

تحلیل فراکتالی تغییرات بافت لس‌های استان گلستان

سمیه قندهاری^۱، آرش امینی^{۲*}، علی سلگی^۳، حامد رضایی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۲/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۱۴

چکیده

استفاده از تحلیل فراکتال به عنوان روشی متفاوت از روش‌های معمول در بررسی ویژگی‌های لس‌ها به‌خصوص در یکی از گسترده‌ترین پهنه‌های لسی ایران که به‌عنوان حلقه ارتباطی بین لس‌های آسیای مرکزی و اوراسیا نیز شناخته می‌شود، ضروری و پراهمیت تلقی می‌گردد. بنابراین هدف از این مقاله، تحلیل فراکتال توزیع اندازه ذرات با ویژگی‌های بافتی لس‌های استان گلستان است. در این تحقیق، از ۱۶ ایستگاه نواحی لسی استان گلستان نمونه‌برداری شد و نمونه‌ها از طریق دانه‌بندی و فراکتال مطالعه شدند. سپس کاربرد فراکتال توزیع اندازه ذرات و فراکتال شمارش جعبه‌ای در شناسایی تغییرات پس از رسوب‌گذاری لس‌ها و ارتباط مقادیر فراکتال با پارامترهای بافتی نظیر جورشدگی، کج‌شدگی و کشیدگی بررسی شد. نتایج ابعاد فراکتال توزیع اندازه ذرات نشان داد لس‌های منطقه ۱ بیشترین پدورنز را تحمل کرده و دارای Db_H بالاتری هستند. با افزایش Db_H جورشدگی ذرات کاهش می‌یابد و شاخص کشیدگی کمتر شده و پهن‌شدگی منحنی بیشتر می‌شود. ایستگاه‌های آلاگل، آماگل و کمربندی آق‌قلا با جورشدگی بهتر، میانگین اندازه دانه بیشتر، دارای ابعاد فراکتال Db_H پایین‌تر از سایر نقاط هستند. همچنین ابعاد فراکتال توزیع اندازه ذرات و هندسه فراکتالی ذرات بر اساس روش شمارش جعبه‌ای نتایج همدیگر را تأیید می‌کنند.

کلیدواژه‌ها: تحلیل بافتی، فراکتال توزیع اندازه ذرات، فراکتال شمارش جعبه‌ای تفاضلی، لس.

۱. دانشجوی دکتری رسوب‌شناسی و سنگ رسوبی، گروه علوم زمین، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
 ۲. استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران، a.amini@gu.ac.ir
 ۳. دانشیار، گروه علوم زمین، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
 ۴. استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران
- * این مقاله مستخرج از رساله دکتری واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی است.

مقدمه

واژه فراکتال به وسیله مندلبورت^۱ (۱۹۶۷) برای توصیف اشیاء هندسی پیچیده‌ای که درجه بالایی از خود تشابهی دارند ابداع شد. فراکتال‌ها از نگاه ریاضیاتی اجسامی به شمار می‌روند که رفتار یک معادله را به تصویر می‌کشند، از این نظر دارای ویژگی‌هایی خاص هستند. هر جسم فراکتال از قطعاتی تشکیل یافته است که هر قطعه کاملاً نماینده شکل و ویژگی‌های کل جسم است، به این پدیده خاصیت خودمتشابهی گفته می‌شود. همچنین فراکتال‌ها دارای ابعاد صحیح نبوده و بُعد آن‌ها به صورت کسری بیان می‌شود. این اجسام به وسیله یک فرایند تکراری ساخته می‌شوند و می‌توان برای آن‌ها n تابع بازگشتی را در نظر گرفت (باس^۲، ۲۰۰۲).

لس‌ها رسوبات بادرفتی سست با مقدار زیاد سیلت‌های درشت، بدون لایه‌بندی، با قابلیت نفوذپذیری بالا، در حالت خشک مقاوم در شیب‌های تند هستند که به رنگ زرد تا قهوه‌ای کمرنگ می‌باشند. یکی از خصوصیات فیزیکی مهم رسوبات که بسیاری از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی دیگر را تحت تأثیر قرار می‌دهد، توزیع اندازه ذرات^۳ (PSD) است. PSD لس یک فراکتال طبیعی است (لو^۴ و همکاران، ۲۰۰۳).

ذرات لس پس از تغییر به وسیله پدوژنز^۵ هنوز هم دارای خواص خودمتشابهی خوبی هستند، بنابراین ابعاد فراکتال اندازه ذرات این نوع رسوب به عنوان یک شاخص جدید اندازه ذرات پیشنهاد شده است (تازدمیر^۶، ۲۰۰۹؛ ژانگ^۷ و همکاران، ۲۰۱۰). توالی‌های لس که از رسوبات بادی هستند تحت تأثیر تغییرات آب‌وهوایی گذشته به وجود آمده و اطلاعات محیط گذشته را در خود ثبت کرده است. همچنین رسوبات بادی توسط پدوژنز تغییرات بسیاری یافته است که این اطلاعات در ذرات تشکیل‌دهنده لس‌ها ثبت می‌شود؛ بنابراین، با مطالعه PSD می‌توان به محیط گذشته پی برد و تغییرات PSD را می‌توان به عنوان یک شاخص برای شدت

پدوژنز یا سن خاک و فرایند تشکیل خاک مورد استفاده قرار داد (میناسنی^۸ و همکاران، ۲۰۱۶).

در فرایند بسیار پیچیده تشکیل ذرات لس، هوازدگی فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی در ناحیه منبع منجر به تشکیل قطعات سنگ‌های در ابعاد کوچک‌تر می‌شود. سپس توسط باد حمل و رسوب‌گذاری شده یک جورشدگی در اندازه ذرات به وجود می‌آید. پدوژنز پس از رسوب‌گذاری، از جمله هوازدگی شیمیایی و بیولوژیکی، موجب خرد شدن بیشتر ذرات می‌شود (لیو^۹، ۱۹۸۵؛ پای^{۱۰}، ۱۹۹۵). مقدار خرد شدن در مکان‌های مختلف ممکن است به دلیل توزیع اندازه ذرات از رسوب‌گذاری، زمان و شدت پدوژنز و یا عوامل دیگر متفاوت باشد. با این حال، مقادیر بُعد فراکتال را می‌توان با استفاده از مکانیسم کاهش اندازه ذرات لس مقایسه کرد (تازدمیر، ۲۰۰۹). از آنجایی که هوازدگی بسیار کمی در حین حمل و نقل اتفاق می‌افتد (جونگ^{۱۱} و همکاران، ۲۰۰۸) فرض می‌شود که رسوبات لسی قبل از حمل و نقل یکنواخت بودند و رسوب بادی عمدتاً شامل ذرات در اندازه سیلت-ماسه (۱۰ تا ۵۰ میکرون) بوده است؛ پس از رسوب، نیروهایی که بر ذرات لس اثر می‌گذارند، عمدتاً از پدوژنز (شتزل و اندرسون^{۱۲}، ۲۰۰۵) و تحت تأثیر نیروهای مؤثر آب‌وهوایی (سان^{۱۳} و همکاران، ۲۰۱۶) حاصل می‌شود. معمولاً پدوژنز شدید با جورشدگی ضعیف تا خیلی ضعیف در آب‌وهوای گرم و مرطوب و پدوژنز ضعیف در آب‌وهوای سرد و خشک رخ می‌دهد (سان^{۱۴} و همکاران، ۲۰۱۸).

فرایند تشکیل ذرات لس یک فرایند پیچیده و غیریکنواخت در زمین‌شناسی است (لیو^{۱۵} و همکاران، ۱۹۹۹). حوادث فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی مرتبط با آب‌وهوا، باعث خرد شدن سنگ و ایجاد رسوباتی غالباً در اندازه سلیت می‌شود. وقتی که ذرات به وسیله باد منتقل می‌شوند، نظم

8. Minasny

9. Liu

10. Pye

11. Jeong

12. Schaetzl and Anderson

13. Sun

14. Sun

15. Liu

1. Mandelbrot

2. Baas

3. Particle Soil Distribution

4. Lu

5. Pedogenesis

6. Taşdemir

7. Zhang

مورد استفاده قرار گیرد و مقادیر فراکتال از PSDها می‌تواند برای تشخیص درجه خرد شدن ذرات و شدت خاک‌زایی برای لس پالئوسل استفاده شود. همچنین پالئوسل دارای مقدار فراکتال بیشتر از لس است.

محمدی و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از نتایج آزمون تجزیه واریانس یک‌طرفه بیان کردند بین میانگین بُعد فراکتال سه سازند زمین‌شناسی با اطمینان ۰/۹۹ اختلاف معنی‌دار وجود دارد. نتایج روابط معنی‌داری بین ابعاد فراکتال شبکه زهکشی و شاخص‌های مورفومتریکی نشان می‌دهد. بالاترین ضریب همبستگی متعلق به روابط رگرسیونی بین تراکم شبکه زهکشی و بُعد فراکتال است (در سطح ۰/۹۹). در پایان نتیجه‌گیری کردند که بُعد فراکتال، شاخص نسبتاً دقیق در ارائه خصوصیات مورفومتریکی و ژئومورفولوژیک شبکه‌های زهکشی است.

محمدی و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند بین ابعاد فراکتال و اندازه ذرات همبستگی مکانی نیز وجود دارد و پارامترهای فراکتال دارای ساختار فضایی قدرتمندی بوده و می‌توانند تنوع مکانی بافت خاک را بهتر توصیف کنند.

