

هیدروژنومورفولوژی، شماره ۱۵، تابستان ۱۳۹۷، صص ۱۶-۱

وصول مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۳۱ تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۱۰

## شناسایی سیرک‌های یخچالی زردکوه با تأکید بر ویژگی‌های ژئومورفومتری

علی احمدآبادی<sup>۱\*</sup>

امیر کرم<sup>۲</sup>

واردوهی سرکیسیان<sup>۳</sup>

### چکیده

در این پژوهش به منظور شناسایی ویژگی‌های کمی شکل سیرک‌ها در منطقه‌ی زردکوه بختیاری از شاخص‌های ژئومورفومتریک شامل مشتقات درجه دوم انحنا، پلان، پروفیل، کلی، حدافل، حداکثر، انحنا، طولی و مقطعی و شاخص شیب به عنوان مشتق درجه اول استفاده شده است. برای این منظور مدل رقومی ارتفاع با دقت ۲۰ متر از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری تهیه و برای تحلیل‌های ژئومورفومتریک استفاده گردید. سپس با ترکیب نقشه‌ی انواع انحنا و نقشه‌ی شیب، نقشه‌ی رنگی با ترکیب باندی مختلف به دست آمد که در طبقه‌بندی نظارت شده MLC از آنها استفاده شد. نتایج پژوهش نشان می‌دهند از ۲۶ چاله سیرک مانند مشخص شده تنها ۱۴ مورد توسط مدل طبقه‌بندی نظارت شده شناسایی شد. با انطباق دادن خروجی مدل MLC با تعریف لندفرم سیرک، در نهایت به ۸ سیرک کاملاً توسعه‌یافته در منطقه رسیدیم. همچنین نتایج ارزیابی دقت طبقه‌بندی با استفاده از نقشه‌ی پایه ژئومورفولوژی منطقه نشان می‌دهد دقت کلی طبقه‌بندی سیرک‌ها در منطقه حدود ۶۰٪

E-mail:ahmadabadi@khu.ac.ir

۱- استادیار دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران (نویسنده‌ی مسئول).

۲- دانشیار دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

است و این در حالی است سازند غالب منطقه کربناته و انحلالی است و در نتیجه سیرک‌های یخچالی در زردکوه تحت شرایط انحلال کارستی شکل و توسعه یافته و در بیشتر موارد شکل تپیک سیرک را ندارند. همچنین از نتایج چنین استنباط می‌شود که مشتقات درجه دوم کارایی بیشتری در شناسایی ویژگی‌های شکلی سیرک‌های یخچالی دارند. شاخص انحنای پلان بخوبی توانسته پرتگاه اطراف سیرک را نشان دهد و انحنای پروفیل مسیر عبور بهمن‌های دیواره سیرک را بارز نموده است. به نظر می‌رسد شاخص‌های مشتق دوم شامل خانواده انحناء قابلیت‌های زیادی در استخراج و بارزسازی اشکال طبیعی بر روی داده‌های رقومی ارتفاعی دارد. کلمات کلیدی: ژئومورفومتری، سیرک یخچالی، طبقه‌بندی نظارت‌شده MLC، زردکوه.

#### مقدمه

سیرک‌های یخچالی یکی از مهم‌ترین لندفرم‌های کاوشی در منطقه‌ی کوهستانی به حساب می‌آیند. لندفرم‌ها بیانگر فرآیندهای تأثیرگذار بر عوارض سطح زمین در گذشته و حال هستند و اطلاعات مهمی در مورد ویژگی‌ها و پتانسیل‌های زمین فراهم می‌کنند (ایتزلمولر و سولبک، ۲۰۰۰). لندفرم‌ها حداقل دو ویژگی اساسی در خود دارند: اولاً نتیجه فرایند های ژئومورفولوژیک و زمین‌شناختی گذشته هستند و دوماً مرزهایی مشخص برای تعیین قلمرو حاکمیت فرایندهایی ژئومورفولوژیک کنونی هستند (دن و همکاران، ۲۰۰۱). در اوایل دهه‌ی ۱۹۶۰ روش‌های کمی وارد مطالعات لندفرم‌ها شدند (کسماس و همکاران، ۲۰۰۹). ژئومورفومتری علم تجزیه و تحلیل کمی سطح زمین است (پایک، ۲۰۰۰؛ ریزمن، ۲۰۰۴).

سیرک‌ها از ۱۵۰ سال پیش مرکز توجه مطالعات گسترده بوده‌اند (داروین، ۱۸۴۲؛ تاینل، ۱۸۶۲؛ گاستالدی، ۱۸۴۲) در چند دهه‌ی گذشته توجه به تجزیه و تحلیل سیرک‌ها بیشتر شده است (ایوانز، ۲۰۰۶؛ دل‌ماس، ۲۰۱۵؛ میشل، همفریز، ۲۰۱۵). تعدادی مطالعات در رابطه با درک مکانیسم، فرآیندها و عوامل تشکیل سیرک‌ها با توجه به توزیع و مشخصات مورفولوژیکی آنها صورت پذیرفته است (گراف، ۱۹۷۶؛ گردن،

۱۹۷۷: جانسون، ۱۹۹۹). از برآیند مطالعات انجام شده مشخص شد که مورفولوژی و توزیع سیرک‌ها نه تنها منعکس کننده‌ی ویژگی‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی از یک منطقه هستند، بلکه شرایط آب و هوایی حاکم در دوره‌های دیرینه (پالئوکلایمت) منطقه را نیز مشخص می‌کنند.

