

ساخت اولین دستگاه ایرانی اندازه‌گیری توزیع اندازه ذرات سیمان



■ محمد صفایی*



■ محمدامین اسماعیلی*



■ حسین رجب تبار*



■ امیرحسین عباس نیا*



■ دکتر محمد ترامشلو*

* دکتری مهندسی شیمی، واحد تحقیق و توسعه شرکت سیمان فیروزکوه و عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد سوادکوه
** دانشجویان کارشناسی منابع شیمیایی و معدنی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سوادکوه

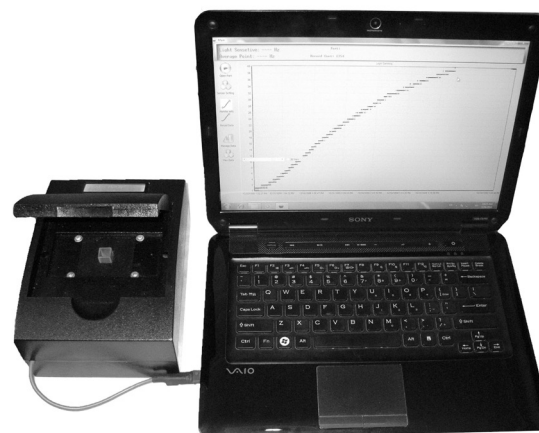
چکیده

در این راستا و جهت رفع موانع موجود و همچنین دستیابی به شرایط بهینه در فرایند تولید و آسیاب سیمان، برای اولین بار در کشور، دستگاه اندازه‌گیری توزیع اندازه ذرات سیمان توسط واحد تحقیق و توسعه شرکت سیمان فیروزکوه و گروهی از دانشجویان، طی مدت زمان کمتر از چهار ماه ساخته شد. از جمله مزایای دستگاه مذکور، دقت مطلوب در شناسایی و اندازه‌گیری توزیع اندازه ذرات سیمان (بین ۳ الی ۱۰۰ میکرون)، قیمت تمام شده، هزینه تعمیر، نگهداری و سرویس‌دهی اندک در مقایسه با نمونه‌های خارجی این دستگاه را می‌توان نام برد.

همچنین بخش اعظم ترکیب درصد ذرات با اندازه خاص می‌باشد. در این زمینه و به جهت افزایش سطح کیفی و کمی، رفع خطاهای موجود در روش اندازه‌گیری اندازه ذرات با الک، فقدان وجود الک در سائزهای کمتر از ۲۰ میکرون و همچنین بهینه‌سازی تولید سیمان در کلاس‌های مقاومتی متنوع، آگاهی از نحوه توزیع اندازه ذرات سیمان به صورت دقیق بسیار حائز اهمیت است. از سوی دیگر با توجه به هزینه‌های سنگین تهیه دستگاه‌های اندازه‌گیری توزیع اندازه ذرات و همچنین تحریم‌های موجود، تهیه این نوع ابزارها برای کارخانجات سیمان کشور آسان و توجیه‌پذیر نبوده است.

توزیع اندازه ذرات و یا به عبارت دیگر دانه‌بندی سیمان، یکی از پارامترهای بسیار موثر از دیدگاه کیفی به جهت کسب خواص مطلوب و بهینه در محصول تولید شده به عنوان سیمان می‌باشد. همان‌طور که در اکثر گزارش‌ها، بررسی‌ها و تحقیقات علمی انجام شده بر روی سیمان بیان شده است، توزیع اندازه ذرات و همچنین میزان نرمی (بلین)، اثرات مستقیم و موثری بر روی خواص فیزیکی سیمان‌های هیدرولیکی دارد به طوری که نرخ رشد و افزایش مقاومت‌های مکانیکی سیمان در سنین مختلف متأثر از نوع توزیع اندازه ذرات و

کلمات کلیدی: آسیاب سیمان، بلین، توزیع اندازه ذرات، نرمی سیمان، شکل ذرات



۱- مقدمه

ویژگی‌های ذرات سیمان عامل مهم و مؤثر بر استحکام مکانیکی سیمان است. هم‌اکنون، سیمان‌های تولید داخل با مشکلاتی مانند قطر مناسب هیدروپنایمی ذرات، پهنای توزیع اندازه ذرات و همچنین مقدار کم ذرات با شکل کروی مواجه هستند. افزایش درجه نرمی مطلوب، کاهش نرمی کاذب، اصلاح توزیع اندازه ذرات و افزایش میزان درصد ذرات کروی شکل از اهداف اصلاح تجهیزات و بهینه‌سازی شرایط عملیاتی جهت کسب معیارهای مناسب، از جمله اقدامات لازم جهت رسیدن به استانداردهای بین‌المللی مطلوب برای تولیدکنندگان داخلی از جمله موارد مورد نیاز است. تجزیه و تحلیل مشخصات ذرات سیمان نه تنها می‌تواند داده‌های دقیقی را برای تولید ارایه دهد، بلکه منجر به بهره‌وری انرژی، افزایش بازده بهره‌برداری و ارتقاء عملکرد نیز می‌شود.