ژانگ^۵ و همکاران (۲۰۲۰) با مطالعه بر روی رابطه بُعد فراکتال با ترکیب مختلف نسبت خاک‌های نرم تا ماسه، به این نتیجه رسیدند که تغییرات بُعد فراکتال می‌تواند نشان‌دهنده ایجاد خاک ترکیبی جدید باشد که از طریق ترکیب خاک نرم با ماسه ایجاد شده است. علاوه بر این، بین فراکتال ذرات خاک و مقدار سیلت، رس و مواد آلی همبستگی مثبت و معناداری وجود دارد.

امروزه روش فراکتال اندازه ذرات (PSD) در رسوبات برای مطالعات و تحقیقات بین‌المللی بیشتر مورد توجه قرار گرفته و چینی‌ها در این زمینه پیشگام هستند، ولی در مورد استفاده از روش فراکتال توزیع اندازه ذرات در ایران به‌منظور شناسایی تغییرات پس از رسوب‌گذاری، پدوژنز و اقلیم اطلاعات اندکی موجود است. از این رو این تحقیق در نظر دارد تحلیل متناسبی از روش‌های فراکتال در خصوص بافت لس‌ها و تغییرات پس از رسوب‌گذاری آن‌ها را ارائه دهد. همچنین

رسوب وابسته به اندازه است. اگر برای دوره زمانی طولانی و یا شدیدتر پدوژنز رخ دهد، ذرات ریزتر ایجاد می‌کند (آن^۱ و همکاران، ۱۹۹۱). از آنجایی که خصوصیات و رفتار لس‌ها تحت تأثیر بافت و ساختار آن است، شناسایی بافت لس‌ها موجب شناسایی رفتار لس‌ها در شرایط مختلف می‌شود. بافت لس‌ها منعکس‌کننده شرایط و تحولاتی است که بعد از نهشته شدن بر روی لس‌ها تأثیرگذار بوده است.

لو و همکاران (۲۰۰۳) با شبیه‌سازی آزمایشگاهی بر روی لس‌ها، فراکتال را روشی برای توصیف هندسه ذرات می‌دانند. آن‌ها نتایج آزمایش‌ها خود را بدین صورت بیان می‌کنند: الف: سیلت هنگام خرد شدن رفتار فراکتال نشان می‌دهد. ب: ابعاد فراکتال در روند خرد شدن تغییر می‌کنند. ج: بین ابعاد فراکتال که توسط توزیع اندازه ذرات به دست آمده و زمان خرد شدن رابطه وجود دارد. د: گرایش عمومی ویژگی‌های فراکتال برای نشان دادن روند کاهش اندازه ذرات است.

ژی‌او^۲ و همکاران (۲۰۱۴) نیز رابطه لگاریتمی با سطح تعیین بالا بین بُعد فراکتال و درصد شن ($R^2=0/81$) و رس ($R^2=0/99$) ملاحظه کردند. این محققان نشان دادند که رابطه ضعیفی بین بُعد فراکتال و درصد سیلت وجود دارد ($R^2=0/06$). آنان روابط غیرخطی را برای بیان ارتباط بین بُعد فراکتال و درصد شن، سیلت و رس خاک ارائه کردند.

سونگ^۳ و همکاران (۲۰۱۵) از ابعاد فراکتال برای بررسی ویژگی‌های توزیع اندازه ذرات (PSD) در ریزوسفرها و خاک‌های فله‌ای شش گیاه زراعی استفاده کرده و به این نتیجه رسیدند که PSD به‌طور قابل توجهی بین خاک ریزوسفر و خاک فله متفاوت است. بُعد فراکتال یک شاخص حساس و مفید برای تعیین کمی تغییرات در خصوصیات مناطق مختلف خاک است.

سان^۴ و همکاران (۲۰۱۸) با ارزیابی فراکتال توزیع اندازه ذرات در سکانس لس-پالئوسل بادی نشان می‌دهند PSD می‌تواند به‌عنوان یک شاخص برای شدت توسعه خاک

1. An
2. Xiao
3. Song
4. Sun

5. Zhang

گلستان که شامل لس ماسه‌ای، لس سیلتی و لس رسی هستند (رضایی، ۲۰۱۳) صورت گرفت. ابتدا با توجه به نقشه استان گلستان (با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰) پراکندگی لس‌های استان بررسی و ۱۶ منطقه با توجه به راه‌های دسترسی، وجود ترانشه مناسب برای نمونه‌برداری و مطالعه انتخاب شد. در زون یک از ۳ ایستگاه، زون دو ۸ ایستگاه و زون سه ۵ ایستگاه نمونه‌برداری انجام شد. شماره نمونه‌ها و موقعیت هر ایستگاه در جدول (۱) و شکل (۱) آورده شده است.

جدول (۱): نام و موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری

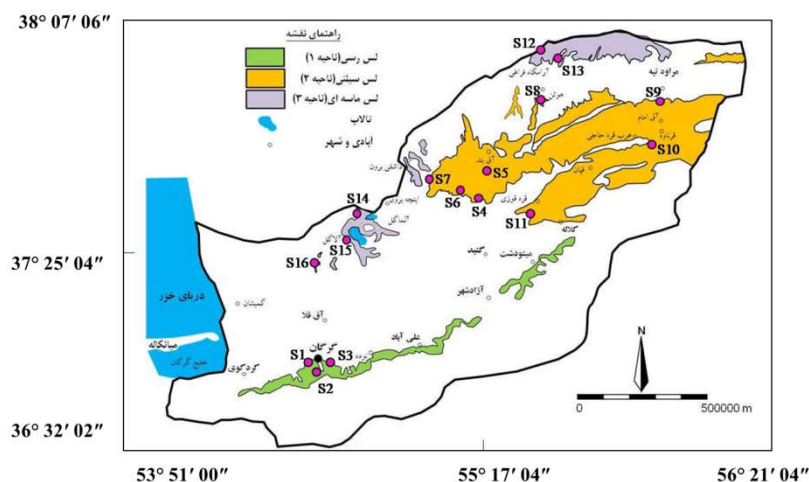
Table (1): The name and location of sampling stations

ایستگاه	محل	ناحیه
S1	سعدآباد	۱
S2	گلند فخرآباد	
S3	نصرآباد	
S4	دوراهی آق بند	۲
S5	شمال شرق آق بند	
S6	شمال گنبد	
S7	دانشلی برون	
S8	هوتن	
S9	مسکن مهر مراوه‌تپه	
S10	چنارلی	
S11	روستای تمرقره قوزی	۳
S12	آق تقه جدید	
S13	مختومقلی	
S14	آلماگل	
S15	آلاگل	
S16	کمربندی آق‌قلا	

نتایج فراکتال توزیع اندازه ذرات با هندسه فراکتالی به دست آمده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی مقایسه می‌شود.

مواد و روش‌ها

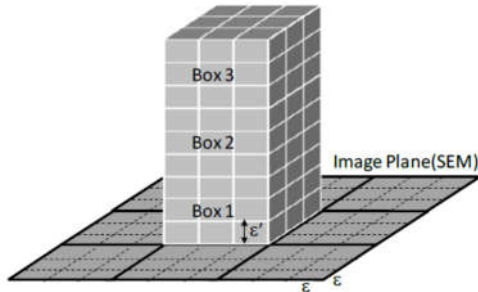
منطقه مورد مطالعه در استان گلستان واقع شده است. استان گلستان در جنوب شرقی دریای خزر با مساحتی بالغ بر ۲۰۴۳۸ کیلومتر مربع حدود ۱/۳٪ مساحت کل کشور را دارا هست (سالنامه آماری استان گلستان، ۲۰۱۶). این استان بین عرض جغرافیایی ۳۰° ۳۶' تا ۳۸° ۸' شمالی و طول جغرافیایی ۵۷° ۵۳' تا ۵۶° ۲۲' شرقی واقع شده است. ۴۷۶۰۰۰ هکتار معادل ۳/۲۳٪ از مساحت استان گلستان با لس پوشیده شده است. لس‌های استان گلستان بر اساس ویژگی‌های اندازه (خواجه و همکاران، ۲۰۰۵) و خواص مهندسی آن (رضایی، ۲۰۱۳) به سه ناحیه تقسیم شده‌اند: لس‌های ناحیه ۱ که به لس‌های کوهپایه معروف‌اند؛ سهم گسترش لس‌های ناحیه ۱ حدود ۶۰ هزار هکتار است. لس‌های ناحیه ۲ در مناطق مرکزی و شرق استان گلستان گسترش دارند. سهم گسترش آن حدوداً ۳۳۸ هزار هکتار است. ناحیه ۳ مربوط به نهشته‌های لسی شمال مراوه‌تپه، حاشیه رودخانه اترک در مرز ایران و ترکمنستان و حواشی دریاچه‌های آلاگل و آلماگل و بر خان‌های شمال شرق آق‌قلا است. سهم گسترش لس‌های ناحیه ۳ حدوداً ۷۸ هزار هکتار برآورد می‌شود (خواجه و همکاران، ۲۰۰۵؛ رضایی، ۲۰۱۳). نمونه‌برداری از سه زون بر اساس سه نوع بافت لسی استان



شکل (۱): نقشه پراکنش سه تیپ لس در استان گلستان و ایستگاه‌های نمونه‌برداری

Figure (1): Distribution of three loss types in Golestan Province and sampling stations

ε' ارتفاع هر چشمه در جعبه‌ها برحسب نانومتر و M ابعاد انتخابی تصویر در SEM برحسب نانومتر است (رضایی، ۲۰۱۳). در این صورت تصویر SEM به صورت سه‌بعدی مدل می‌شود که در آن (i, j) به موقعیت دوبعدی و مختصات سوم K به سطوح خاکستری متناظر دلالت دارد (شکل ۲).



