

رهیافت‌های جدید در بررسی تطبیقی نتایج دانه‌بندی لیزری و هیدرومتری رسوبات ریزدانه (مطالعه موردی: لس‌های استان گلستان)

آرش امینی^{۱*}، سمیه قندهاری^۲ و حامد رضایی^۳

۱ و ۳- استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گرگان

۲- دانش‌آموخته دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران

نویسنده مسئول: amini@gu.ac.ir

دریافت: ۹۸/۱۲/۱۹ پذیرش: ۹۹/۲/۲۴

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

لس‌ها رسوبات بادرفتی سست با مقدار زیاد سیلت درشت، بدون لایه‌بندی و با قابلیت نفوذپذیری بالا هستند که عمدتاً به رنگ زرد تا قهوه‌ای کم‌رنگ دیده می‌شوند. استان گلستان واقع در شمال‌خاور ایران یکی از گسترده‌ترین پهنه‌های لسی ایران است که به‌عنوان حلقه ارتباطی بین لس‌های آسیای مرکزی و اوراسیا شناخته می‌شود. در این پژوهش خصوصیات بافتی و مقادیر سیلت و ماسه و رس در دو روش دانه‌بندی ال-ک- هیدرومتری و لیزری در ایستگاه‌های شانزده‌گانه نمونه‌برداری مقایسه می‌شود. نتایج همبستگی بین ماسه، سیلت و رس اندازه‌گیری شده توسط دو روش حاکی از تفاوت در نسبت مقادیر ذرات می‌باشد. همبستگی ضعیفی بین نتایج ال-ک- هیدرومتری و لیزری در رسوبات لسی استان گلستان وجود دارد و بجز ماسه رگرسیون مقدار خیلی ضعیف در بخش سیلت و رس را نشان می‌دهد که دلیل آن را می‌توان تفاوت در اصول اندازه‌گیری دانست. از آنجایی که تجزیه و تحلیل هیدرومتری بر اساس سرعت رسوب ذرات است، سرعت بصورت ثابت فرض شده، چگالی ذرات برابر ذره کوارتز محسوب شده و ذرات به صورت کروی و صاف در نظر گرفته می‌شود. همچنین نتایج نشان داد مقدار ذرات رس در آنالیز هیدرومتری بسیار بیش‌تر از نتایج آنالیز لیزری است که به دلیل کانی‌شناسی متفاوت ذرات رس می‌باشد. در روش هیدرومتری این موضوع موجب تخمین بیش از حد ذرات صفحه‌ای شکل می‌شود. دستگاه آنالیز لیزری قطر متوسط ذرات را اندازه‌گیری می‌کند اما ال-ک اندازه قطر بزرگ ذرات را به ما می‌دهد. همین موضوع موجب تفاوت اندازه‌گیری ذرات در اندازه ماسه می‌شود.

واژگان کلیدی: لس، ال-ک- هیدرومتری، دانه‌بندی لیزری، گلستان

۱- پیشگفتار

مقایسه‌ای و با تعداد نمونه‌های قابل قبول از نظر آماری در لس‌های گلستان انجام گرفته است (قندهاری، ۱۳۹۸). روش‌های سنتی پیت و هیدرومتری از ابتدای قرن بیستم برای تشخیص دانه‌بندی رسوبات ریزدانه مورد استفاده قرار می‌گیرد در حالی که استفاده از روش لیزری از ابتدای سال ۱۹۷۰ میلادی آغاز و در ۲۰ سال اخیر در رسوب‌شناسی کاربردی، توسعه قابل‌توجهی یافته است. استفاده از روش استاندارد ال-ک- هیدرومتری برای تجزیه و تحلیل رسوبات نیازمند مقدار زیادی مواد (بیش از ۳۰ گرم) بوده، خسته‌کننده و وقت‌گیر و معمولاً در معرض خطای انسانی هستند. در طی چند دهه گذشته، روش آنالیز لیزری برای تحلیل و توزیع ذرات ریزدانه و پودرها در داروسازی، صنایع غذایی، پلیمر و علوم دیگر مورد

