

## راهکارهای ساده تشخیص میکروسیلیس از پودر سیلیس میکرونیزه

محسن تدین – رئیس هیئت مدیره انجمن بتن ایران

### چکیده

امروزه مصرف میکروسیلیس (دوده سیلیس)<sup>۱</sup> در ایران و جهان رایج شده است. برخی تصور می‌کنند که پودر سیلیس میکرونیزه همان کاربرد و خواص را دارد و گاه سودجویی بیش از حد به این امر دامن می‌زند. از اوایل دهه ۸۰ هجری شمسی، متأسفانه فروش پودر (آرد) سیلیس میکرونیزه<sup>۲</sup> و مصرف آن به جای میکروسیلیس به چشم می‌خورد. در این نوشته سعی شده است، تفاوت‌های میکروسیلیس به عنوان یک پوزولان بسیار فعال با پودر سیلیس که ماده‌ای غیر پوزولانی و غیرفعال (خنثی) است تعیین گردد. هم‌چنین راهکارهای تشخیص این دو ماده از هم به صورت کارگاهی (ساده) و به صورت آزمایشگاهی پیشرفته ذکر می‌شود. آزمایش‌های تعیین چگالی انبوهی، چگالی ذرات و ته‌نشینی به صورت ساده و آزمایش‌های تشخیص میکروسکوپی میکروسیلیس، فعالیت پوزولانی، مانده روی الک ۴۵ میکرومتر و نهایتاً تعیین سطح ویژه (ریزی) از جمله آزمایش‌هایی است که احتیاج به تجهیزات پیشرفته‌تر آزمایشگاهی دارد. هم‌چنین معیارهای تشخیص در این نوشته ارائه اولیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: میکروسیلیس، آرد سیلیس، پودر سیلیس میکرونیزه، چگالی انبوهی، چگالی ذرات، ته‌نشینی.

## ۱. مقدمه

میکروسیلیس یا دوده سیلیس، محصول جانبی تولید فروسیلیس یا فروآلیاژ است. فروسیلیس یا فروآلیاژ در کوره‌هایی تولید می‌شود که انرژی آن توسط قوس الکتریکی تأمین می‌گردد. ذرات سیلیس مذاب ریز ایجاد شده در بالای سطح کوره، در اثر جریان ناشی از اختلاف دما، به سمت دهانه خروجی دودکش حرکت می‌کند و خیلی زود و سریع، سرد می‌گردد و سیلیس بی‌شکل یا غیربلوری (آمورف) حاصل می‌شود که میکروسیلیس نام دارد. ذرات غیر بلوری تولیدی، کروی شکل و بسیار ریز هستند. معمولاً بیش از ۸۵ درصد این ذرات را سیلیس ( $\text{SiO}_2$ ) تشکیل می‌دهد و ناخالصی‌هایی را نیز شامل می‌شود. این ذرات معمولاً در حدود ۵ تا ۲۵ میکرون هستند.

سیلیس غیربلوری، خاصیت پوزولانی دارد. پوزولان‌ها در فشار یک اتمسفر و دمای معمول، با آهک هیدراته موجود در خمیر سیمان پرتلند با حضور رطوبت ترکیب می‌شود و چسب سیلیکات کلسیمی می‌دهد.

سیلیس بلوری به شکل کوارتز نمی‌تواند در فشار و دمای عادی با آهک زنده یا هیدراته علیرغم وجود رطوبت، واکنش دهد و بنابراین خاصیت پوزولانی ندارد و بی‌اثر باقی می‌ماند.

به دلیل خلوص قابل توجه میکروسیلیس و ریزی زیاد آن، واکنش‌های آن با آهک هیدراته در محیط مرطوب با آهنگ سریع اتفاق می‌افتد و از این نظر در بین همه پوزولانها، شاخص به شمار می‌آید. از این نظر متاکائولن و خاکستر پوسته برنج در مرتبه‌های بعدی هستند.

این پوزولان بسیار فعال، علاوه بر افزایش مقاومت بتن در سنین اولیه (و مقاومت در سنین بعدی تا حدود سه ماه) می‌تواند نفوذپذیری بتن را در برابر آب و به‌ویژه یون کلرید کم کند. هم‌چنین با افزایش شدید مقاومت ویژه الکتریکی بتن، علاوه بر ایجاد تأخیر در شروع خوردگی، آهنگ خوردگی میلگرد بتن را کاهش می‌دهد. از این نظر هیچ پوزولانی، یارای رقابت با دوده سیلیس را ندارد و این ماده یکه‌تاز و بی‌همتا محسوب می‌شود. به‌رحال حداقل مصرف آن ۵ درصد مواد سیمانی است.

