



شماره ۳۰ - مواد سیمانی مکمل

مواد سیمانی مکمل (SCMs) چیست؟

بتن در ساده‌ترین شکل آن، مخلوطی از سیمان، ماسه، سنگدانه درشت و آب است. سیمان اصلی استفاده‌شده، سیمان پرتلند یا سیمان آمیخته است. بیش‌تر مخلوط‌های بتن شامل مواد سیمانی مکمل هستند که بخشی از ترکیب سیمانی بتن را تشکیل می‌دهند. این مواد به طور معمول، محصولات جانبی فرآیندهای دیگر یا مواد طبیعی هستند. برخی مواد سیمانی مکمل، ممکن است نیاز به فرآیندهای بیش‌تر از جمله خشک‌کردن، کلسینه‌کردن یا آسیاب‌کردن برای استفاده در بتن داشته باشند. برخی از این مواد، پوزولان‌ها بوده که خواص سیمانی نداشته اما هنگام استفاده در کنار سیمان، واکنش‌داده و ترکیبات سیمانی تشکیل می‌دهند. مواد دیگر، مانند سرباره و کلاس C خاکستر زغال‌سنگ، خواص سیمانی از خود نشان می‌دهند. برای استفاده در بتن، مواد سیمانی مکمل باید با الزامات استانداردهای معتبر مطابقت داشته باشند. بیش از یک ماده مکمل ممکن است در مخلوط‌های بتن استفاده شود. این مواد می‌توانند بخشی از سیمان آمیخته بوده یا به صورت جداگانه در تاسیسات تولید بتن استفاده شوند.

خاکستر زغال‌سنگ

به خاکستر بادی یا تمخاکستری که محصول جانبی کوره‌های سوخت زغال‌سنگ در نیروگاه‌ها یا حاصل از خاکریزها یا حوضچه‌های دفن است، اطلاق می‌گردد. خاکستر بادی، ماده‌ای با ذرات ریز است که از گازهای دودکش حذف‌شده است؛ در حالی که تمخاکستر، در انتهای پایینی کوره ته‌نشین می‌شود. خاکستر زغال‌سنگ مورد استفاده در بتن باید مطابق مشخصات ASTM C618 باشد. مقدار خاکستر زغال‌سنگ مورد استفاده در بتن، می‌تواند در محدوده ۱۵ تا ۶۵ درصد جرم مواد سیمانی (بسته به منبع، ترکیب و الزامات عملکردی بتن) متغیر باشد. ویژگی‌های خاکستر زغال‌سنگ به‌طور قابل‌توجهی بسته به نوع زغال‌سنگ سوزانده‌شده و منبع ماده، متفاوت است. خاکستر کلاس F معمولاً از سوختن زغال‌سنگ آنتراسیتی یا قیری تولید شده و خاصیت پوزولانی دارد. خاکستر کلاس C به طور معمول از سوختن زغال‌سنگ لیگنیتی یا زیرقیری حاصل شده و دارای خواص سیمانی و پوزولانی است. همان‌گونه که در ASTM C618 ذکر شده است، خاکستر کلاس F حداکثر تا ۱۸٪ اکسید کلسیم (CaO) دارد؛ در حالی که محتوای این ماده در خاکستر کلاس C، بیش از ۱۸٪ است. به طور معمول فرآوری خاکستر زغال‌سنگ حاوی تمخاکستر یا موادی که جمع‌آوری شده‌اند، پیش از پذیرش به منظور استفاده در بتن، ضروری است.

سرباره

یک محصول جانبی غیرفلزی بوده که از کوره‌بلند آهن‌گدازی هنگام تبدیل سنگ‌آهن به آهن خام بدست می‌آید. سرباره مذاب به سرعت سرد شده و توده‌های دانه‌ای شکل می‌دهد و سپس تا حد نرمی مشابه سیمان، آسیاب می‌شود. سرباره مورد استفاده به عنوان ماده سیمانی، باید مطابق مشخصات ASTM C989 باشد. در این استاندارد، سه درجه ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ تعریف شده که درجه بالاتر به ظرفیت مقاومتی بیش‌تر مربوط است. سرباره خواص سیمانی داشته اما این خواص هنگام ترکیب با سیمان افزایش می‌یابد. مقدار استفاده از سرباره بین ۲۰ تا ۸۰ درصد جرم مواد سیمانی است.