از جمله ویژگی‌های اساسی ذرات سیمان می‌توان نرمی، توزیع اندازه ذرات و شکل آن را نام برد. در حال حاضر در اکثر کارخانجات سیمان کشور از الک‌ها با مش و اندازه‌های متفاوت برای شرح دانه‌بندی و زبری ذرات سیمان‌های تولیدی استفاده می‌شود؛ ولی در واقع، الک‌های موجود با گذشت زمان دچار تغییر و دگرگونی در اندازه حفرات شده و می‌تواند ویژگی‌های متفاوتی از سیمان را موجب شود. همچنین بکارگیری الک در شناسایی میزان اندازه ذرات منجر به داده‌های تجمعی شده و اطلاعات دقیق غیرتجمعی را در بر ندارد. بنابراین کنترل نرمی و اندازه آن با غربال نمودن و مساحت سطح، محدود و نامعین

است. اندازه‌گیری توزیع مقدار و اندازه ذرات نه تنها یک روش مؤثر برای کنترل نرمی و شناسایی کیفیت سیمان می‌باشد، بلکه مبنای دقیقی را برای اصلاح و بهینه‌سازی فرایند آسیاب کردن و افزایش بهره‌وری نیز ایجاد می‌نماید. اندازه‌گیری توزیع اندازه ذرات و درجه‌بندی ذرات سیمان در کشورهای پیشرفته، یک ابزار نظارت بر کیفیت به صورت قراردادی است.

تحقیقات نشان می‌دهند که ذره $30-3\text{ }\mu\text{m}$ ، محدوده اندازه اصلی ذرات مؤثری است که استحکام سیمان را تأمین می‌نماید. تأثیر اندازه سایر بخش‌های ذرات سیمان، کوچکتر از $3\text{ }\mu\text{m}$ به علت هیدراته شدن قبل از مصرف و ذرات بزرگتر از $60\text{ }\mu\text{m}$ به علت عدم هیدراته شدن کامل، در سیمان فقط به‌عنوان پرکننده عمل می‌نمایند. همچنین با کاهش متوسط ترکیب درصد ذرات در اندازه‌های کوچکتر، میزان استحکام بتن در سنین ۳ و ۷ روزه افزایش پیدا می‌کند و بالعکس. بنابراین، واضح است که درجه‌بندی و توزیع اندازه ذرات، تأثیر زیادی بر عملکرد سیمان دارد.

علاوه بر توزیع اندازه و مقدار ذرات، شکل ذرات نیز تأثیر مهمی بر ویژگی‌های سیمان دارد. شاخص اصلی شکل، میزان کروی بودن حجم هیدروپنایمی و فیزیکی ذرات است. تحقیقات نشان می‌دهند که درجه کروی بودن ذرات، تأثیر بارزی بر استحکام ابعادی و دوره‌ای سیمان دارد، به طوری که با افزایش درجه کروی بودن ذرات، سختی و استحکام سیمان افزایش می‌یابد. در مجموع، تجزیه و تحلیل کمی و کیفی دقیق توزیع اندازه ذرات در سیمان، ابزار مهمی برای دستیابی به بازارهای حرفه‌ای و افزایش بهره‌وری در مصرف انرژی، افزایش توانایی و بالفعل نمودن پتانسیل‌های شیمیایی سیمان را در بر دارد.

۲- تأثیر ویژگی سیمان بنا بر توزیع اندازه ذرات و میزان کروی بودن شکل ذرات

۲-۱- تأثیر توزیع اندازه ذرات بر عملکرد سیمان

سختی و استحکام سیمان در اصل، ناشی از اتصال و سخت شدن میان ذرات سیمان در اثر فرایند هیدراتاسیون می‌باشد. ارتباط مستقیمی بین اندازه ذرات سیمان و سرعت ترکیب با آب و هیدراتاسیون و در نتیجه، افزایش استحکام مکانیکی وجود

جدول ۱- نتایج استحکام سیمان با تغییر در قطر اکثریت تشکیل دهنده

شماره	۹۰ درصد وزن سیمان از ذرات با اندازه	استحکام خمشی (Mpa)			استحکام فشاری (Mpa)		
		۳ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	۳ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه
۱	$\geq 20 (\mu m)$	۶/۲	۷/۴	۸/۵	۳۶/۸	۴۴/۵	۵۶/۳
۲	$20-50 (\mu m)$	۵/۰	۵/۹	۷/۴	۲۵/۷	۳۴/۷	۴۷/۶
۲	$50-70 (\mu m)$	۲/۲	۳/۴	۵/۱	۱۲/۶	۱۹/۵	۳۰/۲
۴	$70-80 (\mu m)$	۰	۰	۰/۸	۰	۲/۱	۴/۲

جدول ۲- تغییرات استحکام مکانیکی سیمان با تغییر درجه کروی بودن ذرات در میزان نرمی یکسان

شماره	مساحت سطح مشخص (m ² /kg)	ضریب یکنواختی	فاکتور شکل میزان دایره بودن (%)	استاندارد پایداری (%)	استحکام فشاری (Mpa)	
					۳ روزه	۲۸ روزه
۱	۳۴۵	۰/۸۹	۴۷	۳۰/۴	۳۵/۲	۵۹/۸
۲	۳۴۸	۰/۹۲	۷۳	۳۶/۷	۳۴/۱	۶۸/۴

