

بررسی تاثیر کمک ساینده‌های معدنی بر قابلیت خردایش سیمان و مقاومت فشاری بتن

محسن علی‌لو^۱، عطااله بهرامی^۲، جعفر عبدالهی شریف^۲

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه

۲. عضو هیئت علمی گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه

چکیده:

کمک ساینده‌های معدنی مورد استفاده در خردایش کلینکر سیمان، تاثیر چشمگیری بر راندمان فرایند آسیابگری، کاهش انرژی مصرفی، صرفه‌جویی در زمان، افزایش ظرفیت تولید، بهبود خواص سیمان و بتن حاصل از آن و کاهش هزینه‌ها ... دارند. هدف از این تحقیق بررسی تاثیر نوع و مقدار کمک ساینده‌ها بر خردایش سیمان و مقاومت فشاری بتن است. بدین منظور نمونه‌هایی از ترکیب کلینکر سیمان با کمک ساینده‌های معدنی پوزولان، پرلیت، پومیس و همچنین کمک ساینده‌های آلی (با درصد‌های متفاوت وزنی) تهیه و عدد بلین آنها اندازه‌گیری گردید. سپس با ساخت بلوک‌های بتنی در شرایط ثابت ترکیب آب و سنگدانه و ترکیب‌های متفاوت سیمان، بر روی آنها آزمایش تعیین مقاومت فشاری در سنین مختلف ۲، ۳، ۷ و ۲۸ روزه انجام گرفته است. در تمامی حالات، استفاده از کمک ساینده‌ها موجب افزایش عدد بلین (درجه نرمی سیمان) شده است. استفاده از کمک ساینده در سنین ۲ و ۳ روزه بتن موجب کاهش مقاومت فشاری آن شده است. با گذشت زمان مقاومت فشاری بتن حاوی کمک ساینده‌های مختلف افزایش یافته است. ترکیب ۱۵ درصد وزنی پوزولان، ۸۵ درصد کلینکر، ۴ درصد گچ و ۳ گرم کمک ساینده آلی، بهینه‌ترین ترکیب کلینکر سیمان بوده که موجب کمترین افت مقاومت نسبت به سایر حالات شده است. در این حالت مقاومت ۲ روزه بتن حاوی کمک ساینده، ۳ درصد نسبت به بتن فاقد کمک ساینده افزایش داشته است؛ در حالیکه مقاومت‌های ۳ و ۷ روزه به ترتیب ۸/۲۱ و ۱۳/۱۳ درصد کاهش یافته‌اند. در سن ۲۸ روزه بتن، وجود کمک ساینده‌ها موجب افزایش مقاومت فشاری آن نسبت به حالت عدم استفاده از کمک ساینده شده است. در نهایت ترکیب ۵ درصد پوزولان و ۹۵ درصد کلینکر و گچ منجر به حصول بیشترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه به میزان ۳۳۵ مگا پاسگال با ماسه محلی شده است.

کلمات کلیدی: کمک ساینده سیمان، پوزولان، پرلیت، پومیس، مقاومت فشاری بتن.

۱. مقدمه

رشد روزافزون مصرف انرژی و محدودیت منابع مولد آن، جوامع صنعتی را برای تامین انرژی مورد نیاز زمان حال و آینده به تکاپو واداشته است (علی حسینی و همکاران، ۱۳۸۸). صنعت تولید سیمان بعنوان یکی از زیربخش‌های مهم صنعت، به شدت به انرژی وابسته بوده و مصرف‌کننده ۲ درصد از کل انرژی تولیدی دنیا و ۱/۵ درصد از کل سوخت مصرفی است (Worreler and Galistky, 2004). حدود ۲/۳ درصد از کل سیمان جهان در ایران تولید می‌شود. مصرف کل انرژی بخش صنعت در ایران ۲۶ درصد است که بخش سیمان بیش از ۱۵ درصد از این انرژی مصرفی را به خود اختصاص داده است (Avami and sattari, 2007). انرژی در صنعت سیمان به دو صورت انرژی الکتریکی و گرمایی مصرف می‌شود. در جدول ۱ میزان مصرف انرژی الکتریکی در بخش‌های مختلف یک واحد صنعتی تولید سیمان آورده شده است.