شکل (۲): مدل جعبه‌های تفاضلی در هندسه فراکتالی (رضایی، ۲۰۱۳)

Figure (2): Differential Box Modeling in Fractal Geometry (Rezaei, 2013)

اگر حداکثر و حداقل سطوح خاکستری در قطعه (i, j) امین به ترتیب U^{th} و V^{th} باشد، تعداد جعبه‌های موردنظر نیاز برای پوشاندن سطح عکس بر روی هر قطعه به صورت زیر محاسبه می‌گردد (رضایی، ۲۰۱۳):

$$n\varepsilon(i, j) = v - u + 1 \quad (3)$$

تعداد کل جعبه‌های مورد نیاز برای پوشاندن همه سطح می‌تواند از رابطه زیر تخمین زده شود (رضایی، ۲۰۱۳):

$$\tilde{N}\varepsilon = \sum_{i,j} n\varepsilon(i, j) \quad (4)$$

به منظور توصیف توزیع متفاوت مجموعه فراکتال‌ها یک معیار $\mu_\varepsilon(i, j)$ قطعه برای هر قطعه تعریف می‌شود (رضایی، ۲۰۱۳):

$$\mu_\varepsilon(i, j) = (n\varepsilon(i, j)) / \tilde{N}\varepsilon \quad (5)$$

i, j موقعیت‌های دوبعدی یک تصویر و $\tilde{N}\varepsilon$ تعداد جعبه‌های حاوی دانه و بدون بعد است.

قطعه‌بندی و تخمین در مقیاس‌های متفاوت انجام می‌شود و ابعاد چندفراکتالی مرتبه‌ای q با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید (نیکویی و همکاران، ۲۰۰۸).

$$Dq = \frac{1}{1-q} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln[\sum_{i,j} \mu(i, j)^q]}{\ln(\frac{1}{\varepsilon})} \quad (6)$$

که در آن $r = \varepsilon / M$ است.

i, j موقعیت‌های سه‌بعدی یک تصویر، D بُعد فراکتال، q رتبه در اندازه جعبه‌ها هستند. اگر ε به عنوان مقیاسی که شیء فراکتالی در آن بررسی شده است در نظر گرفته شود، مقیاس هر

فراکتال بر اساس توزیع اندازه ذرات (Db)

محققان مختلف (ژائو^۱، زیائو^۲، ۲۰۱۴) نشان دادند که مدل منفذ-ذره قادر به توصیف توزیع اندازه ذرات خاک است؛ این مدل به صورت زیر توصیف می‌شود (بیرد^۳ و همکاران، ۲۰۰۰):

$$M(X \leq X_i) = CbX_i^{3-Db} \quad (1)$$

$M(X \leq X_i)$ جرم تجمعی ذرات کوچک‌تر از X_i ، X_i حد بالایی اندازه ذرات در هر کلاس اندازه، Db بُعد فراکتالی توزیع اندازه ذرات خاک و Cb ثابت مقیاس مرکب است. ویژگی فراکتال خاک در درک و کمی‌سازی فرایندهای مرتبط با خاک اهمیت دارد (سو^۴ و همکاران، ۲۰۰۴).

روش شمارش جعبه‌های تفاضلی

همان‌طور که اشاره شد، یکی از بهترین روش‌های فراکتالی، الگوریتم شمارش جعبه‌های تفاضلی^۵ است (جفرسون^۶، ۲۰۰۳؛ سان و همکاران، ۲۰۰۴؛ شادرو^۷ و همکاران ۲۰۰۷؛ نیکویی و همکاران، ۲۰۰۸؛ رومر و زیمنس^۸، ۲۰۰۸). در این روش در یک تصویر SEM^۹ سطح دانه‌ها، منافذ و یا سیمان، به جای اندازه‌گیری مستقیم، با استفاده از شمارش جعبه‌های هم‌اندازه و دارای مقیاس مشخص اندازه‌گیری می‌شود. این شمارش در مقیاس‌های مختلف انجام می‌گردد. با زیاد شدن مقدار جعبه‌ها ابعاد آن کوچک شده و کار شمارش سخت‌تر خواهد شد ولی شمارش با دقت کافی و نزدیک به واقعیت انجام می‌شود. روش کار بدین صورت است که یک تصویر SEM به ابعاد $M \times M$ توسط شبکه‌ای از جعبه‌های مساوی به ابعاد $\varepsilon \times \varepsilon$ تقسیم می‌شود. بر روی هر جعبه یک ستون به ابعاد $\varepsilon' \times \varepsilon' \times \varepsilon$ (برحسب نانومتر) از جعبه‌ها وجود دارد که در آن ε' برابر است با (رضایی، ۲۰۱۳):

$$\varepsilon' = (\varepsilon \times G) / M \quad (2)$$

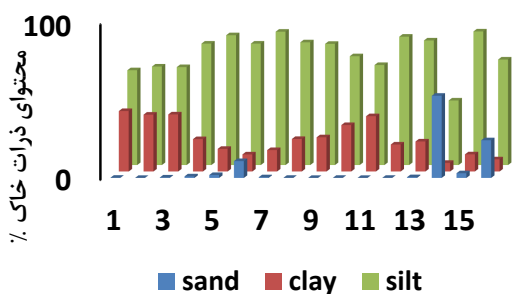
که در آن، G حداکثر سطح خاکستری در بعد سوم و برحسب نانومتر، $\varepsilon \times \varepsilon$ ابعاد هر چشمه از جعبه‌ها برحسب نانومتر،

1. Zhao
2. Xiao
3. Bird
4. Su
5. Defereential Box counting
6. Jefferson
7. Shadroo
8. Romero&Simms
9. Scanning Electron Microscope

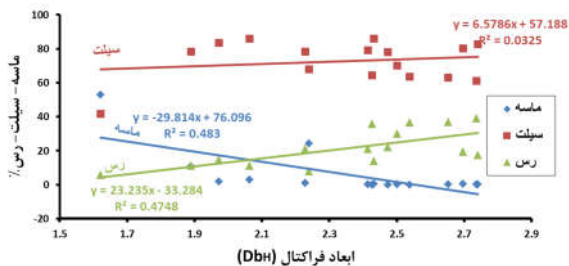
همچنین نتایج میانگین ۴/۳۷ میکرون و جورشدگی بسیار بد ($\phi=2/96$ میانگین) را برای ناحیه ۱، میانگین ۱۴/۳۵ میکرون جورشدگی بسیار بد ($\phi=3/17$ میانگین) را برای ناحیه ۲ و میانگین ۴۹/۵۶ میکرون با دو مقدار جورشدگی متفاوت جورشدگی بسیار بد ($\phi=2/28$ میانگین) در ایستگاه‌های S12 و S13 و جورشدگی بد ($\phi=1/78$ میانگین) در ایستگاه‌های S16, S15, S14 را برای ناحیه ۳ نشان می‌دهد (جدول ۲).

نتایج بررسی ابعاد فراکتال DbH در مقابل مقدار ماسه در لس‌های استان گلستان نشان می‌دهد که روند تغییرات DbH و درصد ماسه مخالف هم هستند؛ یعنی با افزایش DbH درصد ماسه کاهش می‌یابد. مقادیر سیلت با ابعاد DbH همبستگی ضعیفی نشان می‌دهد، ولی مقدار رس در لس‌های گلستان با افزایش DbH افزایش می‌یابد؛ به عبارتی افزایش مقدار رس باعث دانه‌بندی بهتر رسوبات می‌شود (شکل ۳ و ۴).

ایستگاه‌های نمونه‌برداری



شکل (۳): تغییرات ماسه، رس و سیلت در ایستگاه‌های نمونه‌برداری لس‌های گلستان
Figure (3): Sand, Clay and Silt Changes in Golestan Sampling Stations



شکل (۴): تغییرات مقادیر ماسه سیلت و رس در مقابل ابعاد فراکتال در لس‌های مورد مطالعه
Figure (4): Changes of silt and clay values versus fractal dimensions in the Sampling studied

جعبه به مقیاس تصویر تبدیل می‌شود و تعداد تصویر مورد نظر در ارتباط رگرسیونی با مقیاس مربوط به خود قرار می‌گیرد و از رابطه زیر عدد فراکتالی محاسبه می‌شود (رضایی، ۲۰۱۳):

$$D = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log[N(\delta)]}{\log(\frac{1}{\delta})} \quad (7)$$

که در آن (D) بُعد فراکتالی، ϵ مقیاس هر جعبه در هر رتبه (q) و $N(\epsilon)$ تعداد جعبه‌هایی است که دانه در آن وجود دارد. نتیجه کار در یک مقیاس تمام لگاریتمی ($\log \frac{1}{\epsilon} - \log N_{\epsilon}$) رسم می‌شود و یک رابطه خطی مستقیم به وجود می‌آید که شیب خط عدد فراکتال (D) هست (رضایی، ۲۰۱۳).

نتایج

ابعاد فراکتال توزیع اندازه ذرات

بررسی ابعاد فراکتال توزیع اندازه ذرات در آنالیز الک و هیدرومتری (DbH) نشان داد که میانگین مقدار Db_H برای منطقه یک ۲/۶۴ و برای منطقه دو ۲/۳۰ بوده است. Db_H منطقه سه در دو مقدار متفاوت بود. برای دو منطقه S12 و S13 مقدار Db_H ۲/۷۴ و ۲/۷۰ و برای S14, S15 و S16 به ترتیب ۱/۶۲، ۲/۰۶ و ۲/۲۴ می‌باشد (جدول ۲).