مالشی در میان ذرات چندضلعی در مقایسه با ذرات کروی، بیشتر بوده و در نتیجه سیالیت^۱ سیمان را کاهش می‌دهد. در نتیجه برای رسیدن به سیالیت معین در ملات‌سازی، بایستی آب بیشتری به مخلوط افزوده شده یا آب موجود در ملات افزایش پیدا کند، بنابراین سختی سیمان به علت افزایش حفرات ناشی از حذف آب پس از سفت شدن بتن، کاهش می‌یابد و باعث افزایش نفوذپذیری بتن و نهایتاً کاهش مقاومت محیطی و سرویس‌دهی بتن می‌شود. جدول ۲ نتایج اندازه‌گیری سختی سیمان را با مساحت سطح مشخص یکسان ولی درجات مختلفی از فاکتور شکل یا کروی بودن برخوردار هستند را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج مندرج در جدول ۲، مشخص است سیمانی دارای استحکام و سختی دوره‌ای بیشتری است که از میزان و یا درصد کروی بودن ذرات بیشتری برخوردار باشد. به‌طور خلاصه، برای افزایش سطح کیفی سیمان، بایستی درصد حجم ذرات $30-3\ \mu m$ و درجه کروی بودن ذرات افزایش حجم ذره بیش از $30\ \mu m$ را در حین فرآیند آسیاب، کاهش داده تا پتانسیل‌های شیمیایی و مینرالوژی فازهای سیمان تبدیل به نتایج فیزیکی و مکانیکی تبدیل شود و محصول با استحکام بیشتری روانه بازار گردد.

دارد به طوری که تفاوت زیادی در رابطه با سرعت ترکیب با آب و مقدار قطر متفاوت ذرات سیمان است. ذرات $30-3\ \mu m$ در اصل بر روی استحکام سیمان در میان تمام ذراتی که سیمان را تشکیل می‌دهد، نقش اساسی دارند. سرعت هیدراتاسیون با آب برای ذرات نرم کوچک‌تر از $3\ \mu m$ بسیار سریع است به طوری که در زمان نگهداری سیمان و حتی در زمان اختلاط و ملات‌سازی از بین می‌روند. سرعت هیدراتاسیون ذرات $30-60\ \mu m$ پایین است. ذرات با قطر بیش از $60\ \mu m$ از فعالیت بسیار کمی برخوردار و فقط پرکننده هستند. جدول ۱ بیانگر نقش ذرات در کسب مقاومت مکانیکی برای نوعی سیمان در سنن مختلف است.

۲-۲- تأثیر شکل ذرات بر عملکرد سیمان

شکل ذرات به‌عنوان یک عامل مکمل بر عملکرد سیمان است. شکل فضایی و هیدرودینامیکی نامنظم ذرات، همانند چند ضلعی یا بی‌شکل بودن (عدم وجود حجم فضایی متعارف) بر ارتباط میان ذرات در هنگام هیدراته شدن و همچنین عملیات اختلاط اثرگذار بوده و می‌تواند سختی سیمان با مینرالوژی یکسان را افزایش یا کاهش دهد. از طرف دیگر، مقاومت اصطکاک یا

۳- دلایل جایگزینی و ارجحیت روش اندازه گیری توزیع اندازه ذرات PSD با بلین^۱

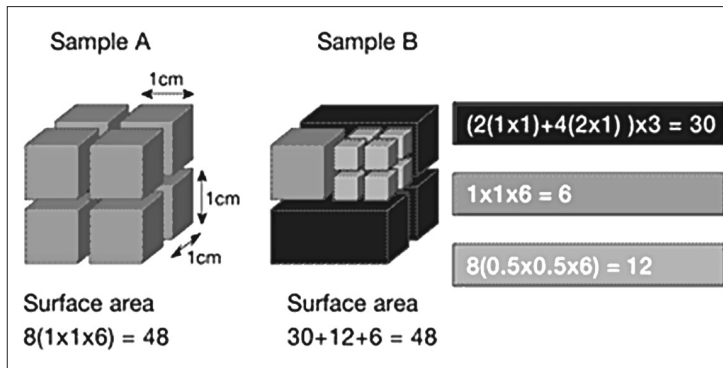
۳-۱- توزیع اندازه ذرات - اندازه گیری بسیار

حساس عملکرد سیمان

زبری و دانه بندی سیمان به دلیل تأثیر آن روی نرخ هیدراتاسیون در محصول کنترل می شود. مساحت سطح موثر نمونه که تابعی از اندازه ذرات می باشد، بیانگر این موضوع است که آب چگونه و با چه سرعتی قادر خواهد بود نفوذ کند و با ذرات سیمان موجود واکنش بدهد. این موضوع، اتکاء و استناد سنتی صنعتی بر داده های بلین را تشریح می کند. اندازه گیری سطح موثر بلین از دهه چهل میلادی برای تعیین کیفیت سیمان استفاده شده است و بسیاری از کارخانجات هنوز این تکنیک نفوذپذیری هوا را به عنوان یک ابزار کنترل کیفیت کلیدی حفظ نموده اند. اگرچه، مشکل آنالیز بلین این است که فقط یک عدد میانگین برای سطح هر نمونه به دست می دهد، این در حالی است که دو سیمان با ویژگی متفاوت دانه بندی و نهایتاً استحکام مکانیکی، می توانند عدد بلین مشابهی را ارائه دهند.

