

# پهنه‌بندی کمی زمین‌دیس‌های بزرگ محیط بیابانی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی (مقایسه کویرهای لوت ایران و کایدام چین)

امیرهوشنگ احسانی\*<sup>۱</sup>، مرضیه فروتن<sup>۲</sup>

۱. دانشیار گروه مهندسی طراحی محیط زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران

foroutam@ucalgary.ca

۲. دانشجوی دکتری، جغرافیا، دانشگاه کالگری کانادا

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۱/۲۸

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۲/۶/۲۴

## چکیده

یاردانگ‌ها و تپه‌های ماسه‌ای مناطق فراخشک از جالب‌ترین زمین‌دیس‌های (لندفرم‌ها) مناطق بیابانی محسوب می‌شوند. ارائه روش مطلوب برای شناخت و پهنه‌بندی کمی زمین ریخت‌شناسی این زمین‌دیس‌ها با توجه به ناممکن بودن بازدیدهای میدانی و دسترسی از اهداف این مقاله است. در این مطالعه از داده‌های رادار SRTM/C با قدرت تفکیک زمینی معادل ۹۰ متر که وزارت ملی فضا و هوانوردی آمریکا (NASA) در سال ۲۰۰۳ ارائه کرد، استفاده شد. زمین‌دیس‌های بزرگی (Mega Landforms) نظیر یاردانگ‌ها و تپه‌های ماسه‌ای دشت لوت ایران و کایدام چین، به وسیله یکی از روش‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی با عنوان «الگوریتم خودسازمانده» مطالعه، طبقه‌بندی و مقایسه شدند. نتایج این تحقیق نشان داد که منطقه یاردانگ‌های کایدام چین نسبت به منطقه لوت ایران دارای پیچیدگی‌های بیشتری در قسمت تیغه‌های یاردانگی است در حالی که یاردانگ‌های منطقه لوت کلاس‌های یکنواخت‌تری دارد. جزئیات پیچیده یاردانگ‌های والی شکل کایدام نسبت به دوکی لوت سبب شده است که در این منطقه جزئیات دیگری از پارامترهای ورودی مثلاً جهت شیب در تقسیم‌بندی نهایی مؤثر واقع شود. بلوغ تپه‌های ماسه‌ای در ارگ لوت به علت منبع زیاد ماسه و بادهای چندجهته آن سبب شده است تا درصد کلاس‌هایی همچون شانه و دماغه شیب در آن بیشتر باشد. نقشه‌های مورفومتریک نهایی تپه‌های ماسه‌ای در دو منطقه تشابه زیادی در اجزای هر کلاس، تعداد و ویژگی‌های کلاس‌ها دارند، اما روند تکاملی ارگ در منطقه لوت به خوبی قابل تشخیص است. حال آنکه در منطقه کایدام به علت منبع کمتر ماسه و یک‌جهته شدن بادهای بلوغ و تغییر محسوس‌تری از ابتدا تا انتهای ارگ دیده نمی‌شود. به طور کلی نتایج نشان داد که شبکه خودسازمانده به منزله الگوریتم نظارت‌نشده شبکه‌های عصبی مصنوعی در تلفیق پارامترهای مورفومتریک برای آنالیز نیمه‌اتوماتیک زمین‌دیس‌های محیط‌های بیابانی و تحقیق در علل تفاوت آن‌ها بسیار کارآمد است.

## کلیدواژه

بیابان لوت ایران، بیابان کایدام چین، SRTM، زمین‌دیس‌ها، نقشه‌های خودسازمانده.

## ۱. سرآغاز

روز تا چندین میلیون سال دیده می‌شوند (Hugget, 2007). زمین‌دیس‌ها را می‌توان به طور کلی بر حسب ابعادشان به سه گروه میکرو (با ابعاد چندین سانتی‌متری)، مزو (با ابعاد چندین متری) و مگا (با ابعاد چند کیلومتری) تقسیم کرد.

لندفرم‌ها یا زمین‌دیس‌ها از عوارض آشکار سطح زمین به شمار می‌روند که در اندازه‌های مختلف از توده‌های خاکی تا کوه‌ها و صفحات تکتونیکی و طول عمرهایی از چند

۳۰ هزار کیلومتر مربع که حداقل بیش از ۶۰ درصد به وسیله تپه‌های ماسه‌ای بزرگ و پیچیده اشغال شده باشد ارگ<sup>۳</sup> اطلاق می‌شود. کلمه ارگ از زبان محلی عرب در صحرای آفریقای شمالی گرفته شده است که در ایران ماسه‌زار و در آسیای میانه و چین به آن کوم<sup>۴</sup> یا پسکی<sup>۵</sup> می‌گویند. محققان تلاش‌های زیادی در جهت تقسیم‌بندی تپه ماسه‌ای و یاردانگ‌ها بر مبنای ترکیبی از شکل، اندازه، تعداد و جهت قرارگیری سطوح لغزش بر مبنای باد غالب و درجه تغییر شکل انجام داده‌اند. ژئومتری یاردانگ‌ها و فرم‌های تپه‌های ماسه‌ای در ارگ‌ها، بیان‌کننده الگوی باد غالب منطقه طی دوره تکامل است. احسانی و همکاران در سال ۲۰۰۸ لندفرم‌های بخش مرکزی بیابان لوت را با استفاده از الگوریتم شبکه خودسازمانده طبقه‌بندی کردند. تأثیر اندازه توان تفکیک در بارزسازی عوارض مورفولوژیک در مدل رقومی ارتفاع SRTM و کاربرد آن در پهنه‌بندی نیز بررسی شده است (Hedin, 1903؛ Foroutan, et al., 2011؛ Ehsani, et al., 2009). از ترکیب داده‌های SRTM و داده‌های ماهواره‌ای با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی می‌توان به استفاده از این ترکیب در آنالیز منظر در مسائل اکولوژیکی نیز اشاره کرد (Ehsani, et al., 2008, 2010)

### ۱.۱.۱. بیابان لوت

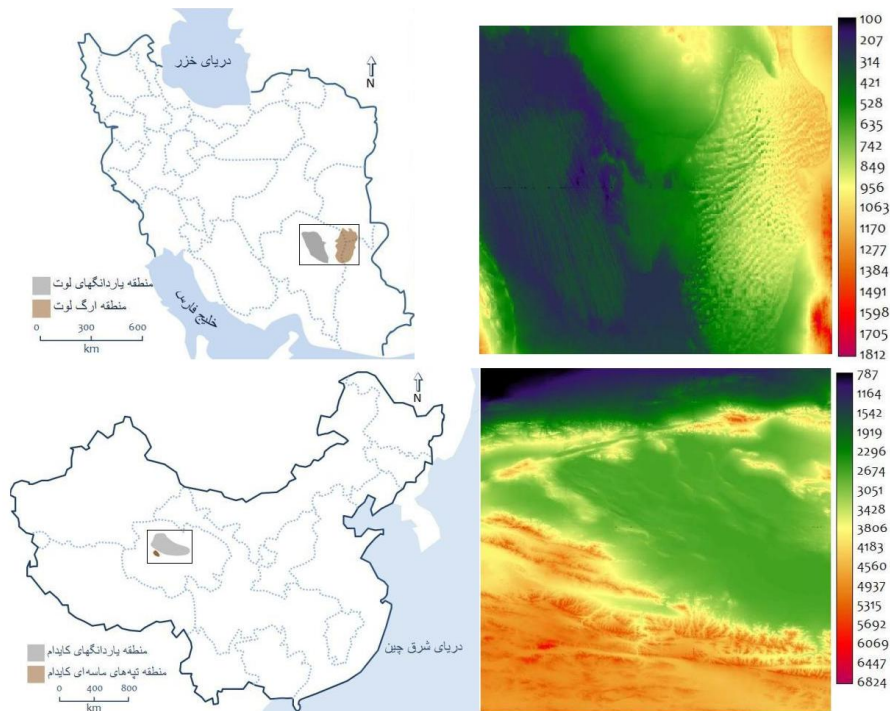
در ایران چاله‌ها و حوزه‌های آبخیز بسته بزرگ و کوچک فراوانی وجود دارند که حوزه آبخیز لوت از حوزه‌های بسته است که از نظر وسعت دومین آن‌ها به شمار می‌آید و از طریق ناهمواری‌هایی با ارتفاع کمتر از ۱۰۰۰ متر از حوزه آبخیز دشت کویر (بزرگ‌ترین حوزه آبخیز داخلی ایران) جدا می‌شود (درویش‌زاده، ۱۳۷۰). حوزه آبخیز لوت بخش‌هایی از استان‌های خراسان، سیستان و بلوچستان و کرمان را در جنوب شرقی ایران در بر می‌گیرد (Ehsani, et al., 2002, 1389). کلمه لوت در لغت به سرزمین برهنه، بدون آب و عاری از پوشش گیاهی گفته می‌شود که

