

مدل‌سازی مؤلفه‌های مورفومتری دولین‌ها و ارائه شاخص بعد فرکتال در مطالعه گسل‌های مناطق

کارستی (مطالعه موردی: مناطق کارستی بین پرآو و شاهو)

سیدمحمد زمان زاده - دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.
اسماعیل پاریزی* - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.
مهدی امینی - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۱۸ تائید نهایی: ۱۳۹۷/۰۱/۲۸

چکیده

دولین یکی از لندفرم‌های شاخص مناطق کارستی است که در اثر عوامل و فرآیندهای گوناگونی شکل می‌گیرد. مطالعه مورفومتری این عوارض علاوه بر اینکه یک تحلیل کمی از محیط‌های کارستی را فراهم می‌کند، بلکه مقایسه پارامترهای متنوع دولین‌ها ممکن است منجر به طرح فرضیاتی در مورد نحوه تکامل آن‌ها شود. هدف از این پژوهش تجزیه و تحلیل کمی مؤلفه‌های مورفومتری دولین‌ها جهت مدل‌سازی و ارائه شاخص بعد فرکتال گسل‌ها برای ارزیابی فعالیت گسل‌ها در مناطق کارستی بین پرآو و شاهو است. در این راستا از روش‌های ژئومورفومتری، CCLs، شمارش جعبه‌ای هاسدورف و تکنیک‌های آنالیز رگرسیون استفاده شده است تا امکان تحلیل رگرسیون، مدل‌سازی و حل تابع لگاریتمی $\text{Number} - \text{Size}$ فراهم شود. نتایج آنالیز رگرسیون خطی تک متغیره نشان‌دهنده این است که مؤلفه‌های محیط با قطر بزرگ، قطر کوچک با محیط، قطر بزرگ با مساحت، مساحت با محیط و عمق با مساحت به ترتیب با ضرایب تبیین ۰/۹۳، ۰/۸۶، ۰/۸۵، ۰/۸۳ و ۰/۶۶۸ از بیشترین میزان همبستگی معنی‌دار برخوردارند. همچنین حداکثر ارتباط معنی‌داری برای روابط درجه ۲ و ۳ در سطح معنی‌داری ۰/۹۹، بین مؤلفه‌های مساحت و محیط با ضرایب تبیین ۰/۹۴ و ۰/۹۴۵ و خطای برآورد ۰/۰۵ و ۰/۰۴ وجود دارد. نتایج رگرسیون چند متغیره خطی نیز مؤید ارتباط معنی‌دار عمق با پارامترهای شیب، قطر کوچک و مساحت با ضریب تبیین ۰/۸۳۴ و خطای برآورد ۰/۸۵ است. تخمین بعد فرکتال در مناطق مورد مطالعه مؤید آن است که منطقه شاهو و پرآو به ترتیب با مقادیر ۱/۲۴ و ۱/۱۵ دارای بیشینه و کمینه ابعاد فرکتالی گسل‌ها می‌باشند. در واقع ارزیابی میزان فعالیت گسل‌ها به وسیله هندسه فرکتال نشان داد که معادله $\text{Number} - \text{Size}$ و شاخص بعد فرکتال روشی مناسب جهت ارزیابی گسل‌ها در مناطق کارستی می‌باشند.

واژگان کلیدی: دولین، مورفومتری، آنالیز رگرسیون، بعد فرکتال، معادله $\text{Number} - \text{Size}$.

مقدمه

کارست یک سیستم ژئومورفیک و هیدرولوژی است که توسط انحلال سنگ‌های انحلال‌پذیر مانند سنگ آهک، دولومیت و ژیبس شکل می‌گیرد (آزیورت ۱ و همکاران، ۲۰۱۴). به بیان دیگر کارست نوعی چشم‌انداز است که در سنگ‌های کربناته (سنگ آهک، دولومیت و مرمر) یا تبخیری (ژیبس، آیدریت و سنگ نمک) تشکیل می‌شود و توسط مجموعه‌ای از لندفرم‌ها مانند چشمه‌ها، دولین‌ها، غارها، فروچاله‌های ریزش کرده و لندفرم‌های رسوبی کربناته مشخص می‌شود (فورد و ویلیامز، ۲۰۱۳؛ تیلن ۳ و همکاران ۲۰۱۴). این مناطق دارای محیط‌های بسیار شکننده هستند، تقریباً ۱۲ درصد قاره‌ها را پوشش داده‌اند (فنگ ۴ و همکاران، ۲۰۱۶؛ پاریز ۵ و همکاران، ۲۰۰۹؛ ژانگ ۶ و همکاران، ۲۰۱۴) و ویژگی بارز آن‌ها وجود لندفرم‌های مشخص مرتبط با انحلال و یک شبکه زهکشی مسلط زیرسطحی است (گوتیرز ۷ و همکاران، ۲۰۱۴).

توسعه یک سیستم کارستی به عواملی از جمله اقلیم، لیتولوژی و عوامل ساختمانی (چین، گسل و درزه) بستگی دارد. در این میان اشکال کارستی رابطه نزدیکی با ساختارهای تکتونیکی دارند؛ در واقع تخلخل و نفوذپذیری در امتداد مناطق شکسته شده در واحدهای کربناته توسعه کارست را افزایش می‌دهد (انس ۸ و همکاران، ۲۰۱۵). علاوه بر این درزه‌ها و گسل‌ها به همراه سطوح لایه‌بندی، نه تنها مناطق ضعف را در سنگ بستر تشکیل می‌دهند و منجر به فرسایش متمرکز می‌شوند (لیس و میلروی ۹، ۲۰۱۳)، بلکه آن‌ها اشکال و رفتارهای متنوعی که در سیستم‌های کارستی وجود دارد را تعیین می‌کنند (فورد و ویلیامز، ۲۰۱۳). مهم‌ترین لندفرم‌ها در چشم‌اندازهای رخنمون یافته کارستی شامل: پهنه‌های کارنی، دولین‌ها و حفره‌های بلعنده می‌باشند. این اشکال بر روی سطح زمین معمولاً ولی نه الزاماً، در امتداد مناطقی که دچار درز و شکستگی شده است، ایجاد می‌شوند (کواچیچ و راوبار، ۲۰۱۳). در این بین به چاله‌های بسته کارستی کوچک تا متوسط بدون توجه به زمینه پیدایش و اقلیمی آن‌ها دولین می‌گویند و یکی از دلایل شکل‌گیری آن‌ها این است که غارهای اولیه که از نقاط تغذیه گسترش می‌یابند، به یک چشمه یا مجرای غار قدیمی‌تر متصل شوند. زمانی که این پیوندها شکل بگیرد، مقاومت نسبت به جریان عبوری از میان سنگ آن‌قدر زیاد است که اجازه جابجایی مقادیر کافی آهک را می‌دهد تا منجر به شکل‌گیری چاله‌ای در اندازه دولین شود (فورد و ویلیامز، ۲۰۱۳). دولین‌ها به وسیله فرآیندهای مختلفی شکل می‌گیرند که شامل: ۱. دولین‌های انحلالی و دولین‌های فروریزی که در کارست‌های برهنه به وجود می‌آیند، ۲. دولین‌های ریزشی ۱۰ و پر شده ۱۱ در کارست‌های پوششی ایجاد می‌شوند و ۳. دولین‌های فرونشینی / تراکمی که در کارست‌های مدفون تشکیل می‌شوند (فورد و ویلیامز، ۲۰۱۳؛ پرین ۱۲ و همکاران، ۲۰۱۵؛ والتهام ۱۳ و همکاران، ۲۰۰۷). هنگامی که دولین‌ها یافت شوند کارست همیشه توسعه یافته است بنابراین آن‌ها می‌توانند شاخص‌های لندفرمی کارست در نظر گرفته شوند (فورد و ویلیامز، ۲۰۱۳). تجزیه و تحلیل مورفومتریک لندفرم‌های کارستی برای تشخیص ارتباط بین پارامترهای

1. Ozyurt
2. Ford & Williams
3. Theilen
4. Feng
5. Parise
6. Zhang
7. Gutiérrez
8. Ennes
9. Lace & Mylroie
10. Dropout
11. Suffusion
12. Perrin
13. Waltham

مختلفی که به طور قابل مستقیم یا به آسانی قابل درک نیستند، مفید می‌باشد (باسو و همکاران، ۲۰۱۲). همچنین مطالعه مورفومتریک دولین‌ها علاوه بر اینکه یک تحلیل کمی از محیط‌های کارستی را فراهم می‌کند، بلکه مقایسه پارامترهای متنوع دولین‌ها ممکن است نتایج غیرمنتظره داشته باشد و منجر به ارائه فرضیاتی در مورد نحوه تکامل و دینامیک ژئواکوسیستم‌های کارستی شود (باندسن ۲ و همکاران، ۱۹۹۲). برای مثال تا دهه ۱۹۶۰ تصور می‌شد که کارست‌ها پدیده‌هایی آشفته هستند، به طوری که لندفرم‌های آن‌ها مخلوطی نامنظم و تصادفی از اشکال ریزشی و انحلالی است. از آن موقع تاکنون پژوهش‌های مورفومتریک نشان داده است که این تصور صحیح نیست. کارست‌های بسیاری که در مناطقی کاملاً جدا از هم در سطح جهان پراکنده‌اند (به‌ویژه کارست‌های چندضلعی) از سازماندهی فضایی مشابهی برخوردارند. به علاوه، پراکندگی دولین‌های آن‌ها از الگوهای برخوردار است که بسیار متفاوت از الگوهای تصادفی است به طوری که دولین‌ها تمایل به یکسان بودن در الگوی پراکنش دارند (فورد و ویلیامز، ۲۰۱۳).