دوده سیلیسی

یک محصول جانبی از تولید فلز سیلیکون یا فروسیلیکون بوده و ماده‌ای پوزولانی با واکنش‌زایی بالا محسوب می‌شود. این ماده از گازهای دودکش کوره‌های قوس الکتریکی جمع‌آوری شده و یک پودر بسیار ریز با ذرات حدود ۱۰۰ برابر کوچک‌تر از یک ذره متوسط سیمان است. دوده سیلیسی به صورت پودر متراکم موجود بوده و برای استفاده در بتن، باید مطابق مشخصات ASTM C1240 باشد. از این ماده به طور معمول در مقدار ۳ تا ۱۰ درصد جرم مواد سیمانی استفاده می‌شود. کاربردهای آن شامل سازه‌های بتنی است که نیاز به مقاومت بالا یا نفوذپذیری بسیار کم در برابر آب و مواد شیمیایی داشته باشند. هنگام استفاده از بتن حاوی دوده سیلیسی، اقدامات ویژه‌ای به منظور جابجایی، بتن‌ریزی و عمل‌آوری نیاز است.

پوزولان‌های طبیعی

برخی مواد می‌توانند به طور طبیعی یا پس از فرآوری، خصوصیات پوزولانی داشته باشند. این مواد باید در انطباق با الزامات کلاس N در ASTM C618 قرار گیرند. پوزولان‌های طبیعی به طور معمول از منشأ آتشفشانی هستند. در ایالات متحده، پوزولان‌های طبیعی تجاری شامل متاکائولن و شیل یا رس کلسینه‌شده هستند. این مواد با کلسینه‌کردن کنترل‌شده (پخت) مواد طبیعی تولید می‌شوند. متاکائولن از رس کانولینیت تقریباً خالص تولید شده و به میزان ۵ تا ۱۵ درصد جرم مواد سیمانی استفاده می‌شود. شیل یا رس کلسینه‌شده در درمدهای گرمی بالاتر به‌کار می‌رود. سایر پوزولان‌های طبیعی شامل خاکستر آتشفشانی، پومیسیت‌ها، تراس یا توف‌های ژئولیتی، خاکستر پوسته برنج و خاک دیاتومه‌ای هستند. برخی پوزولان‌های طبیعی، کلسینه می‌شوند تا خواص پوزولانی پیدا کنند.

پوزولان شیشه‌ای آسیاب‌شده (GGP)

از بازیافت ظروف شیشه‌ای مورد استفاده در محصولات بسته بندی، صفحات شیشه‌ای استفاده شده در

۷۹ مکمل در درمدهای بالاتر، کندتر شود. این کندشدن زمان گیرش، می‌تواند در هوای گرم مفید باشد. در زمستان، زمان گیرش کند با کاهش مقادیر این مواد در بتن و استفاده از افزودنی‌های تسریع‌کننده جبران می‌شود. به دلیل ذرات ریز اضافی، میزان و سرعت آب‌انداختگی این بتن‌ها اغلب کاهش می‌یابد. این امر، به‌ویژه هنگام استفاده از دوده سیلیسی قابل‌توجه است. کاهش آب‌انداختگی همراه با ویژگی‌های گیرش کندتر، می‌تواند باعث بروز ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی خمیری (پلاستیک) شود و ممکن است اقدامات احتیاطی ویژه‌ای هنگام اجرا و پرداخت بتن لازم باشد (برای اطلاعات بیشتر، به راهنمای شماره ۵ بتن در اجرا (CIP 5) مراجعه شود).

مقاومت

مخلوط‌های بتن می‌توانند برای حصول مقاومت مورد نیاز و نرخ کسب مقاومت مطابق با کاربرد مد نظر، طراحی شوند. با استفاده از مواد سیمانی مکملی به غیر از دوده سیلیسی، نرخ کسب مقاومت ممکن است در ابتدا کمتر باشد؛ اما افزایش مقاومت در مقایسه با مخلوط‌هایی که فقط حاوی سیمان هستند، برای مدت طولانی‌تر ادامه یافته و اغلب، منجر به مقاومت نهایی بالاتر خواهد شد. دوده سیلیسی اغلب برای تولید بتن با مقاومت فشاری بیش از ۷۰ مگاپاسکال استفاده می‌شود. بتن حاوی مواد سیمانی مکمل، به طور معمول نیاز به توجه اضافی در عمل‌آوری نمونه‌های آزمایشی و همچنین در سازه برای رسیدن به خواص بالقوه دارد.