آنچه زمین‌دیس‌های بیابانی را از دیگر مناطق جدا می‌کند گستردگی، عمق و شاخص بودن آن‌هاست. تپه‌های ماسه‌ای و یاردانگ‌ها از مهم‌ترین و شناخته‌شده‌ترین این لندفرم‌ها محسوب می‌شوند که در نقاط مختلف دنیا در کنار هم و در ابعاد بزرگ قرار دارند. از جمله این مناطق می‌توان به دو بیابان لوت ایران و کایدام چین در قاره پهناور آسیا اشاره کرد.

یاردانگ کلمه‌ای ترکمنی است که آن را نخستین بار جهانگردی سوئدی به نام هدین در سال ۱۹۰۳ به کار برد. این زمین‌دیس‌ها را در ایران به نام کلوت می‌شناسند و در چین لیاگنز<sup>۱</sup> نامیده می‌شوند (Cooke و همکاران، ۱۹۹۳). یاردانگ‌ها اشکال فرسایشی خطی هستند که طول آن‌ها به ۱۵۰ کیلومتر و ارتفاع‌شان گاه به ۷۵ متر نیز می‌رسد. این عوارض تحت تأثیر مشترک وزش بادهای تک‌جهتی و فرسایش آبی شکل می‌گیرند و توسعه می‌یابند، اما فرایندهای دیگری نیز در تکامل آن‌ها بسیار مؤثرند که می‌توان به بادساییدگی، انقباض، بریدگی‌های ناشی از جریان‌ات آب، شکاف‌های ناشی از خشک و ترشدن رسوبات، سقوط و ریزش ناگهانی، هوازگی و حرکت توده‌ای اشاره کرد (Goudi & M iddelton, 2006). یاردانگ‌ها بسته به ساختار زمین‌شناسی و فرایندهای غالب به اشکال گوناگون نظیر وال شکل، دوکی شکل، گوزپشتی، یال دندان اره‌ای، مخروطی، هرمی و طولی دیده می‌شوند (Hugget, 2003). قسمت عمده مگایاردانگ‌های آسیای میانه در جنوب شرقی این منطقه و شمال شرق فلات تبت در حوضه خشک کایدام چین وجود دارند.

تپه ماسه‌ای را به طور ساده می‌توان به صورت توده یا تیغه از ماسه انباشته شده از طریق باد تعریف کرد که از لحاظ ابعادی از چند ۱۰ سانتی‌متر تا بیش از ۱۵۰ متر متغیر است. تپه‌های ماسه‌ای بزرگ را در اصطلاح مگا- تپه ماسه‌ای یا دراس<sup>۲</sup> می‌گویند. تپه‌های ماسه‌ای همچنین می‌توانند به یکدیگر متصل و زنجیره‌های تپه‌های ماسه‌ای یا شبکه‌های ماسه‌ای را شکل دهند. به منطقه‌ای وسیع بالغ بر

شمال شرق - جنوب غرب در نتیجه تصادم فعال بین دو صفحه هند و آسیاست (Tapponnier, et al., 2001). ناهمواری کم (>۳۰۰ متر)، ساختار زهکشی درونی و بین‌کوهستانی حوزه بالادست، سبب شده است که بیابان کایدام به طور فعال با رسوبات پر شود. این رسوبات شامل انواع نمک‌هاست و نام این حوضه (کایدام) نیز واژه‌ای مغولی به معنای نمک است. محدوده جغرافیایی این حوزه در طول و عرض جغرافیایی بین  $35^{\circ}$  تا  $40^{\circ}$  شمالی و  $90^{\circ}$  تا  $95^{\circ}$  شرقی است. حوزه کایدام در حال حاضر تحت تأثیر فرسایش بادی شدیدی است، اما در ۵۰ سال گذشته هیچ طوفان تولیدکننده شن بزرگی در آن گزارش نشده است (Sun, et al., 2001). بر اساس تناوب شرایط گرم و سرد در مرکز آسیا در دوره پلیو-کواترنری، این حوزه تحت تأثیر دوره‌های رسوب‌گذاری و فرسایش باد قرار گرفته است. شکل ۱ موقعیت این منطقه و مدل رقومی ارتفاعی آن را در چین و استان کایدام نشان می‌دهد.



شکل ۱. مناطق مورد مطالعه شامل کویر لوت ایران و تصویر مدل رقومی ارتفاع (SRTM) (بالا) و کویر کایدام در چین همراه تصویر مدل رقومی ارتفاع مربوط به آن (پایین)

به‌منزله قطب حرارتی دنیا نیز شناخته شده است (Mildrexler, et al., 2006). در قسمت شرق لوت ارگی به وسعت ۵۰۰۰ کیلومتر متشکل از تپه‌های ماسه‌ای بزرگ وجود دارد که به آن ریگ ییلان گفته می‌شود. این در حالی است که غرب لوت را مگایاردانگ‌های بسیار زیبا و بی‌نظیری به وسعت حدود ۴۵۰۰ کیلومتر مربع پوشانده‌اند. بادهای محلی و منطقه‌ای، حرارت زیاد، خشکی شدید و گندهای نمکی را از عوامل تشکیل و گسترش بیابان لوت دانسته‌اند. بیشینه و کمینه ارتفاع این منطقه به ترتیب ۱۸۱۲ و ۱۰۰ متر است. شکل ۱ موقعیت منطقه مطالعاتی را در ایران و چین همراه مدل رقومی ارتفاع مستخرج از داده‌های SRTM نشان می‌دهد.

## ۲.۱. بیابان کایدام

بیابان کایدام چین با ۷۰۰ کیلومتر طول و ۳۰۰ کیلومتر پهنا از مرتفع‌ترین (ارتفاع تقریبی ۲۸۰۰ کیلومتر) و خشک‌ترین (کمتر از ۵۰ میلی‌متر بارندگی در بخش غربی) بیابان‌های جهان محسوب می‌شود که کوتاه‌شدگی آن در جهت

## ۲. مواد و روش بررسی

وزارت ملی فضا و هوانوردی امریکا (NASA) در سال ۲۰۰۳ داده‌های رادار SRTM/SIR-C band با اندازه شبکه ۳ آرک ثانیه (تفکیک زمینی معادل ۹۰ متر) را برای ۸۰ درصد کره زمین ارائه کرد. مدل‌های رقومی ارتفاعی استفاده شده در این مطالعه (به‌منزله مبنای کار آنالیزهای ژئومورفولوژی کمی) از داده‌های رادار SRTM/C تهیه شدند.