امروزه تئوری مجموعه‌های فرکتال و اندازه‌گیری‌های مولتی فرکتال به طور گسترده‌ای برای توصیف بسیاری از فرآیندهای طبیعی از جمله فعالیت گسل‌ها به کار می‌رود (آیونووا^۳ و همکاران، ۲۰۰۷؛ فدر^۴، ۱۹۸۸). در واقع فعالیت نوزمین ساخت گسل‌ها می‌تواند با استفاده از مفاهیم فرکتال بررسی شود (مندلبرو، ۱۹۸۳؛ سارپ^۶، ۲۰۱۴). به دلیل اینکه رفتار گسل‌ها قطعاً غیرخطی می‌باشد (تورکوت^۷، ۱۹۹۰) و از طرفی نظریه فرکتال یک روش برای تشخیص و پیش‌بینی رفتار دینامیک پیچیده غیرخطی است (یانگ^۸، ۲۰۰۷)، بنابراین می‌توان از روش فرکتال جهت بررسی رفتار گسل‌ها استفاده نمود (تُرکوت^۷، ۱۹۹۷). این هندسه که به نظریه فرکتال معروف است اولین بار توسط ریاضی‌دان آمریکایی مندلبرو در سال ۱۹۷۷ برای حل بعضی از مشکلات توزیع تصادفی در محیط غیرخطی ارائه شد (لیو^۹ و همکاران، ۲۰۱۰؛ ژونگ و زو^{۱۰}، ۲۰۰۸) و از زمان معرفی اولیه آن توسط مندلبروت این مفهوم کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده است (تُرکوت^۷، ۱۹۹۷). در این نظریه بعد فرکتال ۱۱ مهم‌ترین رکن است (مندلبرو، ۱۹۸۳؛ مهرنیا، ۱۳۸۶) و می‌تواند به صورت کمی رفتار غیرخطی را توصیف کند (یانگ، ۲۰۰۷).

مطالعات متعددی توسط محققین در سطح بین‌المللی بر روی دولین‌ها صورت گرفته است؛ برای نمونه در تحقیقی که در امتداد دریای مرده بر روی دولین‌ها انجام گردیده، چنین گزارش شده است که علت تشکیل دولین‌ها در کارست‌های نمکی دو عامل گسل‌های فعال نوزمین ساخت و جبهه انحلال حاشیه لایه نمکی هستند (ازرسکی و فرومکین^{۱۱}، ۲۰۱۳). پژوهشی دیگر در منطقه مذکور نشان داد که تحول دولین‌ها از لحاظ ساختاری تحت کنترل گسلش محلی و منطقه‌ای است (آرجنتیری^{۱۳} و همکاران، ۲۰۱۵). همچنین در تحقیقی که در فلات اوبروک بر روی دولین‌ها انجام گردیده، چنین استنباط شده است که در شکل‌گیری و توزیع دولین‌ها عوامل زمین‌شناسی، ارتفاع، جهت شیب، تراکم گسل، فاصله از گسل و شیب

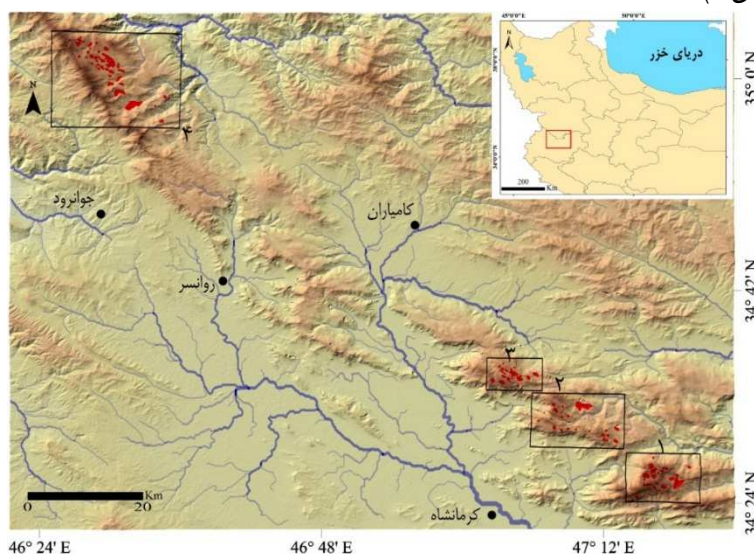
1. Basso
2. Bondesan
3. Ayunova
4. Feder
5. Mandelbrot
6. Sarp
7. Turcotte
8. Yang
9. Liu
10. Zhong & Xu
11. Fractal dimension
12. Ezersky & Frumkin
13. Argentieri

سطح آب زیرزمینی نقش عمده‌ای ایفا می‌کنند (ازدمیر، ۲۰۱۵). پژوهش بر روی فروچاله‌های کارستی منطقه شاهو بیانگر این است که حضور فروچاله‌های کارستی از ارتفاع ۱۹۰۰ متر به بالا و بررسی آثار و شواهد یخچالی همچون سیرک‌ها، دره‌ها و مورنهای یخچالی و همچنین پدیده‌های مجاور یخچالی شامل لایه‌های مختلف سولی فلوکسیون در نقاط مختلف منطقه، نشان می‌دهد که در دوره‌های سرد پلیستوسن از ارتفاع ۱۸۰۰ متر (مرز برف دائمی) به بالا، شرایط برای توسعه انحلالی فروچاله‌های کارستی فراهم بوده است (قربانی و همکاران، ۱۳۸۹). همچنین پژوهشی با عنوان تحلیل کمی دولین‌ها در زمین‌های کارستی در منطقه تخت سلیمان چنین بیان می‌کند که عمق دولین‌ها رابطه معناداری با ارتفاع آن‌ها دارد و عامل ارتفاع می‌تواند نقش مؤثری در مساحت دولین‌ها داشته باشد، اما فعالیت‌های زمین ساخت در محدوده مورد مطالعه موجب شده تا ارتفاع دولین‌ها رابطه معناداری با مساحت آن‌ها نداشته باشد (رضایی مقدم و قدری، ۱۳۹۰).

با توجه به اینکه می‌توان از دولین‌ها به عنوان شاخصی جهت ارزیابی میزان توسعه‌یافتگی کارست استفاده نمود و از طرفی می‌توان با آنالیز مورفومتری دولین‌ها، روابط بین مؤلفه‌های کنترل‌کننده آن‌ها را تشخیص داد، بنابراین در این پژوهش سعی شده که اولاً با استفاده از تحلیل‌های کمی و آماری این لندفرم‌ها را مدل‌سازی کرد و همچنین با توجه به رفتار غیرخطی گسل‌ها، شاخص بعد فرکتال را جهت مطالعه گسل‌ها در مناطق کارستی ارائه نمود.

منطقه مورد مطالعه

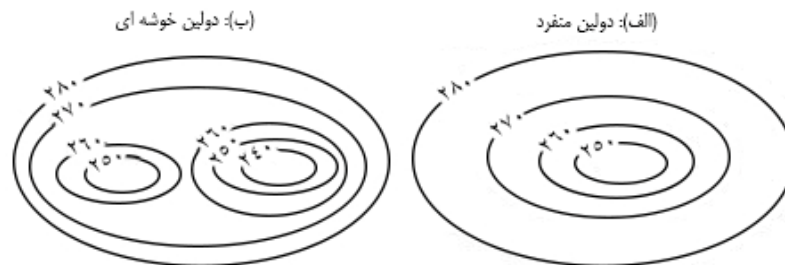
مناطق مورد مطالعه در این پژوهش بخشی از کمربند زاگرس مرتفع در استان کرمانشاه می‌باشند که از منظر زمین‌شناسی تمامی آن‌ها در سازندهای آهک واقع شده‌اند. منطقه اول (پرآو) با وسعت ۷۲/۳۴ کیلومتر مربع و موقعیت ۱۳° تا ۴۷° طول جغرافیایی و ۲۴° تا ۳۴° عرض جغرافیایی، منطقه دوم (خالک) با مساحت ۱۰۲/۵۹ کیلومتر مربع و موقعیت ۰۵° تا ۴۷° طول جغرافیایی و ۲۸° تا ۳۴° عرض جغرافیایی و منطقه سوم (کندوله) با مساحت ۳۶ کیلومتر مربع و موقعیت ۰۱° تا ۴۷° طول جغرافیایی و ۳۳° تا ۳۴° عرض جغرافیایی به ترتیب در شرق، شمال شرق و شمال شهرستان کرمانشاه واقع شده‌اند. منطقه چهارم (بخش شمالی شاهو) نیز با وسعت ۲۴۵/۸۱ کیلومتر مربع و موقعیت ۲۵° تا ۴۶° طول جغرافیایی و ۰۳° تا ۳۵° عرض جغرافیایی در شمال شهرستان جوانرود قرار دارد (شکل ۱).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (منبع: نویسندگان)

مواد و روش‌ها

در نخستین گام دولین‌های مناطق مورد مطالعه بر اساس DEM10 متر و روش^۱ CCLS استخراج شدند. استخراج اتوماتیک دولین‌ها با استفاده از روش CCLS اولین بار توسط لیانگ و دیو^۲ (۲۰۱۳) ابداع شد. در این روش جهت استخراج دولین‌ها، ابتدا خطوط کنتور بسته‌ای که حداقل یک منحنی میزان دیگر را در بر می‌گیرد و ارتفاع آن بیشتر از منحنی یا منحنی‌های داخلی است به عنوان دولین و بیرونی‌ترین خط منحنی میزان را به عنوان مرز آن در نظر می‌گیرند (شکل ۲).



