



## بررسی آزمایشگاهی تأثیر دانه‌بندی ذرات در بهبود خواص سیمان چاه‌های نفت

رضوان بهفر<sup>۱\*</sup> کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه ارومیه

صابر محمدی<sup>۲\*</sup> کارشناسی ارشد مهندسی نفت، مخازن هیدروکربوری، دانشگاه صنعتی شریف  
اعظم انتظاری<sup>۳\*</sup> دانشجوی دکتری زمین‌شناسی نفت، دانشگاه فردوسی مشهد

### چکیده

یکی از مهمترین عواملی که بر کیفیت سیمان چاه‌های نفت اثر می‌گذارد، توزیع دانه‌بندی ذرات سیمان است. بهترین محدوده برای افزایش دانه‌بندی مطلوب، «بلین» (Blaine) (cm<sup>2</sup>/gr) ۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰ بوده در حالی که از «بلین» ۵۰۰۰ به بعد عملاً درصد ذرات مطلوب، ۳ تا ۳۰ میکرومتر کاهش پیدا می‌کند. هدف از این مطالعه، بررسی رفتار سیمان و اندازه‌گیری خواص آن با تغییر دانه‌بندی می‌باشد و تلاش بر این بوده که یک توزیع دانه‌بندی مناسب برای بهبود خواص سیمان با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری توزیع دانه‌بندی به روش لیزری و آزمایش‌های API معرفی گردد. در صورتی که پارامتر «نرمی سیمان» برای نمونه‌های داخلی به محدوده  $X' = 20$  و «ضریب یکنواختی» به حدود  $n = 1/2$  برسد، شرایط بهتری از لحاظ مقاومت و رئولوژیکی خواهد داشت. توزیع دانه‌بندی نمونه سیمان‌های خارجی نشان می‌دهد که «ضریب یکنواختی» در این سیمان‌ها بیشتر از سیمان‌های تولید شده در داخل کشور است. به عبارتی در سیمان‌های خارجی سعی شده توزیع دانه‌بندی، محدوده باریک‌تری داشته باشد. این نکته قابل ذکر است که کنترل توزیع دانه‌بندی، فرآیندی پیچیده است و یافتن ترکیب درصد بهینه برای رسیدن به دانه‌بندی مطلوب، نیازمند مطالعه جامع و تست‌های آزمایشگاهی دقیق می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: سیمان چاه نفت، توزیع دانه‌بندی، شاخص بلین، ضریب یکنواختی، پارامتر نرمی.

### مقدمه

ذرات ۳ تا ۳۲ میکرون به وضوح بر گسترش مقاومت فشاری تأثیر می‌گذارد. این در حالی است که ذرات بسیار نرم (کوچکتر از ۳ میکرون) کاملاً تأثیر منفی دارند و این نشان دهنده اهمیت بالای چگونگی توزیع دانه‌بندی ذرات سیمان است.

مهمترین خواص «تر» و «خشک» دوغاب سیمان چاه نفت عبارتند از: (۱) زمان بندش اتمسفریک دوغاب سیمان، (۲) زمان بندش تحت فشار دوغاب سیمان، (۳) مقاومت فشاری در دمای ۳۷/۷ و ۶۰ درجه سانتیگراد، (۴) آب آزاد، (۵) زمان بندش هنگام استفاده از کندکننده‌ها و میزان واکنش پذیری کندکننده، (۶) رئولوژی، (۷) نفوذپذیری سیمان و (۸) تخلخل سیمان.

با توجه به اهمیت سه شاخص از پیش گفته شده، تأثیر هر یک از آنها بر برخی از خواص سیمان چاه نفت، مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به تجربیات عملی و مطالعات تئوری، می‌توان دریافت که سیستم خردایش را باید در جهتی سوق داد که نرخ ۳ تا ۳۰ میکرون برای وصول به کیفیت بهتر سیمان تولیدی افزایش یابد. این در حالی است که نرخ ذرات ۵ تا ۳ میکرون همواره به طور طبیعی گسترش می‌یابد.

ویژگی‌های سیمان، تحت تأثیر ذرات با قطرهای مختلف متفاوت می‌باشد. اصولاً هدف اصلی در فرآیند خردایش سیمان، دست‌یابی بیشتر به درصد ذرات ۳ تا ۳۰ میکرونی می‌باشد. برای این منظور از سه شاخص زیر استفاده می‌گردد:

۱- «ضریب یکنواختی»<sup>۴</sup> محصول (n)

۲- «پارامتر نرمی»<sup>۵</sup> یا «پارامتر موقعیت» (X')

۳- شاخص «بلین»<sup>۶</sup>

در بحث طراحی دانه‌بندی سیمان، دو شاخص اول مد نظر قرار می‌گیرند و شاخص سوم به عنوان یک پارامتر کنترلی در کارخانجات سیمان مورد توجه است. «ضریب یکنواختی»، نسبت ذرات «نرمه»<sup>۷</sup> (ذرات ریز) سیمان به «زبره»<sup>۸</sup> (ذرات درشت) آن است و «پارامتر نرمی» نشان‌دهنده ابعاد ذراتی از سیمان است که ۳۶/۸ درصد از کل سیمان روی الک باقی می‌ماند. شاخص «بلین» نیز بیانگر سطح ویژه سیمان می‌باشد. مطالعات نشان می‌دهد، که افزایش «بلین» همواره به معنی بهبود توزیع دانه‌بندی مطلوب- که از آن به عنوان محدوده مؤثر در مقاومت فشاری سیمان یاد می‌گردد- نمی‌باشد، بلکه محدوده

نحوه سرد کردن «کلینکر»، نسبت آب به سیمان و شرایط عمل آوری، بر روی خواص «تر» و «خشک» دوغاب سیمان چاه نفت اثر می گذارند که در این مقاله به آن ها پرداخته نمی شود.

