

## ژئومورفومتری مگایاردانگ‌های لوت

امیر هوشنگ احسانی\* - استادیار مرکز تحقیقات بین‌المللی بیابان، دانشگاه تهران

پذیرش مقاله: ۱۳۸۸/۵/۲۰ تأیید مقاله: ۱۳۸۹/۹/۲۹

### چکیده

یاردانگ‌ها لندفرم‌های منحصر به فردی در مناطق خشک دنیا (و احتمالاً در زهره و کره مریخ) هستند که امروزه با پیشرفت فناوری دورسنجی و دسترسی به تصاویر ماهواره‌ای با دقت بسیار بالا، امکان استخراج اطلاعات از آنها فراهم آمده است. اطلاعات ماهواره‌ای موجود نشان می‌دهند که مگایاردانگ‌ها در آسیای مرکزی (چین)، بیابان لوت در ایران، شمال عربستان سعودی، بیابان نامیبیا، بیابان لیبی در مصر، صحرای مرکزی، بیابان‌های پرو و شیلی و آرژانتین وجود دارند. در سال ۲۰۰۳ وزارت ملی هوا و فضای آمریکا داده‌های رادار SRTM با دقت ۹۰ متر را برای تقریباً ۸۰ درصد کره زمین ارائه کرد. آنالیز توپوگرافی به واحدهای همگن اراضی نقش بسیار مهمی در ارائه اطلاعات پایه برای برنامه‌ریزی ایفا می‌کند. در ژئومورفومتری - روش اندازه‌گیری کمی و کیفی توپوگرافی - پارامترهای مورفومتریک نظیر شیب، منحنی حداکثر، منحنی حداقل یا منحنی مقطع عرضی از مدل رقومی ارتفاعی استخراج می‌گردد. در این مقاله پهنه‌بندی یاردانگ‌های لوت از طریق آنالیز مورفومتریک و استخراج پارامترهای نمای اول (شیب) و نمای دوم (مثل منحنی مقطع عرضی، منحنی حداکثر و حداقل) با کمک معادلات درجه دوم دومتغیری بر روی مدل رقومی ارتفاعی مستخرج از داده‌های رادار صورت گرفت. سپس این پارامترها به‌عنوان ورودی شبکه عصبی مصنوعی - الگوریتم شبکه خودسازمانده مورد استفاده قرار گرفتند و با بهره‌گیری از پتانسیل این الگوریتم یاردانگ‌های لوت به صورت نیمه‌اتوماتیک و با سرعت و دقت بالا پهنه‌بندی گردید. نتایج آنالیز مورفومتریک بیابان لوت نشان داد که لندفرم یاردانگ و راهروها ۳۴ و ۴۳ و اراضی مسطح با درجات شیب مختلف ۲۳ درصد منطقه را شامل می‌شوند.

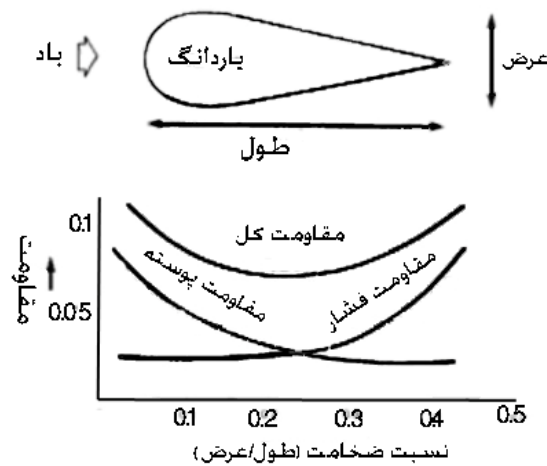
کلیدواژه‌ها: مگایاردانگ، تصاویر ماهواره‌ها، رادار، لوت، شبکه خودسازمانده.

### مقدمه

یاردانگ کلمه‌ای ترکمنی است ("yar" از ریشه زبان ترکستانی به معنی دامنه پرشیب است) که نخستین بار در سال ۱۹۰۳ جهانگردی سوئدی به نام هدین (Hedin, 1903) در سفر به طرف بیابان تاکلامکان واقع در غرب چین، آن را به کار برد؛ و بر طبق گزارش‌های سازمان هوا و فضای آمریکا، در کره مریخ و زهره نیز چنین عوارضی یافت شده‌اند

\* E-mail: ehsani@ut.ac.ir

(Gutiérrez-Elorza et al., 2002, 157; Ward, 1979). یاردانگ‌ها اشکال فرسایشی خطی<sup>۱</sup> هستند که طول آنها به ۱۵۰ کیلومتر و ارتفاعشان گاه به ۷۵ متر می‌رسد. این عوارض جالب که بیشتر در مناطق بسیار خشک و خشک یافت می‌شوند، 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<sup>۲</sup>، انقباض<sup>۳</sup>، بریدگی‌های ناشی از جریان‌های آبی<sup>۴</sup>، شکاف‌های ناشی از خشک و تر شدن رسوبات<sup>۵</sup>، سقوط و ریزش ناگهانی<sup>۶</sup>، هوازگی<sup>۷</sup> و حرکت توده‌ای<sup>۸</sup> (Goudie and Middleton, 2006, 43) اشاره کرد. در نواحی دارای اقلیم فراخشک، باد شدید و بستر مناسب فرسایش باعث ایجاد شیارهایی به صورت آرایه‌های موازی می‌شود، که این راهروها بر اثر افزایش فرسایش بادی آبی گسترش می‌یابند؛ بدین نحو که عامل رطوبت باعث نرمی و سستی سطح می‌گردد و پس از خشکیدگی به سهولت با کوچک‌ترین حرکت باد مواد برداشته می‌شوند و در حفاصل این شیارها تپه‌های موازی و دوکی‌شکل یاردانگ‌ها، هم‌جهت با باد غالب منطقه باقی می‌مانند. حالت دوکی‌شکل یاردانگ‌ها به نحوه عمل فرسایش بادی مربوط می‌شود، به طوری که شیب رو به باد، بیش از قسمت پشت به باد است. طبق نظر وارد و گرلی (Ward and Greeley, 1984, 829) با افزایش نسبی عرض یاردانگ سطح بیشتری از آن در مقابل وزش باد حفاظت می‌گردد و بدین ترتیب مقاومت پوسته‌ای کاهش می‌یابد، در حالی که مقاومت فشار افزایش پیدا می‌کند (شکل ۱). از لحاظ آئروپدینامیکی، زمانی که بین این دو عامل توازن برقرار شود و نسبت عرض: طول یاردانگ ۴:۱ باشد، یاردانگ کمترین مقاومت کل را در برابر باد خواهد داشت.



شکل ۱. نمودار وضعیت آئروپدینامیکی یاردانگ‌ها.  
زمانی مقاومت کل در برابر باد حداقل است که نسبت عرض به طول در حدود ۲۵/۰ باشد.