جدول ۱- مصرف انرژی الکتریکی در بخش‌های مختلف صنعت تولید سیمان (Boyd, 2006).

نام بخش	سنگ‌شکن	سالن اختلاط	آسیای مواد خام	سیلوی ذخیره	سیستم پخت	آسیای کلینکر	بارگیری	سایر
---------	---------	-------------	----------------	-------------	-----------	--------------	---------	------

میزان مصرف (KWh/ton)	۴	۰/۵	۳۰	۱۵	۲۲	۴۴	۲	۱/۵
میزان مصرف %	۳/۴	۰/۴	۲۵/۲	۱۲/۶	۱۸/۵	۳۷	۱/۶۸	۱/۲۶

براساس جدول ۱ برای تولید هر تن سیمان، ۱۱۹ Kwh انرژی الکتریکی مورد نیاز است، که در این میان آسیای کلینکر سیمان با مصرف ۳۷ درصد از کل انرژی، بیشترین مقدار مصرف را به خود اختصاص داده است. بنابراین ارائه راهکارهایی جهت کاهش مصرف انرژی در این بخش ضروری به نظر می‌رسد.

در طی مرحله آسیای کلینکر سیمان، ابعاد ذرات بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته و فرایند نرم‌کنی تا حصول ذرات با اندازه مورد نظر (d_{80} ذرات خروجی آسیای کلینکر معمولاً کمتر از $119 \mu m$ است) ادامه می‌یابد (Diab et al., 2016). تحقیقات متعددی در رابطه با کاهش زمان (آسیاکنی) دسترسی به اندازه مورد نظر و به تبع کاهش میزان انرژی مصرفی تمرکز داشته‌اند (Padovani and Madistri, 2008؛ سرخان‌پور و تاجیک، ۱۳۹۱). استفاده از انواع مواد معدنی، آلی و ... تحت عنوان کمک‌ساینده‌های کلینکر، تاثیر بسزایی در کاهش انرژی مصرفی در این بخش داشته است. کمک‌ساینده‌ها علاوه بر کاهش زمان خردایش و صرفه‌جویی در مصرف انرژی، موجب بهبود خواص محصول تولیدی از نقطه‌نظر گیرایی، دوام و ... می‌شوند. پوزولان از جمله مواد معدنی است که به ترکیب سیمان اضافه می‌گردد. پوزولان خردایش کلینکر سیمان را بهبود بخشیده و نقش کمک‌ساینده‌گی در فرایند تولید سیمان را دارد. پومیس و پرلیت نیز از دیگر کمک‌ساینده‌های معدنی مورد استفاده در خردایش کلینکر سیمان هستند. با توجه به اینکه کمک‌ساینده‌ها در مرحله پس از پخته شدن کلینکر در کوره به آن اضافه می‌گردند، علاوه بر کاهش زمان تولید محصول، کاهش کلینکر مصرفی و در نتیجه افزایش ظرفیت تولید و همچنین کاهش هزینه تمام شده خردایش، از دیدگاه زیست‌محیطی به دلیل کاهش مصرف سوخت و تولید کربن دی‌اکسید نیز اهمیت ویژه‌ای دارند (به ازای تولید هر یک کیلوگرم سیمان، ۰/۷ کیلوگرم CO_2 و دیگر آلاینده‌ها وارد محیط زیست می‌شود).