## ۲- شرح آزمایش

یکی از راه های مناسب برای دستیابی به سیمان با کیفیت بالا، الگوبرداری و مقایس توزیع دانه بندی سیمان های چاه نفت است. به این منظور، دو نمونه سیمان خارجی که در شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب طی سال های اخیر استفاده شده و از لحاظ خواص «رئولوژی»، فیزیکی و شیمیایی نیز مطلوب هستند، انتخاب شده و توزیع دانه بندی آنها با استفاده از دستگاه اندازه گیری توزیع دانه بندی به روش لیزری مدل سیمپاتک<sup>۱۶</sup> اندازه گیری شد.

### ۲-۱- نحوه خردایش برای دستیابی به دانه بندی مطلوب

با توجه به تجربیات عملی و مطالعات تئوری، می توان دریافت که سیستم خردایش را باید در جهتی تنظیم نمود که نرخ ۳ تا ۳۰ میکرون برای وصول به کیفیت بهتر سیمان تولیدی افزایش یابد. این در حالی است که نرخ ذرات ۰ تا ۳ میکرون همواره به طور طبیعی گسترش می یابد. هنگامی که ضریب یکنواختی سیمان به مقادیر نامطلوبی می رسد، کاهش ذرات «زبره» روی الک ۹۰ میکرون، تأثیر زیادی بر روی افزایش درصد ذرات ۵ تا ۳ میکرون خواهد گذاشت، که از دیدگاه دانه بندی مطلوب در مقاومت پذیرفته شده نیست. روند تغییرات درصد ذرات ۳ تا ۳۰ میکرون با کاهش درصد «زبره» روی الک ۹۰ میکرون، برای توزیع دانه بندی مطلوب تر (n=۱ و n=۲) به مراتب بالاتر از دانه بندی نامطلوب تر، n=۰/۷، است.

با توجه به مباحث مطرح شده و ضرورت کنترل توزیع اندازه سیمان برای آسیاب «کلینکر» یا آسیاب سیمان و نیز رساندن توزیع دانه بندی سیمان به محدوده طراحی شده، سیستم های متفاوتی را می توان برای آسیاب سیمان آزمایشگاهی طراحی کرد، که در اینجا ضمن ذکر این موارد، مزایا و معایب هر یک نیز تشریح می شود.

### ۲-۱-۱- استفاده از یک حجم شارژ ثابت با ترکیب درصد گلوله های متغیر<sup>۱۷</sup>

در این سیستم که به منظور ایجاد یک توزیع دانه بندی بهینه از ذرات «نرمه» و «زبره» از سه نوع شارژ متفاوت استفاده می شود، باسیل با قطر که درصد هر یک متفاوت است (شارژ به وسیله گلوله هایی که قطر و درصد آن ها متفاوت است صورت می گیرد) انجام می شود. شارژ اصطلاحی

به منظور خردایش مطلوب، باید تمهیداتی انجام شود تا از موارد زیر جلوگیری شود:

الف- توده ای شدن یا چسبیدن ذرات در اثر نیروهای پیوندی غیر اشباع<sup>۱۸</sup>

ب- توده ای شدن ذرات ناشی از پیوندهای ضعیف<sup>۱۹</sup>

ج- چسبیدن یا توده ای شدن ذرات به دلیل پیوندهای قوی<sup>۱۴</sup>

طبق مطالعات و اقدامات انجام شده در زمینه دانه بندی، «بلازارد» گزارش کرد که  $C_3S$ ، «سنگ گچ» و «نمک های قلیایی» در ذرات سیمان با قطر کمتر از ۷ میکرومتر متداول تر است [۲]، در حالی که حضور  $C_2S$  و مواد گداز آور در ذرات با قطر کمتر از ۲۵ میکرومتر بیشتر مشاهده می شود. اثر مقاومت فشاری ذرات در دامنه قطری در حدود ۳ تا ۳۰ میکرومتر به وسیله بسیاری از محققان گزارش شده است. برای مثال، «کمار» و همکاران و نیز «اسکوارا» و همکاران سه ویژگی به کار رفته برای مشخص کردن عملکرد سیمان را توصیف کرده اند [۳ و ۴]:

(۱) «جرم» به معنای قطری برای عملکرد کلی، (۲) اندازه ۳ تا ۳۰ میکرومتر، شاخصی برای بهبود مقاومت فشاری و (۳) اندازه کمتر از ۷ میکرومتر که مشکلاتی در مصرف آب، آب انداختن و سفت شدن ایجاد می کند. «بکچوتو» و همکاران، «توزیع اندازه ذرات» (دانه بندی)<sup>۱۵</sup> سیمان های چاه نفت را اندازه گیری کردند و قطر اختیاری را محاسبه نمودند که به آن ها اجازه می داد تا ویژگی های سیمان خشک شده از قبیل «تراوایی» و «قابلیت نفوذ» را پیش بینی کنند [۵]. «هانت» و «الپساس» گزارش نمودند که سیمان های چاه نفت مورد استفاده دارای ویژگی های ترکیبی و فیزیکی (API) بسیار مشابه بودند، اما یک استثنا کوچک وجود داشت و آن شکل منحنی های پخش توده متراکم (CMD) بود [۶]. ذراتی با قطر کمتر از ۸ میکرومتر برای ۱۹ تا ۴۰ درصد از توده سیمان و ۶۳ تا ۷۶ درصد از منطقه سطح کلی مورد محاسبه قرار گرفتند. CMD در سیمان هایی با شاخص «بلین» یکسان، در ابتدا متفاوت است که منجر به ذراتی با قطر کمتر از ۲۵ میکرومتر می شود؛ شاخص «بلین» را می توان برای پیش بینی زمان بندش سیمان های کلاس H (در رده بندی API) به کار برد. اکثر محققین به محدوده دانه بندی مؤثر ۳-۳۰ میکرون، جهت بهبود خواص سیمان اشاره کرده اند، اما به طراحی نحوه خردایش برای دستیابی به دانه بندی مطلوب کمتر توجه شده است. در این مقاله سعی شده است تا نحوه توزیع دانه بندی مناسب جهت بهبود خواص سیمان و روش های مناسب خردایش مورد مطالعه قرار گیرد.