1. Streamline
2. Wind Abrasion
3. Deflation
4. Fluvial Incision
5. Desiccation Cracks
6. Slumping
7. Weathering
8. Mass Movement

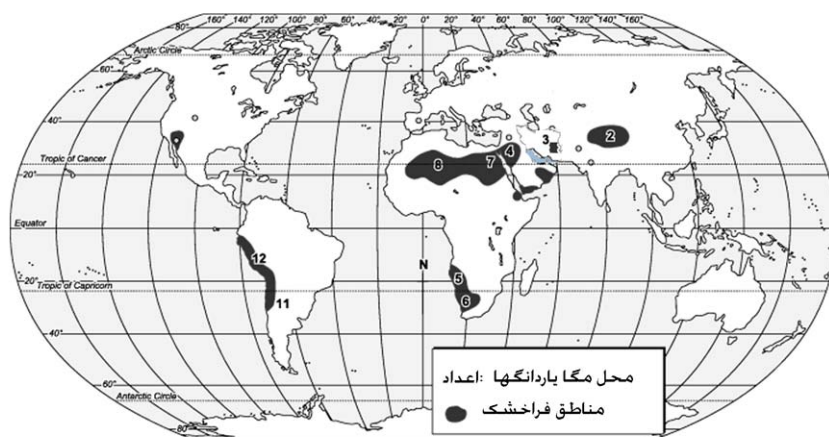
یاردانگ‌ها بسته به ساختار زمین‌شناسی و فرایندهای غالب به اشکال گوناگون نظیر وال شکل<sup>۱</sup>، گوژپشتی<sup>۲</sup>، یال دندان‌اره‌ای<sup>۳</sup>، مخروطی، هرمی و طولی دیده می‌شوند (Huggett, 2003, 298). یاردانگ‌ها را براساس ابعادشان می‌توان به سه گروه میکرو<sup>۴</sup> (دامنه‌هایی به ابعاد چندین سانتی‌متر)، مزو<sup>۵</sup> (ارتفاع و طول چندین متر) و مگا<sup>۶</sup> (ده‌ها متر ارتفاع و چندین کیلومتر طول) طبقه‌بندی کرد (Cooke et al., 1993, 296; Halimov and Fezer, 1989; McCauley et al., 1997). فرم کلاسیک یاردانگ دارای نسبت طول به عرض حدوداً ۱:۴ و شبیه قایق وارونه است، اما این نسبت در مگایاردانگ‌ها نظیر کویر لوت به بیش از ۱:۱۰ می‌رسد (Cooke et al., 1993, 295). مگایاردانگ‌ها در ایران با نام محلی کلوت، به زبان فرانسوی کرتیس<sup>۷</sup> و کلوریز<sup>۸</sup> و در چین لی‌گنز<sup>۹</sup> نامیده می‌شوند (Cooke et al., 1993, 296; Goudie and Middleton, 2006, 44). مگایاردانگ‌ها در نقاط مختلف جهان، با ویژگی‌هایی بارز وجود دارند (شکل ۲). به‌عنوان مثال، در منطقه لوب نور<sup>۱۰</sup> واقع در حوضه تاریم در غرب چین، در بستر دریاچه قدیمی و رسوبات آبرفتی توسعه یافته‌اند (Goudie, 2003, 1120). در قسمت شرق این منطقه در درون هوانگ که در زمان حاضر پارک ملی چین است نیز یاردانگ‌ها مشاهده می‌شوند. اما قسمت عمده مگایاردانگ‌های آسیای میانه در جنوب شرقی این منطقه و شمال شرق فلات تبت در حوضه خشک کایدام<sup>۱۱</sup> چین با مختصات مرکزی (38°14', 93°N, 18°E) وجود دارند. مگایاردانگ‌ها در شمال عربستان بر روی ماسه‌سنگ‌های کامبرین و سایر بسترها به‌خوبی توسعه یافته‌اند. ارتفاع این مگایاردانگ‌ها به بیش از ۴۰ متر و طول آنها به صدها متر می‌رسد.

در نامیبیای جنوبی بین پهنه‌های ماسه‌ای نامیب و رودخانه اورنج، منطقه فراخشک وجود دارد که در آن مگایاردانگ‌ها در سنگ‌های دگرگونی و بلوری دیرینه با ساختارهای پیچیده توسعه یافته‌اند. جهت این مگایاردانگ‌ها جنوب، جنوب شرقی - شمال، شمال غربی است که هم‌جهت با تپه بارخان‌های منفرد در منطقه است. این جهت، افزون بر آن منطبق بر جهت غالب انتقال سالیانه شن‌های خلیج آلکساندر واقع در قسمت جنوبی منطقه نیز هست (Corbett, 1993, 50; Lancaster, 1995, 150). در سراسر نامیبیا حداقل سه منطقه بزرگ دیگر، علاوه بر مناطق ذکر شده وجود دارد که می‌توان در آنها مگایاردانگ‌ها را مشاهده کرد: ۱- منطقه لودریتز<sup>۱۲</sup> واقع در جنوب صحرای نامیب (26°59' - 27°18'S, 15°19' - 15°25'E) و ۲- منطقه شرق پومونا<sup>۱۳</sup> (26°36' - 26°54'S, 15°10' - 15°14'E)

1. Wale Shape
2. Hogback
3. Weathering
4. Micro
5. Meso
6. Mega
7. Cretes
8. Couloris
9. Liagns
10. Lop Nur
11. Qaidam
12. Luderitz
13. Pomona

۳- منطقه ساحلی نزدیک خلیج چامایز<sup>۱</sup> ( $27^{\circ}56' - 28^{\circ}04'S$ ,  $15^{\circ}41' - 15^{\circ}43'E$ ). در مصر یاردانگ‌ها به‌طور گسترده‌ای بر روی رسوبات آبرفتی پلایا و یا فلات آهکی خصوصاً در منطقه الخرقه<sup>۲</sup> توسعه یافته‌اند. شکل این یاردانگ‌ها بسته به لیتولوژی از شمال به جنوب متفاوت است و بر روی سنگ آهک و رسوبات گچی پالئوسن - ائوسن در اطراف منطقه الخرقه توسعه یافته‌اند. در امریکای جنوبی بیابان‌های کشور پرو، همانند بیابان لوت در ایران، دارای فرم کلاسیکی از مگایاردانگ‌ها هستند. اگرچه در برخی از مناطق شمالی پرو این عارضه یافت می‌شود، ولی جالب‌ترین آنها در منطقه پاراکاس ایکا ولی<sup>۳</sup> واقع در مرکز پرو وجود دارد. این محل جزو یکی از مناطق فراخشک دنیا با میانگین سالیانه بارندگی  $0/3$  میلی‌متر است، ولی اندازه مگایاردانگ‌ها در آن کوچک‌تر از بیابان لوت در ایران است (Middleton, 2006).

این مقاله با استفاده از پارامترهای مورفومتریک مستخرج از داده‌های رادار، یاردانگ‌های لوت را مورد بررسی قرار می‌دهد و به فاکتورهایی که این گستردگی را موجب شده‌اند می‌پردازد.