بتن بعنوان یکی از پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی، اهمیت و جایگاه ویژه‌ای در صنعت ساخت و ساز دارد. اگرچه مقاومت و تحمل بار بتن با فولاد قابل مقایسه نیست، اما مصرف آن به دلیل مقاومت بالا در مقابل آب و در نتیجه استفاده از آن برای ساخت پل‌های آب‌گذر، دیوارهای حائل در برابر آب، سدها، کانال‌ها و لوله‌های انتقال آب و مخازن ذخیره‌سازی از فولاد بیشتر است (بهرامی و همکاران، ۱۳۹۶). مقاومت فشاری بتن یکی از پارامترهای بسیار مهم برای ارزیابی کیفیت آن به شمار می‌رود، زیرا بسیاری از خواص بتن از جمله مدول الاستیسیته، نفوذپذیری، مقاومت در برابر ضربه، مقاومت کششی و ... در ارتباط مستقیم با مقاومت فشاری هستند (فرخ‌زاد و همکاران، ۱۳۹۵). با توجه به اینکه بتن متشکل از مواد متفاوتی شامل آب، سیمان، شن و ماسه و مواد افزودنی دیگر است، با بررسی جداگانه هر یک از اجزا تشکیل‌دهنده بتن می‌توان میزان تاثیر آنها را بر روی مقاومت فشاری بتن مورد مطالعه و ارزیابی قرار داد (خادمی و همکاران، ۱۳۹۴)؛ که این مسئله می‌تواند موجب دستیابی به یک ترکیب بهینه برای حصول مقاومت فشاری مطلوب گردد. سیمان بعنوان ماده چسباننده اجزای بتن به یکدیگر و تشکیل یک جسم یکپارچه (از اجزا متشکله)، نقش بسیار مهمی در مقاومت فشاری بتن دارد (Appa Rao, 2003). بطور معمول کلینکر سیمان از ترکیب مواد معدنی متفاوت شامل سنگ آهک، رس، سیلیس و اکسیدهای معدنی آهن، سدیم، منیزیم، پتاسیم و آلومینیوم تشکیل شده است. همچنین همانگونه که ذکر گردید، در مرحله خردایش کلینکر سیمان، مواد معدنی و آلی بعنوان کمک‌ساینده به ترکیب آن اضافه می‌شوند. سرعت واکنش‌زایی هر یک از اجزای مختلف سیمان با آب بطور چشمگیری با یکدیگر متفاوت است. لذا با توجه به سرعت متفاوت هیدراسیون اجزای سیمان، مقاومت آن بطور مستقیم تحت تاثیر ترکیب‌های بکار رفته در ساختار آن است.

با توجه به اهمیت بالای مقاومت فشاری بتن، ارائه راهکارهایی برای افزایش مقاومت متوسط و دوام بتن همواره مورد توجه محققان بوده است (خادمی و همکاران، ۱۳۹۴). بدین منظور مطالعات متعددی در رابطه با تاثیر افزودن مواد مختلف به ترکیبات بتن و تاثیر آن بر مقاومت فشاری بتن در سنین مختلف (۲، ۷ و ۲۸ روزه) انجام گرفته است (خادمی و همکاران، ۱۳۹۴؛ فرخزاد و همکاران، ۱۳۹۵؛ مردای شقاقی و همکاران، ۱۳۹۴؛ اکبری و همکاران، ۱۳۹۳). در این راستا، تحقیق حاضر به بررسی تاثیر نوع و میزان افزودن مواد کمک ساینده به کلینکر و طرح اختلاط سیمان بر مقاومت فشاری بتن پرداخته است. بدین منظور تاثیر مواد معدنی پوزولان، پومیس و پرلیت و همچنین کمک ساینده‌های آلی در نسبت اختلاط‌های متفاوت بر مقاومت بتن بررسی شده است.

۲. مواد و روش

۲-۱ مواد

سیمان مورد استفاده برای ساخت بلوک‌های بتنی و انجام آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری، ترکیبی از کلینکر سیمان (متعلق به کارخانه سیمان خوی)، گچ (با درجه خلوص ۹۹/۵) و مواد معدنی کمک ساینده شامل پوزولان، پرلیت، پومیس و کمک ساینده‌های آلی مورد استفاده در کارخانه‌های سیمان است. پوزولان مورد استفاده از محدوده اکتشافی پوزولان آغچه‌لو شهرستان شاهین‌دژ تهیه شده است. پس از انجام بررسی‌های اولیه بر روی مواد معدنی پرلیت و پومیس (از نظر کیفیت) موجود در منطقه، در نهایت نمونه پرلیت خشک‌ناب شهرستان میانه و پومیس معدن آجواج شهرستان سلماس برای انجام آزمایش‌ها مناسب تشخیص داده شد. در جدول ۲ نتایج مربوط به آنالیز نمونه‌های کلینکر، پوزولان، پومیس، پرلیت و گچ آمده است.

