

## طبقه‌بندی نیمه‌اتوماتیک ژئومورفومتریکی یاردانگ‌های

### لوت با شبکه‌های عصبی مصنوعی

❖ امیر هوشنگ احسانی\*؛ دانشیار دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران  
❖ مرضیه فروتن؛ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد دانشگاه شیراز

#### چکیده

یاردانگ‌های منطقه فراخشک لوت یکی از منحصربه‌فردترین لندفرم‌های آبی-بادی مناطق بیابانی است. شناخت و پهنه‌بندی ژئومورفومتریکی این یاردانگ‌ها، با توجه به میسرنبودن بازدهی‌های میدانی و دسترسی به منطقه، دقت مطلوبی نخواهد داشت. در این مطالعه یاردانگ‌های دشت لوت، با توپوگرافی ویژه و خاص، با یکی از روش‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی با عنوان «الگوریتم خودسازمانده» مطالعه و طبقه‌بندی شد. نخست ۲۲ پارامتر مورفومتریکی نمای اول، نمای دوم، و نمای سوم از مدل رقومی ارتفاعی با اندازه سلول ۱۰ متر بر اساس برنامه‌نویسی و با کمک برازش سطوح درجه دوم و درجه سوم در نرم‌افزار متلب محاسبه و استخراج شد. در مرحله بعد، ۷ پارامتر مورفومتریکی مؤثر در طبقه‌بندی و همین‌طور تعداد کلاس‌های بهینه طبقه‌بندی طی دو مرحله با استفاده از شاخص فاکتور ضریب بهینه و ضریب داویس-بولدین (ضریب دی-بی) تعیین گردید. سپس، از آنالیز حساسیت به منظور تعیین میزان تأثیر هر یک از پارامترهای مورفومتریکی ورودی بر روی نتایج استفاده شد. در نهایت، پارامترهای بهینه مورفومتریکی با الگوریتم شبکه خودسازمانده طبقه‌بندی شد و نتایج با استفاده از اطلاعات موجود و نقشه‌های توپوگرافی مقایسه گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که پارامترهای انحنا سطحی، چرخش، انتگرال ارتفاع‌سنجی، کل انحنا جمع‌ی، شیب، انحنا حدی، و متوسط انحنا بهینه‌ترین پارامترهای مورفومتریکی در جدایی یاردانگ‌ها هستند. همچنین، پارامترهای فوق یاردانگ‌های لوت را به هفت پهنه تقسیم می‌کنند؛ این پهنه‌ها عبارت‌اند از: دره گردنه‌ای، گودی بیضوی، کریدور کم‌شیب، شانه یاردانگ با شیب مقعر، شانه یاردانگ با شیب محدب، رأس یاردانگ، و آبراهه کریدور. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که نتایج طبقه‌بندی به پارامترهای چرخش، متوسط انحنا، و انتگرال ارتفاع‌سنجی دارای بیشترین حساسیت‌اند و جفت پارامترهای انتگرال ارتفاع‌سنجی-انحنا حدی دارای بیشترین قدرت تفکیک کلاس‌ها هستند. به طور کلی، شبکه خودسازمانده به عنوان یک الگوریتم نظارت‌نشده شبکه‌های عصبی مصنوعی در تلفیق پارامترهای مورفومتریکی برای آنالیز نیمه‌اتوماتیک لندفرم‌های بیابان بسیار کارآمد است.

واژگان کلیدی: دشت لوت، ژئومورفولوژی کمی، ضریب دی-بی، فاکتور، ضریب بهینه، مدل رقومی ارتفاع، نقشه‌های خودسازمانده.

## مقدمه

محاسبه بود: ارتفاع، شیب، جهت، انحنای پروفیلی، و انحنای سطحی. او این پارامترها را به گروه‌های مشتق درجه صفر، ۱، و ۲ تقسیم کرد؛ جایی که عملیات درجه ۱ و ۲ دارای اجزایی در جهت‌های X و Y است [۹]. نخستین بار مِتر<sup>۱</sup> تحلیل و تمایز خودکار پهنه‌های همگن توپوگرافیک بر روی سطح زمین را با استفاده از پارامترهای ژئومورفومتریک انجام داد. استفاده از نرم افزارها در زمینه تحلیل مورفومتریک سطح زمین در کنیا توسط بوروو با استفاده از نرم افزار مپ<sup>۲</sup> انجام شد. دیکاو<sup>۳</sup> روشی برای تقسیم‌بندی لندفرم‌ها پیشنهاد داد. او در این روش به توصیف الگوها و واحدهای تشکیل‌دهنده عوارض سطح زمین پرداخت. وی بر مبنای ترکیب نوع انحنای سطح در جهت‌های افقی و عمودی به انواع مقعر، محدب، و تخت، ۹ کلاس را معرفی کرد [۲].

یکی از قدم‌های مؤثر در خودکارسازی پهنه‌بندی سطح زمین ارائه روش‌هایی است که با استفاده از آن‌ها برای سطح زمین به طور پیوسته پارامترهای مورفومتریک به دست می‌آید. در این زمینه، وود نشان داد که چگونه با استفاده از داده‌های رقومی ارتفاعی و استفاده از پنجره‌هایی با ابعاد مختلف می‌توان پارامترهای لازم برای تشخیص عوارض را محاسبه کرد [۲]. بسیاری از روش‌های فراگیر و کاربردی برای تقسیم‌بندی خودکار اشکال سطح زمین بر پایه محاسبه مقادیر کمی انحنای برای قطعات کوچک از سطح مانند پنجره‌هایی با ابعاد ۳×۳ یا بیشتر در داده‌های رقومی با فواصل مختلف انجام شده است [۵، ۶، ۱۴، ۱۵، ۲۲]. شری و همکارانش در سال ۲۰۰۲، بر اساس مطالعات انجام‌شده توسط گاوس و تروئن، سامانه گسترده‌تر و دقیق‌تری برای طبقه‌بندی و بیان کامل‌تر انحنای مورفومتریک سطح ارائه دادند [۲۱].

یاردانگ‌ها لندفرم‌های فرسایشی دارای جهت‌یافتگی خطی در جهت بادهای غالب منطقه‌اند و طول و ارتفاع آن‌ها حتی به ۱۵۰ کیلومتر و ۷۵ متر می‌رسد. این عوارض در مناطق خشک و فراخشک یافت می‌شود، که سایش بادی همراه با فرسایش آبی عامل غالب فرم‌دهنده سطح زمین است. از جمله مناطقی که یاردانگ‌ها در آن‌ها در سطحی با وسعت حدود ۶۴۸۱ کیلومتر مربع و به عنوان منطقه‌ای تپ در سطح جهانی وجود دارند منطقه غرب لوت است. این عوارض بر روی رسوبات رسی سیلتی پلیستوسن یا تشکیلات لوت با ضخامت تقریبی ۱۳۵ – ۲۰۰ متر تشکیل شده‌اند [۳]. در منطقه یاردانگی لوت، که عامل فرسایش بادی اصلی‌ترین عامل به‌وجودآورنده فرم‌های سطحی است، پهنه‌هایی با خواص مورفومتریک منحصربه‌فرد وجود دارد، و پارامترهایی که برای پهنه‌بندی این منطقه کارایی بالایی دارند با پارامترهای مورفومتریک مورد استفاده برای پهنه‌بندی سایر مناطق، که عامل ایجاد آن‌ها باد نیست، متفاوت است [۵، ۶]. هدف از این مطالعه، تشخیص بهترین پارامترهای ژئومورفومتریک در منطقه یاردانگ‌های لوت و بارزسازی و طبقه‌بندی عوارض دشت لوت با استفاده از روش نیمه‌خودکار نقشه‌های خودسازمانده و بهینه‌سازی آن است.

مطالعات عوارض سطحی زمین بر پایه ژئومتری نوین را می‌توان در چهار بخش کلی بیان کرد. این چهار بخش شامل مقاطعی است که انحنای سطح، تأثیر نیروی ثقل، پارامترهای مورفومتریک، و ویژگی‌های زمین‌شناسی در کنار پارامترهای قدیمی‌تر مانند ارتفاع، شیب، و جهت در بررسی و پهنه‌بندی عوارض سطحی زمین مورد استفاده قرار گرفتند [۹، ۲۳]. ایوانز در سال ۱۹۷۲، پنج پارامتر زمینی را تعریف کرد که برای هر سطح دو بُعدی پیوسته قابل

1. Mather  
2. MAP  
3. Dikau

دیگر رود شورگز است که از کوه‌های جنوب و جنوب شرقی حوزه آبریز لوت سرچشمه می‌گیرد و پس از عبور از منطقه لوت زنگی احمد و تپه‌های ماسه‌ای جنوبی یاردانگ‌ها به چاله شورگز هامون منتهی می‌شود. منطقه مورد مطالعه از فرسایش توأمان آبی و بادی یک‌جهته بر روی رسوبات دریاچه‌ای تشکیل شده از شن، سیلت، و رس با سن پلی استوسن است. بیشینه و کمینه ارتفاع در این منطقه به ترتیب برابر است با ۳۷۳ و ۲۲۵ متر. دلیل تشکیل یاردانگ‌ها بادهای یک‌جهته بر اساس گلباد نشان داده شده در شکل F.۱، فراخشک بودن منطقه بر اساس منحنی آمبروترمیک در شکل E.۱، و بالای بودن سرعت باد در منطقه بر اساس منحنی متوسط سرعت باد در طول سال (شکل D.۱) است. چنان‌که در شکل‌های A.۱، B.۱، C.۱، و ۲ نشان داده شده است، یاردانگ‌ها به صورت تپه‌های طولی موازی در امتداد شمال غربی - جنوب شرقی قرار گرفته‌اند. تصویر مدل رقومی ارتفاع شکل C.۱ نشان می‌دهد که با وجود تغییر ارتفاع میانگین در منطقه از قسمت‌های شمالی به سمت جنوب الگوی خطی و شکل تپه‌ها در همه منطقه یکسان است.