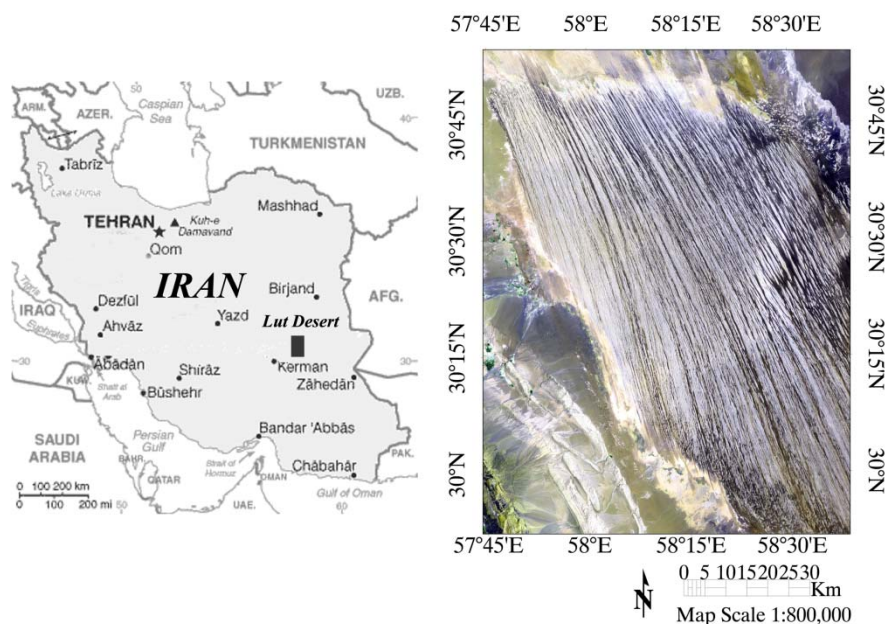
شکل ۲. محل تقریبی مگایاردانگ‌های مورد مطالعه در جهان

## موقعیت جغرافیایی یاردانگ‌های لوت

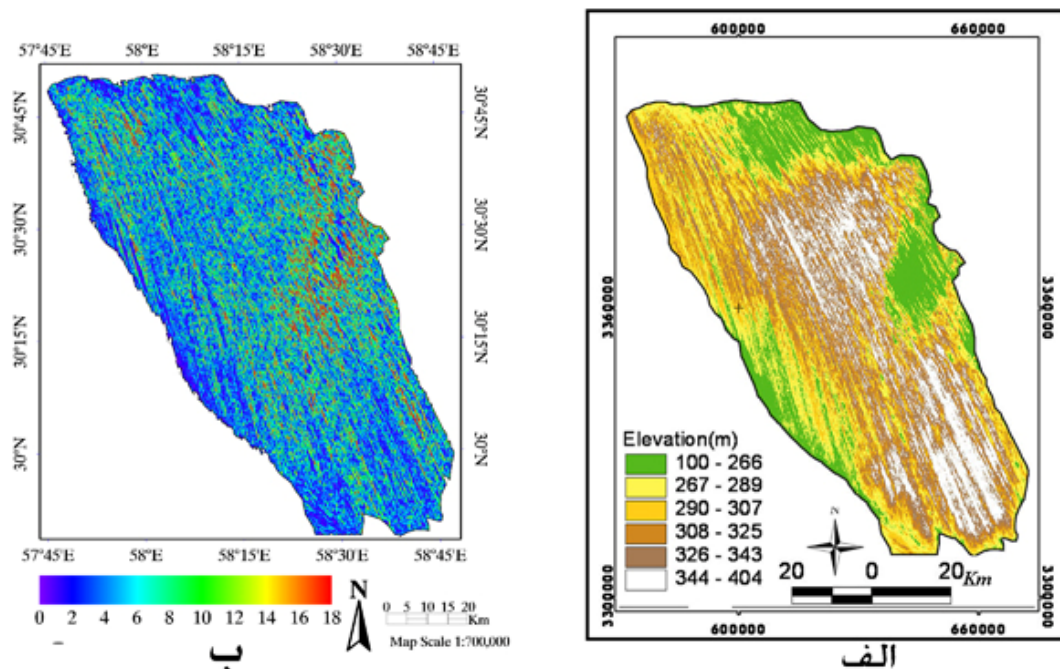
در داخل ایران چاله‌ها و حوزه‌های آبخیز بسته بزرگ و کوچک فراوانی وجود دارند که حوزه آبخیز لوت از حوزه‌های بسته است که از نظر وسعت دومین آنها به‌شمار می‌آید و به‌وسیله ناهمواری‌هایی با ارتفاع کمتر از هزار متر از حوزه آبخیز دشت کویر (بزرگ‌ترین حوزه آبخیز داخلی ایران) جدا می‌گردد. حوزه آبخیز لوت بخش‌هایی از استان‌های خراسان، سیستان و بلوچستان و کرمان را در جنوب شرقی ایران در بر می‌گیرد. دشت لوت واقع در جنوب شرق ایران به‌عنوان قطب حرارتی دنیا شناخته شده است و بر مبنای گزارش منتشر شده انجمن ژئوفیزیک امریکا، تا کنون ۲ بار در سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۰۶ بالاترین درجه حرارت را ( $70/7^{\circ}C$  و  $68/0^{\circ}C$ ) بر روی کره زمین به ثبت رسانده است

1. Chamais
2. Al Kharga
3. Paracas-Ica Valley

(Mildrexler et al., 2006, 461). شرق لوت شامل تپه‌های ماسه‌ای است، در حالیکه غرب آن را مگایاردانگ‌های بسیار زیبا و بی‌نظیری به وسعت ۶۴۸۱ کیلومتر مربع پوشانده‌اند (شکل ۳). این یاردانگ‌ها (به زبان بلوچی کلوت نامیده می‌شود) دارای جهت شمال غربی - جنوب شرقی، و منطبق بر بادهای ۱۲۰ روزه سیستان هستند و بر روی رسوبات رسی - سیلتی پلیستوسن (تشکیلات لوت) با ضخامت تقریبی ۲۰۰-۱۳۵ متر قرار گرفته‌اند (Berberian et al., 2001, 372; Krinsley, 1970). طول و عرض یاردانگ‌های لوت براساس اختلاف مختصات جغرافیایی به ترتیب برابر ۱۲۷ و ۱۱۰ کیلومتر است، ولی با توجه به شکل گستره یاردانگ‌های لوت (حدوداً متوازی‌الاضلاع)، می‌توان متوسط طول ۱۳۰ متر و متوسط عرض ۸۰ کیلومتر را برای وسعت آنها در نظر گرفت (مشهدی و همکاران، ۱۳۸۱، ۴۰). براساس نقشه رقومی ارتفاعی مستخرج از داده‌های رادار پایین‌ترین ارتفاع از سطح دریا در یاردانگ‌های لوت ۱۰۰ متر است که به چاله‌ای در شرق مربوط می‌شود و بلندترین ارتفاع از سطح دریا ۴۰۴ متر است که با قله پشته‌ای در جنوب شرق آن ارتباط می‌یابد (شکل ۴-الف). شیب منطقه از ۰ تا ۱۹ درجه متغیر است (شکل ۴-ب). میانگین سالانه سرعت وزش باد ۶ متر بر ثانیه است و قوی‌ترین بادهای (باد ۱۲۰ روزه سیستان) از ماه اردیبهشت با میانگین سرعت ۹/۳۵ متر بر ثانیه شروع به وزش می‌کنند (Ehsani and Quiel, 2008, 3286) و تحت تأثیر توأمان فرسایش آبی - بادی و عوامل دیگری چون شیب، وضعیت زمین‌ساخت، و ساختار سنگ‌شناسی گسترش یافته‌اند (احمدی، ۱۳۷۸، ۱۱۵). این مگایاردانگ‌ها از طریق راهروهایی از یکدیگر جدا شده‌اند، که در واقع پیامد لایروبی آب و باد است. سطح راهروها را کفه‌های رسی سیلتی، ماسه درشت‌دانه، ریپل مارک‌ها و یا تپه‌های ماسه‌ای، بسته به درجه تکامل، پوشش داده است (مشهدی و همکاران، ۱۳۸۱، ۴۰).



