



تحلیل زمین‌ریخت‌شناسی و رشد تاقدیس مرتبط با راندگی پنهان بیرجند با استفاده از تغییرات بعد برخالی الگوی آبراهه‌ها

محمد امیر علیمی*

۱. استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده معدن، عمران و شیمی، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران.



تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۰۷

چکیده

تاقدیس بیرجند نوعی چین پیشروی گسله است که در بالای گسل راندگی پنهان شکل گرفته و توسط ۱۲ گسل پارگی به ۱۱ قطعه تقسیم شده است. در این تحقیق، دگرریختی سنوزوئیک بالایی مرتبط با راندگی پنهان بیرجند به کمیت درآمده است. بدین منظور، بعد برخالی الگوهای زهکشی واقع بر تاقدیس بیرجند محاسبه و ویژگی‌های آماری آن بیان شده است. توزیع مکانی پنجره‌هایی با بعد برخالی نزدیک ۲ در مناطقی است که نشیب کم، ارتفاعات پست و واحدهای مارن و توف دارند. این پنجره‌ها در یال شمالی چین و نیز به سوی قطعات انتهایی شمال باختری (۱۰ و ۱۱) فراوانی نسبی بیشتری دارند. این موضوع به شیب کم یال پستی چین و ستیغ مسطح قطعه انتهایی شماره ۱۱ بر می‌گردد. در تاقدیس بیرجند به سمت شمال باختری، رشد جانبی چین در دشت بیرجند و نزدیک کوهستان شکراب به شکل شیب ملایم در رسوبات مخروط‌افکنه‌های آبرفتی محرز است. در مراحل رشد پیشرونده تاقدیس بیرجند، قطعات از شمال باختر به سمت جنوب خاور به بلوغ ساختاری بیشتری رسیده‌اند و از مقادیر بعد برخالی پایین تری برخوردارند. در یال پستی و ستیغ پهن چین، الگوی آبراهه‌ها داریستی و درختی شده و بعد برخالی به ۲ نزدیک می‌شود و در یال جلویی که نشیب متوسط تا پرشیب است الگوی آبراهه‌ها به موازی تغییر می‌یابد و بعد برخالی کم می‌شود. دگرریختی سطحی ناشی از هندسه راندگی پنهان بیرجند، الگو و تراکم شبکه آبراهه‌ها را با اثر در توپوگرافی و سنگ‌شناسی منطقه کنترل می‌کند و نتیجه آن بعد برخالی بالا در مناطقی است که پویایی زمین‌ساختی بیشتری دارند.

کلید واژه‌ها: برخال، الگوی آبراهه، چین فعال، قطعه گسل، خاور ایران.

۱- مقدمه

اصطلاح برخال^۱ اولین بار توسط (Mandelbrot, 1967) در تعیین طول خط ساحلی انگلیس عنوان شد که مقدار بعد برخالی آن بیشتر از بعد توپولوژی بود. این موضوع نشانه خصوصیت قطعه‌شدگی^۲ پدیده‌های طبیعی است که از لحاظ ریاضی مقادیری اعشاری بدست می‌آیند (Mandelbrot, 1967) و نظیر اجسام فیزیکی، بعد صحیح ندارند. در هندسه اقلیدسی اشکالی نظیر مربع، منشور، بیضی و... شکل‌هایی ساده با طول معین و بدون ناهمواری هستند که با تجزیه شکل به اجزاء، از پیچیدگی آن کاسته می‌شود. اما اشکال برخالی نظیر خط ساحلی، کوه‌ها، طرح آبراهه‌ها و... ناهموار و فاقد طول شاخص‌اند و در مقیاس‌های مختلف پیچیده هستند (Mandelbrot, 1982).

با استفاده از هندسه برخالی می‌توان شکل موضوعات نامنظم زمین‌شناسی نظیر فراوانی و اندازه ذرات تشکیل‌دهنده سنگ‌ها، گسل‌ها، شکستگی‌ها، آبراهه‌ها، زمین‌لرزه‌ها، آتشفشان‌ها، ذخایر معدنی و میدان‌های نفتی را که ظاهراً توصیفی هستند، با تعیین بعد برخالی به صورت کمی در آورد (Turcotte, 1997). این بعد به سهولت از نمودار قانون توانی لگاریتم تعداد تجمعی موضوعات به لگاریتم اندازه آنها به دست می‌آید. امروزه ثابت شده است که توزیع مکانی گسل‌ها، زمین‌لرزه‌ها، چشم‌اندازها و آبراهه‌ها از قانون توانی پیروی می‌کند و هندسه برخالی ابزار آماری مناسبی برای به کمیّت در آوردن این موضوعات است. (Hirata, 1989; Tingbao et al., 1993; Zhao et al., 2011; Alvarez-Ramirez et al., 2012)

در سال‌های اخیر، خاور و مرکز پوسته ایران زمین شاهد زمین‌لرزه‌های مخربی (نظیر ۱۹۶۸ فردوس، ۱۹۷۸ طبس، ۱۹۹۴ سفیدابه، ۲۰۰۳ بم و ۲۰۰۵ زرنند) بوده که در نتیجه فعالیت گسل‌های پنهان رخ داده‌اند. این موضوع اهمیت مطالعه پهنه‌های گسلی پنهان را خاطر نشان می‌کند اما به‌راستی، با وجود به سطح نرسیدن این گونه گسل‌ها، ارزیابی پویایی آنها چگونه امکان‌پذیر است؟ امروزه ارتباط بین آثار کج‌شدگی و چین‌خوردگی رسوبات و پادگانه‌های رودخانه‌ای کوتاه‌تر و گسل‌های پنهان در این مناطق به اثبات رسیده است (Berberian et al., 1979, 2000; Walker et al., 2003; Talebian et al., 2004). بررسی تکامل این چشم‌اندازها و پدیده‌های مرتبط با آنها (نظیر آبراهه‌ها)

می‌تواند به تحلیل پویایی این مناطق کمک کند. تاقدیس بیرجند واقع در خاور ایران شاهدهی بر فعالیت رانندگی پنهان است که بررسی پویایی آن، به‌علت مجاورت با شهر بیرجند، از اهمیت بالایی برخوردار است. در پژوهش حاضر، با استفاده از هندسه برخالی الگوی آبراهه‌ها، فعالیت رانندگی پنهان بیرجند را ارزیابی کرده‌ایم. همچنین به بررسی چالش‌ها و محدودیت‌های استفاده از این عوارض در تفسیرهای لرزه‌زمین‌ساختی گسل‌های پنهان پرداخته‌ایم.

۲- زمین‌شناسی و زمین‌ساخت گسترده مورد مطالعه

تاقدیس بیرجند به طول ۴۰ کیلومتر و عرض ۴-۲ کیلومتر به‌صورت بالآآمدگی تاق شکل در واحدهای سخت شده کنگلومرای، مارن، توف، مارن توفی نئوژن و گراول‌های آبرفتی کوتاه‌تری گسترده شده است. این چین، با روند شمال باختر-جنوب خاور، توسط کوهستان باقران و دشت بیرجند در جنوب و کوهستان‌های شکراب و مرک و دشت بجد در شمال احاطه شده است (شکل ۱). در دشت‌های میان کوهستانی مذکور نهشته‌های کوتاه‌تر به صورت مخروط‌افکنه‌ها، پادگانه‌های آبرفتی قدیمی و جدید، پادگانه‌های آبرفتی رودخانه‌ای و رسوبات جدید رودخانه‌ای نمود دارند. مرز کوهستان و دشت در شمال توسط گسل شکراب و در جنوب توسط گسل جنوب بیرجند جدا شده‌اند (شکل ۱). تاقدیس بیرجند در اثر عملکرد ۱۲ گسله پارگی^۳ قطعه‌قطعه شده و به حالت خمیدگی پلکانی^۴ در آمده است (عسگرپور، ۱۳۸۸) (شکل ۴). جابه‌جایی بر روی این گسل‌ها در محل روستای بجد بیشترین مقدار است که با خمش و جابه‌جایی محور تاقدیس مشخص می‌شود. سابقه لرزه‌خیزی منطقه نیز قابل توجه است چرا که زمین‌لرزه ۲۶ بهمن ۹۲۷ ه. ش (۱۵ فوریه ۱۵۴۹ م) بیرجند، با بزرگی تقریبی $(M_p=6.7)$ ، به فعالیت رانندگی پنهان بیرجند (مدفون در زیر تاقدیس) نسبت داده می‌شود (Berberian, 2014). امروز نیز بافت تاریخی شهر بیرجند (قلعه تاریخی بیرجند متعلق به دوره صفویه)، بخشی از ساخت و سازهای جدید شهری و تجهیزات نظامی بر روی قطعه شماره ۱۱ از این چین واقع شده است.

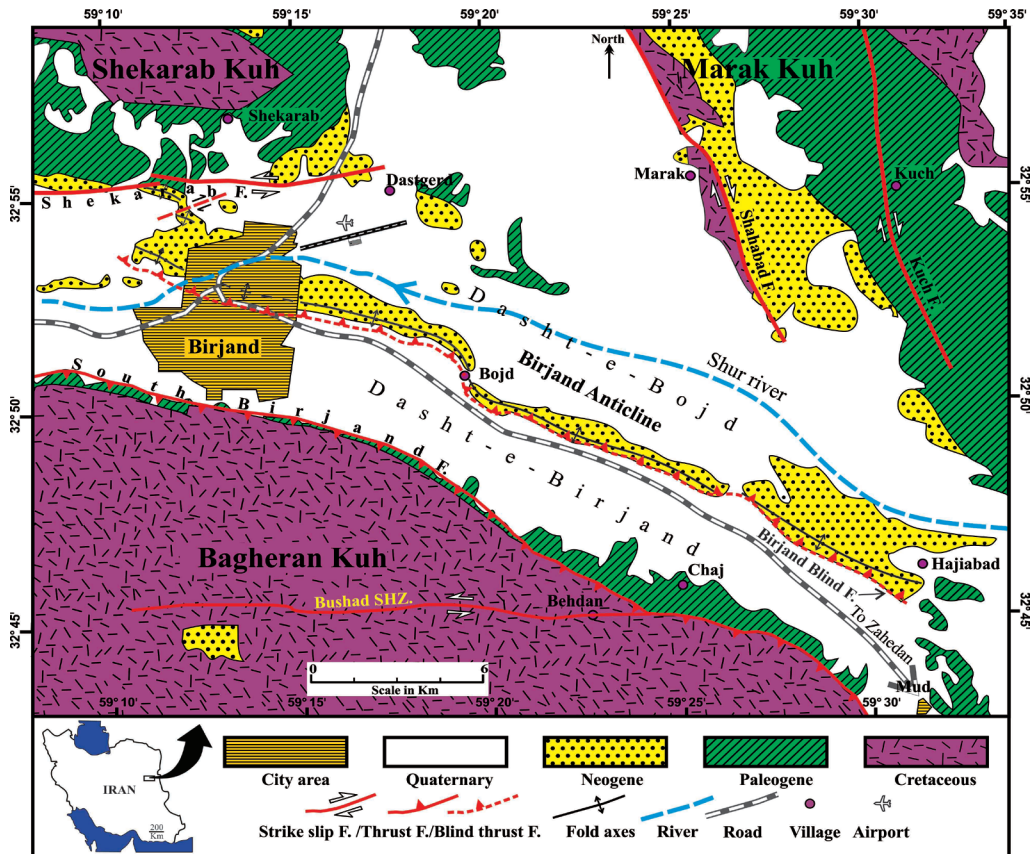
بررسی زمین‌ساخت فعال و توزیع و انتش سنوزوئیک در مرکز و خاور ایران نشان می‌دهد که توزیع دگرشکلی در گسل‌های اصلی ناهمسان بوده و به صورت افزایش برش و چرخش از

1. Fractal
2. Segmentation
3. Tear fault
4. En echelon

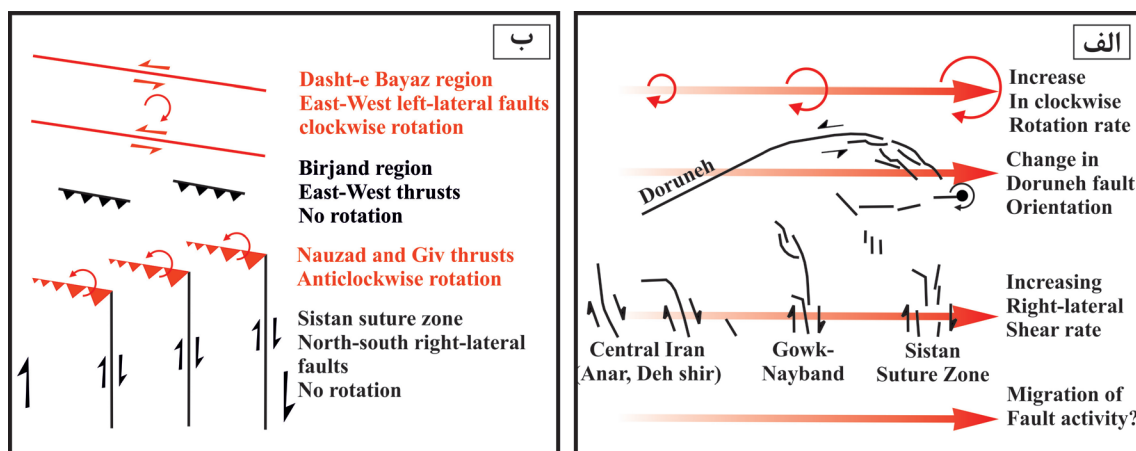


دارای چرخش ساعت‌گرد) در شمال است که راندگی‌های فعال در مناطق بین آنها گسترده شده‌اند (شکل ۲-ب). راندگی پنهان بیرجند نیز از جمله این راندگی‌های فعال است که در انتقال تغییر سبک دگرریختی از جنوب به شمال در خاور ایران نقش دارد.