### داده‌ها و نرم‌افزارها

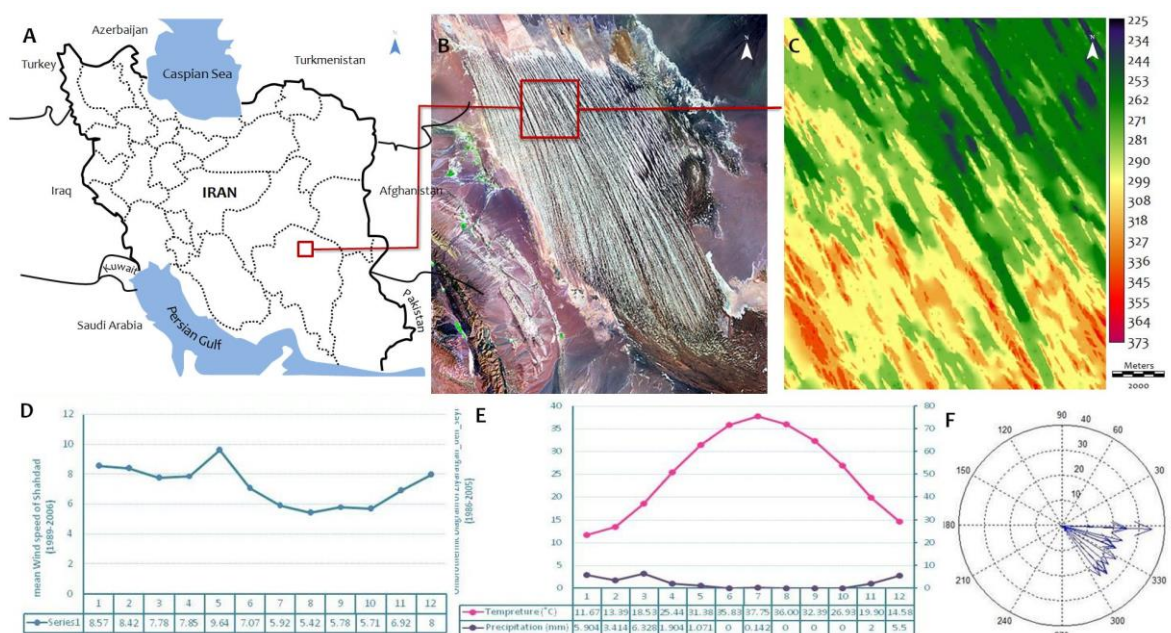
داده ورودی اصلی در این مطالعه مدل رقومی ارتفاع با توان تفکیک ۱۰ متری است که از سازمان نقشه‌برداری ایران به شماره شیت D76513NW تهیه شده و تصویر این نقشه در شکل C.۱ آمده است. روش‌های مختلفی برای تولید داده‌های رقومی ارتفاعی وجود دارد. این‌گونه داده‌ها بیشتر به داده‌های رستری یا ماتریس‌های ارتفاعی مربوط می‌شوند. هر سلول از یک شبکه با یک کد رقومی، که نشان‌دهنده ارتفاع آن نقطه است، مشخص می‌شود. از ماتریس‌های ارتفاعی به عنوان مبنای کار آنالیزها در ژئومورفولوژی کمی استفاده می‌شود [۹].

امروزه، پهنه‌بندی زمین بر اساس روش‌های خودکار و نیمه‌خودکار و با استفاده از داده‌های رقومی ارتفاعی انجام می‌پذیرد. یکی از روش‌های خودکار برای پهنه‌بندی سطح، که از روش شبکه عصبی مصنوعی برگرفته شده، روش نقشه‌های خودسازمانده است. این روش برای تحلیل و دسته‌بندی داده‌های پیچیده، که دارای وابستگی مکانی اند، به‌کار می‌رود [۱۸]. از جمله کاربردهای این روش می‌توان اشاره کرد به: طبقه‌بندی پایگاه‌های هواشناسی با استفاده از فازی و الگوریتم خودسازمانده، تشخیص سنگ‌شناسی منطقه با لندست TM، مدل‌سازی اکولوژیکی، تقسیم‌بندی کاربری اراضی، نقشه‌برداری زمین‌شناسی سطح، طبقه‌بندی کاربری اراضی شهری، دیدارسازی داده‌هایی با ابعاد بالا، دسته‌بندی پوشش زمین، طبقه‌بندی داده‌های سنجش از دور، پهنه‌بندی عوارض سطح مریخ، آنالیز عوارض مورفومتریک، آنالیز عناصر زمین، تشخیص کلوت در بیابان لوت و حوزه‌بندی تکنیکی ایران با استفاده از نقشه‌های خودسازمانده، و نقشه‌برداری سنگ‌شناسی در قبرس [۵، ۶، ۷، ۸، ۱۴، ۱۵، ۱۶].

### روش‌شناسی تحقیق

#### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در حوزه لوت مرکزی در جنوب شرقی ایران در بین طول و عرض جغرافیایی ۳۷° ۳۰' تا ۳۰° ۴۵' و ۵۸° ۷' ۳۰' قرار گرفته است و با اقلیم فراخشک یا بیابانی شدید دارای متوسط بارندگی کمتر از ۵۰ میلی‌متر در سال در غرب چاله لوت قرار دارد. در بیابان لوت تنها رودخانه دائمی، که در شمال حوزه از غرب به شرق در جریان است، رود شوربیرجند است. این رود، در نهایت، به حوزه انتهایی شمالی یاردانگ‌ها منتهی و در اراضی پست و گاهی در میان دالان‌های یاردانگ‌ها سرازیر می‌شود. منبع آب



شکل ۱. A: موقعیت منطقه در ایران، B: تصویر کاذب رنگی ماهواره لندست با ترکیب باندهای ۷، ۴، ۲، C: مدل رقومی ارتفاع ۱۰ متری سازمان نقشه برداری کشور، D: گلباد، و E: نمودار آمبروترمیک منطقه مورد مطالعه

به صورت شبکه‌ای به هم پیوسته و موازی با یکدیگر عمل می‌کنند. در این شبکه‌ها الگوریتم‌هایی برای تحلیل داده‌ها طراحی شده که همانند نرون یا سلول عصبی عمل کند. شبکه‌ها و نرون‌های موجود در آن‌ها به نحوی طراحی شده‌اند که بر اساس ورودی و خروجی‌های داده‌شده می‌توانند پارامترهای داخلی خود را تنظیم نمایند و در اصطلاح آموزش بینند. به طور خلاصه، وقتی شبکه به نحوی آموزش دیده که با وارد کردن داده‌های ورودی همان خروجی‌های مورد نظر را یا مقادیر بسیار نزدیک به آن‌ها را به عنوان خروجی ارائه می‌دهند در اصطلاح یادگیری در شبکه انجام شده است. شبکه‌ها یا سیستم‌های دارای قابلیت یادگیری سیستم‌هایی هستند که می‌توانند خروجی‌ها یا رفتارشان را بر اساس مشاهده عملکردشان بهبود بخشند تا زمانی که به هدف یا مقصدی خاص خود، که یکی نمودن داده‌های خروجی با مشاهدات است، دست یابند. در این شبکه‌ها پارامترهای نرون‌ها یا وزن‌ها به صورت تصادفی یا با قاعده‌های ویژه‌ای مقداردهی می‌شوند.

برای استخراج لایه‌های مورفومتریکی مختلف از مدل رقومی ارتفاع از نرم‌افزار متلب (MATLAB (2010 استفاده شد. دلیل استفاده از این نرم‌افزار قابلیت نوشتن برنامه برای محاسبه پارامترها و قابلیت آن در پردازش داده‌هایی با حجم بالاست. در این مطالعه نیز با استفاده از آخرین نسخه منتشر شده متلب لایه‌ها یا ماتریس داده‌ها برای پارامترهای مختلف مورفومتریکی محاسبه شد.

نرم‌افزار دیگر مورد استفاده در این مطالعه نسخه ۱۶ از نرم‌افزار IDRISI است. ورودی این نرم‌افزار داده‌های رستری (شبکه- پایه) است. این نرم‌افزار حاوی شیوه‌نامه بندی نقشه‌های خودسازمانده در دو بخش نظارت‌شده و نظارت‌نشده است.

### شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم شبکه خودسازمانده

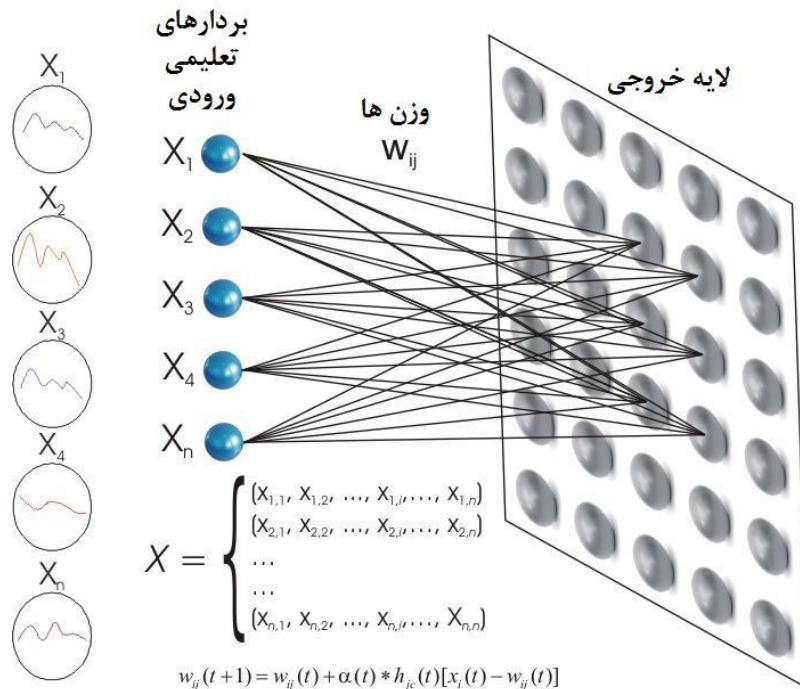
شبکه عصبی مصنوعی سامانه پردازشی داده‌هاست. این شبکه از مغز انسان ایده گرفته و پردازش داده‌ها را به پردازنده‌های کوچک و بسیار زیادی سپرده که

یکدیگر قرار می‌گیرند و با افزایش اختلاف فاصله بین سلول‌های عصبی نیز افزایش می‌یابد. در لایه نهایی، سلول‌های عصبی، که در کنار یکدیگر قرار دارند، بسته به فاصله موجود بین آن‌ها در فرایند یادگیری، بر روی هم تأثیر می‌گذارند و با رفتار متقابل روی یکدیگر وظیفه یادگیری در شبکه خودسازمانده را ایفا می‌کنند (شکل ۲).

الگوریتم این شبکه عبارت است از: مرحله تعیین نرون برنده. در این مرحله، نخست مقادیر اولیه برای وزن مقادیر ورودی به نرون‌ها تعیین می‌شود. سپس، داده‌های ورودی تک تک با مقادیر وزنی میانگین در نرون مقایسه می‌شوند. نرونی که بیشترین شباهت با ورودی را دارد نرون برنده شناخته می‌شود. فرض کنید که  $w_{ij}$  مقدار ضرایب وزنی از ورودی  $i$  به گره خروجی  $j$  در زمان  $t$  است. مقادیر اولیه برای ضرایب وزنی تصادفی تعیین می‌شود.

سپس، بر اساس مقایسه مقادیر خروجی محاسبه شده با خروجی‌های واقعی وزن‌ها بهینه می‌گردد، به نحوی که اختلاف بین خروجی‌های محاسبه شده و واقعی به حداقل ممکن برسد [۱۸].

