیر تکتونیک و تغییرات سریع توپوگرافی منطبق بر خطوط گسلی است (جعفر بگلو و همکاران، ۱۳۹۸). تحلیل شیب و جهت شیب مشتق شده از DEMs می‌تواند الگوهای کنترل ساختاری بر توپوگرافی را آشکار کند که احتمالاً مناطق ضعیف مستعد گسیختگی در طول رویدادهای زلزله را نشان می‌دهد. علاوه بر این، این پارامترها نقش مهمی در تأثیرگذاری بر فرآیندهای هیدروژئومورفولوژیکی مانند الگوهای رواناب، نرخ‌های فرسایش و انتقال رسوب ایفا می‌کنند. در مطالعه ژئومورفولوژی، درک فرآیندهای مرتبط با گسیختگی‌ها بسیار مهم است (چورلی و همکاران[۷]، ۱۹۸۴) ، نواحی گسیختگی با فعالیت‌های زمین‌شناختی قابل توجه مشخص می‌شوند که بر تکامل چشم‌انداز از طریق مکانیزم‌هایی مانند گسل‌گذاری، فعالیت آتشفشانی و رسوب‌گذاری تأثیر می‌گذارد. این فرآیندها منجر به شکل‌های زمین متمایز می‌شوند و می‌توانند به طور قابل توجهی الگوهای زهکشی و دینامیک اکوسیستم را تغییر دهند. نویسندگان تأکید می‌کنند که تعامل بین نیروهای تکتونیکی و فرآیندهای سطحی برای درک ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی نواحی گسیختگی حیاتی است.

اقلیم نیمه‌خشک منطقه کپه داغ، که با دماهای بالا و بارندگی کم مشخص می‌شود، لایه دیگری از پیچیدگی به فرآیندهای ژئومورفولوژیکی در حال وقوع می‌افزاید. با میانگین بارندگی سالانه ۳۷۲ میلی‌متر و میانگین دمای ۲۷,۰۷ درجه سانتیگراد، این منطقه رویدادهای بارشی نادر اما بالقوه شدیدی را تجربه می‌کند که می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر فرآیندهای سطحی و منابع آب داشته باشد.

این مطالعه از تکنیک‌های پیشرفته ژئوسپیشیال[۸] (مکانی- فضایی) و تحلیل‌های آماری برای استخراج اطلاعات معنادار از داده‌های DEM[۹] استفاده می‌کند. تنوع زمینی توسط معیارهای مختلفی همچون کانی، فسیل، خاک، اقلیم، چشم اندازها و فرآیند های موثر در تشکیل آن ها، قابل ارزیابی است (توسلی و همکاران، ۱۴۰۲). با بررسی توزیع و ویژگی‌های شیب و جهت شیب در سراسر چشم‌انداز، ما به دنبال شناسایی مناطق بالقوه گسیختگی سطحی و ارزیابی پیامدهای آن برای تکتونیک منطقه‌ای و خطر زلزله هستیم. علاوه بر این، ما بررسی می‌کنیم که چگونه این ویژگی‌های توپوگرافی بر فرآیندهای هیدروژئومورفولوژیکی با تأکید ویژه بر ارتباط آنها با مدیریت منابع آب در این محیط نیمه‌خشک تأثیر می‌گذارند. هدف این مطالعه انجام یک تحلیل ژئومورفولوژیکی از منطقه کپه داغ با استفاده از نظریه گسیختگی برای درک پتانسیل گسیختگی سطحی و فرآیندهای هیدروژئومورفولوژیکی است.

ادغام تحلیل ژئومورفومتری با داده‌های زمین‌شناسی و اقلیم‌شناسی، رویکردی جامع برای درک تعامل پیچیده بین فرآیندهای تکتونیکی، اقلیمی و سطحی در شکل‌دهی چشم‌انداز کپه داغ فراهم می‌کند. این پژوهش نه[۱۰] تنها به درک اساسی ژئومورفولوژی منطقه کمک می‌کند، بلکه پیامدهای عملی برای ارزیابی خطر، برنامه‌ریزی کاربری اراضی و مدیریت منابع آب دارد. این مطالعه از ترکیبی از سنجش از دور، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، و تکنیک‌های تحلیل فضایی

---

[۷] Chorley et al.

[۸] Geospatial

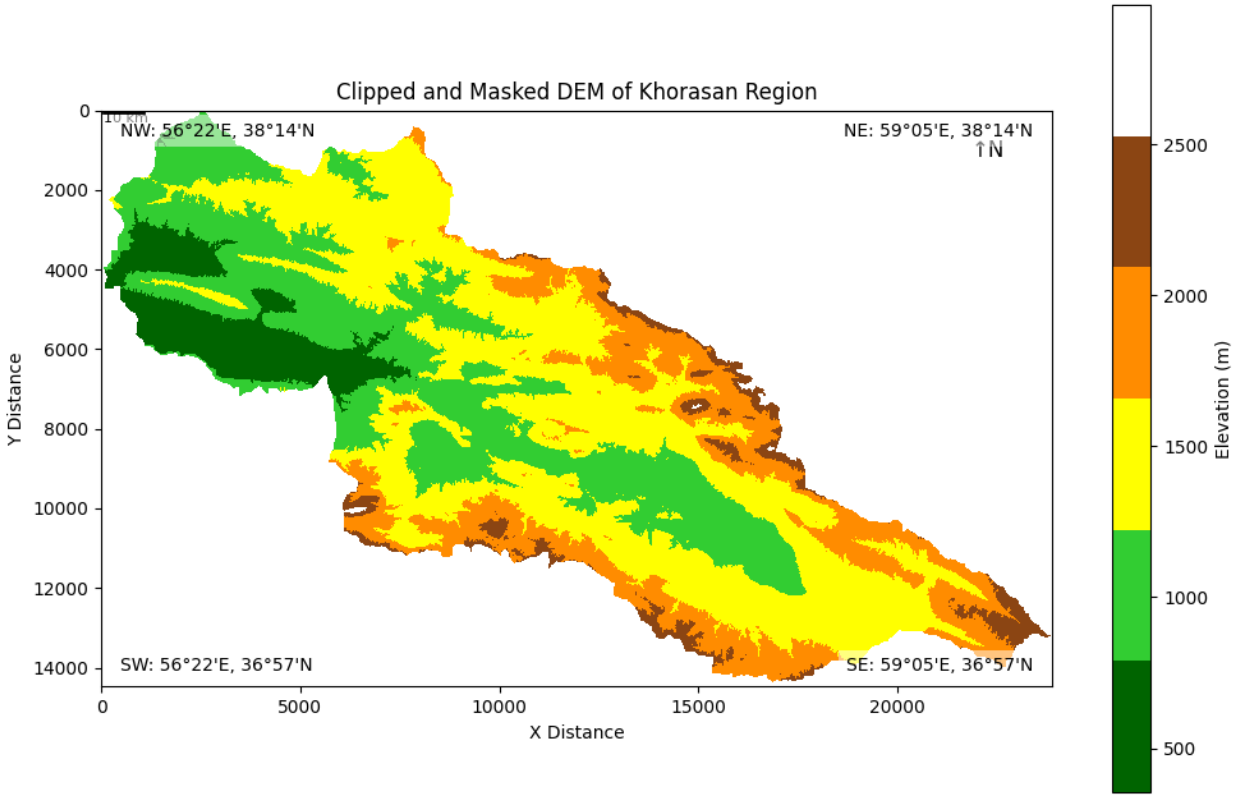
[۹] Digital Elevation Model

(ESRI, 2022; GDAL, 2022; Python Documentation, 2022) برای بررسی مدل رقومی ارتفاع (DEM) و داده‌های مشتق‌شده شیب و جهت شیب استفاده می‌کند. روش‌شناسی پژوهش شامل جمع‌آوری داده‌ها، پیش‌پردازش و تحلیل داده‌های DEM، و محاسبه آماره‌های شیب و جهت شیب است تا ویژگی‌های ژئومورفولوژیک منطقه کپه‌داغ مرکزی و شرقی و پتانسیل گسیختگی سطحی آن به‌طور جامع ارزیابی شود.

منطقه موردمطالعه

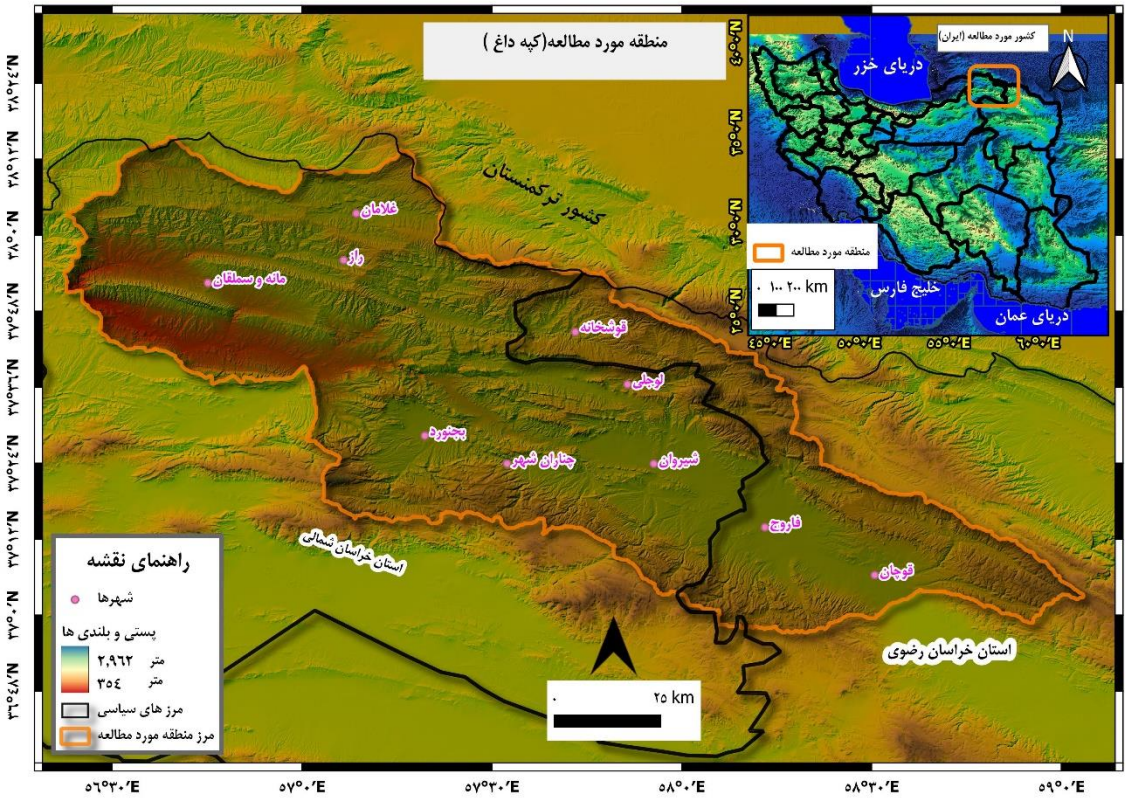
منطقه مورد مطالعه این پژوهش، بخش مرکزی و شرقی کپه‌داغ در شمال شرق ایران است که مساحتی بالغ بر ۱۴،۱۹۵,۲۴۴۲ کیلومتر مربع را در بر می‌گیرد. این منطقه با دامنه ارتفاعی ۳۵۴ تا ۲،۹۶۲ متر بالاتر از سطح دریا، بین مختصات جغرافیایی ۵۶ درجه و ۲۲ دقیقه و ۳۰ ثانیه تا ۵۹ درجه و ۳ دقیقه و ۳۰ ثانیه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۵۷ دقیقه و ۱۳,۷۳ ثانیه تا ۳۸ درجه و ۱۵ دقیقه و ۳۰ ثانیه عرض شمالی واقع شده و بخشی از کوهستان کپه‌داغ را شامل می‌شود که به دلیل فعالیت تکتونیکی مداوم و تنوع توپوگرافی، از اهمیت ژئومورفولوژیکی بالایی برخوردار است (شکل ۱). این منطقه که عمدتاً با ترکمنستان هم‌مرز است، دارای ترکیب ژئومورفولوژیکی متشکل از ۶۰٪ کوهستان، ۲۵٪ تپه، ۱۰٪ پدیمنت، و ۵٪ دشت است، که نشان‌دهنده غلبهٔ ویژگی‌های کوهستانی بر چشم‌انداز آن می‌باشد. ژئومورفولوژی مناطق کوهستانی مانند کپه‌داغ به‌طور ذاتی با ساختار زمین‌شناسی زیرین، فرآیندهای تکتونیکی، و نوع سنگ‌ها پیوند خورده است که نقش اساسی در شکل‌گیری این چشم‌انداز ایفا می‌کنند. تحلیل نقشه ژئومورفولوژیکی منطقه حاکی از آن است که سلامت پوشش گیاهی (NDVI) در این محیط نیمه‌خشک بیشتر تحت تأثیر دما قرار دارد تا بارندگی، که این امر بر فرآیندهای سطحی و پایداری چشم‌انداز اثرگذار است.

شکل ۱، نقشه موقعیت ریاضی منطقه را همراه با وضعیت توپوگرافی آن ارائه می‌دهد و محدوده مورد مطالعه را در زمینه توپوگرافی کلی منطقه و نسبت به ساختارهای زمین‌شناسی اطراف مشخص می‌کند. این اطلاعات، بنیانی برای تحلیل‌های ژئومورفومتریک و بررسی پتانسیل گسیختگی سطحی در ادامه مقاله فراهم می‌آورد.