کاهش انبساط ناشی از واکنش سنگدانه‌های واکنش‌زا با قلیایی‌های موجود در سیمان و بتن، به کمک میکروسیلیس نیز ممکن می‌شود، به شرط اینکه مصرف آن از ۵ درصد مواد سیمانی کمتر نباشد. مقاومت بتن در برابر سایش با مصرف دوده سیلیس افزایش می‌یابد. مقاومت در برابر یخ زدن و آب شدن‌های پی‌درپی به کمک میکروسیلیس در بازه معین ۵ تا ۱۰ درصد مواد سیمانی، افزایش نشان می‌دهد. تقاضای آب در بتن تازه حاوی میکروسیلیس به‌مراتب بیشتر از بتن حاوی پودر سیلیس است و در مقدار آب برابر، بتن حاوی میکروسیلیس روانی کمتری خواهد داشت.

## ۲. تولید میکروسیلیس در ایران

میکروسیلیس در ایران در اواخر دهه ۶۰ در کارخانه صنایع فروآلیاژ ایران در ازنا برای اولین بار تولید شد. در اوایل دهه ۷۰، کارخانه فروسیلیس سمنان نیز، اقدام به تولید این ماده نمود.

از اوایل دهه ۹۰ تاکنون کارخانه‌هایی در اطراف اشتهارد، ملایر (دو کارخانه)، کاشان، خمین، ساوه و اصفهان با ظرفیت کمتری نسبت به این دو کارخانه، تولید کشور را بالاتر بردند. در مجموع تعداد کارخانه‌ها به ۹ می‌رسد.

در اواخر دهه ۷۰ و در ابتدای دهه ۸۰، تولید میکروسیلیس کشور در حدود ۱۲،۰۰۰ تن بود و در این سال‌ها ناگهان تقاضای این ماده به‌ویژه در پروژه‌های منطقه پارس جنوبی رو به فزونی گذاشت و عملاً عرضه آن

جوابگوی تقاضای صنعت بتن نبود. فکر واردات میکروسیلیس به همراه واردات خاکستر بادی در این ایام قوت گرفت و همچنین قیمت میکروسیلیس رو به افزایش گذاشت. این امر زمینه‌ساز تقلب شد و پودر سیلیس میکرونیزه یا آرد سیلیس به جای میکروسیلیس به بازار عرضه شد و ناآگاهان آن را بی‌توجه به تأثیر آن بر بتن به کار بردند. این روند، علیرغم تولید میکروسیلیس کافی و بیش از تقاضا، کماکان ادامه دارد. ظرفیت تولید میکروسیلیس در کشور اینک در حدود ۵۱,۰۰۰ تن است که سهم دو کارخانه بزرگ فروآلیاژ ایران (ازنا) و فروسیلیس سمنان قبل از سال ۹۳ و هم‌اکنون نزدیک به ۳۰,۰۰۰ تن برآورد می‌گردد.

#### ظرفیت تولید کارخانه‌های میکروسیلیس ایران تا آخر سال ۹۷ شمسی

نام کارخانه	شهر	استان	مقدار (تن)
صنایع فرو و آلیاژ ایران	ازنا	لرستان	۲۰,۰۰۰
فروسیلیس ایران	سمنان	سمنان	۸۴۰۰
فروسیلیس غرب	ملایر	همدان	۸۰۰۰
آهن و سیلیس آذرخش	ملایر	همدان	۳۶۰۰
آلیاژ سازان	اشتهارد	البرز	۱۶۰۰
فروآلیاژ کاویان	ساوه	مرکزی	۱۶۰۰
فروآلیاژ اکسین	ذوب آهن اصفهان	اصفهان	۲۰۰۰
فروآلیاژ گستر هامون	کاشان	اصفهان	۲۰۰۰
فروآلیاژ پیام هونامیک	خمین	مرکزی	۴۰۰۰

تولید واقعی این کارخانه‌ها معمولاً کمتر از ظرفیت تولید آنها است.

### ۳. تولید پودر سیلیس میکرونیزه یا آرد سیلیس در ایران

در نقاط مختلف ایران، سیلیس زیادی وجود دارد که دارای خلوص قابل توجهی است و به مصارف گوناگونی می‌رسد. پودر کردن سیلیس از جمله اقداماتی است که برای کاربردهای مختلف انجام می‌شود. برخی گمان کرده‌اند که پودر سیلیس میکرونیزه یا آرد سیلیس همان میکروسیلیس است. برخی دیگر علیرغم آگاهی از تفاوت فاحش آنها با یکدیگر، اقدام به فروش پودر سیلیس میکرونیزه یا آرد سیلیس به جای میکروسیلیس می‌کنند.