تجزیه و تحلیل اندازه رسوبات می‌تواند اطلاعات کلیدی در خصوص حمل و نقل، رسوب‌گذاری و محیط‌های رسوبی مختلف در اختیار ما قرار دهد (پای و بلات، ۲۰۰۴). در ایران تاکنون مطالعه اغلب دانه‌بندی رسوبات ریزدانه با روش‌هایی سنتی بیش‌تر مرسوم مانند پیت یا هیدرومتری و روش‌های کمتر مرسوم مانند سدیگراف و هیدرافتومتر (کوتر و هولسه، ۱۹۸۵) و اخیراً هم روش‌های مدرن لیزری و اسپکتروفتومتر (قاسمی، ۱۳۹۵) به صورت مجزا انجام گرفته ولی استفاده از این روش‌ها به صورت مقایسه‌ای و تطبیقی کمتر صورت گرفته است. در این تحقیق برای اولین بار در کشور آنالیزهای هیدرومتری و لیزری به صورت همزمان و

لیزری در پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی صورت گرفت.

۳- آزمایش دانه‌بندی

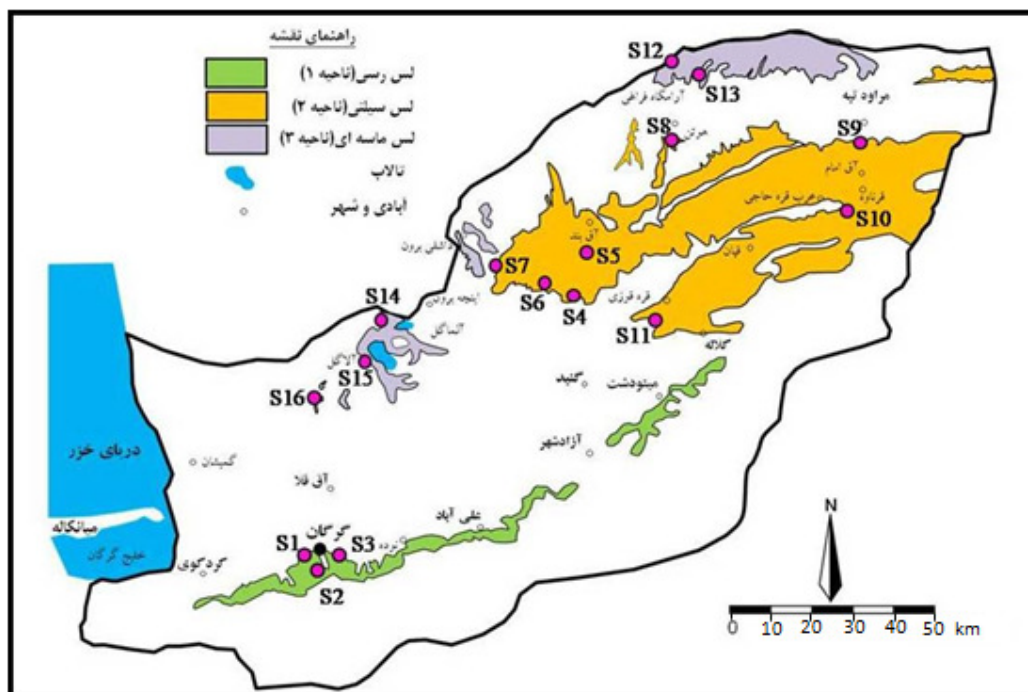
۳-۱- روش الک و هیدرومتری

دانه‌بندی لس‌ها پس از آماده‌سازی اولیه نمونه‌ها، براساس روش غربال خشک و با استفاده از دستگاه شیکر صورت گرفت. در ابتدا ۵۰۰ گرم از هر نمونه از رسوبات خشک‌شده با ترازوی حساس تا یک‌صدم به‌دقت وزن شد و با استفاده از الک‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۲۳۰ میکرون و با استفاده از الک‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۲۳۰ میکرون مش غربال شدند. سپس بعد از اتمام کار رسوبات هر طبقه به‌طور مجزا با دقت ۰/۰۱ وزن شدند. برای انجام آزمایش هیدرومتری ۵۰ گرم از رسوب عبوری از الک شماره ۲۳۰ کنار گذاشته شد. محلول جداکننده با غلظت ۴۰ گرم هگزامتاسفات سدیم ($NaPO_3$) در ۱ لیتر آب مقطر تهیه و سپس ۱۲۵ سی‌سی محلول جداکننده با ۵۰ گرم رسوب عبوری مخلوط گردید. بر اساس آیین‌نامه (ASTM D422-63 (2007)، با استفاده از نتایج الک و هیدرومتری منحنی رسوبی در محیط اکسل ترسیم گردید.