شکل شماره (۱): وضعیت توپوگرافی کپه داغ مرکزی و شرقی

همچنین، شـکل ۲ موقعیت جغرافیایی منطقه (به‌صـورت نسـبی و ریاضـی) را در نماهایی کلی و جزئی نمایش می‌دهد و درک بهتری از جایگاه منطقه در مقیاس‌های مختلف ارائه می‌کند.



شکل شماره (۲): موقعیت نسبی و ریاضی کپه داغ مرکزی و شرقی

مبانی نظری

ژئومورفولوژی مطالعه ویژگی‌های فیزیکی زمین و شکل‌های زمین و چگونگی شکل‌گیری آنها توسط فرآیندهای زمین‌شناختی است. این زمینه به طور گسترده در متون مختلف از جمله "ژئومورفولوژی" توسط (چورلی و همکاران، ۱۹۸۴) مطالعه و مستند شده است.. نظریه گسیختگی در ژئومورفولوژی، شامل مطالعه گسیختگی‌های سطحی ناشی از فعالیت‌های تکتونیکی است(بول[۱۱]، ۲۰۰۷) . این نظریه برای درک تعامل پویا بین نیروهای تکتونیکی و فرآیندهای سطحی ضروری است.

این مطالعه با هدف روشن کردن روابط بین ویژگی‌های توپوگرافی، ساختارهای زمین‌شناسی و فرآیندهای سطحی در این منطقه فعال تکتونیکی است.

منطقه کپه داغ بخشی از مرز بین صفحات اوراسیا و عربستان است که با فعالیت تکتونیکی قابل توجه مشخص می‌شود. این منطقه تجربه زمین‌لرزه‌ها و گسیختگی‌های سطحی متعدد را داشته است که بر ژئومورفولوژی آن تأثیر گذاشته‌اند. تنظیم تکتونیکی این منطقه لیتولوژی متنوعی را شامل می‌شود که شامل سنگ‌های رسوبی، آتشفشانی و دگرگونی است(هارتمن و کوینلان[۱۲]، ۱۹۹۵؛ تورکوت و شوبرت[۱۳]، ۲۰۰۲). مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEMs) به ابزارهای ضروری در تحلیل ژئومورفومتری تبدیل شده‌اند که داده‌های توپوگرافی با وضوح بالا را برای بررسی دقیق ویژگی‌های چشم‌انداز

---

[۱۱] Bull

[۱۲] Hartmann & Quinlan

[۱۳] Turcotte & Schubert

فراهم می‌کنند. در این مطالعه، ما از یک DEM منطقه کپه داغ برای استخراج و تحلیل پارامترهای کلیدی ژئومورفومتری، از جمله ارتفاع، شیب و جهت شیب استفاده می‌کنیم که برای درک پتانسیل گسیختگی سطحی و فرآیندهای هیدروژئومورفولوژیکی حیاتی هستند (تارولی[۱۴]، ۲۰۱۴).

تحلیل شیب و جهت شیب مشتق شده از DEMS می‌تواند الگوهای کنترل ساختاری بر توپوگرافی را آشکار کند که احتمالاً مناطق ضعیف مستعد گسیختگی در طول رویدادهای زلزله را نشان می‌دهد. ویژگی‌های شیب نقش اساسی در تعیین پایداری دامنه‌ها و پتانسیل حرکات توده‌ای دارند که اغلب با رویدادهای گسیختگی سطحی مرتبط هستند (رایشنباخ و همکاران[۱۵]، ۲۰۱۸). علاوه بر این، جهت شیب بر میکرواقلیم‌های محلی تأثیر می‌گذارد و فرآیندهای هوازدگی و الگوهای پوشش گیاهی را تحت تأثیر قرار می‌دهد که به نوبه خود می‌تواند بر پایداری سطح و پویایی‌های هیدروژئومورفولوژیکی تأثیر بگذارد(پور قاسمی[۱۶] و همکاران، ۲۰۲۰).
گسیختگی سطحی، که نمودی از گسل‌خوردگی فعال است، در مناطق فعال تکتونیکی مانند کپه داغ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. توزیع فضایی زوایا و جهت‌های شیب می‌تواند بینش‌های ارزشمندی درباره ساختارهای زمین‌شناسی زیرین و پتانسیل آنها برای ایجاد گسیختگی‌های سطحی در طول رویدادهای زلزله ارائه دهد. مناطقی با تغییرات ناگهانی در شیب یا جهت شیب ممکن است نشان‌دهنده وجود پرتگاه‌های گسلی یا سایر ویژگی‌های تکتونیکی باشد که می‌توانند مستعد رویدادهای گسیختگی سطحی آینده باشند (بایز و همکاران، ۲۰۱۹).
اقلیم نیمه‌خشک منطقه کپه داغ لایه دیگری از پیچیدگی به فرآیندهای ژئومورفولوژیکی در حال وقوع می‌افزاید. با رویدادهای بارشی نادر اما بالقوه شدید، این منطقه مستعد سیلاب‌های ناگهانی و فرسایش سریع است که می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر فرآیندهای سطحی و منابع آب داشته باشد. تعامل بین این شرایط اقلیمی و توپوگرافی منطقه نقش مهمی در شکل‌دهی چشم‌انداز و تأثیرگذاری بر پتانسیل گسیختگی سطحی ایفا می‌کند (مکرم و ساتیامورثی[۱۷]، ۲۰۱۸).

فرآیندهای هیدروژئومورفولوژیکی در منطقه کپه داغ ارتباط تنگاتنگی با ویژگی‌های توپوگرافی مشتق شده از تحلیل DEM دارند. شیب و جهت شیب بر الگوهای رواناب، نرخ‌های نفوذ و جریان آب زیرزمینی تأثیر می‌گذارند که عوامل مهمی در درک منابع آب منطقه و خطرات بالقوه مرتبط با رویدادهای گسیختگی سطحی هستند. تغییرپذیری فضایی این پارامترها می‌تواند به شناسایی مناطقی با پتانسیل فرسایش بیشتر، انتقال رسوب و رسوب‌گذاری کمک کند که همه این موارد پیامدهایی برای حساسیت به گسیختگی سطحی و مدیریت منابع آب دارند (کانوسنتی و همکاران[۱۸]، ۲۰۱۶). فرآیندهای هیدروژئومورفولوژیکی، از جمله رواناب، فرسایش و حمل رسوب، نقش حیاتی در شکل‌گیری چشم‌انداز منطقه کپه داغ دارند. این فرآیندها تحت تأثیر توپوگرافی، لیتولوژی و تنظیم تکتونیکی منطقه قرار دارند (لئوپولد و همکاران[۱۹]، ۱۹۶۴؛ استراهلر[۲۰]، ۱۹۶۴) درک این فرآیندها برای مدیریت منابع آب و کاهش اثرات مخاطرات طبیعی ضروری است. ادغام تحلیل ژئومورفومتری با داده‌های زمین‌شناسی و اقلیم‌شناسی رویکردی جامع برای درک تعامل پیچیده بین فرآیندهای تکتونیکی،

[۱۴] Tarolli

[۱۵] Reichenbach et al.

[۱۶] Pourqasmi et al.

[۱۷] Mokarram & Sathyamoorthy

[۱۸] Conoscenti et al.

[۱۹] Leopold et al.

[۲۰] Strahler

اقلیمی و سطحی در شکل‌دهی چشم‌انداز کپه داغ فراهم می‌کند. این رویکرد چندرشته‌ای امکان ارزیابی جامع‌تری از پتانسیل گسیختگی سطحی و پیامدهای آن برای فرآیندهای هیدروژئومورفولوژیکی در منطقه را فراهم می‌کند (علیپور و همکاران[۲۱]، ۲۰۱۱).

پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های سنجش از دور و تکنیک‌های تحلیل ژئوسپیشیال (مکانی–فضایی) توانایی ما را برای مطالعه و کمی‌سازی پارامترهای ژئومورفومتری در مقیاس‌های فضایی مختلف به طور قابل توجهی افزایش داده است. استفاده از DEMهای با وضوح بالا، همراه با روش‌های پیشرفته تحلیل آماری و فضایی، امکان ارزیابی دقیق‌تر و جزئی‌تر ویژگی‌های مورفولوژیکی چشم‌انداز و ارتباط آنها با پتانسیل گسیختگی سطحی و فرآیندهای هیدروژئومورفولوژیکی را فراهم می‌کند (سوفیا و همکاران[۲۲]، ۲۰۱۶).
در نتیجه، تحلیل ژئومورفومتری منطقه کپه داغ، با تمرکز بر استخراج و تفسیر شیب و جهت شیب از DEMها، پایه محکمی برای درک تعاملات پیچیده بین توپوگرافی، تکتونیک و فرآیندهای سطحی فراهم می‌کند. این پژوهش نه تنها به درک اساسی ژئومورفولوژی منطقه کمک می‌کند، بلکه پیامدهای عملی برای ارزیابی خطر، برنامه‌ریزی کاربری اراضی و مدیریت منابع آب در این محیط فعال تکتونیکی و نیمه‌خشک دارد.

روش تحقیق

بخش روش‌شناسی این پژوهش با هدف ارائه یک رویکرد جامع برای تحلیل ژئومورفولوژیک منطقه کپه‌داغ مرکزی و شرقی طراحی شده است. در این مطالعه، از مدل‌های رقومی ارتفاع (DEMs) با رزولوشن‌های مختلف (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ متر) به‌عنوان منبع اصلی داده استفاده شد که از پایگاه داده‌های سنجش از دور استخراج شده‌اند. این داده‌ها به دلیل دقت بالا و توانایی‌شان در نمایش جزئیات توپوگرافی، برای انجام تحلیل‌های ژئومورفومتریک انتخاب شدند. ابزارهای نرم‌افزاری مورد استفاده شامل پایتون (نسخه ۳,۹) به‌عنوان محیط برنامه‌نویسی اصلی، همراه با کتابخانه‌های تخصصی نظیر Rasterio برای پردازش داده‌های رستری، NumPy و SciPy برای محاسبات عددی، Matplotlib و Seaborn برای تجسم داده‌ها، و Libpysal برای تحلیل‌های فضایی می باشد. همچنین، محیط Google Colab به‌عنوان بستری برای اجرای کدها و مدیریت حجم بالای داده‌ها به کار گرفته شد، که امکان دسترسی به منابع محاسباتی ابری و اشتراک‌گذاری کدها را فراهم می کند.
فرآیند تحلیل در این پژوهش با استفاده از مدل‌های رقومی ارتفاع (DEMs) در چندین مرحله سازمان‌یافته انجام می شود که به‌طور خلاصه در شکل ۳ به‌صورت نمودار جریان ارائه می گردد. این فرآیند با آماده‌سازی داده‌ها آغاز می‌شود، که شامل بارگذاری DEMها با رزولوشن‌های مختلف (۱۰ تا ۱۰۰ متر)، کلیپ کردن آن‌ها به محدوده مورد مطالعه، و تصحیح اولیه داده‌ها برای حذف نویز است. در مرحله بعد، پارامترهای ژئومورفومتریک کلیدی نظیر شیب، جهت شیب، انحنا، شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)، و شاخص ناهمواری زمین (TRI) با استفاده از الگوریتم‌های محاسباتی نظیر روش‌های هورن و اوانز محاسبه می شوند. این محاسبات با بهره‌گیری از عملگر Sobel و تحلیل مشتقات فضایی انجام می گردد تا تغییرات دقیق توپوگرافی شناسایی شود. سپس، برای ارزیابی پتانسیل گسیختگی سطحی، داده‌های ترکیبی از پارامترهای محاسبه‌شده با الگوریتم‌های تشخیص لبه[۲۳] و عملیات مورفولوژیکی پردازش گردید. شکل ۳ این مراحل را به‌صورت بصری

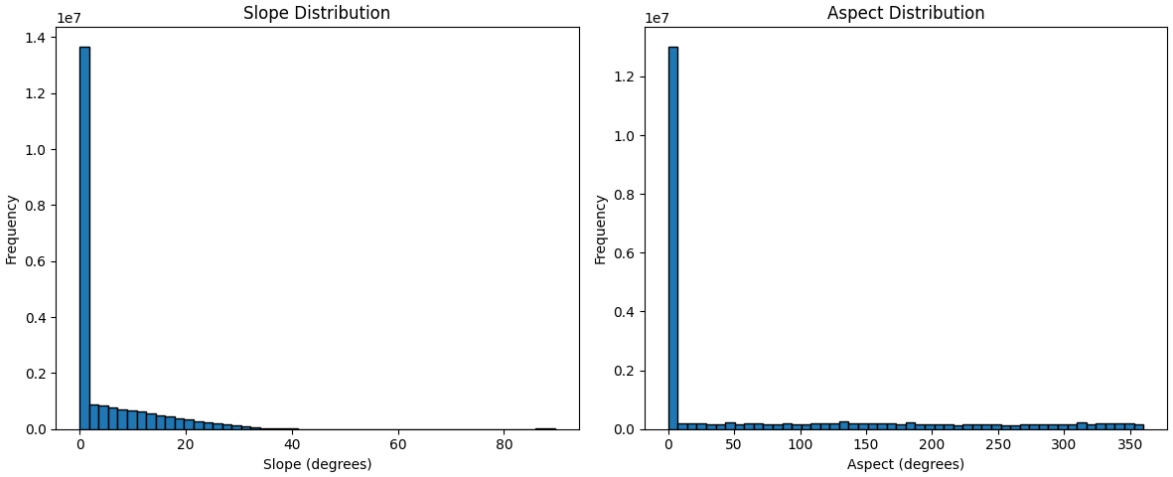
---

[۲۱] Alipoor et al.