شکل ۲: نمایش دولین‌های منفرد و خوشه‌ای بر روی خطوط کنتور بسته (لیانگ و همکاران، ۲۰۱۴).

بعد از استخراج دولین‌ها توسط روش مذکور، مؤلفه‌های مورفومتری دولین‌ها شامل: مساحت، محیط، عمق، شیب، قطر بزرگ، قطر کوچک و ضریب کشیدگی در نرم‌افزار GIS محاسبه و آنالیز توصیفی آنها در نرم‌افزار SPSS انجام گردید (جدول ۱). سپس در نرم‌افزار SPSS تحلیل رگرسیونی پارامترهای مورفومتری دولین‌ها انجام شد. برای این منظور از روش‌های خطی تک متغیره، درجه ۲، درجه ۳ و چند متغیره استفاده و مناسب‌ترین مدل‌ها که دارای ارزش رجحانی بالاتر بودند، ارائه گردیدند.

جدول ۱: آنالیز توصیفی مؤلفه‌های مورفومتری دولین‌ها

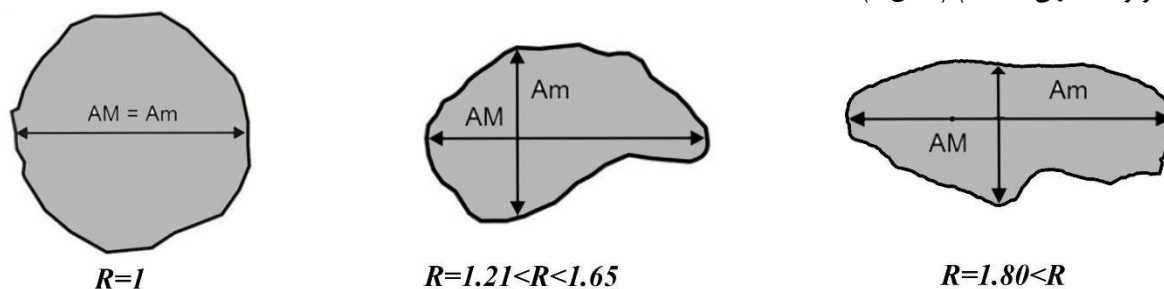
منطقه	شاخص‌های آماری	مساحت (مترمربع)	محیط (متر)	عمق (متر)	شیب (درصد)	قطر بزرگ (متر)	قطر کوچک (متر)	ضریب کشیدگی (قطر بزرگ/قطر کوچک)
پراو	دامنه	۹۰۲۶۶۰/۹	۵۸۹۸/۹	۸۷	۴۲/۳۱	۱۸۲۶	۹۴۸	۱/۸۳
	حداقل	۸۴۴/۳۱	۱۲۴	۷	۹/۶۳	۴۰	۲۶	۱
	حداکثر	۹۰۳۵۰۵/۲	۶۰۲۲/۹	۹۴	۵۱/۹۴	۱۸۶۶	۹۷۴	۲/۸۳
	میانگین	۹۰۶۸۹/۱	۱۳۱۹/۵	۳۰/۸	۲۹/۷	۳۶۷/۵	۲۳۵/۸	۱/۵۳
	انحراف معیار	۱۷۲۹۵۱/۷	۱۱۷۵/۲	۲۰/۳	۹/۴	۳۵۳/۲	۱۹۳/۹	۰/۴۲
خالک	چولگی	۳/۸	۲/۶	۱/۵	-۰/۲۳	۲/۷	۲/۲	۱
	دامنه	۱۲۵۸۸۹۶/۹	۶۴۱۹/۳	۷۶	۳۹/۲۹	۲۰۳۱	۹۸۷	۱/۴۷
	حداقل	۶۴۷۴/۲	۳۰۵/۸	۸	۱۱/۰۷	۱۱۲	۷۸	۱/۰۶
	حداکثر	۱۲۶۵۳۷۱/۲	۶۷۲۵/۲	۸۴	۵۰/۳۶	۲۱۴۳	۱۰۶۵	۲/۵۳
	میانگین	۱۱۴۲۲۵/۶	۱۳۵۳/۷	۲۲/۳	۲۲/۹	۴۳۷/۲	۲۵۶/۶	۱/۶
	انحراف معیار	۲۶۰۸۴۶/۷	۱۳۱۰/۳	۱۶/۱	۸/۶	۴۱۶	۱۹۷/۶	۰/۴۰
چولگی	۴/۴	۳/۵	۲/۸	۱/۴	۳/۵	۳/۴	۰/۵۳	

1. Closed contour lines

2. Liang & Du

۱/۳۶	۵۲۱	۱۰۵۹	۲۷/۵۱	۵۰	۳۲۸۶/۶	۳۶۸۲۶۷/۵	دامنه	کندوله
۱	۹۲	۱۳۳	۷/۱	۷	۴۰۱	۱۰۴۰۶	حداقل	
۲/۳۶	۶۱۳	۱۱۹۲	۳۴/۶۱	۵۷	۳۶۸۷/۶	۳۷۸۶۷۴	حداکثر	
۱/۴۹	۲۳۰/۵	۳۵۷/۶	۲۲/۶	۲۵/۴	۱۱۵۲/۴	۷۷۷۶/۹	میانگین	
-۰/۳۵	۱۵۱/۴	۲۸۵/۴	۶/۹	۱۴/۳	۹۳۰/۵	۱۰۱۹۷۲/۴	انحراف معیار	
-۰/۷۲	۱/۱۹	۱/۵	-۰/۴۲	-۰/۷۱	۱/۵۳	۱/۷	چولگی	
۴/۷۹	۹۰۷	۲۲۸۱	۲۴/۶	۱۲۹	۵۸۸۸/۲	۱۴۰۸۴۴۰/۱	دامنه	شاهو
۱/۰۲	۶۱	۹۰	۷/۲۶	۸	۲۵۹/۳	۴۶۵۵	حداقل	
۵/۸	۹۶۸	۲۳۷۱	۳۱/۹۲	۱۳۷	۶۱۴۷/۵	۱۴۱۳۰۹۵/۱	حداکثر	
۱/۷۵	۲۶۱/۱	۴۷۴/۲	۲۰/۲	۲۲/۲	۱۳۹۶/۳	۱۲۰۷۱۵/۸	میانگین	
-۰/۸۷	۱۸۳/۰۵	۴۵۹/۶	۶/۱	۲۰/۹	۱۳۹۳/۹	۲۳۲۸۸۳/۷	انحراف معیار	
۲/۸	۱/۸	۲/۶	۰	۳/۹	۲	۴/۲	چولگی	

در مرحله بعد جهت تعیین مورفولوژی دولین‌ها از روش‌های باسو^۳ و سویچ^۴ استفاده شد. تعیین شکل در روش باسو به صورت دو بعدی انجام می‌شود، بدین صورت که بر اساس ضریب کشیدگی^۵ (R)، دولین‌ها به سه طبقه: دایره‌ای (ضریب کشیدگی ۱ یا نزدیک به ۱)، بیضی‌شکل (ضریب کشیدگی ۱/۲۱ تا ۱/۶۵) و کشیده (بیشتر از ۱/۸) تقسیم‌بندی می‌شوند (باسو و همکاران، ۲۰۱۳) (شکل ۳).