جدول ۲- آنالیز XRF کلینکر، پوزولان، پرلیت، پومیس و گچ مورد استفاده در آزمایش‌های خردایش سیمان و تعیین مقاومت فشاری بتن.

LOI	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	
۰/۱۹	۰/۶۸	۰/۸۹	۰/۸۳	۲/۴۲	۶۴/۲۴	۳/۷۶	۵/۴۰	۲۱/۷۷	کلینکر
۵/۸۴	۰/۶۷	۲/۲۶	-	۱/۱۶	۹/۵۶	۲/۷۵	۱۲/۲۹	۶۵/۴۶	پوزولان
-	۰/۶۹	۲/۶۹	-	۲/۰۵	۳/۱۳	۲/۳۵	۱۵/۲۴	۶۳/۰۷	پرلیت
۵/۱۲	۳/۹۳	۲/۲۸	-	۲/۴	۳/۷	۴/۴	۱۶/۱	۶۱	پومیس
۲۱/۵	-	-	۴۶	-	۳۲/۲	-	-	-	گچ

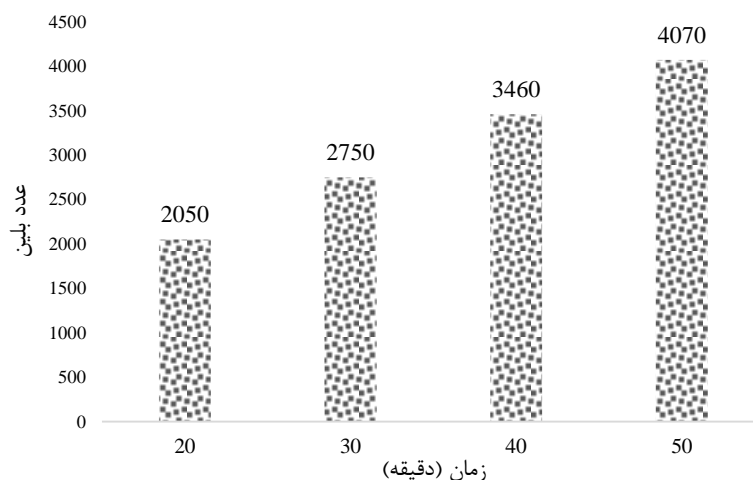
هر یک از نمونه‌های کلینکر سیمان، گچ، پوزولان، پرلیت و پومیس تحت فرایند خردایش با استفاده از سنگ‌شکن‌های فکی و غلتکی قرار گرفته‌اند. هدف از خردایش اولیه با استفاده از این سنگ‌شکن‌ها کاهش اندازه ذرات مواد ورودی به آسیا (و به تبع کاهش زمان و هزینه‌های نرم‌کنی) است. سپس محصول خروجی از سنگ‌شکن غلتکی به منظور خردایش بیشتر و نرم‌کنی به آسیای گلوله‌ای منتقل شده است (در جدول ۳ مشخصات آسیای گلوله‌ای آمده است). ابتدا به منظور خردایش مواد اولیه سیمان و تعیین زمان بهینه نرم‌کنی با استفاده از آسیا، ترکیب ۹۶ درصدی کلینکر و ۴ درصد گچ به آسیای گلوله‌ای وارد و در زمان‌های ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ دقیقه فرایند آسیاکنی، نمونه‌های جهت اندازه‌گیری بلین^۱ تهیه گردید (شکل ۱). آزمایش بلین یا تعیین رقم بلین به منظور تعیین درجه خردایش یا نرمی سیمان انجام می‌گیرد. با توجه به اینکه اندازه ذرات سیمان یکی از عوامل موثر بر سرعت هیدراته شدن آن است و با کاهش اندازه ذرات سرعت هیدراسیون افزایش می‌یابد، تعیین عدد بلین

¹ Blaine

سیمان از اهمیت بالایی برخوردار است. حداقل استاندارد بلین^۱ در سیمان پرتلند معمولی، ۲۸۰۰ است، لذا زمان بهینه فرایند آسیاکنی در این تحقیق ۳۵ دقیقه تعیین گردید.