[۲۲] Sofia et al.

[۲۳] Canny

نمایش می‌دهد و نشان‌دهنده ترتیب منطقی فرآیندها، از آماده‌سازی داده‌ها تا تولید خروجی‌های نهایی به‌صورت نقشه‌های ژئوتیف و تجسم داده‌هاست. این ساختار، امکان تحلیل جامع ویژگی‌های ژئومورفولوژیک منطقه کپه‌داغ مرکزی و شرقی را فراهم کرد و پایه‌ای برای بررسی ارتباط آن‌ها با گسیختگی سطحی و فرآیندهای هیدروژئومورفولوژیکی ایجاد نمود.



شکل شماره ۳: نمودار جریان مراحل تحلیلDEM ، شامل آماده‌سازی داده‌ها، محاسبه پارامترهای ژئومورفومتریک، و شناسایی پتانسیل گسیختگی سطحی

برای تحلیل آماری، داده‌ها در مقیاس‌های مختلف کوچک‌سازی[۲۴] شدند تا تأثیر رزولوشن بر نتایج بررسی می شود. تحلیل‌های آماری نظیر میانگین، انحراف معیار، چولگی[۲۵]، و کشیدگی[۲۶] برای شیب و جهت شیب محاسبه می شود و از آماره موران[۲۷] برای ارزیابی خودهمبستگی فضایی استفاده می گردد. به‌منظور اعتبارسنجی، روش اعتبارسنجی متقاطع[۲۸] (با ۵ دسته) اجرا می شود تا پایداری نتایج در زیرمجموعه‌های مختلف داده‌ها تأیید شود. در نهایت، نتایج به‌صورت نقشه‌های ژئوتیف[۲۹] ذخیره و با استفاده از ابزارهای تجسم داده، به‌صورت نمودارها و نقشه‌های موضوعی ارائه می شوند. این روش‌شناسی ترکیبی، امکان تحلیل جامع ویژگی‌های ژئومورفولوژیک و ارتباط آن‌ها با گسیختگی سطحی و فرآیندهای هیدروژئومورفولوژیکی را در منطقه کپه‌داغ فراهم می کند.

این مطالعه از تحلیل جامع ژئومورفومتری منطقه کپه داغ برای بررسی پتانسیل گسیختگی سطحی و فرآیندهای هیدروژئومورفولوژیکی استفاده می‌کند. روش تحقیق، تکنیک‌های پیشرفته ژئوسپیشیال(مکانی–فضایی)، تحلیل‌های آماری و برنامه‌نویسی مبتنی بر پایتون را برای استخراج و تفسیر اطلاعات توپوگرافی از مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEMs) با وضوح بالا ترکیب می‌کند.

داده ها:

در این مطالعه ژئومورفولوژیکی منطقه کپه داغ، مجموعه داده‌های زیر استفاده شده است:

۱. داده‌های لیتولوژیکی منطقه مورد مطالعه در کپه‌داغ مرکزی و شرقی: با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی دقیق[۳۰] و تحلیل‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) استخراج شده‌اند، که در شکل شماره ۴ (نقشه زمین شناسی

---

[۲۴] Downsampling

[۲۵] Skewness

[۲۶] Kurtosis

[۲۷] Moran's I

[۲۸] K-Fold

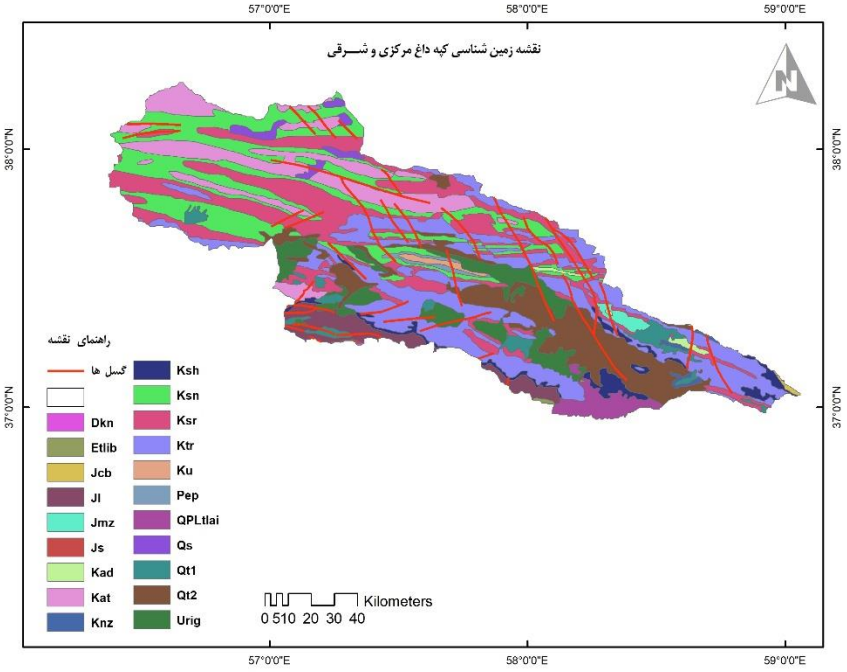
[۲۹] GeoTIFF

[۳۰] بر مبنای نقشه های یک صد هزارم زمین شناسی زون کپه داغ

کپه داغ) و جدول ویژگی‌های زمین‌شناسی مذکور (جدول شماره ۱) منعکس شده‌اند. این منطقه، واقع در شمال شرق ایران، دارای تنوع قابل‌توجهی از سنگ‌های رسوبی، آتشفشانی، و دگرگونی است که دوره‌های زمانی مختلف از مزوزوئیک (دوره کرتاسه زودهنگام) تا کواترنر (دوره چهارم) را پوشش می‌دهند. بر اساس تحلیل نقشه، ترکیب لیتولوژیکی غالب شامل موارد زیر است:

- سنگ‌های رسوبی :این سنگ‌ها، که تقریباً ۷۰٪ از مساحت منطقه را تشکیل می‌دهند، عمدتاً شامل آهک، ماسه‌سنگ، و شیل هستند. واحدهای آهکی(مانند سنگ آهک‌های کرتاسه) به‌ویژه در مناطق کوهستانی و مرتفع‌تر غالب‌اند و به دلیل مقاومت بالای آن‌ها، نقش مهمی در شکل‌گیری ساختارهای تکتونیکی و پایداری شیب‌ها ایفا می‌کنند. ماسه‌سنگ‌ها و شیل‌ها بیشتر در تپه‌ها و پدیمنت‌ها یافت می‌شوند و به فرسایش و زهکشی تأثیر می‌گذارند.
- سنگ‌های آتشفشانی :سنگ‌های بازالتی و آندزیتی به‌طور پراکنده در بخش‌های خاصی از منطقه، به‌ویژه در نواحی تکتونیکی فعال، مشاهده می‌شوند و نشان‌دهنده فعالیت‌های آتشفشانی قدیمی در دوره پلیوسن–چهارم هستند. این سنگ‌ها به دلیل سختی کمتر، به فرسایش سریع‌تر و شکل‌گیری ناهمواری‌های محلی کمک می‌کنند.
- سنگ‌های دگرگونی :واحدهای شیست و گنیس در مقیاس محدودتری وجود دارند و معمولاً در زون‌های تکتونیکی شدیداً تغییرشکل‌یافته دیده می‌شوند. این سنگ‌ها، به دلیل مقاومت بالا در برابر هوازدگی، در پایداری بلندمدت چشم‌انداز نقش دارند، اما در نواحی کوچک‌تر محدود هستند.

توزیع فضایی این واحدهای لیتولوژیکی در نقشه زمین‌شناسی، الگوهای مشخصی را نشان می‌دهد که با ساختارهای تکتونیکی کپه‌داغ هم‌راستاست. سنگ‌های آهکی و ماسه‌سنگی در امتداد گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها غالب‌اند (مانند واحدهای Ksr و Kat)، در حالی که سنگ‌های آتشفشانی و دگرگونی در نواحی خاص و پراکنده‌تر متمرکز شده‌اند. این الگوها، که با فرآیندهای تکتونیکی و فرسایشی منطقه مرتبط‌اند، تأثیر قابل‌توجهی بر تکامل ژئومورفولوژیکی و پتانسیل گسیختگی سطحی دارند. داده‌های لیتولوژیکی، همراه با تحلیل‌های ژئومورفومتریک ارائه‌شده در این مقاله، بنیانی برای درک تعامل بین ساختار زمین‌شناسی و فرآیندهای سطحی در منطقه کپه‌داغ فراهم می‌کنند.



شکل شماره ۴: نقشه زمین شناسی کپه داغ مرکزی و شرقی

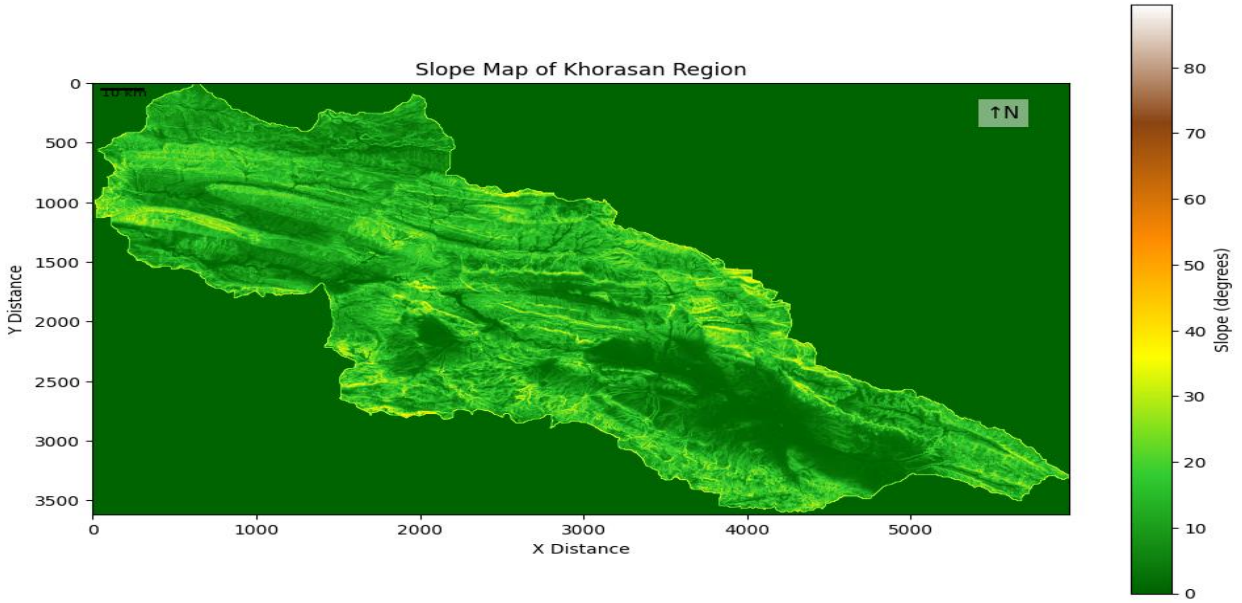
ردیف	نام اختصاری دوره زمین شناسی	معادل دوره به زبان فارسی	جنس سازند	نشانه
۱	Dkn	دوره‌های میوسن پلیوسن	رسوبات کنگلومرایی و ماسه‌سنگی نئوژن	فعالیت‌های رسوبی در دوره‌های میوسن پلیوسن
۲	Etlib	سنوزوئیک	سنگ‌های بازالتی و آندزیتی	فعالیت‌های آتشفشانی اولیه در دوره سنوزوئیک
۳	Jcb	مزوزوئیک	سنگ‌های آهکی و دولومیتی	رسوبات دریایی در دوره مزوزوئیک
٤	Jl	مزوزوئیک	شیل‌ها و ماسه‌سنگی‌های زوراسیک	رسوبات ساحلی و قاره‌ای در دوره مزوزوئیک
٥	Jmz	مزوزوئیک	مارن‌ها و آهک‌های زوراسیک	رسوبات انتقالی در دوره‌های مزوزوئیک
٦	Js	مزوزوئیک	شیل‌ها و ماسه‌سنگ	رسوبات قاره‌ای در دوره مزوزوئیک
۷	Kad	کرتاسه	آهک	رسوبات دریایی با مقاومت بالا در برابر هوازدگی
۸	Kat	کرتاسه	آهک‌ها و ماسه‌سنگی‌های	غالب در مناطق کوهستانی و تکتونیکی فعال
۹	Knz	مزوزوئیک	آهک‌ها و شیل‌های	رسوبات دریایی پایانی دوره مزوزوئیک
۱۰	Ksh	مزوزوئیک	شیل‌ها و ماسه‌سنگی‌های	رسوبات قاره‌ای دریایی در دوره مزوزوئیک
۱۱	Ksn	مزوزوئیک	ماسه‌سنگی‌ها و شیل‌های	رسوبات ساحلی در دوره مزوزوئیک
۱۲	Ksr	کرتاسه	آهک‌ها و شیل‌های	غالب در نواحی تکتونیکی با مقاومت بالا
۱۳	Ktr	کرتاسه	آهک‌ها و ماسه‌سنگی‌های	رسوبات دریایی در مناطق مرتفع
١٤	Ku	اولیگوسن	رسوبات آبرفتی و کنگلومرایی	فرآیندهای فرسایشی در دوره کنوزوئیک
۱٥	Pep	پلیوسن چهارم	رسوبات پدیمنت	رسوبات جوان در نواحی تپه‌ای
١٦	QPLtai	کواترنر	رسوبات دریاچه‌ای و آبرفتی چهارم	فرآیندهای هیدروژئومورفولوژیکی کنونی
۱۷	Qs	کواترنر	رسوبات آبرفتی چهارم	فعالیت‌های رسوبی اخیر در دشت‌ها و پدیمنت‌ها
۱۸	Qt1	کواترنر	رسوبات تراس‌های چهارم	فعالیت‌های رودخانه‌ای و فرسایشی در دوره‌های اخیر
۱۹	Qt2	کواترنر	رسوبات آبرفتی و تراس‌های چهارم	فرآیندهای هیدرولوژیکی کنونی در نواحی پایین‌دست
۲۰	Urig	پلیوسن	رسوبات کنگلومرایی و ماسه‌سنگی	مرتبط با فعالیت‌های تکتونیکی و فرسایشی در دوره کنوزوئیک