روش‌های مختلفی جهت تهیه مدل رقومی ارتفاع و شبیه‌سازی عوارض سطح زمین وجود دارد که قابلیت آن را دارند تا در زمینه‌های مختلف علوم زمین از جمله مخاطرات زمین، فرسایش، ژئومورفولوژی، اکولوژی، هیدرولوژی و غیره کاربرد داشته باشند. ارزیابی کارایی شاخص‌های ژئومورفولوژیک در مناطق خشک به روش وود توسط شایان و همکاران انجام شده است (۱۳۹۱). مکران و همکاران با استفاده از شاخص موقعیت توپوگرافی ارتفاع در هر نقطه از مدل رقومی ارتفاع به استخراج لندفرم‌ها پرداخت است (۱۳۹۳). هدف از این تحقیق ارائه یک روش نیمه اتوماتیک برای تشخیص و طبقه‌بندی لندفرم سیرک یخچالی منطقه‌ی زردکوه بختیاری بر اساس روش وود و ایوانز می‌باشد.

### معرفی منطقه‌ی مورد مطالعه

محدوده‌ی مورد مطالعه این پژوهش شامل خط ارتفاعی ۲۵۰۰ متر به بالا در زردکوه به مختصات جغرافیایی  $50^{\circ}10'$  تا  $50^{\circ}00'$  شرقی و  $32^{\circ}30'$  تا  $32^{\circ}15'$  شمالی می‌باشد. ارتفاعات زردکوه بختیاری در بلندترین بخش واحد زمین‌ساختی تراست زاگرس یا زاگرس مرتفع قرار گرفته است (درویش‌زاده، ۱۳۷۶). رشته کوه زاگرس از سه کوهستان مهم به نام‌های اشتران‌کوه، زردکوه و دنا تشکیل شده است. زردکوه تنها شامل یک قلعه‌ی منفرد نیست. قله زردکوه به ترتیب از جنوب شرقی به شمال غربی شامل کوه میلی ۴۰۰۰ متر، قله درویش کزلی ۴۰۱۰ متر، قله چری ۴۱۰۰ متر، خرسان ۴۰۵۰ متر، کلونچین ۴۲۲۱ متر، شاه شهیدان ۴۱۸۰ متر، سردان ۴۰۰۰ متر، قله لاسوزو ۳۹۸۸ متر، قله آب‌سفید ۴۰۵۰ متر و قله هفت تنان ۴۱۸۰ متر می‌باشند (یمانی، ۱۳۸۶). در این میان قله کلونچین با ارتفاع ۴۲۲۰ متر و بعد از آن قله شاه شهیدان با

ارتفاع ۴۱۸۰ متر بلندترین قله‌های این رشته عظیم کوهستانی را تشکیل می‌دهند. موقعیت ریاضی این دو قله به ترتیب ۳۲ درجه و ۱۷ دقیقه و ۳۲ درجه و ۲۳ دقیقه عرض شمالی می‌باشد. قله‌های کلونچین و شاه شهیدان تقریباً در امتداد یک نصف‌النهار با مختصات ۵۰ درجه و ۷ دقیقه طول شرقی واقع شده‌اند. ایستگاه هواشناسی کوه‌رنگ که در نزدیکی آبادی چلگرد استقرار یافته پر باران‌ترین نقطه‌ی داخلی کشور با بارش متوسط سالانه ۱۶۰۰ میلی‌متر محسوب می‌شود. اقلیم این محدوده، سرد کوهستانی است و بارش‌ها به طور عمده به صورت برف است (علیجانی، ۱۳۷۶).

### مواد و روش‌ها

به منظور رسیدن به اهداف پژوهش، از نقشه‌ی توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ مدل رقومی ارتفاع منطقه با دقت ۲۰ متر تهیه گردید و سپس مشتق اول (شیب) و از روی مشتق اول مشتقات ثانوی که عبارتند از انحنای پلان و پروفایل، انحنای کلی، انحنای حداقل و حداکثر، انحنای طولی و مقطعی در محیط نرم‌افزار ENVI استخراج شد. اطلاعات لایه‌های مشتق اول و مشتقات دوم با استفاده از منطق فازی استانداردسازی و آنگاه ترکیب گردیدند که حاصل آن نقشه‌ی رنگی واحد (RGB) است که با ترکیب باندهای مختلف آن می‌توانیم خروجی‌های رنگی قابل ملاحظه‌ای به دست آوریم. ابتدا چاله‌های سیرک مانند بر روی نقشه‌ی توپوگرافی مشخص شد. جهت انجام طبقه‌بندی نظارت شده، چهار سیرک آموزشی در نقشه‌ی رنگی واحد معرفی شد و سپس مدل در محیط نرم‌افزار GIS اجرا شد. در ادامه مدل پیشنهادی ایوانز و کاکس (ایوانز، ۱۹۷۴) جهت استخراج سیرک‌ها با استفاده از دستور focal point در محیط GIS اجرا شد و در نهایت با خروجی مدل طبقه‌بندی نظارت شده تطبیق داده شده. به منظور ارزیابی دقت طبقه‌بندی و خروجی لندفرم‌ها، از روش اعتباریابی متقاطع دقت کلی استفاده شده است.