شکل ۳. موقعیت حوضه مورد مطالعه و زیرحوضه‌های اصلی آن. تصویر ماهواره لندست ۷ با ترکیب باندهای قرمز: ۷، آبی: ۵ و سبز: ۲ با قدرت تفکیک ۳۰ متر به تاریخ سوم ماه اوت ۲۰۰۱ از مگایاردانگ‌های کویر لوت که از شمال غرب به جنوب شرق و بر روی تشکیلات پلیستوسن امتداد یافته‌اند.



شکل ۴- الف. نقشه وضعیت ارتفاعی یاردانگ‌های لوت (ب) نقشه شیب که از داده‌های رادار SRTM استخراج شده است

### مواد و روش‌ها

در فوریه سال ۲۰۰۰ داده‌های شاتل رادار Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) مدل رقومی ارتفاعی یکنواختی را برای ۸۰ درصد سطح زمین، یعنی مناطق بین عرض جغرافیایی ۶۰ درجه شمالی تا ۵۶ درجه جنوبی، جمع‌آوری کرد. در سال ۲۰۰۳ وزارت ملی فضا و هوانوردی آمریکا (NASA) داده‌های رادار SRTM/SIR-C band با گرید سایز ۳ آرک ثانیه (رزولوشن معادل ۹۰ متر) را برای تقریباً ۸۰ درصد کره زمین ارائه کرد. در مطالعه مگیاردانگ‌های لوت در ایران، داده‌های رادار اس - آر - تی ام نسخه سه با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر از سازمان نقشه‌برداری تهیه گردید و بعد از پردازش‌های اولیه به سیستم تصویر UTM تبدیل شد. در مورفومتری (اصطلاح عام ژئومورفومتری) - روش اندازه‌گیری کمی و کیفی توپوگرافی - پارامترهای مورفومتریک نظیر منحنی پروفیل، منحنی حداکثر، منحنی حداقل یا منحنی طولی محاسبه و استخراج می‌شوند. این پارامترها به منظور استخراج عوارض مورفومتریک نظیر مناطق مسطح (Planar)، کانال (Channel) یا کریدورها (راهروهای بین یاردانگ‌ها) و یاردانگ‌ها (Ridge) مورد استفاده قرار می‌گیرند. عوارض مورفومتریک را می‌توان براساس قوانین موجود بین پارامترها استخراج و تعریف کرد. بر همین اساس، Wood (1996) شاخص‌هایی را بیان کرد که در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. برمبنای این شاخص‌ها تمام عوارض نقطه‌ای (نظیر قله = Peak، گودال = Pit و گردنه‌ها = Pass) در مکان‌های دارای شیب محلی صفر پدیدار می‌گردند؛ و به همین خاطر شاخص منحنی مقطع عرضی برای این گونه عوارض محاسبه‌شدنی نیست (چرا که وجه شیب نامعین است) و بنابراین می‌بایست دو پارامتر منحنی حداکثر و حداقل مورد استفاده قرار گیرد. در این حالت هر دو مقدار حداکثر و حداقل منحنی برای قله‌ها مثبت و برای گودال‌ها منفی است.

در مورد یاردانگ‌ها مقدار حداکثر منحنی مثبت و حداقل منحنی صفر است. این وضعیت در مورد راهروها یا کریدورها برعکس است. برای مکان‌های شبیدار، دامنه‌ها یا یاردانگ‌ها دارای مقادیر مثبت، و کریدورها دارای مقادیر منفی و دشت‌ها دارای مقادیر نزدیک به صفر برای شاخص منحنی مقطع عرضی‌اند. با استفاده از داده رادار تهیه شده، پارامترهای مورفومتریکی نمای اول (شیب) و نمای دوم (منحنی مقطع عرضی، منحنی حداکثر و حداقل) با کمک معادلات درجه دوم دومتغیری استخراج گردیدند. سپس این پارامترها به‌عنوان ورودی الگوریتم غیرنظارتی شبکه‌های عصبی مصنوعی - شبکه خودسازمانده<sup>۱</sup> (SOM) مورد استفاده قرار گرفتند. شبکه خودسازمانده (SOM) در اوایل دهه ۱۹۸۰ به‌وسیله تئوکوهون ابداع شد. این شبکه که از نوع نظارت‌نشده رقابتی است، تا حد زیادی به ساختار ذخیره اطلاعات در کورتکس مغز شباهت دارد. این شبکه دارای ۲ لایه ورودی و خروجی است و در آن تمام نرون‌های لایه ورودی به لایه خروجی متصل شده‌اند. این شبکه قادر است که داده‌های ورودی با ابعاد زیاد را با حفظ ساختار توپولوژی به صورت نگاشت دوبعدی درآورد. این ویژگی مهم به‌همراه سایر ویژگی‌هایی چون انعطاف‌پذیری، توانایی یادگیری از داده‌های دارای ساختار پیچیده و چندبعدی، این الگوریتم را جایگزین بسیار مناسبی برای سایر روش‌های خوشه‌بندی و طبقه‌بندی کرده است.

آموزش شبکه خودسازمانده به‌وسیله نمونه‌هایی از فضای ورودی مشتمل بر چهار پارامتر مورفومتریکی و خروجی شامل ۱۰ نرون صورت پذیرفت. در ابتدای آموزش نرون‌ها در شبکه به‌صورت تصادفی قرار دارند، در حالی که بعد از آموزش واحدهای نقشه به‌صورتی در فضای ورودی پراکنده می‌شوند که قادر به تشخیص بهترین تطابق برای نمونه‌های جدید باشند. به‌منظور بهینه کردن شبکه خودسازمانده، مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در شبکه همچون تعداد دوره‌های آموزش، شعاع اولیه و شعاع نهایی همسایگی در قالب ۴۲ شبکه مورد آزمون قرار گرفتند. خطای کوانتیزه شده هر شبکه محاسبه گردید و در نهایت شبکه بهینه با کمترین خطا انتخاب و به‌کار گرفته شد.

جدول ۱. شاخص‌های استخراج عوارض مورفومتریکی

عوارض مورفومتریکی	شیب (o)	منحنی مقطع عرضی (I/m)	منحنی حداکثر (I/m)	منحنی حداقل (I/m)
یاردانگ	0	uv	+va	0
	+va	+va	*	*
سطوح دشتی یا مسطح	0	uv	0	0
	+va	0	*	*
دره یا راهرو	0	uv	0	-va
	+va	-va	*	*

برگرفته از Wood (1996)

uv: مقادیر تعریف نشده

o: جزء معیارهای انتخابی نیست.