شکل ۳. انواع مورفولوژی دولین‌ها (باسو و همکاران، ۲۰۱۳ با کمی تغییر)

در روش سویچ نیز با استفاده از نسبت‌های عمق به قطر، دولین‌ها به سه طبقه: چاله‌های کم عمق یا حوضچه‌های کاسه‌ای شکل با کف پهن (قطر/عمق بیشتر از ۲)، دولین‌های عمیق‌تر و پرشیب‌تر قیفی شکل (قطر/عمق بین ۱/۵ تا ۲) و دولین‌های چاهک مانند (قطر/عمق کمتر از ۱/۵) که در آن‌ها معمولاً پهنا کمتر از عمق است، تقسیم می‌شوند (سویچ، ۱۹۸۳؛ باندسان، ۱۹۹۲؛ فورد و ویلیامز، ۲۰۱۳). بنابراین جهت تعیین مورفولوژی دولین‌ها با روش باسو و سویچ، بعد از محاسبه پارامترهای مورفومتری دولین‌ها در نرم‌افزار GIS، انواع مورفولوژی دولین‌ها را با روش‌های باسو و سویچ در نرم‌افزار Excel تعیین شدند. همچنین جهت تعیین نیمرخ عرضی دولین‌ها با روش سویچ، با بهره‌گیری از Dem 10 متر، نیمرخ دولین‌ها در نرم‌افزار Surfer ترسیم شدند.

برای تعیین سیستم‌های گسلی مناطق مورد مطالعه نیز از نقشه‌های ۱/۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی مناطق کرمانشاه، میانراهان، کامیاران و پاوه استفاده و نقشه گسل‌های آن استخراج گردید. سپس جهت محاسبه بعد فرکتال گسل‌ها با توجه به برداری بودن گسل‌ها، از میان معادلات فرکتال معادله Number – Size انتخاب شد. طبق این معادله در یک پدیده منسوب به علوم زمین، تعداد رویدادهای به وقوع پیوسته در یک واحد سطحی معین متناسب با ابعاد آن رویداد است. در واقع در این

3. Basso
4. Cvijic
5. Elongation ratio

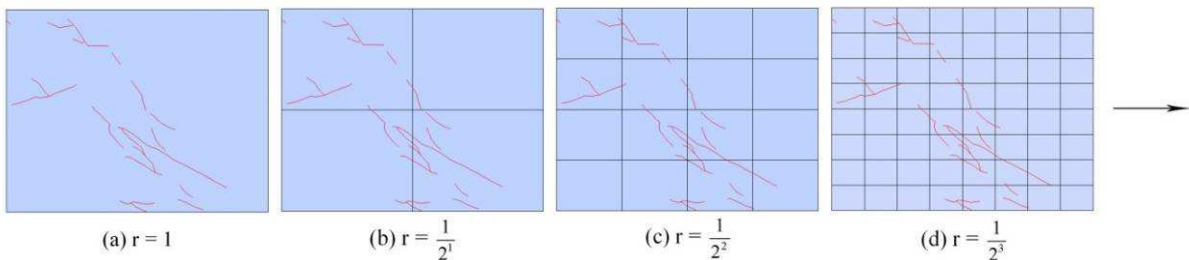
معادله یک رابطه‌ی نمایی اجزای خود تشابه وجود دارد که متأثر از مؤلفه‌های کثرت (تعدد) و بزرگی کمیت‌های مکانی می‌باشد. بنابراین طبق آنچه شرح داده شد می‌توان معادله $\text{Number} - \text{Size}$ را طبق رابطه ۱ تشریح کرد (مهرنیا، ۱۳۸۶):

رابطه ۱):

$$\text{Log}(Ns) = a + K \text{Log}(S)$$

در این معادله: Ns تعداد پدیده‌ها (در این پژوهش تعداد گسل‌ها)، S اندازه شبکه و K ضریب زاویه خط یا همان بعد فرکتال می‌باشد (مندلیرو، ۱۹۸۳).

برای دست‌یابی به بعد فرکتال در معادله مذکور روش‌های متعددی وجود دارد که در بین آن‌ها روش شمارش جعبه‌ای^۶ هاسدورف جزو بهترین روش‌ها می‌باشد (مهرنیا، ۱۳۸۶). شاید بهترین مزیت این روش که اولین بار توسط هاسدورف (۱۹۸۵) در نقشه حاصل از تصاویر ماهواره‌ای استفاده شد، این است که پایه آن GIS است (مهرنیا، ۱۳۸۶). در همین راستا بعد از تهیه نقشه گسل‌ها در هر منطقه، ابتدا با استفاده از ابزار $\text{Grid Index Features}$ در نرم‌افزار GIS یک شبکه GRID بر روی نقشه موردنظر ترسیم شد و تعداد شبکه‌ها حاوی گسل به صورت خودکار محاسبه شد. سپس تعداد شبکه‌های گریدبندی شده در هر مرحله مطابق روش هاسدورف افزایش پیدا کرد و تعداد شبکه‌ها حاوی پدیده شمارش گردید (شکل ۴).



شکل ۴: روش شمارش جعبه‌ای جهت محاسبه بعد فرکتال سیستم گسلی (آتیکوس و دامپوس ۷، ۲۰۰۹ با کمی تغییر).

بعد از محاسبه کمیت‌های ابعاد و تعداد شبکه حاوی گسل‌ها، با توجه به نمایی بودن رابطه مذکور و نیازی که به معادله‌ی خطی بود، از داده‌های موردنظر در نرم‌افزار Excel لگاریتم گرفته شد و بعد از تعیین رگرسیون بین این دو پارامتر، بعد فرکتال برای هر منطقه محاسبه گردید.

یافته‌ها و بحث

تجزیه و تحلیل توصیفی مؤلفه‌های مورفومتری

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل داده‌های توصیفی دولین‌ها در مناطق مورد مطالعه به شرح جدول ۱ می‌باشد. جدول ۱ مؤید آن است که منطقه پرآو و شاهو با میانگین عمق $30/8$ و $22/2$ متر دارای عمیق‌ترین و کم‌عمق‌ترین دولین‌ها و با میانگین شیب $29/7$ و $20/2$ درصد پرشیب‌ترین و کم‌شیب‌ترین دولین‌ها را تشکیل می‌دهند. از منظر پارامتر میانگین مساحت دولین‌ها نیز منطقه شاهو و خالک به ترتیب با مقادیر $120715/8$ و $7776/9$ دارای بیشینه و کمینه مقایر این شاخص آماری هستند.

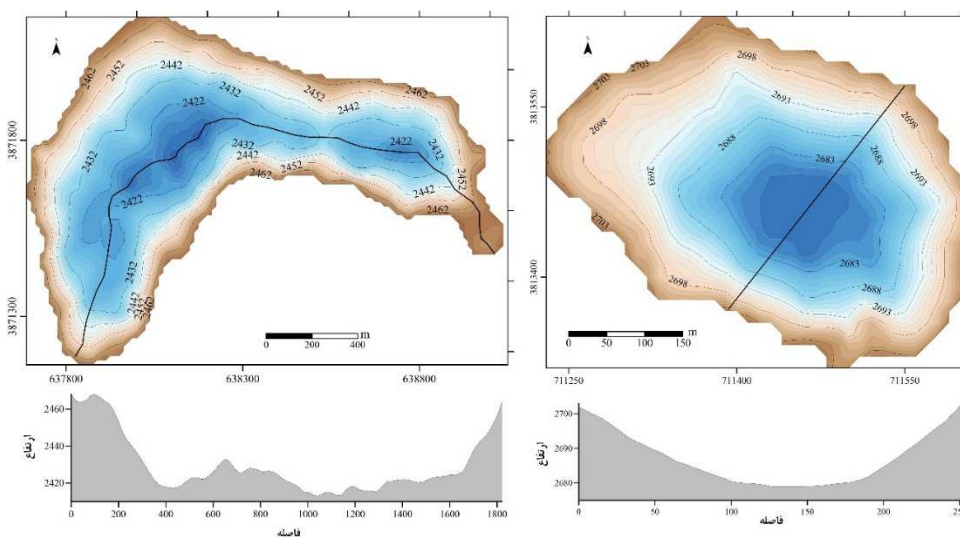
مورفولوژی دولین‌ها

نتایج شکل شناسی دولین‌ها در مناطق مطالعاتی به شرح جدول ۲ و شکل ۵ و ۶ می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که بر اساس روش باسو کمترین و بیشترین نوع دولین مربوط به دولین‌های دایره‌ای شکل و بیضی شکل می‌باشد. همچنین بر طبق روش سویچ، نسبت قطر به عمق تمام دولین‌ها بیشتر از ۲ می‌باشد و بنابراین تمام دولین‌ها جزو دولین‌های کاسه‌ای

شکل محسوب می‌شوند. به دلیل اینکه دولین‌های انحلالی معمولاً کاسه‌ای شکل هستند و فرم کاسه‌ای شکل آن‌ها دلالت بر آن دارد که از مرکز آن‌ها توده بزرگ‌تری از سنگ نسبت به اطرافشان جابجا شده است (فورد و ویلیامز، ۲۰۱۳)، بنابراین می‌توان بیان کرد که احتمالاً دولین‌های مناطق مطالعاتی جزو دولین انحلالی (دولین‌هایی که در اثر پدیده انحلال در مناطق برهنه به وجود می‌آیند، فورد و ویلیامز، ۲۰۱۳) محسوب می‌شوند که در اثر پدیده انحلال (نه ریزشی) در مناطق برهنه زاگرس مرتفع شکل گرفته‌اند.