پارامترهای مورفومتریک ورودی به الگوریتم شبکه خودسازمانده عبارت‌اند از: شیب، کمینه انحنا، بیشینه انحنا و فاکتور انحناي مقطع عرضی که با استفاده از معادلات درجه دوم از مدل رقومی ارتفاعی مناطق (جدول ۱) استخراج شدند. این پارامترها بعد از نرمال‌سازی با روش لوجستیک به‌منزله ورودی الگوریتم شبکه خودسازمانده استفاده شدند (Wood, 1996). تعداد بهینه کلاس‌های خروجی شبکه با روش داویس-بولدین یا دی-بی تعیین شد. مقدار ضریب دی-بی برای تعیین تعداد بهینه پهنه‌ها به صورت فرمول زیر تعریف می‌شود:

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

که در آن  $d(c_i, c_j)$  فاصله بین مرکز دو کلاس  $i$  و  $j$  یا 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  $j$  هستند. کمترین مقدار این ضریب، بهترین حالت جدایش پهنه‌ها یا بهترین طبقه‌بندی را نشان می‌دهد (Bouldin & Davies, 1979). این روش برای دو محیط مختلف شامل یاردانگ‌ها و تپه‌های ماسه‌ای دشت لوت ایران و حوضه کایدام چین با توپوگرافی‌های ویژه به کار گرفته و نتایج پهنه‌بندی در نهایت با نقشه‌های توپوگرافی و اطلاعات جانبی مقایسه و اعتبارسنجی شد.

## ۱.۲. الگوریتم شبکه خودسازمانده

مدل کوهن یا شبکه خودسازمانده گونه‌ای از شبکه‌های عصبی است که بر یادگیری رقابتی استوار است. در این الگوریتم داده‌های با ابعاد بالا، پیچیده و غیرخطی در دسته‌های مجزا سازماندهی و نقشه‌ای با ابعاد کم ایجاد می‌کنند. در این مدل تعدادی سلول عصبی که معمولاً در یک توپولوژی مسطح کنار یکدیگر چیده می‌شوند، با ایفا متقابل روی یکدیگر، وظیفه شبکه خودسازمانده را ایفا می‌کنند.

جدول ۱. پارامترهای مورفومتریک استفاده شده

شماره	نشان	پارامتر سطح زمین	درجه	واحد	فرمول
۱	Crosc	انحناي تقاطعی	۲	1/m	$-\sqrt{\frac{\frac{t}{2}p^2 + \frac{r}{2}q^2 - spq}{p^2 + q^2}}$
۲	Slst	شیب	۱	°	$\arctan(\sqrt{p^2 + q^2})$
۳	minc	کمینه انحنا	۲	1/m	$(-\frac{r}{2} - \frac{t}{2} + \sqrt{((\frac{r}{2} - \frac{t}{2})^2 + s^2)})$
۴	maxc	بیشینه انحنا	۲	1/m	$(-\frac{r}{2} - \frac{t}{2} - \sqrt{((\frac{r}{2} - \frac{t}{2})^2 + s^2)})$

$$w_{ij(t+1)} = w_{ij(t)} + \eta(t) * (x_i(t) - w_{ij(t)}) \quad (3)$$

که در این رابطه  $\eta$ ، همان ضریب بهره است ( $0 < \eta < 1$ ) که به تدریج طی زمان کاهش می‌یابد. اندازه شعاع همسایگی نیز به تدریج کاهش می‌یابد. بدین صورت محدوده بالاترین فعالیت یا تأثیر نورون برنده روی نورون‌های مجاورش مرتباً کاهش می‌یابد. با اعمال این رابطه مقادیر وزنی نورون‌های مجاور به مقادیر وزنی نورون برنده شبیه‌تر می‌شوند. وقتی پس از انجام تصحیحات نقشه توپولوژیک به سطوح یا پهنه‌های همگن تقسیم شوند شبکه آموزش دیده شده است. در مراحل ابتدایی آموزش محدوده‌های همسایگی بزرگ است، اما همین‌طور که آموزش ادامه می‌یابد و طی آن، اثر همسایگی کوچک‌تر و خالص‌تر می‌شود (Kohonen, 2001).

### ۳. نتایج

#### ۳.۱. کویر لوت ایران (منطقه یاردانگ‌ها)

پس از به کارگیری پارامترهای مورفومتریک در الگوریتم نقشه خودسازمانده، خروجی به صورت نقشه مورفومتریک زمین‌دیس‌ها شامل یاردانگ‌های کویر لوت در ایران ارائه شد (شکل ۲). تعداد بهینه کلاس‌ها برای این منطقه بر اساس نتایج آنالیز ضریب دیویس بولدین ۷ کلاس با ضریب کمی‌سازی ۰/۰۶۳۹ تعیین شد که به ترتیب گودی بیضوی، آبراهه کریدور، کریدور کم‌شیب، دره گردنه‌ای و شانه یاردانگ با شیب محدب و قله و شانه یاردانگ با شیب مقعر بودند.

#### ۳.۲. کویر لوت ایران (ارگ لوت)

نقشه مورفومتریک تپه‌های بزرگ ماسه‌ای شرق لوت که ارگ ییلان نام دارد در شکل ۳ ارائه شده است. بر اساس نتایج آنالیز ضریب داویس - بولدین، تعداد بهینه کلاس‌های مورفومتریک (زمین‌دیس) ۶ کلاس تعیین شد که دماغه شیب، تیغه، تیغه گردنه‌ای، شانه، بیضوی مقعر و دره بودند. ضریب کمی‌سازی در الگوریتم ۰/۰۳۳ بوده که بیانگر دقت بالایی روش است.