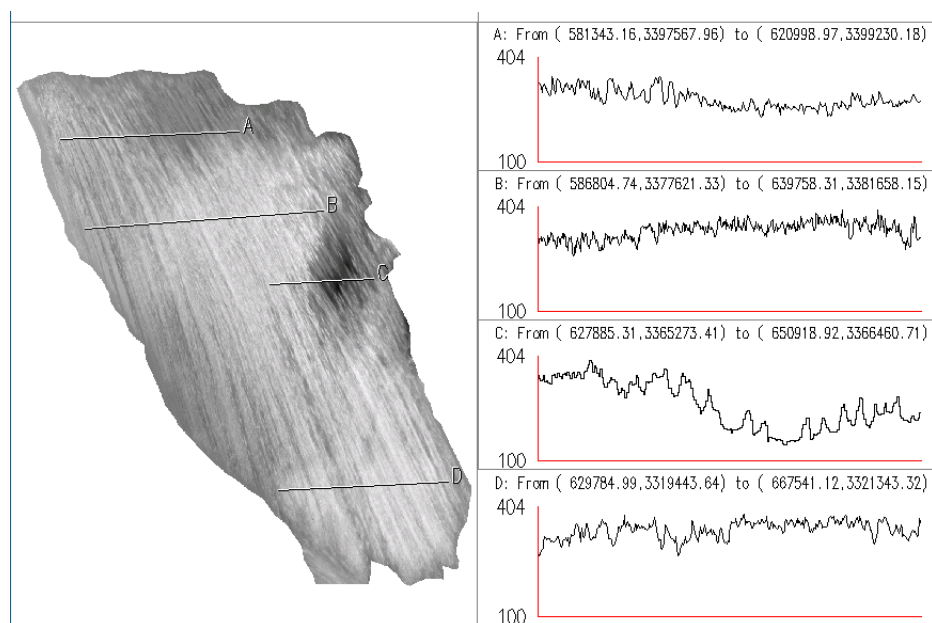
va: مقادیر پارامترها

نتایج الگوریتم با آنالیز نمودار دوبعدی و با بهره‌گیری از جدول ۱ به کلاس‌هایی نظیر یاردانگ، راهرو و اراضی مسطح با درجات شیب مختلف پهنه‌بندی گردیدند. در این مطالعه همچنین از داده‌های ماهواره Quick Bird با قدرت تفکیک ۲/۴ متر، لندست ۷ با قدرت تفکیک ۳۰ متر و تکنیک‌های پردازش چشمی و مطالعه منابع موجود به‌منظور مطالعه پراکندگی یاردانگ‌های سایر مناطق جهان استفاده گردید.

## یافته‌های تحقیق

### پهنه‌بندی مگایاردانگ‌های لوت - ایران

مدل رقومی ارتفاعی به‌دست آمده نشان داد که مساحت کل منطقه لوت شامل یاردانگ‌ها ۶۴۸۱۵۹/۵ هکتار است. براساس نقشه شیب به‌دست آمده، شیب کلی منطقه بین صفر تا ۱۸/۵۶ درجه متغیر است که ۹۹ درصد منطقه شیب زیر ۱۰ درجه دارد و ۵۰ درصد منطقه دارای شیب کمتر از ۲/۳۳ درجه است. یک درصد منطقه دارای شیب صفر درجه است که عمدتاً شامل راهروهاست و ۱۵ درصد منطقه هم دارای شیب بین ۰ و ۱ درجه است. مناطق دارای شیب زیاد نیز عمدتاً در نزدیکی چاله شرقی و شمال غرب منطقه واقع شده‌اند. آنالیز نیمرخ عرضی بر روی مدل رقومی ارتفاعی (شکل ۵)، نشان داد که پایین‌ترین ارتفاع از سطح دریا در یاردانگ‌های لوت که بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ متر است، مربوط به بریدگی و چاله‌ای در شرق (با مساحتی ۰/۷۹۸۳ درصد معادل ۵۱۷۴ هکتار از منطقه مطالعاتی)؛ و بلندترین ارتفاع از سطح دریا ۴۰۴ متر است که به ۳ قله پشته در نزدیکی چاله شرقی مربوط می‌شود. لازم به ذکر است که ۵۶/۵۳ درصد (معادل ۳۶۶۴۲۷ هکتار) منطقه مطالعاتی دارای یاردانگ‌هایی با ارتفاع بین ۳۰۰ تا ۴۰۴ متر هستند که عمدتاً در قسمت‌های مرکزی و جنوبی قرار دارند.



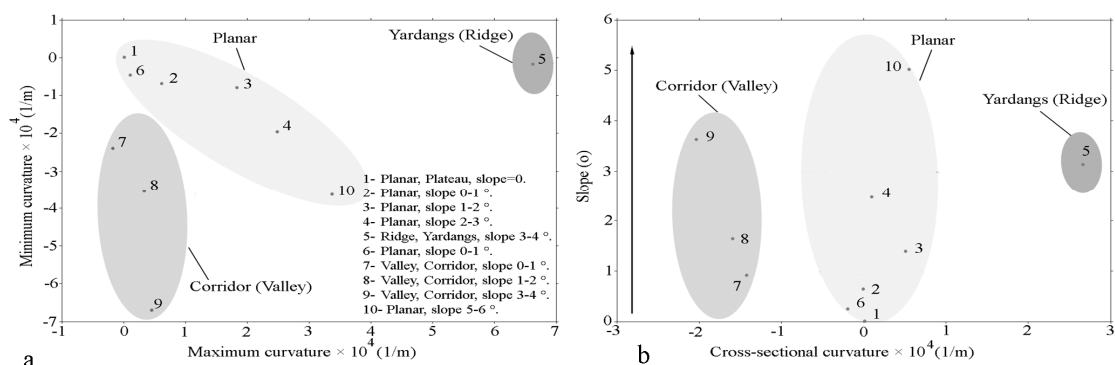
شکل ۵. نواحی متأثر از انواع جریان‌های پروفیل مقطع عرضی از یاردانگ‌ها و راهروها. منطقه B دارای بالاترین ارتفاع و منطقه C چاله‌ای با کمترین ارتفاع است. عمده یاردانگ‌ها دارای ارتفاعی بین ۳۰۰ تا ۴۰۴ متر هستند که در مناطق D و B قرار دارند.



همان‌گونه که قبلاً هم ذکر گردید، پارامترهای شیب، منحنی مقطع عرضی، و منحنی حداکثر و منحنی حداقل به‌عنوان ورودی شبکه خودسازمانده (SOM) برای تفکیک و طبقه‌بندی یاردانگ‌های دشت لوت مورد استفاده قرار گرفتند. آموزش شبکه خودسازمانده به‌وسیله نمونه‌هایی از فضای ورودی مشتمل بر چهار پارامتر مورفومتریک و خروجی شامل ۱۰ نرون صورت پذیرفت. در ابتدای آموزش، نرون‌ها در شبکه به‌صورت تصادفی قرار دارند، در حالی‌که بعد از آموزش واحدهای نقشه به‌صورتی در فضای ورودی پراکنده می‌شوند که بتوانند بهترین تطابق را برای نمونه‌های جدید تشخیص دهند. به‌منظور بهینه‌کردن شبکه خودسازمانده، مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در شبکه - نظیر تعداد دورهای آموزش، شعاع اولیه و شعاع نهایی همسایگی - در قالب ۴۲ شبکه مورد آزمون قرار گرفت.