### استخراج پارامترهای ژئومورفومتری

از اهداف ژئومورفولوژیست‌ها در کار با مدل‌های لندفرم‌های مختلف درک واقعیت‌های فیزیکی محیط است. اشتقاق واحدهای لندفرم می‌تواند با استفاده از رویکردهای مختلفی شامل طبقه‌بندی پارامترهای مرفومتری، استفاده از فیلترهای مختلف، آنالیز خوشه‌ای و آمار چندمتغیره باشد (مهدی تاز، ۱۳۹۳). شیب می‌تواند مقعر یا محدب باشد. جهت نمایش وضعیت تحدب یا تقعر شیب از انحنا کمک می‌گیریم. در حقیقت انحنا مشتق درجه دوم شیب است که با تأکید بر جنبه‌های مختلف شیب، وضعیت فیزیکی سطح لندفرم را نمایان می‌کند. تعاریف و معادلات متنوع از انحنا شده است، اما تعریف جامع از انحنای لندفرم به نظر کار سختی می‌رسد. طبق تعریف ایوانز (۱۹۸۰) و زونبرگ (۱۹۸۷) برای محاسبه‌ی انحنا پیکسل هدف از نقاط ارتفاعی سلول‌های همسایه استفاده می‌شود.

$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I \quad (۱): \text{رابطه‌ی}$$

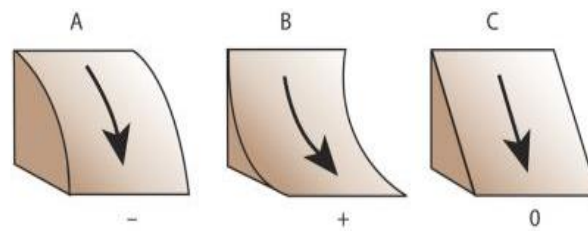
برای محاسبه‌ی انحنا از یک پنجره متشکل از پیکسل‌های ۳ در ۳ بر روی بردار  $x$  و  $y$  استفاده می‌شود بدین معنا که از ۹ نقطه‌ی ارتفاعی جهت تشکیل انحنا استفاده می‌شود. مقادیر مثبت و منفی در هر انحنا معرف یک ویژگی از لندفرم هستند که البته با توجه به نرم‌افزارهایی مختلف که برای این منظور طراحی شده است مانند Microdem, Surfer, SAGA, Landserf علایم متفاوت خواهد بود. در این تحقیق انحنا با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS بررسی می‌گردد در نتیجه تعاریف وابسته به آن ارائه خواهد شد. داده‌ی ورودی در مطالعات ژئومورفومتری، مدل رقومی ارتفاعی می‌باشد. پارامتری کردن ناهمواری‌ها و آنالیز مکانی داده به منظور یافتن ارتباط بین اشکال واقعی و مقادیر عددی است. در این راستا وود<sup>۱</sup> الگوریتم‌های عددی را برای توصیف کمی ناهمواری‌ها با استفاده از تعداد محدودی عدد و رقم برای طبقات مرفومتری و اشکال آن، ارائه کرد. قواعد تعریف شده برای هر کلاس مرفومتری، بر پایه مقدار شیب و تقعر آن بنا نهاده شده که هر دو از مدل رقومی ارتفاعی استخراج می‌گردد. طبقات مرفومتری

پیشنهاد شده توسط وود، شامل لبه‌ها، کانال‌ها، سطوح، حفره‌ها، رئوس و گردنه‌ها می‌باشد. البته بعدها طبقات دیگری از قبیل مناطق پلکانی و پرتگاه، به آن اضافه شد. استفاده از پارامترهای مرفومتريک، بیانگر پیشرفت در توصیف ویژگی‌های هر یک از اجزای مدل‌های رقومی ارتفاعی می‌باشد و این پارامترها به طور کامل بیان‌کننده‌ی ترکیب و ارتباط پیکسل‌ها بیان لندفرم‌های مختلف، می‌باشد (مهدی تاز، ۱۳۹۳). این روابط به صورت اتوماتیک در محیط نرم‌افزار اجرا می‌شود.

جدول (۱) روابط مشتق اول و دوم DEM

پارامتر مورفومتريک	رابطه
شیب	$\arctan(\sqrt{d^2 + e^2})$
انحنای پروفیل	$n * g * (a * d^2 + b * e^2 + c * d * e) / (d^2 + e^2) * (1 + (d^2 + e^2))^{1.5}$
انحنای طولی	$n * g * (a * d^2 + b * e^2 + c * d * e) / (d^2 + e^2) * (1 + (d^2 + e^2))^{1.5}$
انحنای حداکثر	$n * g * (-a - b + \sqrt{(a - b) * (a - b) + c^2})$
انحنای حداقل	$n * g * (-a - b - \sqrt{(a - b) * (a - b) + c^2})$

در روابط ارائه شده در جدول (۱)، g: قدرت تفکیک مدل رقومی ارتفاع؛ n: ابعاد پنجره متحرک؛ a-f: ضرایب درجه دوم است.