جدول شماره (۱): ویژگی های سازندهای زمین شناسی زون کپه داغ مرکزی و شرقی

۲. داده‌های شیب: داده‌های شیب از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) منطقه کپه داغ استخراج شده‌اند. DEM استفاده شده در این مطالعه دارای ویژگی‌های زیر است:

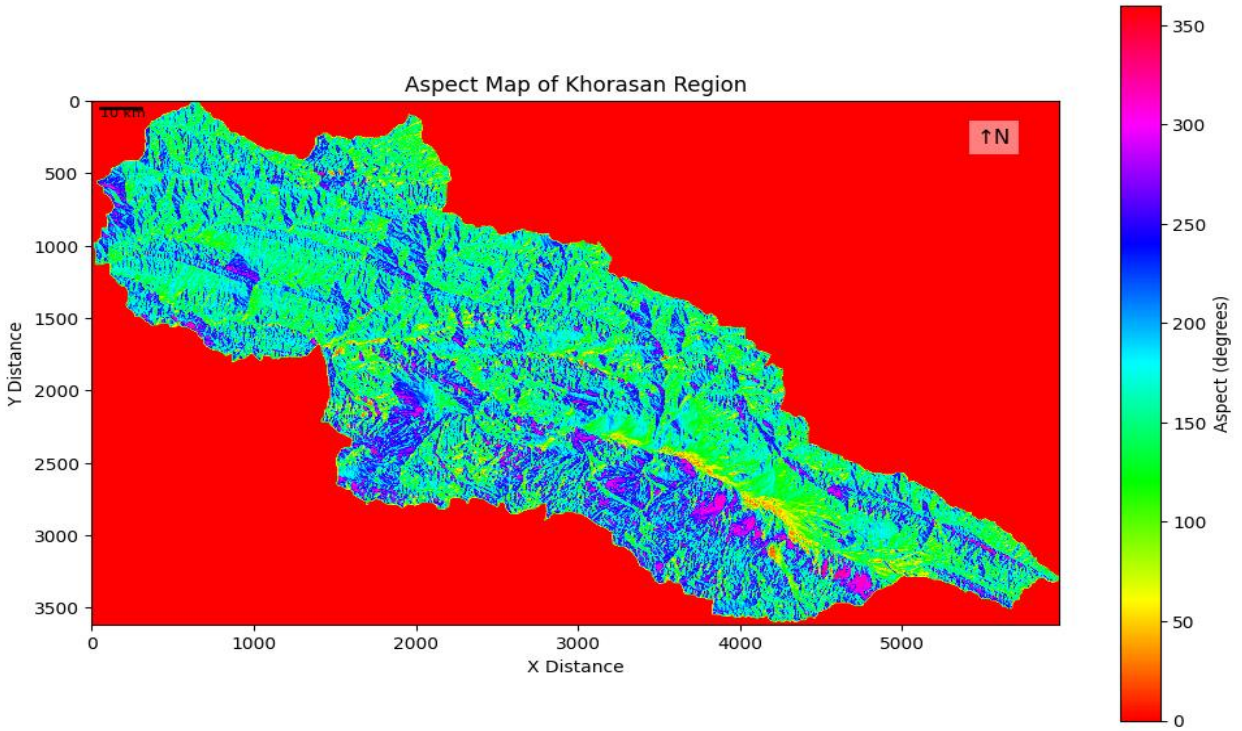
– وضوح: ۱۰ متر رادار و ۵ متر اپتیک؛

– محدوده ارتفاع: ۳۵۴ تا ۲۹۶۲ متر از سطح دریا؛
– میانگین ارتفاع: ۱۳۶۵٫۹۷ متر؛
– میانه ارتفاع: ۱۳۳۴٫۰۰ متر؛
– انحراف معیار: ۴۰۳٫۹۷ متر.
تحلیل شیب نشان داد:
– میانگین شیب: ۴٫۸۸ درجه ± ۰٫۰۱ درجه (SEM)
– حداکثر شیب: ۸۹٫۶۰ درجه؛
– توزیع شیب: عمدتاً شیب‌های ملایم تا متوسط با برخی مناطق شیب‌دار.
تحلیل جهت شیب نشان داد:
– میانگین جهت شیب: ۷۱٫۱۳ درجه ± ۰٫۰۳ درجه (SEM)؛
– توزیع جهت شیب: متنوع، با غلبه جزئی بر شیب‌های رو به شرق.
شکل ۵ نقشه شیب منطقه کپه‌داغ مرکزی و شرقی را نشان می‌دهد که با استفاده از مدل رقومی ارتفاع و الگوریتم‌های محاسباتی در محیط پایتون تهیه شده است. این نقشه، توزیع مکانی شیب‌ها را در بازه ۰ تا بیش از ۷۷ درجه به تصویر می‌کشد و نشان‌دهنده تنوع قابل‌توجه توپوگرافی منطقه است. مناطق با شیب‌های تند (بیش از ۴۵ درجه) به‌ویژه در بخش‌های مرکزی و مرتفع‌تر، می‌توانند نشان‌دهنده پتانسیل بالای گسیختگی سطحی یا فعالیت تکتونیکی اخیر باشند.



شکل ۵: نقشه شیب منطقه کپه داغ: نقشه شیب مشتق شده از DEM، نشان‌دهنده توزیع زوایای شیب در سراسر منطقه کپه داغ. این نقشه غلبه زمین‌های پرشیب را آشکار می‌کند که با ماهیت کوهستانی منطقه سازگار است.

همچنین شکل ۶، نقشه جهت شیب منطقه را ارائه می‌دهد که با استفاده از داده‌های DEM و محاسبات آماری مدور محاسبه شده است. این نقشه، الگوهای متنوع جهت‌گیری شیب‌ها را با میانگین جهت حدود ۱۸۵ درجه (تقریباً رو به جنوب) و انحراف زاویه‌ای بالا (بیش از ۱۰۳ درجه) نشان می‌دهد. این تنوع در جهت‌گیری، بیانگر پیچیدگی ساختاری و تأثیر فرآیندهای تکتونیکی بر شکل‌گیری چشم‌انداز منطقه است. این دو شکل، پایه‌ای برای تحلیل‌های بعدی در ارتباط با گسیختگی سطحی و فرآیندهای هیدروژئومورفولوژیکی فراهم می‌کنند.



شکل ۶: نقشه جهت شیب منطقه کپه داغ: نقشه جهت شیب نشان‌دهنده جهت رو به پایین شیب‌ها در منطقه کپه داغ. این نقشه بینش‌هایی درباره کنترل ساختاری بر توپوگرافی و پیامدهای بالقوه برای الگوهای گسیختگی سطحی ارائه می‌دهد.

۳. داده‌های هیدرولوژیک:

داده‌های هیدرولوژیک از نقشه‌های توپوگرافی، تصاویر سنجش از دور و مشاهدات میدانی به دست آمده‌اند. مجموعه داده شامل:

– شبکه رودخانه‌ای: رودخانه‌های اصلی و شاخه‌های آنها در منطقه کپه داغ؛

– الگوهای زهکشی: عمدتاً شاخه‌ای، با برخی مناطق نشان‌دهنده الگوهای مشبک؛

– حوضه‌های آبریز: بر اساس DEM ترسیم شده و از طریق مطالعات میدانی تأیید شده‌اند؛

– منابع آب فصلی: شامل جریان‌های متناوب و دریاچه‌های فصلی.

۴. داده‌های تکتونیک:

داده‌های حاصل از بررسی‌های زمین‌شناسی، مطالعات زلزله‌شناسی و تحلیل تصاویر ماهواره‌ای، گسل‌های اصلی و فرعی، محورهای چین‌خوردگی و داده‌های تاریخی و اخیر زمین‌لرزه‌ها را نشان می‌دهند. این داده‌ها برای درک تنظیم تکتونیکی و پتانسیل گسیختگی سطحی منطقه کپه داغ ضروری هستند(کالج ایالتی رودخانه هند[۳۱]، ۲۰۲۲؛ سازمان زمین شناسی آمریکا[۳۲]، ۲۰۲۲).

. مجموعه داده شامل:

– خطوط گسل: گسل‌های اصلی و فرعی که در سراسر منطقه نقشه‌برداری شده‌اند؛

[۳۱] Indian River State Collage (IRSC)

[۳۲] United States Geological Survey (USGS)

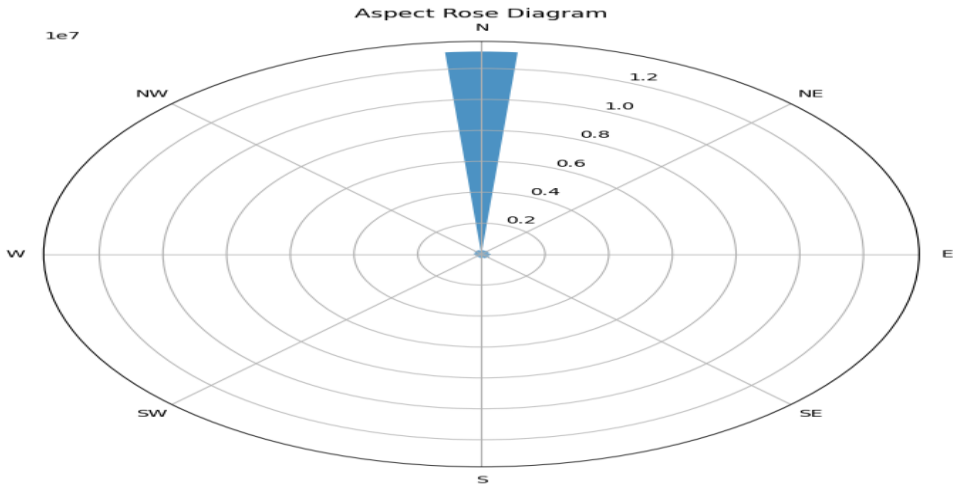
– محورها چین‌خوردگی: آنتی‌کلاین‌ها[۳۳] و سین‌کلاین‌هایی[۳۴] که از نقشه‌های زمین‌شناسی و مشاهدات میدانی شناسایی شده‌اند؛
– فعالیت زلزله‌ای: داده‌های تاریخی و اخیر زلزله، شامل بزرگی‌ها و عمق کانونی؛
– نرخ بالاآمدگی: برآورد شده از تاریخ‌گذاری نشانگرهای ژئومورفیک و تحلیل چینه‌شناسی؛
این مجموعه داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار GIS یکپارچه و تحلیل شدند تا ویژگی‌ها و تکامل ژئومورفولوژیکی منطقه کپه داغ را بررسی کنند. ترکیب داده‌های لیتولوژیک، شیب، هیدرولوژیک و تکتونیک اجازه داد تا ارزیابی جامعی از شکل‌گیری چشم‌انداز و فرآیندهای ژئومورفیک جاری انجام شود.