مدل کوهنن<sup>۱</sup> یا نقشه‌های خودسازمانده گونه‌ای از شبکه‌های عصبی است که برای تحلیل و دسته‌بندی داده‌های مکانی پیچیده و غیرخطی و با تعداد زیاد به کار می‌رود. این یک مدل نظارت نشده و یک نوع شبکه عصبی تطبیقی است که بر اساس یادگیری رقابتی عمل می‌کنند. اختلاف آن‌ها با سایر شبکه‌های مصنوعی در این است که لایه خروجی آن‌ها به صورت نقشه‌ای با ابعاد کوچک است (نقشه توپولوژیک) که در آن سلول‌های عصبی، که هر کدام نماینده واحدهایی از سطح زمین‌اند، دارای پارامترهای مورفومتريک یکسان یا بسیار شبیه به هم‌اند. در لایه خروجی دسته‌بندی به نحوی انجام شده که سلول‌های عصبی شبیه‌تر در فاصله کمتری از



شکل ۲. شبکه خودسازمانده تک‌لایه‌ای [۱۸]

که در این رابطه  $\eta$ ، همان ضریب بهره است ( $0 < \eta < 1$ ) که به تدریج در طول زمان کاهش می یابد. اندازه شعاع همسایگی نیز به تدریج کاهش می یابد و بدین صورت محدوده بالاترین فعالیت یا تأثیر نرون برنده بر روی نرون های مجاورش مرتباً کاهش می یابد. با اعمال این رابطه، مقادیر وزنی نرون های مجاور به مقادیر وزنی نرون برنده شبیه تر می شوند. تصحیح در اطراف نرون برنده در چندین مرحله تکرار می شود و در هر مرحله ضریب تصحیح کوچک تر و شعاع اثر آن کوچک تر می شود. ذکر این نکته لازم است که منظور از شعاع اثر فاصله مکانی نرون های مورد نظر بر روی نقشه توپولوژیک است. در مراحل ابتدایی آموزش، محدوده های همسایگی بزرگ است، ولی همین طور که آموزش ادامه می یابد و در طی آن اثر همسایگی کوچک تر و خالص تر می شود. طرح شبکه خودسازمانده کوهنن در طول آموزش به طور مستقیم وابسته به تعداد تکرار و زمان یادگیری است.

### پارامترهای مورفومتريک

پارامترهای مورفومتريک سطحی بر اساس مشتق های درجه اول، دوم، و سوم معادلات چندمجهولی محاسبه می شوند. جدول ۱ ضرایب این معادلات چندمجهولی را، که تحت عنوان ضرایب مورفومتريک نام دارند، نشان می دهد.

ایوانز<sup>۱</sup> و فلورینسکی<sup>۲</sup> ضرایب جدول ۱ را در قالب معادلات به ترتیب درجه دوم و سوم ارائه کرده اند. روابط ایوانز و فلورینسکی به ترتیب در رابطه ۳ و ۴ آورده شده است [۹، ۱۳].

(رابطه ۳)

$$Z = \frac{rx^2}{2} + \frac{ty^2}{2} + sxy + px + qy + u$$

1. Evans
2. Florinsky

در مرحله بعد، داده های واقعی ورودی، که دارای مقادیر پارامترهای  $x_{i(t)}$  هستند و تعداد این پارامترها در داده ورودی برابر با تعداد وزن های تصادفی موجود در هر نرون است، به شبکه وارد می شوند. برای تعیین نرون برنده یا نرونی که دارای بیشترین شباهت مقادیر وزنی با پارامترهای داده ورودی است، داده ورودی با نرون های شبکه مقایسه می شود. مبنای درجه شباهت داده ورودی با نرون اختلاف بین وزن های نرون با پارامترهای متناظر آن در داده ورودی است. در اصطلاح، اختلاف بین وزن های نرون و پارامترهای داده ورودی با پارامتر فاصله مشخص می شود. فاصله،  $d_j$ ، بین داده برداری ورودی و مقادیر وزن متناظر با آن در هر نرون با رابطه ۱ محاسبه می شود:

(رابطه ۱)

$$d_j = \sum_{i=0}^{n-1} [x_i(t) - w_{ij}(t)]^2$$

که در این رابطه پارامترها عبارت اند از:  $d_j$  فاصله وزن داده ورودی و وزن نرون،  $w_{ij}$  وزن نرون،  $x_i$  بردار ورودی،  $t$  زمان یادگیری. نرونی که دارای کمترین مقدار فاصله  $d_j$  با بردار یا داده ورودی باشد نرون برنده محسوب می شود.

مرحله بعد مرحله تصحیح نرون های همسایگی نرون برنده است که در صفحه نقشه توپولوژیک نرون ها در کنار هم قرار گرفته اند. نرون های اطراف نرون برنده در این صفحه متناسب با فاصله قرارگیری شان نسبت به نرون برنده در نقشه توپولوژیک تصحیح می شوند. هر چه فاصله نرون تا نرون برنده بیشتر باشد نرون مورد نظر کمتر تحت تأثیر تصحیح قرار می گیرد. تصحیح نرون های مجاور نرون برنده بر اساس رابطه ۲ انجام می گیرد:

(رابطه ۲)

$$w_{ij(t+1)} = w_{ij(t)} + \eta(t) * (x_{i(t)} - w_{ij(t)})$$

جدول ۱. ضرایب مورفومتریکی

شماره	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
علامت اختصاری	p	q	r	s	t	a	b	c	d
توضیح	$\frac{\partial z}{\partial x}$	$\frac{\partial z}{\partial y}$	$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}$	$\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}$	$\frac{\partial^2 z}{\partial y^2}$	$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}$	$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2 \partial y}$	$\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y^2}$	$\frac{\partial^2 z}{\partial y^2}$

۵×۵ نیاز است. در این مطالعه، ۲۲ پارامتر مورفومتریکی مربوط به لندفرم‌های لوت استخراج شد که در جدول ۲ روابط موجود برای محاسبه آن‌ها نیز آورده شده است. پارامترها را می‌توان بر حسب درجه مشتقی که در محاسبه آن‌ها استفاده شده به چهار دسته تقسیم کرد: پارامترهای درجه صفر، یک، دو، و سه. جدول ۲ فرمول، علامت اختصاری، درجه، و مرجع پارامترهای مورفومتریکی را نشان می‌دهد.

(رابطه ۴)

$$Z = \frac{1}{6}ax^2 + \frac{1}{6}dy^2 + \frac{1}{2}bx^2y + \frac{1}{2}cxy^2 + \frac{1}{2}rx^2 + \frac{1}{2}ty^2 + sxy + px + qy + u$$

بر اساس روش‌های محاسبه ضرایب مشتق و تعداد جملات موجود در روابط ۳ و ۴ برای محاسبه مقادیر ضرایب این معادلات یا مشتق‌ها در جهات مختلف و با درجات مختلف با استفاده از رابطه‌های ایوانز و فلورینسکی به ترتیب حداقل به قطعه یا پنجره‌ای از داده‌های ارتفاعی با ابعاد ۳×۳ و

جدول ۲. پارامترهای مورفومتریکی استفاده شده در منطقه لوت

شماره	پارامتر سطح زمین	نشان اختصاری	درجه	فرمول	واحد	مرجع
۱	جهت شیب (وجه)	Asp	۱	$-90.1 + (\text{sign}(q))(1 -  \text{sign}(p) ) + 18.0[1 + \text{sign}(p)] - 18.0 \cdot \text{sign}(p) \arccos \left[ -q / (p^2 + q^2)^{1/2} \right] / \pi$	°	-
۲	شیب	Slst	۱	$\arctan(\sqrt{p^2 + q^2})$	°	-
۳	متوسط ارتفاع	Meanel	۰	متوسط ارتفاع در هر پنجره محاسباتی	m	-
۴	انتهال ارتفاع سنجی	HI	۰	$\frac{\text{ارتفاع کمیته} - \text{ارتفاع متوسط}}{\text{ارتفاع کمیته} - \text{ارتفاع بیشینه}}$	m	ستراهل (۱۹۵۲)
۵	تابش شیب <sup>۱</sup>	Slins	۱	$50 \cdot \left\{ 1 + \text{sign} \left[ \cos a - \sin a * (p \sin b + q \cos b) \right] \right\} \left[ \cos a - \sin a * (p \sin b + q \cos b) \right] / (1 + p^2 + q^2)$	%	(اونورائی، ۱۹۹۲)

\* در اینجا  $a_{90}$  درجه زاویه عمودی خورشید از سطح افق و  $b$  آزیموت خورشید از جهت شمال در جهت ساعتگرد است.

ادامه جدول ۲. پارامترهای مورفومتریک استفاده شده در منطقه لوت

شماره	پارامتر سطح زمین	نشان اختصاری	درجه	فرمول	واحد	مرجع
۶	متوسط انحنا	Meanc	۲	$\frac{1}{\gamma}(minc + maxc) = \frac{1}{\gamma}(k_h + k_v) =$ $-\left[\frac{(1+q^\gamma)r - \gamma pqs + (1+p^\gamma)t}{\gamma(1+p^\gamma+q^\gamma)^{\gamma/\gamma}}\right]$	۱/ m	گاوس (۱۸۲۷)
۷	اختلاف انحنا	Difc	۲	$\frac{(q^\gamma r - \gamma pqs + p^\gamma t) / \left[ (p^\gamma + q^\gamma)(1+p^\gamma+q^\gamma)^{\frac{1}{\gamma}} \right]}{-\left[\frac{(1+q^\gamma)r - \gamma pqs + (1+p^\gamma)t}{\gamma(1+p^\gamma+q^\gamma)^{\gamma/\gamma}}\right]}$	۱/ m	شری (۱۹۹۵)
۸	ناکرویت	Unsph	۲	$\left\{ r \left[ \frac{(1+q^\gamma)}{(1+p^\gamma)} \right]^{\gamma/\gamma} - \right.$ $t / \left[ \frac{(1+q^\gamma)}{(1+p^\gamma)} \right]^{\gamma/\gamma} \left. \right\}^\gamma / (1+p^\gamma+q^\gamma) +$ $\{ pqr \left[ \frac{(1+q^\gamma)}{(1+p^\gamma)} \right]^{\gamma/\gamma} -$ $\gamma \left[ \frac{(1+q^\gamma)}{(1+p^\gamma)} \right]^{\gamma/\gamma} s +$ $pqt / \left[ \frac{(1+q^\gamma)}{(1+p^\gamma)} \right]^{\gamma/\gamma} \left. \right\}^\gamma / \left[ \gamma(1+p^\gamma+q^\gamma)^{\gamma/\gamma} \right]$	۱/ m	(شری، ۱۹۹۵)
۹	انحنای افقی	Horc	۲	$-\frac{(q^\gamma r - \gamma pqs + p^\gamma t)}{\left[ (p^\gamma + q^\gamma)(1+p^\gamma+q^\gamma)^{\gamma/\gamma} \right]}$	۱/ m	(کرچو، ۱۹۸۳)
۱۰	انحنای عمودی (پروفیلی)	Verc	۲	$-\frac{(p^\gamma r + \gamma pqs + q^\gamma t)}{\left[ (p^\gamma + q^\gamma)(1+p^\gamma+q^\gamma)^{\gamma/\gamma} \right]}$	۱/ m	(ایوانز، ۱۹۷۲)
۱۱	انحنای سطح	Plc	۲	$-\frac{(q^\gamma r - \gamma pqs + p^\gamma t)}{(p^\gamma + q^\gamma)^{\gamma/\gamma}}$	۱/ m	(ایوانز، ۱۹۷۲)
۱۲	چرخش	Rot	۲	$\left[ \frac{(p^\gamma - q^\gamma)s - pq(r-t)}{(p^\gamma + q^\gamma)^{\gamma/\gamma}} \right]$	۱/ m	
۱۳	انحنای تفاضلی افقی	Horex	۲	unsph-difc	۱/ m	(شری، ۱۹۹۵)
۱۴	انحنای تفاضلی عمودی	Verexc	۲	Unsph+difc	۱/ m	(شری، ۱۹۹۵)
۱۵	انحنای کمینه	Minc	۲	Meanc-unsph	۱/ m	-