جدول (۲): تغییرات ابعاد فراکتال توزیع اندازه ذرات در آنالیز الک و هیدرومتری
Table (2): Fractal Dimension Changes of Particle Size Distribution in Sieve and Hydrometric Analysis

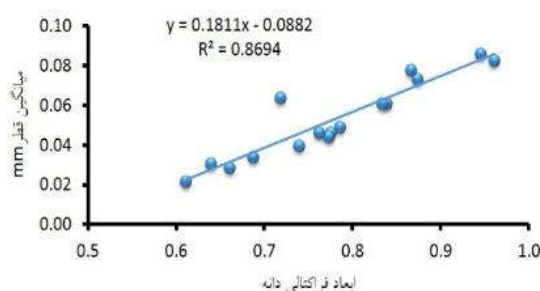
زون	ایستگاه	جورشدگی (ϕ)	میانگین (μm)	DbH
۱	S1	۳/۲۴	۳/۵۶	۲/۷۴
	S2	۲/۶۴	۵/۲۷	۲/۵۴
	S3	۳/۰۲	۴/۲۸	۲/۶۵
۲	S4	۳/۲۸	۱۷/۹۵	۲/۲۳
	S5	۲/۵۸	۵/۹۲	۱/۹۷
	S6	۲/۹۷	۲۷/۸۴	۱/۸۹
	S7	۲/۳۷	۲۷/۲	۲/۴۳
	S8	۳/۷۴	۱۱/۸۴	۲/۴۱
	S9	۳/۳۵	۱۳/۶	۲/۴۷
۳	S10	۳/۴۹	۵/۹۲	۲/۵۶
	S11	۳/۶۰	۴/۴۹	۲/۴۳
	S12	۱/۹۵	۱۷/۱۴	۲/۷۴
	S13	۲/۶۱	۱۵/۶۳	۲/۷۰
	S14	۰/۹۴	۶۶/۹۹	۱/۶۲
	S15	۲/۶۰	۵۹/۶۸	۲/۰۶
	S16	۱/۸۰	۸۸/۳۹	۲/۲۴

دارای میانگین قطر ذرات بیشتر، مقدار رس کمتر، ماسه بیشتر و عدد فراکتال کوچک‌تری هستند. منطقه ۳ دارای دو محدوده متفاوت از میانگین قطر ذرات، جورشده‌گی، درصد اندازه ذرات بوده و مقادیر فراکتال نیز دو محدوده متفاوت را نشان داده است. ایستگاه‌های S12 و S13 دارای قطر ذرات بیشتری نسبت به مناطق دیگر بوده و همچنین این دو ایستگاه دارای جورشده‌گی بسیار بد، مقدار رس بیشتر و عدد فراکتال بزرگ‌تری هستند. ایستگاه‌های S14، S15 و S16 نیز دارای میانگین قطر ذرات بسیار بیشتر از سایر مناطق و متفاوت از دو ایستگاه دیگر منطقه ۳ بوده و جورشده‌گی بهتر، درصد ماسه بیشتر و رس کمتر از سایر نقاط و متفاوت از دو ایستگاه دیگر منطقه ۳، دارای ابعاد فراکتال کمتر هستند.

هندسه فراکتالی ذرات بر اساس روش شمارش جعبه‌ای

در قسمت هندسه فراکتالی ذرات ابعاد فراکتالی دانه و ابعاد فراکتالی سطح دانه محاسبه شده و ارتباط این مقادیر با گردشده‌گی و کرویت و کشیدگی تصویری بیان می‌شود.

بررسی ابعاد فراکتالی دانه (DFg) نشان داد مقدار ابعاد فراکتال دانه در لس‌های استان گلستان از ۰/۶۱ کمترین مقدار تا ۰/۹۶۰ بیشترین مقدار متغیر است. میانگین ابعاد فراکتالی دانه در منطقه یک ۰/۶۷۳ در منطقه دو ۰/۷۸۸ و در منطقه سه ۰/۸۵۰ است. ابعاد فراکتالی دانه با قطر دانه همبستگی بالایی داشته و ارتباط نشان می‌دهد (شکل ۷).



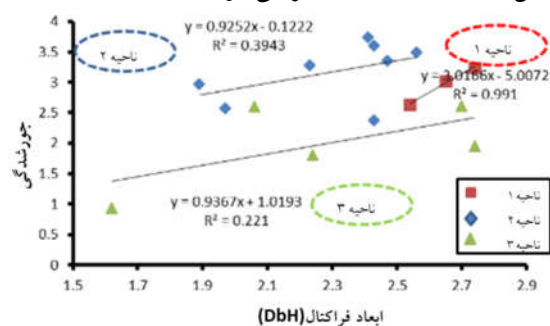
شکل (۷): تغییرات ابعاد فراکتال دانه در مقابل قطر

Figure (7): Changes of fractal grain dimensions versus diameter

همچنین با افزایش گردشده‌گی از ناحیه ۳ به ۱ ابعاد فراکتالی دانه کاهش می‌یابد (شکل ۸)؛ به این معنی که با افزایش گردشده‌گی ذرات، نظم رسوبات کاهش یافته و بافت آن‌ها دچار تغییر و تحول شده است.

روند جورشده‌گی ذرات در مقابل Db_H روند مثبت است (شکل ۵ و ۶)؛ یعنی با افزایش Db_H عدد جورشده‌گی بیشتر می‌شود و جورشده‌گی ذرات کاهش می‌یابد. به این مفهوم که دانه‌بندی بهتری در توزیع اندازه ذرات وجود داشته و حجم بیشتری از کلاس‌های اندازه ذرات در نمونه‌های مورد مطالعه وجود دارد (سان و همکاران، ۲۰۱۸).

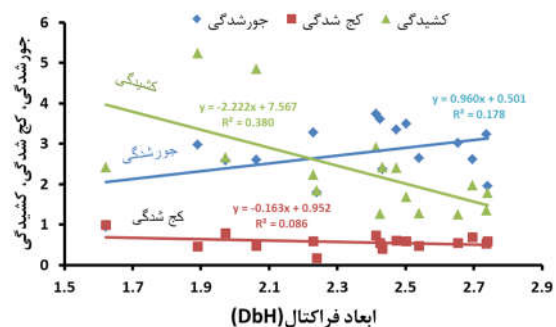
روند کشیدگی در مقابل Db_H روند منفی است (شکل ۶)؛ به این معنی که با افزایش Db_H شاخص کشیدگی کمتر شده و پهن‌شدگی منحنی بیشتر می‌گردد؛ زیرا حجم کلاس‌های اندازه ذرات بیشتر می‌شود.



شکل (۵): نمودار تغییرات ابعاد فراکتال در مقابل جورشده‌گی به تفکیک

نواحی نمونه‌برداری در آنالیز الک-هیدرومتری

Figure(5): Diagram of changes of fractal dimensions versus sorting in sampled stations of Golestan loess in the analysis Sieve-hydrometry



شکل (۶): تغییرات جورشده‌گی، کج‌شدگی، کشیدگی را در مقابل ابعاد

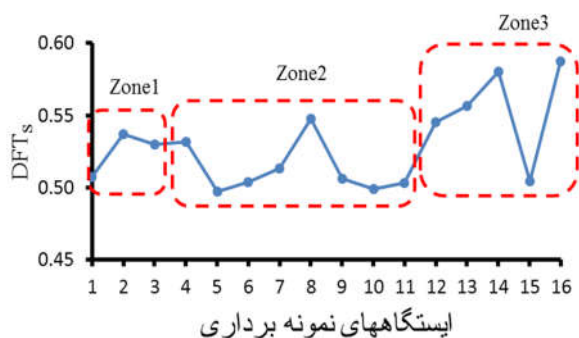
فراکتال در آنالیز الک-هیدرومتری

Figure (6): Changes of sorting, skewness and kurtosis versus fractal dimensions in sieve-hydrometric analysis

مقادیر بالای Db_H با میانگین اندازه قطر دانه کم و جورشده‌گی بسیار بد منطقه ۱ همراه است. این منطقه دارای ذرات رس بیشتری نسبت به دو منطقه دیگر است. در منطقه ۲ جورشده‌گی ذرات بسیار بد است و نسبت به منطقه ۱

اقلیمی محیط خشک و ناحیه ۱ جزء ناحیه مرطوب محسوب می‌شود، شدت هوازدهی و در پی آن فرایند خاک‌زایی بیشتر شده (فیض‌نیا و همکاران، ۲۰۰۵) کرویت ذرات تغییر می‌کند و در نتیجه عدد فراکتالی کاهش می‌یابد. بنابراین هرچه از منطقه ۳ به ۱ نزدیک می‌شویم، نظم رسوبات کمتر و تغییر بافت لس‌ها بیشتر می‌شود. این نتیجه مؤید نتیجه آنالیز ریزساختاری (قندهاری و همکاران، ۲۰۱۹) است.

در ابعاد فراکتالی سطح دانه (DFTs) اگر دانه‌ای کاملاً دایره‌ای باشد، مساحت آن با دایره محاطی و محیطی یکی است و نسبت یک می‌شود. این مقدار در منطقه ۱ دارای میانگین ۰/۵۱، در منطقه ۲ دارای میانگین ۰/۴۹ و در منطقه ۳ دارای میانگین ۰/۵۰ است (شکل ۱۰). هرچه ابعاد فراکتالی سطح دانه کوچک‌تر باشد، نشانه بی‌نظمی بیشتر در بافت سطح دانه است (رضایی، ۲۰۱۳).