مرکز به خاور ایران تغییر می‌کند (Walker & Jackson, 2004) (شکل ۲-الف). به نظر (Walker & Khatib, 2006)، زمین‌ساخت فعال در پهنه سیستان حاصل تغییر سبک گسلش راست‌الغز راست‌بر شمالی-جنوبی (پهنه‌های دگرشکلی فاقد چرخش) در جنوب، به گسلش راست‌الغز چپ‌بر خاوری-باختری (پهنه‌های دگرشکلی



شکل ۱. نقشه ساده شده واحدهای سنگ‌شناسی و گسل‌های فعال پیرامون شهر بیرجند.



شکل ۲. الف) الگوی توزیع ناهمسان دگرشکلی در مرکز و خاور ایران (Walker & Jackson, 2004)؛ ب) الگوی انتقالی تغییر سبک گسلش راست‌الغز در پهنه سیستان (Walker & Khatib, 2006).

۳- تعاریف و روش‌ها

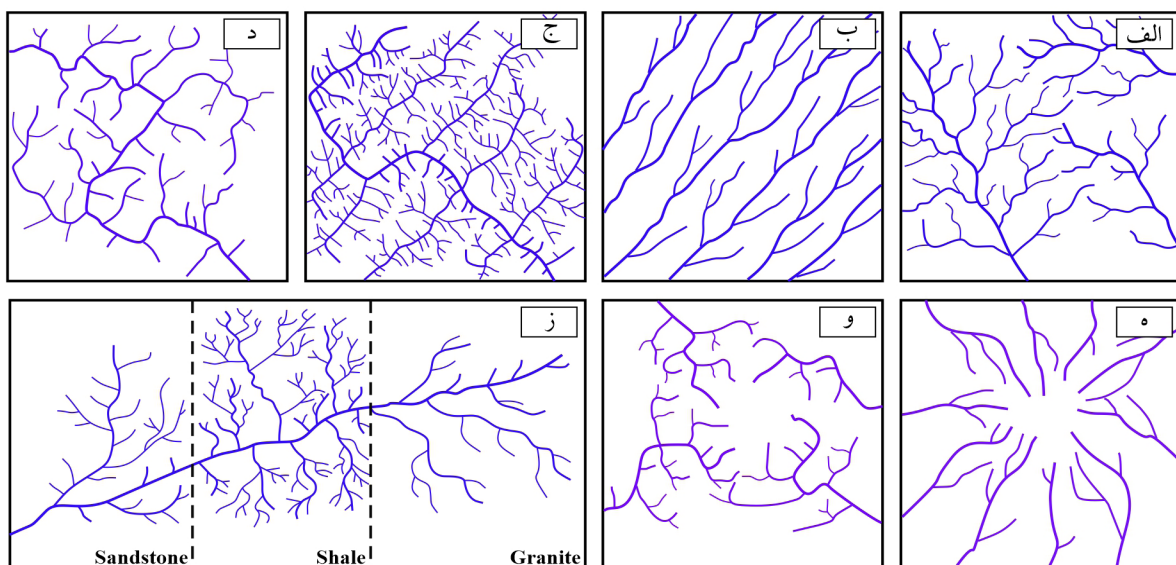
۳-۱- الگوی شبکه آبراهه‌ها و عوامل مؤثر بر آن

آنچه در لرزه‌زمین ساخت مناطق گسلش فعال اهمیت دارد تأکید بر عوارض طبیعی دوره کواترنری است چرا که اکثر سازه‌های بشری بر روی سازندهای این دوره بنا شده است. از جمله این چشم‌اندازهای طبیعی، تاقدیس‌های مرتبط با راندگی‌های پنهان هستند. به منظور ارزیابی پویایی گسل‌های پنهان با استفاده از شواهد سطحی، بایستی به دنبال پدیده‌هایی بود که ارتباط خاصی با چین خوردگی داشته باشند. از جمله این پدیده‌ها، آبراهه‌ها هستند که الگوهای اصلی آن شامل طرح درختی^۱، موازی^۲، داربستی^۳، راست گوشه^۴، شعاعی^۵ و حلقوی^۶ می‌باشد (شکل ۳-الف-و). جایگاه پیدایش این الگوها توسط (Howard, 1967) بیان شده است.

شکل، اندازه و تعداد آبراهه‌ها به عواملی نظیر توپوگرافی (ارتفاع و شیب زمین)، سنگ‌شناسی، ساختارهای زمین‌شناسی، شرایط اقلیمی (میزان بارندگی)، شدت و نوع جریان آب بستگی دارد. بین تمامی عواملی که تعیین‌کننده ویژگی شبکه زهکشی هستند، سنگ‌شناسی و زمین ساخت اهمیت فراوانی دارد. به عنوان مثال، میزان انشعاب و تراکم شبکه آبراهه‌ها متأثر از سنگ‌شناسی

منطقه است به گونه‌ای که در سنگ‌های سست (رسی و شیلی)، متراکم و در مناطق سخت (گرانیتی و آهکی) انشعابات کم و میاناب‌های وسیع دارد (شکل ۳-ز). اراضی هزاردره‌ای که اغلب از آبرفت‌های کواترنری تشکیل شده‌اند متراکم‌ترین شبکه زهکشی را دارند. علاوه بر این، الگوی زهکشی در یک حوضه آبریز اغلب از ساختمان زمین‌شناسی آن حوضه پیروی می‌کند. منطقه می‌شوند. در ساختارهای چین خورده مسیر شاخه‌های شبکه زهکشی می‌تواند در امتداد محور ناودیس‌ها یا تاقدیس‌ها قرار گرفته و الگوی زهکشی موازی و داربستی شکل می‌گیرد. شکل‌های ثانویه نظیر تشکیل دره‌های طولی در بین لایه‌های رسوبی با تناوب سخت و سست نیز معلول گذشت زمان و دینامیک آب‌های جاری در ساختمان‌های چین خورده است که در نهایت در سطوح کم شیب‌تر به الگوی شاخه درختی منتهی می‌شود. الگوی شعاعی و اگرانیز در پاره‌ای از تپه‌های منفرد در مناطق فشارشی دیده می‌شود. در مناطق زمین ساختی فعال هندسه الگوی آبراهه‌ها می‌تواند بیانگر میزان پویایی و تکوین عناصر ساختاری آن باشد.

1. Dendritic
2. Parallel
3. Trellis
4. Rectangular
5. Radial
6. Annular



شکل ۳. الف- و- شش الگوی اصلی شبکه زهکشی آبراهه‌ها (Howard, 1967). الف- درختی؛ ب- موازی؛ ج- داربستی؛ د- راست گوشه؛ ه- شعاعی؛ و- حلقوی؛ ز- تأثیر سنگ‌شناسی در تراکم شبکه آبراهه‌ها.



اشکال هندسی هستند و بعد آنها یک عدد صحیح نمی‌باشد. به عنوان مثال الگوی شبکه زهکشی آبراهه‌ها از یکسری خطوط (بعد توپولوژی=۱) تشکیل ده است که در یک سطح (بعد توپولوژی=۲) گسترش یافته‌اند. این موضوع که تراکم شبکه آبراهه‌ها در فضای سطح پراکندگی یافته است با بعد بر خالی کمی سازی می‌شود که مقداری اعشاری بین ۱ تا ۲ دارد. این مقدار در حوضه‌های زهکشی به عدد ۲ نزدیک می‌شود (Tur-cotte, 2007).

یکی از گویاترین روش‌های تعیین بعد بر خالی، روش مربع‌شمار^۴ است. این روش بخصوص برای سری‌های تصادفی و خودهمسانی آماری مناسب است و در نرم‌افزارهای MAT-LAB و GIS نیز کارآمد می‌باشد. در این روش پدیده مورد مطالعه شبکه‌بندی و تحلیل‌ها بر اساس نمودار Log-Log از تعداد مربع‌های حاوی ساختار (در این مطالعه شبکه آبراهه) (N_p) بر حسب اندازه شبکه به کار گرفته شده (r) و یا عکس آن ($r/1$) صورت می‌گیرد. در رابطه $\log(N_p) = a + k \log(1/r)$ ضریب خط (k) در نمودار همان بعد بر خالی بوده و با D_H نمایش داده می‌شود. هر چه طول ابعاد شبکه کاهش یابد جزئیات بیشتری را بیان می‌کند و برای پدیده‌های طبیعی (نظیر شبکه آبراهه‌ها) مقادیر متفاوتی از بعد بر خالی به دست می‌آید. بنابراین انتظار داریم که با تغییر ابعاد شبکه، مقادیر بعد بر خالی تغییر کنند اما هر چه ابعاد شبکه به صفر نزدیک شود مقادیر بعد بر خالی دقت بیشتری دارد (Kusak, 2014).

روش مربع‌شمار در تعیین بعد بر خالی شبکه‌های زمین‌ریختی^۵ پیچیده توسط محققینی نظیر (Mandelbrot, 1982; Turcotte, 2007) استفاده شده است. بعد بر خالی الگوهای مختلف شبکه آبراهه‌ها، اعدادی اعشاری بین ۱ و ۲ دارند (Kusak, 2014). در جدول ۱ بعد بر خالی الگوهای اصلی شبکه آبراهه‌ها، ارائه شده توسط (Howard, 1967)، به روش مربع‌شمار (Turcotte, 2007) محاسبه شده است.

$$D_H = \ln(N_{r+1}/N_r) / \ln(r/r_{+1})$$

D_H : بعد مربع‌شمار، N : تعداد مربع‌های حاوی آبراهه در شبکه‌ای با اندازه‌های r
بعد بر خالی در الگوی داربستی بیشترین مقدار است که نشانه

۲-۳- ویژگی خودهمسانی و خودخویشی شبکه آبراهه‌ها

از ویژگی‌های هندسه بر خالی دو خصوصیت خودهمسانی^۱ و خودخویشی^۲ است. یک پدیده دقیقاً خودهمسان از N کپی از خودش (با انتقال و چرخش‌های ممکن) به وجود می‌آید و از نظر مقیاس پایاست چرا که مشابهت و همانندی بین اجزاء تشکیل دهنده و شکل کل وجود دارد. خودهمسانی دقیق بیشتر در الگوریتم‌های ریاضی قابل بررسی بوده و در طبیعت دیده نمی‌شود. خصلت اصلی بر خالی‌های طبیعی، خودهمسانی آماری^۳ است در این حالت شباهت دقیق نیست و جنبه آماری یا تصادفی دارد و جزئیات در مقیاس‌های مختلف متفاوت است. در خودهمسانی، شکل جزء در همه جهات به نسبت ثابتی رشد می‌کند و شکل کل را به وجود می‌آورد از اینرو شباهت محسوسی بین ایندو (جزء و کل) وجود دارد و در صورت بزرگنمایی، اشکال (به‌طور دقیق یا آماری) تکرار می‌شوند. در بر خالی‌های تصادفی و نامنتظم، شکل جزء در همه جهات به یک نسبت رشد نکرده است و تکرار آماری فقط هنگامی می‌تواند امکان‌پذیر گردد که بزرگنمایی در ابعاد مختلف، به اندازه متفاوت انجام گیرد. این نایکنواختی مقیاس که پدیده‌ها و اشکال به لحاظ آماری ناهمسان هستند خاصیت خودخویشی نامند. دو ویژگی خودهمسانی و خودخویشی برای توصیف موضوعات طبیعی بکار می‌روند که بیانگر همگنی یا ناهمگنی پدیده‌ها هستند. الگوی‌های زهکشی بر اساس قانون (Horton, 1945) خاصیت خودهمسان دارند (Tur-Mandelbrot, 1982; cotte, 2007) با وجود این مطالعات دیگر محققین، خودخویشی بین اجزای نشان می‌دهد (Voss, 1988). به طور کلی الگوهای درختی، راست گوشه و داربستی ویژگی خودهمسانی و الگوهای موازی، شعاعی و مدور خودخویشی را نشان می‌دهند (Kusak, 2014).