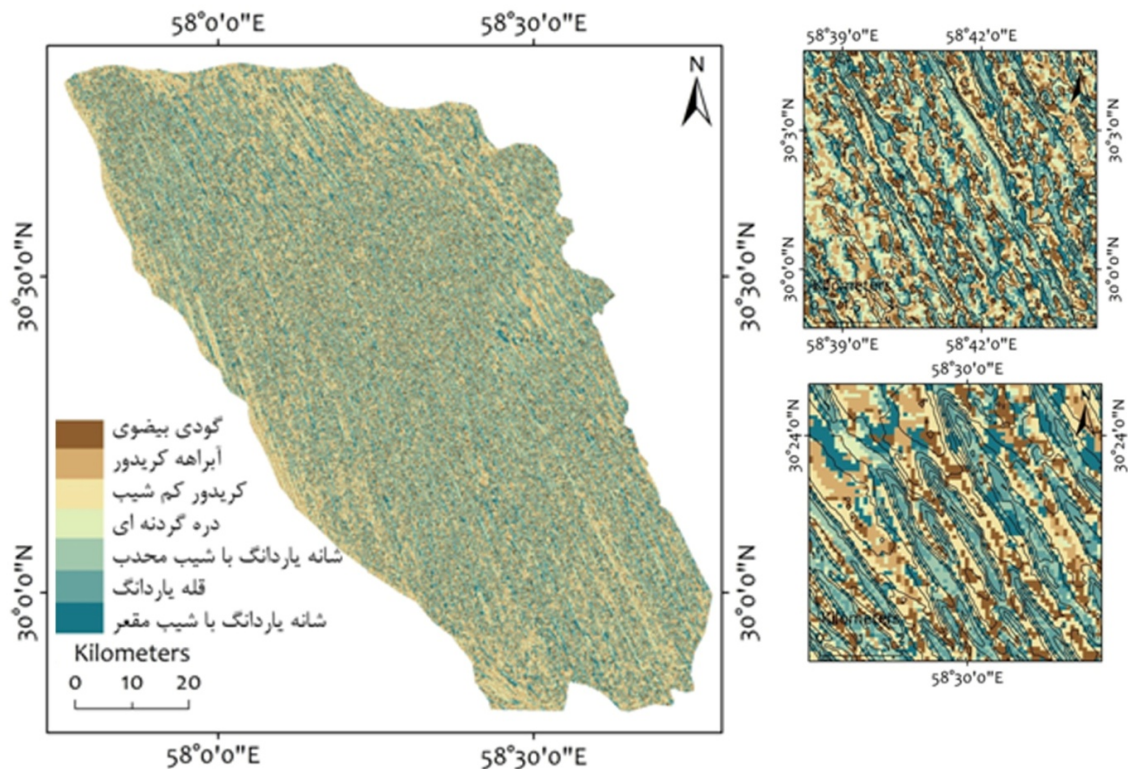
یعنی نورون‌های لایه خروجی این شبکه عصبی، در برنده یا فعال‌شدن با یکدیگر رقابت می‌کنند و در هر مرحله در این رقابت فقط یک نورون پیروز می‌شود. در مرحله اول یعنی تعیین نورون برنده مقادیر اولیه برای وزن مقادیر ورودی نورون‌ها تعیین می‌شود، سپس داده‌های ورودی تک تک با مقادیر وزنی معادل در نورون مقایسه می‌شوند. نورونی که بیشترین شباهت با ورودی را دارد برنده شناخته می‌شود. مقادیر اولیه برای ضرایب وزنی به صورت تصادفی تعیین می‌شوند. در مرحله بعد داده‌های واقعی ورودی که دارای مقادیر پارامترهای  $x_i(t)$  هستند و تعداد این پارامترها که در داده ورودی برابر تعداد وزن‌های تصادفی در هر نورون است به شبکه وارد می‌شوند و برای تعیین نورون برنده یا نورونی که دارای بیشترین شباهت مقادیر وزنی با پارامترهای داده ورودی است، داده ورودی با نورون‌های شبکه مقایسه می‌شود. مبنای درجه شباهت داده ورودی با نورون اختلاف بین وزن‌های نورون با پارامترهای متناظر آن در داده ورودی است. فاصله  $d_j$ ، بین داده برداری ورودی و مقادیر وزن متناظر با آن در هر نورون از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

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

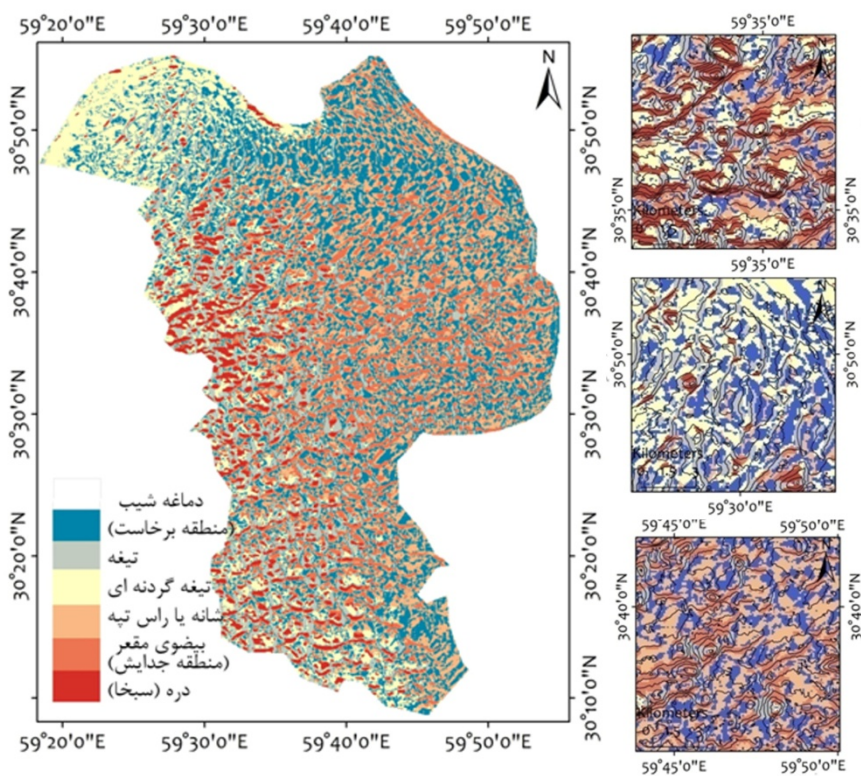
که در این رابطه پارامترها عبارت‌اند از:  $d_j$  فاصله وزن داده ورودی و وزن نورون است،  $w_{ij}$  وزن نورون مقدار ضرایب وزنی از ورودی  $i$  به گره خروجی  $j$  در زمان  $t$  است و  $x_i$  بردار ورودی و  $t$  زمان یادگیری است. نورونی که دارای کمترین مقدار فاصله  $d_j$ ، با بردار یا داده ورودی باشد نورون برنده محسوب می‌شود.

در مرحله نهایی صفحه نقشه توپولوژیک نورون‌ها در کنار هم قرار گرفته است. نورون‌های اطراف نورون برنده در این صفحه متناسب با فاصله قرارگیری‌شان نسبت به نورون برنده در نقشه توپولوژیک تصحیح می‌شوند. تصحیح نورون‌های مجاور نورون برنده بر اساس رابطه ۳ انجام می‌گیرد:





شکل ۲. نقشه ژئومورفومتریک منطقه یاردانگ های لوت با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی

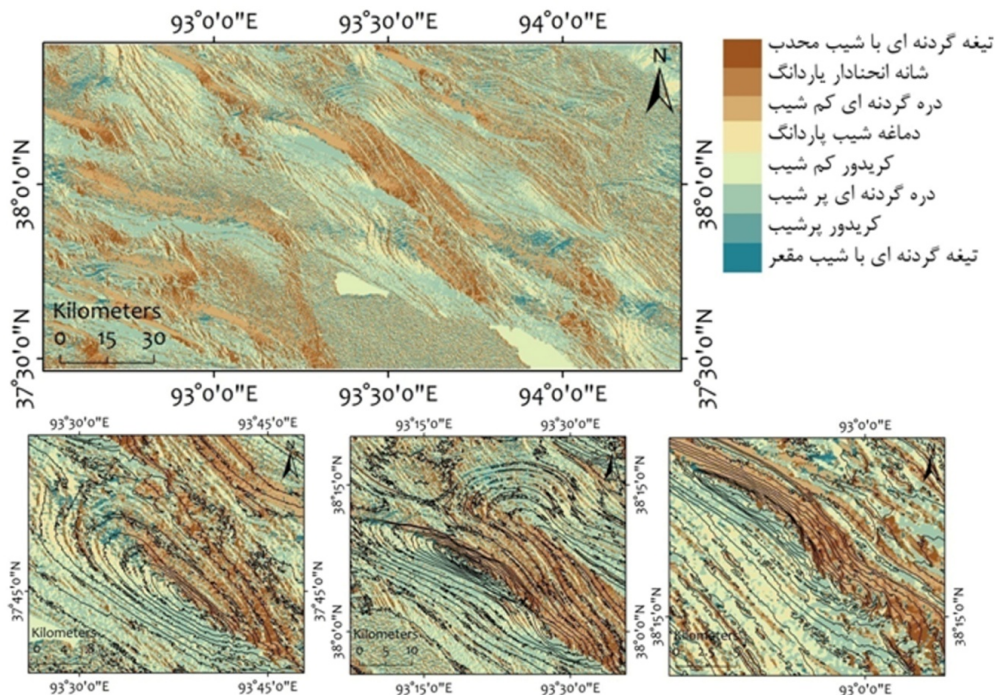


شکل ۳. نقشه ژئومورفومتریک منطقه ارگ لوت با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی

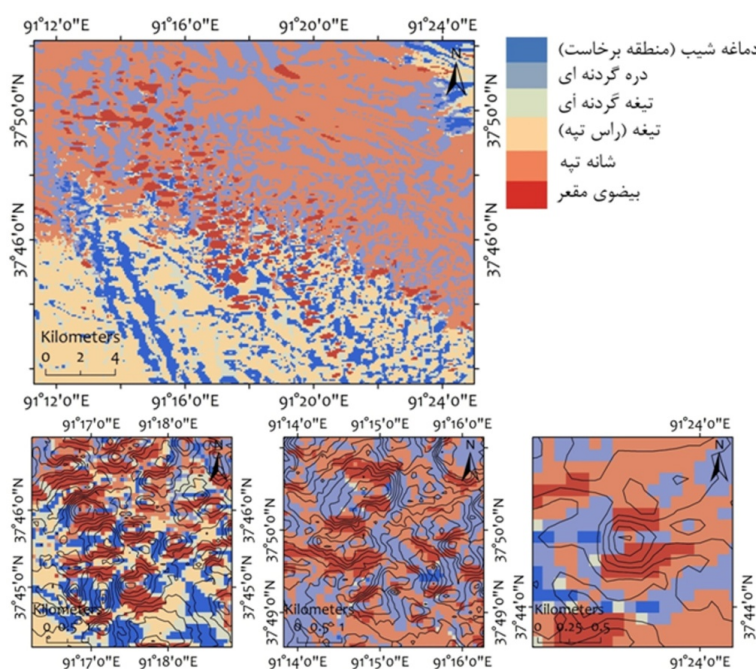
گردنه‌ای، شانه‌ی انحنادار، دره‌ی گردنه‌ای کم‌شیب، دماغه‌ی شیب، کریدور کم‌شیب، دره‌ی گردنه‌ای پرشیب، کریدور پرشیب و تیغه‌ی گردنه‌ای با شیب مقعر بودند. ضریب کمی‌سازی شبکه در این مورد ۰/۰۴۲۴ بوده است.

### ۳.۳. کایدام چین (منطقه یاردانگ‌ها)

منطقه یاردانگ‌های کایدام چین با توجه به شرایط متفاوت مورفومتریکی به منظور ارزیابی روش ارائه‌شده به کار گرفته شد. نتایج به کارگیری این روش در شکل ۴ ارائه شده است. تعداد بهینه کلاس‌ها در این منطقه بر اساس ضریب دیویس-بولدین ۶ کلاس تعیین شد که شامل تیغه



شکل ۴. نقشه ژئومورفومتریک منطقه یاردانگ‌های بیابان کایدام چین با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی



شکل ۵. نقشه ژئومورفومتریک تپه‌های ماسه‌ای کایدام چین با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی



### ۴.۳. کایدام چین (منطقه تپه‌های ماسه‌ای)

نتایج مربوط به بخش تپه‌های ماسه‌ای کایدام در چین در نقشه شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود تعداد بهینه کلاس‌ها در این منطقه ۶ کلاس تعیین شد که به ترتیب دماغه شیب، دره گردنه‌ای، تیغه گردنه‌ای، تیغه و شانه بیضوی مفرع بودند. ضریب کمی‌سازی شبکه ۰/۰۲۴۴ بوده است.

### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

#### ۱.۴. مناطق یاردانگ

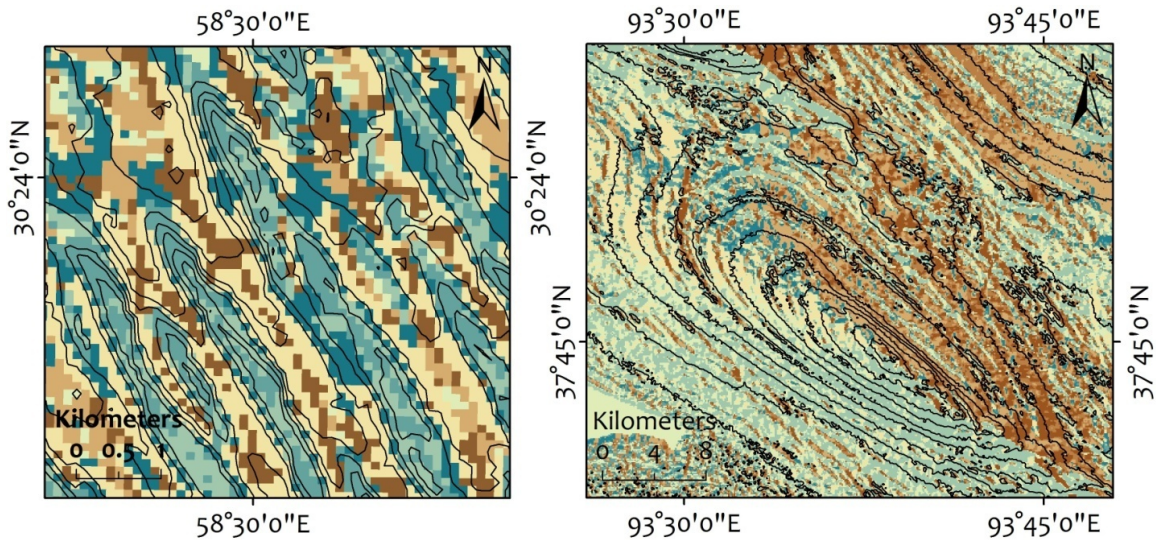
با توجه به نتایج آنالیز ضریب دیویس- بولدین در مناطق شامل یاردانگ‌ها در دو منطقه لوت و کایدام، تعداد کلاس‌های مورفومتریک در منطقه کایدام چین بیشتر است. علت این امر پیچیده‌تر بودن شکل یاردانگ‌ها در کایدام چین (والی شکل) نسبت به شکل یکنواخت‌تر و دوکی شکل آن‌ها در کویر لوت ایران است. علاوه بر آن، متغیر بودن یا به عبارتی یکنواخت نبودن جهت اکثر بادها سبب ایجاد کلاسی نظیر شانه انحنا دار یاردانگ (کلاس ۲) در بخش‌های قوس دار یاردانگ‌ها در کایدام می‌شود در حالی که در منطقه لوت این انحنا فقط در جهت شمال- غرب به جنوب- شرق است. اصولاً یاردانگ‌های منطقه کایدام چین را می‌توان به دو گروه میکرو و مگالندفرم تقسیم کرد. در این منطقه یاردانگ‌های کوچک در فواصل بین مگایاردانگ‌های والی شکل (حدود ۱۰۰ متر) قرار گرفته‌اند. تفرع و تحدب از رأس یاردانگ‌ها به پایین در هر دو منطقه به طور متناوب دیده می‌شود. آنچه در نقشه ژئومورفومتریک یاردانگ‌های منطقه کایدام چین (شکل ۴) به وضوح مشاهده می‌شود وجوه تفکیک شده یاردانگ‌های والی بزرگ است که به نظر می‌رسد به علت جهت‌های متفاوت باد در این منطقه است. همین‌طور جهت شیب نیز در تفکیک آن‌ها نقش مؤثری داشته است. شکل ۶ به خوبی این تفاوت در جهت، اندازه و پیچیدگی یاردانگ‌های دو منطقه را نشان می‌دهد. از آنجا که جنس منطقه لوت از نظر سنگ‌شناسی شن و سیلت‌های پلیستوسن و رسوبات دریاچه‌ای با لایه‌های افقی مربوط به دوران میوسن است،