استفاده قرار گرفته و در رسوب‌شناسی برای تحلیل دانه‌بندی رسوبات ریزدانه مورد استفاده قرار می‌گیرد که به مقدار کمی از نمونه (حداکثر ۴ گرم) نیاز داشته، و طیف گسترده‌ای از اندازه دانه‌ها را پوشش داده و اندازه‌گیری آن‌ها بسیار سریع است. نتایج پراش لیزر معمولاً بسیار دقیق است و طبقه‌بندی و کلاس‌های جزئی اندازه رسوبات را مشخص می‌کند.

۲- روش مطالعه

ابتدا با توجه به نقشه استان گلستان (۱:۱۰۰۰۰۰) پراکندگی لس‌های استان بررسی و نمونه‌های منتخب در سه ناحیه لس‌های رسی (ناحیه ۱)، لس‌های سیلتی (ناحیه ۲) و لس‌های ماسه‌ای (ناحیه ۳) و در ۱۶ ایستگاه با توجه به توزیع جغرافیایی مناسب، راه‌های دسترسی و وجود ترانشه مناسب برای انجام آزمایش‌های مختلف انتخاب شدند. سعی شده نمونه‌ها از قسمت‌های دست‌نخورده فاقد هوازدگی انتخاب شوند. شماره نمونه‌ها و موقعیت هر ایستگاه نمونه‌برداری در جدول ۱ و جایگاه هر ایستگاه در نقشه استان گلستان در شکل ۱ نمایش داده شده است. بر روی نمونه‌ها آزمایشات الک-هیدرومتری در آزمایشگاه دانشگاه گلستان و دانه‌بندی



شکل ۱. نقشه پراکنش سه تیپ لس در استان گلستان و ایستگاه‌های نمونه‌برداری

جدول ۱. نام و موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری

ناحیه	محل	ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
۱	سعدآباد	S1	۵۴° ۳۷' ۴۱"	۳۶° ۸۰' ۹۷"
	گلند فخرآباد	S2	۵۴° ۴۱' ۵۴"	۳۶° ۸۲' ۴۹"
	نصرآباد	S3	۵۴° ۳۷' ۴۱"	۳۶° ۸۱' ۸۸"
۲	دوراهی آق بند	S4	۵۵° ۰۲' ۵۵"	۳۲° ۷۴' ۱۷"
	شمال شرق آق بند	S5	۵۵° ۱۳' ۳۵"	۳۴° ۳۶' ۵۲"
	شمال گنبد	S6	۵۵° ۰۵' ۲۲"	۳۳° ۰۹' ۶۳"
	داشلی برون	S7	۵۴° ۵۳' ۰۵"	۳۱° ۳۵' ۴۷"
	هوتن	S8	۵۵° ۲۸' ۲۸"	۳۶° ۵۹' ۲۲"
	مسکن مهر مراوه‌تپه	S9	۵۵° ۵۷' ۱۹"	۴۰° ۸۱' ۵۱"
	چنارلی	S10	۵۵° ۵۱' ۴۱"	۳۹° ۹۶' ۷۰"
	روستای تمرقره قوزی	S11	۵۴° ۳۰' ۰۹"	۳۶° ۷۶' ۱۴"
۳	آق تقه جدید	S12	۵۵° ۳۹' ۳۷"	۳۸° ۲۳' ۴۸"
	مختومقلی	S13	۵۵° ۳۹' ۳۹"	۳۸° ۲۳' ۴۸"
	آلماگل	S14	۵۴° ۳۸' ۱۲"	۲۹° ۰۸' ۸۸"
	الاگل	S15	۵۴° ۳۳' ۲۷"	۲۸° ۳۶' ۹۱"
	کمربندی آق قلا	S16	۵۴° ۲۶' ۰۴"	۲۷° ۱۷' ۳۰"