جدول ۲: شکل‌شناسی دولین‌های مناطق مورد مطالعه

منطقه	روش سوپج			روش باسو		
	چاهک مانند	کیفی شکل	کاسه‌ای شکل	کشیده	بیضی شکل	دایره‌ای
پراو	-	-	۳۲	۹	۱۵	۸
خالک	-	-	۲۲	۹	۱۱	۲
کندوله	-	-	۲۳	۷	۹	۷
شاهو	-	-	۴۷	۱۸	۲۲	۷



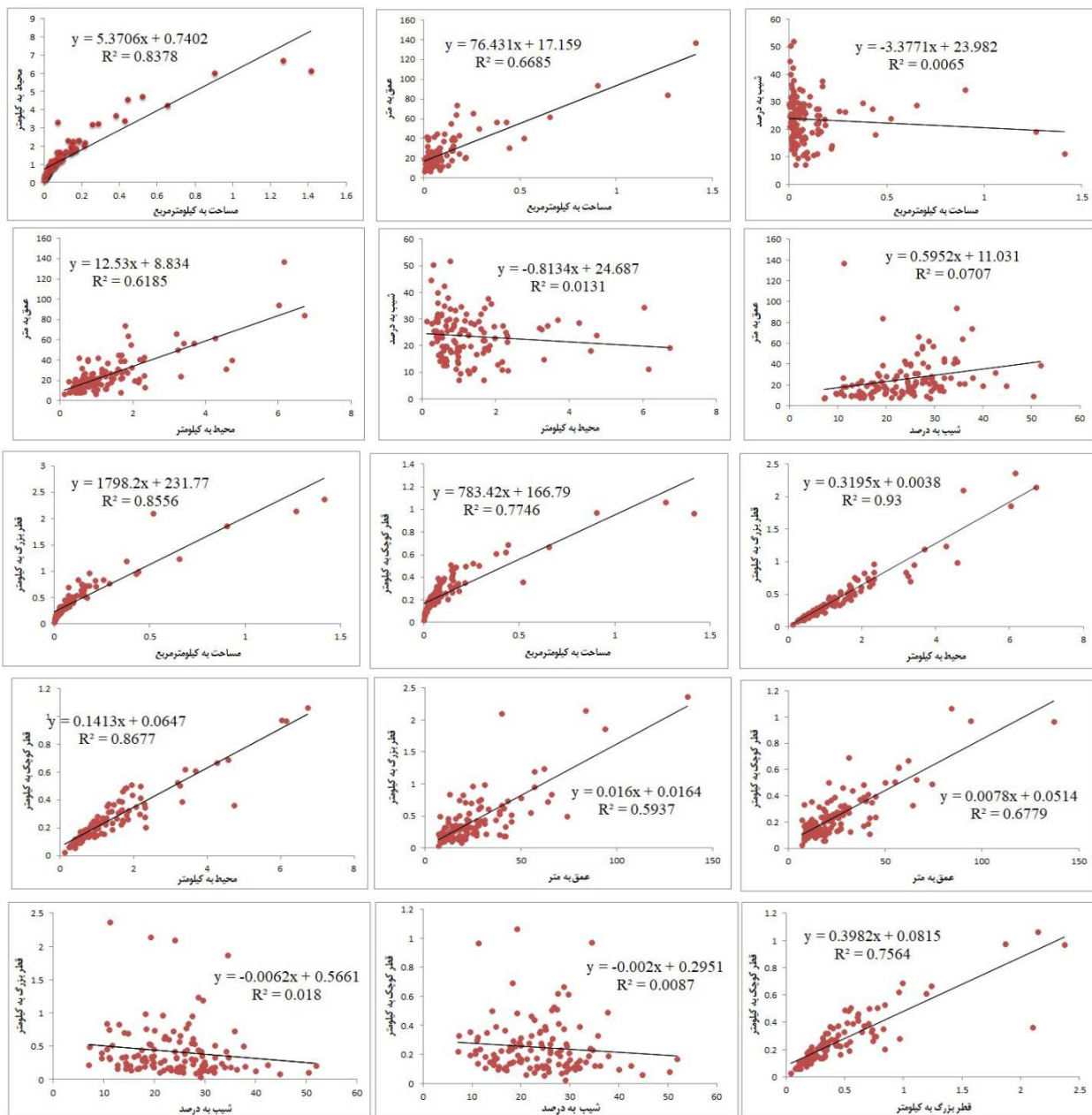
شکل ۵. الف: توپوگرافی و نیمرخ دولین منفرد در منطقه پراو - ب: توپوگرافی و نیمرخ دولین خوشه‌ای در منطقه شاهو



شکل ۶: نمونه‌ای از دولین‌ها در منطقه شاهو (عکس از حسام ملکی، بهار ۱۳۹۲)

تحلیل رگرسیون مؤلفه‌های مورفومتری دولین‌ها

نتایج حاصل از تحلیل رگرسیون خطی تک متغیره بین مؤلفه‌های مورفومتری دولین‌ها به شرح شکل ۷ است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که مؤلفه‌های محیط با قطر بزرگ، قطر کوچک با محیط، قطر بزرگ با مساحت، مساحت با محیط و قطر کوچک با مساحت به ترتیب با ضرایب تبیین ۰/۹۳، ۰/۸۶، ۰/۸۵، ۰/۸۳ و ۰/۷۷ از بیشترین میزان همبستگی معنی‌دار برخوردارند.



شکل ۷: نتایج تحلیل رگرسیون ساده خطی بین پارامترهای مورفومتری دولین‌ها

در این میان مؤلفه‌هایی مانند شیب با مساحت و شیب با قطر کوچک با ضرایب $0/006$ و $0/008$ دارای کمترین میزان همبستگی هستند. نتایج جدول ۳ مؤید آن است که حداکثر ارتباط معنی‌دار در سطح احتمال خطای کمتر از $0/01$ ، بین مؤلفه‌های مساحت و محیط برای روابط درجه ۲ و ۳ با ضرایب تبیین $0/940$ و $0/945$ و خطای برآورد $0/05$ و $0/04$ است. این نتایج همچنین نشان می‌دهد که کمترین ارتباط معنی‌دار درجه ۲ و ۳، بین مساحت و شیب با ضرایب تبیین $0/007$ و $0/009$ و خطای برآورد $0/205$ و $0/206$ می‌باشد.

جدول ۳: نتایج آنالیز رگرسیون ساده روابط درجه ۲ و ۳ بین پارامترهای مورفومتری دولین‌ها

پارامتر	نوع مدل	ضریب همبستگی	ضریب تبیین	خطای برآورد	مقدار F	معنی‌داری	ضرایب مدل			
							b^3	b^2	b^1	b^0
مساحت و محیط	درجه ۲	$0/969$	$0/940$	$0/05$	$943/3$	$0/000$	$0/01$	$0/005$	$0/02$	-
	درجه ۳	$0/972$	$0/945$	$0/04$	$692/9$	$0/000$	$-0/02$	$-0/08$	$-0/09$	$0/004$
مساحت و عمق	درجه ۲	$0/867$	$0/751$	$0/103$	$182/6$	$0/000$	$-0/04$	$0/001$	$0/000$	-
	درجه ۳	$0/873$	$0/763$	$0/101$	$128/6$	$0/000$	$-0/06$	$-0/005$	$0/000$	$0/000$
مساحت و شیب	درجه ۲	$0/882$	$0/807$	$0/205$	$0/41$	$0/665$	$0/134$	$-0/001$	$0/000$	-
	درجه ۳	$0/994$	$0/809$	$0/206$	$0/35$	$0/783$	$0/246$	$-0/016$	$0/001$	$0/000$
مساحت و قطر بزرگ	درجه ۲	$0/951$	$0/905$	$0/063$	$577/6$	$0/000$	$-0/02$	$0/173$	$0/156$	-
	درجه ۳	$0/951$	$0/905$	$0/064$	$381/9$	$0/000$	$-0/02$	$0/171$	$0/158$	$-0/001$
مساحت و قطر کوچک	درجه ۲	$0/954$	$0/910$	$0/062$	$614/2$	$0/000$	$-0/02$	$-0/151$	$1/29$	-
	درجه ۳	$0/955$	$0/912$	$0/061$	$412/3$	$0/000$	$-0/007$	$0/141$	$0/514$	$0/522$
محیط و عمق	درجه ۲	$0/787$	$0/619$	$0/745$	$98/15$	$0/000$	$-0/92$	$0/047$	$0/000$	-
	درجه ۳	$0/794$	$0/630$	$0/737$	$68/16$	$0/000$	$0/50$	$0/008$	$0/001$	$0/000$
محیط و شیب	درجه ۲	$0/120$	$0/014$	$1/19$	$0/889$	$0/414$	$1/42$	$0/005$	$0/000$	-
	درجه ۳	$0/134$	$0/018$	$1/20$	$0/730$	$0/536$	$2/26$	$-0/107$	$0/004$	$0/000$
محیط و قطر بزرگ	درجه ۲	$0/969$	$0/939$	$0/297$	$936/1$	$0/000$	$-0/112$	$3/68$	$-0/396$	-
	درجه ۳	$0/971$	$0/942$	$0/292$	$650/2$	$0/000$	$0/047$	$2/64$	$1/05$	$-0/466$
محیط و قطر کوچک	درجه ۲	$0/934$	$0/873$	$0/430$	$416/2$	$0/000$	$-0/27$	$4/80$	$1/51$	-
	درجه ۳	$0/934$	$0/873$	$0/431$	$275/6$	$0/000$	$-0/94$	$5/42$	$-0/157$	$1/11$
شیب و عمق	درجه ۲	$0/277$	$0/077$	$18/47$	$5/02$	$0/008$	$3/05$	$1/28$	$-0/013$	-
	درجه ۳	$0/314$	$0/099$	$18/32$	$4/38$	$0/006$	$36/57$	$-3/24$	$0/165$	$-0/002$
شیب و قطر بزرگ	درجه ۲	$0/138$	$0/019$	$0/396$	$1/17$	$0/312$	$0/496$	$0/000$	$0/000$	-
	درجه ۳	$0/144$	$0/021$	$0/397$	$0/850$	$0/469$	$0/690$	$-0/026$	$0/001$	$0/000$
شیب و قطر کوچک	درجه ۲	$0/107$	$0/012$	$0/182$	$0/704$	$0/497$	$0/243$	$0/003$	$0/000$	-
	درجه ۳	$0/128$	$0/016$	$0/182$	$0/663$	$0/576$	$0/391$	$-0/018$	$0/001$	$0/000$
قطر کوچک و قطر بزرگ	درجه ۲	$0/885$	$0/783$	$0/085$	$217/8$	$0/000$	$0/033$	$0/594$	$-0/001$	-
	درجه ۳	$0/886$	$0/784$	$0/085$	$145/6$	$0/000$	$0/013$	$0/724$	$-0/283$	$0/059$