بحث و یافته ها

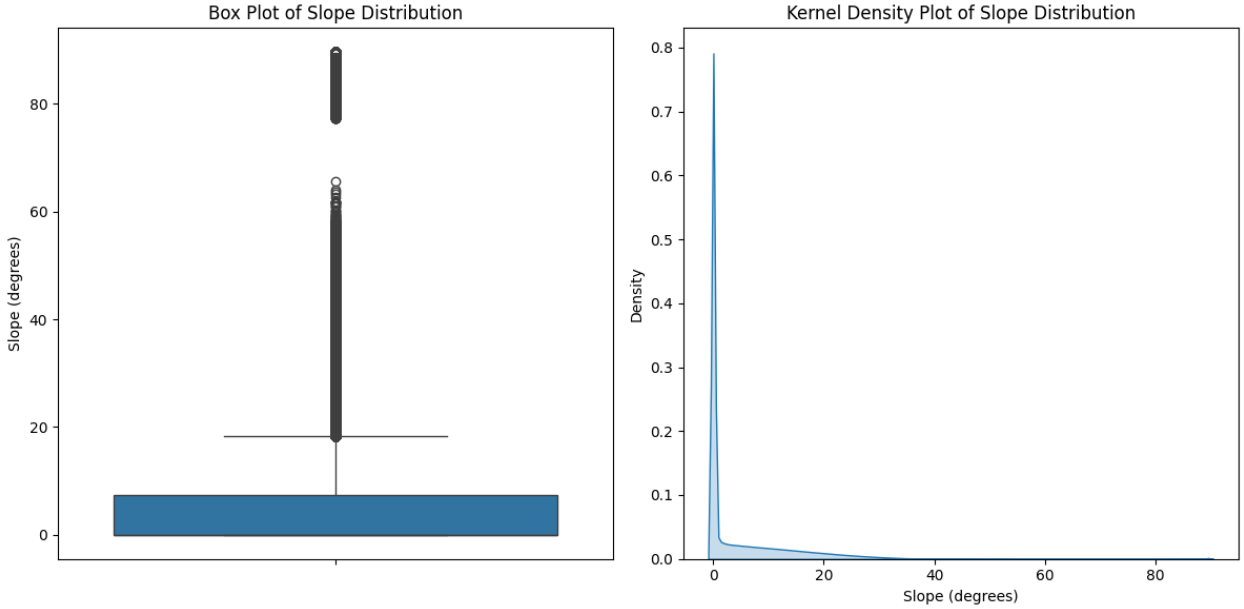
تحلیل‌های ژئومورفومتریک انجام‌شده در این پژوهش، ویژگی‌های توپوگرافی منطقه کپه‌داغ مرکزی و شرقی را با دقت آشکار کرد و نتایج ارزشمندی در ارتباط با پتانسیل گسیختگی سطحی و فرآیندهای هیدروژئومورفولوژیکی ارائه داد. هیستوگرام توزیع شیب (شکل ۵) دامنه وسیعی از مقادیر شیب را از ۰ تا بیش از ۷۷ درجه نشان می‌دهد، با میانگین ۱۳٫۵۵ درجه و انحراف معیار ۹٫۶۷ درجه. این تنوع، که با چولگی مثبت (۳٫۱۵) و کشیدگی بالا (۱۸٫۶۵) مشخص می‌شود، با یافته‌های دیتریش و دون[۳۵] (۱۹۷۸) هم‌خوانی دارد که شیب‌های تند را به‌عنوان شاخصی از پتانسیل فرسایش و ناپایداری در مناطق کوهستانی معرفی کرده‌اند. مناطق با شیب‌های بیش از ۴۵ درجه، به‌ویژه در بخش‌های مرتفع‌تر، می‌توانند نشان‌دهنده پتانسیل بالای گسیختگی سطحی باشند، که این امر با تحلیل‌های کلر و پینتر[۳۶] (۲۰۰۲) درباره ارتباط شیب و فعالیت تکتونیکی تأیید می‌شود. توزیع آماری شیب، که در شکل ۸ به‌صورت هیستوگرام ارائه شده، این تنوع را به‌طور بصری تأیید می‌کند و نشان‌دهنده غلبه شیب‌های متوسط با وجود نواحی محدود اما قابل‌توجه با شیب‌های بسیار تند است، که پتانسیل ناپایداری و گسیختگی را برجسته می‌سازد.
نقشه جهت شیب (شکل ۶) و نمودار رز جهت شیب (شکل ۷) الگوهای متنوع جهت‌گیری شیب‌ها را با میانگین جهت ۱۸۵٫۵۲ درجه (تقریباً رو به جنوب) و انحراف زاویه‌ای ۱۰۳٫۷۳ درجه به تصویر می‌کشند. این پراکندگی بالا، که با میانگین طول برآیند (R) برابر با ۰٫۵۹۵۳ پشتیبانی می‌شود، پیچیدگی ساختاری منطقه را نشان می‌دهد و با نتایج هاویوس و همکاران[۳۷] (۱۹۹۷) درباره تأثیر تکتونیک بر تنوع جهت‌گیری توپوگرافی هم‌سو است. نمودار توزیع آماری شیب (شکل ۸) الگوهای چندجهتی را نمایش می‌دهد که با تمرکز غالب به سمت جنوب، پیچیدگی تکتونیکی و تأثیرات ساختاری را تأیید می‌کند. جهت‌گیری‌های غالب رو به جنوب ممکن است به دلیل دریافت تابش خورشیدی بیشتر، نرخ فرسایش متفاوتی داشته باشند، که این موضوع در مطالعات هیدروژئومورفولوژیکی مانند کار فریدمن و هاپ[۳۸] (۲۰۱۹) نیز مورد توجه قرار گرفته است و بر الگوهای زهکشی و پوشش گیاهی تأثیر می‌گذارد.

---

[۳۳] anticlines
[۳۴] synclines
[۳۵] Dietrich & Dunne
[۳۶] Keller & Pinter
[۳۷] Hovius et al.
[۳۸] Friedman & Hupp

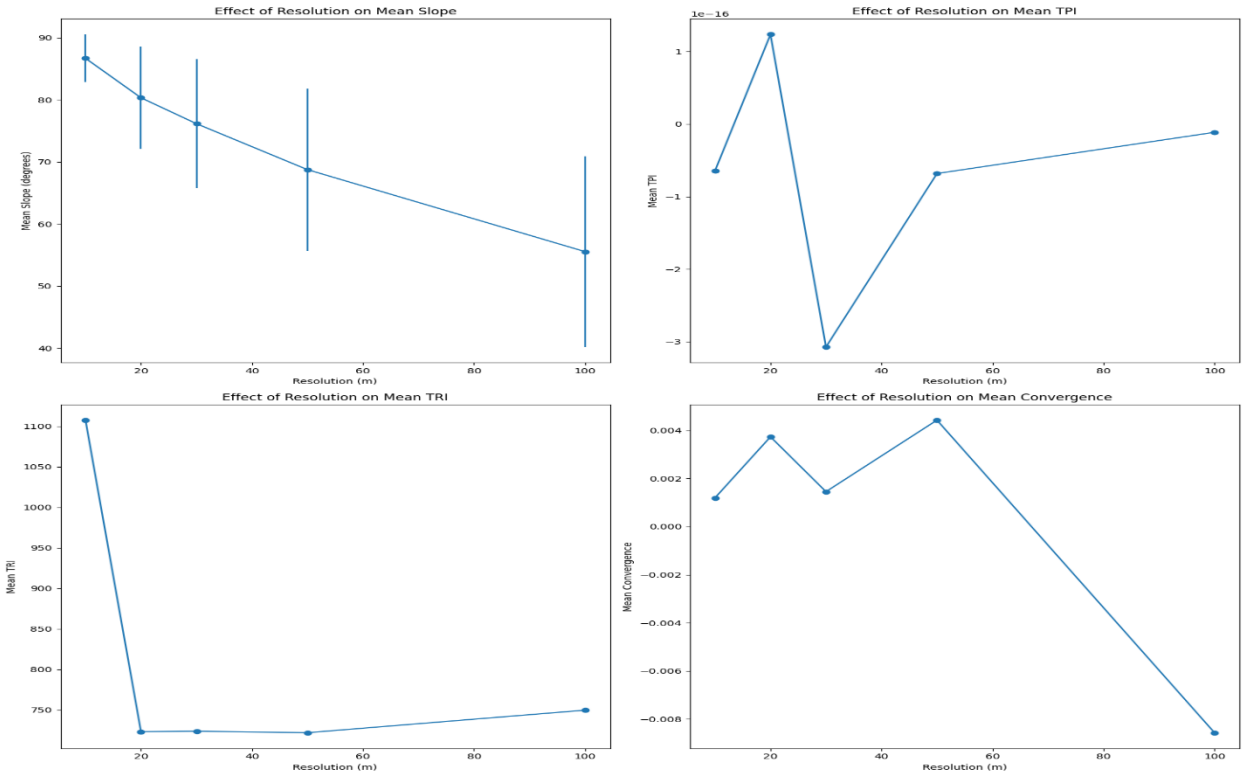


شکل ۷: نمودار گل‌سرخی جهت شیب منطقه کپه داغ :نمودار گل‌سرخی نشان‌دهنده توزیع جهت‌های شیب در منطقه کپه داغ. این نمودار فراوانی جهت‌گیری‌های شیب را نمایش می‌دهد، که هر میله نشان‌دهنده یک بازه ۱۰ درجه‌ای است. جهت‌های غالب شیب، بینش‌هایی درباره کنترل ساختاری بر توپوگرافی و پیامدهای بالقوه برای الگوهای گسیختگی سطحی و فرآیندهای هیدروژئومورفولوژیکی ارائه می‌دهد.

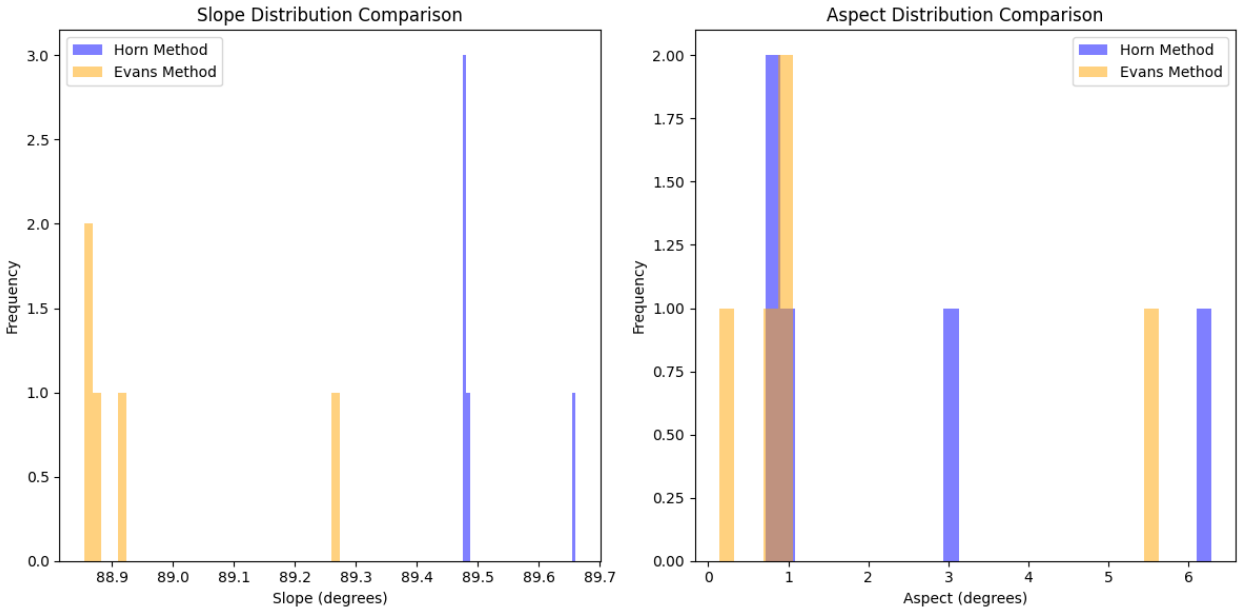


شکل ۸: توزیع آماری شیب در منطقه کپه داغ: نمودار جعبه‌ای (سمت چپ) و نمودار چگالی کرنل (سمت راست) نشان‌دهنده توزیع آماری زوایای شیب در منطقه کپه داغ. نمودار جعبه‌ای میانه، چارک‌ها و داده‌های پرت را نمایش می‌دهد، در حالی که نمودار چگالی کرنل چگالی احتمال مقادیر شیب را نشان می‌دهد. توزیع با چولگی مثبت (چولگی: ۳,۱۵) و کشیدگی بالا (کشیدگی: ۱۸,۶۵) نشان‌دهنده غلبه شیب‌های متوسط همراه با مناطق محدود دارای زمین پرشیب است، که پیامدهای مهمی برای پتانسیل گسیختگی سطحی و فرآیندهای هیدروژئومورفولوژیکی در منطقه دارد.

تحلیل حساسیت تفکیک‌پذیری پارامترهای ژئومورفومتری (شکل ۹)، که از تلفیق پارامترهای شیب، انحنا، و شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) به‌دست آمده، مناطقی با احتمال بالای گسیختگی را مشخص کرد. این رویکرد با روش‌های بول (۲۰۰۷) برای شناسایی نواحی تکتونیکی فعال از طریق ویژگی‌های ژئومورفولوژیک هم‌راستاست (بول، ۲۰۰۷). نقشه معیار ترکیبی (شکل ۱۰)، با میانگین مقدار ۰,۰۴۴۶ و حداکثر ۰,۹۳۶۴، تمرکز پتانسیل گسیختگی را در بخش‌های خاصی از منطقه نشان می‌دهد.



شکل ۹: تحلیل حساسیت تفکیک‌پذیری پارامترهای ژئومورفومتری در منطقه کپه داغ :این شکل تحلیل حساسیت پارامترهای کلیدی ژئومورفومتری را در تفکیک‌پذیری‌های مختلف مدل رقومی ارتفاعی (DEM) در منطقه کپه داغ نشان می‌دهد. چهار نمودار، اثرات تغییر تفکیک‌پذیری را بر (الف) شیب میانگین، (ب) شاخص موقعیت توپوگرافی میانگین (TPI)، (ج) شاخص ناهمواری زمین میانگین (TRI)، و (د) همگرایی میانگین نشان می‌دهند. (الف) شیب میانگین در برابر تفکیک‌پذیری: این نمودار روند کاهشی در شیب میانگین را با افزایش درشتی تفکیک‌پذیری نشان می‌دهد. میله‌های خطا نشان‌دهنده انحراف معیار شیب هستند که با تفکیک‌پذیری‌های درشت‌تر کاهش می‌یابند. این روند نشان می‌دهد که تفکیک‌پذیری‌های ریزتر جزئیات توپوگرافی بیشتری را ثبت می‌کنند و منجر به مقادیر شیب بالاتر و متغیرتر می‌شوند. (ب) TPI میانگین در برابر تفکیک‌پذیری: شاخص موقعیت توپوگرافی، که برجستگی محلی را اندازه‌گیری می‌کند، رابطه غیرخطی با تفکیک‌پذیری نشان می‌دهد. تغییرات TPI در تفکیک‌پذیری‌های مختلف نشان می‌دهد که درک موقعیت توپوگرافی محلی با مقیاس تحلیل تغییر می‌کند. (ج) TRI میانگین در برابر تفکیک‌پذیری: شاخص ناهمواری زمین با درشت‌تر شدن تفکیک‌پذیری کاهش می‌یابد. این روند نشان‌دهنده از دست رفتن اطلاعات ناهمواری زمین در مقیاس ریز در تفکیک‌پذیری‌های پایین‌تر است که می‌تواند بر ارزیابی‌های پیچیدگی سطح و پتانسیل فرسایش تأثیر بگذارد.(د) همگرایی میانگین در برابر تفکیک‌پذیری: همگرایی، که مرتبط با الگوهای تجمع جریان است، رابطه پیچیده‌ای با تفکیک‌پذیری نشان می‌دهد. تغییرات مشاهده شده نشان می‌دهد که الگوهای جریان و مناطق بالقوه فرسایش/رسوب‌گذاری ممکن است در مقیاس‌های مختلف به طور متفاوتی تفسیر شوند.