همان طور که در شکل ۱ مشخص است، دو نمونه متفاوت با مساحت سطحی مشابه توزیع اندازه ذرات متفاوتی دارند. این دو نمونه مساحت سطحی میانگین مشابهی دارند و بنابراین اعداد بلین همسانی را ارائه می دهند، ولو این که توزیع ذرات بسیار متفاوتی دارند. در نمونه سمت چپ (نمونه A)، هیدراتاسیون با نرخ مشابهی پیش خواهد رفت یا به عبارت دیگر نرخ افزایش استحکام مکانیکی در سنین مختلف از سرعت یکسانی برخوردار است. در حالی که برای نمونه سمت راست (نمونه B)، ذرات ریز به سرعت و کاملاً هیدراته خواهند شد ذرات بزرگتر، بسیار کندتر هیدراته خواهند شد و یا ممکن است کاملاً هیدراته نشده و تبدیل به نقاط نقص در سیمان شوند، بنابراین ویژگی های استحکام توسعه یافته این دو نمونه سیمان حتی با

1- Blaine



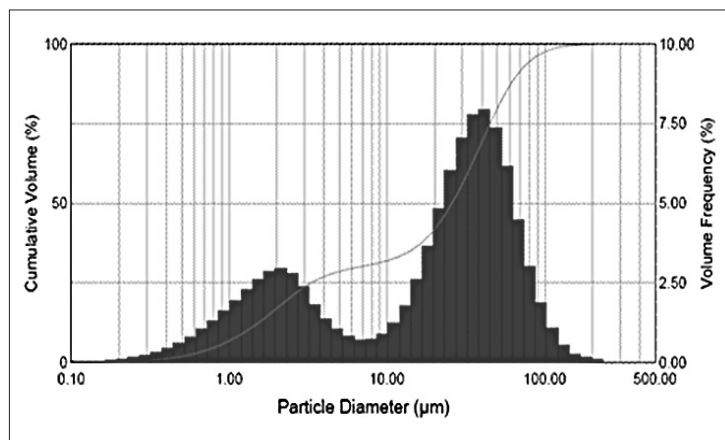
شکل ۱ - تغییر در اندازه ذرات در بلین یکسان

داشتن مقدار بلین یکسان، به طور کاملاً مشخصی متفاوت خواهد بود. در نتیجه در صورتی که فقط از داده های بلین استفاده شود، تشریح کاملی از دلایل وجود تغییرات در خواص مکانیکی سیمان وجود ندارد. برای محیط تولیدی محدودیت های عملی شناخته شده ای از روش اندازه گیری بلین «هر چند روش بسیار مفیدی است» به شرح زیر وجود دارد، به طوری که اندازه گیری بلین:

- ❖ کند و زمانبر است؛
- ❖ تنها یک حجم کوچک نمونه را اندازه گیری می کند؛
- ❖ برای استفاده در جریان فرایند (کار) نامناسب است؛
- ❖ قابلیت تکرارپذیری ندارد.

از طرف دیگر با استفاده از آنالیز تهیه شده توسط دستگاه های اندازه گیری توزیع اندازه ذرات به خوبی می توان میزان نرخ رشد و افزایش استحکام را در سنین مختلف تعیین نمود و همچنین از نحوه عملکرد سیمان در سنین مختلف، در جهت تولید محصولی مناسب، آگاهی کاملتری داشت. فناوری اندازه گیری توزیع اندازه ذرات بوسیله قابلیت آنالیز بهتر و تکرارپذیری بیشتر و شاید مهمتر از همه گزینه ای برای پایش مداوم و حقیقی فرایند تولید سیمان را عرضه می کند، بنابراین این فناوری، مسیری را برای اتوماسیون کامل آنالیز و کنترل فرایند را نیز می گشاید.

روش بیان داده های اندازه گیری توزیع اندازه ذرات، به دو شکل منحنی تجمعی و غیرتجمعی می باشد، به طوری که درصد تجمعی و غیرتجمعی ذرات، در اندازه های مختلف بنا بر دقت و مقیاس اندازه گیری دستگاه بیان می شود. لذا به طور کامل تری می توان کیفیت و کمیت ذرات را در هر اندازه، شناسایی نمود. نمونه ای از داده های دستگاه اندازه گیری توزیع اندازه ذرات به روش لیزری برای نمونه سیمانی دارای دو بخش اعظم از ذرات در شکل ۲ آمده است.



شکل ۲- نمودار توزیع اندازه ذرات سیمان تهیه شده به روش اندازه‌گیری لیزری

۲-۳- روش‌های اندازه‌گیری توزیع اندازه ذرات

اندازه‌گیری توزیع اندازه ذرات به روش‌های زیر برای انواع پودرهای

جامد انجام می‌شود:

۱- آنالیز به روش استفاده از الک در مش‌های مختلف

۲- آنالیز به روش استفاده از امواج فراصوت

۳- جداسازی و طبقه‌بندی با استفاده از هوا

۴- اندازه‌گیری تصویری

۵- اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی

۶- رسوب گذاری ذرات در محیط سیال

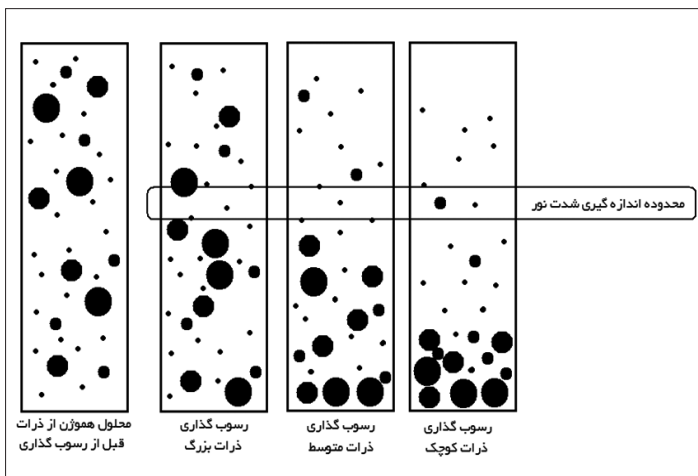
۷- انکسار لیزر

همان طور که ذکر شد از روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری توزیع اندازه ذرات بنا بر نوع ذرات و مقیاس اندازه ذرات، استفاده می‌شود. آنالیزگر اندازه ذرات در روش‌های مختلف با اصول مختلفی می‌تواند بر اساس ویژگی‌های متفاوت ذرات، مغایرت‌های معادلی را ایجاد کند. برای مثال، تحلیلگر اندازه ذرات در روش رسوب‌گذاری، مغایرتی معادل مطابق با نرخ رسوب‌گذاری ذرات را ایجاد می‌کند و قطر اندازه گرفته شده از ذرات برابر با قطر معادل در نرخ رسوب‌گذاری است. بدان معنا که از ذرات با قطر مشابه کروی از نرخ رسوب‌گذاری همسانی برخوردار هستند و ذرات با قطر متفاوت از تقدم و تأخر در نرخ رسوب‌گذاری برخوردار هستند و این موضوع به‌عنوان فاکتوری در اندازه ذرات در نظر گرفته می‌شود.

تحلیلگر لیزری اندازه ذرات کاربرد ویژگی‌های پراکندگی شدت نور را برای ایجاد مغایرت معادل، در نظر می‌گیرد و قطر اندازه ذرات اندازه‌گیری

شده، قطر معادل پراکندگی است. روش رسوب‌گذاری یا ته‌نشینی ذرات در محیط سیال از جمله روش‌های خوب با صرف هزینه و زمان مناسب است.

همان‌گونه که بیان شد چند نوع روش برای تجزیه و تحلیل توزیع اندازه ذرات وجود دارد و بهترین روش برای اندازه‌گیری توزیع ذرات سیمان، روش رسوب‌گذاری و لیزر می‌باشد. روش رسوب‌گذاری به اندازه‌گیری نرخ رسوب‌گذاری ذره در مایع برای تعیین توزیع اندازه ذرات است به طوری که نمونه‌ها در مقداری مایع بی‌اثر قرار داده می‌شوند تا سوسپانسیون یکنواختی به دست آید و ذرات در مایع سوسپانسیون پس از تعلیق مناسب به دلیل اثر وزن، شروع به نشست و ته‌نشین شدن می‌کنند. تحقیقات نشان می‌دهند که نرخ رسوب‌گذاری ذرات در مایع، نسبت مستقیم با مربع قطر ذرات دارد. یعنی نرخ رسوب‌گذاری ذرات بزرگ، سریع است و نرخ رسوب‌گذاری ذرات کوچک، کندتر است. تحلیلگر دستگاه به طور خودکار اطلاعات مربوط به نرخ رسوب‌گذاری ذرات را در طول مدت زمان آزمون رسوب‌گذاری ذرات ثبت کرده و توزیع اندازه ذرات نمونه بعد از پردازش داده‌ها به دست می‌آید. روش رسوب‌گذاری، نوعی روش اندازه‌گیری سنتی توزیع اندازه ذرات است. این روش نسبت به قطر و طول ذرات سیمان حساس است و می‌تواند وضعیت



شکل ۳- رسوب گذاری ذرات در محیط سیال و نحوه اندازه گیری میزان شدت نور

اندازه سرعت نهایی به معادله نیرو اجازه می‌دهد تا برای قطر ذرات، معادله زیر به دست آید:

$$D = V_t^{1/2} [(18\eta) / (\rho - \rho_0)g]^{1/2}$$

به طوری که D قطر هیدرودینامیکی ذرات، V_t سرعت ته‌نشینی تعادلی ذرات جامد در سیال و ρ چگالی ذرات جامد است. محیط سیال با ویسکوزیته η و چگالی، مشخص می‌شود و g نیز شتاب گرانش است. با روش بررسی ته‌نشینی، نمونه ابتدا در یک مایع پراکنده (توزیع) می‌شود به طوری که هم زدن به صورت پراکنشی، توزیع همگنی از ذرات که در ظرف نمونه قرار دارند را ایجاد می‌کند، سپس هم زدن متوقف می‌شود و ذرات اجازه می‌یابند تا ته‌نشین شوند، به طوری که بزرگترین ذرات در بالاترین سرعت و سپس ذرات با اندازه کوچکتر، ته‌نشین می‌شوند. بنابراین پس از هر دوره زمانی، تمام ذرات بزرگتر از یک اندازه معین، زیر ناحیه اندازه‌گیری سقوط خواهند کرد. با دانستن موقعیت ناحیه اندازه‌گیری و زمان سپری شده از آغاز ته‌نشینی، سرعت ته‌نشینی می‌تواند محاسبه شود و با استفاده از معادله استوکس، اندازه ذرات، معرف هر طبقه^۱ اندازه‌گیری و تعیین می‌شود. (شکل ۳)