نتایج تحلیل رگرسیون خطی چندگانه قدم‌به‌قدم^۸ بین مؤلفه‌های مورفومتری دولین‌ها نیز به شرح جدول ۴ می‌باشد. در واقع در این جدول مناسب‌ترین مدل‌ها برای هر مؤلفه تشریح شده است. یافته‌های حاصل از مدل‌سازی مؤلفه‌های دولین‌ها نشان می‌دهد که حداکثر ارتباط معنی‌داری مربوط به پارامتر محیط با پارامترهای قطر بزرگ و قطر کوچک با ضریب تبیین ۰/۹۶۵ و خطای برآورد ۰/۲۲ و حداقل ارتباط معنی‌داری مربوط به مؤلفه شیب با عمق، قطر کوچک و قطر بزرگ با ضریب تبیین ۰/۴۲۶ و خطای برآورد ۶/۵ می‌باشد.

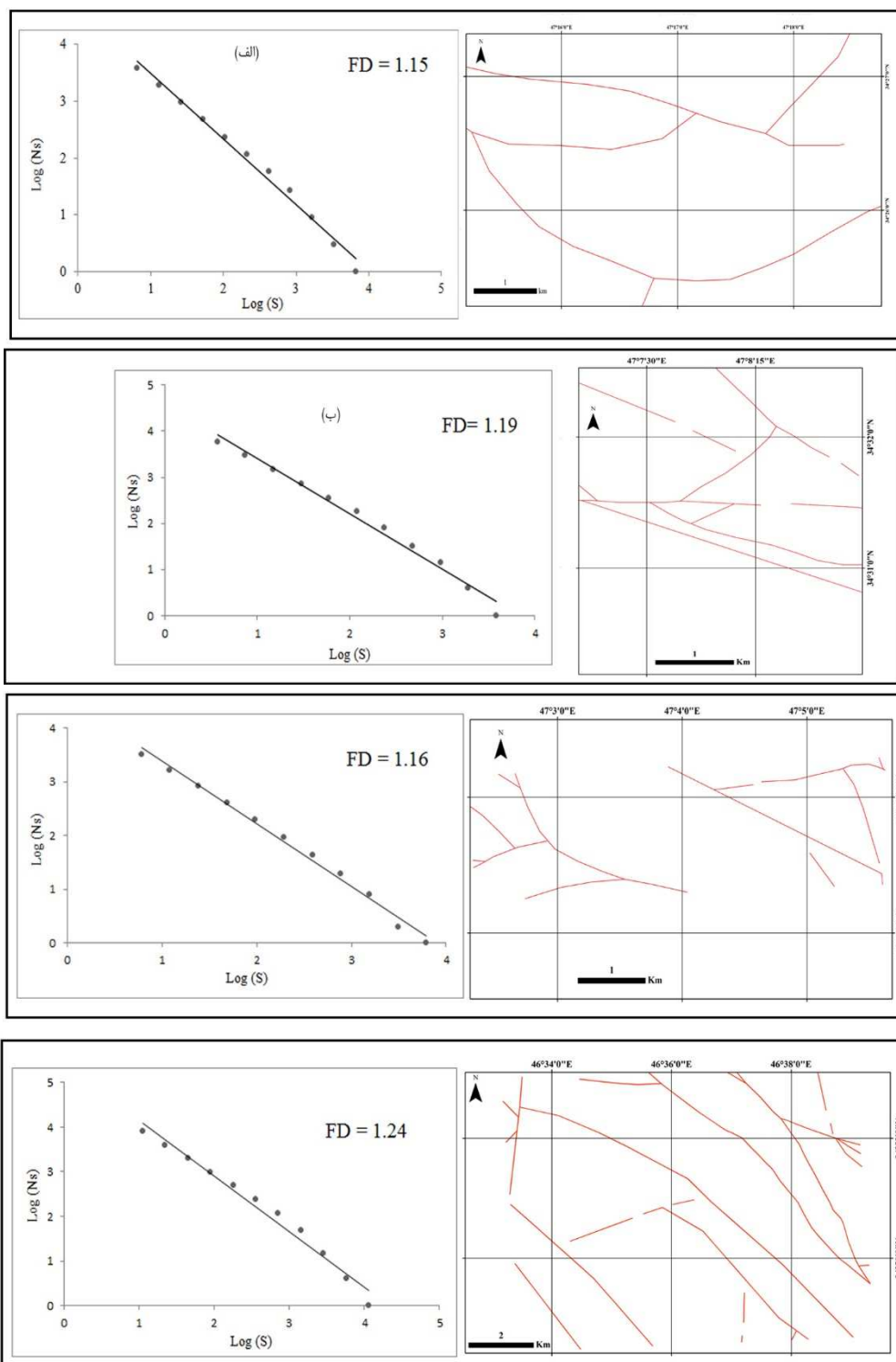
جدول ۴: خلاصه مدل‌های خطی چند متغیره مؤلفه‌های مورفومتری دولین‌ها در مناطق مطالعاتی

سطح معناداری	مقدار Beta	ضرایب غیراستاندارد		متغیر مستقل	خطای برآورد	ضریب تعدیلی	ضریب تبیین	ضریب همبستگی	متغیر وابسته
		خطای استاندارد	مقدار B						
۰/۰۰۰	۰/۴۱۱	۷/۳۱	۳۸/۳۹	مساحت	۷/۸۵	۰/۸۳۰	۰/۸۳۴	۰/۹۱۳	عمق
۰/۰۰۰	۰/۴۹۴	۸/۲۲	۵۱/۸۸	قطر کوچک					
۰/۰۰۰	۰/۳۴۵	-۰/۰۸۴	-۰/۷۷۳	شیب					
۰/۰۰۰	-	۲/۶۰	-۱۰/۰۲	مقدار ثابت					
۰/۰۰۰	۰/۶۱۴	-۰/۰۳۲	۰/۳۱۶	قطر بزرگ	۰/۰۶۸	۰/۸۸۷	۰/۸۹۰	۰/۹۴۳	مساحت
۰/۰۰۷	۰/۱۹۴	-۰/۰۷۹	۰/۲۱۸	قطر کوچک					
۰/۰۰۰	۰/۱۸۵	-۰/۰۰۱	-۰/۰۰۲	عمق					
۰/۰۰۰	-	-۰/۰۱۱	-۰/۱۳۲	مقدار ثابت					
۰/۰۰۰	۰/۶۳۳	-۰/۱۰۴	۱/۹۱	قطر بزرگ	۰/۲۲	۰/۹۶۵	۰/۹۶۵	۰/۹۸۳	محیط
۰/۰۰۰	۰/۳۸۱	-۰/۲۳۶	۲/۵۱	قطر کوچک					
۰/۰۰۰	-	-۰/۰۳۵	-۰/۱۲۵	مقدار ثابت					
۰/۰۰۰	۱/۱۴	-۰/۰۵۶	۰/۵۱۱	عمق	۶/۵	۰/۴۱۲	۰/۴۲۶	۰/۶۵۳	شیب
۰/۰۰۱	-۰/۴۷۴	۳/۰۷	-۱۰/۱۹	قطر بزرگ					
۰/۰۰۰	-۰/۶۲۳	۷/۵۳	-۲۹/۲۱	قطر کوچک					
۰/۰۰۰	-	۱/۰۳۶	۲۲/۳۱	مقدار ثابت					