لازم به ذکر است علاوه بر نحوه توزیع دانه بندی ذرات سیمان، عوامل دیگری مثل: ترکیب شیمیایی، معدنی بودن مخلوط مواد خام مورد استفاده در ساخت سیمان، شرایط پخت «کلینکر» در کوره،



خواص سیمان‌های دانه‌بندی شده جدید را مطالعه کرد. با تغییر «بلین» و متعاقباً پارامتر «نرمی» و با انجام عملیات مشابه (الک کردن و خردایش زیره) می‌توان سیستم‌های جدیدتری ساخت.

این روش، نسبت به سایر روش‌ها کاربردی‌تر، آسان‌تر و عملی‌تر است. البته در صورتی که در آزمون‌ها و ساخت سیمان با دانه‌بندی طراحی شده با این روش مشکلاتی پدید آید، می‌توان از تلفیق این روش با روش‌های قبلی مانند سیستم حجم شارژ ثابت و ترکیب درصد گلوله‌های ثابت، به محدوده توزیع دانه‌بندی مورد نظر رسید. برای ساخت سیمان در هر یک از این سیستم‌ها از ۵ کیلوگرم «کلینکر» نوع ۵ و ۰/۲۵ کیلوگرم گچ با آنالیز مشخص استفاده می‌شود. «کلینکر» و گچ در خردکننده<sup>۲۰</sup> تا حدود ۱ میلی‌متر خرد می‌شوند و پس از اختلاط با یکدیگر داخل آسیاب آزمایشگاهی ساییده می‌شوند. دو ساعت و بیست دقیقه پس از سایش، از محصول آسیاب نمونه برداری شده و شاخص «بلین» آن اندازه‌گیری می‌شود و در صورتی که سیمان به «بلین» مطلوب نرسیده باشد، عملیات سایش تکرار می‌شود و در صورت حصول «بلین» طراحی شده، سیمان از آسیاب خارج و پس از نمونه برداری، توزیع دانه‌بندی آن را به طریق لیزری اندازه‌گیری می‌کنند.

#### ۲-۲- دستگاه آنالیزور اندازه ذرات

برای ارتقا روش اندازه‌گیری ذرات، محصولات با استفاده از الک‌های چشمی با دستگاه لیزری اندازه‌گیری ذرات، آنالیز می‌شوند. این دستگاه با دقت بسیار زیادی قادر است تا ابعاد ذرات پودر را به صورت دیجیتال و به صورت دیاگرام فراوانی تجمعی نشان دهد. دستگاه Analysette ۲۰ ساخت شرکت FRITSCH، دستگاهی برای تعیین توزیع اندازه ذرات در محدوده ۰/۵ تا ۵۰۰ میکرومتر می‌باشد. این دستگاه به عنوان ابزاری برای آنالیز اندازه ذرات بر اساس اندازه‌گیری فوتومتریک<sup>۲۱</sup> ته‌نشینی مطابق با قانون «استوک»<sup>۲۲</sup> مورد استفاده قرار می‌گیرد. هنگامی که توزیع اندازه ذرات در بازه‌های کوچک‌تر (که این امر در مورد آنالیز سرنبدی محدود است) و دقیق‌تر مورد نظر باشد، ذرات جامد خالص با وزن مخصوص یکنواخت (در محدوده ۰/۵ تا ۵۰۰ میکرومتر) باید به صورت پیوسته و یکنواخت در مدت زمان ۳ تا ۱۰ دقیقه در یک محلول خاص به حالت تعلیق قرار گیرند.

ذرات بالاتر از ۹۰ میکرون توسط الک معمولی یا الک «آلپاین» جدا شده و به صورت مجزا آسیاب و به سیستم اصلی اضافه می‌شوند. توزیع دانه‌بندی جدید، مجدداً به وسیله لیزر اندازه‌گیری می‌شود تا بتوان به ضریب یکنواختی طراحی شده دست یافت. عملیات سیمان‌سازی با بلین طراحی شده ۳ بار دیگر تکرار

رایج در کارخانجات سیمان است و به معنی چینش گلوله‌ها در عملیات آسیاب می‌باشد. با توجه به اینکه ترکیب درصد شارژ آسیاب‌ها به طور کلی در اسناد سازنده درج می‌شود و کاملاً تجربی است، لذا یافتن ترکیب درصد بهینه برای رسیدن به دانه‌بندی طراحی شده، نیاز به آزمون‌های سعی و خطای بسیاری دارد. به این ترتیب احتمالاً یافتن ترکیب درصد شارژ و میزان پرشدگی آسیاب، زمان زیادی را می‌طلبد. ضمن آنکه ممکن است در عمل هیچ‌گاه امکان دسترسی به توزیع دانه‌بندی طراحی شده وجود نداشته باشد.