۴-۲- قانون بیر - لامبر

قانون بیر^۲ که به نام‌های قانون بیر- لامبرت^۳ و قانون بیر- لامبرت- بوگو^۴ و حتی ترکیب‌های مختلف دیگری از این سه نام

1- class

2- Beer's Law

3- Beer-Lambert law

4- Beer-Lambert-Bouguer law

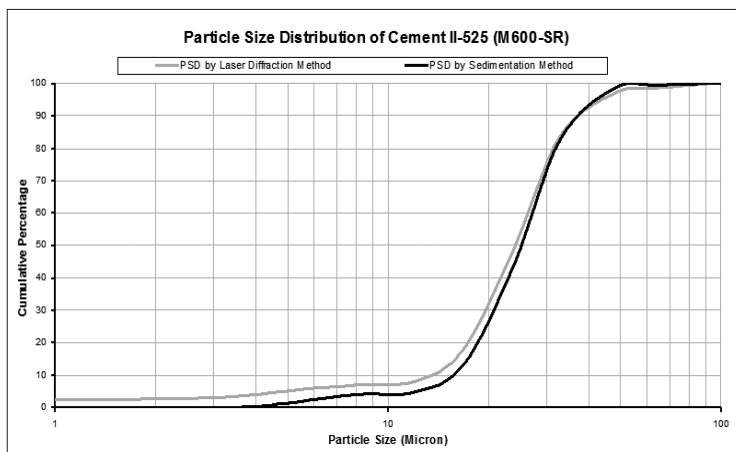
توزیع اندازه ذرات را منعکس کند. این روش، روشی کم هزینه، کم مصرف، کم استهلاک بوده و حفظ ویژگی‌های آن آسان است.

روش لیزری، تکنولوژی جدید سال‌های اخیر است. در این روش از اصل شکستگی نور و پراکندگی استفاده می‌شود تا توزیع اندازه ذرات بررسی شود. وقتی تشعشعات لیزری با ذرات برخورد می‌کنند، در مایع پراکنده می‌شوند. مقداری از نور جهت اصلی انتقال پرتو لیزر را منحرف خواهد کرد و پراکندگی در زاویه مشخص روی می‌دهد. این عمل پدیده انکسار نور یا پراکندگی لیزر در اثر برخورد با ذرات است و چون در محیط نمونه، ذرات با قطرهای مختلف وجود دارند عملکرد و میزان انکسار متفاوت خواهد بود. وقتی نور پراکنده شده از لنزهای فوریه می‌گذرد، هاله پراکندگی شکل «هدف» را بر سطح کانونی ایجاد خواهد کرد. شعاع هاله مرتبط با ابعاد ذره و تراکم هاله مرتبط با کمیت ذرات خاص است. نتایج به روش تئوری انکسار Fraunhofer و تئوری پراکندگی Mie پردازش می‌شوند و توزیع اندازه و مقدار ذرات به دست خواهند آمد. مزایای همیشگی روش لیزری، سرعت بالا، عملیات مناسب و تکرارپذیری خوب است. نقص آن، هزینه بالای اجرا و تفکیک‌پذیری نامناسب برای طول ذرات می‌باشد.

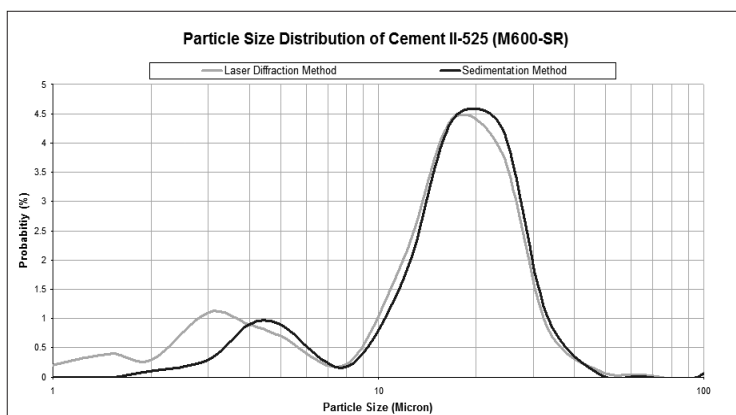
۴-۱- تکنولوژی ساخت دستگاه اندازه‌گیری توزیع اندازه ذرات

۴-۱- قانون استوکس

قانون استوکس نیروی کششی روی بدنه ذرات (جسم) در حال سقوط به عنوان تابعی از قطر و سرعت سقوط و دیگر ویژگی‌های بدنه و محیطی که در آن سقوط می‌کند را تشریح می‌نماید. وقتی نیروی کششی در تعادل با نیروی گرانشی باشد، سرعت ته‌نشینی نهایی (V_t) به دست می‌آید. تحت این شرایط تعادلی،



شکل ۴- نمودار تجمعی اندازه ذرات سیمان تیپ ۲ در کلاس مقاومتی ۵۲۵ (M600-SR) با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده توسط دستگاه لیزری و دستگاه ساخته شده به روش رسوب‌گذاری



شکل ۵- نمودار غیر تجمعی اندازه ذرات سیمان تیپ ۲ در کلاس مقاومتی ۵۲۵ (M600-SR) با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده توسط دستگاه لیزری و دستگاه ساخته شده به روش رسوب‌گذاری

جدول ۳- نتایج داده‌های عددی برای کسرهای اندازه‌های مختلف بر اساس داده‌های دستگاه لیزری و دستگاه ساخته شده به روش رسوب‌گذاری