دوام

مواد سیمانی مکمل می‌توانند به منظور کاهش حرارت تولیدشده مرتبط با آب‌گیری (هیدراسیون) سیمان استفاده‌شده و احتمال بروز ترک‌خوردگی حرارتی در سنین اولیه و اعضای سازه‌ای حجیم را کاهش دهند. این مواد، ریزساختار بتن را اصلاح کرده و نفوذپذیری آن را کاهش می‌دهند و بنابراین، از نفوذ آب و مواد شیمیایی محلول در آب به بتن جلوگیری می‌کنند. بتن نفوذناپذیر، باعث کاهش انواع مختلف تخریب در بتن مانند خوردگی میلگرد فولادی و حملات شیمیایی می‌شود. بیشتر مواد سیمانی مکمل می‌توانند ترک‌های زیان‌آور ناشی از واکنش‌های شیمیایی مانند واکنش قلیایی-سیلیسی و حملات سولفاتی را کاهش دهند.

ترکیب بهینه مواد سیمانی برای الزامات عملکردی مختلف و نوع ماده سیمانی مکمل استفاده‌شده، متفاوت خواهد بود. تولیدکننده بتن آماده، با دانش و آگاهی از مواد محلی در دسترس، می‌تواند نسبت‌های مخلوط را برای دستیابی به عملکرد مورد نیاز تعیین نماید. محدودیت‌های دسترسی در نسبت‌های مخلوط می‌تواند بهینه‌سازی عملکردی، اقتصادی و دستیابی به مخلوط‌های پایدار بتنی را محدود کند. در حالی که به چندین مورد از بهبود خواص بتن در بالا اشاره شد، این موارد به‌طور متقابل انحصاری نبوده و مخلوط باید برای مهم‌ترین الزامات عملکردی پروژه با مصالح در دسترس، طراحی گردد.

ساختمان‌ها و خودروها و همچنین شیشه نوع E حاصل از الیاف شیشه‌ای بدست‌می‌آید. دو مورد اول شیشه‌های **سیلیکات-سدیم-کلسیم** هستند. شیشه‌های حاصل از این منابع، به پودرهای بسیار ریز آسیاب شده که هنگام استفاده در بتن، خواص پوزولانی دارند. پوزولان شیشه‌ای آسیاب‌شده برای استفاده در بتن، باید مطابق با ASTM C1866 باشد که دو طبقه‌بندی را مشخص می‌کند: نوع GS از شیشه **سیلیکات-سدیم-کلسیم** و نوع GE از شیشه نوع E. این پوزولان می‌تواند در درمدهای جرمی مشابه با خاکستر زغال‌سنگ استفاده در مواد سیمانی استفاده شود.

مواد سیمانی مکمل که با مشخصات جداگانه مطابقت دارند، می‌توانند ترکیب شده تا مواد سیمانی مکمل آبیخته مطابق با ASTM C1697 تولید شود. این روش زمانی مفید است که مواد سیمانی مکمل مرسوم در بحث تامین، کمبود داشته یا نیاز به ترکیب خواص مفید هر ماده در مخلوط وجود داشته باشد.

چرا از مواد سیمانی مکمل استفاده می‌شود؟

این مواد می‌توانند عملکرد بتن را در حالات تازه و سخت‌شده، بهبود دهند. هدف اصلی آن‌ها بهبود کارایی، دوام و مقاومت بتن است. مواد سیمانی مکمل به تولیدکننده بتن امکان می‌دهند تا مخلوطی را طراحی و تنظیم نمایند که الزامات عملکردی برای طیف وسیعی از کاربردهای بتن را برآورده سازد.

موادی مانند خاکستر بادی، سرباره و دوده سیلیسی به صنعت بتن اجازه می‌دهد میلیون‌ها تن محصولات جانبی به‌صورت مفید استفاده‌شود که در غیراین‌صورت، به عنوان ضایعات دفن می‌شدند. این مواد گزینه‌ای ضروری برای کاهش کربن نهفته در مخلوط‌های بتن به منظور حمایت از ابتکارات ساخت‌وساز پایدار هستند.

چگونه مواد سیمانی مکمل بر خصوصیات بتن اثر می‌گذارند؟

بتن تازه

به‌طور کلی، مواد سیمانی مکمل یکنواختی و کارایی بتن تازه را به دلیل افزوده‌شدن حجم ذرات ریز به مخلوط، بهبود می‌بخشند. بتن حاوی دوده سیلیسی به طور معمول در مخلوط‌هایی با مقدار آب کم و دارای افزودنی‌های کاهنده شدید آب استفاده می‌شود. این مخلوط‌ها چسبندگی و چسبناکی بیشتری نسبت به سایر مخلوط‌های بتن دارند. خاکستر زغال‌سنگ و سرباره معمولاً نیاز آبی بتن برای رسیدن به روانی (اسلامپ) موردنظر را کاهش می‌دهند. برخی پوزولان‌های طبیعی نیاز آبی بالاتری دارند. زمان گیرش بتن ممکن است به دلیل وجود برخی مواد سیمانی