#### ۲-۱-۲- استفاده از یک حجم شارژ ثابت و ترکیب درصد گلوله‌های ثابت

در این سیستم که به منظور ساده‌سازی سیستم اول انجام می‌شود، یک نوع ترکیب درصد ثابت گلوله برای آسیاب کردن در نظر گرفته می‌شود و عملاً خردایش در سه مرحله با سه نوع گلوله مختلف (سه اندازه مختلف) انجام می‌شود. به این ترتیب کنترل توزیع دانه‌بندی آسان‌تر می‌شود، اما برای افزایش دفعات آسیاب‌ها و انجام آزمایش‌ها، زمان زیادی صرف می‌شود. این سیستم که اساس طراحی آن بر مبنای عمل خردایش «کلینکر» و گچ در خانه اول، دوم و سوم آسیاب است، نیاز به سعی و خطا دارد و کماکان پیچیدگی سیستم اول را نیز داراست.

#### ۲-۱-۳- افزایش یک مجموعه دانه‌بندی خاص به سیمان اولیه

در این سیستم، حجم مشخصی از یک سیمان به اندازه‌های آسیاب می‌شود تا ۹۵ درصد آن از یک الک مشخص مانند الک ۲۴ میکرومتر یا ۱۶ میکرومتر عبور کند و پس از آن با نسبت‌های طراحی شده به سیمان اولیه اضافه و مخلوط می‌شود. پس از اندازه‌گیری توزیع دانه‌بندی سیمان جدید ساخته شده توسط دستگاه اندازه‌گیری توزیع دانه‌بندی به طریق لیزری و انطباق آن با موارد طراحی شده، خواص رئولوژی، فیزیکی و شیمیایی سیمان مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این سیستم در صورت اجراء، از دو سیستم قبل ساده‌تر است و زمان کمتری نیاز دارد؛ خصوصاً هنگام استفاده از مواد ساییده، اجرای آزمایش‌ها ساده‌تر خواهد بود.

#### ۲-۱-۴- سیستم آسیاب زیره سیمان و ترکیب آن با سیمان اولیه

اساس این سیستم بر مبنای عملکرد جداکننده‌ها<sup>۱۹</sup> طرح ریزی شده است و به عبارتی با خارج کردن ذرات نسبتاً درشت (بالای ۶۰ تا ۷۰ میکرومتر) و خردایش مجدد آن‌ها عملی شده است. به این ترتیب با تغییر ضریب یکنواختی (با شبیه‌سازی عملکرد جداکننده) و تغییر درصد پارامتر «نرمی» (از طریق افزایش یا کاهش «بلین») می‌توان

استفاده در آزمایش استحکام تراکمی عبارتند از:

۱- دستگاه UCA<sup>TV</sup> که می‌تواند استحکام تراکمی سیمان را بر اساس زمان و به صورت پیوسته اندازه‌گیری نماید و همچنین مدت زمان انتظار بندش سیمان<sup>۲۸</sup> دوغاب‌های مختلف را بر اساس زمان عبور امواج اولتراسونیک از ستون سیمان بسنجد. این دستگاه می‌تواند در حداکثر فشار کاری ۲۰ هزار پام و حداکثر دمای کاری ۴۰۰ درجه فارنهایت عمل کند.

۲- دستگاه پرس در آزمایش استحکام تراکمی، اندازه‌گیری فشار مورد نیاز برای خرد کردن یک قالب سیمان با هندسه مشخص تحت تراکم نامحدود و یک محوری می‌باشد که توسط دستگاه پرس صورت می‌گیرد.

### ۲-۵- آزمایش آب آزاد

زمانی که دوغاب سیمان در شرایط ایستا باشد، ممکن است بر اثر رسوب ذرات سیمان، آب آزاد ایجاد شود. این مسئله در چاه‌های کج و افقی، بحرانی و مشکل آفرین خواهد بود. آزمایش آب آزاد در یک استوانه مدرج ۲۵۰ میلی‌لیتری انجام می‌شود. دوغاب سیمان تهیه شده بر اساس استاندارد API در یک گرانروی سنج، تحت دمای استاتیک ته چاه به مدت ۲۰ دقیقه به هم زده شده و درون یک استوانه ریخته می‌شود.

### ۳- تحلیل نتایج

همان‌گونه که از شکل‌های ۱ و ۲ مشخص است ضریب یکنواختی سیمان برابر  $n=1/18$  و پارامتر نرمی آن برابر  $X'=20/94$  است. به عبارت دیگر ۶۳/۲ درصد ذرات زیر ۲۰/۹۴ میکرون هستند. و این در حالی است که در اکثر سیمان‌های تولیدی داخل کشور پارامتر «نرمی» سیمان بیشتر از این مقدار و ضریب یکنواختی نیز کمتر می‌باشد.

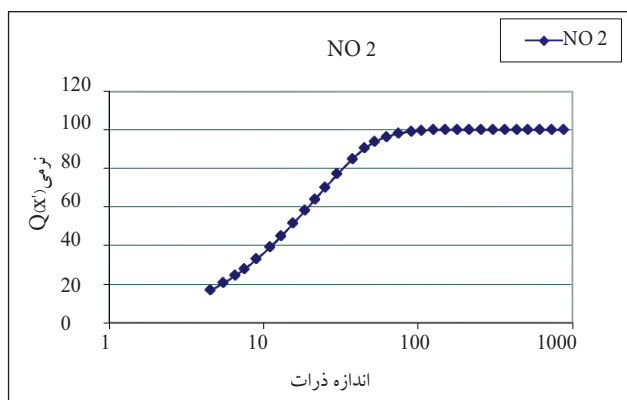
می‌شود و هر بار با جداسازی ذرات «زیر» دیگر (به عنوان مثال ۶۰، ۷۵ و ۸۰ میکرون) و سایش مجدد، سیستم‌های جدید با ضرایب یکنواختی طراحی شده ساخته می‌شوند. در صورت عدم حصول نتایج مطلوب، این عملیات تکرار می‌شود تا به ضرایب یکنواختی طراحی شده در هر یک از آزمایشات برسیم. در نهایت خواص «تر» و «خشک» دوغاب سیمان چاه نفت به وسیله تست‌های API انجام شد و تأثیر توزیع دانه‌بندی بر آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفت [۶].