ادامه جدول ۲. پارامترهای مورفومتریک استفاده‌شده در منطقه لوت

شماره	پارامتر سطح زمین	نشان اختصاری	درجه	فرمول	واحد	مرجع
۱۶	انحنای بیشینه	Maxc	۲	Meanc+unsph	۱/m	-
۱۷	کل انحنای گاوسین	TGc	۲	$(rt - s^z) / (1 + p^z + q^z)^z$	۱/m <sup>z</sup>	گاوس (۱۸۲۷)
۱۸	کل انحنای حلقوی	TRc	۲	$\left[ \frac{(p^z + q^z)s - pq(r-t)}{(p^z + q^z)^z (1 + p^z + q^z)^z} \right]^z /$	۱/m <sup>z</sup>	(شری، ۱۹۹۵)
۱۹	کل انحنای تجمعی	Tac	۲	$meanC^z - difC^z$	۱/m <sup>z</sup>	(شری، ۱۹۹۵)
۲۰	زبری شیب	Slr	۲	انحراف استاندارد شیب در پنجره محاسباتی	°	
۲۱	انحنای تقاطع	Crosc	۲	$-z \left( \frac{\frac{t}{z} p^z + \frac{r}{z} q^z - spq}{p^z + q^z} \right)$	۱/m	فرانکل، (۲۰۰۷)
۲۲	انحنای حدی	Extc	۳	$\frac{1}{\sqrt{(p^z + q^z)^z (1 + p^z + q^z)}} \cdot \frac{(q^z a - 3pq^z b + 3p^z qc - p^z d + ((q^z r - 2pqs + p^z t) \cdot (\frac{2 + 3p^z + 3q^z}{(p^z + q^z)(1 + p^z + q^z)})) \cdot (pq(t-r) + s(p^z - q^z))}{(p^z + q^z)^z (1 + p^z + q^z)^z}$	۱/m <sup>z</sup>	فلورینسکی (۲۰۰۹)

باشد، خطاهای موجود برای پارامترهای دیگر با روش‌های ایوانز و فلورینسکی بر اساس روابط ارائه‌شده در جدول ۳ قابل محاسبه است. چنان‌که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، میزان خطاهای محاسبه برای اکثر پارامترها با استفاده از روش فلورینسکی کمتر از روش ایوانز است و در بعضی موارد مانند خطاهای  $m_r$  و  $m_t$  خطای محاسبه با روش فلورینسکی نزدیک به ۶ برابر کمتر از روش ایوانز است.

ذکر این نکته لازم است که برای محاسبه هر یک از این پارامترها از معادله سطح زمین با درجه‌ای استفاده شده است که دارای کمترین خطا باشد. در اینجا برای مقایسه خطاهایی با پنجره ۵×۵ در روش‌های ایوانز و فلورینسکی مقدار خطا برای پارامترهای مختلف  $p, q, r, s$ ، که به‌ترتیب با علامت‌های  $m_p, m_q, m_r, m_s$  نشان داده می‌شوند، محاسبه شده است. بر اساس معادلات موجود برای محاسبه پارامترهای مختلف، در صورتی که خطای موجود در مدل رقومی ارتفاعی با دقت  $w$  برابر با  $m_z$

جدول ۳. مقایسه میزان خطای متوسط مربع ریشه‌ای معادلات  $p$ ،  $q$ ،  $r$  و  $t$  در معادلات مکانی درجه دوم و سوم [۱۳]

RMSE	معادله جبری درجه دو با پنجره ۳×۳	معادله جبری درجه سه با پنجره ۵×۵
$m_q$ and $m_p$	$\frac{m_z}{\sqrt{6w}}$	$\sqrt{\frac{527}{70}} \frac{m_z}{6w}$
$m_t$ and $m_r$	$\frac{\sqrt{2}m_z}{w^2}$	$\sqrt{\frac{2}{35}} \frac{m_z}{w^2}$
$m_s$	$\frac{m_z}{2w^2}$	$\frac{m_z}{10w^2}$
$m_d$ and $m_a$	—	$\frac{m_z}{\sqrt{2}w^2}$
$m_c$ and $m_o$	—	$\frac{m_z}{\sqrt{35}w^2}$

بهینه<sup>۱</sup> رتبه‌بندی گردید. ده پارامتر مورفومتریک بهینه مؤثر در طبقه‌بندی با بیشترین رتبه برای طبقه‌بندی انتخاب گردیدند. در مرحله نهایی بهترین پارامترها و بهترین تعداد پهنه‌ها با استفاده از روش تعیین ضریب داویس بولدین<sup>۲</sup> (ضریب دی-بی) به دست خواهند آمد.

### انتخاب بهترین پنجره محاسباتی

چنان‌که توضیح داده شد، پارامترهای مورفومتریک در پنجره‌های مربعی با اندازه‌های حداقل ۳ در ۳ یا ۵ در ۵ از داده‌های رقومی ارتفاعی محاسبه می‌شوند و با حرکت این پنجره در سطح منطقه مقادیر پارامترهای مورد نظر به طور پیوسته و به صورت یک لایه به دست می‌آید. اندازه بهینه برای پنجره‌ها را می‌توان با روش‌های آماری مختلف تعیین کرد. از جمله معمول‌ترین و ساده‌ترین این روش‌ها این‌گونه است که برای اندازه‌های مختلف پنجره محاسباتی لایه مورد نظر برای پارامتر مورد نظر به دست می‌آید و برای هر اندازه پنجره مقدار انحراف استاندارد برای

$m_s$  برای معادله درجه سوم ۵ برابر کمتر از معادله درجه دوم است. اما برای مقادیر خطای  $m_q$  و  $m_p$  نتایج برعکس است و این ارقام برای معادلات درجه سوم به میزان ده درصد بیشتر از معادلات درجه دوم است [۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳]. بنابراین، در این مطالعه پارامترهای مورفومتریک درجه اول شامل شیب، جهت شیب، و زبری یا زبری سطح با روابط ایوانز محاسبه شده و پارامترهای مورفومتریک درجه دوم و سوم، شامل کلیه انحناها و انحنای حدی، با روش فلورینسکی محاسبه شده است.

### بهینه‌سازی ورودی‌ها

مشخص است که پهنه بندی یک منطقه با استفاده از کلیه پارامترهای محاسبه‌شده برای آن لزوماً بهترین طبقه بندی ممکن را ارائه نمی‌دهد. مثلاً، بعضی از این پارامترها همبستگی زیادی دارند، بعضی نوسانات زیادی دارند، و تعدادی دیگر ارتباط زیادی با هدف طبقه‌بندی انجام گرفته ندارند. برای انتخاب پارامترهای بهینه مورفومتریک، در مرحله اول بهترین اندازه پنجره محاسباتی با توجه به میزان انحراف استاندارد در هر لایه پارامتری تعیین و با روش فاکتور ضریب

1. Optimum Index Factor (OIF)  
2. Davies Bouldin Index (DBI)

که در این رابطه  $Stdj$ ،  $Stdi$  و  $Stdk$  به ترتیب انحراف استاندارد پارامترهای  $i$ ،  $j$ ، و  $k$  هستند. در نهایت، مقادیر OIF حاصله را از ترکیبات سه‌تایی پارامترهای متفاوت محاسبه و رتبه‌بندی می‌گردند. از میان دسته‌های سه‌تایی، با بیشترین مقادیر ضریب بهینه، ده پارامتر، که در ساخت دسته‌های سه‌تایی با بالاترین رتبه‌ها شرکت داشته‌اند، برای مرحله بعد انتخاب شدند. ده پارامتر انتخاب‌شده در این مرحله شامل پارامترهای انحنا، سطحی، چرخش، انتگرال ارتفاع‌سنجی، کل انحنا، تجمعی، تندی شیب، انحنا، حدی، متوسط انحنا، متوسط ارتفاع، وجه شیب، و انحنا، مقطع عرضی است.

بعد از انتخاب ده پارامتر با بالاترین مقادیر فاکتور ضریب بهینه لازم است تعداد بهینه پارامترهای ورودی و تعداد کلاس‌ها تعیین گردد. برای تعیین تعداد بهینه کلاس‌ها از روش داویس-بولدین یا دی-بی استفاده شد. مقدار ضریب دی-بی برای تعیین تعداد بهینه پهنه یا دسته‌ها به صورت زیر تعریف می‌شود:

(رابطه ۷)

$$DB = \frac{1}{n} \sum_{i=1, i \neq j}^n \max \left( \frac{\sigma_i + \sigma_j}{d(c_i, c_j)} \right)$$

که در آن  $d(c_i, c_j)$  فاصله بین مرکز دو کلاس  $i$  یا  $j$  به عبارتی تفاوت میانگین‌های این دو گروه و  $\sigma_i$  و  $\sigma_j$  به ترتیب قطر گروه  $i$  و  $j$  یا به عبارتی فاصله اقلیدسی دورترین عضوهای گروه‌های  $i$  و  $j$  می‌باشند. شکل ۳ اجزای این فاکتور را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۳ نیز استنباط می‌شود، کمترین مقدار این ضریب بهترین حالت جدایش دسته‌ها یا بهترین دسته‌بندی را در بر دارد [۴].

پارامترهای محاسبه‌شده در لایه مورد نظر محاسبه می‌شود [۱۹]. در این مطالعه پارامترهای مورفومتریکی برای اندازه پنجره‌های بین ۵ در ۵، که حداقل اندازه پنجره ممکن برای روش فلورینسکی است، تا ۳۱ در ۳۱، به عنوان بزرگ‌ترین پنجره‌ای که اطلاعات توپوگرافی را در مقیاس منطقه‌ای منعکس می‌کند، محاسبه می‌شود. سپس، متوسط انحراف از استاندارد لایه‌های پارامتری برای هر اندازه پنجره محاسبه می‌گردد. کمترین میزان انحراف استاندارد معیار بهترین اندازه پنجره محاسباتی خواهد بود. از آنجا که در این مطالعه قصد بر ایجاد پارامترها با یک مقیاس بود، بر طبق نتایج، به طور کلی، برای این منطقه متوسط بهترین اندازه پنجره برای همه پارامترها  $17 \times 17$  انتخاب شد.

### رده‌بندی پارامترهای مورفومتریکی

در این مرحله ۲۲ پارامتر مورد نظر با استفاده از پنجره محاسباتی بهینه انتخاب‌شده، یعنی اندازه  $17 \times 17$ ، محاسبه و بر اساس فاکتور ضریب بهینه رده‌بندی می‌شوند. بر اساس این روش، بهترین ورودی‌ها، که بیشترین میزان اطلاعات (بیشترین مجموع انحراف معیار) و کمترین همبستگی را دارند، بر اساس اولویت انتخاب می‌شوند.