۳-۳- بعد بر خالی شبکه آبراهه‌ها

بسیاری از پدیده‌های انسان‌ساخت (مانند خانه‌ها، جاده‌ها، لوله‌ها و اراضی کشاورزی) بر حسب سه عنصر نقطه، خط یا سطح نمایش داده می‌شوند و بیانگر ابعاد هندسه اقلیدسی (بعد توپولوژی) هستند. عناصر مذکور در هندسه اقلیدسی، موضوعاتی ۱، ۲ و ۳ بعدی‌اند، اما پدیده‌های طبیعی پیچیده‌تر از

1. Self-similarity
2. Self-affinity
3. Statistically self-similarity
4. Box counting
5. Geomorphic



شد. سپس نمودار Log-Log، تغییرات شاخص (N_p) به $(r/1)$ برای هر یک از اجزای شبکه پایه رسم و ضریب شیب این نمودار (D_p) به عنوان بعد بر خالی شبکه آبراهه برای هر جزء معرفی گردید.

ویژگی های ابعاد بر خالی آبراهه ها در هر یک از قطعات تاقدیس بیرجند با شاخص های آماری بیان شده اند (جدول ۲). شاخص های تمرکز نظیر میانگین^۱، میانه^۲، چندک ها^۳ و شاخص های توزیع^۴ نظیر چولگی^۵ و برجستگی^۶ برای داده ها بررسی شدند. به منظور نرمال سازی داده ها سعی شده است تا با استفاده از دو ابزار Histogram و Normal QQPlot در نرم افزار ArcMap، حتی الامکان شاخص چولگی به صفر، شاخص برجستگی به ۳ نزدیک شده و مقادیر میانگین و میانه با هم مساوی شوند که نتایج در جدول ۲ آمده است. همچنین برای مقایسه نگاره های شاخص های آماری ابعاد بر خالی آبراهه ها در قطعات مختلف تاقدیس بیرجند از نمودار جعبه ای استفاده شده است (شکل ۵).

گسترش سطحی بالای این الگو می باشد. همچنین الگوهای حلقوی و شعاعی کمترین مقدار بعد بر خالی را دارند.

۴-۵ داده ها و نتایج

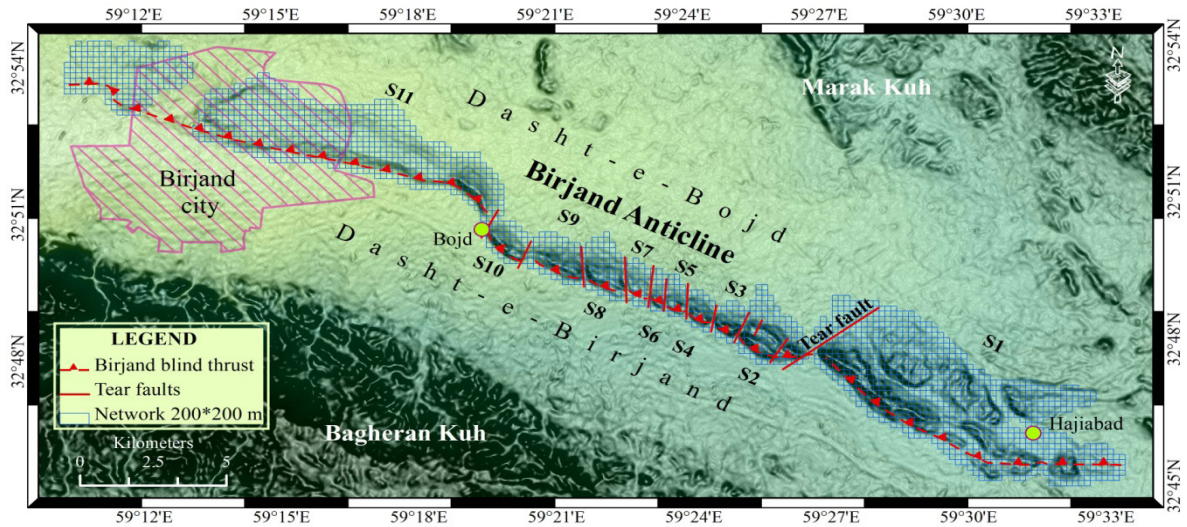
۴-۱- محاسبه و تحلیل شاخص های آماری بعد بر خالی شبکه آبراهه ها در تاقدیس بیرجند

در این تحقیق شبکه آبراهه های واقع بر تاقدیس بیرجند در نرم افزار Google Earth با قدرت تفکیک مکانی ۱ متر استخراج و لایه بُرداری آن در نرم افزار ArcMap ایجاد گردید. سپس به منظور تهیه نقشه بعد بر خالی آبراهه ها، شبکه ای با مربع هایی (پنجره) به ابعاد 0.2×0.2 کیلومتر (۲۱۴۵ مربع)، بر روی لایه آبراهه ها گسترده شد (شکل ۴). اجزای این شبکه (شبکه پایه) به عنوان مربع های مرتبه صفر و پایه شبکه بندی می باشند. در اولین مرتبه، مربع ها به ۴ مربع هم اندازه به میزان نصف طول مربع شبکه پایه (۰/۱ کیلومتر) تقسیم و تعداد مربع های حاوی آبراهه (شاخص N) شمارش شدند. در مراتب بعدی، عملیات تا مرتبه پنجم و با طول مربع های (۰/۰۵، ۰/۰۲۵، ۰/۰۱۲۵ و ۰/۰۰۶۲۵ کیلومتر) تکرار

1. Mean
2. Median
3. Quintile
4. Distribution
5. Skewness
6. Kurtosis

جدول ۱. محاسبه بعد بر خالی الگوهای اصلی شبکه آبراهه های (Howard, 1967).

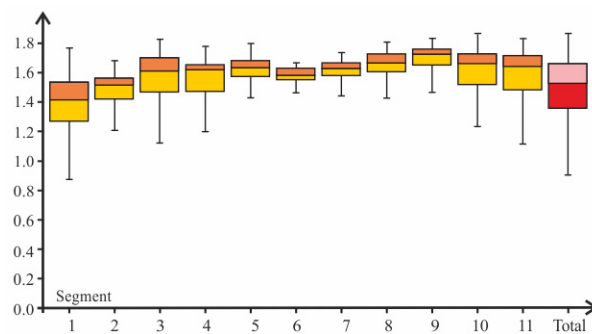
| الگو | بعد بر خالی (D_p) | ضریب همبستگی (R^2) | تعداد مربع های حاوی آبراهه در شبکه ای با اندازه های متفاوت | | | | | | | |
|-----------|---------------------|----------------------|--|-----|----|-----|-----|------|------|------|
| | | | ۲۵۶ | ۱۲۸ | ۶۴ | ۳۲ | ۱۶ | ۸ | ۴ | ۲ |
| درختی | ۱/۳۹۶۶ | ۰/۹۹۰۵ | ۴ | ۱۳ | ۴۰ | ۱۳۰ | ۳۵۰ | ۷۵۲ | ۱۵۸۹ | ۳۵۳۹ |
| موازی | ۱/۴۰۵۴ | ۰/۹۹۰۰ | ۴ | ۱۵ | ۴۷ | ۱۴۷ | ۳۶۷ | ۸۰۳ | ۱۷۷۷ | ۴۰۹۹ |
| داربستی | ۱/۵۱۴۵ | ۰/۹۸۹۸ | ۴ | ۱۵ | ۴۶ | ۱۵۴ | ۵۱۳ | ۱۳۱۳ | ۲۷۸۹ | ۵۶۶۸ |
| راست گوشه | ۱/۳۶۰۳ | ۰/۹۹۱۳ | ۴ | ۱۱ | ۳۹ | ۱۱۶ | ۲۷۸ | ۶۱۰ | ۱۳۲۳ | ۲۹۱۰ |
| شعاعی | ۱/۳۳۵۰ | ۰/۹۹۳۶ | ۴ | ۱۴ | ۴۱ | ۱۰۸ | ۲۶۲ | ۵۶۸ | ۱۲۶۰ | ۳۰۵۱ |
| حلقوی | ۱/۳۳۲۶ | ۰/۹۹۳۸ | ۴ | ۱۱ | ۳۳ | ۹۸ | ۲۳۹ | ۵۱۷ | ۱۱۲۳ | ۲۵۹۰ |



شکل ۴. تصویر توپوگرافی SRTM از تاقدیس بیرجند به همراه نمایش تصویر خط لبه‌ای گسل راندگی پنهان و گسل‌های پارگی. شبکه‌ای متشکل از مربع‌هایی به ابعاد ۲۰۰×۲۰۰ متر بر روی چین گسترده شده است.

جدول ۲. محاسبه شاخص‌های آماری بعد بر خالی در پنجره‌های واقع در قطعات تاقدیس بیرجند.

| قطعه | تعداد مربع | بیشینه | کمینه | میانگین | میانه | چولگی | برجستگی | انحراف معیار | چارک اول | چارک سوم |
|---------------|---------------|--------|--------|---------|--------|---------|---------|--------------|----------|----------|
| ۱ | ۸۴۳ | ۱/۷۷۴۰ | ۰/۸۱۰۸ | ۱/۳۸۸۱ | ۱/۴۱۱۶ | -۰/۵۴۴۳ | ۲/۹۲۲۴ | ۰/۱۸۰۶ | ۱/۲۷۱۵ | ۱/۵۲۷۱ |
| ۲ | ۱۰۸ | ۱/۶۸۳۰ | ۱/۰۹۳۸ | ۱/۴۷۹۴ | ۱/۵۱۰۴ | -۰/۹۸۷۷ | ۳/۵۲۷۴ | ۰/۱۲۹۹ | ۱/۴۲۵۹ | ۱/۵۶۳۸ |
| ۳ | ۳۳ | ۱/۸۲۸۸ | ۰/۸۹۸۱ | ۱/۵۳۰۳ | ۱/۶۰۶۹ | -۱/۱۲۰۰ | ۳/۴۰۶۴ | ۰/۲۴۲۸ | ۱/۴۶۷۴ | ۱/۶۹۹۲ |
| ۴ | ۳۱ | ۱/۷۸۴۰ | ۱/۱۹۰۹ | ۱/۵۵۸۲ | ۱/۶۲۱۷ | -۰/۷۸۶۰ | ۲/۷۶۷۶ | ۰/۱۴۶۹ | ۱/۴۶۸۳ | ۱/۶۵۰۱ |
| ۵ | ۲۳ | ۱/۷۹۵۷ | ۱/۴۳۵۸ | ۱/۶۲۹۲ | ۱/۶۳۲۹ | -۰/۱۴۳۶ | ۲/۲۴۴۴ | ۰/۱۰۱۳ | ۱/۵۶۸۸ | ۱/۶۸۴۷ |
| ۶ | ۱۷ | ۱/۶۷۰۸ | ۱/۴۶۱۱ | ۱/۵۸۵۱ | ۱/۵۸۴۰ | -۰/۲۷۸۵ | ۲/۶۳۶۸ | ۰/۰۵۵۸ | ۱/۵۴۸۰ | ۱/۶۲۸۱ |
| ۷ | ۳۱ | ۱/۷۳۳۸ | ۱/۳۵۴۱ | ۱/۶۰۲۱ | ۱/۶۲۴۷ | -۰/۸۸۳۸ | ۲/۹۷۳۷ | ۰/۰۹۹۰ | ۱/۵۶۶۷ | ۱/۶۶۱۹ |
| ۸ | ۶۴ | ۱/۷۹۸۹ | ۱/۳۹۵۸ | ۱/۶۵۶۳ | ۱/۶۶۶۳ | -۰/۸۹۴۷ | ۳/۳۵۶۱ | ۰/۰۹۱۴ | ۱/۵۹۵۳ | ۱/۷۲۷۶ |
| ۹ | ۶۵ | ۱/۸۳۲۴ | ۱/۴۱۸۳ | ۱/۶۹۲۸ | ۱/۷۱۶۴ | -۰/۸۵۳۶ | ۳/۲۳۸۰ | ۰/۰۹۳۶ | ۱/۶۳۹۹ | ۱/۷۶۶۱ |
| ۱۰ | ۴۳ | ۱/۸۵۶۳ | ۱/۲۳۴۳ | ۱/۶۲۳۲ | ۱/۶۶۰۸ | -۰/۹۰۲۹ | ۳/۳۱۸۸ | ۰/۱۵۶۱ | ۱/۵۲۵۴ | ۱/۷۲۳۰ |
| ۱۱ | ۷۵۸ | ۱/۸۳۵۴ | ۱/۰۹۱۱ | ۱/۵۷۹۲ | ۱/۶۳۴۹ | -۰/۸۸۳۹ | ۲/۹۳۸۴ | ۰/۱۷۱۳ | ۱/۴۷۳۹ | ۱/۷۰۸۴ |
| تاقدیس بیرجند | ۲۰۸۱ | ۱/۸۵۶۳ | ۰/۸۱۴۵ | ۱/۴۸۶۶ | ۱/۵۲۵۳ | -۰/۶۹۹۱ | ۲/۹۳۱۲ | ۰/۲۱۰۱ | ۱/۳۴۹۸ | ۱/۶۵۳۵ |