۳-۲- اندازه‌گیری دانه‌ها به وسیله لیزر^۱

تعداد ۱۶ نمونه به آزمایشگاه زمین‌شناسی دریا در پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی منتقل و دانه‌بندی آن‌ها پس از آماده‌سازی اولیه نمونه‌ها با استفاده از دستگاه آنالیز لیزری توزیع اندازه ذرات^۲ HORIBA مدل LA 950 صورت گرفت.

۴- بحث

مقدار ماسه، سیلت و رس موجود در ایستگاه‌های ۱۶ گانه استان گلستان اندازه‌گیری شده و توسط دو روش آنالیز لیزری و الک- هیدرومتری در جدول ۲ آورده شده است. نتایج همبستگی بین ماسه، سیلت و رس اندازه‌گیری شده توسط دو روش در جدول ۳ و شکل ۲ گزارش شده است.

به عقیده کوتز و هولسه (۱۹۸۵) از آنجا که صحت و دقت اندازه‌گیری اندازه رسوبات ریزدانه در روش‌های مختلف بر اساس طول بزرگ‌ترین قطر، حجم، وزن و سایر معیارهای کمی صورت می‌پذیرد، معمولاً سبب گوناگونی و اختلاف نتایج به دست آمده در روش‌های مختلف با یکدیگر

خواهد گردید. از سوی دیگر مورفولوژی صفحه‌ای گروهی از کانی‌های رسی مانند ایلیت و اسمکتیت به اختلاف نتایج به دست آمده ذرات در اندازه رس در مقایسه روش‌های سنتی مانند پیپت و هیدرومتری در مقایسه با لیزر موثر است (بوسلینک و همکاران، ۱۹۹۸).

از آنجایی که تمرکز مطالعات قبلی بر روی دانه‌بندی لس‌ها یا طبق نتایج الک- هیدرومتری و یا لیزر هستند، در مقایسه نتایج ناهمگونی بوجود می‌آید. در این مطالعه احتمالاً برای اولین بار در ایران بصورت توأم در تعداد نمونه‌های زیاد با دو روش در لس‌ها مقایسه‌ای بین نتایج الک- هیدرومتری و روش لیزری صورت گرفته است. نتایج همبستگی بین ماسه، سیلت و رس اندازه‌گیری شده توسط دو روش در جدول ۳ گزارش شده است که حاکی از تفاوت زیاد در مقادیر ذرات می‌باشد. همبستگی ضعیفی بین نتایج الک- هیدرومتری و لیزری در رسوبات لسی استان گلستان در ایستگاه‌های ۱۶ گانه مورد مطالعه وجود دارد و بجز ماسه رگرسیون مقدار همبستگی خیلی ضعیف در بخش سیلت و رس را نشان می‌دهد. در مقایسه نتایج لیزر و الک - هیدرومتری باید در نظر داشت که اصول اندازه‌گیری متفاوت هستند. تجزیه و تحلیل هیدرومتری بر اساس سرعت رسوب ذرات است،