### ۲-۳- آزمایش زمان بندش

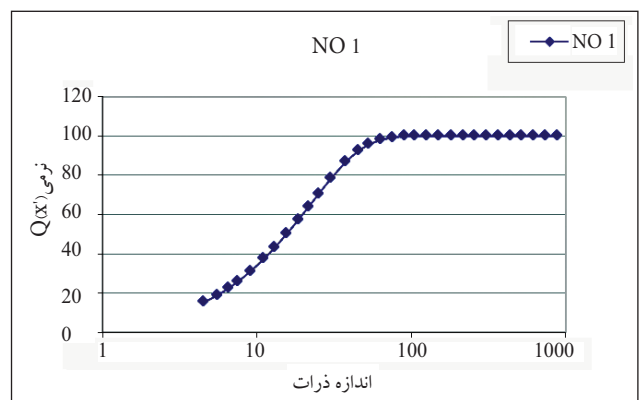
در این آزمایش، افزایش گرانروی دوغاب سیمان با گذشت زمان در شرایط دمای گردشی و فشار ته چاه نمایش داده می‌شود. هنگامی که گرانروی به ۱۰,۰۰۰ cp رسید، مدت زمان سپری شده همان زمان بندش دوغاب در نظر گرفته می‌شود. از دستگاه «کانسیستومتر»<sup>۲۵</sup> دما بالا- فشار بالا برای انجام آزمایش‌ها به روش API استفاده می‌گردد.

### ۲-۴- آزمایش استحکام تراکمی

در آزمایش استحکام تراکمی، فشار مورد نیاز برای خرد کردن یک قالب سیمان با هندسه مشخص تحت تراکم نامحدود و یک محور اندازه‌گیری می‌شود. دوغاب‌های سیمان در قالب‌های برنجی به اندازه دو اینچ مکعب بر اساس روش API و در شرایط دمای ساکن و فشار ته چاه در دستگاه Curing Chamber سخت می‌گردند. مکعب‌های سخت شده سیمانی پس از گذراندن زمان معین، برای تعیین استحکام با پرس خرد می‌گردند. سیمان سخت شده باید به اندازه‌ای استحکام داشته باشد تا لوله‌های جداری و مغزی را نگه دارد. معمولاً استحکام تراکمی به میزان ۱۰۰ پام برای نگهداشتن لوله‌های جداری کافی بوده و برای ادامه حفاری معیار استحکام تراکمی ۵۰۰ پام در نظر گرفته می‌شود. دستگاه‌های مورد



۲ | توزیع دانه‌بندی سیمان خارجی نمونه ۲ (  $X'=20/90$ ,  $n=1/59$  )



۱ | توزیع دانه‌بندی سیمان خارجی نمونه ۱ (  $X'=20/94$ ,  $n=1/18$  )



این سیمان دارای پارامتر نرمی  $X' = 32/59$  و ضریب یکنواختی  $n = 0/97$  است که نمودار دانه‌بندی آن در شکل ۳ آمده است. همان‌گونه که از نمودار توزیع دانه‌بندی این سیمان مشهود است، توزیع دانه‌بندی سیمان، مخصوصاً پارامتر «نرمی» آن نسبت به نمونه سیمان خارجی نامطلوب‌تر است و باید با ایجاد تغییرات در جداکننده‌ها و شارژ آسیاب، پارامتر «نرمی» و ضریب یکنواختی این سیمان بهبود یابد. در صورتی که پارامتر «نرمی» این سیمان به محدوده  $X' = 20$  برسد، شرایط بهتری از لحاظ مقاومت خواهد داشت. چنانچه ضریب یکنواختی این سیمان کمی افزایش یابد و به حدود  $1/2$  نزدیک شود، از لحاظ رئولوژیکی نیز خواص آن بهبود می‌یابد. ضریب یکنواختی  $n = 0/97$  نشان می‌دهد که توزیع دانه‌بندی ذرات تقریباً یکنواخت است. در چنین شرایطی آب مورد نیاز برای پر کردن حفره‌های بین ذرات بیشتر می‌شود؛ زیرا دامنه توزیع ذرات نسبت به شرایطی که توزیع ذرات غیر یکنواخت است، کاهش یافته است و برای رسیدن به مقاومت‌های بالاتر باید «بلین» را افزایش داد. در این حالت اگر چه مقاومت خمیر سیمان افزایش می‌یابد و آب آزاد نیز کاهش می‌یابد، اما عملاً واکنش‌پذیری سیمان نسبت به انواع کندکننده‌ها کاهش می‌یابد. تأثیر «بلین» در واکنش‌پذیری سیمان‌های چاه نفت با انواع کندکننده‌ها آنقدر زیاد است که حتی در یک سیمان چاه نفت که تمام خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن در محدوده استاندارد هستند، اگر شاخص «بلین» تغییر کند اکثر پارامترهای فیزیکی و شیمیایی نیز به هم می‌ریزد و برخی از آن‌ها از محدوده استاندارد خارج می‌شوند. به همین دلیل استاندارد API محدوده مشخصی برای «بلین» ندارد.