شکل ۵. نمودار جعبه‌ای شاخص‌های آماری ابعاد بر خالی آبراهه‌ها در قطعات مختلف تاقدیس بیرجند



۱۰ و ۱۱، ۲۵ درصد داده‌ها بیشتر از ۱/۷ است. حتی در قطعه شماره ۹، نیمی از داده‌ها بزرگتر از این مقدار است. بعد بر خالی شبکه آبراهه‌ها (D_p) برای هر قطعه از تاقدیس بیرجند به صورت یک مقدار کلی نیز محاسبه شد (جدول ۳). این مقدار بر اساس ضریب زاویه خط برازش شده در نمودار Log-Log تعداد مربع‌های حاوی آبراهه به عکس اندازه ضلع مربع‌های شبکه، با ضریب همبستگی بالا به دست آمده است. قطعه شماره ۶ به عنوان قطعه میانی تاقدیس، کمترین مقدار بعد بر خالی را بعد از قطعه شماره ۱ دارد. نسبت به قطعه میانی، مقدار بعد بر خالی در قطعات واقع در جنوب خاوری (۵-۱) کمتر از قطعات شمال باختری (۱۱-۷) است.

از نظر آماری توزیع داده‌ها در دو قطعه انتهایی تاقدیس (۱ و ۱۱) تقریباً متقارن است. مقدار بیشینه بعد بر خالی در پنجره‌هایی واقع بر قطعات انتهایی شمال باختری (۹، ۱۰ و ۱۱) و مقدار کمینه در قطعات انتهایی (۱، ۲، ۳، ۴ و ۱۱) وجود دارد که پیرو آن دامنه تغییرات بعد بر خالی در قطعات انتهایی (۱، ۳، ۱۰ و ۱۱) بیشترین مقدار است. به عبارت دیگر بیشترین مقدار پراکندگی داده‌ها در این قطعات وجود دارد. همچنین قطعه میانی (۶) کمترین دامنه تغییرات را دارد که از دو طرف به سمت قطعات انتهایی این مقدار به تدریج افزایش می‌یابد. میانگین داده‌ها از قطعه شماره ۱ به سمت قطعه شماره ۱۱ به تدریج رو به افزایش است. بررسی چارک‌ها نیز نشان می‌دهد که در قطعات ۸

جدول ۳. محاسبه بعد بر خالی کلی در هر یک از قطعات تاقدیس بیرجند.

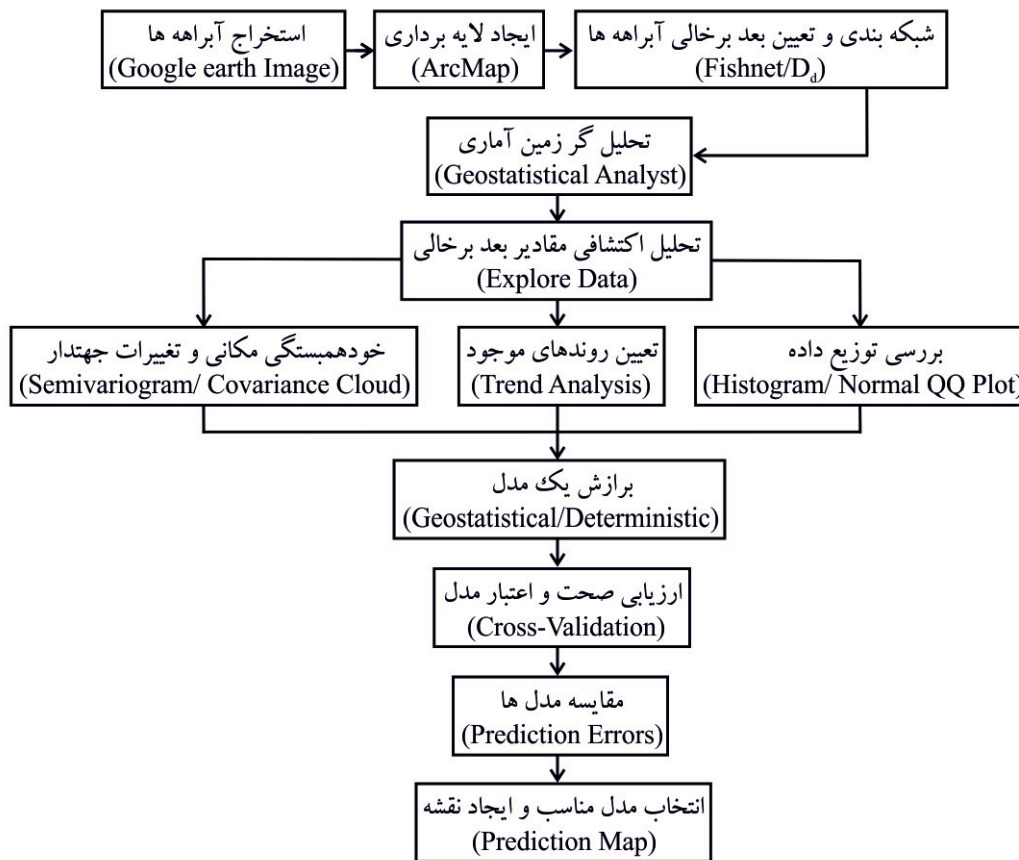
| قطعه | بعد بر خالی (D_p) | ضریب همبستگی (R^2) | تعداد مربع‌های حاوی آبراهه در شبکه‌ای با اندازه‌های متفاوت (متر) | | | | | | |
|---------------|-----------------------|------------------------|--|------|-------|-------|--------|--------|--|
| | | | ۲۰۰ | ۱۰۰ | ۵۰ | ۲۵ | ۱۲/۵ | ۶/۲۵ | |
| ۱ | ۱/۴۲۵۹ | ۰/۹۸۸۵ | ۸۸۰ | ۳۱۶۳ | ۱۰۱۱۸ | ۲۶۴۲۵ | ۵۹۹۸۰ | ۱۲۵۵۸۵ | |
| ۲ | ۱/۵۷۰۳ | ۰/۹۸۹۷ | ۱۱۴ | ۴۱۵ | ۱۵۲۵ | ۴۷۰۰ | ۱۱۶۱۰ | ۲۵۱۲۰ | |
| ۳ | ۱/۶۰۶۱ | ۰/۹۹۳۹ | ۳۳ | ۱۱۴ | ۴۰۷ | ۱۳۱۹ | ۳۵۲۷ | ۸۰۶۱ | |
| ۴ | ۱/۵۹۱۰ | ۰/۹۹۰۵ | ۳۳ | ۱۱۲ | ۴۰۶ | ۱۳۲۹ | ۳۳۱۳ | ۷۲۱۸ | |
| ۵ | ۱/۶۱۶۹ | ۰/۹۹۱۶ | ۲۶ | ۹۴ | ۳۴۴ | ۱۱۵۰ | ۲۹۵۳ | ۶۵۹۳ | |
| ۶ | ۱/۵۴۹۳ | ۰/۹۸۹۵ | ۲۱ | ۷۲ | ۲۶۵ | ۸۲۸ | ۱۹۱۷ | ۴۲۲۳ | |
| ۷ | ۱/۵۹۲۳ | ۰/۹۹۱۳ | ۳۵ | ۱۲۳ | ۴۴۱ | ۱۴۶۴ | ۳۷۲۹ | ۸۰۵۶ | |
| ۸ | ۱/۶۳۸۴ | ۰/۹۹۱۶ | ۷۴ | ۲۶۵ | ۹۹۵ | ۳۴۰۴ | ۸۹۷۹ | ۱۹۸۱۲ | |
| ۹ | ۱/۶۷۷۴ | ۰/۹۹۲۶ | ۷۴ | ۲۷۱ | ۱۰۳۱ | ۲۶۲۸ | ۹۹۲۷ | ۲۲۷۱۴ | |
| ۱۰ | ۱/۶۴۳۷ | ۰/۹۹۳۸ | ۴۶ | ۱۶۲ | ۵۹۵ | ۲۰۰۸ | ۵۴۸۹ | ۱۲۶۷۰ | |
| ۱۱ | ۱/۶۰۳۹ | ۰/۹۹۱۲ | ۸۰۹ | ۲۹۸۸ | ۱۰۸۰۴ | ۳۴۸۹۰ | ۹۰۳۵۴ | ۱۹۸۳۵۴ | |
| تاقدیس بیرجند | ۱/۵۴۴۷ | ۰/۹۹۱۰ | ۲۱۴۳ | ۷۷۷۹ | ۲۶۹۳۱ | ۸۱۱۴۵ | ۲۰۱۸۳۲ | ۴۳۸۴۰۶ | |

(به طور جداگانه و کلی) گسترده شدند (شکل ۷). به مراکز این شبکه، مقادیر محاسبه شده بعد بر خالی آبراهه‌ها نسبت داده شد. سپس تحلیل اکتشافی داده‌های مکانی با بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها و تعیین روندهای موجود انجام گردید. همچنین ساختار تغییرات مکانی بعد بر خالی آبراهه‌ها با استفاده از توابع Semivariogram و Covariance تجزیه و تحلیل شد تا وابستگی آماری (خودهمبستگی مکانی) داده‌ها مشخص شود. به منظور ایجاد نقشه پیش‌بینی، از درون‌یابی با روش‌های زمین‌آماري نظیر (Kriging) و مدل‌های قطعی وزن‌دهی معکوس فاصله بهره گرفته ایم.