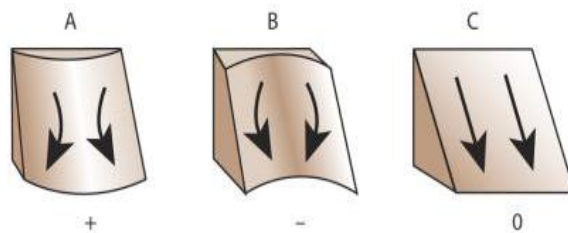


شکل (۱) انحنای پروفایل

انحنای پروفیل<sup>۱</sup> یا انحنای عمودی، مقدار تغییر شیب را منطبق با جهت تغییر آن به صورت عمودی محاسبه می‌کند. اهمیت ویژه انحنای پروفیل در نشان دادن تقعر، تحدب و سطح مسطح است. طبیعی است از این طریق می‌توان اطلاعات چون دیواره‌ی پرفیل شیب

سیرک یا کف آن به صورت کمی مشخص کرد. اما ابهامات که ممکن است در این راستا پیش بیاید اثبات صحت مقادیر به دست آمده با نشانه‌های آن و نوع سطح زمین که با آن می باشد. برای درک آن، سطوح محدب را با علامت منفی و سطوح مقعر را با علامت مثبت نمایش می دهند. برای راحتی کار، می توان اعداد را در ۱۰۰ ضرب کنیم.

انحنای پلان<sup>۱</sup> که به آن شیب افقی نیز می گویند و می توان آن را روی شیب سطحی نمایش داد. مقدار تغییر شیب در جهت افقی را انحنای پلان می گویند. در حقیقت شیب سطحی را در امتداد خط تقاطع بین سطح زمین و محور XY می باشد. در حقیقت به ما اطلاعاتی در رابطه با ویژگی همگرا یا واگرا بودن لندفرم‌ها می دهد. بدین گونه که اعداد منفی سطوح همگرا و اعداد مثبت سطوح واگرا را نشان می دهد.



شکل (۲) انحنای پلان

انحنای طولی و مقطعی<sup>۲</sup> از نقطه نظر مفهومی به ترتیب شبیه به انحنای پروفیل و انحنای پلان می باشند، حتی از نظر تعریف ژئومورفولوژی تعریف یکسان با آنها دارند. تفاوت آنها در الگوریتم‌هایی اجرایی در آنهاست. میانگین، حداکثر و حداقل انحنای معمولاً از انحنای حداقل و حداکثر به دست می آید (اسمیت و همکاران، ۲۰۱۲) طبق گفته‌ی اولیا (۲۰۰۹) این پارامتر در تحقیقات ژئومورفولوژی از اهمیت زیادی برخوردار است چرا که ارزش میانی در میزان تحدب یا تقعر بودن لندفرم را بیان می کند. انحنای کلی<sup>۴</sup> اولین بار توسط مور

1- Plan Curvature

2- Longitudinal and Cross-Sectional Curvature

3- Mean, Maximum and Minimum Curvature

4- General Curvature

(۱۹۹۳) شناسایی شد. با استفاده از این الگوریتم می‌توان انحنای کلی لندفرم را بررسی کرد و از این طریق سطوح محدب چون قله و خط‌الراس که انحنای مثبت دارند نشان داد. ارزش‌های منفی در این انحنا نشان‌دهنده‌ی سطوح مقعر مانند دره‌ها است.

### طبقه‌بندی حداکثر احتمال

در این تحقیق از روش طبقه‌بندی نظارت شده حداکثر احتمال برای طبقه‌بندی سیرک‌ها استفاده شد و از شاخص‌های ژئومورفومتریک به عنوان ورودی این روش استفاده گردید. روش مذکور از روش‌های استاندارد طبقه‌بندی بوده و بر اساس تئوری احتمالات طرح ریزی شده است. روش یاد شده نیز همانند سایر روش‌ها از یک سری توابع تفکیک تشکیل شده است که بر اساس آنها اقدام به تعیین سطوح تصمیم‌گیری بین کلاس‌ها می‌شود.<sup>۱</sup> قانون تصمیم‌گیری در روش حداکثر احتمال به شرح زیر است:

$$P_i(x) > p_j(x) P_i(x) = \log p(w_i) - \frac{1}{2} \log |\sum_i| - \frac{1}{2} (x - u_i)^T \sum_i^{-1} (x - u_i) \quad (۲):$$

$X = i$  در کلاس  $i$  قرار می‌گیرد اگر و فقط اگر،  $P_i(x)$ : احتمال وجود  $x$  در کلاس  $i$

$P(w_i)$ : احتمال اولیه کلاس  $i$  می‌باشد که احتمال وقوع کلاس  $i$  در منطقه مورد نظر را نشان می‌دهد.