برای هر مجموعه سه‌تایی از لایه‌های پارامتری یک فاکتور ضریب بهینه قابل محاسبه است. تعداد ممکن ترکیبات سه‌تایی از تعداد  $N$  پارامتر عبارت است از:

$$\binom{N}{3} = \frac{N!}{(3! * (N-3)!)} \quad (\text{رابطه ۵})$$

و برای هر ترکیب سه‌تایی فاکتور ضریب بهینه یا OIF بر اساس رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

$$OIF = \frac{Stdi + Stdj + Stdk}{|Corri, j| + |Corrj, k| + |Corri, k|} \quad (\text{رابطه ۶})$$

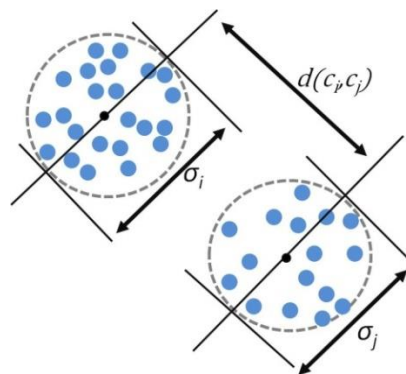
می‌کنند، می‌تواند در داخل نرم افزار انجام پذیرد. در اغلب موارد تحلیل حساسیت بر اساس مشتق هر پارامتر خروجی متناظر با هر پارامتر ورودی محاسبه می‌شود، ولی در مواردی که فرمول ساده و قابل تعریفی برای نشان دادن رابطه بین پارامترهای ورودی و خروجی وجود ندارد، برای تحلیل حساسیت، از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی استفاده می‌شود. برای آنالیز حساسیت در این مطالعه از نرم افزار نرو سولوشن<sup>۲</sup>، پیچیدگی کاوش سریع<sup>۳</sup>، پرسپترون با لایه‌های چندگانه<sup>۴</sup>، و شبکه مصنوعی احتمالاتی<sup>۵</sup> استفاده شده است.

به منظور بررسی جدایش یا تفکیک پذیری پارامترهای مورفومتری از فاکتور جفری ماتوسیتا<sup>۶</sup> استفاده شد. این فاکتور ضریبی است که به طور گسترده برای اندازه‌گیری میزان جداسازی گروه‌ها یا، به عبارتی، برای اندازه‌گیری فاصله بین بخش‌ها و تقسیمات و برای تقسیمات گوسین چندمتغیره استفاده می‌شود، که در این مطالعه نیز از آن برای تحلیل تفکیک پذیری پارامترهای مورفومتری و ورودی استفاده شد. فاصله جی - ام بین کلاس ۱ و کلاس ۲ به قرار رابطه ۸ است:

(رابطه ۸)

$$J_{ij} = \sqrt{2 \left( 1 - e^{-\frac{\lambda (m_i - m_j)^T \left( \frac{\sum_i + \sum_j}{\gamma} \right) (m_i - m_j) + \frac{1}{\gamma} \ln \left[ \frac{(\sum_i + \sum_j)^{\gamma}}{|\sum_i|^{\gamma} |\sum_j|^{\gamma}} \right]} \right)} \right)}$$

که در این فرمول  $m_i$  و  $m_k$  بردارهای متوسط کلاس یا گروه‌اند و  $\sum_i$  و  $\sum_j$  کوواریانس‌های کلاس‌ها هستند. برای انتخاب بهترین پارامتر، باید ترکیبی از پارامترها انتخاب شود که بیشترین متوسط فاصله جی - ام را دارند. متوسط فاصله دوتایی از طریق



شکل ۳. اجزای محاسبه ضریب دی - بی

در این روش بیشترین فاصله اعضای درون هر گروه فاصله هر عضو تا مرکز گروه (میانگین گروه) و بیشترین فاصله بین دو گروه در دسته‌بندی تعیین می‌شوند. استدلال مبنایی در محاسبه این ضریب این است که گروه‌بندی بهینه گروه‌بندی‌ای است که در آن فاصله دسته‌ها بیشترین و پراکندگی داخل هر دسته کمترین باشد و چون برخلاف سایر روش‌های تعیین گروه آن‌ها را دو به دو مقایسه می‌کند، از دقت بیشتری برخوردار است.

### آنالیز حساسیت و جدایش پذیری

آنالیز حساسیت<sup>۱</sup> عملی است که در ازای آن مقادیر تغییرات یا عدم قطعیت در داده‌های ورودی را به تغییرات یا عدم قطعیت در داده‌های خروجی ارتباط می‌دهد. هدف از آنالیز حساسیت داده‌ها تعیین میزان تأثیر تغییرات موجود در هر پارامتر ورودی بر تغییرات موجود در داده‌های خروجی است. با استفاده از این روش می‌توان تعیین کرد که کدام یک از داده‌های خروجی نسبت به کدام ورودی‌ها هیچ حساسیت یا تغییری نداشته‌اند. با این روش می‌توان تعیین نمود که کدام یک از پارامترهای ورودی اهمیت کمتری داشته و می‌توانسته‌اند از تحلیل‌ها حذف شوند. تحلیل حساسیت در بسیاری از نرم‌افزارها، که بر اساس تحلیل‌های آماری عمل

2. NeuroSolutions
3. quick search complexity
4. multilayer perceptron
5. probabilistic neural network
6. Jeffreys\_Matusita Distance (JM distance)

1. Sensitivity Analysis (S.A)

رابطه ۹ محاسبه می‌شود:

(رابطه ۹)

$$d_{ave} = \sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^C p(\omega_i) p(\omega_k) J_{ij}$$

که در این فرمول نیز  $p(\omega_i)$  و  $p(\omega_k)$  احتمالات پیشنهادی کلاس‌اند.

## نتایج

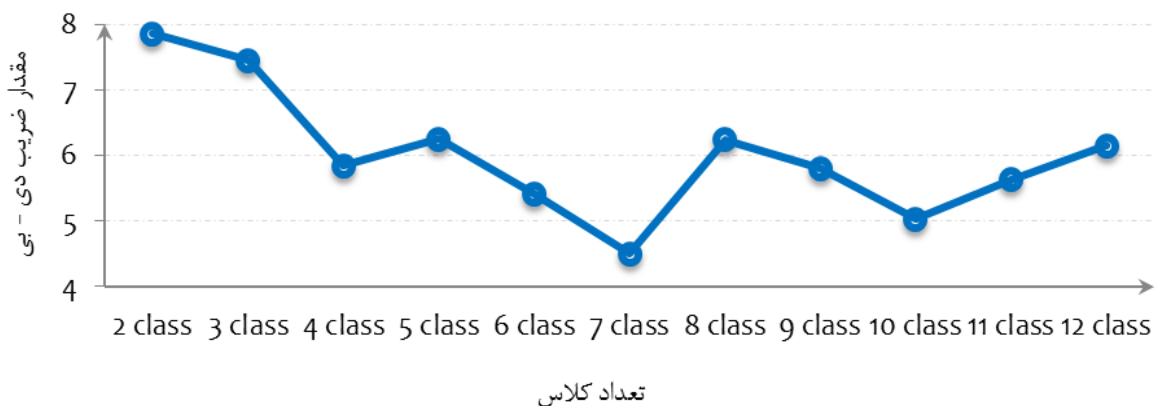
نتیجه اعمال فاکتور ضریب بهینه در انتخاب بهترین و مناسب‌ترین پارامترهای مورفومتریکی برای طبقه‌بندی یاردانگ‌های لوت به ترتیب بر اساس اولویت در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. رتبه‌بندی ۲۲ پارامتر مورفومتریکی یاردانگ‌های لوت با استفاده از فاکتور ضریب بهینه

رتبه	پارامتر	رتبه	پارامتر
۱	plc	۱۲	slins
۲	rot	۱۳	unsph
۳	HI	۱۴	verc
۴	TAc	۱۵	horc
۵	slst	۱۶	TGc
۶	extc	۱۷	verexc
۷	meanc	۱۸	minc
۸	difc	۱۹	slro
۹	meanel	۲۰	TRc
۱۰	asp	۲۱	horex
۱۱	crosc	۲۲	Maxc

از پارامترهای نشان‌داده‌شده در جدول ۴، ده پارامتر اول، یعنی پارامترهایی با رتبه‌های ۱ تا ۱۰، انتخاب شدند.

در مرحله بعد، برای تعیین بهترین تعداد پارامترها و بهترین تعداد دسته‌ها با استفاده از ضریب دی-بی از ده پارامتر انتخاب‌شده از جدول ۴ به ترتیب ترکیبات بین ۳ تا ۱۰ عدد پارامتر، به عنوان ورودی، برای پهنه‌بندی منطقه به ۲ تا ۱۲ پهنه ساخته‌شده و برای پهنه‌بندی استفاده شد. سپس، برای ترکیب‌های مختلف با تعداد پارامتر ورودی و تعداد پهنه متفاوت ضریب دی-بی مربوطه به دست آمد. ترکیبی که دارای کمترین میزان ضریب دی-بی است به عنوان بهینه‌ترین نوع و تعداد پارامترها و تعداد پهنه‌ها برای منطقه مورد مطالعه مشخص می‌شود. نتایج نشان داد که ۷ پارامتر - شامل پارامترهای سطحی، چرخش، انتگرال ارتفاع‌سنجی، کل انحنای تجمعی، تندی شیب، انحنای حدی، و متوسط انحنای ترکیب‌هایی با حداقل ضریب دی-بی را ارائه می‌دهند. نمودار ارائه‌شده در شکل ۴ تغییرات ضریب دی-بی را برای ۷ پارامتر ورودی گفته‌شده - که همان پارامترهای دارای رتبه‌های اول تا هفتم در جدول فاکتور ضریب بهینه‌اند - برای طبقه‌بندی با ۲ تا ۱۲ کلاس نشان می‌دهد.



شکل ۴. تعیین تعداد کلاس بهینه در منطقه با استفاده از ضریب داویس - بولدین برای هفت پارامتر بهینه

چنان که شکل ۴ نشان می دهد، بهترین تعداد پارامتر ورودی برای این منطقه، که دارای حداقل ضرایب دی-بی است، هفت پارامتر و برای تعداد کلاس ها نیز برابر با ۷ است.