۴-۲- نقشه بعد بر خالی آبراهه‌ها

برای ایجاد یک سطح پیوسته در نمایش بعد بر خالی آبراهه‌های واقع بر تاقدیس بیرجند از روش‌های زمین‌آماري استفاده شده است. تخمین زمین‌آماري فرآیندی است که طی آن می‌توان با استفاده از داده‌های یک کمیت در مختصات معلوم، مقدار مجهول همان کمیت را در نقطه‌ای با مختصات معلوم دیگر تخمین زد. در این تحقیق، برای آماده‌سازی داده‌ها، انتخاب مدل مناسب و رسم نقشه پیش‌بینی از ابزار Geostatistical Analyst در نرم‌افزار ArcMap مطابق روند نمای شکل ۶ استفاده شده است. ابتدا شبکه مربع‌های پایه بر روی قطعات تاقدیس بیرجند

1. Inverse Distance Weighting



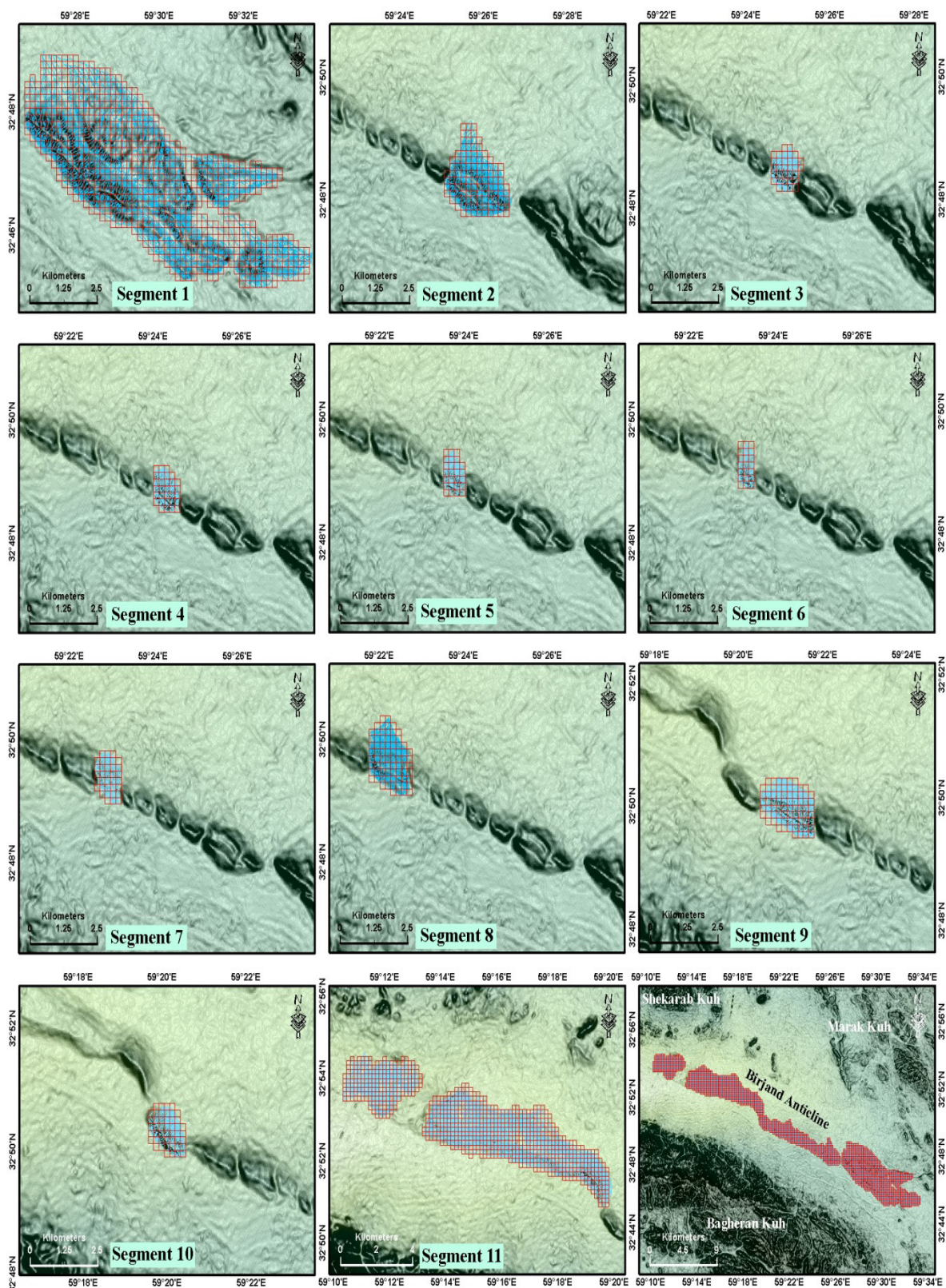
شکل ۶. روند نمای آماده‌سازی داده‌ها به منظور ایجاد نقشه پیش‌بینی بعد برخالی آبراهه‌ها در تاقدیس بیرجند.

کشیدگی و گسترش غالب منحنی‌های پیشینه بعد برخالی در راستای محور چین است. بخش‌هایی از قطعه شماره ۱۱ که به رنگ آبی نمایش داده شده است به علت وجود بافت قدیمی شهر بیرجند و نیز ساخت و سازهای پراکنده بر روی این قطعه فاقد اطلاعات آبراهه بوده و پیش‌بینی نادرستی از مقدار بعد برخالی انجام گرفته است. مناطق با بعد برخالی بالای ۱/۷ به صورت تکه‌هایی در قطعات شمال باختری چین (قطعات ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱) پراکنده شده‌اند (شکل ۹). اگرچه قطعات ۱ و ۱۱ بخش‌های انتهایی چین می‌باشند اما تغییرات بعد برخالی در این دو قابل توجه است. در خصوص علت این تفاوت‌ها در ادامه بحث می‌شود.

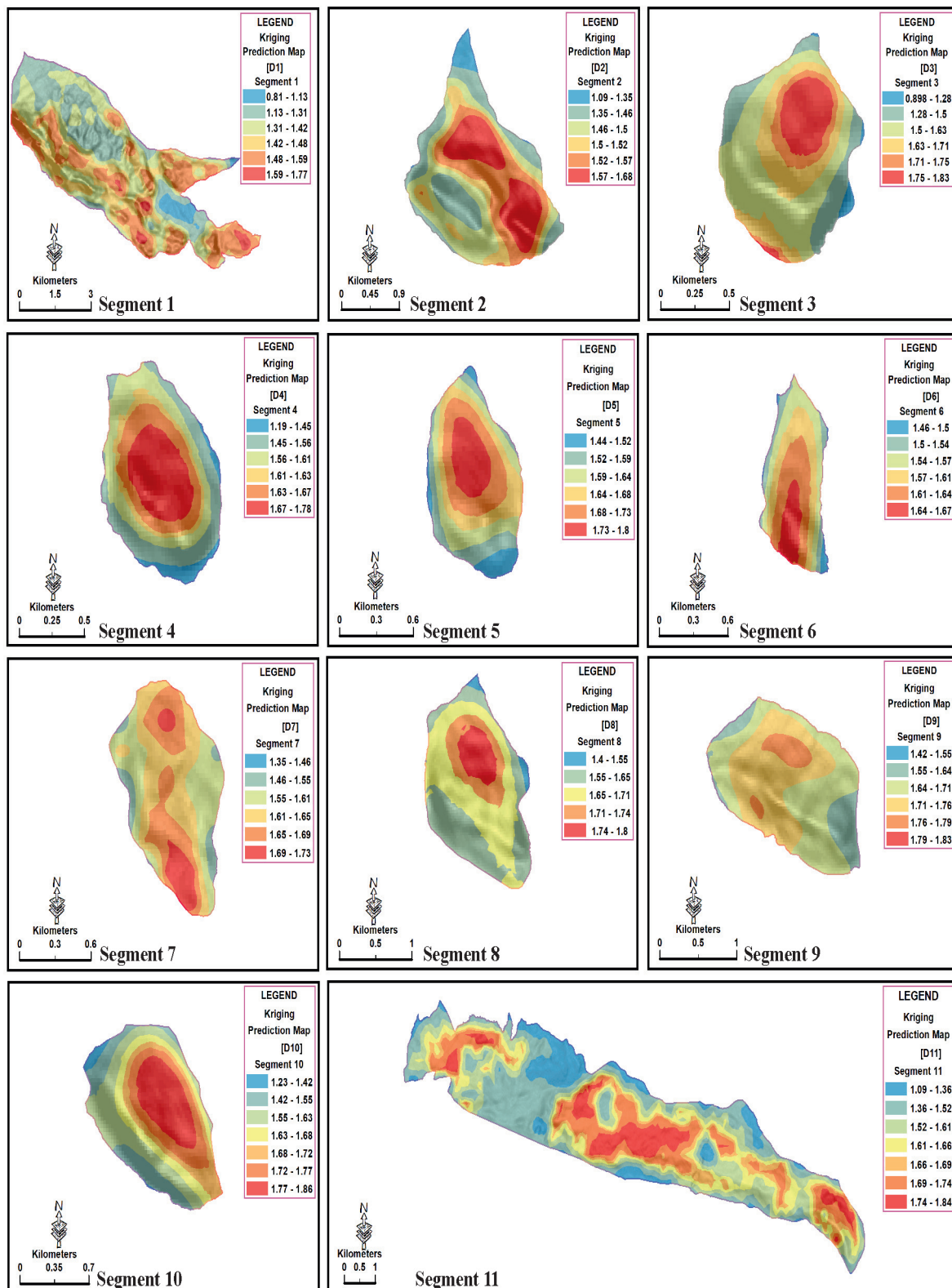
در بررسی اعتبار و درستی نقشه پیش‌بینی از جدول کنترل اعتبار تغییرنما^۱ استفاده شده است. مدل انتخابی زمانی دقیق‌ترین سطح ممکن از اطلاعات را بوجود می‌آورد که در خطاهای پیش‌بینی شده، میانگین^۲ نزدیک به صفر، ریشه میانگین مربعات^۳ و متوسط استاندارد^۴ در حد امکان کوچک و نزدیک هم و ریشه میانگین مربعات استاندارد شده^۵ به یک نزدیک شود. با در نظر گرفتن این موضوع، روش Kriging بهترین نقشه پیش‌بینی را با کمترین خطا بوجود آورد (شکل ۸).

نقشه پیش‌بینی بعد برخالی شبکه آبراهه‌ها نشان می‌دهد که نواحی با مقادیر پیشینه بر روی دامنه شمالی قطعات تاقدیس قرار گرفته‌اند.

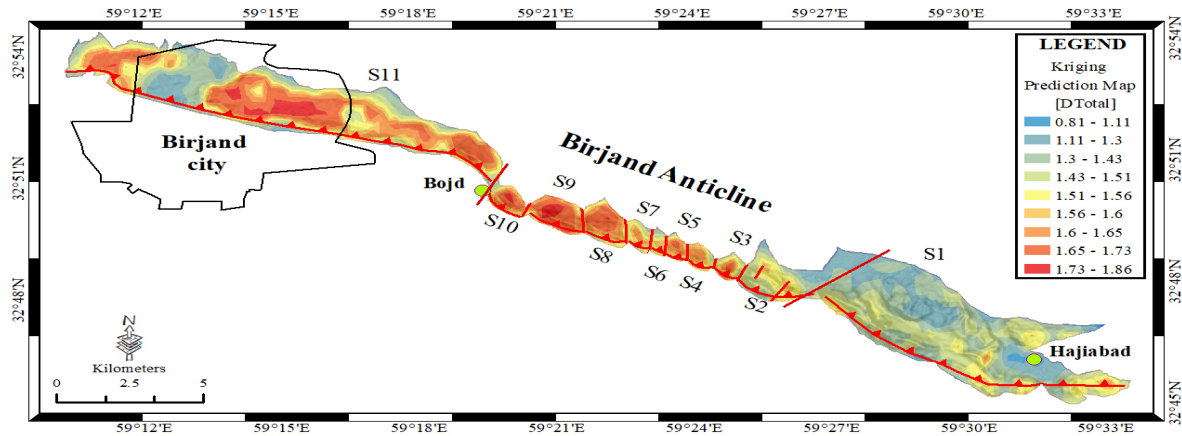
1. Cross-Validation
2. Mean
3. Root-Mean-Square
4. Average Standard
5. Root-Mean-Square Standardized



شکل ۷. قطعات تاقدیس بیرجند با شبکه‌ای متشکل از مربع‌های پایه به ابعاد 200×200 متر پوشیده شده است. مراکز مربع‌های این شبکه، مبنای ایجاد نقشه پیش‌بینی بعد بر خالی آبراهه‌ها قرار گرفته است.



شکل ۸. نقشه پیش‌بینی بعد بر خالی شبکه آبراهه‌ها با استفاده از روش Kriging در قطعات ۱-۱۱ از تاقدیس بیرجد به تفکیک آمده است.



شکل ۹. نقشه پیش‌بینی بعد بر خالی شبکه آبراهه‌ها با استفاده از روش Kriging در تاقدیس بیرجند.