تخمین بعد فرکتال گسل‌ها

نتایج محاسبه بعد فرکتال گسل‌ها در مناطق مطالعاتی به شرح شکل ۸ است. این نتایج حاکی از این است که منطقه شاهو و پرآو با مقادیر ۱/۲۴ و ۱۵/۱۵ دارای بیشینه و کمینه ابعاد فرکتالی هستند. در پژوهش‌هایی که تاکنون در زمینه گسل‌های مناطق کارستی انجام شده از شاخص‌های مانند تراکم گسل استفاده شده است، در صورتی که طبق نظر محققینی مانند تروکوت به دلیل رفتار پیچیده و غیرخطی سیستم‌های گسلی بهترین روش جهت تشخیص رفتار و فعالیت گسل‌ها محاسبه بعد فرکتال آن‌ها می‌باشد. در واقع شاخص تراکم گسل به خوبی نمی‌تواند میزان فعال بودن یک گسلی که تأثیر مهمی در توسعه لندفرم‌های کارستی دارد، نشان دهد. بنابراین به دلیل اینکه بعد فرکتال بیشتر در یک منطقه نشان‌دهنده فعالیت

بیشتر گسل می‌باشد (ترکوته، ۱۹۹۷)، می‌توان چنین بیان کرد تأثیر فعالیت گسل‌ها در ایجاد دولین‌ها در بین مناطق مطالعاتی در منطقه شاهو به بیشترین میزان خود می‌رسد.



شکل ۸. بعد فرکتال گسل‌ها در مناطق مورد مطالعه. الف: منطقه پراو، ب: خالک، ج: کندوله و د: شاهو.

با مقایسه تحقیق حاضر با پژوهش‌های پیشین می‌توان چنین بیان کرد که در تحقیقی که به صورت کمی بر روی دولین های منطقه تخت سلیمان انجام گردیده، چنین گزارش شده که بین مساحت و عمق، مساحت و محیط به ترتیب ضرایب همبستگی ۰/۰۲۷ و ۰/۶۳۶ وجود دارد (رضایی مقدم و قدری، ۱۳۹۰)، در صورتی که پژوهش حاضر نشان داد که ضریب همبستگی مساحت و عمق دولین‌ها در مناطق مطالعاتی ۰/۶۶۸ و مساحت و محیط ۰/۸۳۷ می‌باشد. برانو^۹ و همکاران (۲۰۰۸) در تحقیقی که بر روی مورفومتری دولین‌ها در جنوب ایتالیا انجام دادند، چنین گزارش دادند که ضریب تبیین قطر کوچک و بزرگ دولین‌ها برای روابط خطی تک متغیره در منطقه مذکور ۰/۵۶۵ می‌باشد که این رابطه در تحقیق حاضر به ۰/۷۵۶ می‌رسد. از منظر مورفولوژی نیز، در پژوهشی که در منطقه شاهو انجام شده است، دولین‌ها را از نظر شکل ظاهری به سه دسته ساده، مرکب و پیچیده تقسیم‌بندی شده‌اند (ثروتی و همکاران، ۱۳۹۳)، ولی پژوهش حاضر با استفاده از روش سویچ (کاسه‌ای، کیفی شکل و چاهک مانند) و باسو (دایره‌ای، بیضی‌شکل و کشیده) دولین‌ها را به سه دسته تقسیم نموده است.

نتیجه‌گیری

بررسی ساختار چشم‌اندازهای ژئومورفیک در ارتباط با تحلیل روابط خطی و غیرخطی مؤلفه‌های مورفومتری آن‌ها یکی از مهم‌ترین اصول و مبانی ژئومورفولوژی است. چشم‌انداز مورد مطالعه در پژوهش حاضر دولین‌های ایجاد شده در آهک‌های بین منطقه پرآو و شاهو در استان کرمانشاه می‌باشند. یکی از دلایل شکل‌گیری این اشکال در سطح جهانی این است که غارهای اولیه که از نقاط تغذیه گسترش می‌یابند، به یک چشمه یا مجرای غار قدیمی‌تر متصل شوند. زمانی که این پیوندها شکل بگیرد، مقاومت نسبت به جریان عبوری از میان سنگ آن‌قدر زیاد است که اجازه جابجایی مقادیر کافی آهک را می‌دهد تا منجر به شکل‌گیری چاله‌ای در اندازه دولین شود. هنگامی که این لندفرم‌ها یافت شوند کارست همیشه توسعه یافته است؛ بنابراین آن‌ها می‌توانند شاخص‌های لندفرمی کارست در نظر گرفته شوند. تجزیه و تحلیل و مدل‌سازی مورفومتری دولین‌ها، تشخیص ارتباط بین پارامترهای مختلفی که به طور قابل مستقیم یا به آسانی قابل درک نیستند را فراهم می‌سازد. همچنین مطالعه مورفومتری دولین‌ها علاوه بر اینکه یک تحلیل کمی از محیط‌های کارستی را فراهم می‌کند، بلکه مقایسه پارامترهای متنوع دولین‌ها ممکن است نتایج غیرمنتظره داشته باشد و منجر به طرح فرضیاتی در مورد نحوه تکامل و دینامیک ژئواکوسیستم‌های کارستی داشته باشد.

در این پژوهش با بهره‌گیری از ژئومورفولوژی کمی، روش‌های آماری و هندسه فرکتال از یک طرف به تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های مورفومتری دولین‌ها در منطقه بین پرآو و شاهو پرداخته شده است و از طرف دیگر از روش فرکتال جهت تشخیص میزان فعالیت گسل‌ها در مناطق کارستی استفاده شد. در واقع به دلیل رفتار پیچیده و غیرخطی سیستم‌های گسلی بهترین روش جهت تشخیص رفتار و فعالیت گسل‌ها محاسبه بعد فرکتال آن‌ها می‌باشد. در این راستا جهت مدل‌سازی مؤلفه‌های مورفومتری دولین‌ها از پارامترهایی نظیر: مساحت، محیط، عمق، شیب، قطر بزرگ، قطر کوچک و ضریب کشیدگی دولین‌ها استفاده و با استفاده از تحلیل رگرسیون ساده و چندگانه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آنالیز خطی تک متغیره نشان می‌دهد که مساحت با محیط، مساحت با عمق، محیط با عمق، محیط با قطر بزرگ و قطر کوچک با قطر کوچک با ضرایب تبیین ۰/۸۳۷، ۰/۶۶۸، ۰/۶۱۸، ۰/۹۳ و ۰/۷۵۶. در سطح ۰/۹۹ معنی‌دار می‌باشند. همچنین نتایج مؤید آن است که حداکثر ارتباط معنی‌دار برای روابط درجه ۲ و ۳ در سطح احتمال خطای کمتر از ۰/۰۱، بین مؤلفه‌های مساحت و محیط (ضرایب تبیین ۰/۹۴۰ و ۰/۹۴۵ و خطای برآورد ۰/۰۵ و ۰/۰۴)، مساحت و عمق (ضرایب تبیین ۰/۷۶۳ و ۰/۷۵۱ و خطای برآورد ۰/۱۰۳ و ۰/۱۰۱)، مساحت و قطر بزرگ (ضرایب تبیین ۰/۹۵۱ و ۰/۹۵۱ و خطای برآورد ۰/۰۶۳ و ۰/۰۶۴)، قطر بزرگ و قطر کوچک (ضرایب تبیین ۰/۸۸۵ و ۰/۸۸۶ و خطای برآورد ۰/۰۸۵ و ۰/۰۸۵) است. نتایج رگرسیون چند

متغیره خطی نیز مؤید ارتباط معنی‌دار عمق با پارامترهای شیب، قطر کوچک و مساحت با ضریب تبیین $0/834$ و خطای برآورد $7/85$ است. نتایج شکل شناسی دولین‌ها نیز نشان داد که بر اساس روش باسو کمترین و بیشترین نوع دولین مربوط به دولین‌های دایره‌ای شکل و بیضی‌شکل می‌باشد. همچنین بر طبق روش سویچ، نسبت قطر به عمق تمام دولین‌ها بیشتر از ۲ می‌باشد و بنابراین تمام دولین‌ها جزو دولین‌های کاسه‌ای شکل محسوب می‌شوند. بنابراین می‌توان بیان کرد که احتمالاً دولین‌های مناطق مطالعاتی جزو دولین‌های انحلالی محسوب می‌شوند که در اثر پدیده انحلال (نه ریزشی) در مناطق برهنه زاگرس مرتفع شکل گرفته‌اند. نتایج محاسبه بعد فرکتال گسل‌ها در مناطق مطالعاتی نیز حاکی از این است که منطقه شاهو و پرآو با مقادیر $1/24$ و $15/15$ دارای بیشینه و کمینه ابعاد فرکتالی هستند.