فرسایش ناشی از وزش بادهای یک‌جته در این منطقه سبب ایجاد یاردانگ‌هایی با کریدورهای عمیق‌تر، مشخص‌تر و یکنواخت‌تری شده است. بافت سخت‌تر منطقه کایدام چین از دوران پلیستوسن سبب شده است که فرسایش بادی فقط لایه‌های نرم‌تر سطحی را فرسوده و لایه‌های سخت زیرین را نتواند به طور عمیق فرسوده کند. در منطقه کایدام چین شکل یاردانگ‌ها محصول بادهای یک‌جته است، اما عوامل زمین‌شناسی متفاوت آن سبب ایجاد شکل متفاوت‌تری از یاردانگ‌ها شده است. مطالعات قبلی نشان داد که فرسایش در این منطقه با دگرگونی و برخاست زمین ارتباط بازخوردی مثبت دارد (بیامونت و همکاران، ۲۰۰۱). در واقع در این منطقه یک چین کوهزایی فعال در معرض فرسایش بادی قرار گرفته است که می‌توان آنرا در در شکل یاردانگ‌ها دید.

کلاس دماغه شیب (کلاس ۴) در منطقه کایدام چین وجود دارد در حالی که این کلاس در کویر لوت به علت فرم دوکی و یکنواختی نسبی عرض یاردانگ‌ها قابل تفکیک نبوده است. در نقشه ژئومورفومتریک لوت به جای کلاس مذکور، قله یاردانگ قرار گرفته است. شکل ساده و عرض یکنواخت و نبود شیارهای فرسایشی روی شانه‌های یاردانگ‌ها در منطقه لوت توجهی برای نبود این کلاس‌ها در منطقه کایدام چین است.

کلاس ۵ در کایدام چین و کلاس ۳ در لوت، مناطق کم‌شیب و نسبتاً مسطح کف کریدورها را نشان می‌دهد. کلاس ۱ در منطقه لوت همان منطقه پست و آبراهه‌ها در بخش کریدورهاست. کلاس ۲ بیشتر منطبق بر مسیر آبراهه‌ها در کریدورهاست که با کمینه انحنا مثبت در محل شیار کف کریدورها قرار گرفته است. کلاس ۱ یا گودی بیضوی به صورت لکه‌هایی در فروافتاده‌ترین بخش کریدور قرار دارد. در این کلاس متوسط، کمینه و بیشینه انحنا منفی و انحنا مقطع عرضی مثبت سبب ایجاد گودی‌های موضعی در کریدورها شده است. این دو کلاس در لوت معادل کلاس‌های ۷ یا کریدور پرشیب در منطقه کایدام هستند که در بین ریز یاردانگ‌ها و در مقررترین بخش‌های کریدور کم‌شیب کایدام (کلاس ۵) قرار دارند.





شکل ۶. مقایسه نمای نزدیک کلاس‌های مورفومتریک یاردانگ‌های منطقه کایدام چین (راست) و لوت (چپ)

منطقه کایدام تکامل یافته‌تر و به دو بخش کم‌شیب و پرشیب (کلاس‌های ۳ و ۶) تقسیم شده و در دو طرف ارتفاعات یاردانگ قرار گرفته است. دره گردنه‌ای که وجه آن در جهت شمال-شرق است نسبت به بخش مقابل آن شیب کمتری دارد و وجه و شیب این دو منطقه سبب تفکیک آن در منطقه کایدام شده است. منطقه دره گردنه‌ای در منطقه لوت فقط یک کلاس (کلاس ۴) است که در منطقه پرشیب دره‌ای یاردانگ‌ها و کریدورها متمایز شده است.

مطالعه توزیع وزن الگوریتم خودسازمانده نشان داد که تغییرات شیب در کلاس‌های هر دو منطقه بسیار متغیر است، اما تغییرات کم‌وزن در خصوص بیشینه و کمینه انحنا در کلاس‌های منطقه کایدام نسبت به تغییرات شدید آن‌ها در لوت و نسبت به دیگر پارامترها در همین منطقه قابل ملاحظه است. روند تغییرات در دیگر پارامترها متناسب با ویژگی‌های آن‌ها در دیگر کلاس‌ها تغییر کرده است. به نظر می‌رسد به علت متمرکز بودن بیشتر کلاس‌های منطقه کایدام روی خود یاردانگ‌ها توزیع وزن این دو پارامتر در این منطقه نسبت به منطقه لوت از اهمیت کمتری برخوردار بوده است، زیرا کلاس‌ها در منطقه لوت به نسبت متناسبی بین کلوت و یاردانگ توزیع شده‌اند و تغییرات کمینه و بیشینه شیب در آن از اهمیت بیشتری برخوردار بوده است.

کلاس ۵ در کایدام چین و کلاس ۳ در لوت، مناطق کم‌شیب و نسبتاً مسطح کف کریدورها را نشان می‌دهد. کلاس ۱ در منطقه لوت همان منطقه پست و آبراهه‌ها در بخش کریدورهاست. کلاس ۲ بیشتر منطبق بر مسیر آبراهه‌ها در کریدورهاست که با کمینه انحنا مثبت در محل شیار کف کریدورها قرار گرفته است. کلاس ۱ یا گودی بیضوی به صورت لکه‌هایی در فروافتاده‌ترین بخش کریدور قرار دارد. در این کلاس متوسط، کمینه و بیشینه انحنا منفی و انحنا مقطعی عرضی مثبت سبب ایجاد گودی‌های موضعی در کریدورها شده است. این دو کلاس در لوت معادل کلاس‌های ۷ یا کریدور پرشیب در منطقه کایدام هستند که در بین ریز یاردانگ‌ها و در مقعرترین بخش‌های کریدور کم‌شیب کایدام (کلاس ۵) قرار دارند.

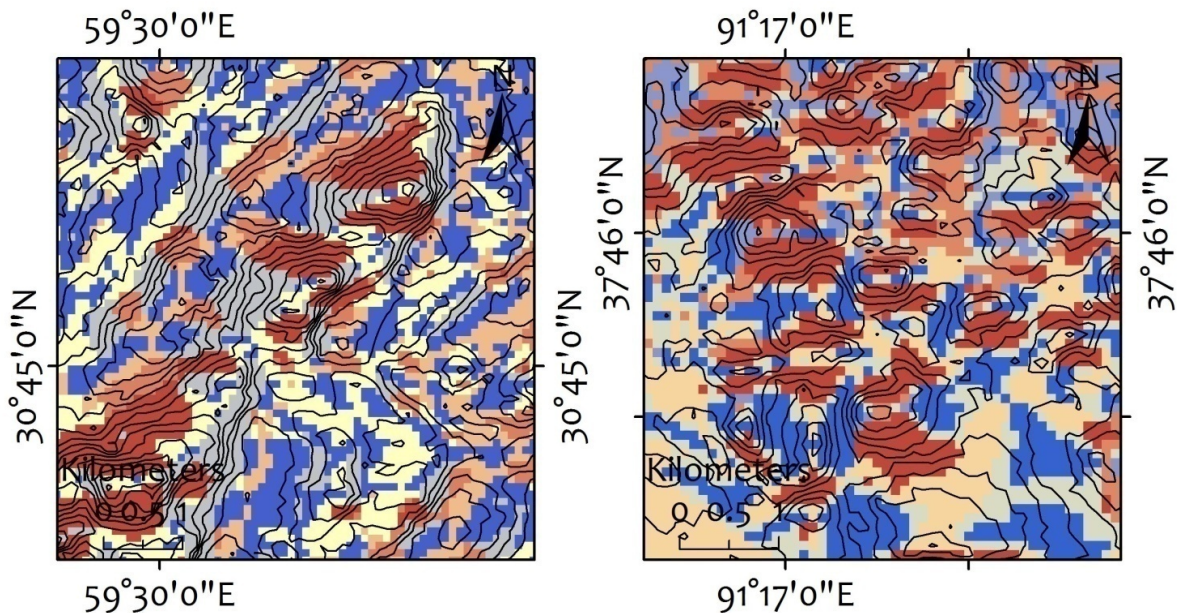
پیشانی یا حاشیه برجستگی یاردانگ‌ها در لوت شامل چند کلاس اصلی است که مرتفع‌ترین آن قله یاردانگ با حداکثر انحنا طولی و عرضی است که در واقع قله‌های منفرد است و در بالاترین ارتفاع پیشانی قرار دارد. بلافاصله در زیر آن کلاس‌های ۵ و ۷ به صورت متناوب وجود دارد. تفاوت اصلی این دو کلاس در شیب‌های طولی آن‌هاست. دره‌های گردنه‌ای در هر دو منطقه مشاهده می‌شوند، در این منطقه انحنا متوسط در مجموع منفی است، این کلاس در