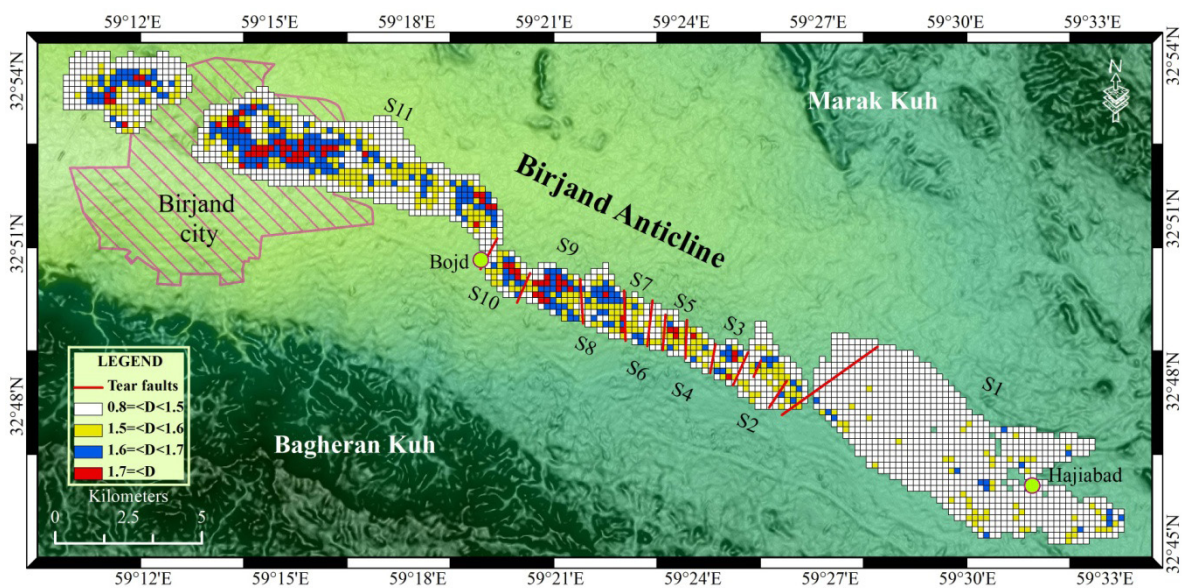
۵- بحث

۵-۱- ارتباط بعد بر خالی آبراهه‌ها با زمین‌ریخت‌شناسی و ساختار تاقدیس بیرجند

مطالعه الگوهای شبکه آبراهه‌ها به عنوان پدیده‌ای متأثر از ساختار، به صورت غیرمستقیم می‌تواند بیانگر فعالیت رانندگی‌های پنهان در منطقه باشد. به نظر می‌رسد بهره‌گیری از هندسه بر خالی بتواند با کمی کردن این موضوع کارگشا باشد. اما لازمه اندازه‌گیری بعد بر خالی پدیده‌ها، تشخیص خودهمسانی و خودخویشی آنها است که الگوهای زهکشی این دو خصوصیت را از لحاظ آماری نشان می‌دهند. در تحلیل بر خالی الگوی زهکشی

آبراهه‌ها در تاقدیس بیرجند سوال اساسی این است که چگونه بر خالی به‌عنوان یک روش ریاضی می‌تواند به درک پویایی ساختار چین‌خوردگی کمک کند؟ تفاوت در ابعاد بر خالی در قطعات مختلف تاقدیس بیرجند بیانگر چه موضوعی است؟

بر روی تاقدیس بیرجند، پنجره‌های با ابعاد بر خالی متفاوت توزیع شده‌اند (شکل ۱۰). به منظور تعیین اثر نشیب، ارتفاع، سنگ‌شناسی و ویژگی هندسی چین بر الگوی آبراهه‌ها، فراوانی نسبی مقادیر بعد بر خالی شبکه آبراهه‌ها را در نشیب‌ها، ارتفاعات و واحدهای سنگی مختلف محاسبه کرده‌ایم که در جداول ۴، ۵ و ۶ ارائه شده است.



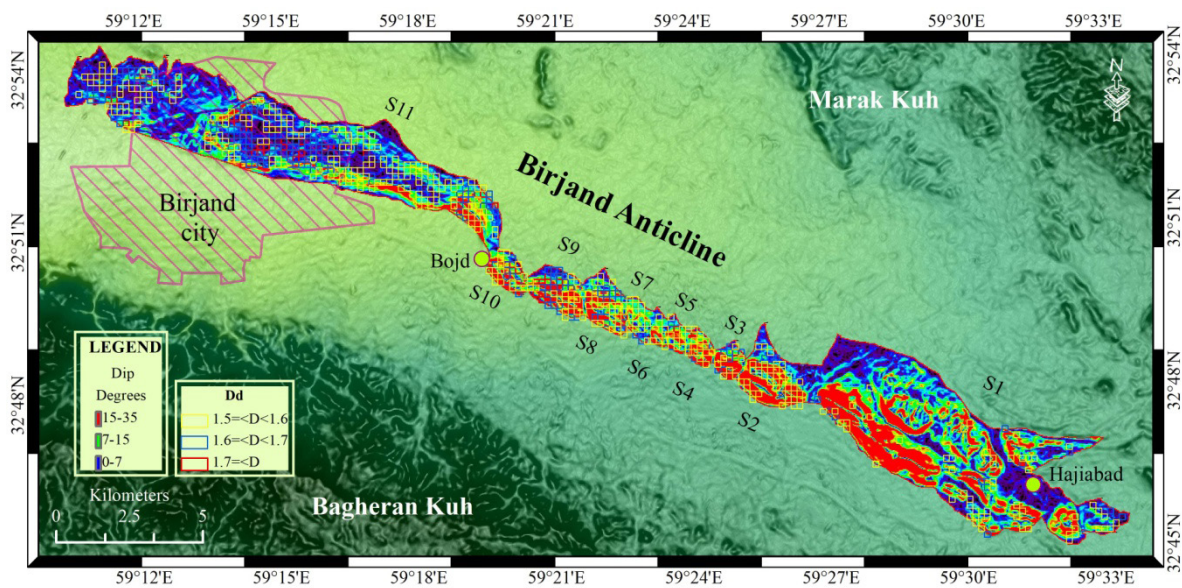
شکل ۱۰. توزیع مکانی پنجره‌های با ابعاد بر خالی متفاوت در تاقدیس بیرجند.



راندگی بیرجند ارتباط دارد چرا که شیب صفحه گسل به سمت شمال خاوری است و با رشد گسل، یال جنوبی چین پر شیب‌تر و یال شمالی با شیب ملایم شکل می‌گیرد. در این حالت آبراهه‌ها در یال شمالی چین فرصت کافی برای شاخه‌شاخه شدن و افزایش طول در گستره سطح را داشته‌اند اما در دامنه جنوبی از گسترش سطحی آبراهه‌ها جلوگیری شده و الگوی آبراهه‌ها به طرح موازی نزدیک شده است.

۵-۱-۱- تغییرات بعد برخالی آبراهه‌ها با شیب

مطابق جدول ۴، ۶۸٪ کل پنجره‌ها در شیب زیر ۱۵ درجه و ۳۲٪ در شیب ۱۵-۳۰ درجه واقع شده‌اند. توزیع پنجره‌های با بعد برخالی بالا در مناطق با شیب کمتر از ۷ درجه به ۴۵٪ می‌رسد که این میزان در شیب‌های زیر ۱۵ درجه بیشتر از ۷۰٪ است (شکل ۱۱). پنجره‌هایی که بیشترین مقادیر بعد برخالی را دارند در بخش‌های شمالی توزیع شده‌اند. این موضوع به هندسه چین و عملکرد



شکل ۱۱. توزیع مکانی پنجره‌های با ابعاد برخالی متفاوت در شیب‌های مختلف.

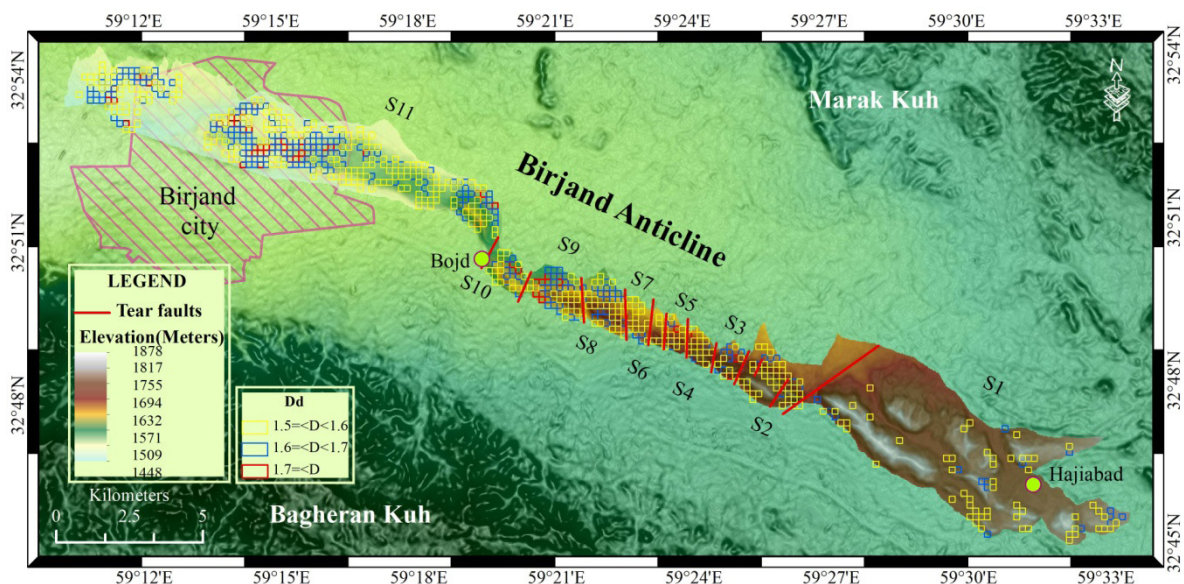
جدول ۴. محاسبه فراوانی نسبی پنجره‌هایی با مقادیر بعد برخالی متفاوت در شیب‌های مختلف.

| رده | شیب (درجه) | فراوانی | | | | | فراوانی نسبی (درصد) | | | | |
|-----|---------------|--|-----|-----|-----|------|---------------------|-----|-----|-----|-----|
| | | پنجره‌هایی با مقادیر بعد برخالی متفاوت | | | | | | | | | |
| | | ۰/۸ | ۱/۵ | ۱/۶ | ۱/۷ | کل | ۰/۸ | ۱/۵ | ۱/۶ | ۱/۷ | کل |
| ۱ | ۰-۷ | ۶۳۵ | ۱۸۴ | ۱۳۲ | ۳۳ | ۹۸۴ | ۴۷ | ۴۷ | ۵۱ | ۴۱ | ۴۷ |
| ۲ | ۷-۱۵ | ۲۴۱ | ۱۰۲ | ۶۲ | ۳۰ | ۴۳۵ | ۱۸ | ۲۶ | ۲۴ | ۳۸ | ۲۱ |
| ۳ | ۳۰-۱۵ | ۴۸۲ | ۱۰۹ | ۶۶ | ۱۷ | ۶۷۴ | ۳۵ | ۲۷ | ۲۵ | ۲۱ | ۳۲ |
| جمع | | ۱۳۵۸ | ۳۹۵ | ۲۶۰ | ۸۰ | ۲۰۹۳ | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰ |

سطح، آبراهه‌ها در سطح زمین پخش و بعد برخالی به عدد ۲ نزدیک می‌شود (Turcotte, 2007). بدین ترتیب چون بعد برخالی از جنوب خاور به شمال باختر افزایش یافته است، پس می‌بایست از ارتفاع چین در این مسیر کاسته و به حالت مسطح نزدیک شود. این نتیجه با آنچه که در تصویر مدل رقومی ارتفاعی زمین مشاهده می‌شود هم‌خوانی دارد (شکل ۱۲). به طوری که از سمت جنوب خاوری به شمال باختری گسل، همواره از ارتفاع تاقدیس کاسته شده و این ارتفاعات در نزدیک شدن به کوهستان شکراب به دشت تبدیل می‌شوند. حتی در قطعه شماره ۱۱ ستیغ چین پهن و مسطح می‌شود به گونه‌ای که بخشی از ساخت و سازهای شهر بیرجند بر روی آن بنا شده است. این موضوع برخاستگی بیشتر بخش جنوب خاوری نسبت به شمال باختری چین را تبیین می‌کند.

۵-۱-۲- تغییرات بعد برخالی آبراهه‌ها با ارتفاع

ارتفاع تاقدیس بیرجند بین ۱۸۷۸-۱۴۴۸ متر از سطح تراز آب‌های آزاد متغیر است که حدود ۴۳۰ متر اختلاف ارتفاع بین قطعات مختلف چین وجود دارد (شکل ۱۲). مطابق جدول ۵، ۲۲٪ کل پنجره‌ها در ارتفاع بالای ۱۷۳۴ متر قرار دارد. توزیع پنجره‌های با بعد برخالی بالا در این مناطق زیر ۱۵٪ است. بیش از ۶۰٪ پنجره‌هایی با ابعاد برخالی بالا در مکان‌هایی از چین توزیع شده‌اند که ارتفاع زیر ۱۵۹۱ متر دارند. پراکنش پنجره‌هایی با بعد برخالی بالا، از قطعات واقع در جنوب خاور به سمت شمال باختر افزایش می‌یابد. در توپوگرافی مرتفع و پر شیب، آبراهه‌ها به الگوی خطی تمایل پیدا می‌کنند، در این صورت بعد برخالی، کاهش یافته و به عدد یک نزدیک می‌شود. برعکس، در توپوگرافی پست و



شکل ۱۲. توزیع مکانی پنجره‌های با ابعاد برخالی متفاوت در ارتفاعات مختلف.