جدول ۳- مشخصات آسیای گلوله‌ای مورد استفاده در تعیین عدد بلین کلینگر سیمان

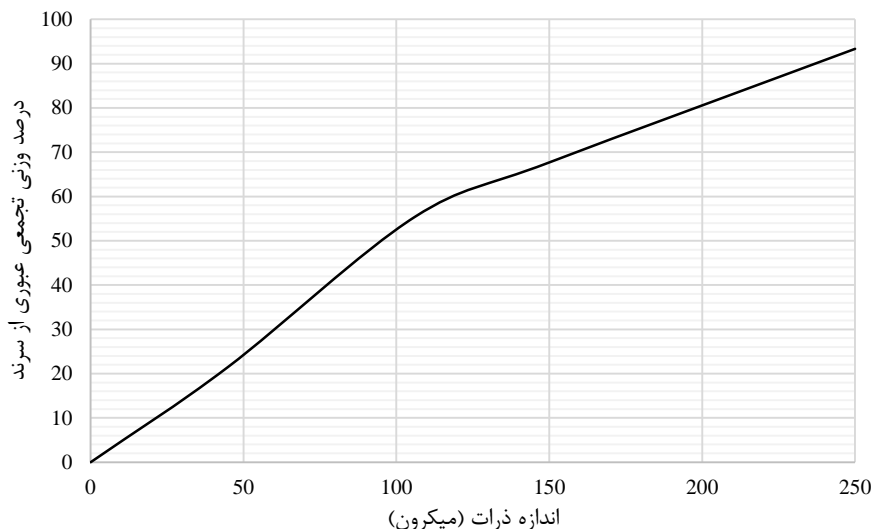
تعداد	قطر (میلیمتر)	وزن (گرم)	
۱۹	۳/۱۲	۱۱۴/۵	مشخصات گلوله‌های مصرفی
۱	۳/۷۲	۱۸۱/۵	
۷	۵/۱۱	۵۲۹	مجموع
۲	۶/۱۰	۹۰۲/۵	
۱۲	۴/۲۲	۲۸۰/۵	
۴۱	۲۱/۸۲	۲۰۰۸	



شکل ۱- بلین سیمان در زمان‌های متفاوت فرایند آسیاکنی

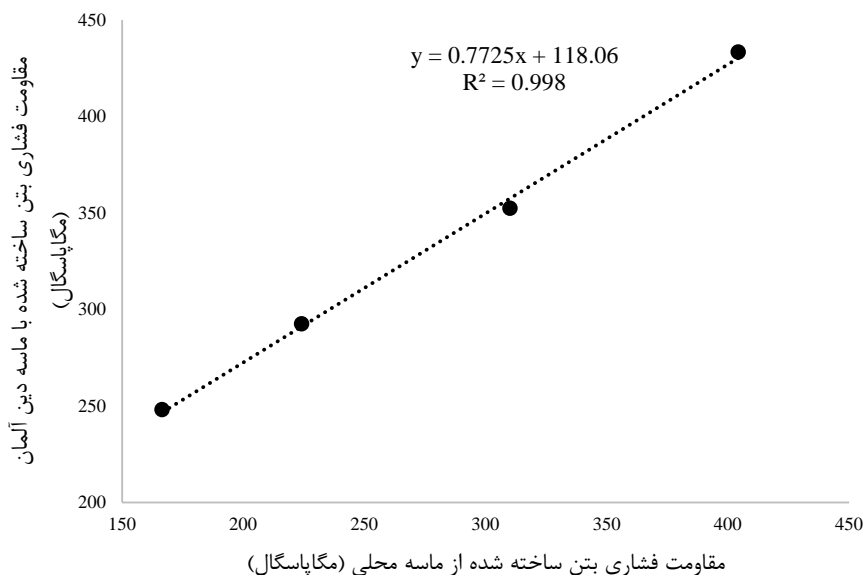
در شکل ۲ نمودار مربوط به دانه‌بندی نمونه کلینگر پس از فرایند آسیاکنی نمایش آمده است. براساس شکل، d_{80} ذرات کلینگر پس از خردایش حدوداً $200\ \mu\text{m}$ است. زمان آسیاکنی برای هر یک از مواد، براساس استاندارد بلین محاسبه شده ۳۵ دقیقه منظور شده است.