### بحث و نتایج

به منظور استخراج سیرک‌های یخچالی منطقه‌ی زردکوه، ۲۶ چاله سیرک مانند بر روی نقشه‌های توپوگرافی مشخص شد (شکل ۳). از آنجایی که هدف این پژوهش استخراج سیرک‌ها بر اساس ویژگی‌های مورفومتری است، هفت شاخص مورفومتری تعیین و تهیه شد. انحنای پروفیل و پلان، انحنای حداقل و حداکثر، انحنای طولی و مقطعی، انحنای کلی منطقه از روی مشتق اول یا شیب منطقه تهیه شد. در ادامه ۸ لایه مورفومتری با

1- Hudson, 1987, 1785-1796



منطق فازی استانداردسازی و سپس ترکیب شده<sup>۱</sup> و نقشه‌ی رنگی<sup>۲</sup> واحدی تشکیل شده از کلیه‌ی پارامترهای مورفومتریک به دست آمد (شکل ۴). با تغییر باندهای مختلف این نقشه می‌توان خروجی‌های رنگی قابل ملاحظه همانند نمایش خط‌الراس‌ها، خط‌القعرها، جهت شیب، اختلاف ارتفاع و غیره به دست آمد. به عنوان مثال با ترکیب باندهای شیب، انحناى پلان و پروفیل می‌توان پرتگاه‌ها را به رنگ آبی و شبکه‌ی رودخانه را به رنگ سبز نشان داد (شکل ۴).

جدول (۲) ویژگی‌های مورفومتریک سیرک‌های آزمایشی

پارامتر سیرک	شیب			انحنای پروفایل		
	حداقل	حداکثر	میانگین	حداقل	حداکثر	میانگین
A	۳/۸۸	۱۲۵/۹۲	۵۴/۲۳	۰/۵۴	۱/۱۶	۰/۱۶
B	۱/۴۶	۱۱۴/۵۲	۳۸/۷۶	-۲/۰۰	۶/۳۰	۰/۱۵
C	۶/۰۵	۱۲۲/۷۷	۶۳/۵۰	-۰/۶۹	۲/۷۹	۰/۰۸
D	۲۱/۳۸	۹۴/۰۰	۵۱/۳۹	-۰/۵۶	۱/۳۷	۰/۲۳

پارامتر سیرک	انحنای حداکثر			انحنای حداقل		
	حداقل	حداکثر	میانگین	حداقل	حداکثر	میانگین
A	-۰/۲۱	۱/۲۳	۰/۳۸	-۰/۷۶	۰/۶۵	-۰/۰۸
B	-۰/۲۷	۴/۲۷	۰/۳۳	-۱/۸۴	۳/۱۲	-۰/۰۹
C	-۰/۵۰	۲/۲۵	۰/۲۸	-۰/۸۴	۱/۸۰	-۰/۱۵
D	-۰/۳۲	۱/۳۱	۰/۴۳	-۰/۶۳	۰/۵۹	-۰/۰۸

پارامتر سیرک	انحنای پلان			انحنای کلی		
	حداقل	حداکثر	میانگین	حداقل	حداکثر	میانگین
A	-۱۱/۰۰	۱۰/۴۳	-۰/۶۳	-۵/۸۴	۵/۵۸	-۰/۱۵
B	-۲۱/۰۶	۵/۴۱	-۰/۸۰	-۴۴/۹۹	۲۱/۳۹	-۰/۴۲
C	-۷/۱۷	۵/۶۴	-۰/۳۴	-۱۸/۰۸	۱۰/۳۷	۰/۴۲
D	-۳/۲۰	۱/۶۷	۰/۴۴	-۵/۹۸	۶/۹۶	۰/۲۳

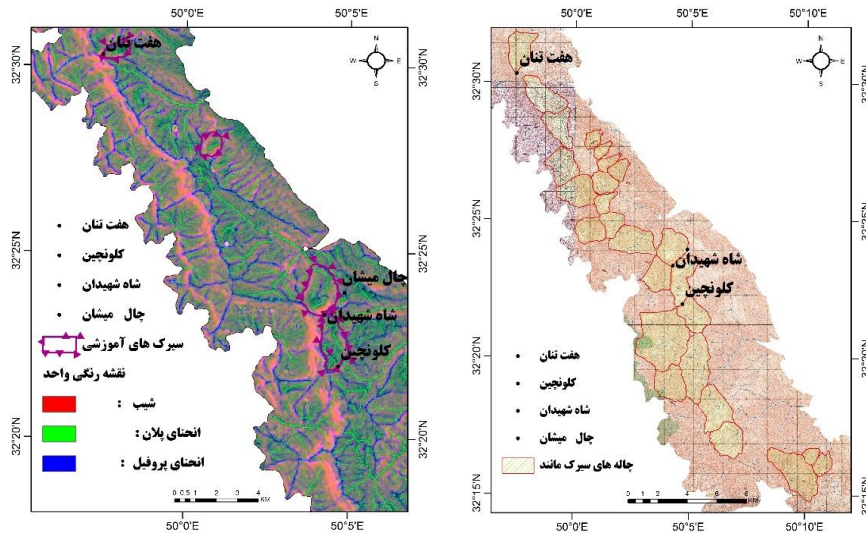
پارامتر سیرک	انحنای طولی			انحنای مقطعی		
	حداقل	حداکثر	میانگین	حداقل	حداکثر	میانگین
A	-۱۱/۰۰	۱۰/۴۳	-۰/۶۳	-۵/۸۴	۵/۵۸	-۰/۱۵
B	-۲۱/۰۶	۵/۴۱	-۰/۸۰	-۴۴/۹۹	۲۱/۳۹	-۰/۴۲
C	-۷/۱۷	۵/۶۴	-۰/۳۴	-۱۸/۰۸	۱۰/۳۷	۰/۴۲
D	-۳/۲۰	۱/۶۷	۰/۴۴	-۵/۹۸	۶/۹۶	۰/۲۳