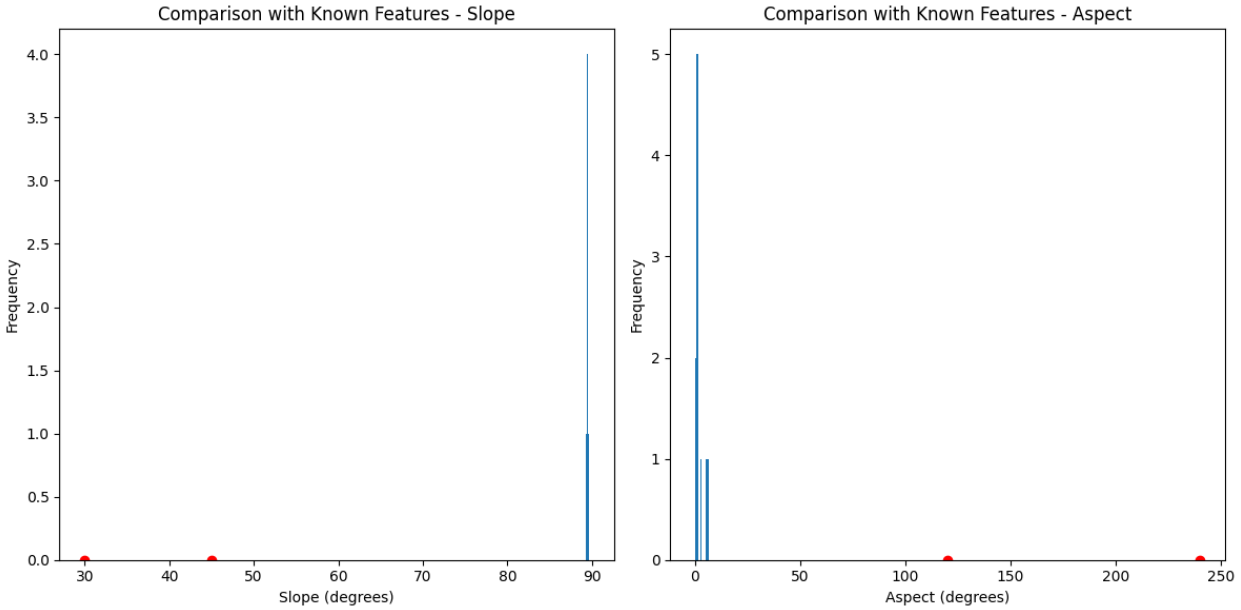
شکل ۱۰ (سمت چپ) مقایسه توزیع شیب را نشان می‌دهد. هیستوگرام آبی رنگ نشان‌دهنده مقادیر شیب محاسبه شده با روش هورن است، در حالی که هیستوگرام نارنجی مقادیر شیب به دست آمده از روش ایوانز را نشان می‌دهد. محور افقی شیب را بر حسب درجه نمایش می‌دهد و محور عمودی فراوانی وقوع را نشان می‌دهد. تفاوت در توزیع‌ها، حساسیت محاسبات شیب نسبت به روش انتخاب شده را برجسته می‌کند. (سمت راست) مقایسه توزیع جهت شیب را نشان می‌دهد. مشابه مقایسه شیب، هیستوگرام آبی نشان‌دهنده مقادیر جهت شیب محاسبه شده با روش هورن است، و هیستوگرام نارنجی مقادیر جهت شیب به دست آمده از روش ایوانز را نشان می‌دهد. محور افقی جهت شیب را بر حسب درجه (۰–۳۶۰ درجه) نمایش می‌دهد و محور عمودی فراوانی وقوع را نشان می‌دهد. این مقایسه تفاوت‌هایی را در محاسبات جهت شیب بین دو روش آشکار می‌کند که می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر تفسیرهای جهت‌گیری سطح و مسیرهای جریان بالقوه در منطقه کپه داغ داشته باشد.

هیستوگرام معیار ترکیبی (شکل ۱۰) این توزیع ناهمگن را تأیید می‌کند و حاکی از ارتباط نقاط با مقادیر بالا با خطوط گسلی است، که با تحلیل‌های کندی[۳۹] (۲۰۱۵) درباره استفاده از معیارهای ترکیبی برای شناسایی گسل‌ها سازگار است. این یافته‌ها فرضیه پژوهش مبنی بر پیوند نزدیک بین ویژگی‌های ژئومورفولوژیک و گسیختگی سطحی را تقویت می‌کنند. تحلیل جهت گسل‌ها از طریق نمودار رز (شکل ۱۴) الگوهای چندجهتی را نشان داد که می‌تواند نتیجه فازهای متعدد تغییر شکل تکتونیکی باشد، همان‌طور که هاگت[۴۰] (۲۰۱۷) در بررسی تکامل ژئومورفولوژیک مناطق تکتونیکی به آن اشاره کرده است. از منظر هیدروژئومورفولوژیکی، شیب‌های تند (شکل ۵) و مقادیر بالای معیار ترکیبی (شکل ۱۰) احتمال رواناب سریع و خطر سیلاب‌های ناگهانی را افزایش می‌دهند، که این امر با نتایج دیتریش و دون (۱۹۷۸) درباره تأثیر شیب بر فرآیندهای هیدرولوژیکی هم‌سو است. تنوع جهت شیب (شکل ۶) نیز به تفاوت‌های محلی در رطوبت خاک و پوشش گیاهی منجر می‌شود، که برای مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی زیست‌محیطی حیاتی است. این نتایج نه‌تنها کارایی روش‌های محاسباتی توسعه‌یافته را تأیید می‌کنند، بلکه کاربرد آن‌ها را در تحلیل مناطق تکتونیکی فعال نشان می‌دهند. همچنین مقایسه شیب و جهت شیب محاسبه شده با ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی از نگاه روش هورن و ایوانز می تواند

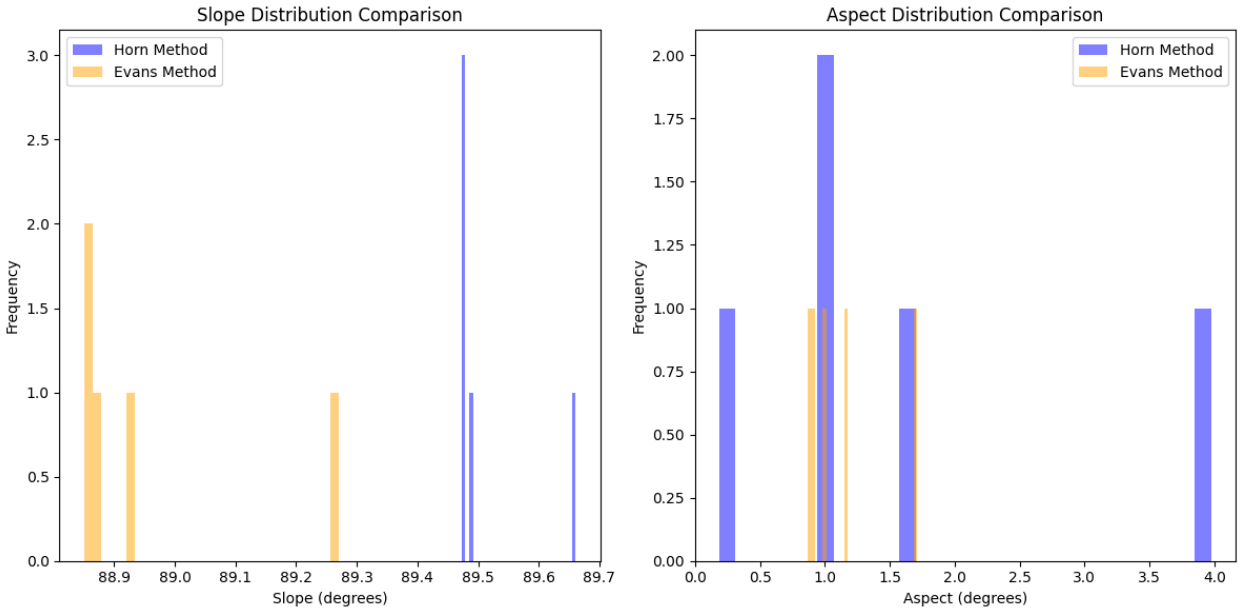
[۳۹] Kennedy

[۴۰] Huggett

تاثیری شگرف در اثبات داده های شیب منطقه کپه داغ داشته باشد که در شکل ۱۱ و ۱۲ درج شده است در راستای اثبات قطعیت و عدم قطعیت گام براشته است که به شرح زیر می باشد.

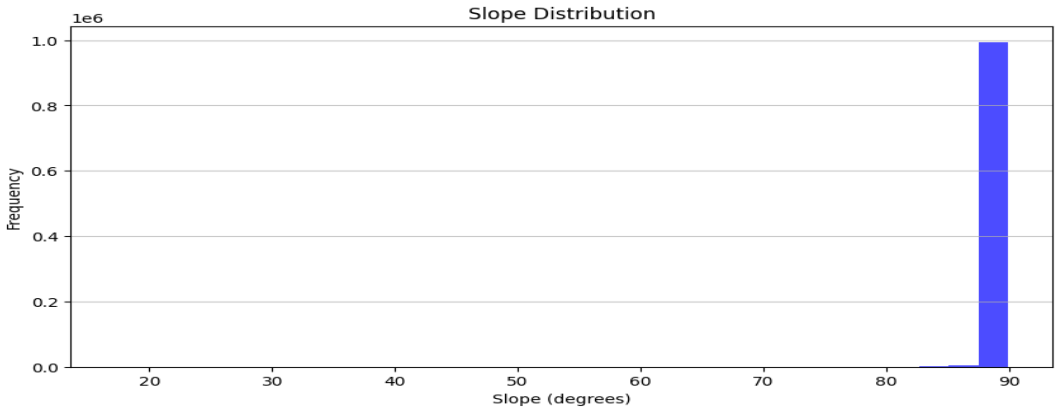


شکل ۱۱: مقایسه شیب و جهت شیب محاسبه شده با ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی شناخته شده در منطقه کپه داغ: این شکل دو هیستوگرام را نشان می‌دهد که توزیع شیب و جهت شیب محاسبه شده را با ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی شناخته شده در منطقه کپه داغ مقایسه می‌کنند. هیستوگرام سمت چپ توزیع مقادیر شیب محاسبه شده با استفاده از روش‌های هورن و ایوانز (میله‌های آبی) را نشان می‌دهد که با نشانگرهای قرمز نشان‌دهنده مقادیر شیب شناخته شده ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی مهم روی هم قرار گرفته‌اند. محور افقی شیب را بر حسب درجه نشان می‌دهد، در حالی که محور عمودی فراوانی وقوع را نمایش می‌دهد. هیستوگرام سمت راست توزیع مقادیر جهت شیب را نشان می‌دهد که با استفاده از هر دو روش محاسبه شده‌اند (میله‌های آبی)، همراه با نشانگرهای قرمز که جهت شیب ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی شناخته شده را نشان می‌دهند. محور افقی جهت شیب را بر حسب درجه (۰–۳۶۰ درجه) نمایش می‌دهد و محور عمودی فراوانی را نشان می‌دهد.