¹ DIN 1164-85



شکل ۲- نمودار آنالیز سرنده نمونه کلینکر کارخانه سیمان خوی پس از فرایند آسیابکنی.

بطور معمول برای انجام آزمایش تعیین مقاومت فشاری بتن، از سنگدانه‌های ماسه‌ای مطابق با استاندارد دین^۱ (DIN1045) آلمان استفاده می‌شود. در این استاندارد نحوه توزیع دانه‌ها به گونه‌ای انتخاب شده است که دانه‌های کوچک در فضای بین دانه‌های بزرگتر قرار گرفته و فضای خالی میان ذرات به حداقل ممکن کاهش می‌یابد. بتن ساخته شده با سنگدانه‌های مطابق این استاندارد، دارای ساختاری متراکم با حداقل نفوذپذیری خواهد بود؛ همچنین حجم خمیر سیمان در آن کاهش یافته و در نتیجه دوام بتن افزایش می‌یابد. در شکل ۳ رابطه خطی بدست آمده میان مقاومت فشاری بتن ساخته شده از ماسه استاندارد دین و ماسه مورد استفاده در این تحقیق آمده است. با توجه به شکل، مقاومت فشاری بتن حاصل از ماسه بکار رفته در انجام آزمایش‌ها دارای یک رابطه خطی با ضریب همبستگی بیش از ۰/۹۹ با بتن حاوی ماسه استاندارد دین است. مقاومت‌های ذکر شده در این پژوهش بر اساس ماسه محلی می باشد که می توان از این رابطه برای معادل سازی بهره برد .



شکل ۳- رابطه میان مقاومت فشاری ماسه استاندارد دین آلمان با ماسه مورد استفاده در انجام آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری بتن.

¹ Din

در پروسه ساخت بلوک‌های بتنی برای انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، ۱۳۵۰ گرم سنگدانه، ۴۵۰ گرم سیمان و ۲۲۵ میلی‌لیتر آب با یکدیگر مخلوط و پس از اختلاط کامل در قالب‌های بتنی ریخته شده‌اند. لازم به ذکر است که نسبت مواد بکار رفته در ساخت بلوک‌های بتنی در تمام آزمایش‌ها یکسان بوده و فقط ترکیب سیمان آنها متفاوت است. در جدول ۴ اطلاعات مربوط به طرح اختلاط کمک ساینده‌ها با کلینکر برای تهیه سیمان در حالت‌های متفاوت آمده است.

برای اعمال بار محوری به بلوک‌های بتنی و اندازه‌گیری مقاومت فشاری از دستگاه بارگذاری صلب - خودکار استفاده شده است. در طی این آزمایش با قرار دادن نمونه در بین صفحات فولادی ماشین بارگذاری و اعمال بار محوری با استفاده از اهرم دستگاه، میزان بار اعمالی یا مقاومت نمونه اندازه‌گیری می‌شود.

جدول ۴- طرح اختلاط کلینکر سیمان با کمک خردایش‌های مختلف

ردیف	درصد وزنی کلینگر	نام کمک خردایش معدنی	درصد وزنی کمک خردایش معدنی	کمک خردایش آلی	بلین
۱	۸۵	پومیس	۱۵	-	۳۱۶۰
۲	۹۰	پومیس	۱۰	-	۳۰۷۰
۳	۹۵	پومیس	۵	-	۲۷۵۶
۴	۸۵	پرلیت	۱۵	-	۲۹۷۶
۵	۹۰	پرلیت	۱۰	-	۳۰۷۰
۶	۹۵	پرلیت	۵	-	۲۹۰۰
۷	۸۵	پوزولان	۱۵	-	۴۵۴۶
۸	۹۰	پوزولان	۱۰	-	۴۲۷۰
۹	۹۵	پوزولان	۵	-	۳۶۵۵
۱۰	۸۵	پومیس	۱۵	۳ گرم	۳۲۳۴
۱۱	۸۵	پرلیت	۱۵	۳ گرم	۳۰۴۶
۱۲	۸۵	پوزولان	۱۵	۳ گرم	۴۳۴۰