خطای کوانتیزه شده هر شبکه محاسبه گردید و در نهایت شبکه بهینه با کمترین خطا انتخاب و به‌کار گرفته شد. در این آزمون چنین در نظر گرفته شد که شعاع اولیه مقادیر ۳/۲ و ۱ است و شعاع نهایی از ۳ شروع می‌شود و به ۰/۱ ختم می‌گردد. نتایج آزمون نشان داد که شبکه دارای شعاع همسایگی اولیه ۱ و شعاع همسایگی نهایی ۳ بیشترین خطا را دارند. به‌طور کلی با افزایش تعداد دور آموزش، شبکه فرصت بیشتری برای بهینه شدن خواهد داشت. شبکه بهینه دارای شعاع همسایگی اولیه ۳، شعاع نهایی همسایگی ۰/۱ و ۱۰۰۰ دور آموزش دارای کمترین خطای بهینه ۰/۱۰۴۰ بود که به‌عنوان شبکه نهایی برای طبقه‌بندی عوارض دشت لوت به‌کار گرفته شد. بعد از انتخاب شبکه بهینه و اجرای آن، پارامترهای ورودی به ۱۰ کلاس - که بیانگر عوارض لوت بودند - طبقه‌بندی گردید. عوارض عمده منطقه (دشت، یاردانگ و راهروها) با توجه به نمودار دوبعدی شامل منحنی حداقل و منحنی حداکثر (شکل ۶a) تفسیر گردیدند. در این نمودار راهروها دارای مقادیر منفی برای منحنی حداقل و صفر (و یا نزدیک به صفر) برای منحنی حداکثر هستند. این در حالی است که یاردانگ‌ها دارای مقادیر مثبت برای منحنی حداکثر و صفر (و یا نزدیک به صفر) برای منحنی حداقل هستند. دشت‌ها نیز در هر دو مورد مقادیر بسیار کم داشتند.

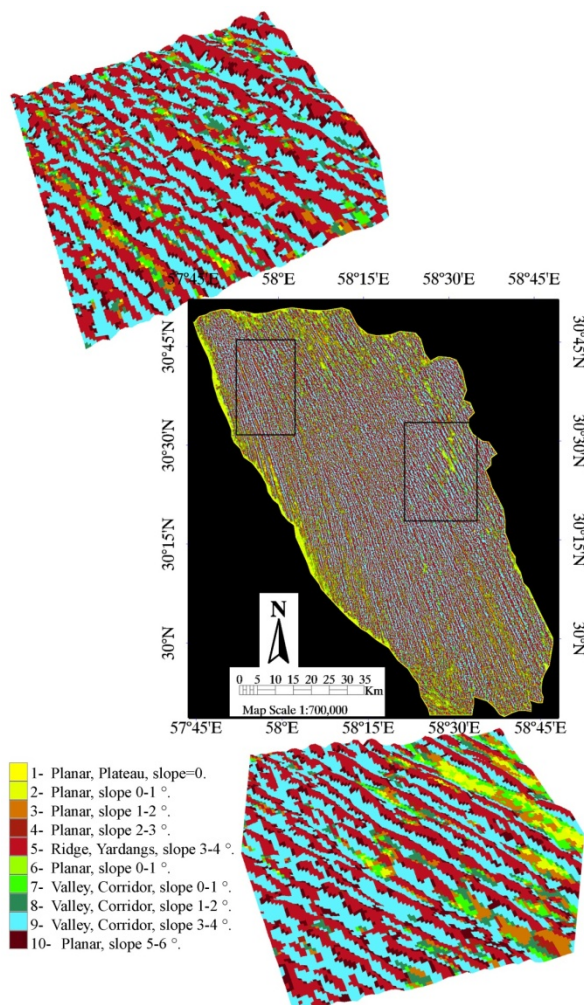
نتایج مشابه از روی نمودار دوبعدی منحنی مقطع عرضی و شیب به‌دست می‌آید (شکل ۶b). اضافه کردن شیب منجر به تفکیک کلاس‌های مشابه براساس درجات شیب گردید. به‌عنوان مثال کلاس‌های دارای مقادیر منفی برای پارامتر منحنی مقطع عرضی (۷/۸ و ۹) به‌عنوان کلاس راهرو با میانگین شیب‌های مختلف تفسیر گردیدند. در این نمودار سطوح شیب‌دار با مقادیر مثبت برای منحنی مقطع عرضی به‌عنوان کلاس یاردانگ (کلاس ۵) طبقه‌بندی گردیدند. مشخصات مورفومتری این عارضه‌ها در جدول ۲ ذکر شده است.



شکل ۶. پراکنش عوارض مورفومتریک بر روی نمودار دوبعدی (a) منحنی حداکثر - حداقل (b) منحنی مقطع عرضی - شیب

جدول ۲. مشخصات مورفومتری عوارض لوت

مشخصات مورفومتری لوت			عوارض مورفومتری	کلاس
منحنی حداکثر (متر/۱)	منحنی حداقل (متر/۱)	منحنی مقطع عرضی (متر/۱)		
0.014	0.004	0.010	دشت با شیب ۰	1
0.626	-0.674	-0.015	دشت با شیب ۰-۱	2
1.838	-0.800	0.500	دشت با شیب ۱-۲	3
2.488	-1.952	0.095	دشت با شیب ۲-۳	4
6.616	-0.156	2.655	یاردانگ با شیب ۳-۴	5
0.110	-0.474	-0.191	دشت با شیب ۰-۱	6
-0.172	-2.404	-1.423	راهرو ها با شیب ۰-۱	7
0.332	-3.536	-1.599	راهرو ها با شیب ۱-۲	8
0.456	-6.689	-2.033	راهرو ها با شیب ۳-۴	9
3.370	-3.652	0.543	دشت با شیب ۵-۶	10



شکل ۷. نقشه عوارض مورفومتری دشت لوت با الگوریتم خودسازمانده به همراه دو تصویر سه بعدی بزرگ‌نمایی شده. در این تصویر یاردانگ‌ها با رنگ قهوه‌ای تیره، و دالان‌های بین آنها با رنگ آبی فیروزه‌ای نشان داده شده‌اند.

شکل ۷ نتیجه طبقه‌بندی با الگوریتم خودسازمانده را نشان می‌دهد. در این شکل کلاس یاردانگ با رنگ قرمز و راهروهای بین آنها با رنگ آبی فیروزه‌ای نشان داده شده است. دو تصویر بزرگنمایی شده مربوط به شمال غرب و شرق منطقه به صورت سه‌بعدی نشان داده شده است. آنالیز نتایج با توجه به تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های توپوگرافی و آنالیز سه‌بعدی، به خوبی بیانگر کارایی روش مذکور در تفکیک و طبقه‌بندی عوارض دشت لوت است.

به‌طور کلی الگوی کلاس‌ها منطبق بر بادهای ۱۲۰ روزه سیستان است و جهت شمال غربی - جنوب شرقی دارد. پنج کلاس (۴، ۳، ۲، ۱ و ۶) مربوط به اراضی مسطح با شیب و ارتفاع کم عمدتاً در شمال و شرق منطقه وجود دارند. سطوح مسطح شیب‌دار (کلاس ۱۰) عمدتاً بین کلاس‌های یاردانگ‌ها و راهروها واقع‌اند، چرا که بیشتر تحت تأثیر عوامل فرسایش قرار دارند. کلاس یاردانگ‌ها (کلاس ۵) به خوبی از بقیه کلاس‌ها تفکیک شده است. این کلاس دارای میانگین شیب ۳ تا ۴ درجه است و به موازات راهروها قرار دارد. شیب از عوامل یا فاکتورهای کنترل‌کننده رژیم بادی بین یاردانگ‌هاست. راهرو نیز در سه کلاس طبقه‌بندی گردیدند که شیب بین ۰ تا ۴ درجه دارند. جدول مورفومتری یک کلاس‌های طبقه‌بندی شده، روند تغییرات مورفومتریکی عوارض را نشان داد. براساس این جدول، یاردانگ‌ها دارای مقادیر مثبت برای منحنی حداکثر و راهروها دارای مقادیر منفی در منحنی حداقل هستند.

### نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که از مجموع ۶۴۸۲ کیلومترمربع مطالعاتی، یاردانگ‌ها ۳۴ درصد، راهروها ۴۳ درصد و اراضی مسطح ۲۳ درصد از منطقه را در بر گرفته‌اند که تطابق بیشتری با نقشه‌های توپوگرافی و مطالعات صورت گرفته دارند. مطالعه مگایاردانگ‌ها در مناطق مختلف جهان همگی مؤید این مطلب است که این عوارض بر روی انواع سنگ‌ها نظیر ماسه‌سنگ (عربستان سعودی، صحرای مرکزی)، رسی - سیلتی (ایران، چین)، سنگ‌های دگرگونی (نامیبیا جنوبی)، سنگ آهک و رسوبات گچی (بیابان‌های غربی مصر و مرکزی)، ایگنیمبریت و لاوای بازالتی (آرژانتین) در مناطق فراخشک و یا خشک (بارندگی سالیانه کمتر از ۵۰ میلی‌متر) شکل می‌گیرند؛ یعنی در جایی که رژیم بادهای به صورت تک‌جهتی و فرسایش آبی و بادی از فرایندهای غالب ژئومورفولوژیکی هستند.

در این قسمت با توجه به علل این پراکندگی می‌توان شرایط و قوانین مشترکی را در مورد یاردانگ‌ها به شرحی که در پی می‌آید بیان داشت:

۱) فرایندها: به‌طور کلی پیدایش یاردانگ‌ها ناشی از اثر متقابل و پیچیده میان عوامل درونی (ساختار و لیتولوژی) و بیرونی (بادهای تک‌جهتی، سیستم جریان‌های آبی اطراف آنها و وجود منبع ذرات فرسایش‌دهنده در نزدیکی یاردانگ‌ها) است. این در حالی است که فرایندهای دیگری نظیر ریزش یک‌باره، هوازدگی و فرسایش خندقی می‌تواند به تکامل یاردانگ‌ها بینجامد. یاردانگ‌های بیابان‌های غربی مصر مثال خوبی از بیان تأثیر عوامل داخلی بر شکل‌گیری مگایاردانگ‌هاست. مگایاردانگ‌های بیابان لوت در ایران بیشتر تحت تأثیر هم‌زمان عوامل بیرونی و درونی، شکل و توسعه یافته‌اند. رژیم باد غالب و تک‌جهتی بی‌شک از عوامل مهم در شکل‌گیری مگایاردانگ‌ها قلمداد می‌شود. وجود بارخان‌ها (که تنها شرط تشکیل‌شان وجود این‌گونه بادهاست) در نزدیکی آنها و جهت یکسان دالان‌ها و پشت‌ها با جهت

بادهای غالب می‌تواند به خوبی این موضوع را اثبات کند. گاهی اوقات (نظیر دشت لوت، جنوب و شمال نامیبیا و عربستان) محل مگیاردانگ‌ها در بالادست محل پهنه‌های ماسه‌ای و در جهت عبور شن‌ها قرار دارند. گاهی نیز (نظیر مناطق شرقی کوه‌های آند جنوبی در آرژانتین) فرایندهای آتشفشانی و ساختار ویژه لاواها و وجود کوارتز سبب تشکیل مگیاردانگ‌ها می‌گردد.

۲) مواد تشکیل‌دهنده: به طور کلی مگیاردانگ‌ها بر روی رسوبات تبخیری، سیلت استون، سند استون، شیل، لایم استون، و گاهی حتی بر روی سنگ‌های کریستالی نظیر شیست و گنیس هم تشکیل می‌شوند. به عنوان مثال بیشتر مگیاردانگ‌ها نظیر دشت لوت و آسیای میانه بر روی مواد مارنی و رسوبات آبرفتی پلیستوسن تشکیل شده‌اند (Gabriel, 1938)، در حالی که مگیاردانگ‌های مناطق عربستان جنوبی، نامیبیا و صحرای مرکزی به ترتیب بر روی ماسه‌سنگ‌های کامبرین، سنگ‌های آذرین دگرگونی و ماسه‌سنگ‌های پالئوزوئیک شکل گرفته‌اند (Goudie, 1999, 97). مگیاردانگ‌های بیابان‌های غربی و مرکزی مصر را می‌توان بر روی رسوبات آبرفتی پلایا، سنگ آهک و رسوبات گچی پالئوسن و ائوسن مشاهده کرد (Brookes, 2001, 189). مگیاردانگ‌های امریکای جنوبی - آرژانتین بر خلاف سایر مناطق بر روی اراضی یکپارچه و سخت آتشفشانی و بازالتی وجود دارد، در حالی که در سواحل شیلی و پرو رس‌های الیگوسن فوقانی تا میوسن فوقانی بستر مگیاردانگ‌هاست (Inbar and Risso, 2001, 657).

۳) محل پیدایش: اغلب مگیاردانگ‌ها در مناطق فراخشک با میانگین بارندگی سالیانه کمتر از ۵۰ میلی‌متر به وجود می‌آیند (جدول ۳). پوشش گیاهی بسیار کم، بادکندی و فرسایش بادی زیاد، جریان‌های سیلابی وجود پلایاها و یا منابع تأمین ماسه، از ویژگی‌های مناطق حاوی این عوارض به‌شمار می‌آید. یاردانگ‌ها در مناطق دارای رسوبات مخروط‌افکنه‌های آبرفتی، مناطق کوهستانی و یا دارای سیستم زهکشی یکپارچه هرگز یافت نمی‌شوند.

جدول ۳. میانگین بارندگی سالیانه در محل مگیاردانگ‌ها

محل مگیاردانگ‌ها	میانگین بارندگی سالیانه (میلی‌متر)
دشت لوت ایران	< ۱۰
مصر	۱
عربستان سعودی	۶۱
نامیبیا جنوبی	۱۰
نامیبیا شمالی	۳۰-۱۰
صحرای مرکزی - چاد	۱۵
دون هوانگ - چین	۴۰
پرو	۰
شیلی	۱۰

منبع: Goudie and Middleton, 2006

۴) نرخ تشکیل و سن: مگیاردانگ‌ها عوارض بسیار قدیمی و پایداری هستند که طی میلیون‌ها سال شکل گرفته‌اند. تا کنون مطالعات و شواهد اندکی در مورد سن و نرخ تشکیل آنها صورت پذیرفته است. آزمایش‌های تونل باد نشان داده

است که در ابتدا به سرعت شکاف‌هایی بر روی مواد ایجاد می‌شوند و تا مواد پایه (نظیر سنگ بستر) پیش می‌روند. بعد از این مرحله، فرم قسمت‌های مختلف یاردانگ‌ها تا رسیدن به فرم نهایی دستخوش تغییراتی می‌گردد (Ward and Greeley, 1984, 830). نرخ برش رسوبات در مگایاردانگ‌های لوت در کشور چین در حدود ۰/۲ سانتی‌متر در سال بیان شده است (McCauley et al., 1977, 233). صحرای نامیب و اتاکاما در زمان‌های پیش- پلیستوسن و احتمالاً در میوسن یا زودتر تشکیل شده‌اند و لذا زمان بسیار زیادی برای تشکیل مگایاردانگ‌ها در آن‌ها سپری شده است (Goudie, 2002, 195).