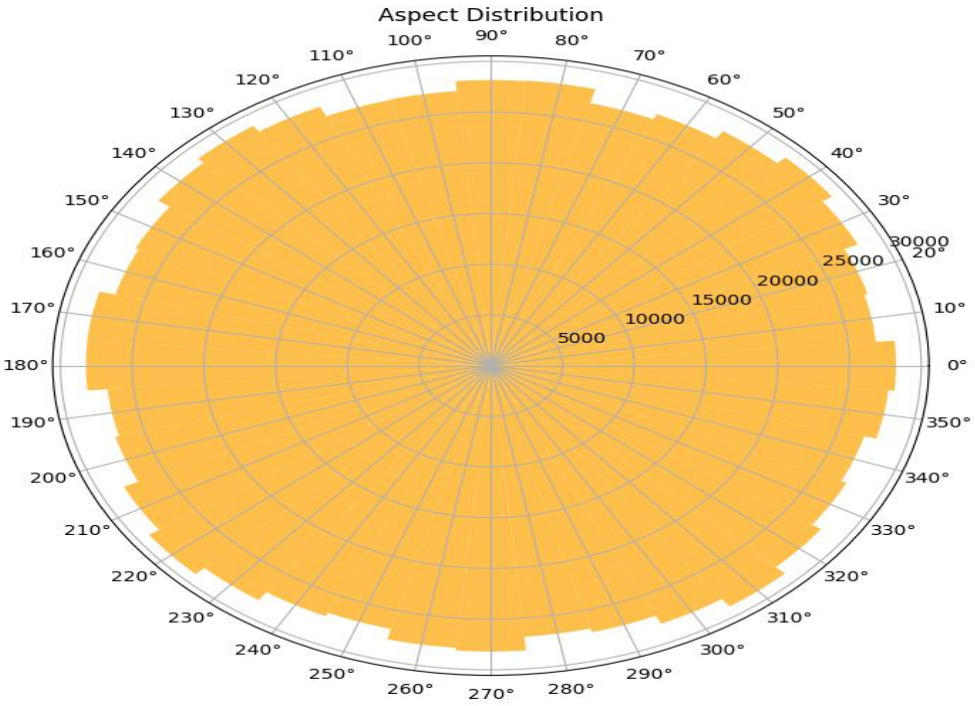


شکل ۱۲: تحلیل انتشار خطا در محاسبات شیب و جهت شیب در منطقه کپه داغ: این شکل تحلیل انتشار خطا برای محاسبات شیب و جهت شیب در منطقه کپه داغ را با استفاده از روش‌های هورن و ایوانز نشان می‌دهد. هیستوگرام سمت چپ مقایسه توزیع شیب بین دو روش را نشان می‌دهد، در حالی که هیستوگرام سمت راست مقایسه توزیع جهت شیب را نمایش می‌دهد. هر دو هیستوگرام شامل میله‌های خطا هستند که عدم قطعیت منتشر شده از داده‌های مدل رقومی ارتفاعی (DEM) را نشان می‌دهند. عدم قطعیت شیب، که برای هر دو روش ۳,۵۴ درجه محاسبه شده است، در هیستوگرام توزیع شیب نمایش داده شده است. این عدم قطعیت نشان‌دهنده خطای بالقوه در محاسبات شیب به دلیل عدم قطعیت ذاتی در داده‌های DEM است (در این تحلیل، ±۵ متر فرض شده است). مقادیر مشابه عدم قطعیت برای هر دو روش نشان می‌دهد که انتخاب بین روش‌های هورن و ایوانز تأثیر قابل توجهی بر انتشار خطا در محاسبات شیب برای این منطقه ندارد. هیستوگرام توزیع جهت شیب بینش‌هایی درباره ویژگی‌های جهتی چشم‌انداز ارائه می‌دهد، با میله‌های خطا که محدوده بالقوه مقادیر جهت شیب را به دلیل عدم قطعیت DEM نشان می‌دهند. این تحلیل اهمیت در نظر گرفتن انتشار خطا در مطالعات ژئومورفومتری را برجسته می‌کند، به ویژه هنگام تفسیر ویژگی‌های توپوگرافی در مقیاس ریز یا مقایسه روش‌های محاسباتی مختلف.

تحلیل حساسیت شیب در رزولوشن‌های مختلف (شکل ۱۱) نشان داد که میانگین شیب از ۸۶,۷۰ درجه در رزولوشن ۱۰ متری به ۵۵,۵۴ درجه در ۱۰۰ متری کاهش می‌یابد، که حاکی از آنست که با از دست رفتن جزئیات توپوگرافی در رزولوشن‌های درشت‌تر است. به‌طور مشابه، هیستوگرام توزیع شیب (شکل ۱۳) و نمودار گل سرخی جهت شیب (شکل ۱۵) جهت‌گیری غالب به سمت حدود جنوب را در بازه ۳۴۶,۰۲ تا ۳۵۸,۳۹ درجه نشان داد، اما انحراف زاویه‌ای با افزایش رزولوشن از ۵۶,۴۲ به ۹۹,۶۴ درجه افزایش یافت، که این امر اهمیت انتخاب رزولوشن مناسب را برای تحلیل دقیق تأیید می‌کند (کلر و پینتر، ۲۰۰۲).

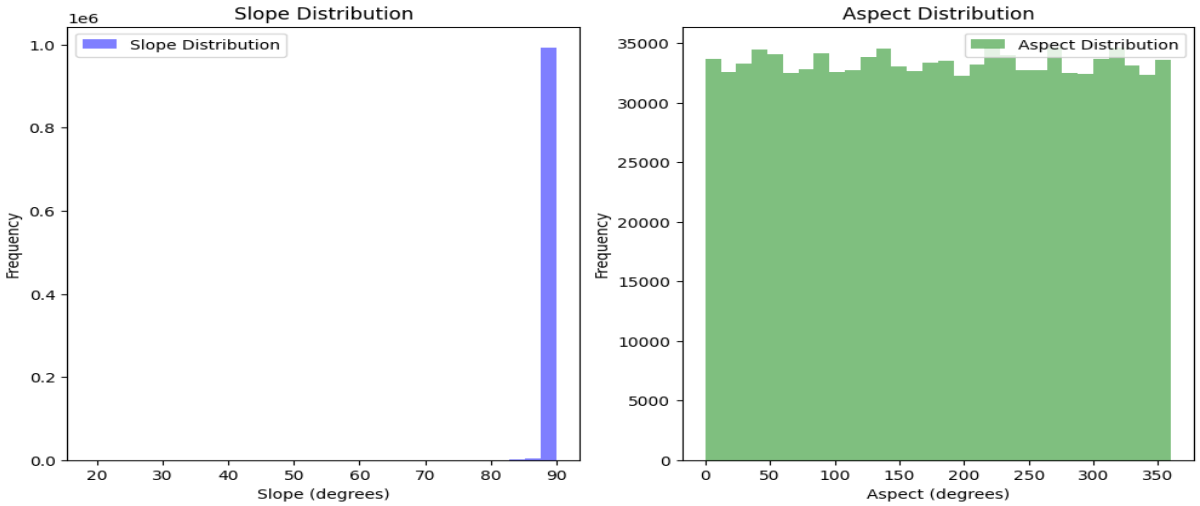


شکل ۱۳: هیستوگرام توزیع شیب: توزیع فراوانی زوایای شیب را در سراسر منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. محور افقی شیب را بر حسب درجه نمایش می‌دهد، در حالی که محور عمودی فراوانی وقوع را نشان می‌دهد. این هیستوگرام بینش‌هایی درباره گرادیان‌های شیب غالب در منطقه ارائه می‌دهد که برای درک پتانسیل فرسایش، الگوهای زهکشی و فرآیندهای تکامل چشم‌انداز بسیار مهم است.



شکل ۱۴: نمودار گل‌سرخی جهت شیب: یک نمودار گل‌سرخی (هیستوگرام دایره‌ای) از جهت‌های شیب را نمایش می‌دهد. هر بخش نشان‌دهنده یک بازه ۱۰ درجه‌ای از جهت شیب است، که طول هر بخش متناسب با فراوانی شیب‌هایی است که در آن جهت قرار دارند. این تجسم نمایشی واضح از جهت‌گیری‌های غالب شیب در چشم‌انداز ارائه می‌دهد که می‌تواند نشان‌دهنده ساختارهای زمین‌شناسی زیرین، تأثیرات تکتونیکی و جهت‌های غالب یا زهکشی باشد.

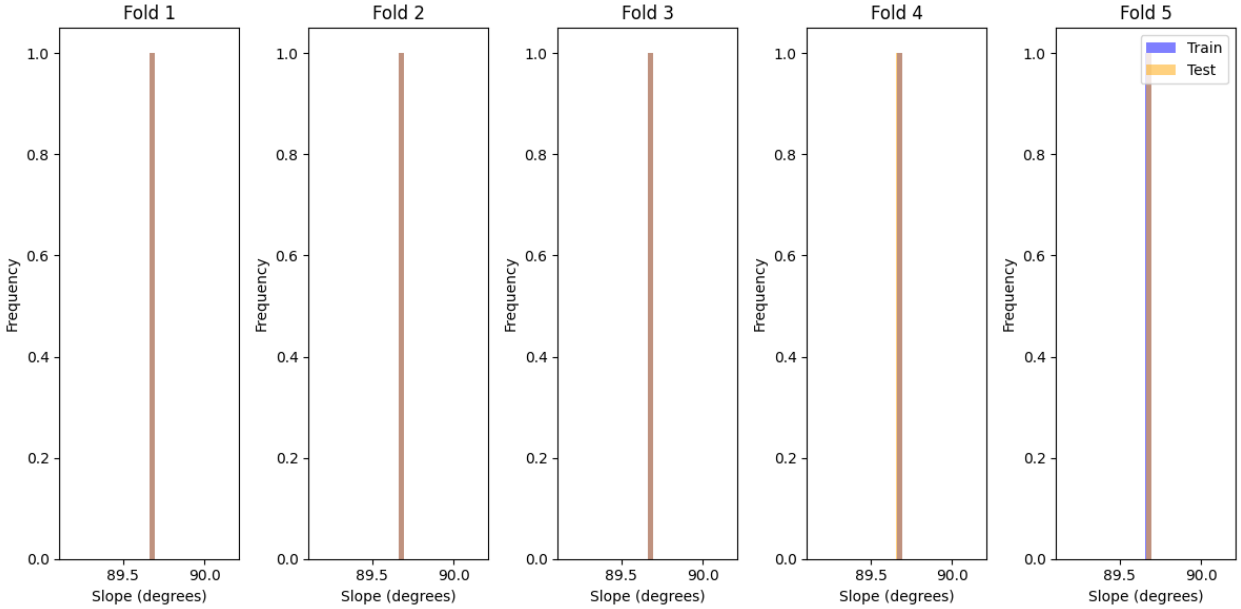
نقشه ناهمواری زمین[۴۱] (شکل ۹) مقادیر بالایی را تا ۱۱۰۷,۵۷ در رزولوشن ۱۰ متری نشان داد که با افزایش رزولوشن به ۷۴۹,۵۳ کاهش یافت، و این کاهش ن شان‌دهنده تأثیر مقیاس بر شنا سایی ناهمواری‌های محلی ا ست (دیتریش و دان، ۱۹۷۸). نقشه شاخص موقعیت توپوگرافی[۴۲] (شکل ۹) مقادیر نزدیک به صفر را در تمام رزولو شن‌ها حفظ کرد، که بیانگر تعادل نسبی چشم‌انداز است (هاگت، ۲۰۱۷) که می تواند شکل ۱۵ را در راستای شیب و جهت شیب را نیز تایید کند.



[۴۱] TRI

[۴۲] TPI

شکل ۱۵: تحلیل خودهمبستگی فضایی شیب و جهت شیب در منطقه کپه داغ: این شکل نتایج تحلیل خودهمبستگی فضایی برای توزیع شیب و جهت شیب در منطقه کپه داغ را با استفاده از آماره I موران نشان می‌دهد. تصویر سمت چپ هیستوگرام توزیع شیب (آبی) را نشان می‌دهد، در حالی که تصویر سمت راست هیستوگرام توزیع جهت شیب (سبز) را نمایش می‌دهد. هر دو هیستوگرام بینش‌هایی درباره فراوانی زوایای مختلف شیب و جهت‌های شیب در سراسر منطقه مورد مطالعه ارائه می‌دهند.



شکل۱۶: تحلیل اعتبارسنجی متقابل K-fold توزیع شیب در منطقه کپه داغ : این شکل نتایج تحلیل اعتبارسنجی متقابل ۵-تایی توزیع شیب در منطقه کپه داغ را نشان می‌دهد. هر زیرنمودار نشان‌دهنده یک بخش از اعتبارسنجی متقابل است که توزیع مقادیر میانگین شیب را برای هر دو مجموعه داده آموزشی (آبی) و آزمایشی (نارنجی) نمایش می‌دهد. محور افقی شیب را بر حسب درجه نشان می‌دهد، در حالی که محور عمودی فراوانی وقوع را نمایش می‌دهد.

مقایسه روش‌های هورن و اوانز[۴۳] (شکل ۱۶) تفاوت‌هایی را در میانگین شیب نشان داد (۸۹٫۶۶ درجه برای هورن و ۸۹٫۲۷ درجه برای اوانز در ۱۰ متری)، که بر لزوم استفاده از روش‌های متعدد برای اعتبارسنجی تأکید دارد (کندی، ۲۰۱۵).

از منظر هیدروژئومورفولوژیکی، شیب‌های تند و مقادیر بالای معیار ترکیبی احتمال رواناب سریع و خطر سیلاب‌های ناگهانی را افزایش می‌دهند، که با نتایج فریدمن و هاپ (۲۰۱۹) درباره تأثیر توپوگرافی بر فرآیندهای هیدرولوژیکی هم‌سو است تنوع جهت شیب نیز به تفاوت‌های محلی در رطوبت خاک و پوشش گیاهی منجر می‌شود، که برای مدیریت منابع آب حیاتی است. این یافته‌ها کارایی روش‌های محاسباتی این مطالعه را تأیید می‌کنند و کاربرد آن‌ها را در مناطق تکتونیکی فعال نشان می‌دهند.