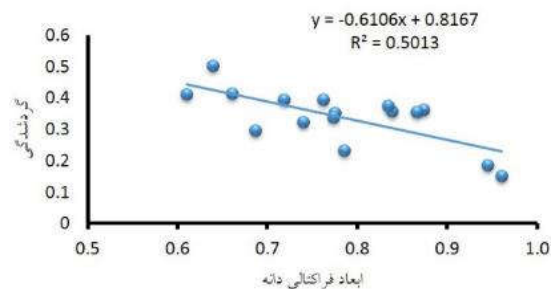


شکل (۱۰): تغییرات ابعاد فراکتالی سطح دانه در ایستگاه‌های مورد مطالعه
Figure (10): Changes in fractal dimensions of the grain surface at the stations under study

همان‌طور که در شکل (۱۰) نشان داده شده، تفاوت زیادی در مقدار DFTs در سه منطقه مشاهده نشد. به نظر می‌رسد ابعاد فراکتالی بافت سطح دانه در لس‌های گلستان دارای نظم بافت سطح دانه مشابه یکدیگرند.

هندسه فراکتالی آرایش چگالی فابریک

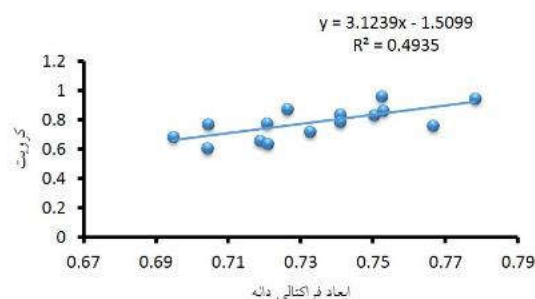
مقدار میانگین هندسه فراکتالی آرایش چگالی فابریک دانه (DFf) در لس‌های گلستان ۱/۹ است. این مقدار در منطقه ۱، ۱/۹۴، در منطقه ۲، ۱/۸۷ و در منطقه ۳، ۱/۹۱ است (شکل ۱۱).



شکل (۸): تغییرات ابعاد فراکتالی دانه در مقابل گردشدهی

Figure (8): Changes in fractal dimensions of the grain against rounding

و نیز ابعاد فراکتالی دانه با افزایش کرویت افزایش می‌یابد (شکل ۹).



شکل (۹): تغییرات ابعاد فراکتالی دانه در مقابل کرویت

Figure (9): Fractal grain size variations versus sphericity

از آنجا که کرویت از ناحیه ۳ به ۱ کاهش می‌یابد، عدد فراکتالی ابعاد دانه کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج، ابعاد فراکتالی دانه با افزایش قطر بیشتر می‌شود؛ این امر بیانگر این است که با افزایش قطر نظم بیشتر می‌شود و نیز مؤید این مطلب است که در نزدیکی منشأ دانه‌ها با نظم بهتری ته‌نشین شده و هرچه از منشأ دورتر می‌شویم با کاهش اندازه دانه عدد فراکتالی کوچک‌تر می‌شود.

نتایج مربوط به گردشدهی نشان داد از ناحیه ۳ به ۱ گردشدهی افزایش یافته است. احتمالاً چون ناحیه ۱ در مقایسه با ناحیه ۳ نسبت به منشأ در فاصله دورتری قرار دارد، در هنگام حمل و نقل ذرات برخورد بیشتری با هم دارند. لبه‌های دانه‌ها به هم بیشتر ساییده شده موجب گردشدهی بیشتر دانه‌ها و تغییر در بافت اولیه شده و عدد فراکتالی را کاهش می‌دهد. نتایج بررسی کرویت نشان داد که هرچه کرویت بیشتر باشد، نظم اولیه رسوب‌گذاری بیشتر بوده و بافت کمتر دچار تغییر شده است. از آنجا که منطقه ۳ از نظر

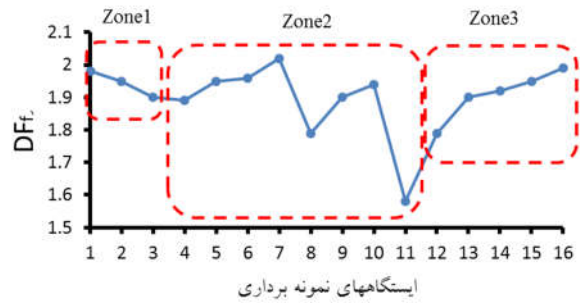
بحث و نتیجه‌گیری

ابعاد فراکتال بر اساس توزیع اندازه ذرات

از آنجایی که نتایج به‌دست‌آمده از محاسبه فراکتال لس‌های گلستان بین ۰ تا ۳ است و با تئوری خرد شدن و فراکتال تطابق دارند (تورکت^۱، ۱۹۸۶)، اعتبار استفاده از این پارامترها را برای تحلیل PSD (چن و مو^۲، ۲۰۰۴) مورد تأیید قرار می‌دهد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز ال-هیدرومتری لس‌های گلستان مقدار Db_H با مقدار ماسه، رابطه منفی دارد؛ یعنی با افزایش ماسه ابعاد فراکتال کاهش می‌یابد، این نتیجه مشابه نتایج تحقیق کیاو^۳ و همکاران (۲۰۲۱) است. نتایج همچنین نشان داد با افزایش رس، عدد Db_H افزایش می‌یابد. این نتیجه با نتایج تحقیق تیرگر سلطانی و همکاران (۲۰۱۲) همخوانی دارد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده مقدار Db_H با افزایش سیلت افزایش می‌یابد که با نتایج کیاو و همکاران (۲۰۲۱) نیز همخوانی دارد.

اگر فرض کنیم منشأ رسوبات برای لس‌های گلستان یکسان بوده، مقادیر متفاوت Db حاکی از تحولات پس از رسوب‌گذاری است. مقدار بالای عدد فراکتال (Db_H) نشان‌دهنده خرد شدن بیشتر و وجود ذرات ریز بیشتر است (سان و همکاران، ۲۰۱۸). بنابراین، طبق نتایج به‌دست‌آمده از Db_H لس‌های منطقه ۱ بیشترین پدوژنز را تحمل کرده‌اند. از آنجایی که با توجه به شاخص دو ماراتن (فیض‌نیا و همکاران، ۲۰۰۵) منطقه ۱ در آب‌وهوای مرطوب قرار دارد، رطوبت باعث افزایش پدوژنز شده و تولید رس افزایش می‌یابد. افزایش رس موجب بالا رفتن عدد فراکتال شده است که با نتایج سان و همکاران (۲۰۱۸) در لس‌های شمال چین همچنین لو و همکاران (۲۰۰۳) مطابقت دارد.

مقدار Db_H در منطقه ۲ نسبت به منطقه ۱ پایین‌تر است که نشان‌دهنده بافت متفاوت لس‌ها در این منطقه است. با توجه به اقلیم این منطقه که نیمه‌خشک است (فیض‌نیا و همکاران، ۲۰۰۵) این تفاوت منطقی به نظر می‌رسد.

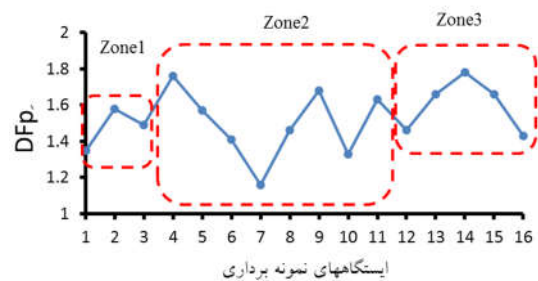


شکل (۱۱): تغییرات مقدار هندسه فراکتال آرایش چگالی فابریک دانه در

ایستگاه‌های نمونه‌برداری شده لس‌های گلستان

Figure (11): Changes in fractal geometry of grain density arrangement in sampled stations of Golestan loess

میانگین هندسه فراکتالی آرایش چگالی فابریک منفذ (DFp) در لس‌های گلستان ۱/۵۲ است که این میانگین در منطقه ۱، ۱/۴۷، در منطقه ۲، ۱/۵ و در منطقه ۳، ۱/۵۹ است (شکل ۱۲).

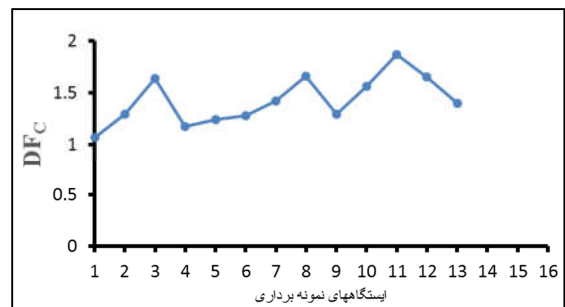


شکل (۱۲): تغییرات مقدار هندسه فراکتال آرایش چگالی فابریک منفذ در

ایستگاه‌های نمونه‌برداری شده لس‌های گلستان

Figure (12): Changes in fractal geometry value of fabric density of pore fabrication at sampled stations of Golestan loess

بررسی تغییرات هندسه فراکتالی آرایش چگالی فابریک سیمان (DFC) در لس‌های گلستان در ایستگاه‌های ۱۶ گانه نشان داد ایستگاه‌های S14، S15 و S16 فاقد سیمان هستند. میانگین هندسه فراکتالی آرایش چگالی فابریک سیمان در لس‌های گلستان ۱/۴۲ است که این میانگین در منطقه ۱، ۱/۳۳، در منطقه ۲، ۱/۴۳ و در منطقه ۳، ۱/۵۲ است (شکل ۱۳).