1- Layer Satck

2- RGB

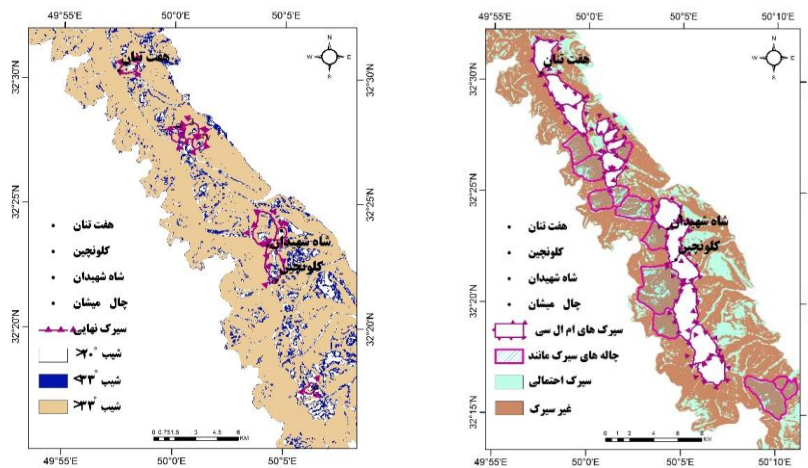
میانگین	حداکثر	حداقل	میانگین	حداکثر	حداقل	سیرک
۰/۱۵	۰/۸۳	-۰/۵۸	۰/۱۵	۱/۲۱	-۰/۵۳	A
۰-۱۴	۳/۲۳	-۰/۷۱	۰/۱۱	۴/۱۶	-۱/۳۳	B
۰/۰۶	۱/۹۱	-۰/۷۵	۰/۰۷	۲/۱۴	-۰/۶۳	C
۰/۱۳	۰/۹۶	-۰/۴۱	۰/۲۱	۱/۳۰	-۰/۴۶	D

برای اجرای مدل طبقه‌بندی نظارت شده<sup>۱</sup>، ویژگی‌های مورفومتری چهار سیرک توسعه‌یافته استخراج شد (جدول ۲). همانگونه که در جدول مشاهده می‌شود مقادیر هر کدام از پارامترهای ژئومورفومتری نمایانگر یک وجه از ویژگی‌های شکل لندفرم‌ها است. نتایج ارزیابی کمی نشان می‌دهد که لندفرم سیرک مانند ارزش مثبت برای میانگین انحنای پروفیل دارد که خود نشان‌دهنده‌ی سطوح مقعر است. در حالی که میانگین پلان ارزش‌های منفی دارد و در نتیجه سطوح همگرا را نشان می‌دهد. انحنای کلی به دلیل داشتن مقادیر نزدیک به صفر ارزش‌های مثبت و منفی نشان می‌دهند.



شکل (۳) چاله‌های سیرک مانند مشخص شده  
شکل (۴) ترکیب لایه‌های پارامترهای موفولوژیک  
بر روی نقشه‌ی توپوگرافی جهت تهیه‌ی نقشه‌ی RGB به همراه چهار  
سیرک آموزشی معرفی شده جهت طبقه‌بندی  
نظارت

در ادامه چهار سیرک توسعه‌یافته را به عنوان سیرک آموزشی در نقشه‌ی رنگی حاصل از ترکیب پارامترهای مورفومتری معرفی گردید (شکل ۴) و سپس مدل اجرا شد. نتایج حاصل از طبقه‌بندی نظارت شده نشان‌دهنده‌ی ۱۴ چاله سیرک مانند از ۲۶ چاله می‌باشد (شکل ۵).



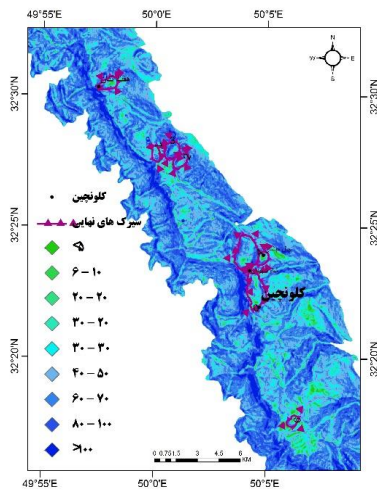
شکل (۵) سیرک‌های استخراج شده بر اساس مدل  
شکل (۶) سیرک‌های استخراج شده بر اساس  
نظریه ایوانز و کاکس

طبق تعریف ایوانز و کاکس (۱۹۷۴) لندفرمی سیرک محسوب می‌شود که حداقل بخشی از کف آن شیبی کمتر از ۲۰ درجه و دیواره‌ی آن شیبی تندتر از زاویه‌ی اصلی تالوس داشته باشد (به عنوان مثال ۳۱-۳۶ درجه). در اینجا به دلیل پیچیدگی‌های زمین‌شناسی و رژیم پر بارش منطقه، تک‌تک چاله‌های مشخص شده توسط مدل MLC