¹ Lazer particle sizer

² Laser Scattering Particle Size Distribution

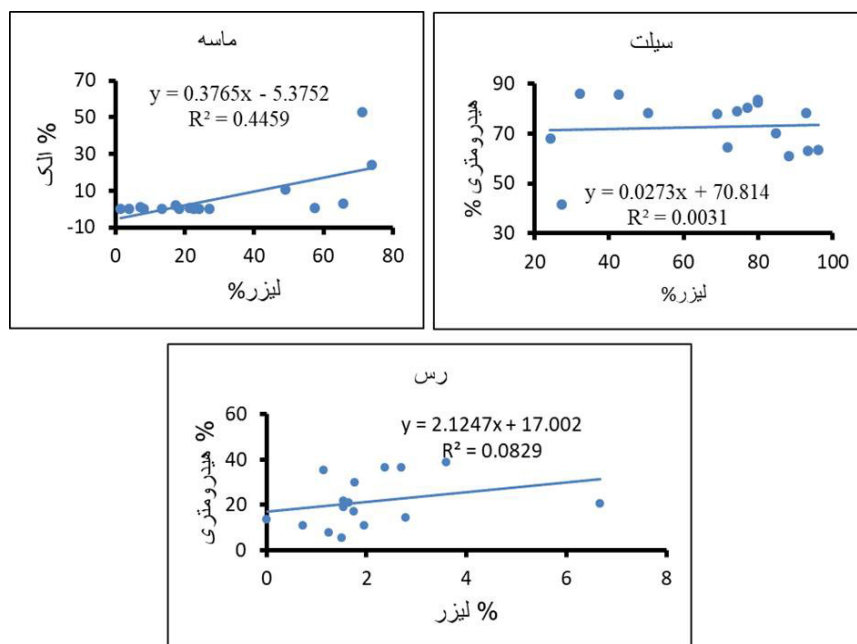
حجم برابر است بنابراین منطقی است که نتایج لیزر محدوده درشت‌تری از اندازه دانه‌ها را به ما ارائه دهد. تحقیقات جدید انجام شده توسط شن و همکاران (۲۰۲۰) با آنالیز ۱۰۰ نمونه از رسوبات لسی در منطقه هایوان در شمال چین و جنوب مرز مغولستان اعتبار و صحت این نظریه را در رسوبات لسی مانند رسوبات ریزدانه در سایر محیط‌های رسوبی تایید می‌نماید.

سرعت ته‌نشینی بصورت ثابت فرض شده، چگالی ذرات برابر ذره کوارتز محسوب شده و ذرات به صورت کروی و صاف در نظر گرفته شده است. در آزمون با دستگاه لیزر قطر ذرات معادل یک کره در نظر گرفته می‌شود (راماسوامی و راتو، ۲۰۰۶).

جونز (۱۹۹۱) بیان می‌کند مساحت تصویری از یک ذره غیرکروی به طور متوسط بسیار بزرگ‌تر از یک کره با

جدول ۲. توزیع اندازه ذرات در لس‌های گلستان و بافت آن‌ها بر طبق نتایج الک - هیدرومتری و دانه‌بندی لیزری