سیلیس تا اندازه ۱۰ میکرون با آسیاب کردن، پودر و ریز می‌شود که تفاوت اساسی و زیادی با اندازه میکروسیلیس دارد. پودر کردن آن به صورت ریزتر عملاً مشکل و پرهزینه است و تجهیزات پیشرفته‌تری را نیاز دارد.

از نظر حجم تولید پودر سیلیس عملاً محدودیت چندانی وجود ندارد و می‌توان در صورت نیاز، صدها هزار تن پودر را در اختیار گرفت. قیمت آن به مراتب کمتر از میکروسیلیس می‌باشد و بسته به ریزی آن در حدود نصف قیمت میکروسیلیس است.

گاه برخی سودجویان سنگ‌های آهکی (کربنات کلسیم) نرم را پودر می‌کنند که به خوبی می‌تواند ریز شود و هزینه آسیاب کردن آن نیز کمتر از پودر کردن سیلیس است.

#### ۴. راهکارهای تشخیص پودر سیلیس از میکروسیلیس

تمیز دادن و بازشناسی پودر سیلیس از میکروسیلیس از یک دیدگاه به دو صورت کارگاهی ساده و آزمایشگاهی پیشرفته تقسیم می‌شود. از دیدگاهی دیگر می‌توان این روش‌ها را به صورت عملکردی و غیر عملکردی نیز در نظر گرفت.

آزمایش‌های ساده یا کارگاهی با استفاده از امکانات آزمایشگاهی کارگاهی انجام می‌شود. آزمایش تعیین چگالی انبوهی و آزمایش تعیین چگالی ذرات و آزمایش ته‌نشینی از این نوع آزمایش‌ها هستند. آزمایش‌های پیشرفته‌تر آزمایشگاهی شامل آزمایش مشاهده میکروسکوپی، تعیین درصد گذشته از الک ۴۵ میکرون، تعیین شاخص فعالیت پوزولانی و نهایتاً تعیین سطح ویژه به روش جذب نیتروژن می‌باشد. به جز آزمایش میکروسکوپی، سه آزمایش دیگر، آزمایش‌های مرتبط با ویژگی‌های استاندارد مربوط به میکروسیلیس است. در بین همه آزمایش‌های ساده کارگاهی و پیشرفته، تنها تعیین شاخص فعالیت پوزولانی یک آزمایش عملکردی محسوب می‌گردد، هر چند آزمایش کاهش انبساط ملات در محیط سولفاتی و واکنش‌زایی سنگدانه و قلیایی‌ها نیز از جمله آنها به حساب می‌آید. آزمایش‌ها همواره با توجه به معیارها، ملاک تشخیص مواد مختلف و انطباق با ویژگی‌های استاندارد است که در ادامه به آنها اشاره می‌شود.

#### ۴.۱. آزمایش تعیین چگالی انبوهی غیرمتراکم

این آزمایش را می‌توان با یک پیمانۀ ۱ لیتری تا ۳ لیتری طبق استاندارد ASTM C29 یا استاندارد ملی به شماره ۴۹۸۱ به صورت غیرمتراکم انجام داد، هر چند این استاندارد مربوط به سنگدانه است. ماده پودری مشکوک را بسته به حجم پیمانۀ (حدود ۶۰۰ گرم برای پیمانۀ ۱ لیتری یا حدود ۱/۸ کیلوگرم برای پیمانۀ ۳ لیتری) برمی‌داریم و در یک ظرف با حجم حدود ۵ یا ۱۵ لیتری (بسته به حجم یا وزن نمونه) می‌ریزیم و درب آن را محکم می‌کنیم و به شدت به هم می‌زنیم تا کاملاً به صورت غیر متراکم و پف کرده در آید. سپس با یک سرتاس، مواد را از ارتفاع ۱۰ تا ۱۵ سانتیمتری بالای پیمانۀ، داخل آن می‌ریزیم تا پیمانۀ پر شود. با یک خط کش سرزن، ماده اضافی را بدون لرزش حذف می‌کنیم و پیمانۀ پر از ماده را وزن می‌کنیم،  $W_f$  با توجه به وزن پیمانۀ خالی  $W_m$  و حجم پیمانۀ  $V_m$ ، چگالی انبوهی ماده پودری غیر متراکم به دست می‌آید.

$$D_p = \frac{W_f - W_m}{V_m}$$

چنانچه وزن‌ها برحسب Kg و حجم برحسب میلی‌لیتر باشد چگالی برحسب گرم بر میلی‌لیتر یا تن بر مترمکعب به دست می‌آید.