شکل (۱۳): تغییرات هندسه فراکتالی آرایش چگالی فابریک سیمان در

لس‌های گلستان در ایستگاه‌های ۱۶ گانه

Figure (13): Fractal geometry variations of cement fabric density in Golestan loose at 16 stations

1. Turcotte,
2. Chen and Mu
3. Qiao

است که با نتایج سان و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت دارد. بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده می توان ادعا کرد هندسه فراکتالی قادر است تغییرات پس از نهشته شدن لس ها را تعیین کند.

هندسه فراکتالی ذرات بر اساس روش شمارش جعبه ای

در محیط بادی ذرات درشت (ماسه) به صورت کشتی و ذرات ریز (سیلت و رس) به فرم معلق حرکت می کنند. این تفاوت در حرکت باعث می شود رسوبات بافت مخصوص به خود را داشته باشند. ذراتی که در هوا با سرعت یکنواختی رسوب می کنند، ذرات با تصاویر آئرو دینامیکی گفته می شود که موجب جورشدگی خوب ذرات می شود (موسوی حرمی، ۲۰۰۶). به همین علت بافت اولیه رسوب در زمان رسوب گذاری نظم بالایی دارد و عدد فراکتالی آن ۲ است؛ اما بعد از نهستگی با گذشت زمان، تحت تأثیر فرایندهای ثانویه مانند رطوبت، توپوگرافی، فرسایش، هوازگی و تغییرات اقلیمی تغییرات زیادی در بافت رسوبات به وجود می آید و عدد فراکتالی آن دچار تغییر می شود؛ بنابراین هرچه شاخص ریزساختاری منظم تر باشد، عدد فراکتالی به ۲ نزدیک تر می شود. همان طور که از نتایج پیداست، منطقه ۳ و منطقه ۱ دارای نظم بیشتری از منطقه ۲ هستند. دلیل این امر احتمالاً این است که منطقه ۳ به علت نزدیکی به منشأ دارای نظم زیادی در هنگام رسوب گذاری است؛ بنابراین، عدد فراکتال آن نزدیک ۲ است. در منطقه ۲، ذرات با حمل بیشتر دچار تغییرات زیادی در اندازه و نحوه قرارگیری شده اند؛ بنابراین، عدد فراکتال و نظم دچار تغییر شده و کمتر می شود. بر طبق روند پیش بینی شده می بایست عدد فراکتال منطقه ۱، کمتر از دو منطقه دیگر باشد اما اینطور نیست و بیشترین عدد فراکتال در منطقه ۱ به چشم می خورد. دلیل این امر آب و هوای مرطوب منطقه ۱ است که موجب تشکیل رس ثانویه شده و عدد فراکتال و نظم رسوبات را افزایش می دهد.

نتایج هندسه فراکتال آرایش چگالی فابریک منفذ نشان داد در منطقه ۳ و نزدیک منشأ ذرات درشت ترند و با نظم بیشتری در کنار هم قرار دارند. اندازه منافذ در این منطقه

از آنجا که عدد فراکتال بالا نشان دهنده شدت پدوژنز است و با توجه به اینکه آب و هوای دیرینه منشأ اصلی خرد شدن سنگ ها در نظر گرفته می شود، مقدار Db_H در ایستگاه های نمونه برداری مختومقلی و آق تقه جدید که در آب و هوای خشک هستند (فیض نیا و همکاران، ۲۰۰۵)، باید پایین تر از مناطق دیگر می بود؛ اما این دو ایستگاه دارای Db بالایی هستند. این نتیجه با نتایج سان و همکاران (۲۰۱۸) همخوانی ندارد. دلیل احتمالی این امر را می توان به گستردگی محدوده اندازه ذرات و... ارتباط داد. لو و همکاران (۲۰۰۳) بیان می کنند مقدار Db نشان دهنده بی نظمی در یک سیستم گرنولار^۱ است و همچنین مقدار Db بیشتر، نظم بیشتر توزیع اندازه ذرات و نسبت بیشتر ذرات ریز را نشان می دهد و مقدار Db پایین تر، حاکی از بی نظمی توزیع اندازه ذرات و ذرات ریز کمتر است. لذا دلیل بالا بودن Db را احتمالاً می توان در نزدیکی به منشأ آن جستجو کرد. به طوری که به دلیل نزدیکی به منشأ نسبت به سایر مناطق ذرات در اندازه های مختلف در رسوبات لسی این مناطق بیشتر بوده و همه اندازه ذرات در لس های این مناطق مشاهده می شود (هولتز و کواکس^۲، ۱۹۸۱). از طرف دیگر جورشدگی بد در این دو ایستگاه این احتمال را تقویت می کند.

در منطقه ۳، ایستگاه آلمانگل و آلاگل و کمربندی آق قلا دارای مقادیر Db_H پایین تری نسبت به سایر مناطق بودند. این سه منطقه دارای جورشدگی بهتری از سایر مناطق بوده و اندازه میانه در آنها بیشترین مقدار بوده است. این تفاوت می تواند ناشی از تفاوت منشأ یا محیط تشکیل آنان و حمل مجدد آنان باشد. این مطلب نشان می دهد که مقادیر فراکتال می تواند برای شناسایی رسوبات مختلف کارآمد باشد.

از آنجایی که ابعاد فراکتال در مناطق مختلف مقادیر متفاوتی را نشان داد، به نظر می رسد هندسه فراکتالی با تغییر بافت لس ها تغییر می کند. به طوری که مقدار ابعاد فراکتال بیشتر نشان دهنده شدت خاک زایی بیشتر، نسبت ذرات ریز بیشتر است و توزیع ذرات به صورت خوب دانه بندی شده^۳

1. granular
2. Holtz and Kovacs
3. well graded

مختلف است که جورشدگی بد منطقه این احتمال را تقویت می‌کند.

ایستگاه‌های آلاگل، آلاگل و کمربندی آق‌قلا با جورشدگی بهتر، میانگین اندازه دانه بیشتر، دارای ابعاد فراکتال Db_H پایین‌تر از سایر نقاط هستند. این مطلب نشان می‌دهد که مقادیر فراکتال می‌تواند برای شناسایی رسوبات مختلف کارآمد باشد.

نتایج حاصل از هندسه فراکتالی ذرات بر اساس روش شمارش جعبه‌ای نشان داد ذرات در منطقه ۳ و ۱ از نظم بیشتری از اندازه دانه برخوردارند؛ این امر در منطقه ۱ به علت آب‌وهوای مرطوب و افزایش دیاژنز و مقدار رس بیشتر و در منطقه ۳ به علت نزدیکی منشأ و وجود همه اندازه ذرات بوده که موجب به دست آمدن عدد فراکتال بیشتری در آن‌ها شده است.

ابعاد فراکتال توزیع اندازه ذرات و هندسه فراکتالی ذرات بر اساس روش شمارش جعبه‌ای نتایج همدیگر را تأیید می‌کنند. البته باید در استفاده از ابعاد فراکتال میزان دوری و نزدیکی به منشأ را نیز در نظر گرفت.

مقدار فراکتال توزیع اندازه ذرات و هندسه فراکتالی ذرات بر اساس روش شمارش جعبه‌ای به‌عنوان یک شاخص خوب برای اندازه‌گیری تفاوت اندازه ذرات و شدت پدورژن کارآمد باشد. نتایج نشان داد ابعاد فراکتال PSD و هندسه فراکتالی شمارش جعبه‌ای شامل DFc ، DFp ، DFf در منطقه ۱ و منطقه ۳ مقادیر بیشتری از منطقه ۲ داشتند و نتایج یکدیگر را تأیید می‌کنند. لذا می‌توان ادعا کرد این دو روش همسو هستند. همچنین با توجه به محدودیت‌های تحقیق محاسبه گردشدگی و کرویت از هر دو روش امکان‌پذیر نبود، بنابراین بررسی موارد ذکرشده از هر دو روش و مقایسه آن‌ها با یکدیگر به محققان پیشنهاد می‌شود.

دارای نظم بیشتری است. همچنین، درشتی اندازه دانه‌ها منجر به ایجاد نظم در آرایش آن‌ها می‌شود. در نظم بیشتر، تماس بین دانه‌ها به صورت نقطه‌ای است و فضای متخلخل بیشتری را ایجاد می‌کند (رضایی، ۲۰۱۳). لذا مقدار تراکم کم شده و متخلخل بیشتر می‌شود. از سوی دیگر هرچه به طرف منطقه ۱ می‌رویم، ذرات کوچک‌تر در بین ذرات درشت‌تر قرار گرفته، مقدار DFp کمتر شده و نظم منافذ را از بین می‌برند.

از بررسی تغییرات هندسه فراکتالی آرایش چگالی فابریک سیمان پیداست این مقدار از منطقه ۱ به ۳ افزایش می‌یابد. دلیل این امر مقدار رس موجود در منطقه ۱ است که موجب می‌شود نظم ذرات پیونددهنده دانه‌ها به هم خورده و منافذ از رس پر شوند. در منطقه ۳ چون ذرات رس کمتر است، سیمان به صورت منظم‌تری می‌تواند تشکیل شود. در ایستگاه‌های $S14$ ، $S15$ و $S16$ ، مقدار DFc صفر است. این مناطق فاقد یا دارای مقدار خیلی کمی سیمان است؛ که می‌تواند نشان‌دهنده منشأ متفاوت این لس‌ها یا تأثیر حمل مجدد توسط آب و شسته شدن رس این مناطق باشد.