آنالیز لیزری				الک - هیدرومتری				ایستگاه
درصد رس	درصد سیلت	درصد ماسه	بافت خاک	درصد رس	درصد سیلت	درصد ماسه	بافت خاک	
۳/۵۹	۸۸/۳۶	۸/۰۵	Silt	۳۸/۸۸	۶۱	۰/۱۲	silty clay loam	S1
۲/۳۷	۹۶/۱۹	۱/۴۴	Silt	۳۶/۵۶	۶۳/۴۰	۰/۰۴	silty clay loam	S2
۲/۶۹	۹۳/۳۲	۳/۹۹	Silt	۳۶/۷۲	۶۳	۰/۳۸	silty clay loam	S3
۶/۶۷	۸۶/۱۷	۷/۱۶	Silt	۲۰/۸۳	۷۸/۱۵	۱/۰۲	silty loam	S4
۲/۷۸	۷۹/۸۵	۱۷/۳۶	Silty loam	۱۴/۵۷	۸۳/۵۴	۱/۹۰	silty loam	S5
۰/۷۳	۵۰/۳۸	۴۸/۸۹	Silty loam	۱۰/۹۹	۷۸/۱۶	۱۰/۸۵	silty loam	S6
---	۴۲/۴۷	۵۷/۵۳	sandy loam	۱۳/۷۷	۸۵/۷۹	۰/۴۴	silty loam	S7
۱/۶۴	۷۴/۳۴	۲۴/۰۱	Silty loam	۲۰/۹۲	۷۸/۹۹	۰/۰۸	silty loam	S8
۱/۵۳	۷۵/۸۶	۲۲/۶۱	Silty loam	۲۲/۰۱	۷۷/۹۶	۰/۰۳	silty loam	S11
۱/۷۶	۸۴/۷۶	۱۳/۴۶	Silt	۲۹/۸۹	۷۰/۰۳	۰/۰۸	silty loam	S12
۱/۱۴	۷۱/۷۱	۲۷/۱۳	Silty loam	۳۵/۵۷	۶۴/۳۹	۰/۰۴	silty loam	S13
۱/۷۴	۷۹/۸۸	۱۸/۳۶	Silty loam	۱۷/۳۴	۸۲/۵۹	۰/۰۷	silty loam	S9
۱/۵۳	۷۷/۰۴	۲۱/۴۲	Silty loam	۱۹/۳۱	۸۰/۱۸	۰/۵۱	silty loam	S10
۱/۵	۲۷/۳۹	۷۱/۱	sandy loam	۵/۵۸	۴۱/۵۵	۵۲/۸۷	sandy loam	s14
۱/۹۵	۳۲/۲۳	۶۵/۸۱	sandy loam	۱۱/۰۲	۸۵/۹۴	۳/۰۴	Silt	s15
۱/۲۴	۲۴/۲۷	۷۴/۴۹	loamy sand	۷/۸۵	۶۷/۸۹	۲۴/۲۵	silty loam	s16



شکل ۲. نتایج همبستگی بین ماسه، سیلت و رس اندازه‌گیری شده توسط دو روش الک-هیدرومتری و آنالیز لیزری

جدول ۳. نتایج همبستگی بین ماسه، سیلت و رس اندازه‌گیری شده توسط دو روش الک-هیدرومتری و آنالیز لیزری

نوع رسوب	همبستگی	R2
ماسه	$y = 0.3765x - 5.3752$	۰/۴۴
سیلت	$y = 0.0273x + 70.814$	۰/۰۰۳۱
رس	$y = 2.1247x + 17.002$	۰/۰۸۲

مقدار رس در آنالیز لیزری پایین‌تر از مقدار رس در نتایج هیدرومتري و هم‌چنین مقدار سیلت در نتایج آنالیز لیزری نسبت به هیدرومتري بیش‌تر باشد. در مورد مقایسه دستگاه آنالیز لیزری با الک نیز باید گفت که دستگاه آنالیز لیزری قطر متوسط ذرات را اندازه‌گیری می‌کند اما الک اندازه قطر بزرگ ذرات را به ما می‌دهد. همین موضوع موجب تفاوت اندازه‌گیری ذرات در اندازه ماسه می‌شود. در نمونه‌های لسی، توزیع اندازه دانه‌ها نسبتاً یکنواخت‌تر از سایر نمونه‌هاست و همبستگی‌ها بطور کلی خوب نیستند (بورمان و همکاران، ۲۰۰۱) که نتایج بدست آمده در این مطالعه عملاً نظر محققان پیشین را تایید می‌نماید. تعداد زیاد نمونه‌های مورد آزمایش در تحقیقات جدید (والمینک، ۲۰۱۸؛ شانگ و همکاران، ۲۰۱۷ و یوجواری و همکاران، ۲۰۱۶) و صحت‌سنجی نتایج به دست آمده، نشان می‌دهد در آینده دانه‌بندی لیزری نسبت به هیدرومتري بیش‌تر می‌تواند در رسوب‌شناسی کاربردی مورد استفاده و استناد قرار گیرد.