مقدار چگالی انبوهی غیرمتراکم میکروسیلیس‌های ایران معمولاً بین ۰/۱۷۵ تا ۰/۳۵ تن بر مترمکعب است. در مورد پودر سنگ سیلیس این مقدار بین ۰/۵ تا ۰/۶۵ تن بر مترمکعب به دست می‌آید. البته شرکت فروآلیاژ ایران (ازنا) به تازگی شروع به متراکم کردن میکروسیلیس خود کرده است، و چگالی انبوهی محصول خود را به ۰/۵۵ تن بر مترمکعب رسانده است.

#### ۲.۴. آزمایش تعیین چگالی ذرات

این آزمایش را می‌توان طبق استاندارد ASTM C188 یا استاندارد ملی ۷۱۴۸ و ۳ - ۱۸۸۰۷ به دست آورد و یا طبق استاندارد ASTM D 854 خاک ریزدانه یا استاندارد ملی مشابه آن چگالی ذرات را تعیین کرد. همچنین از روش مندرج در استاندارد ASTM C135 و یا روش اصلاح شده مربوط به ASTM C604 می‌توان استفاده نمود. شاید امکانات آزمایشگاه کارگاهی نزدیک‌تر به امکانات روش‌های استاندارد ASTM C135 و ASTM D854 باشد. در این روش به کمک یک بالن ژوژه یا پیکنومتر، در حالت سرد یا جوشانیده و به کارگیری روش تعیین حجم ذرات در اثر جابجایی آب و داشتن جرم ذرات، می‌توان چگالی ذرات را به دست آورد. چگالی ذرات میکروسیلیس معمولاً بین ۲/۱ تا ۲/۳ گرم بر میلی‌لیتر می‌باشد. در مورد پودر سیلیس این مقدار معمولاً بیش از ۲/۵۵ و تا حدود ۲/۶۵ گرم بر میلی‌لیتر است.

#### ۳.۴. آزمایش هیدرومتری یا ته‌نشینی ذرات

این آزمایش در واقع برای خاک‌های ریزدانه و تشخیص دانه‌بندی آنها انجام می‌شود. در ASTM D422 و استاندارد ملی مشابه می‌توان روش کار را مشاهده کرد. چنانچه از این آزمایش به صورت مقایسه‌ای استفاده شود نیازی به انجام محاسبات نیست. اگر یک میکروسیلیس را با پودر مشکوک در این آزمایش (در دو استوانه جداگانه) و هم‌زمان آزمایش کنیم مشاهده می‌شود که پودرهای سیلیس یا سنگ‌آهک به مراتب سریع‌تر از میکروسیلیس در آب حاوی ماده پراکنده‌کننده ته‌نشین می‌شوند. گاه میکروسیلیس در طول ۲۴ یا ۴۸ ساعت در آب حاوی پراکنده‌کننده ته‌نشین نمی‌شود و معلق می‌ماند و زلال نمی‌شود. در حالی که پودر سنگ سیلیس یا آهک پس از ۲ تا ۳ ساعت در آب حاوی ماده پراکنده‌کننده ته‌نشین می‌گردد و زلال می‌شود.

#### ۴.۴. آزمایش میکروسکوپی

چنانچه یک میکروسکوپ معمولی (با بزرگنمایی ۴۰ تا ۱۰۰) در دست باشد، می‌توان ذرات پودر سنگ را با شکل نامنظم و تیز گوشه در زیر آن مشاهده نمود. ذرات میکروسیلیس صرفاً به صورت کلوخه قابل مشاهده است و نمی‌توان ذرات گردگوشه و ریز میکروسیلیس را در زیر چنین میکروسکوپ‌هایی دید. برای دیدن ذرات میکروسیلیس، نیاز به میکروسکوپ الکترونی با بزرگنمایی ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ وجود دارد.

#### ۵.۴. آزمایش درصد گذشته از الک ۴۵ میکرون

طبق استاندارد ASTM C430 می‌توان درصد مانده روی الک شماره ۳۲۵ یا ۴۵ میکرون را به دست آورد. این آزمایش نمی‌تواند چندان در تشخیص میکروسیلیس از پودر سیلیس مؤثر باشد اما به‌رحال به‌نظر می‌رسد درصد مانده پودر سیلیس بیشتر از میکروسیلیس باشد. در مورد میکروسیلیس درصد مانده روی الک مزبور نباید از ۱۰ درصد بیشتر باشد. به‌رحال ممکن است برای پودر سیلیس هم این مقدار کمتر از ۱۰ درصد به دست آید.