اولین پارامتر یا انحنای سطحی (Plc)، که انحنای مربوط به خطوط کنتوری است، در واقع مقدار تمرکز یا پخش شدن جریان آب روی سطح را نشان می دهد؛ پارامتر دوم یا چرخش (Rot) معرف انحنای خطوط جریانی است که عمود بر خطوط کنتوری اند. در واقع، این پارامتر انحنای مسیرهای آبراهه ای را نشان می دهد که چرخش ساعت گرد یا پادساعت گرد خط جریان با مقادیر مثبت یا منفی این پارامتر تعیین می شود. سومین پارامتر انتگرال ارتفاع سنجی است (HI) که تعریف کننده میزان پراکنش یا نوسانات ارتفاعی در یک منطقه یا مساحت مشخص از سطح زمین است. این پارامتر یکی از مهم ترین پارامترها در ژئومورفولوژی زمین ساختی است. پارامتر چهارم کل انحنای تجمعی (Tac) است که حاصل ضرب انحنای افقی و عمودی است. پنجمین پارامتر شیب (Slst) است که یکی از مهم ترین، اساسی ترین، عینی ترین، و، در عین حال، پُراهمیت ترین پارامترهای ژئومورفولوژیکی است و از آن در اکثر تقسیم بندی های ژئومورفولوژیکی استفاده می شود. شیب ها گاهی منعکس کننده تغییرات سنگ شناسی و سنگ بسترهای ویژه ای در زمین شناسی اند. ششمین پارامتر انحنای حدی (extc) است که تنها پارامتر درجه سوم در این مطالعه است. این پارامتر به طور نسبی محل تیغه ها و خطوط پایین ترین قسمت دره را نشان می دهد. این پارامتر در واقع بیانگر نقطه عطف انحنای خطوط هم ارتفاع بوده و می تواند توصیف کننده ۴ فرم خطی ژئومورفیک باشد که عبارت اند از: ۱. محل تیغه، نوک قلعه، ستیغ، یا به عبارتی بیشترین انحنای مثبت کنتوری؛ ۲. خطوط

دره ها یا پایین ترین قسمت های دره ها، نهایت (آخرین حد) انحنای منفی در کتورها؛ ۳. خط شکستگی محدب یا به عبارتی نهایت (آخرین حد) شیب مثبت؛ ۴. خط شکستگی مقعر یا به عبارتی نهایت (آخرین حد) شیب منفی. در نهایت، آخرین پارامتر برتر متوسط انحناس (meanc) که نشان دهنده متوسط تقعر و تحدب سطح زمین است. مقادیر مثبت متوسط انحنای مربوط به نواحی ای است که سطح حالت کلی تقعر یا حالت تجمع نسبی جریان را دارد و مقادیر منفی نشان دهنده تحدب کلی یا حالت پخش جریان است.

هفت پارامتر مورفومتریک بهینه به عنوان ورودی در الگوریتم نقشه های خودسازمانده وارد و با حداقل خطای شبکه طبقه بندی شد. خطای کمی سازی شبکه با تعداد دوره های آموزش بالا به میزان حداقل ۰,۰۸۱۱ به دست آمد.

شکل ۵ نقشه پهنه های به دست آمده برای منطقه و شکل ۶ منحنی مربوط به مقادیر پارامترها در هر کلاس را نشان می دهد. نام گذاری پهنه های به دست آمده در شکل ۵ برای منطقه مورد مطالعه بر اساس تعاریف اشکال سطح زمین است که دیکاو، وودز، و سائوکس ارائه کرده اند [۲۰، ۲۲].

بنا بر نتایج به دست آمده، کلاس ۳، که از همه کلاس های دیگر وسعت بیشتری دارد و حدود ۵۵ درصد از مساحت کل را می پوشاند، سطحی تخت و با کمترین انحنای طولی و عرضی و با شیبی متوسط است. این پهنه کریدورها یا فروافتادگی های کف و قسمت های تخت بالای برجستگی ها را تحت پوشش قرار می دهد. یاردانگ ها از فرسایش رسوبات دریاچه ای ایجاد شده اند، بنابراین، سطح رسوب دریاچه ای اولیه، که هم اکنون آثار آن در قسمت های میانی یاردانگ ها یا ارتفاعات دوکی شکل دیده می شود، سطوحی تخت بوده و با کف کریدورها، که آن ها هم سطوحی تخت اند، در یک کلاس قرار

نمی‌شود. از طرف دیگر، مینیمم انحنا در کلاس ۶ مثبت است و در کلاس‌های ۴ و ۵ منفی. در کلاس ۴ بیشترین مقدار مطلق انحنا وجود دارد؛ دلیل آن فقدان آبراهه و فرسایش آبی و آبراهه‌ای در کلاس ۶ و وجود این نوع فرسایش در کلاس‌های ۴ و ۵ است. در مرز بین یاردانگ‌ها و کریدورها سه کلاس وجود دارد که شامل کلاس‌های ۱، ۲، و ۷ به ترتیب دره گردنه‌ای، گودی بیضوی، و آبراهه کریدور هستند. این کلاس‌ها همه دارای انحناهای طولی و عرضی منفی یا مقعرند. ولی تفاوت آن‌ها این است که در کلاس ۲ یا گودی بیضوی شیب بیشتر و قدر مطلق مقادیر انحناها بیشتر است و حتی انحناهای ماکزیمم در این کلاس مقداری منفی دارد. دو کلاس ۱ و ۷ دارای قدر مطلق مقادیر انحناهای طولی و عرضی کمتر و ماکزیمم انحناهای نزدیک به صفر یا کمی مثبت‌اند. به نظر می‌رسد که گودی بیضوی در اثر سایش بادی در پای دامنه‌ای پرتگاه یاردانگ و مرز آن با کریدورها ایجاد شده باشد.

از علائم آن تقعر زیاد این کلاس در جهت طولی و عدم تبعیت انحناهای عرضی آن (انحنای عرضی منفی) از انحناهای کلی مرز یاردانگ که مثبت است. کلاس ۲ به صورت نواری در حاشیه مرز بین کریدورها با پرتگاه یاردانگ‌ها وجود دارد و کلاس‌های ۱ و ۷ به صورت نوارهای نازک‌تر یا لکه‌های کوچک در میانه یا لبه‌های نوار حاصل از کلاس ۲ واقع شده‌اند.

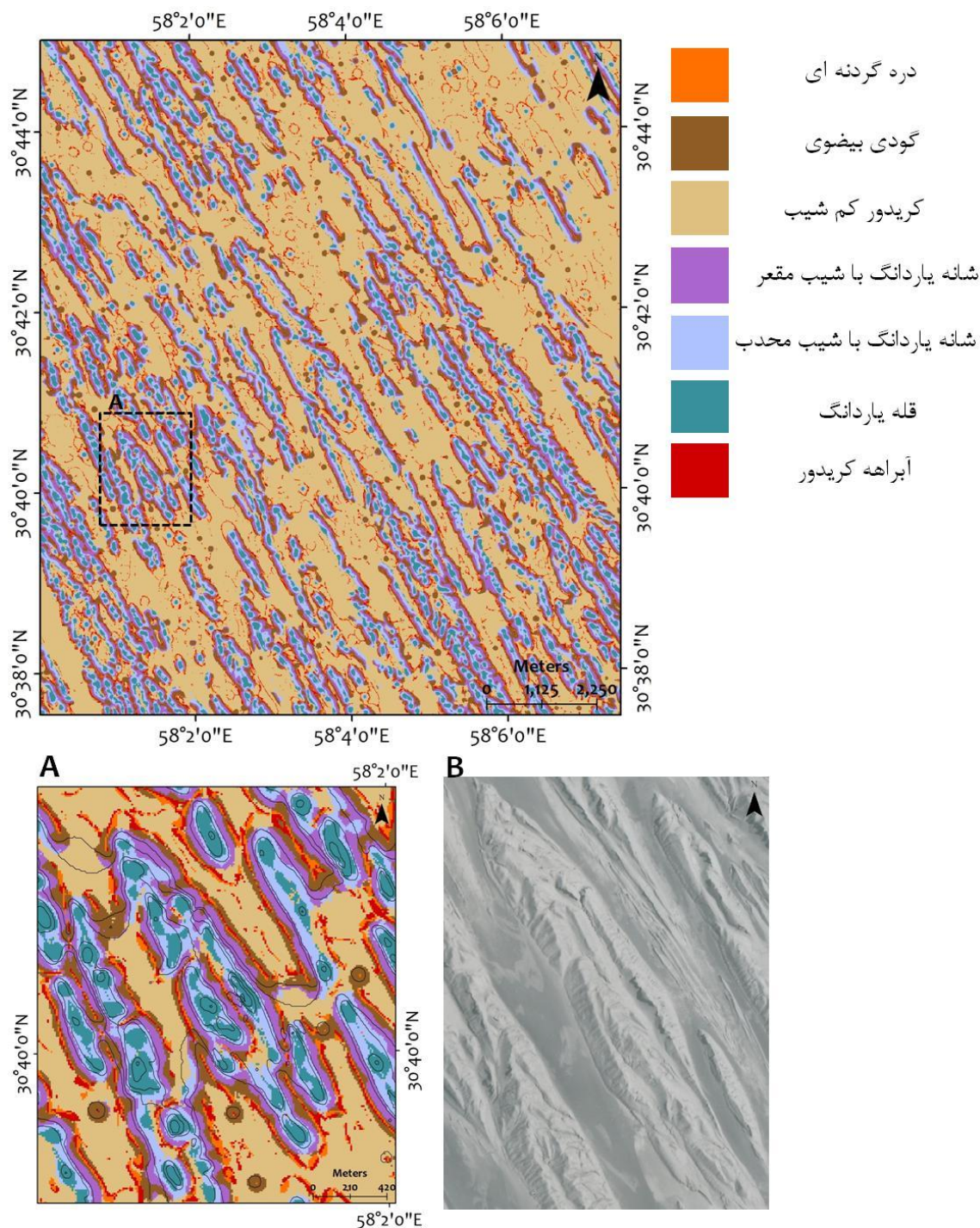
کلاس ۱ بیشتر به صورت خطوط نازک در میانه نوار کلاس ۲ وجود دارد و انطباق مناسبی بین مسیر آبراهه‌ها و کلاس ۱ وجود دارد. کلاس ۷ بیشتر به صورت لکه‌هایی در مجاورت خط‌های کلاس ۱ دیده می‌شود. کلاس‌های ۱ و ۷ بیشتر با آبراهه‌ها و یا قعر محدوده کلاس ۲ انطباق دارند؛ البته به دلیل تجمع رسوب آبراهه‌ها شیب این دو کلاس نسبت به کلاس ۲ کمتر شده است.

می‌گیرند. پیشانی یا حاشیه برجستگی یاردانگ‌ها شامل چند کلاس اصلی است. مرتفع‌ترین آن‌ها کلاس ۶ یا قله یاردانگ است. این پهنه با حداکثر انحناهای طولی و عرضی دارای کمینه انحنا محذب نیز است. این پهنه در واقع قله‌های منفرد اصلی را تشکیل می‌دهد که در بالاترین ارتفاع پیشانی قرار دارند و اثر سایش باد را به خوبی نشان می‌دهند.

بلافاصله، در زیر کلاس ۶ شانه‌های یاردانگ یا کلاس‌های ۴ و ۵ قرار دارند که به ترتیب شیب‌های محذب و مقعر در دامنه یاردانگ‌ها هستند. تفاوت اصلی این دو کلاس در شیب‌های طولی آن‌هاست که به ترتیب در کلاس ۵ محذب و در کلاس ۴ مقعر است. در واقع، کلاس ۵ قسمت محذب بالای شیب پرتگاهی است و کلاس ۴ قسمت مقعر پایین شیب پرتگاهی یاردانگ‌ها. انحناهای عرضی در هر دوی این کلاس‌ها مثبت یا محذب است؛ دلیل آن شکل کلی یاردانگ‌هاست که مرز آن‌ها انحنا محذب دارد. بیشترین انحناهای عرضی در کلاس ۶ و سپس ۵ و کمترین آن در کلاس ۴ وجود دارد؛ دلیل آن وجود قله‌های منفرد پرتگاهی در کلاس ۶ است که انحناهای زیاده‌تر و مستقلی نسبت به انحناهای اصلی یاردانگ دارند. همچنین، در پای پرتگاه یعنی در کلاس ۴ انحنا کاهش می‌یابد و تقریباً به انحناهای کلی لبه یاردانگ نزدیک می‌شود.