مقایسه کلی روش هیدرومتري و لیزر در جدول ۴ به روشنی برتری و مزیت نسبی استفاده از روش لیزری را برای پروژه‌های تحقیقاتی با اهمیت نشان می‌دهد هر چند برای موارد آموزشی هنوز مجبور هستیم به دلیل محدودیت ابزار و امکانات کافی به روش‌های سنتی مانند پیپت و هیدرومتري اتکا داشته باشیم.

مقدار ذرات رس در آنالیز هیدرومتري معمولاً بسیار بیش‌تر از نتایج آنالیز لیزری است. در هر دو روش معمولاً به ذراتی مانند رس که صفحه‌ای هستند توجه کافی نمی‌شود (بورمان و همکاران، ۲۰۰۱). ذرات رس شکل کانی‌شناسی متفاوتی دارند. در روش هیدرومتري این موضوع موجب تخمین بیش از حد ذرات صفحه‌ای شکل می‌شود (راماسوامی و رائو، ۲۰۰۶ و دی استفانو و همکاران، ۲۰۱۰). از طرفی ذرات رس با حدود قطر ۲ میکرون می‌توانند ۱۰ میکرون طول و ۰/۴ میکرون ضخامت داشته باشند که این محدوده معادل حجم کره به قطر حدود ۳/۹ میکرون است (کونرت و وان‌دنبیرگ، ۱۹۹۷). احتمالاً همین موضوع موجب می‌شود درصد

جدول ۴. مقایسه پارامترهای مختلف در روش‌های هیدرومتری و لیزری

لیزری	هیدرومتری	شاخص مورد بررسی
۲ تا ۴ گرم	۳۰ تا ۴۰ گرم	حجم نمونه مورد نیاز
حذف مواد آلی - حذف کربنات کلسیم - استفاده از هگزامتافسفات سدیم برای جدایش ذرات - استفاده از التراسونیک برای تکمیل فرآیند جدایش ذرات	حذف مواد آلی - حذف کربنات کلسیم - استفاده از هگزامتافسفات سدیم برای جدایش ذرات	آماده‌سازی نمونه‌ها
<i>Mie Theory</i>	قانون ارشمیدس	اساس و پایه روش
کوتاه (کمتر از ۱۰ دقیقه)	طولانی (چند ساعت)	زمان آزمایش
محاسبات کامپیوتری توسط دستگاه و ترسیم جداول مورد نیاز و منحنی‌های فراوانی و تجمعی و امکان چاپ نتایج در فرمت دیجیتال	محاسبات دستی توسط کاربر	محاسبه پارامترهای آماری بافتی رسوبات (میان‌ه - میانگین - جورشدگی - کجشدگی - کشیدگی)
رسوب‌شناسی - داروسازی - صنایع غذایی - پلیمر	علوم خاک - مهندسی عمران	استفاده از روش و دستگاه توسط متخصصین علوم مختلف

نتیجه‌گیری

۱- برای آنالیز دانه‌بندی ذرات ریزدانه رسوبات بهترین حالت این است که از روش‌هایی استفاده شود که بالاترین دقت، کمترین هزینه و بیشترین سرعت را در انجام آزمایش در پی داشته باشند.

۲- در مقایسه بین هیدرومتری و لیزری برای تحلیل دانه‌بندی لس‌ها روش لیزری با وجود هزینه بالاتر، دقت بالاتر و سرعت بیشتری را دارد.

۳- برای انتخاب و تصمیم‌گیری نهایی برای مناسب‌ترین روش پیشنهادی، مناسب‌ترین حالت این است که نمونه‌های شانزده‌گانه با روش‌های پیپت و اسپکتوفتومتری هم آنالیز شده و جمع‌بندی کلی روش‌های سنتی و مدرن دانه‌بندی ذرات ریزدانه در سطح ملی ارایه گردد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از ریاست محترم انجمن رسوب‌شناسی ایران، جناب آقای دکتر موسوی‌حرمی و دبیر محترم علمی پنجمین همایش ملی رسوب‌شناسی ایران جناب آقای دکتر زندمقدم بسیار قدردانی می‌نمایند. هم‌چنین از سردبیر و مدیر مسئول محترم مجله رسوب‌شناسی کاربردی دانشگاه بوعلی‌سینا برای حمایت از همایش ملی رسوب‌شناسی و چاپ مقالات برگزیده تشکر می‌شود.