نوع آنالیز	D_{10}	D_{25}	D_{50}	D_{70}	D_{80}	حداکثر قطر در دسترس (μm)
لیزری	۱۲/۶	۱۸/۱	۲۳/۱	۲۸/۹	۳۰/۴	۱۷/۹
دستگاه ساخته شده	۱۴/۲	۲۰	۲۴/۶	۲۹/۱	۳۰/۸	۱۹/۷

اندازه ذرات و توزیع دانه‌بندی با دقت مناسب از نمونه‌های سیمان است. فرایند این دستگاه به نحوی است که ذراتی که درون سل (ظرف نمونه) حاوی نمونه قرار می‌گیرد بر اساس قانون استوکس (بر اساس اندازه و چگالی ذره و همچنین چگالی مایعی که نمونه درون آن قرار دارد) با سرعت‌های متفاوتی درون سل، ته‌نشین می‌شوند. هر ذره با عبور از

مشهور است، یکی از قوانین اصلی در اپتیک است. این قانون تجربی، ارتباط شدت نور جذب شده در اثر عبور از ماده همگن بدون پراکندگی را با خصوصیات مواد بیان می‌کند. قانون بیر-لامبر، بیانگر رابطه شدت پرتو نور دریافت شده (I_f) که به‌طور تابعی نمایی کاسته می‌شود، نسبت به شدت نور تابیده شده (I_i) زمانی که نور از میان محیط جذب کننده عبور می‌کند، است. این نسبت تابعی از جذب سیستم (ϵ)، غلظت جذب کننده (c)، طول مسیر پرتو از میان جذب کننده (d) می‌باشد. این رابطه عبارت است از:

$$\frac{I_f}{I_i} = \exp(-\epsilon cd) = T$$

به طوری که T انتقال را تعریف می‌کند و دامنه‌ای از مقادیر صفر تا ۱ را داراست، صفر به معنای جذب کامل و یک نشانگر عدم جذب پرتو در محیط جذب است.

عملکرد دستگاه اندازه‌گیری توزیع اندازه ذرات ساخته شده در این پروژه، در واقع ترکیبی از بکارگیری قانون استوکس^۲ و قانون جذب نور بیر-لامبرت در فرایند رسوب‌گذاری ذرات در حال ته‌نشینی سیمان در محیط سیال بی‌اثر می‌باشد. البته لازم به ذکر است که سوسپانسیون تهیه شده با ترکیب درصد معینی از ذرات سیمان، تهیه شده و سپس با استفاده از دستگاه اختلاط فراصوت به‌صورت کامل به جهت ایجاد ذرات منفرد، مورد عملیات القایی فراصوت قرار گرفته تا هموژن شده و کلیه ذرات از هم جدا شوند تا نیروهای الکترواستاتیک باعث ایجاد چسبندگی بین ذرات نشده و آنالیز را با خطا، همراه نسازد.

بر اساس میزان جذب نور عبوری از محلول سوسپانسیون پس از برخورد با ذرات معلق در محیط سیال با سرعت سقوط ذرات معین ذرات با اندازه‌های مختلف، این دستگاه قادر به اندازه‌گیری

- 1- PSD Analyzer
- 2- Stokes's law

مقابل پرتو نوری که توسط منبع به درون سل تابیده می‌شود، باعث تغییر در شدت نوری که به آشکارساز می‌رسد، می‌گردد (قانون بیر-لامبر). این تغییرات در سیگنال ورودی آشکارساز (سنسور) باعث ایجاد پالس و سیگنال شده و با استفاده از نوع چیدمان و پردازش سیگنال‌های خروجی توسط مدار کنترلی بر اساس میکروکنترلرهای AVR، مورد پردازش قرار گرفته و نتایج به دست آمده به صورت نمودار و جدول داده‌ها به نمایش در می‌آید.

۵- نتایج و بحث

نمونه‌ای از اندازه‌گیری توزیع ذرات سیمان تیپ دو کلاس مقاومتی ۵۲۵ (M600-SR) تولیدی شرکت سیمان فیروزکوه با استفاده از دستگاه لیزری و همچنین دستگاه

ساخته شده، مورد بررسی و آنالیز توزیع اندازه ذرات قرار گرفت که نتایج آن در شکل‌های ۴ و ۵ ملاحظه می‌شود. بنا بر نمودارها و داده‌های نهایی دستگاه، نتایج به‌طور قابل توجهی، نزدیک به هم می‌باشند که این موضوع، دقت بالای دستگاه ساخته شده را اثبات می‌نماید. البته لازم به ذکر است که تفاوت در اندازه ذرات کمتر از ۵ میکرومتر به علت وجود دقت بسیار بالای دستگاه لیزری در اندازه‌گیری این اندازه ذرات، می‌باشد. همچنین خطای اندک در دیگر اندازه‌های ذرات به علت تفاوت در روش اندازه‌گیری بوده که در محدوده قابل قبولی از خطا قرار دارد.