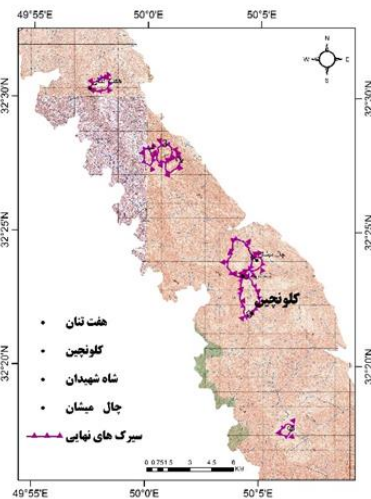
با استفاده از سیستم طبقه‌بندی سیرک‌ها معرفی شده توسط ایوانز و کاکس (۱۹۷۴) مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۶). از تطبیق مدل MLC و مدل ایوانز و کاکس، با مشاهده سیرک‌ها و بررسی نظریه‌های کارشناسان، می‌توان نتیجه گرفت که در منطقه ۸ سیرک توسعه‌یافته وجود دارد (شکل ۶). در ادامه از روش اعتباریابی متقاطع جهت ارزیابی دقت طبقه‌بندی و نقشه‌ی خروجی لندفرم‌ها استفاده شد. چندین دلیل باعث پایین آمدن دقت مدل به ۶۰٪ شده است که عبارت است از:

۱- وجود پلاتفرم‌هایی با شیب ملایم بر روی ارتفاعات زردکوه در بعضی نقاط باعث شده تا مدل اعمالی ویژگی‌های مورفومتریکی سطوح ملایم را با سیرک‌ها مشترک بداند. بعضاً در مدل چاله استخراج شده به عنوان سیرک مشخص شده اما با بررسی‌های انجام شده مشخص شد که چاله مذکور پلاتفرمی است که توسط شبکه‌ی آبراهه‌ای شیپار داده و آن را نمی‌توان در به عنوان سیرک‌ها محسوب کرد چرا که عاری از دیواره پر شیب مخصوص سیرک می‌باشد و حتی شواهدی از فرسایش دیواره‌ای در آن دیده نمی‌شود.

۲- طبق تعریف ایوانز و کاکس کف سیرک‌ها شیبی ملایم کمتر از ۲۰٪ دارند (۱۹۷۴). وجود رژیم بارندگی شدید در منطقه باعث حفر و فرسایش دره‌هایی شده است که بعضاً شیبی کمتر از ۲۰٪ در کف آنها ملاحظه می‌شود. در بعضی جاها ملاحظه می‌شود که مدل چاله‌هایی که شیب کمتر از ۲۰٪ دارند به عنوان سیرک در نظر گرفته است اما با بررسی مشخص می‌شود که چاله در حقیقت حاصل عملکرد فرآیندهای آبی به وجود آمده است چرا که کف واقعی در آنها ملاحظه نمی‌شود.



شکل (۸) نمایش سیرک‌های استخراج شده بر روی نقشه‌ی شیب



شکل (۷) نمایش سیرک‌های استخراج شده بر روی نقشه‌ی توپوگرافی

### نتیجه‌گیری

این تحقیق با رویکرد ژئومورفومتری به شناسایی و استخراج ویژگی‌های سیرک‌های یخچالی پرداخته است. سیرک‌ها با توجه به اشکال خاصشان چه در مشاهده‌ی عینی و چه در تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های توپوگرافی شاخصی مناسبی برای تشخیص یخچال‌ها و برف مرزها همچنین دنباله‌ی زبانه‌ی یخچالی در یک منطقه می‌باشند چرا که با تأمین شرایط لازم، زمینه برای شکل‌گیری یخچال‌ها را در خود فراهم می‌کنند. از طرف دیگر ژئومورفومتری علم شناسایی ویژگی‌های شکلی عوارض طبیعی سطح زمین به صورت کمی بر اساس مدل‌های رقومی ارتفاع است. با توجه به توسعه داده‌های رقومی بخصوص مدل‌های رقومی ارتفاع، روش‌های شناسایی لندفرم‌ها و تهیه‌ی نقشه از آنها مبتنی بر ژئومورفومتری افزایش یافته است. در این تحقیق پارامترهای ژئومورفومتریک

شامل انحناى پلان، پروفیل، کلی، حداقل، حداکثر، عرضی و انحناى طولی استخراج گردید و برای هر محدوده سیرک مقادیر شاخص‌ها محاسبه شد.

از ترکیب شاخص‌های ژئومورفومتریک نقشه‌ی رنگی با قابلیت ترکیب باندی به دست آمد که نتایج نشان داد قابلیت مناسبی در کمک به شناسایی بصری عوارض مختلف بخصوص سیرک‌های یخچالی دارد همچنین نتایج این پژوهش نشان می‌دهد سیرک‌های یخچالی زردکوه به علت وجود سازندهای کربناته عمدتاً شکل‌های تیپیک سیرکی را ندارند ولی شاخص‌های ژئومورفومتریک مورد استفاده توانسته تاحد زیادی ویژگی‌های شکلی و کمی سیرک‌های منطقه‌ی زردکوه را نمایش دهد و در استخراج سیرک‌ها و همچنین شناسایی و طبقه‌بندی سایر لندفرم‌ها به عنوان یک رویکرد جدید مطرح گردد. در ادامه این پژوهش با استفاده از رویکرد مدل MLC و مطابقت خروجی آن با تعریف سیرک ارایه شده توسط ایوانز و کاکس (۱۹۷۴) به ۸ سیرک کاملاً توسعه یافته (شکل ۸ و ۷) در منطقه رسیدیم. از طرف دیگر سایر مطالعات انجام شده در زمینه شناسایی و استخراج سیرک بر اساس رویکرد ژئومورفومتری از جمله ایوانز (۲۰۱۲)، (بار و اسپاگنولو، ۲۰۱۵) دقت بیشتری را نشان می‌دهد که علت اصلی آن ساختار لیتولوژی کربناته زردکوه است که شکل سیرک‌ها به علت دخالت انحلال از شکل تیپیک آن خارج نموده است. بنابر این می‌توان گفت رویکرد ژئومورفومتری در شناسایی اتوماسیون سیرک‌ها در این مناطق نمی‌تواند کارایی زیادی داشته باشد ولی به عنوان اطلاعات کمکی در تفسیر بصری و شناسایی لندفرم‌ها به مفسر می‌تواند کمک زیادی نماید.