## ۲.۴. مناطق تپه‌ماسه‌ای

تپه‌های ماسه‌ای در هر دو منطقه بر اساس محاسبات ضریب دیویس-بولدین به تعداد کلاس مساوی تقسیم شده‌اند. به‌رغم تعداد کلاس‌های یکسان، در منطقه لوت تنوع اشکال تپه‌های ماسه‌ای بیشتر و گسترده‌تر است (شکل ۷). کلاس دماغه شیب (کلاس ۱ در هر دو منطقه) حدود ۳۰ درصد از منطقه لوت و ۱۲ درصد از منطقه کایدام چین را تشکیل می‌دهد. اصلی‌ترین و برجسته‌ترین بخش تپه‌های ماسه‌ای اشکال ریپل مارک و زیبارهاست. کمترین مقدار انحناى مقطع عرضی و انحناى عمودی در هر دو منطقه مربوط به این کلاس‌هاست. بخش بالا و قوس‌دار تپه‌های ماسه‌ای که همان منطقه برخاست یا اثر نام دارد (منطقه رو به باد که اصطلاحاً به آن شیب استاس می‌گویند) در قسمت شمالی یا ابتدایی ارگ لوت است و بیشترین وسعت را دارد. تپه‌های ستاره‌ای به علت ساختار آن‌ها که دارای وجوه بیشتری با شیب تند هستند، درصد کمتری از منطقه را در بر می‌گیرند. بالاترین تأثیر پارامتر شیب در خصوص کلاس ۶ یا همان بیضوی مقعر (منطقه جدایش) در هر دو منطقه است. این منطقه همچنین دارای بالاترین وزن انحناى مقطع عرضی نیز است که بر حسب زاویه اثر، جهت و سرعت باد میزان شیب آن تغییر می‌کند. کلاس ۲ در هر دو منطقه دره گردنه‌ای با شیب و ارتفاع زیاد است که در لبه تپه ماسه‌ای و در نوک منطقه سایه تپه‌های ماسه‌ای قرار دارد. این منطقه بسته به قدرت و سرعت باد و سن تپه ماسه‌ای می‌تواند اشکال متفاوتی به خود گیرد. الگوریتم شبکه خودسازمانده وزن بیشتری به پارامتر انحناى کمینه نسبت به انحناى بیشینه در این بخش داده است. تیغه گردنه‌ای که در منطقه لوت کلاس ۴ و کایدام کلاس ۳ است، در بخش‌های بالغ‌تر ارگ وسعت بیشتری به خود اختصاص داده است. در جدایش این بخش وزن متوسط انحناى کل مثبت و وزن شیب کم است. به نظر می‌رسد این منطقه در ناحیه لوت نسبت به کایدام دارای انحناى عمودی منفی‌تری است. انحناى عمودی مثبت و

سطحی منفی سبب ایجاد کلاس شانه در لوت (کلاس ۳) و در کایدام (کلاس ۵) شده است که مقدار شیب در آن در هر دو منطقه نسبتاً کم است. در منطقه لوت با توجه به وزن‌دهی شبکه خودسازمانده تأثیر شیب در تفکیک این منطقه نقش تعیین‌کننده‌تری داشته است. در تشخیص تیغه یا رأس تپه (کلاس ۴ در کایدام و ۵ در لوت) نیز پارامتر شیب تأثیر بسزایی داشته است.

در بین کلاس‌های مشترک تپه‌های ماسه‌ای در هر دو درصد کلاس دماغه شیب در منطقه لوت بیش از دو برابر منطقه کایدام است که نشان از میزان بلوغ و درخور توجه ماسه در منطقه است. برعکس، مساحت کلاس شانه در منطقه کایدام بیش از دو برابر لوت است. کوهستان مرتفع در شرق قسمت‌های انتهایی ارگ علاوه بر افزایش رطوبت، سبب کاهش اثر بادهای و تغییر جهت آن‌ها می‌شود. در نتیجه این اثر، تپه‌های ستاره‌ای و با شکل‌های پیچیده‌تر که میزان دماغه شیب و تیغه گردنه‌ای کمتری نسبت به تپه‌های یکنواخت ابتدای ارگ دارند ایجاد شده‌اند. در این منطقه به تدریج بر میزان دره یا پیشانی شیب، تیغه و تپه‌های هرمی (قورد) افزوده و از یکنواختی تپه‌ها کم می‌شود. این تغییرات از ابتدا تا انتهای ارگ به خوبی در کل منطقه دیده می‌شود، اما در منطقه کایدام این روند به علت منابع کمتر ماسه، بلوغ و تکامل نیافتن تپه‌ها مشاهده نمی‌شود. همچنین، در جنوب منطقه لوت هرم‌های ماسه‌ای بزرگی وجود دارند که از ترکیب اشکال سیف و بارخان با رژیم چندجهته حاصل می‌شوند. این اشکال در منطقه کایدام به علت محصورشدن در بین دو تیغه کوهستانی مشاهده نمی‌شود. در لوت از کلاس ۱ یا منطقه نسبتاً یکنواخت دماغه شیب به تدریج کاسته و به تدریج با پیچیده‌شدن ناهمواری‌ها بر وسعت تیغه‌های گردنه‌ای افزوده می‌شود. در منطقه کایدام نیز رشد تیغه گردنه‌ای را از ابتدا به انتهای ارگ می‌توان در نقشه کلی تشخیص داد.