### سپاس‌گزاری

این مقاله برگرفته از طرح‌های پژوهشی مصوب معاونت پژوهشی دانشگاه تهران، مرکز تحقیقات بین‌المللی بیابان، به شماره ۲ و ۱/۱/۷۳۱۴۹۳۱۰/۱/۱ انجام شده است که بدین‌وسیله از حمایت‌های مالی صورت گرفته، قدردانی می‌شود.

### منابع

- Agustino V.D., Marchi, L., 2001, **Debris Flow Magnitude in the Eastern Italian Alps: Data Collection and Analysis**, Phy. Chem. Earth (PERGAMON), Vol. 26, No. 9, 657- 663.
- Ahmadi, H., 2008, **Applied Geomorphology (Water Erosion)**, University of Tehran, 686 pp.
- Al-Dousari, A.M., Al-Elaj, M., Al-Enezi, E. and Al-Shareeda, A., 2009, **Origin and Characteristics of Yardangs in the Um Al-Rimam Depressions (N Kuwait)**, Geomorphology, 104(3-4): 93-104.
- Bagnold, R.A., 1933, **A Further Journey through the Libyan Desert**, The Geographical Journal, 82(2): 103-126.
- Beadnell, H.J.L., 1909, **An Egyptian Oasis: An Account of the Oasis of Kharga in the Libyan Desert, with Special Reference to its History**, Physical Geography, and Water-Supply, John Murray, London, 248 pp.
- Berberian, M. et al., 2001, **The 1998 March 14 Fandoqa Earthquake (Mw 6.6) in Kerman Province, Southeast Iran: Re-rupture of the 1981 Sirch Earthquake Fault, Triggering of Slip on Adjacent Thrusts and the Active Tectonics of the Gowk Fault Zone**, Geophysical Journal International, 146(2): 371-398.
- Beresford-Jones, D., Lewis, H. and Boreham, S., 2009, **Linking Cultural and Environmental Change in Peruvian Prehistory: Geomorphological Survey of the Samaca Basin, Lower Ica Valley, Peru**. CATENA, In Press, Corrected Proof.
- Blumberg, D.G. and Greely, R., 1966, **A Comparison of General Circulation Model Predictions to Sand Drift and Dune Orientations**, Journal of Climate, 9: 3248-3259.
- Brookes, I.A., 1993, **Geomorphology and Quaternary Geology of the Dakhla Oasis Region, Egypt**, Quaternary Science Reviews, 12: 529-552.
- Brookes, I.A., 2001, **Aeolian Erosional Lineations in the Libyan Desert, Dakhla Region, Egypt**, Geomorphology, 39(3-4): 189-209.

- Cooke, R.U., Warren, A. and Goudie, A., 1993, **Desert Geomorphology**, Taylor & Francis, 526 pp.
- Corbett, I., 1993, **Aeolian Sediments Ancient and Modern and Ancient Pattern of Sandflow in the Southern Namib Deflation Basin**, International Association of Sedimentologists Special Publication, 16: 45-60.
- Ehsani, A.H. and Quiel, F., 2008, **Application of Self Organizing Maps and SRTM Data to Characterize Yardangs in the Lut Desert, Iran**, Remote Sensing of Environment, 112(7): 3284-3294.
- El-Baz, F., Breed, C.S., Grolier, M.J. and McCauley, J.F., 1979, **Eolian Features in the Western Desert of Egypt and Some Applications to Mars**, Journal Geophysics Research, 84(B14): 8205-8221.
- Gabriel, A., 1938, **The Southern Lut and Iranian Baluchistan**, Geographical Journal, 92: 193-208.
- Gay, S.P., 2005, **Blowing Sand and Surface Winds in the Pisco to Chala Area**, Southern Peru Journal of Arid Environments, 61(1): 101-117.
- Goudie, A., 2003, **Encyclopedia of Geomorphology**, Routledge, 1200 pp.
- Goudie, A. and Middleton, N., 2006, **Desert Dust in the Global System**, Springer, 287 pp.
- Goudie, A.S., 2002, **Great Warm Deserts of the World: Landscape and Evolution**, Oxford University Press, 480 pp.
- Goudie, A.S., Stokes, S., 1999, **Yardang Landforms from Kharga Oasis, South-western Egypt**, Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementbände, 116: 97-112.
- Grolier, M.J., McCauley, J.F., Breed, C.S. and Embabi, N.S., 1980, **Yardangs of the Western Desert**, The Geographical Journal, 146(1): 86-87.
- Gutiérrez-Elorza, M., Desir, G. and Gutiérrez-Santolalla, F., 2002, **Yardangs in the Semiarid Central Sector of the Ebro Depression (NE Spain)**, Geomorphology, 44(1-2): 155-170.
- Halimov, M. and Fezer, F., 1989, **Eight Yardang Types in Central Asia**, Zeitschrift für Geomorphologie, 33: 205-217.
- Hedin, S., 1903, **Central Asia and Tibet**, Charles Scribner and Sons, New York, 608 pp.
- Huggett, R.J., 2003, **Fundamentals of Geomorphology**, Routledge, 386 pp.
- Inbar, M. and Risso, C., 2001, **Holocene Yardangs in Volcanic Terrains in the Southern Andes, Argentina**, Earth Surface Processes and Landforms, 26: 657-666.
- Krinsley, D.B., 1970, **A Geomorphological and Palaeoclimatological Study of the Playas of Iran**, U.S. Geological Survey, U.S. Government Printing Office, Contract, PROCP 700-800. US Air Force Cambridge Research. 329 pp.
- Lancaster, N., 1995, **Geomorphology of Desert Dunes**, Routledge, London, 290 pp.
- Mashhadi, N., Alavipanah, S.K., Ahmadi, H., 2002, **Study the Geomorphology of Lut Desert**, Desert, No.7, PP. 25-43.

- McCauley, J.F., Grolier, M.J. and Breed, C.S., 1977, **Yardangs**, In: D.O. Doehring (Editor), *Geomorphology in Arid Regions*, Allen and Unwin, London, pp. 233–269.
- Mildrexler, D.J., Zhao, M. and Running, S.W., 2006, **Where Are the Hottest Spots on Earth?** EOS, Transactions American Geophysical Union, 87(43): 461.
- Vincent, P. and Kattan, F., 2006, **Yardangs on the Cambro-ordovician Saq Sandstones, North-west Saudi Arabia**, *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 50(3): 305-320.
- Ward, A.W., 1979, **Yardangs on Mars: Evidence of Recent Wind Erosion**, *Journal of Geophysical Research*, 84: 8147-8166.
- Ward, A.W. and Greeley, R., 1984, **Evolution of the Yardangs at Rogers Lake, California**, *Geological Society of America Bulletin*, 95(7): 829-837.
- Zhao, Y. et al., 2009, **Late Holocene Vegetation and Climate Oscillations in the Qaidam Basin of the Northeastern Tibetan Plateau**, *Quaternary Research*, In Press, Corrected Proof.
- Hedin, S., 1903, **Central Asia and Tibet**, Charles Scribner and Sons, New York, 608 pp.