#### ۴.۶. آزمایش تعیین سطح ویژه

این آزمایش به تجهیزات ویژه‌ای نیازمند است و برای پودر ریزی مانند میکروسیلیس امکان استفاده از دستگاه بلین وجود ندارد؛ اما می‌توان برای پودر مشکوک از دستگاه بلین استفاده نمود. در این حالت سطح ویژه باید بسیار زیاد باشد تا احتمال داد میکروسیلیس موجود است. به‌هرحال چنانچه سطح ویژه پودر در حد مقادیر کمتر از ۳۰۰۰ تا حدود ۵۰۰۰ سانتیمترمربع باشد مسلماً با یک پودر سنگ روبرو هستیم.

برای تعیین ریزی یا سطح ویژه میکروسیلیس باید از روش جذب نیتروژن (BET) طبق استاندارد ASTM C1069 استفاده نمود و مقدار به‌دست آمده معمولاً در محدوده ۱۲ تا ۳۰ مترمربع بر گرم (۱۲۰،۰۰۰ تا ۳۰۰،۰۰۰ سانتیمترمربع بر گرم) می‌باشد هر چند حداقل آن در استاندارد ۱۵ مترمربع بر گرم است.

#### ۴.۷. آزمایش تعیین شاخص فعالیت پوزولانی تسریع شده

این آزمایش از جمله آزمایش‌های عملکردی است که امکانات نسبتاً گسترده‌ای را نیازمند است. در این آزمایش مقاومت فشاری ۷ روزه تسریع شده ملات استاندارد سیمان و ملات حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس جایگزین سیمان طبق استاندارد تغییر یافته ASTM C311 و شبیه ASTM C109 به دست می‌آید. نسبت مقاومت فشاری ملات حاوی میکروسیلیس به مقاومت بدون میکروسیلیس باید از ۱۰۵ درصد بیشتر باشد. برای تسریع در کسب مقاومت پس از یک روز، شش روز ملات‌ها در دمای ۶۵ درجه سلسیوس قرار می‌گیرد و سپس مقاومت‌های فشاری ملات‌ها به دست می‌آید.

چنانچه از یک پودر سنگ سیلیسی یا کربناتی استفاده شود معمولاً این نسبت کمتر از ۱۰۰ درصد به دست می‌آید و نشانه عدم فعالیت پوزولانی آن ماده خواهد بود.

#### ۴.۸. آزمایش کنترل انبساط سنگدانه واکنش‌زا با قلیایی‌ها

این آزمایش به‌صورت اختیاری در استاندارد ASTM C1240 آمده است. طبق ASTM C441 با یک سنگدانه شدید واکنش‌زا مانند پیرکس یا شیشه بورو سیلیکاتی واکنش‌زا با قلیایی‌ها ملاتی با سیمان پرقلیا (۰/۹۵ تا ۱/۰۵ درصد معادل قلیائی نسبت به سیمان) ساخته و عمل‌آوری و انبساط ۱۴ روزه آن اندازه‌گیری می‌شود که باید حداقل ۰/۲۵ درصد باشد. سپس ملات مشابه با جایگزینی ۱۰ درصد میکروسیلیس ساخته و عمل‌آوری می‌گردد و باید انبساطی معادل حداکثر ۸۰ درصد ملات شاهد داشته باشد.

بدیهی است که پودر سیلیس یا پودر مشابه دیگری نمی‌تواند ۲۰ درصد کاهش در انبساط به وجود آورد. این آزمایش نیز یک آزمایش عملکردی است.

#### ۵. نتیجه‌گیری

تشخیص و تمیز دادن و بازشناسی میکروسیلیس از پودر سیلیس یا پودر سنگ‌های کربناتی با آزمایش‌های نسبتاً ساده و کارگاهی امکان‌پذیر است. هر چند اگر آزمایش‌های مندرج در ویژگی‌های استاندارد میکروسیلیس انجام شود مسلماً تشخیص میکروسیلیس از پودر سیلیس دقیقاً امکان‌پذیر می‌باشد. بدین ترتیب خیلی زود می‌توان از مصرف پودرهای تقلبی در کارگاه جلوگیری نمود و امید است تا زمینه این نوع تقلب‌ها از بین رود.