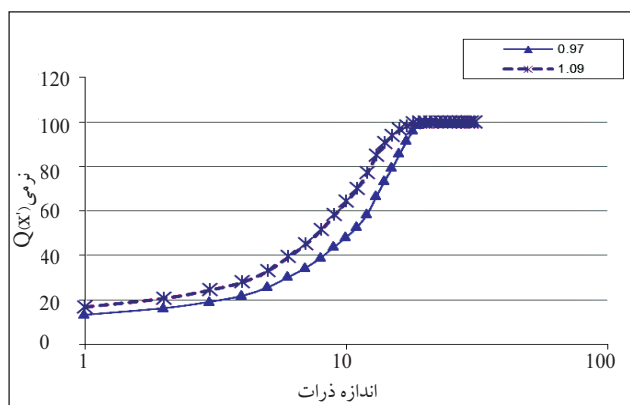
مطابق شکل ۴، شیب نمودار توزیع ذرات، مقیاسی از نسبت بین ذرات «نرمه» و «زیره» در دانه‌های سیمان است؛ در حالی که پارامتر «نرمی»، سطح نرمی سیمان را مشخص می‌کند. برای یک سطح ویژه

در نمونه دوم، پارامتر نرمی این سیمان  $X' = 20/9$  و ضریب یکنواختی آن برابر  $n = 1/09$  است. بر اساس نتایج به دست آمده، پارامتر نرمی دو سیمان فوق‌الذکر تقریباً برابر است و این بدان معناست که شرکت‌های تولیدکننده سیمان چاه نفت در خارج از کشور برای اصلاح توزیع دانه‌بندی سیمان، از میان سه پارامتر رایج کنترل دانه‌بندی یعنی: «بلین» ( $cm^2/gr$ )، «ضریب یکنواختی» و «پارامتر نرمی»، نسبت به پارامتر نرمی، توجه ویژه‌ای دارند و مقدار آن را کنترل کرده‌اند. نکته حائز اهمیت اینکه، شاخص «بلین» این دو سیمان کاملاً متفاوت است. مطابق آزمایش‌های انجام شده، «بلین» سیمان نمونه ۱، برابر  $3,250 cm^2/gr$  و «بتلین» نمونه ۲، برابر  $3450 cm^2/gr$  است.

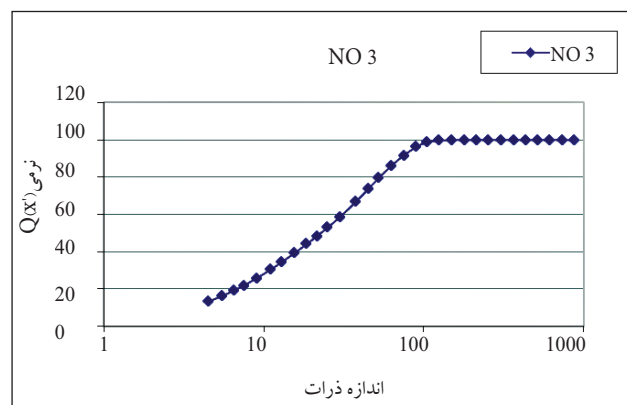
بر خلاف نظرات متعدد پذیرفته شده، مبنی بر اینکه مقاومت نهایی سیمان از طریق سطح ویژه تعیین شده توسط شاخص «بلین» مشخص می‌شود، باید توجه نمود که در عمل این گونه نیست و افزایش سطح ویژه همواره به معنای بهبود توزیع دانه‌بندی مطلوب، که از آن به عنوان محدوده مؤثر در مقاومت سیمان یاد می‌شود، نمی‌باشد.

بهترین محدوده برای افزایش دانه‌بندی مطلوب، از «بلین»  $3000 cm^2/gr$  تا  $4000 cm^2/gr$  است و از «بلین»  $5000 cm^2/gr$  به بعد عملاً درصد ذرات مطلوب ۳ تا ۳۰ میکرومتر کاهش می‌یابد. حتی در یک ضریب یکنواختی ثابت از سیمان ( $n = 1$ ) و یک سطح ویژه «بلین» یکسان، مقاومت استاندارد به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر پارامتر نرمی ( $X'$ ) قرار می‌گیرد.

برای بررسی و شناخت توزیع دانه‌بندی شرکت‌های تولیدکننده سیمان چاه نفت در داخل کشور، پس از تهیه این نوع سیمان از بازار، توزیع دانه‌بندی آن‌ها با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری توزیع دانه‌بندی به روش لیزری<sup>۲۹</sup> که در آن از مدل سیمپاتک استفاده می‌شود اندازه‌گیری شد.



شکل ۴ | مقایسه توزیع دانه‌بندی و ضریب یکنواختی



شکل ۳ | توزیع دانه‌بندی نمونه سیمان داخلی ( $X' = 59/32$ ,  $n = 97/0$ )

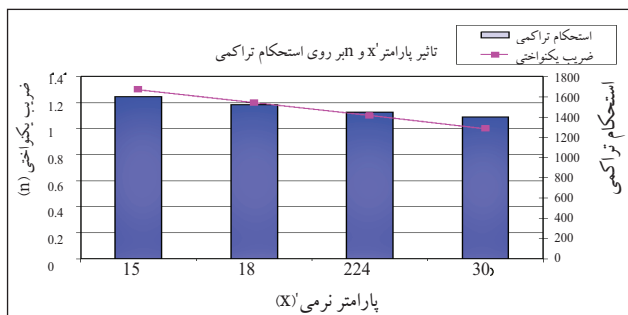
تفاوت‌ها به خوبی در پارامتر «نرمی» سیمان ( $X'$ ) و ضریب یکنواختی سیمان ( $n$ ) مشهود است.

برای تشخیص اثر ضریب یکنواختی بر زمان بندش، چندین نمونه مورد آزمایش قرار می‌گیرند. با دانستن اینکه پارامتر «نرمی» بر زمان بندش اثر می‌گذارد و با توجه به مقادیر طراحی شده برای ضریب یکنواختی و آزمایش‌هایی که بر روی خواص این سیمان‌ها انجام می‌شود، بهترین ضریب یکنواختی که قابل دسترسی باشد انتخاب شده و بر روی آن نمونه، اثر تغییرات پارامتر «نرمی» بررسی می‌شود. پس از ساختن نمونه طراحی شده، زمان بندش مشابه شکل ۶ با ضریب یکنواختی و پارامتر نرمی تغییر می‌کند.