در مجموع نتایج پژوهش حاضر دربردارنده معادلاتی است که با استفاده از آن‌ها به راحتی و با دقت نسبتاً بالایی می‌توان پارامترهای که محاسبه آن‌ها در برخی از مناطق مشکل می‌باشد را تخمین زد. همچنین استفاده از هندسه فرکتال و معادله Number – Size نیز نشان داد که می‌توان با تخمین بعد فرکتال توسط روش مذکور، میزان فعالیت گسل‌ها و تأثیر نسبی که در انحلال سنگ‌های انحلال‌پذیر دارد را تعیین نمود. در واقع از این روش می‌توان به عنوان شاخص جدیدی در زمینه مطالعه گسل‌های مناطق کارستی بهره گرفت.

منابع

- ثروتی، محمدرضا، رستمی، مژگان، نصرتی، کاظم، احمدی، محمود، ۱۳۹۳، شناخت عوامل مؤثر بر پراکنش و رخداد فروچاله‌ها در منطقه گازرونی کرمانشاه با استفاده از رگرسیون لجستیک، فصلنامه جغرافیا و توسعه، شماره ۳۶، صص ۱۹۴-۱۸۱.
- رضایی مقدم، محمدحسین، محمدرضا، قدری، ۱۳۹۰، تحلیل‌های کمی دولین‌ها در زمین‌های کارستی (مطالعه موردی، منطقه تخت سلیمان)، نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی، شماره ۳۵، صص ۱۳۵-۱۱۳.
- مهرنیا، سید رضا، ۱۳۸۶، بررسی پتانسیل لرزه‌خیزی گسل شمال قزوین با استفاده از روش سنجش فرکتالی نشانگرهای مغناطیسی، اولین همایش پیش‌نشانگرهای زلزله.
- مهرنیا، سید رضا، ۱۳۸۶، تعاملات فرکتالی در تعامل با سامانه‌های اطلاعات مکانی (مطالعه موردی: گسل‌های شمال غرب ایران)، همایش ژئوماتیک.
- قربانی، محمد صدیق، محمودی، فرج‌الله، یمانی، مجتبی، مقیمی، ابراهیم، ۱۳۸۹، نقش تغییرات اقلیمی کوتاه‌تر در تحول ژئومورفولوژیکی فروچاله‌های کارستی (مطالعه موردی: ناهمواری شاهو، غرب ایران)، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۷۴، صص ۱۶-۱.
- Argentero, A., Carluccio, R., Cecchini, F., Chiappini, M., Ciotoli, G., De Ritis, R., Margottini, S., 2015. Early stage sinkhole formation in the Acque Albule basin of central Italy from geophysical and geochemical observations. *Engineering Geology*, 191, pp 36–47.
- Attikos, C. & Doumpos, M., 2009. Faster estimation of the correlation fractal dimension using box-counting. In *Informatics. Fourth Balkan Conference*, pp 93–96.
- Ayunova, O. D., Kalush, Y. A. & Loginov, V. M., 2007. Relationship of the seismic activity of the Tuvian and adjacent Mongolian areas with the fractal dimensionality of a fault system. *Russian Geology and Geophysics*, 48(7), pp 593–597.
- Basso, A., Bruno, E., Parise, M. & Pepe, M., 2012. Morphometric analysis of sinkholes in a karst coastal area of southern Apulia (Italy). *Environmental Earth Sciences*, 70(6), pp 1-16.
- Bondesan, A., Meneghel, M. & Sauro, U., 1992. Morphometric analysis of dolines. *International Journal of Speleology* 21(1), pp 1-55.
- Bruno, E., Calcaterra, D. & Parise, M., 2008. Development and morphometry of sinkholes in coastal plains of Apulia, southern Italy. Preliminary sinkhole susceptibility assessment. *Engineering Geology*, 99(3), pp 198–209.

- Cvijić, J., 1893. *Das Karstphänomen: Versuch einer morphologischen Monographie*. Stuttgart.
- Ennes-Silva, R. A., Bezerra, F. H. R., Nogueira, F. C. C., Balsamo, F., Klimchouk, A., Cazarin, C. L. & Auler, A. S., 2015. Superposed folding and associated fracturing influence hypogene karst development in Neoproterozoic carbonates, São Francisco Craton, Brazil. *Tectonophysics*, 5, pp 1–62.
- Ezersky, M. & Frumkin, A., 2013. Fault—Dissolution front relations and the Dead Sea sinkhole problem. *Geomorphology*, 201, pp 35–44.
- Feder, J., 1988. *Fractals*, New York.
- Feng, T., Chen, H., Polyakov, V. O., Wang, K., Zhang, X. & Zhang, W., 2016. Soil erosion rates in two karst peak-cluster depression basins of northwest Guangxi, China: Comparison of the RUSLE model with 137 Cs measurements. *Geomorphology*, 253, pp 217–224.
- Ford, D. & Williams, P. D., 2013. *Karst hydrogeology and geomorphology*. London.
- Gutiérrez, F., Parise, M., De Waele, J. & Jourde, H., 2014. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. *Earth-Science Reviews*, 138, pp 61–88.
- Kovačič, G., & Ravbar, N., 2013. Analysis of human induced changes in a karst landscape—the filling of dolines in the Kras plateau, Slovenia. *Science of the Total Environment*, 447, pp 143–151.
- Lace, M. J. & Mylroie, J. E., 2013. *Coastal karst landforms*. London.
- Liang, F. & Du, Y., 2013. An automated method to extract typical karst landform entities from contour lines on topographic maps. *Proceedings of Geomorphometry*, 112, pp 46–49.
- Liang, F., Du, Y., Ge, Y. & Li, C., 2014. A quantitative morphometric comparison of cockpit and doline karst landforms. *Journal of Geographical Sciences*, 24(6), pp 1069–1082.
- Liu, D., Li, T. & Fu, Q., 2010. Fractal dimension estimation of groundwater depth series of well irrigation area in Sanjiang Plain based on continuous wavelet transform. In *Natural Computation (ICNC), 2010 Sixth International Conference*, 8, pp 3988–3992.
- Mandelbrot, B. B., 1983. *The Fractal Geometry of Nature*. New York.
- Ozdemir, A., 2015. Investigation of sinkholes spatial distribution using the weights of evidence method and GIS in the vicinity of Karapınar, Turkey. *Geomorphology*, 245, pp 40–50.
- Ozdemir, A., 2015. Sinkhole Susceptibility Mapping Using a Frequency Ratio Method and GIS Technology Near Karapınar, Konya-Turkey. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, pp 502–506.
- Ozyurt, N. N., Lutz, H. O., Hunjak, T., Mance, D. & Roller-Lutz, Z., 2014. Characterization of the Gacka River basin karst aquifer (Croatia): Hydrochemistry, stable isotopes and tritium-based mean residence times. *Science of The Total Environment*, 487, pp 245–254.
- Parise, M., De Waele, J. & Gutierrez, F., 2009. Current perspectives on the environmental impacts and hazards in karst. *Environmental Geology*, 58(2), pp 235–237.
- Perrin, J., Cartannaz, C., Noury, G. & Vanoudheusden, E., 2015. A multicriteria approach to karst subsidence hazard mapping supported by weights-of-evidence analysis. *Engineering Geology*, 197, pp 296–305.
- Sarp, G., 2014. Evolution of neotectonic activity of East Anatolian Fault System (EAFS) in Bingöl pull-apart basin, based on fractal dimension and morphometric indices. *Journal of Asian Earth Sciences*, 88, pp 168–177.
- Theilen-Willige, B., Malek, H. A., Charif, A., El Bchari, F. & Chaïbi, M., 2014. Remote Sensing and GIS Contribution to the Investigation of Karst Landscapes in NW-Morocco. *Geosciences*, 4(2), pp 50–72.

- Turcotte, D. L., 1990. *Implications of chaos, scale-invariance, and fractal statistics in geology*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 89(3), pp 301–308.
- Turcotte, D. L., 1997. *Fractals and chaos in geology and geophysics*. London.
- Waltham, T., Bell, F. G. & Culshaw, M., 2007. *Sinkholes and subsidence: karst and cavernous rocks in engineering and construction*. *Environmental and Engineering Geoscience*, 13(1), pp 83-84
- Yang, J., Zhang, Y. & Zhu, Y., 2007. *Intelligent fault diagnosis of rolling element bearing based on SVMs and fractal dimension*. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(5), pp 2012–2024.
- Zhang, X., Shang, K., Cen, Y., Shuai, T. & Sun, Y., 2014. *Estimating ecological indicators of karst rocky desertification by linear spectral unmixing method*. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 31, pp 86–94.
- Zhong, L. & Xu, G., 2008. *Application Actuality of Fractal Theory in Turbulence and Sediment Studies Journal of Chongqing Jiaotong University*, 5, pp 12-34.