بیشترین شیب‌ها در کلاس‌های ۴ و ۵ دیده می‌شود که دلیل آن قرارگیری این کلاس‌ها در پیشانی پرتگاه یاردانگ است و برعکس در کلاس ۶، به‌رغم انحناهای زیاد طولی و عرضی، شیب متوسط زیاد است. دلیل آن این است که این کلاس بین پرتگاه و قسمت تخت مرتفع واقع شده است. در کلاس‌های ۵ و ۶ ماکزیمم انحنا زیاد است و دلیل آن بیرون‌زدگی‌های موضعی است. در کلاس ۴ ماکزیمم انحنا خیلی کمتر است، یعنی در کلاس ۴ این بیرون‌زدگی‌ها دیده





شکل ۵. نقشه پهنه‌بندی شده لوت با استفاده از ۷ پارامتر بهینه: A: نمایی بزرگ‌تر از بخشی از منطقه، B: عکس هوایی منطقه مورد نظر

اختلاف کلاس‌های ۱ و ۷ در مقدار پارامتر کل انحنا گوسین است که وابسته به طول انحناست و برای خمیدگی که طول انحنا در آن تغییر نکند تغییر نخواهد کرد و، در واقع، فقط به این بستگی داد که چگونه فاصله‌ها در یک صفحه اندازه‌گیری می‌شوند

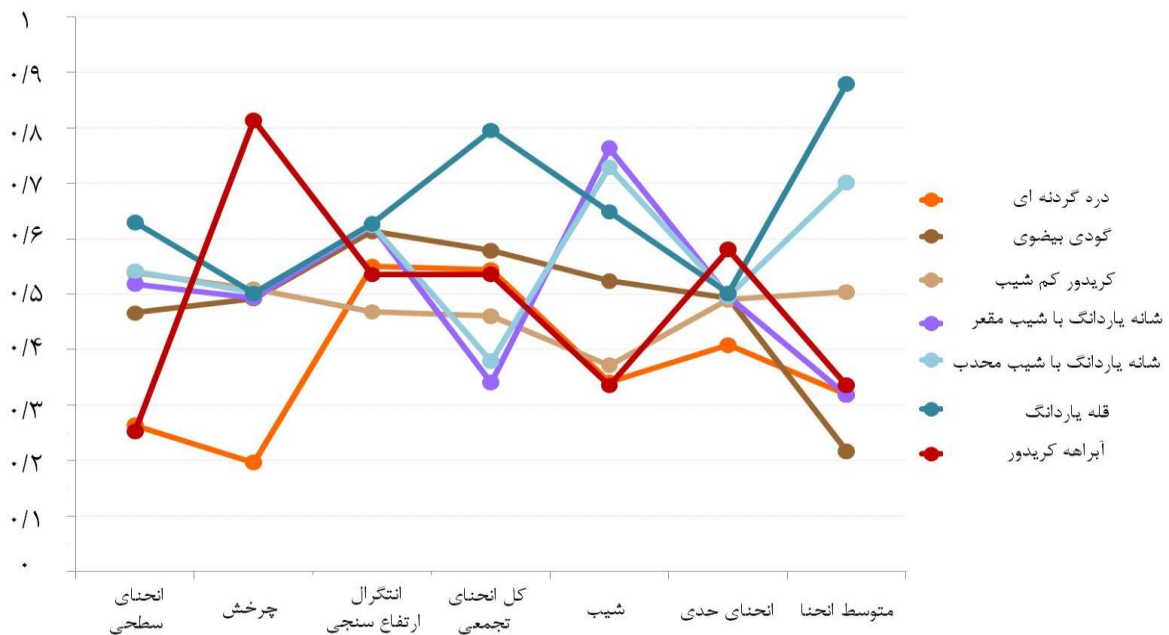
همچنین، محدوده‌هایی دایره‌ای شکل از کلاس ۲ مشاهده می‌شود که در قسمت مرکزی آن‌ها کلاس ۱ قرار گرفته، و، در واقع، این دایره‌ها حالت گودی‌های موضعی هستند که قعر آن‌ها (کلاس ۱) در مرکز آن‌ها واقع شده است.



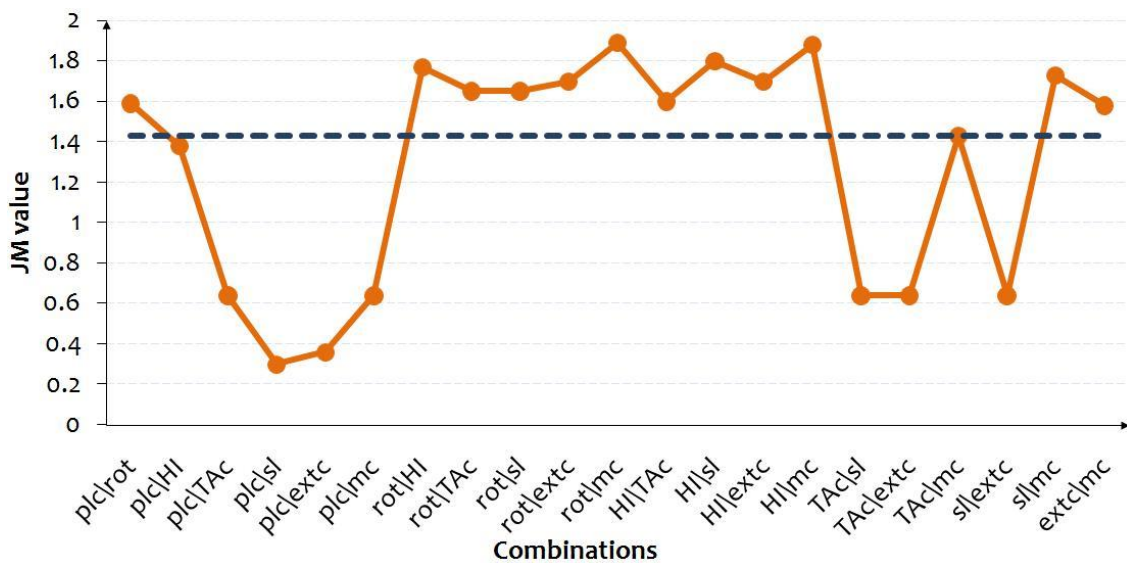
آبراهه هم‌جهت کند، بیشترین پیش‌جریان وجود دارد. شکل ۶ متوسط پارامترهای ورودی را در هر یک از پهنه‌ها به نمایش می‌گذارد.

شکل ۷ میزان جدایش‌پذیری کلاس‌ها به وسیله هر جفت از ورودی‌ها را به روش جفری ماتوسیتا نشان می‌دهد.

و نشان‌دهنده این است که یک سطح آبراهه به هم پیچیده است یا نه. در کلاس ۱ کمترین مقدار برای پارامتر چرخش و در کلاس ۷ بیشترین آن در بین گروه‌ها وجود دارد. در امتداد آبراهه‌های گروه ۱ کمترین پیش‌جریان وجود دارد و در حاشیه آبراهه‌ها، که جریان از سطح زمین در هر جهتی که حرکت داشته مجبور است در مسافت کمی خود را با



شکل ۶. متوسط پارامترهای مورد استفاده در رده‌بندی عوارض ژئومورفولوژیک لوت در هر کدام از پهنه‌ها



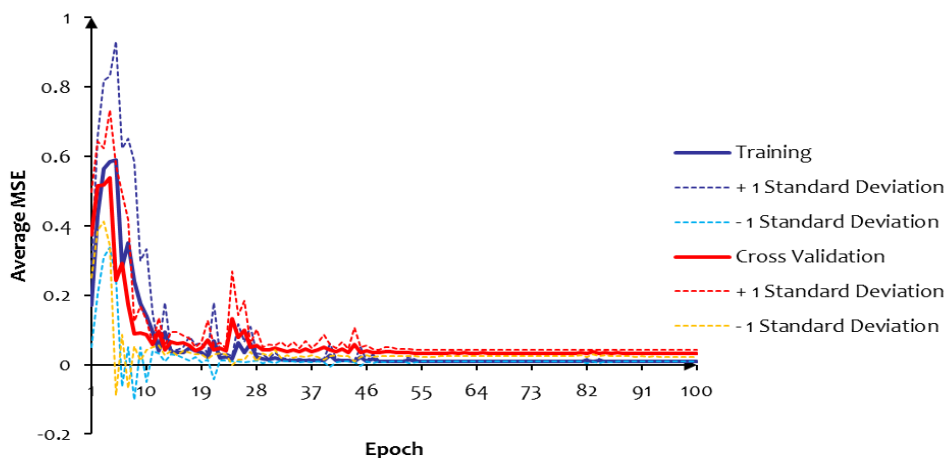
شکل ۷. میزان جدایش‌پذیری کلاس‌ها به جفت پارامترهای ورودی به روش جفری ماتوسیتا. ۱/۴۳ میزان جدایش‌پذیری کلی پارامترها در این نقشه است.

میانگین در طی آموزش و واسنجی به همراه محدوده‌های انحراف استاندارد واحد مثبت و منفی در شکل ۸ آورده شده است. همان طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، پس از حدود ۵۵ دور آموزش به حد کافی انجام شده و مجذور میانگین خطا به مقدار  $0,00865$  رسیده است. شکل ۸ نتایج تحلیل حساسیت بر روی شبکه آموزش دیده‌شده را نشان می‌دهد.

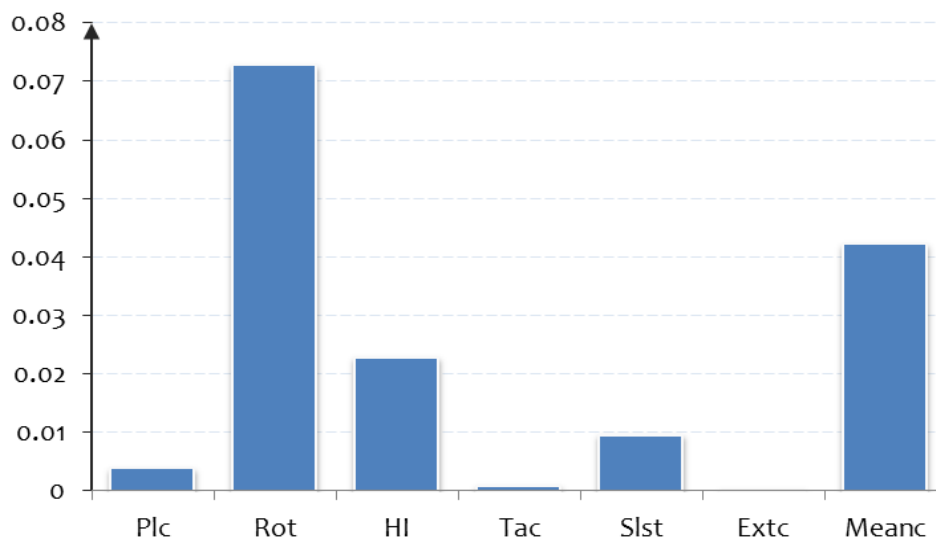
به طور کلی، در این طبقه بندی خط  $1/43$  میزان جدایش پذیری کلی را نمایش می‌دهد. از نمودار این گونه برمی‌آید که جفت پارامترهای انتگرال ارتفاع/متوسط شیب و متوسط ارتفاع/چرخش بیشترین توان تفکیک کلاس‌ها را در این منطقه دارا بودند.