جدول ۵. محاسبه فراوانی نسبی پنجره‌هایی با مقادیر بعد برخالی متفاوت در ارتفاعات مختلف.

| رده | ارتفاع | فراوانی نسبی (درصد) | | | | | | | | | |
|-----|-----------|--|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | فراوانی | | | | | | | | | |
| | | پنجره‌هایی با مقادیر بعد برخالی متفاوت | | | | | | | | | |
| | | ۰/۸ | ۱/۵ | ۱/۶ | ۱/۷ | کل | ۰/۸ | ۱/۵ | ۱/۶ | ۱/۷ | کل |
| ۱ | ۱۴۴۸-۱۵۹۱ | ۷۶۸ | ۱۹۰ | ۱۷۱ | ۵۹ | ۱۱۸۸ | ۵۶ | ۴۸ | ۶۶ | ۷۴ | ۵۷ |
| ۲ | ۱۵۹۱-۱۷۳۴ | ۱۹۰ | ۱۴۸ | ۷۲ | ۲۱ | ۴۳۱ | ۱۴ | ۳۷ | ۲۸ | ۲۶ | ۲۱ |
| ۳ | ۱۷۳۴-۱۸۷۸ | ۴۰۰ | ۵۷ | ۱۷ | ۰ | ۴۷۴ | ۳۰ | ۱۵ | ۶ | ۰ | ۲۲ |
| جمع | | ۱۳۵۸ | ۳۹۵ | ۲۶۰ | ۸۰ | ۲۰۹۳ | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰ |

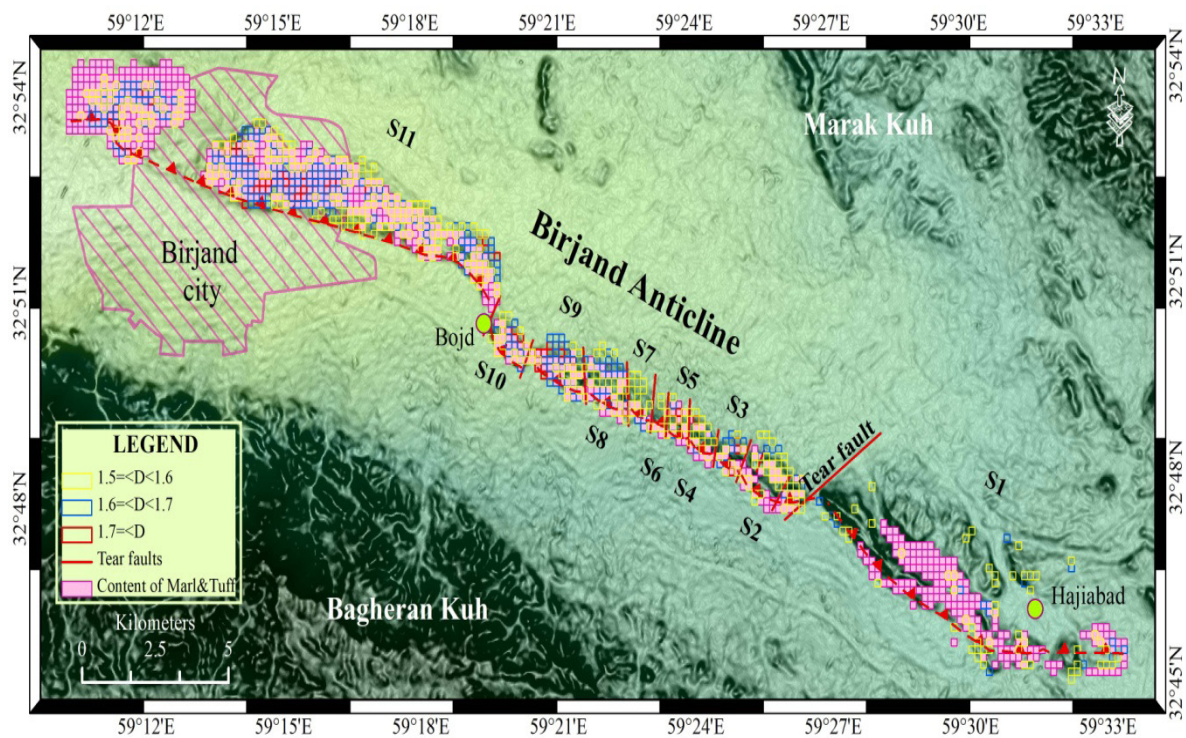


۵-۱-۳- تغییرات بعد برخالی آبراهه‌ها با سنگ‌شناسی

در شکل ۱۳ مناطقی که واحدهای مارن و توف‌های نئوژن به سطح رسیده‌اند نشان داده شده است. مطابق جدول ۶ پنجره‌هایی که فاقد مارن‌اند تنها ۱۵٪ آنها ابعاد برخالی بیشتر از ۱/۵ دارند و در پنجره‌های حاوی مارن و توف ۵۷٪ مربع‌ها بعد برخالی بالای ۱/۵ دارند. پنجره‌هایی با بعد برخالی پایین در قطعه شماره ۱ توزیع شده است. سنگ‌شناسی این قطعه بخصوص به سمت جنوب خاور توده‌های آندزیت، آگلومرا است که گسترش کمتر شبکه زهکشی و به تبع آن کاهش بعد برخالی را باعث می‌شود. عملکرد راندگی پنهان بیرجند، بخش‌هایی از رسوبات ریز دانه (نظیر رس و مارن) را در راستای گسل‌های منشعب شده از گسل اصلی در نواحی هسته تاقدیس به سطح آورده و در شکل‌گیری الگوی آبراهه‌ها نقش ایفا کرده است (علیمی، ۱۳۹۴) (شکل ۱۴-ج). در این نواحی شدت تراکم آبراهه‌ها بالا رفته و الگوی آبراهه‌ها به داربستی و درختی غالب می‌شود. ظهور اراضی هزاردره‌ای و به تبع آن سامانه زهکشی متراکم، باعث بالا رفتن بعد برخالی به مقدار بیش از ۱/۵ در تعداد قابل توجهی از پنجره‌های واقع بر این بخش‌ها شده است.

۵-۱-۴- ارتباط بعد برخالی آبراهه‌ها با هندسه چین

پنجره‌ای با بالاترین مقدار بعد برخالی (۱/۸) در قطعه شماره ۱۰ واقع است. این پنجره از نظر مکانی، در محل جدایش قطعات ۱۰ و ۱۱ توسط گسل پارگی بجد قرار دارد. خمیدگی پلکانی تاقدیس بیرجند در این منطقه نشان از دگرریختی و فعالیت بالای این قطعات دارد. اگرچه نشیب کم، ارتفاعات پست و واحدهای سست مارن و توف در تاقدیس بیرجند باعث بالا رفتن بعد برخالی شبکه آبراهه‌ها شده است؛ اما این عوامل به هندسه و روند تکاملی چین وابسته‌اند بدین صورت که تاقدیس بیرجند نوعی چین پیشروی گسلی است که با رشد و پیشروی گسل راندگی پنهان زیرین، لایه‌های چین خورده به تدریج با گسل‌های معکوس و رانده بریده و بالا می‌آیند. گرایش تاقدیس بیرجند نیز به سوی جنوب باختری است که شیب تند یال جنوبی و شیب ملایم یال شمالی را سبب شده است. پنجره‌هایی از قطعه شماره ۱۱ که بیشترین مقدار بعد برخالی را دارند ناشی از ستیغ پهن چین به همراه گسترش سطحی واحدهای مارن در این قطعه است.

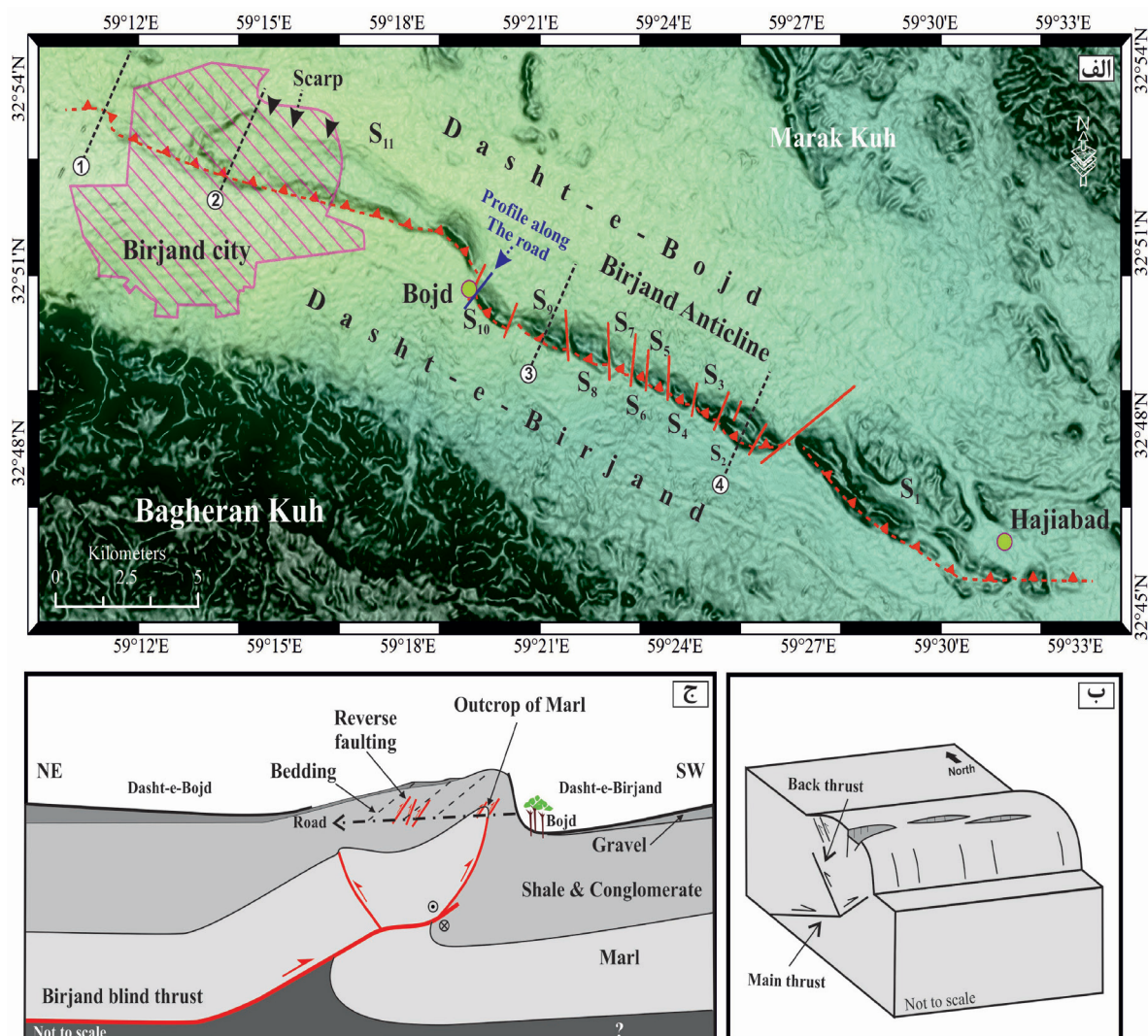


شکل ۱۳. توزیع مکانی پنجره‌های با ابعاد برخالی متفاوت در واحدهای مارن و توف.