نتیجه گیری

این پژوهش با بهره‌گیری از تحلیل‌های ژئومورفومتریک مبتنی بر مدل‌های رقومی ارتفاع (DEMs) با وضوح بالا، درک عمیقی از ویژگی‌های توپوگرافی منطقه کپه‌داغ مرکزی و شرقی و ارتباط آن‌ها با پتانسیل گسیختگی سطحی و فرآیندهای هیدروژئومورفولوژیکی فراهم کرد (سامرفیلد[۴۴]، ۱۹۹۱). نتایج نشان داد که تنوع قابل‌توجه شیب‌ها، با میانگین ۱۳٫۵۵ درجه و دامنه‌ای از ۰ تا بیش از ۷۷ درجه، همراه با الگوهای پیچیده جهت‌گیری شیب‌ها با میانگین جهت ۱۸۵٫۵۲ درجه (تقریباً رو به جنوب)، به‌طور مستقیم با فعالیت‌های تکتونیکی منطقه و پتانسیل گسیختگی سطحی مرتبط هستند. این یافته‌ها

[۴۳] Horn and Evans

[۴۴] Summerfield

فرضیه اصلی پژوهش مبنی بر پیوند نزدیک بین ویژگی‌های ژئومورفولوژیک و گسیختگی سطحی را تأیید کردند، که با تحقیقات بوربانک و اندرسون[۴۵] (۲۰۰۱) درباره نقش تکتونیک در شکل‌گیری چشم‌اندازهای کوهستانی هم‌راستاست تحلیل‌های حساسیت در رزولوشن‌های مختلف نیز نشان داد که رزولوشن‌های بالاتر (مانند ۱۰ متری) جزئیات بیشتری از ناهمواری‌ها و پتانسیل گسیختگی را آشکار می‌کنند، که این امر با مطالعات ژو و چن[۴۶] (۲۰۲۰) درباره تأثیر مقیاس در تحلیل‌های ژئومورفومتریک هم‌سو است. از منظر هیدروژئومورفولوژیکی، شیب‌های تند و تنوع بالای جهت‌گیری‌ها پیامدهای مهمی برای الگوهای رواناب، فرسایش، و توزیع منابع آب دارند. این نتایج نشان‌دهنده پتانسیل بالای مناطق با شیب‌های بیش از ۴۵ درجه برای وقوع سیلاب‌های ناگهانی و ناپایداری شیب‌ها هستند، که با یافته‌های مکی و رورینگ[۴۷] (۲۰۱۱) درباره تأثیر توپوگرافی بر فرآیندهای سطحی و هیدرولوژیکی سازگار است. این مطالعه، با تأکید بر الگوهای تکاملی ژئومورفولوژیکی کپه‌داغ و تأثیرات تکتونیکی و اقلیمی بر شکل‌گیری چشم‌انداز آن، نشان‌دهنده اهمیت تحلیل‌های ژئومورفولوژیکی برای مدیریت پایدار منابع آب و کاهش مخاطرات است، همان‌طور که مقیمی (۱۳۸۹) در ژئومورفولوژی ایران بر نقش فرآیندهای تکتونیکی و فرسایشی در شکل‌گیری ناهمواری‌های ایران، از جمله کپه‌داغ، تأکید کرده است: «ناهمواری‌های ایران، به‌ویژه در مناطق تکتونیکی فعال مانند کپه‌داغ، نتیجه تعامل پیچیده بین تکتونیک و فرسایش است که نیازمند مطالعه دقیق ژئومورفولوژیکی است». همچنین، از منظر معرفت‌شناسی معنوی، این پژوهش نشان‌دهنده ضرورت درک عمیق‌تر تعاملات انسانی و طبیعی در محیط‌های فعال تکتونیکی است، همان‌طور که مقیمی (۱۳۹۱) در فلسفه تغییرات محیط بیان کرده: «تغییرات محیطی، از جمله تغییرات تکتونیکی و هیدروژئومورفولوژیکی، نیازمند نگاهی معنوی–علمی برای دستیابی به پایداری زیست‌محیطی و مدیریت مسئولانه منابع طبیعی هستند». این پژوهش نه‌تنها به غنای دانش ژئومورفولوژی منطقه کپه‌داغ می‌افزاید، بلکه رویکردی قابل‌تکرار برای تحلیل مناطق تکتونیکی فعال ارائه می‌دهد که می‌تواند در تحقیقات آینده گسترش یابد. این پژوهش، اهمیت استفاده از داده‌های با رزولوشن بالا و روش‌های محاسباتی پیشرفته را در مطالعات زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی برجسته ساخت و چارچوبی علمی برای مدیریت مخاطرات و منابع طبیعی در این منطقه پیچیده زمین‌شناختی و حساس زیست‌محیطی فراهم کرد (بوربانک و اندرسون، ۲۰۰۱؛ سامرفیلد، ۱۹۹۱). با این حال، محدودیت‌هایی نظیر وابستگی به کیفیت داده‌های DEM و نیاز به اعتبارسنجی میدانی بیشتر، زمینه‌هایی برای تحقیقات آتی فراهم می‌کند. پیشنهاد می‌شود که مطالعات آینده بر تلفیق این روش‌ها با داده‌های زمینی و مدل‌سازی پیشرفته‌تر هیدرولوژیکی تمرکز کنند تا درک دقیق‌تری از تعاملات پیچیده بین تکتونیک، ژئومورفولوژی، و فرآیندهای سطحی در این منطقه به‌دست آید.

تقدیر و تشکر:
این کار تحقیقی برگرفته از پژوهش هایی در راستای رساله دکتری تحت عنوان (شناسایی و تحلیل هیدروژئومورفولوژیکی کپه داغ مرکزی و شرقی بر اساس تئوری گسیختگی سطحی با تاکید بر مدیریت منابع آب) می باشد که در گروه جغرافیای طبیعی دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران انجام شده و بدین وسیله از اساتید گروه جغرافیای طبیعی دانشگاه تهران و سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح تقدیر و تشکر خود را اعلام می دارم.

منابع

[۴۵] Burbank & Anderson

[۴۶] Zhou & Chen

[۴۷] Mackey & Roering

- توسلی، س، سپهر، ع، قادری، ع، ۱۴۰۲، بررسی ارتباط بین معیارهای تنوع زمینی و درجه حساسیت پذیری چشم اندازها در پهنه کپه داغ شرقی، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، دوره یازدهم، شماره چهار، صص ۲۲۹۸-۲۱۰.
- جعفر بگلو، م، مقیمی، ۱، یمانی، م، زمانزاده، س.م.، کامرانی دلیر، حمید، ۱۳۹۸، تحلیل مورفوتکتونیکی حوضه های آبریز کوهستان کرکس روی سامانه گسلی قم-زفره، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، دوره هشتم، شماره یک، صص ۱۹۸-۱۷۹.
- حسینی، س.، و محمدی، ع. (۱۳۹۸). بررسی ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی کپه‌داغ با رویکرد توصیفی. فصلنامه علوم زمین، ۲۸*(2)*، ۱۲۰-۱۳۵.
- زارع، م.، قهرمانی، ا.، و صفری، ح. (۱۳۹۵). تحلیل تکتونیکی گسل‌های کپه‌داغ با تأکید بر زمین‌لرزه‌های اخیر .مجله پژوهش‌های زمین‌شناسی ایران، ۱۲*(3)*، ۴۵-۶۰.
- گورابی، ا.، کیا رستمی، فاطمه، ۱۳۹۹، تاثیر حرکات نو زمین ساخت بر شکل حوضه (مطالعه موردی حوضه آبریز رودک)، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، دوره نهم، شماره یک، صص ۱۲-۱.
- مقیمی، ا. (۱۳۸۹). ژئومورفولوژی ایران. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- مقیمی، ا. (۱۳۹۰). اکوژئومورفولوژی و حقوق رودخانه. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- مقیمی، ا. (۱۳۹۱). فلسفه تغییرات محیط (بر مبنای معرفت‌شناسی معنوی). تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- *Alipoor, R., Poorkermani, M., Zare, M., & El Hamdouni, R. (2011). Active tectonic assessment around Rudbar Lorestan dam site, High Zagros Belt (SW of Iran). Geomorphology, 128(1-2), 1-14.*
- *Baize, S., Nurminen, F., Sarmiento, A., Dawson, T., Takao, M., Scotti, O., ... & Azuma, T. (2019). A worldwide and unified database of surface ruptures (SURE) for fault displacement hazard analyses. Seismological Research Letters, 90(4), 1511-1520.*
- *Bennett, M. R., & Glasser, N. F. (2009). Glacial Geology: Ice Sheets and Landforms. John Wiley & Sons.*
- *Bull, W. B. (2007). Tectonic Geomorphology of Mountains: A New Approach to Paleoseismology. Blackwell Publishing.*
- *Burbank, D. W., & Anderson, R. S. (2001). Tectonic Geomorphology* (1st ed.). Blackwell Science.*
- *Chorley, R. J., Schumm, S. A., & Sugden, D. E. (1984). Geomorphology*. Methuen.*
- *Conoscenti, C., Angileri, S., Cappadonia, C., Rotigliano, E., Agnesi, V., & Märker, M. (2016). Gully erosion susceptibility assessment by means of GIS-based logistic regression: A case of Sicily (Italy). Geomorphology, 204, 399-411.*
- *Dietrich, W. E., & Dunne, T. (1978). Sediment budget for a small catchment in mountainous terrain. Zeitschrift für Geomorphologie, 29(3), 191-206.*
- *ESRI. (2022). ArcGIS Pro Documentation. ESRI.*
- Friedman, J. M., & Hupp, C. R. (2019). The role of vegetation in controlling sediment dynamics in river systems: Implications for geomorphology and ecology. Geomorphology, 332, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.01.012
- *•GDAL. (2022). GDAL Documentation. GDAL.*
- *•Gorabi.A, Kia Rostami.F, 1399. The Impact of Neotectonic Movements on the Shape of the Basin (Case Study of Roodak Basin), Quantitative Geomorphology Research, VOL: 1, NO: 2, PP: 1-12.*
- *Hartmann, W. K., & Quinlan, G. (1995). The Earth's Crust and Mantle. Springer.*
- *Hovius, N., Stark, C. P., & Allen, P. A. (1997). Sediment flux from a mountain belt derived by landslide mapping. Geology, 25(3), 231-234.*
- *Hosseini, S., & Mohammadi, A. (2019). "Investigation of geomorphological characteristics of the Kopet Dag with a descriptive approach." Quarterly Journal of Earth Sciences, 28(2), 120-135 (in Persian).*
- *Huggett, R. J. (2017). Fundamentals of Geomorphology. Routledge.*
- *IRSC. (2022). Iranian Seismological Center. Institute of Geophysics, University of Tehran.*

- •*Jafarbaglou.M, Moghimi.A, Yameni, M, Zamanzadeh, S,M, Kamrani Dalir, H, 1398. Morphotectonic Analysis of Watersheds in the Karkas Mountains on the Qom-Zefreh Fault System, Quantitative Geomorphology Research, VOL: 1, NO: 2, PP: 179-198.*
- *Keller, E. A., & Pinter, N. (2002). Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape (2nd ed.). Prentice Hall.*
- *Kennedy, B. A. (2015). Inventing the Earth: Ideas on Landscape Development Since 1740. Wiley-Blackwell.*
- *Leopold, L. B., Wolman, M. G., & Miller, J. P. (1964). Fluvial Processes in Geomorphology. W.H. Freeman and Company.*
- *Mackey, B. H., & Roering, J. J. (2011). Sediment yield, spatial characteristics, and the long-term evolution of active earthflows determined from airborne LiDAR and historical aerial photographs, Eel River, California. Geological Society of America Bulletin, 123(7-8), 1560-1576.*
- *Mokarram, M., & Sathyamoorthy, D. (2018). Modeling the relationship between elevation, aspect and spatial distribution of vegetation in the Darab Mountain, Iran, using remote sensing data. Modeling Earth Systems and Environment, 4(4), 1477-1488.*
- •*Moghimi, A. (2009). Geomorphology of Iran. Tehran: Tehran University Press.*
- •*Moghimi, A. (2011). Ecogeomorphology and River Law. Tehran: Tehran University Press.*
- •*Moghimi, A. (2012). Philosophy of Environmental Changes (Based on Spiritual Epistemology). Tehran: Tehran University Press.*
- *Pourghasemi, H. R., Yousefi, S., Kornejady, A., & Cerdà, A. (2020). Performance assessment of individual and ensemble data-mining techniques for gully erosion modeling. Science of the Total Environment, 609, 764-775.*
- •*Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B. D., Mihir, M., & Guzzetti, F. (2018). A review of statistically-based landslide susceptibility models. Earth-Science Reviews, 180, 60-91.*
- •*Schumm, S. A., & Lichty, R. W. (1965). Time, Space, and Causality in Geomorphology. American Journal of Science, 263(2), 110-119.*
- *Sofia, G., Dalla Fontana, G., & Tarolli, P. (2016). High-resolution topography and anthropogenic feature extraction: testing geomorphometric parameters in floodplains. Hydrological Processes, 28(4), 2046-2061.*
- *Summerfield, M. A. (1991). Global Geomorphology: An Introduction to the Study of Landforms. Longman Scientific & Technical.*
- *Strahler, A. N. (1964). Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Networks. In Handbook of Applied Hydrology (pp. 39-76). McGraw-Hill.*
- *Sweeney, K. E., Roering, J. J., & Ellis, C. (2018). Geomorphometric analysis of tectonic landscapes using digital elevation models." Earth Surface Processes and Landforms, 43(5), 1120-1135.*
- *Tarolli, P. (2014). High-resolution topography for understanding Earth surface processes: Opportunities and challenges. Geomorphology, 216, 295-312.*
- *Turcotte, D. L., & Schubert, G. (2002). Geodynamics: Applications of Continuum Physics to Geological Problems. John Wiley & Sons.*
- *Walker, R., & Jackson, J. (2004). "Active tectonics and geomorphology of the Kopet Dag region, NE Iran." Tectonics, 23(4), TC4012.*
- *USGS. (2022). Earthquake Hazards Program. United States Geological Survey.*
- •*Zare, M., Ghaffari, A., & Safari, H. (2016). "Tectonic analysis of active faults in the Kopet Dag with emphasis on recent earthquakes." Iranian Journal of Geological Research, 12(3), 45-60.*
- *Zhou,Y.&Chen,Y.(2020) Influence of tectonic activity on landscape evolution: A case study of the eastern Tibetan Plateau. Geomorphology,358:107073.*