با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی برای مقادیر ۷ پارامتر به کار برده شده و با اجرای شبکه در ۵ مرحله و هر مرحله شامل ۱۰۰ دور شبکه آموزش داده و واسنجی گردیده است. کاهش مقدار خطا مجذور

Average MSE with Standard Deviation Boundaries for 5 Runs



شکل ۸. نمودار کاهش مقدار خطای مجذور میانگین در طی آموزش و واسنجی به همراه محدوده‌های انحراف استاندارد واحد مثبت و منفی



شکل ۹. آنالیز حساسیت پارامترهای مورفومتریکی ورودی بر نقشه خروجی

نسبت به سایر پهنه‌ها دارد. پهنه کریدور کم‌شیب هم، که در قسمت کف و در بالای یاردانگ‌ها مشاهده می‌شود، در واقع، سطح رسوبات دریاچه‌ای باقی‌مانده یا کف کریدورها را نشان می‌دهد. پهنه گودی بیضوی با تقعر در هر دو سمت و به صورت فرورفتگی مقعر نمی‌تواند به وسیله فرسایش آبی ایجاد شده باشد و احتمالاً در اثر فرسایش بادی و پیچان بادهای موضعی در مکان‌های خاصی از کریدورها ایجاد شده است. نکته حائز اهمیت این است که در طول منطقه، یعنی در امتداد شمال غربی - جنوب شرقی، به‌رغم شیب کلی موجود و کاهش ارتفاع به سمت جنوب شرق، کلاس‌ها دارای پراکندگی یکسان و یکنواختی در کل منطقه‌اند. این حالت در مناطقی که تحت اثر فرسایش آبی‌اند به‌ندرت اتفاق می‌افتد و با کاهش ارتفاع لندفرم‌ها یا حداقل پراکندگی کلاس‌های مختلف تغییر می‌یابد.

مقایسه پهنه‌ها با عوارض موجود بر روی عکس هوایی صحت پهنه‌بندی فوق را تأیید می‌کند؛ بدین‌گونه که کلاس‌های قله و شانه با شیب محدب و مقعر دقیقاً با منطقه پرتگاهی بر روی عکس هوایی منطبق‌اند. مقایسه نتایج حاصل از روش جفری ماتوسیتا با آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که جفت‌هایی که در آن‌ها حداقل یکی از پارامترهای دارای حساسیت بالا وجود دارد دارای قدرت تفکیک بالایی در روش جفری ماتوسیتا نیز هستند. از طرف دیگر، پارامترهایی که دارای بالاترین حساسیت‌اند، مانند پارامترهای چرخش، انحنا متوسط، و انتگرال ارتفاعی، در واقع، همان پارامترهایی هستند که پهنه‌های قله و شانه با شیب محدب و مقعر را، که بیشتر تحت تأثیر فرسایش بادی‌اند، از بقیه کلاس‌ها، که در کف کریدورها و در دامنه یاردانگ‌ها بوده و تحت تأثیر فرسایش آبی‌اند، از یکدیگر جدا می‌کنند. در مقایسه با روش‌های پهنه‌بندی که قبلاً از آن‌ها

شکل ۹ نشان می‌دهد که بیشترین میزان حساسیت نقشه خروجی بر روی به‌ترتیب پارامترهای انحنا چرخشی، متوسط انحنا، انتگرال ارتفاع سنجی، و شیب به‌ترتیب در رده‌های اول تا چهارم است. و پارامترهای انحنا حادی، کل انحنا جمععی، و انحنا سطحی دارای حداقل حساسیت به تغییر پهنه‌ها در منطقه بوده‌اند.

### بحث و نتیجه‌گیری

نتایج پهنه‌بندی قسمت یاردانگی منطقه کویر لوت با استفاده از داده‌های رقومی ارتفاعی با فاصله ۱۰ متری و استفاده از روش نقشه‌های خودسازمانده نشان داد که از میان ۲۲ پارامتر مورد استفاده فقط ۷ پارامتر دارای بالاترین قدرت تفکیک کلاسی‌اند. بالاترین قدرت تفکیک برای پارامترهای انحنا سطحی، چرخش، انتگرال ارتفاع سنجی، کل انحنا جمععی، شیب، انحنا حادی، و متوسط انحنا برای منطقه مورد مطالعه توسط روش‌های رتبه‌بندی OIF و با استفاده از روش دی-بی انجام شد. با استفاده از این ۷ پارامتر منطقه به هفت کلاس - دره گردنه‌ای، گودی بیضوی، کریدور کم‌شیب، شانه یاردانگ با شیب مقعر، شانه یاردانگ با شیب محدب، قله یاردانگ، آبراهه کریدور - پهنه‌بندی شد. پهنه‌های قله یاردانگ، شانه با شیب محدب، و شانه با شیب مقعر دارای بیشترین ارتفاع‌اند و پیشانی فرسایش بادی را نشان می‌دهند. در بین این سه کلاس پهنه شانه با شیب مقعر نشان‌دهنده قسمت کم‌ارتفاع‌تر دیواره یاردانگ است که در آن سایش به وسیله بار بستری غالب است و در دو کلاس قله و شانه با شیب محدب سایش باید با بار معلق و با شدت کمتری انجام پذیرفته باشد. پارامتر چرخش در پهنه‌های کم‌ارتفاع‌تر، که در آن‌ها فرسایش آبی مؤثر بوده، مانند پهنه‌های آبراه کریدور و دره گردنه‌ای، مقادیر متفاوتی

[۵، ۶] با این مطالعه می‌توان دریافت که کاربرد انواع بیشتری از پارامترها باعث می‌شود که پهنه‌هایی با ویژگی‌های خاص‌تر و متمایزتر از سایر پهنه‌ها تفکیک شوند. پیشنهاد می‌شود با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی با دقت بالاتر و با استفاده از پارامترهای مورفومتریک با درجات بالاتر پهنه بندی برای همین منطقه انجام پذیرد.

استفاد می‌شده [۲۰، ۲۲، ۲۳] و بیشتر بر اساس پارامترهایی مانند ارتفاع، شیب، و انحنای های عرضی و طولی انجام می‌گردیده است، پهنه بندی خودکار با استفاده از پارامترهایی مانند چرخش، انحنای متوسط، و انتگرال ارتفاعی نتایج دقیق‌تری را برای پهنه بندی و تفکیک عوارض سطحی ارائه می‌نماید. همچنین، با مقایسه مطالعه انجام‌شده در دشت لوت به روش نقشه‌های خودسازمانده توسط احسانی و همکاران

## References

- [1] Bue, B.D. and Stepinski, T.F. (2006). Automated classification of landforms on Mars. *Computers & Geosciences*, 32, 604-661.
- [2] Dikau, R. (1989). The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology. In: Raper, J. (Ed.), *Three Dimensional Applications in Geographical Information Systems*. Taylor & Francis, London, pp. 51-77.
- [3] Darvishzadeh., A. (1991). *Geology of Iran*, Amirkabir Press, Tehran, Iran.
- [4] Davies, D.L. and Bouldin, D.W. (1979). A cluster separation measure. *IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intelligence*, 1, 224-227.
- [5] Ehsani, A.H. and Quiel, F. (2008). Geomorphometric feature analysis using morphometric parameterization and artificial neural networks. *Geomorphology*, 99, 1-12.
- [6] Ehsani, A.H. and Quiel, F. (2008). Application of self organizing map and SRTM data to characterize yardangs in the Lut desert, Iran. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3284-3294.
- [7] Ehsani, A.H. and Quiel, F. (2009). Self-organizing maps for multi-scale morphometric feature identification using shuttle radar topography mission data. *Geocarto International*, 24, 335-355.
- [8] Ehsani, A.H. et al. (2010). Effect of SRTM resolution on morphometric feature identification using neural network-self organizing map. *Geoinformatica*, 14, 405-424.
- [9] Evans, I.S. (1972). General geomorphology, derivatives of altitude and descriptive statistics. In R.J. Chorley (Ed.), *Spatial Analysis in Geomorphology* (pp. 17-90). London: Methuen & Co. Ltd.
- [10] Florinsky, I.V. (1998). Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models. *International Journal of Geographical Information Science*, 12, 47-61.
- [11] Florinsky, I.V. (1998). Combined analysis of digital terrain models and remotely sensed data in landscape investigations. *Progress in Physical Geography*, 22, 33-60.
- [12] Florinsky, I.V. (2002). Errors of signal processing in digital terrain modelling. *International Journal of Geographical Information Science*, 16, 475-501.
- [13] Florinsky, I.V. (2009). Computation of the third-order partial derivatives from a digital elevation model. *International Journal of Geographical Information Science*, 23, 2: 213-231.
- [14] Frankel, K.L. and Dolan, J.F. (2007). Characterizing arid region alluvial fan surface roughness with airborne laser swath mapping digital topographic data. *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, 112, F02025.
- [15] Grebby, S (2010). Lithological mapping of the Troodos ophiolite, Cyprus, using airborne LiDAR topographic data. *Remote Sensing of Environment*, 114, 713-724.
- [16] Hengel. T. and Router, H. (2008). *Geomorphometry, Concepts, Software, Applications*. Elsevier.
- [17] Ji, C.Y. (2000). Land-use classification of remotely sensed data using Kohonen Self- Organizing Feature Map neural networks. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66, 1451-1460.
- [18] Kohonen, T. (2001). *Self Organizing Maps*. 3rd Ed. Springer, New York.
- [19] Prima, O.D.A., Echigo, A., Yokoyama, R. and Yoshida, T. (2006). Supervised landform classification of Northeast Honshu from DEM-derived the maticmaps. *Geomorphology*, 78, 373-386.
- [20] Saux, E., et al.( 2004). A New Approach for a Topographic Feature-Based Characterization of Digital Elevation Data. *GIS'04*, 73-81.
- [21] Shary, P.A., Sharaya, L.S. and Mitusov, A.V. (2002). Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma*, 107, 1-32.

- 
- [22] Wood, J. (1996). *The Geomorphological Characterization of Digital Elevation Models*. Ph.D. Thesis, Department of Geography, University of Leicester, UK.
- [23] Zevenbergen, L.W. and Thorne, C.R. (1987). Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12, 47-56.