به طور کلی به نظر می‌رسد روش فراکتال توانایی بیشتری در توصیف اندازه ذرات خاک دارد و می‌تواند جایگزین مثلث بافت خاک شود و اطلاعات بیشتری از توزیع اندازه ذرات نسبت به مثلث بافتی خاک به ما می‌دهد.

نتایج نشان داد ابعاد فراکتال PSD و هندسه فراکتالی شمارش جعبه‌ای شامل DFc ، DFp ، DFf در منطقه ۱ و منطقه ۳ مقادیر بیشتری از منطقه ۲ داشتند.

نتیجه‌گیری

یافته‌های قبلی نشان داد هرچه رطوبت منطقه بیشتر باشد، پدورژن بیشتر خواهد شد و هرچه مقدار رس بیشتر باشد، عدد فراکتال بیشتر می‌شود. نتایج ابعاد فراکتال توزیع اندازه ذرات نشان داد لس‌های منطقه ۱ بیشترین پدورژن را تحمل کرده و دارای Db_H بالاتری هستند. لس‌های ناحیه ۲ Db_H پایین‌تری نسبت به منطقه ۱ داشته‌اند که با توجه به اقلیم نیمه‌خشک منطقه مطالعه، طبیعی به نظر می‌رسد. در ناحیه ۳ و نزدیک منشأ Db_H بالاتری از دو منطقه دیگر داشت که احتمالاً به دلیل نزدیکی به منشأ و وجود ذرات در اندازه

منابع

- An, Z.S., Kukla, G.J., Porter, S.C. and Xiao, J.L., 1991. Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the Loess Plateau of central China during the last 130,000 years. *Quat. Res.* 36, 29–36.
- Baas, A.C.W., 2002. Chaos, fractals and self-organization in coastal geomorphology: simulating dune landscapes in vegetated environments. *Geomorphology* 48.
- Bird, N. R. A., Perrier, E., Rieu and M., 2000. The water retention function for a model of soil structure with pore and solid fractal distributions. *European Journal of Soil Science*, 51(1), 55-63.
- Chen, D.M. and Mu, G.J., 2004. Comparising study of grain-size fractal dimensions characteristics between several sediments with different forming environments. *Arid Geogr.* 27, 47–51.
- Feyznia, S., Ghauomian, J. and Khajeh, M., 2005. "The study of the effect of physical, chemical and climate factors on surface erosion sediment yield of loess soils (Case study in Golestan Province)", *Pajouhesh and Sazandegi* No. 66: 14-24. (in persian)
- Ghandhari, S., Amini, A., Solgi, A. and Rezaei, H., 2019. Analysis of loess sediment texture in Golestan province according to the microstructure parameters. *Iranian Journal of Earth Sciences*. Vol. 11, No. 4, 2019, 244-255.
- Golestan Governorate, 2016. *Statistical Yearbook of Golestan Province* (in persian).
- Holtz, R.D. and Kovacs, W.D., 1981. *An introduction to geotechnical engineering*. Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, N.J. 30p.
- Jefferson, I.F., Evstatiev, D., Karastanev, D., Mavlyanova, N.G. and Smalley, I.J., 2003. *Engineering geology of loess and loess-like deposits: a commentary on the Russian literature*. *Engineering Geology*, 68: 333–351.
- Jeong, G.Y., Hillier, S. and Kemp, R.A., 2008. Quantitative bulk and single-particle mineralogy of a thick Chinese loess–paleosol section: implications for loess provenance and weathering. *Quat. Sci. Rev.* 27, 1271–1287.
- Khadjeh, M., Ghayoumian, J. and Feyznia, S., 2005. Investigating the lateral variation of particle size and mineralogy to determine the dominant winds in the formation of sedimentary deposits in Golestan province, *International Desert Research Center (IDRC)* 9:11-25 (in persian).
- Lu, P., Jefferson, I.F., Rosenbaum, M.S. and Smalley, I.J. 2003. Fractal characteristics of loess formation: evidence from laboratory experiments. *Eng. Geol.* 69, 287–293.
- Liu, T.S. 1985. *Loess and the Environment*. China Ocean Press, Beijing.
- Liu, L.W., Chen, J., Ji, J.F., Lu, H.Y. and Chen, Y., 1999. Grain-size fractal dimension of loess-paleosol and its significance. *Geol. J. China Univ.* 5, 412–417.
- Minasny, B., Stockmann, U., Hartemink, A.E. and McBratney, A.B., 2016. *Measuring and Modelling Soil Depth Functions*. In: Hartemink, E.A., Minasny, B. (Eds.), *Digital Soil Morphometrics*. Springer, Switzerland, pp. 225–240.
- Mandelbrot, B., 1967. "How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension", *Science, New Series*, 156(3775): 636-638.
- Mousaviharami, R., 2006. *Foundations of Sedimentology*. Beh nashr (Astan Quds Razavi Publishing), (in persian), Mashhad (in persian).
- Mohammadi, M., Ekhtesasi, M., Talebi, A., Hosseini, Z., 2020. Investigation of the relationship between fractal dimensions of the drainage networks and their morphometric properties (Case Study, Yazd-Ardakan Basin), 9(2), 1-16. doi: 10.29252/aridbiom.2020.1812. (in persian).
- Mohammadi, M., SHabanpour, M., Mohammadi, M. and Davatgar, N., 2019. Characterizing spatial variability of soil textural fractions and fractal parameters derived from particle size distributions. *Pedosphere* 29, 2. 224–234.
- Nikooee, E., Haydari, M., Tlebbeydokhti, N. and Hekmatzadeh, A., 2008. *Fractal Geometry in River Engineering: Ideas, Essentials, and Achievements*. 4th National Congress of Civil Engineering, University of Tehran, Iran 6 May 2008.
- Pye, K., 1995. The nature, origin and accumulation of loess. *Quaternary Science Reviews* 14, 653-667.
- Qiao, J., Zhu, Y., Jia, X. and Shao, M. A., 2021. Multifractal characteristics of particle size distributions (50–200 m) in soils in the vadose zone on the Loess Plateau, China. *Soil and Tillage Research*, 205, 104786.
- Rezaei, h., 2013. An investigation of dynamic compaction and static loads on shear strength of loess's soils in golestan province. *Ferdowsi university*. 96 (in persian).
- Romero, E. and Simms, P.H., 2008. *Microstructure investigation in unsaturated soils: a review with special attention to contribution of mercury intrusion porosimetry and environmental scanning electron microscopy*. *Geotech Geol.*
- Shadroo, Sh., Maarefdost, R., yaghobi, M. and pourreza, h., 2007. Image segmentation using multi-fractal estimation, entropy and fuzzy clustering. *First Joint Congress on Fuzzy and Intelligent Systems Ferdowsi University of Mashhad, Iran* 29-31 (in persian).
- Song, Z., Zhang, C., Liu, G., Qu, D. and Xue, S., 2015. Fractal feature of particle-size distribution in the rhizospheres and bulk soils during natural recovery on the Loess Plateau, China. *PloS one*, 10(9), e0138057.
- Schaetzl, R.J. and Anderson, S., 2005. *Soils: Genesis and Geomorphology*. Cambridge

- University Press, New York.
28. Su, Y. Z., Zhao, H. L., Zhao, W. Z. and Zhang, T. H., 2004. Fractal features of soil particle size distribution and the implication for indicating desertification. *Geoderma*, 122(1), 43-49.
 29. Sun, C. G., Dong-Soo, K. and Choong-Ki, C., 2004. Geotechnical information system based on GIS in gyeongju and hongsung for seismic design and hazard mitigation.
 30. Sun, Z. X., Owens, P. R., Han, C. L., Chen, H., Wang, X. L. and Wang, Q. B., 2016. A quantitative reconstruction of a loess-paleosol sequence focused on paleosol genesis: an example from a section at Chaoyang, China. *Geoderma* 266:25-39.
 31. Sun, Z. X., Jiang, Y. Y., Wang, Q. B. and Owens, P. R., 2018. A fractal evaluation of particle size distributions in an eolian loess-paleosol sequence and the linkage with pedogenesis. *Catena* 165, 80-91.
 32. Taşdemir, A., 2009. Fractal evaluation of particle size distributions of chromites in different comminution environments. *Miner. Eng.* 22, 156-167.
 33. Tirgar Soltani, M.T., Zolfaghari, A.A., Gorgi, M. and Sharafa, M., 2012. Investigating the Applied Limitations of Power Functions in Describing the Soil Particle Size Distribution *Iranian Journal of Soil Research* 26.(1)67(in persian)
 34. Turcotte, D. L., 1986. Fractals and fragmentation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978-2012) 91(B2), 1921-1926.
 35. Xiao, L., Xue, S., Liu, G. and Zhang, C., 2014. Fractal features of soil profiles under different land use patterns on the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Land*, 6(5), 550-560.
 36. Zhao, P., Shao, M. and Zhuang, J., 2009. Fractal features of particle size redistributions of deposited soils on the dam farmlands. *Soil science*, 174(7), 403-407.
 37. Zhang, W., Guo, S.L., Li, Y.H. and Li, Y.Y., 2010. Grain-size fractal dimension of loess and its environmental significance in the Peninsula of East Liaoning. *Prog. Geogr.* 29, 79-86.
 38. Zhang, H., Xie, J., Han, J., Nan, H. and Guo, Z., 2020. Response of Fractal Analysis to Soil Quality Succession in Long-Term Compound Soil Improvement of Mu Us Sandy Land, China. *Mathematical Problems in Engineering* 2020, 7. Research Article.