جدول ۶. محاسبه فراوانی نسبی پنجره‌هایی با مقادیر بعد برخالی متفاوت در مناطق با سنگ‌شناسی مختلف.

| رده | بعد برخالی | فراوانی نسبی (درصد) | | | |
|-----|------------|---------------------|-----------|-----------|-----------|
| | | فراوانی پنجره‌های | | فراوانی | |
| | | حاوی مارن | فاقد مارن | حاوی مارن | فاقد مارن |
| ۱ | ۰/۸-۱/۵ | ۴۲۳ | ۴۳ | ۱۰۰۴ | ۸۵ |
| ۲ | ۱/۵-۱/۶ | ۲۶۵ | ۲۷ | ۱۳۰ | ۱۱ |
| ۳ | ۱/۶-۱/۷ | ۲۱۹ | ۲۲ | ۴۱ | ۳ |
| ۴ | ۱/۷-۱/۸ | ۷۵ | ۸ | ۵ | ۱ |
| جمع | | ۹۸۲ | ۱۰۰ | ۱۱۸۰ | ۱۰۰ |



شکل ۱۴. الف- تصویر توپوگرافی SRTM از تاقدیس بیرجند؛ ب- طرح ساختاری شکل‌گیری تاقدیس بیرجند (Walker and Khatib, 2006)؛
ب- نیم‌رخ چین در امتداد جاده آسفالت‌بده بجد، الگوی بالاآمدگی واحدهای مارن در راستای گسل‌های معکوس منشعب شده از راندگی پنهان
بیرجند را نشان می‌دهد (علیمی، ۱۳۹۴ با تغییرات).



۵-۲- ارائه الگوی ساده رشد تاقدیس بیرجند

تلاش محققینی نظیر (Suppe, 1983; Jamisom, 1987; McClay, 1992; Mitra, 2002) در درک ارتباط چین-گسل در کمربندهای رانده و معرفی الگوهای هندسی و جنبشی بین آنها، منجر به معرفی دو گروه از ساختارها گردید: گسل‌های همراه چین^۱ و چین‌های مرتبط با گسل^۲. ارتباط این ساختارها با ذخایر هیدروکربنی و نیز رخداد‌های لرزه‌ای پنهان اهمیت دارد و با وقوع زمین‌لرزه‌های فاقد گسلش سطحی در کالیفرنیا (دهه هشتاد میلادی) توجه محققین را بیش از گذشته به خود جلب کرد. از آنجا که در گسل‌های پنهان، گسل اصلی به سطح نمی‌رسد با دگرریختی‌های سطحی نظیر چین خوردگی، گسل‌های ثانویه و شکستگی‌ها نمود می‌یابند (Lettis et al., 1997).

ساختار تاقدیس بیرجند در اثر فرایندهای گسلش، چین خوردگی و کج شدگی واحدهای نشوژن و کواترنری شکل گرفته است. شواهد توپوگرافی سطحی نظیر ستیغ پهن و وجود افرازهای خطی آشکار با شیب مخالف در یال‌های شمالی و جنوبی تاقدیس بیرجند نشانه عملکرد گسل راندگی در عمق کم (به احتمال ۲ کیلومتر) است (Walker & Khatib, 2006; ib, 2006). گرایش غالب چین به سمت جنوب با محوری که نزدیک به یال جنوبی است نمای نامتقارنی را به چین می‌دهد و بیانگر وجود گسل اصلی در زیر یال جنوبی است. در الگوی ارائه شده توسط (Walker & Khatib, 2006)، رشد چین با ایجاد گسل‌های عادی نزدیک به محور چین و گسل‌های راندگی ثانویه‌ای که به سمت جنوب شیب دارند و یال شمالی چین را بریده‌اند، همراه می‌شود (شکل ۱۴-ب). وجود گسل‌های معکوس با شیب به سمت جنوب و نیز افرازهای گسلی در شمال تاقدیس (شکل ۱۳-الف) نشانه وجود راندگی‌های پستی^۳ در زیر یال شمالی می‌باشد. مطالعات این

محققین در قطعه شماره ۱۱ چین، در راستای ترانسه‌هایی که به منظور احداث جاده ایجاد شده‌اند، انجام گرفته است. مقطع عرضی ترسیم شده در راستای جاده بجد (قطعه شماره ۱۰)، علاوه بر وجود گسل‌های امتدادلغز شمالی-جنوبی، گسل‌های معکوس با شیب زیاد (به سمت شمال) را نشان می‌دهد که به سطح رسیده‌اند و واحدهای مارن زیرین را به همراه خود بالا آورده‌اند (شکل ۱۴-ج) (علیمی، ۱۳۹۴). بنظر می‌رسد دگرریختی در راستای گسل‌هایی که از راندگی پنهان بیرجند جدا شده‌اند و نیز گسل‌های ثانویه سطحی توزیع می‌شود.

شکل ۱۵ الگوی ساده‌ای از رشد پیشرونده تاقدیس بیرجند را نشان می‌دهد. در این الگو رشد چین در بالای خط لبه^۴ راندگی شکل می‌گیرد و دگرریختی در اطراف این خط با تغییر در شیب لایه‌های چین خورده آشکار می‌شود (شکل ۱۵-الف-ب). سپس در فرادیواره، راندگی پستی ایجاد می‌گردد (شکل ۱۵-ج). این راندگی در توزیع واتنش بین یال پستی چین خوردگی و توسعه گسل اصلی نقش دارد. در رشد پیشرونده چین به تدریج به ارتفاع چین افزوده شده و ستیغ چین باریک‌تر می‌شود (شکل ۱۵-د). با افزایش واتنش گسل جدیدی از گسل اصلی جدا شده که بر اساس واژه‌نامه (McClay, ۱۹۹۲) می‌توان ساخت بادزن پولکی^۵ را به آن نسبت داد (شکل ۱۵-ه). رسم مقاطع توپوگرافی در بخش‌های مختلف چین نیز این تکامل را نشان می‌دهد (مقاطع ۴-۱ در شکل ۱۵-ب-ه). بنظر می‌رسد تاقدیس بیرجند در قطعات جنوب خاوری به بلوغ ساختاری رسیده است و چین به سمت شمال باختر با نزدیک شدن به گسل شکراب در دشت بیرجند در حال شکل‌گیری است. همچنین قطعه شماره ۱۱ چین با ارتفاع کم و ستیغ پهن در مراحل میانی بلوغ قرار دارد.

1. Fold-accommodation faults
2. Fault related fold
3. Back thrust
4. Tip line
5. Imbricate fan



برشی پنهان فعال (خاور ایران - خراسان جنوبی)، رساله دکتری، گروه زمین شناسی، دانشگاه بیرجند، ۱۷۹ صفحه.

فخاری، س.، ۱۳۸۵، تحلیل خطر زمین لرزه با استفاده از GIS و روش محاسباتی و بررسی چین خوردگی در ارتباط با گسلش در دشت بیرجند، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه زمین شناسی، دانشگاه بیرجند، ۲۲۰ صفحه.

References

- Alvarez-Ramirez, J., Echeverria, J.C., Ortiz-Cruz, A. and Hernandez, E., 2012- Temporal and spatial variations of seismicity scaling behavior in Southern México. *Journal of Geodynamics*, v. 54, 1– 12.
- Berberian, M., 1979- Earthquake faulting and bedding thrust associated with the Tabas-e-Golshan (Iran) earthquake of September 16, 1978. *Bull. Seismol. Soc. Am*, v. 69, 1861–1887.
- Berberian, M., 2014- Earthquakes and Coseismic Surface Faulting on the Iranian Plateau. Elsevier, 699.
- Berberian, M., Jackson, J.A., Qorashi, M., Talebian, M., Khatib, M.M. and Priestley, K., 2000- The 1994 Sefidabeh earthquakes in eastern Iran: Blind thrusting and bedding-plane slip on a growing anticline, and active tectonics of the Sistan suture zone. *Geophys. J. Int.*, v. 142, 283–299.
- Hirata, T., Satoh, T. and Ito, K., 1987- Fractal structure of spatial distribution of microfracturing in rock. *Geophys. J. R. Astron. Soc*, v. 90, 369-374.
- Howard, A.D., 1967- Drainage analysis in geologic interpretation: A summation. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, v. 51, 2246–2259.
- Jamison, W.R., 1987- Geometric analysis of fold development in overthrust terranes. *Journal of Structural Geology*, v. 9, No.2, 207–219.
- Kusák, M., 2014- Review article: Methods of fractal geometry used in the study of complex geomorphic networks. *AUC Geographica*, v. 49, 99–110.
- Lettis, W.R., D.L. Wells, and J.N. Baldwin 1997- , »Empirical Observations Regarding Reverse Earthquakes, Blind Thrust Faults, and Quaternary Deformation: Are Blind Thrust Faults Truly Blind?». *Bulletin of the Seismological Society of America*, v.87-5, 1171-1198.
- Mandelbrot, B.B., 1967- How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*, v. 156, 636–638.
- Mandelbrot, B.B., 1982- *The Fractal Geometry of Nature*. Freeman, San Francisco, 504.

منابع

- عسگرپور، ز.، ۱۳۸۸، تحلیل هندسی - جنبشی گسلش تراگذر در تاقدیس بیرجند، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه زمین شناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ۱۳۴ صفحه.
- علیمی، م.ا.، ۱۳۹۴، ارزیابی لرزه زمین ساختی پهنه های

- McClay, K.R., 1992- Thrust tectonics. Chapman & Hall press, London, 447.
- Mitra, S., 2002- Fold accommodation faults. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 86, No.4, 671-693.
- Suppe, J., 1983- Geometry and Kinematics of fault-bend folding. *American Journal of Science*, v. 283, 684-721.
- Talebian, M., Fielding, E.J., Funning, G.J., Ghorashi, M., Jackson, J., Nazari, H., Parsons, B., Priestley, K., Rosen, P.A., Walker, R. and Wright, T.J., 2004- The 2003 Bam (Iran) earthquake: Rupture of a blind strikeslip fault. *Geophys. Res. Lett.*, v. 31, GL020058.
- Turcotte, D.L., 1997- Fractals and chaos in geology and geophysics. Cambridge University Press, Cambridge, 378.
- Turcotte, D.L., 2007- Self-organized complexity in geomorphology: Observations and models. *Geomorphology*, v.91, 301-310.
- Voss, R.F., 1988- Fractal in nature: From characterization to simulation. *The science of fractal images*, Springer, 21–70.
- Walker, R. and Khatib, M.M., 2006- Active faulting in the Birjand region of NE Iran. *Tectonics* v. 25, TC4016.
- Walker, R., Jackson, J. and Baker, C., 2003- Surface expression of thrust faulting in eastern Iran. source parameters and surface deformation of the 1978 Tabas and 1968 Ferdows earthquake sequences. *Geophys. J. Int.*, v. 152, p. 749–765.
- Walker, R.T. and Jackson, J.A., 2004- Active tectonics and late Cenozoic strain distribution in central and eastern Iran. *Tectonics*, v. 23, TC5010.
- Xu, T., Moore, I. and Gallant, J., 1993- Fractals, fractal dimensions and landscapes- a review. *Geomorphology*, v.8, 245-262.
- Zhao, J., Chen, C., Zuo, R. and Carranza, E.G.M., 2011- Mapping complexity of spatial distribution of faults using fractal and multifractal models. *Vectoring towards exploration targets*.
- *Computers and Geosciences*, v. 37, 1958–1966.

Geomorphology and growth analysis of the Birjand blind thrust-related anticline by variations in the fractal dimension of drainage patterns

Mohammad Amir Alimi *

1. Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Faculty of Mining, Civil and Chemistry, Birjand University of Technology, Birjand, Iran.



Abstract:

The Birjand anticline is a type of the fault propagation fold that is formed above a blind thrust fault and is divided into 11 segments by 12 tear faults. In this research, the Late Cenozoic deformation associated with the Birjand blind thrust has been evaluated. To this end, the fractal dimension of drainage patterns and its statistical properties is calculated on the Birjand anticline. Accordingly, the spatial distribution of windows with the fractal dimensions close to 2 are within the regions that are low slope, low height and marl-tuff units. These windows are more relative frequency in the northern limb of the fold, also to the northwest end segments (10 and 11). This issue is related to a gentle back-limb of the fold and flat crest of the end segment 11. For Birjand anticline toward northwest, lateral growth of the fold is clearly at the Dasht-e Birjand and close to the Shekarab kuh to form as gently-dipping alluvial fans deposited. In the progressive stages of the Birjand anticline growth, segments from northwest to the southeast have grown more structurally mature and the values of the fractal dimension are lower. In the back-limb and flat crest of the fold, the drainage patterns are closer to trellis and dendritic and the fractal dimension approaches to 2 and in the fore limb are intermediate and steep slope, the drainage patterns are varies to parallel and the fractal dimension is decreasing. The surface deformation due to the Birjand blind thrust geometry controls the pattern and density of the drainage network by effects of topography and lithology and the result is a high the fractal dimension in the region with more active tectonic.

Keywords: fractal, drainage pattern, active fold, fault segment, eastern Iran.

* malimi@birjandut.ac.ir