## منابع

- تازه، مهدی (۱۳۹۳)، طبقه‌بندی دشتهای مناطق بیابانی براساس پارامترهای ژئومورفومتری مطالعه‌ی موردی (عقدا، یزد)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره‌ی ۴، صص ۱۰۵-۱۱۶.
- یمانی، مجتبی (۱۳۸۶)، ژئومورفولوژی یخچال‌های زردکوه (بررسی اشکال ژئومورفولوژیک و حدود گسترش آنها)، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره‌ی ۵۹، صص ۱۳۹-۱۲۵.
- Bue, B.D. a. S.T.F. (2006), **Automated classification of landforms on Mars**, Computers & Geosciences, 32(5), PP. 604-614.
- Barr, I.D., Spagnolo, M. (2013), **Palaeoglacial and palaeoclimatic conditions in the NW Pacific, as revealed by a morphometric analysis of cirques upon the Kamchatka Peninsula**, Geomorphology, 192, PP. 15-29.
- Dehn, M., Gärtner, H., Dikau, R. (2001), **Principles of semantic modeling of landform structures**, Computers & Geosciences, 27, PP. 1005-1010.
- Delmas, M.G.Y.C.M. (2015), **A critical appraisal of allometric growth among alpine cirques based on multivariate statistics and spatial analysis**, Geomorphology, Vol. 228, PP. 637-652.
- Egholm, D.N.S.P.V.L.J. (2009), **Glacial effects limiting mountain height**, Nature, Vol. 460, PP. 884-887.
- Etzelmüller, B., Sulebak, J.S. (2000), **Developments in the Use of Digital Elevation Models in Periglacial Geomorphology and Glaciology**, Physische Geographie, Vol. 41, PP. 35-58.
- Evans I.S. (1980), **An integrated system of terrain analysis and slope mapping**, Geomorphol, Suppl. Bd., 36, PP. 274-295.
- Evans, I. (1972), **General geomorphology, derivatives of altitude and descriptive statistics**, In R.J.Chorley (Ed.), **Spatial Analysis in Geomorphology**, London: Methuen & Co. Ltd.
- Evans, I.C.N. (1974), **Geomorphometry and the operational definition of cirques**, Area, Vol. 6, PP. 150-153.

- Evans, I.C.N. (1995), **The form of glacial cirques in the English Lake District**, Cumbria, Zeitschrift für Geomorphologie, N.F., Vol. 39, PP. 175–202.
- Evans, I. (1987), **The morphometry of specific landforms**, In: Gardiner, V. (Ed.), 1986 Part II. In: Chichester: John Wiley, PP, 105–124.
- Evans, I., (2006a), **Allometric development of glacial cirque form: geological, relief and regional effects on the cirques of Wales**, Geomorphology, 80(3), PP. 245–266.
- Evans, I. (2006b), **Local aspect asymmetry of mountain glaciation: a global survey of consistency of favoured directions for glacier numbers and altitudes**, Geomorphology, 73(1), PP. 166-184.
- Gordon, J. (1977), **Morphometry of cirques in the Kintail–Affric–Cannich area of northwest Scotland**, Geogr. Ann. Ser. A Phys. Geogr., Vol. 59, PP. 177–194.
- Graf, W. (1976), **Cirques as glacier locations**, Arctic and Alpine Research, 8(1), PP. 79–90.
- Giles, P.T.; Franklin, S.E. (1998), **An automated approach to the classification of the slope units using digital data**, Geomorphology, 21(3-4), PP. 251-264.
- Mîndrescu, M.E.I.C.N. (2010), **Climatic implications of cirque distribution in the Romanian Carpathians: palaeowind directions during glacial periods**, J. Quat.Sci., 25(6), PP. 875-888.
- Mitchell, S.G., Humphries, E.E. (2015), **Glacial cirques and the relationship between equilibrium line altitudes and mountain range height**, Geology, 43(1), PP. 35-38.
- Mitchell, S.G., Montgomery, D.R. (2006), **Influence of a glacial buzzsaw on the height and morphology of the Cascade Range in central Washington State, USA**. Quat. Res., 65(1), PP. 96-107.
- Moore I.D., Gessler P.E., Nielsen G.A., Peterson G.A. (1993), **Soil attribute prediction using terrain analysis**, Soil Science Society of America Journal, Vol. 57(2). PP. 443-452.
- Zeverbergen L.W., Thorne C.R. (1987), **Quantitative Analysis of Land Surface Topography**, Earth Surface Processes and Landforms 12: PP. 47–56.