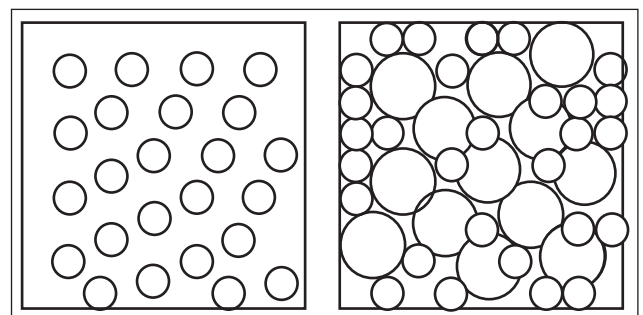
آزمون سنجش مقاومت برای هر یک از ضرایب یکنواختی و پارامترهای طراحی شده انجام می‌گیرد و پس از رسم نمودار آن (شکل ۷) بهترین توزیع دانه‌بندی قابل دسترس که بیشترین مقاومت را نیز دارد، استخراج می‌گردد (لازم به ذکر است که آزمون سنجش مقاومت برای تمام نمونه‌ها انجام شده است). در حالت بهینه و بهترین محدوده دانه‌بندی، چنانچه پارامتر «نرمی» سیمان به محدوده  $X' = 20$  و ضریب یکنواختی به حدود  $n = 1/2$  برسد، شرایط بهتری از لحاظ

«بلین» یکسان بین دو نمونه سیمان: یکی با شیب زیادتر «توزیع اندازه ذرات» (به دلیل ریزتر بودن مجموعه نرمه) و دیگری با شیب کمتر «توزیع اندازه ذرات» (که حاوی نسبت بزرگتری از ذرات نرم است)، در حالت مقایسه، سیمان با شیب بیشتر، نشان دهنده دفعات آسیاب بیشتر است. به طور کلی می‌توان گفت تا جایی که خواص سیمان حفظ شده باشد، همیشه یک سیمان با توزیع یکنواخت اندازه ذرات، نسبت به یک سیمان با همان مساحت سطح ویژه و توزیع غیر یکنواخت اندازه ذرات، نیاز به آب بیشتری دارد. این موضوع به صورت ایده آلی در شکل ۵ نشان داده شده است. مقدار آب مورد نیاز برای پر کردن حجم خالی بین ذرات سیمان، نقش بسیار مهمی در مقدار آب مورد نیاز برای یک سیمان دارد. همواره حجم‌های خالی بزرگتر با دامنه ذرات باریک‌تر، آب بیشتری نیاز دارند. به عبارت دیگر، با دامنه ذرات گسترده‌تر، تخلخلی که بین ذرات درشت وجود دارد، به وسیله ذرات «نرم» تر پر می‌شود که نتیجه آن کاهش تخلخل و نیازمندی به آب کمتر در سیمان است.

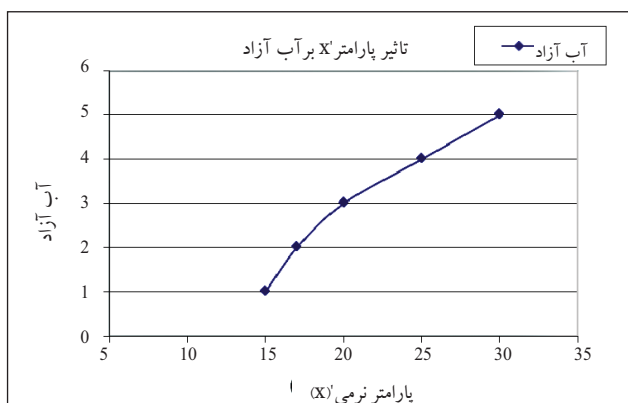
نتایج به دست آمده از آنالیز توزیع دانه‌بندی سیمان‌های تولید شرکت‌های داخلی و خارجی نشان می‌دهد که نحوه توزیع دانه‌بندی سیمان‌های خارجی با کلیه سیمان‌های داخلی متفاوت است و این



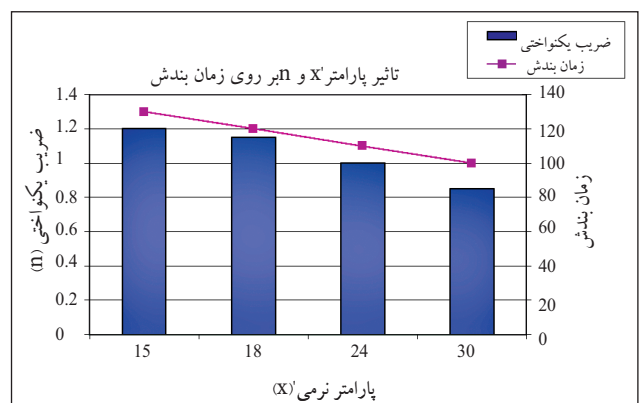
شکل ۷ | تأثیر شاخص‌های  $n$  و  $X'$  بر مقاومت



شکل ۵ | سیمان با توزیع یکنواخت اندازه ذرات (شکل سمت چپ) نسبت به یک سیمان با همان مساحت سطح ویژه و توزیع غیر یکنواخت اندازه ذرات (شکل سمت راست)