Fractal Analysis of Post-Deposition Changes of the Golestan Province's Loess Texture

Somayeh ghandhari¹, Arash amini^{2*}, Ali solgi³, Hamed rezaei⁴

Received: 08/05/2020

Accepted: 02/02/2021

Expanded abstracts

Introduction: Particle size distribution (PSD) is one of the sediments' most important physical properties, affecting other physicochemical properties. Fractals are the objects or processes that show a similar appearance or behavior on some large, spatial, or temporal scale. Each fractal can be divided into several parts, each of which resembles the main body. Many natural phenomena and processes are based on fractal models. Loess particles maintain good self-similar properties even when modified through pedogenesis so that the fractal dimension of their particle size is considered as a new indicator of particle size. The loess sequences, produced by aeolian under the influence of past weather changes, have been transported, deposited, and undergone many changes by pedogenesis, whose information is recorded in loess particles. By studying the PSD loess, which is a natural fractal, one can discover data about the past environment. Therefore, PSD changes can be used to indicate the pedogenesis intensity and process or the soil age.

Post-depositional pedogenesis, including chemical and biological weathering, causes further particle crushing, the extent of which may vary in different locations due to deposition PSD and the time and intensity of pedogenesis or some other factors. Typically, intense pedogenesis or poor to very poor sorting occurs in warm and humid climates, while poor pedogenesis occurs in cold and dry climates. Changes in the loess texture reflect its post-deposition conditions. Thus, this study sought to analyze Golestan's loess texture developments via fractal PSD for the first time, which could interpret the extent of tissue changes at different points. The results were then compared to the fractal geometry obtained from the electron microscope images.

Materials and methods: This study was conducted in Golestan province. The study area is located at latitudes of 38° 8' to 36° 30'N and longitudes of 53° 57' to 56° 22' E. Based on three types of loess texture, including sand loess, silt loess, and clay loess, sixteen samples were totally collected from three zones. Moreover, the fractals were measured using differential box-counting and PSD. The PSD fractal was calculated by sieve-hydrometric (DbH) and laser (DbL) methods.

Result: The mean DbH for region 1 was 2.64 and region 2 was 2.30. DbH in region three differed in two values. For two regions S12 and S13, the values of DbH are 2.74 and 2.70 and for S 14, S15 and S16 are 2.62, 1.06 and 2.24 respectively. Also, the results showed a mean of 4.37 microns and sorting is very poorly (mean $\phi = 2.96$) for region one, a mean of 14.35 microns and sorting is very poorly (mean $\phi = 3.17$) for region two and a mean of 49.56 microns with two different sorting values show very poorly sorting (mean $\phi = 2.28$) at S13 and S12 stations and sorting poorly (mean $\phi = 1.78$) at stations S16, S15, S14 for zone three. The average fractal grain dimension in region one is 0.673 in region two is 0.788 and in region three is 0.850. The fractal dimensions of the grain surface in region one have an average of 0.51 in region two is 0.49 and in region three is 0.50. The average value of fractal geometry of grain density arrangement (DFf) is 1.94 in region one, 1.87 in region two and 1.91 in region three. The average fractal arrangement of pore fabric density (DFp) in region one is 1.47 in

1. Department of Earth Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2. Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Golestan University, Gorgan, Iran; a.amini@gu.ac.ir

3. Associate Professor, Department of Earth Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

4. Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Golestan University, Gorgan, Iran

DOI: 10.22052/deej.2021.10.31.31

region two and 1.5 in region three is 1.59. The fractal geometry of the cement fabric density arrangement is 1.33 in region one, 1.43 in region two and 1.52 in region three.

Discussion and conclusion: The results of examining DbH dimensions in the loess of Golestan province show that the percentage of sand decreases and the clay content increases with the increase of DbH. Comparison of fractal with sediment textual parameters indicate that the number of sorting increases and the sorting of particle decreases with the increase of DbH. This means that the samples have a better gradation of PSD and a larger volume of particle size classes. The kurtosis index decreases with the increase of DbH and the curvature broadening increases as a result of the increase of the particle size classes.

The results of examining DbL fractal dimensions in the loess of Golestan province show that the percentage of sand decreases and the silt and clay contents increase with the increase of DbL. Based on the results of laser sizing, the increased silt and clay contents lead to a better gradation of sediments. The negative trend of particle sorting against DbL means that the sorting index decreases and the particle sorting increases with the increase of DbL. The positive trend of kurtosis against DbL means that the kurtosis index increases and the curvature broadening decreases with increase of DbL.

Three stations of AlmaGol, AlaGol and Agh Ghala Belt in zone 3 had lower DbH and DbL, better sorting, and the highest median size. This may be due to the differences in the sediments' origins or forming environment and retransfer. This implies that the fractal values can be useful for identifying the transfer mechanism in different sediments.

The fractal geometry changes with the changes in loess texture. Therefore, a higher fractal dimension content indicates a higher soil formation and higher fine particle ratios. According to the results, if particle distribution is well graded, it can be claimed that fractal geometry demonstrates the changes after loess deposition. According to the fractal results obtained from electron microscope images in Golestan loess, the fractal dimensions of the grain increased with the increase of diameter. This confirms that near the source, grains are deposited with higher order and away from the source, the fractal number becomes smaller as the grain size decreases. The fractal dimensions of the grain decrease with the increase of particles roundness from zone 3 (near the source) to zone 1 (away from the source). This implies that the sediment's order decreases and the texture undergoes less changes with the increase of particles roundness. On the other hand, the fractal grain dimensions increase with the increase of sphericity. Since the sphericity decreases from zone 3 to zone 1, the fractal number of grain dimensions decreases. This means that a higher sphericity leads to a higher initial order of the sediment and less texture exposure to changes.

The fractal geometry values of the grain fabric density of the fabric in different parts of Golestan province are not equal. Zones 3 and 1 have a higher order than zone 2. Zone 3, with the fractal number close to 2, has a high order during the deposition due to its proximity to the source. In zone 2, with a farther transfer, the particles have been highly subjected to changes in size and arrangement, and thereby the fractal number and order have been subjected to changes and decline. The highest fractal number is seen in zone 1. This can be due to the humid climate in zone 1, which induces the formation of secondary clay and increases the fractal numbers and sediment order. These results show that the content of clay can determine the order and homogeneity of the sediment texture. It can be concluded that fractal and its related parameters, as an efficient tool in analysis of loess sediment, can justify the zone of texture changes, distance from the main source, pedogenesis and climate and The results of DbH dimensions analysis in Golestan province's loess showed that the percentage of sand decreased, and the clay content increased with an increase in DbH. Comparing the fractal with textual sediment parameters indicated that the number of sorting increased and the particle sorting decreased with an increase in DbH, suggesting that the collected samples had a better PSD grading and a larger volume of particle size classes. Moreover, it was found that the kurtosis index decreased with an increase in DbH, and the curvature broadening increased with an increase in particle size classes.

The results of DbL fractal dimensions analysis in Golestan loess showed that the percentage of sand decreased, and the silt and clay contents increased with an increase in DbL. Furthermore, according to the results of laser sizing, the increased silt and clay contents led to a better sediments gradation. A negative trend of particle sorting against DbL means that the sorting index decreased and the particle sorting increased with an increase in DbL. on the other hand, a positive trend of kurtosis against DbL means that the kurtosis index increased and the curvature broadening decreased with an increase in DbL.

Three stations, including AlmaGol, AlaGol, and Agh Ghala Belt in zone 3, had lower DbH and DbL, better sorting, and the largest median size, which could be due to the differences in the sediments' origins or the environment's form and retransfer, implying that the fractal values could help identify the transfer mechanism in different sediments.

The fractal geometry would change with the changes made in loess texture. Therefore, a higher fractal dimension content indicates a higher soil formation and higher fine particle ratios. According to the study's results, should the particle distribution is well graded, it can be claimed that fractal geometry demonstrates the post-deposition changes in the loess. Based on the fractal results obtained from electron microscope images in

Golestan loess, the grain's fractal dimensions increased with an increase in diameter, indicating that the grains are deposited with higher-order near the source, and the fractal number becomes smaller with the decrease in the grains' size away from the source. It was also found that from zone 3 (near the source) to zone 1 (away from the source), the grains' fractal dimensions decreased with an increase in particles roundness, implying that the sediments' order decreased and the texture underwent fewer changes with an increase in particles roundness. On the other hand, the grains' fractal dimensions increased with an increase in sphericity. Therefore, as the sphericity decreased from zone 3 to zone 1, the fractal number of grain dimensions decreased too, indicating that higher sphericity led to a higher initial order of the sediment and less texture exposure to changes.

The fractal geometry values of the grain's fabric density in different parts of Golestan province are not equal. Therefore, zones 3 and 1 had a higher order than zone 2. Due to its proximity to the source, zone 3, with the fractal number close to 2, had a high order during the deposition. In zone 2, with a farther transfer, the particles were highly subjected to changes in size and arrangement, and thereby the fractal number and order were subjected to changes and decline. Moreover, zone 1 was found to have the highest fractal number because of its humid climate, inducing secondary clay formation and increasing the fractal numbers and sediment order.

These results suggest that the content of clay can determine the order and homogeneity of the sediment's texture. Therefore, it can be concluded that as an efficient tool in analyzing loess sediment, fractal and its related parameters can justify the zone of texture changes, distance from the main source, pedogenesis, and climate, and determine the model of post-deposition changes.

keywords: Texture analysis, Fractal particle size distribution, Defferential Box counting, Loess.