منابع

- رضایی، ح (۱۳۹۲) بررسی اثر تراکم دینامیکی و بارهای استاتیکی بر مقاومت برشی خاک‌های لسی استان گلستان. پایان‌نامه دکترا رشته زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.
- قندهاری، س (۱۳۹۸) مطالعه رسوب‌شناسی و تحلیل هندسه فراکتالی تغییرات بافت لس‌های استان گلستان. پایان‌نامه دکترا رسوب‌شناسی و سنگ‌های رسوبی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، ۲۷۰ ص.
- قاسمی، ا (۱۳۹۵) توسعه کاربرد اسپکتروفتومتری در دانه‌بندی خاک‌های ریزدانه از نگاه زمین‌شناسی مهندسی، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد رشته زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه دامغان، ۷۰ ص.
- ASTM D422-63(2007) Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, 8p.*
- Beuselinck, L., Govers, G., Poesen, J., Degraer, G. & Froyen, L (1998) Grain-size analysis by laser granulometry: comparison with the sieve-pipette method. Catena, 32: 193-208.*
- Buurman, P., Pape, Th., Reijneveld, J. A., de Jong, F and van Gelder, E (2001) Laser-diffraction and pipette-method grain sizing of Dutch sediments: correlations for fine fractions of marine, fluvial and loess samples. Netherlands Journal of Geosciences, 80: 49-57.*
- Coates, G. F and Hulse, C. A (1985) A comparison of four methods of size analysis of fine-grained sediments, New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 28(2): 369-380, DOI: 10.1080/00288306.1985.10422234.*
- Di Stefano, C., Ferro, V and Mirabile., S (2010) Comparison between grain-size analyses using*

- laser diffraction and sedimentation methods. biosystems engineering, 106: 205-215.*
- Jonasz, M (1991) *Size, shape, composition and structure of microparticles from light scattering. In: Principles, methods and applications of particle size analysis (Ed. by J. P. M. Syvitski), pp. 143-162. Cambridge University Press, New York. Geologie en Mijnbouw / Netherlands Journal of Geosciences, 80(2): 49-57.*
- Konert, M and Vandenberghe, J (1997) *Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: a solution for the underestimation of the clay fraction. Sedimentology, 44: 523-525.*
- Pye, K. and Blott, S. J (2004) *Particle size analysis of sediments, soils and related particulate materials for forensic purposes using laser granulometry. Forensic Science International, 144: 19-27.*
- Ramaswamy, V and Rao, P. S (2006) *Grain Size Analysis of Sediments from the Northern Andaman Sea: Comparison of Laser Diffraction and Sieve-Pipette Techniques. Journal of Coastal Research, Number, 224: 1000-1009.*
- Shang, Y., Kaakinen, A., Beets, C. J and Prins, M. A (2017) *Aeolian silt transport processes as fingerprinted by dynamic image analysis of the grain size and shape characteristics of Chinese loess and Red Clay deposits, Sedimentary Geology, 375: 36-48.*
- Shen, Z., Zhang, R., Long, H., Wang, Z., Zhu, G., SHI, Q., Yu, K., Xu, A (2020) *Research on Spatial Distribution of Soil Particle Size Distribution in Loess Region Based on Three Spatial Prediction Methods-Taking Haiyuan County in Ningxia as an Example. Scientia Agricultura Sinica, 53(18): 3716-3728.*
- Újvári, G., Kok, J. F., Varga, G and Kovács, J (2016) *The physics of wind-blown loess: Implications for grain size proxy interpretations in Quaternary paleoclimate studies. Earth-Science Reviews, 154: 247-278.*
- Vlaminck, S (2018) *Northeastern Iranian loess and its palaeoclimatic implications. PhD Theses. University of Köln.*