شکل ۸ | تأثیر شاخص  $X'$  بر آب آزاد



شکل ۶ | تأثیر شاخص‌های  $n$  و  $X'$  بر زمان بندش



مقاومت می‌باشد.  
 ۳. در ضریب یکنواختی ثابت (n)، با کاهش پارامتر نرمی ( $X'$ )، «بلین» افزایش می‌یابد و در این راستا مقاومت و زمان بندش، افزایش و آب آزاد کاهش می‌یابد.  
 ۴. به ازای مقادیر ثابتی از پارامتر نرمی، با افزایش ضریب یکنواختی (n)، «بلین» کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد علیرغم یکنواختی ذرات که می‌تواند در بخش «زبره» سیمان متمرکز باشد، به خاطر تثبیت پارامتر نرمی ( $X'$ )، «بلین» کاهش می‌یابد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

با توجه به توزیع دانه‌بندی نمونه سیمان‌های خارجی، مشخص می‌شود که ضریب یکنواختی در این سیمان‌ها بیشتر از سیمان‌های تولید شده در داخل کشور است. به عبارتی در سیمان‌های خارجی سعی شده توزیع دانه‌بندی، محدوده باریک تری داشته باشد. همچنین درصد «زبره» روی الک ۶۰ یا ۷۰ میکرون، نسبت به سیمان‌های داخل کشور بسیار کمتر است؛ در حالی که شدت این مساله در مورد «نرمه» یا ذرات زیر ۵ تا ۱۰ میکرون کمتر است. با توجه به این که در یک کارخانه سیمان، آسیاب‌ها بیشترین مصرف انرژی را دارند، برای تولید ذرات با دانه‌بندی درشت‌تر، در آسیاب انرژی کمتری مصرف شده و از لحاظ اقتصادی بسیار مقرون به صرفه‌تر است.

مقاومت و رئولوژیکی خواهد داشت. طبق نتایج آزمون آب آزاد (شکل ۸) با کاهش پارامتر نرمی ( $X'$ )، «بلین» افزایش می‌یابد و در این راستا آب آزاد کاهش می‌یابد.

با توجه به مقادیر طراحی شده برای ضریب یکنواختی در توزیع دانه‌بندی، نتایج زیر حاصل می‌شود:

۱. با توزیع دانه‌بندی در یک سطح ویژه ثابت از سیمان، با افزایش ضریب یکنواختی (n) و در نتیجه کاهش پارامتر نرمی ( $X'$ )، زمان بندش و مقاومت استاندارد بالاتری را خواهیم داشت.
۲. به ازای ضریب یکنواختی ثابت در سیمان (ثابت n) و یک سطح ویژه «بلین» یکسان، مقاومت یک سیمان به شدت تحت تأثیر پارامتر نرمی ( $X'$ ) قرار می‌گیرد که به دلایل زیر است:  
 ۱-۲: بخش قابل توجهی از ذرات برای عملیات هیدراتاسیون زیر محدوده  $X'$  قرار می‌گیرند. لذا اگر این بخش را ذرات نرم‌تر تشکیل دهند، بالطبع در روند هیدراتاسیون سیمان نقش غالبی را ایفا می‌نمایند.  
 ۲-۲: بهبود مقاومت سیمان از طریق اندازه ذرات زیر ۳۰ میکرون به طور عمده قابل بررسی است و ارزیابی‌ها توسط پارامترهای تعیین کننده «نرمی» سیمان شامل: «بلین»، ضریب یکنواختی (n) و پارامتر نرمی ( $X'$ ) و تأثیر تغییرات آن بر روی مقاومت سنین مختلف سیمان، حاکی از تأثیر همزمان این پارامترها بر روی

#### پانویس‌ها

- |  |  |  |
|--|--|--|
| <sup>1</sup> saber_mohammadi@alum.sharif.edu | <sup>10</sup> Permeability               | <sup>20</sup> Crusher                      |
| <sup>2</sup> entezari552003@yahoo.com        | <sup>11</sup> Porosity                   | <sup>21</sup> Particles Size Analyser      |
| <sup>3</sup> rezvan_behfar@yahoo.com         | <sup>12</sup> Coating                    | <sup>22</sup> Sedimentation                |
| <sup>4</sup> Uniformity Coefficient          | <sup>13</sup> Aggregation                | <sup>23</sup> Stoke's Law                  |
| <sup>5</sup> Softness Parameter              | <sup>14</sup> Agglomeration              | <sup>24</sup> Thickening Time              |
| <sup>6</sup> Blaine                          | <sup>15</sup> Particle Size Distribution | <sup>25</sup> Consistometer                |
| <sup>7</sup> Soft Particles                  | <sup>16</sup> Sympatec Model             | <sup>26</sup> Compressive Strength         |
| <sup>8</sup> Coarse Particles                | <sup>17</sup> Cylpebs                    | <sup>27</sup> Ultrasonic Cement Analyzer   |
| <sup>9</sup> Retarder                        | <sup>18</sup> Sort                       | <sup>28</sup> Weight On Cement (WOC)       |
|  | <sup>19</sup> Separators                 | <sup>29</sup> Laser Particle Size Analyzer |

#### منابع

- [1] R.G. Blezard, "Reflections on the History of the Chemistry of Cement", Society of Chemical Industry - Lecture Paper Series, 104, 2000.
- [2] A. Kumar and D.M. Roy, Cem. Concr. Aggregates, a, 47, 1984.
- [3] F. Skvara, K. Kolar, J. Novotny, Z. Zadak, CemConcr, Res.11, 247, 1981.
- [4] V.S. Bakchoutou, kh. Al-Vardi, T. Pin-Khouan, and M.K. Nikolaeva, 7th Intern. Congress on the Chem of Cement, vol III P.V-202 Edition Seotima, Paris, France, 1980.
- [5] L. PHunt and C.W. Elspass, " Particle-size Properties of Oilwell Cements", Cement and Concrete Research, vol. 16, pp. 805-812, 1986.
- [6] American Petroleum Institute, "Specification for Materials and Testing for Well 6", 1993.