شکل ۷. مقایسه نمای نزدیک کلاس‌های مورفومتریک تپه‌های ماسه‌ای منطقه کایدام چین (راست) و لوت (چپ)

#### ۵. نتیجه‌گیری نهایی

لوت ایران پهنه‌ها به طور متناسبی بین دو عنصر اصلی این مناطق یعنی کریدور و یاردانگ تقسیم شده‌اند، اما درصد پهنه‌ها در منطقه کایدام بسیار متفاوت است. انحنا و شیب به چین و شکن کوهزایی در منطقه کایدام و یک‌جبهه نبودن یاردانگ‌ها در کل منطقه موجب شده است که در این منطقه عنصر جهت شیب در تمایز برخی از کلاس‌ها مؤثر واقع شود. این مسئله به هیچ وجه در خصوص منطقه لوت با بستری از رسوبات دریاچه‌ای و بادهای یک‌جبهه صدق نمی‌کند. کلاس دره گردنه‌ای در منطقه کایدام با توجه به اهمیتش در شکل والی یاردانگ‌ها به دو پهنه کم‌شیب و پرشیب تقسیم شده است. در کل یاردانگ‌های منطقه لوت به نسبت بسیار جزئیات قابل تشخیص‌تری دارند. نقشه‌های مورفومتریک نهایی تپه‌های ماسه‌ای در دو منطقه به‌رغم تشابه زیادی که در اجزای هر کلاس، تعداد و ویژگی‌های کلاس‌های مشابه دارند، اما روند تکاملی ارگ در منطقه لوت به خوبی قابل تشخیص است حال آنکه در منطقه کایدام به علت میزان کمتر منبع ماسه و یک‌جبهه شدن بادها به علت دو تیغه موازی در دو طرف آن، بلوغ و تغییر محسوسی از ابتدا تا انتهای ارگ دیده نمی‌شود. با وجود این، آنچه بیشتر در مقایسه و بررسی این

دشت لوت ایران و کایدام چین با عوارض ریخت‌شناسی ویژه همواره کانون توجه بسیاری از زمین‌شناسان جهان بوده است. در این تحقیق پهنه‌بندی ژئومورفومتریک زمین‌دیس‌های بزرگ نظیر یاردانگ‌ها و تپه‌های ماسه‌ای با استفاده از چهار پارامتر مورفومتریک شامل شیب، کمینه و بیشینه انحنا و انحنا و مقطع عرضی مستخرج از داده‌های رقومی ارتفاع SRTM با دقت ۹۰ صورت گرفت. الگوریتم شبکه‌های خودسازمانده به‌منزله روش نیمه‌اتوماتیک در دو منطقه کویر لوت ایران و کایدام چین به کار گرفته شد تا کلاس‌های مورفومتریک با تأکید بر کلاس‌های زمین‌دیس استخراج شوند. شبکه خودسازمانده به کاهش چندبعدی داده‌ها به یک لایه خروجی شامل هشت واحد نقشه منجر شد. این واحدهای نقشه بر اساس خصوصیات مورفومتریک و شیب طبقه‌بندی شدند. نتایج در مناطق یاردانگ و تپه‌ماسه‌ای هر دو منطقه به طور جداگانه شکل گرفت و نشان داد که یاردانگ‌های این دو منطقه از نظر لندفرم‌ها و میزان تخصیص پهنه‌ها تفاوت‌های زیادی با یکدیگر دارند. مهم‌ترین دلایل این تفاوت‌ها متفاوت بودن جنس و موقعیت بستر یاردانگ‌ها بوده است. در منطقه

مقیاس‌ها و رزولوشن‌های متفاوت داده‌ها در مناطق مختلف بسیار کارآمد است.

### تشکر

این مقاله مستخرج از طرح‌های پژوهشی به شماره ۷۳۱۴۹۳۱۰/۱/۰۴ و ۷۳۱۴۹۳۱۰/۱/۰۶ اعتبارات پژوهشی دانشگاه تهران انجام شده است که بدین وسیله از حمایت‌های صورت گرفته قدردانی می‌شود.

### یادداشت‌ها

1. Liagns
2. Draas
3. Sand Sea
4. Kum
5. Peski

دو منطقه به چشم می‌خورد درصد بسیار بالای کلاس‌شانه در منطقه کایدام و میزان کمتر منطقه برخاست به دلایل گفته شده بود. یک‌جهته شدن بادها در مناطق تپه‌ماسه‌ای سبب افت شدید تیغه گردنه‌ای و دماغه شیب در منطقه می‌شود و هرم‌ها و توده‌های ماسه‌ای عظیمی در منطقه نخواهیم داشت. همچنین، این مطالعه پتانسیل بالای روش پیشنهادی بر اساس استخراج اطلاعات مربوط به عوارض زمین را نشان داد که می‌تواند در مدل‌های ژئواکوسیستمی و ژئومورفولوژیکی کاربرد داشته باشد. این روش نیاز به مطالعات صحرائی را به میزان زیادی کاهش می‌دهد و می‌تواند به‌منزله روش جایگزین برای روش‌های زمان‌بر سنتی و دستی باشد. نتایج حاصل نشان داد که شبکه خودسازمانده به‌منزله الگوریتم نظارت‌نشده شبکه‌های عصبی مصنوعی برای آنالیز عوارض ژئومورفومتریکی با

### منابع

درویش‌زاده، ع. ۱۳۷۰. زمین‌شناسی ایران، انتشارات امیرکبیر، تهران.

Bagnold, R.A. 1941. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. Methuen, London.

Cooke, R., Warren, A., & Goudie, A. S. 1993. Desert geomorphology. London: UCL Press.

Davies, D.L. and Bouldin, D.W. 1979. A cluster separation measure. IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intelligence, 1, 224–227.

Ehsani, A. H., Alavi panah, S. K. 2002. Study and evaluation of ETM+ bands for differentiating spectral units of marginal playa, Technical and Scientific surveying Journal, Vol 7, Issue 53, pp 5-10.

Ehsani, A. H., & 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.

Ehsani, A.H., and Quiel, F. 2008. Geomorphometric feature analysis using morphometric parameterization and artificial neural networks, "Geomorphology", Vol 99, Issues 1-4, Pages 1-12.

Ehsani, A. H., and Quiel, F. 2008. Application of Self Organizing Maps and SRTM data to Characterize Yardangs in the Lut Desert, Iran, Manuscript accepted by the journal "Remote Sensing of Environment", Vol 112, Issue 7, Pages 3284-3294.

Ehsani, A. H., and Quiel, F. 2009. A semi-automatic method for analysis of landscape elements using shuttle radar topography mission and Landsat ETM+ data. "Computers & Geosciences", Vol 35, Issues 2, Pages 373-389.

Ehsani, A. H., and Quiel, F. 2009. Self Organizing Maps for Multi-Scale Morphometric Feature Identification Using Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Data. "Geocarto International", Volume 24, Issue 5, Pages 335 – 355.



- Ehsani, A. H., and Quiel, F. 2010. Effect of SRTM Resolution on Morphometric Feature Identification Using Neural Network -Self Organizing Map, "Geoinformatica".
- Foorotan, M., Kompanizare, M., Ehsani, A.H. 2011. Semi-Automatic Morphometric Land Surface Segmentation of an Arid Mountainous Area by Using DEM and Self Organizing Maps (SOM) Method, "Geoinformation for disaster management 2011", 3-8 May 2011, Antalya, Turkey.
- Goudie, A. and Middleton, N. 2006. Desert Dust in the Global System. Springer, 287 pp.
- Hedin, S. 1903. Central Asia and Tibet. New York: Charles Scribner and Sons.
- Hugget, R.J. 2007. Fundamentals of geomorphology. Second edition. Taylor and Francis group. Routledge Fundamentals of Physical Geography.
- Huggett, R.J. 2003. Fundamentals of Geomorphology. Routledge, 386 pp.
- Kohonen, T. 2001. *Self Organizing Maps*, 3rd Ed. Springer, New York.
- Mildrexler, D. J., Zhao, M., & Running, S. W. 2006. Where are the hottest spots on earth? Eos, transactions. American Geophysical Union, 87, 461.
- Sun, J., Zhang, M., and Liu, T. 2001. Spatial and temporal characteristics of dust storms in China and its surrounding regions, 1960–1999: Relations to source area and climate: Journal of Geophysical Research, v. 106, p. 10,325–10,333.
- Tapponnier, P., Xu, Z., Roger, F., Meyer, B., Arnaud, N., Wittlinger, G., and Yang, J. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau: Science, v. 294, p. 1671–1677.
- Wood, J., 1996a. *The Geomorphological Characterization of Digital Elevation Models*. Ph.D. Thesis, Department of Geography, University of Leicester, UK.