همچنین داده‌های اندازه‌گیری شده برای کسرهای خاصی از اندازه ذرات برای نمونه سیمان مذکور بر اساس اندازه‌گیری به روش لیزری و همچنین دستگاه ساخته شده به شرح جدول ۳ می‌باشد. ■

مراجع

1. Olivier, J.P. and Hickin, G.K., "An Instrument for Rapid, Automatic Determination of Particle Size Distribution", Freeport Kaolin Co., Gordon, Ga.
2. le Doussal, H.; Martin, D.; and Astier, J., "Analyse Granulometrique: Etude Comparative des Resultats Obtenus par l'Hydrometre de Bouyoucos et le SediGraph 5000", l'Industrie Chermique, June 1974, No. 674, pp. 449-453.
3. Steger, E.H., "Evaluation of the SediGraph for Particle Size Analysis of Superfine Ammonium Perchlorate", presented at the JANNAF Propellant Characterization Subcommittee Meeting, Gainesville, Va., Nov. 1980, and printed in CPIA Publication 333, 1981, pp. 19-35.
4. Butters, G. and Wheatley, A.L., "A Critical Review of Laser Diffraction Particle Sizing", Particle Size Analysis, 1981.
5. Schiebe, F.R.; Welch, N.H.; and Cooper, L.R., "Measurement of Fine Silt and Clay Size Distributions", Transactions of the ASAE, 26, (2), 1983, pp. 491-494 and 496.
6. Stein, R., "Rapid Grain-Size Analyses of Clay and Silt Fraction by SediGraph 5000D: Comparison with Coulter Counter and Atterberg Methods," J. Sediment. Petrol., Vol. 55, 1985, pp. 590-615.
7. Risberg, J., "Grain-Size Distribution of Sediments: A Comparison Between Pipette and SediGraph Analysis", Geologiska Oreningsens, Stockholm Forhandlingar, Vol. 111, PT. 3, pp. 247-250 (Geological Society in Stockholm).
8. Weber, O.; Gonthier, E.; and Faugures, J-C, "Grain-Size Data on Marine Sediments: A Comparison Between SediGraph and Malvern Method", Bulletin de l'Institut de Geologie du Bassin d'Aquitaine, No. 50, 1991, pp. 107-114.

9. Syvitski, James P., Principles, Methods, and Application of Particle Size Analysis, Cambridge University Press, Cambridge, 1991.
10. Cooper, John J., "Particle-Size Measurements," *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, 12 [1-2], 1991, pp.133-143; and Allen, T., "The DuPont/Brookhaven Scanning X-Ray Disc Centrifuge", Particle Size Analysis, The Royal Society of Chemistry, 1992.
11. Jimbo, G.; Tsubaki, J.; and Yamamoto, H., "Comparisons of the Measured Results of Particle Size by Several Kinds of Measuring Instruments (Report of Japanese Working Parties)", Particle Size Analysis, The Royal Society of Chemistry, 1992.
12. Boning, Charles W., "Water Resources Division (WRD) Policy on Publication of Sediment Size Data Determined by Use of the SediGraph", Chief Office of Surface Water, Office of Surface Water Technical Memorandum No. 93.11.
13. Buchan, G.D.; Grewal, K.S.; Claydon, J.J.; and McPherson, Robin J., "A Comparison of SediGraph and Pipette Methods for Soil Particle-Size Analysis", *Aust. J. Soil Res.*, Vol. 31, 1993, pp. 407-417.
14. Davies, R. and Allen, T., "Evaluation of Instruments for Particle Size Analysis", E.I. DuPont de Nemours & Co., Engineering Services Division, 1989. \
15. Cramp, A.; Lee, S.V.; Herniman, J.; Hiscott, R.N.; Manley, P.L.; Piper, D.J.W.; Deptuck, M.; Johnston, S.K.; and Black, K.S., "Data Report: Interlaboratory Comparison of Sediment Grain-Sizing Techniques: Data from Amazon Fan Upper Levee Complex Sediments", Flood, R.D., Piper, D.J.W., Klaus, A., and Peterson, L.C. (Eds.), *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, Vol. 155, 1997.
16. Rodney Stevens, et al., "Data and Method Priorities Regarding Sediment Investigations of Harbour Sites," Dept. Earth Sciences, Göteborg University, Sweden (<http://hjs.geol.uib.no/Hsense/publications/public/98-D2.html>), Oct. 15, 1998.
17. Molinarolia, Emanuela; De Falcob, Giovanni; Rabittic, Sandro; and Asunta, Rosana, "Stream-Scanning Laser System, Electric Sensing Counter and Settling Grain Size Analysis: A Comparison Using Reference Materials and Marine Sediments", *Sedimentary Geology*, Vol. 130, No. 3-4, Feb. 2000, pp. 269-281.
18. Dalkey, Ann and Leecaster, Molly K., "Comparison of Sediment Grain Size Analysis Among Two Methods and Three Instruments Using Environmental Samples", Southern California Coastal Water Research Project Authority (SCCWRP) Annual Report: 1999-2000.
19. Skinner, John, "Pipet and X-ray Grain Size Analyzers: Comparison of Methods and Basic Data", Federal Interagency Sedimentation Project, May 2000.
20. Jillavenkatesa, Ajit; Dapkunas, Stanley J.; and H. Lum, Lin-Sien, "Particle Size Characterization", NIST Recommended Practice Guide, Special Publication 960-1, Jan. 2001.
21. Webb, P.A., "Interpretation of Particle Size Reported by Different Analytical Techniques", 2002, online at www.micromeritics.com.
22. Also known as Beer's law or the Beer-Lambert laws see, www.chem.vt.edu/chem-ed/spec/beerslaw.html.