۳. بحث و نتایج

۳-۱ بررسی تاثیر میزان کمک ساینده‌های مختلف سیمان بر خردایش کلینکر و مقاومت فشاری بتن

در شکل ۴ نمودار مقایسه‌ای عدد بلین در حالات استفاده از کمک ساینده‌های متفاوت معدنی و ترکیب کمک ساینده‌های معدنی و آلی نمایش داده شده است. عدد بلین سیمان فاقد مواد ساینده در مدت زمان آسیاکنی ۳۵ دقیقه، ۲۸۰۰ اندازه‌گیری شده است. با مقایسه این مقدار با بلین سیمان‌های حاوی کمک ساینده‌ها مشاهده می‌شود که عدد بلین سیمان در صورت استفاده از کمک ساینده‌ها، افزایش چشمگیری داشته است. بیشترین افزایش بلین به میزان ۳۷/۶۵ درصد مربوط به ترکیب کلینکر با ۱۵ درصد پوزولان است. با توجه به شکل در موارد استفاده از پرلیت و پومیس در ترکیب با کمک ساینده آلی عدد بلین افزایش یافته است. اما ترکیب با کمک ساینده آلی و پوزولان عدد بلین کاهش یافته است. با افزایش عدد بلین (درجه نرمی سیمان) مقاومت فشاری خمیر سیمان سخت شده، ملات و همچنین دوام بتن افزایش می‌یابد.



شکل ۴- عدد بلین در حالت استفاده از کمک ساینده‌های معدنی و حالت ترکیب کمک ساینده‌های معدنی و آلی در خردایش.

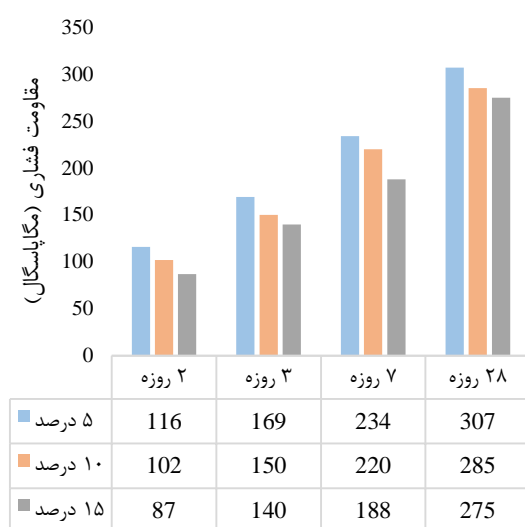
در جدول ۵ مقادیر اندازه‌گیری شده برای مقاومت فشاری بتن فاقد مواد کمک ساینده و بتن حاوی کمک ساینده‌های معدنی سیمان نمایش داده شده است. با توجه به جدول در برخی حالات (مقاومت‌های ۲ و ۳ روزه) با افزودن کمک ساینده، مقاومت فشاری بتن کاهش یافته است. کاهش مقاومت بتن را می‌توان ناشی از کم شدن درصد وزنی کلینکر در ترکیب سیمان در حالت استفاده از کمک ساینده دانست. اما بطور کلی با افزایش سن بتن حاوی مواد کمک ساینده، مقاومت فشاری نسبت به بتن فاقد کمک ساینده افزایش یافته است. در نهایت ترکیب ۵ درصد پوزولان و ۹۵ درصدی کلینکر و گچ منجر به حصول بیشترین مقاومت فشاری به میزان ۳۳۵ مگا پاسگال شده است.

جدول ۵- مقاومت فشاری بتن در سنین مختلف در حضور و عدم حضور کمک ساینده‌ها

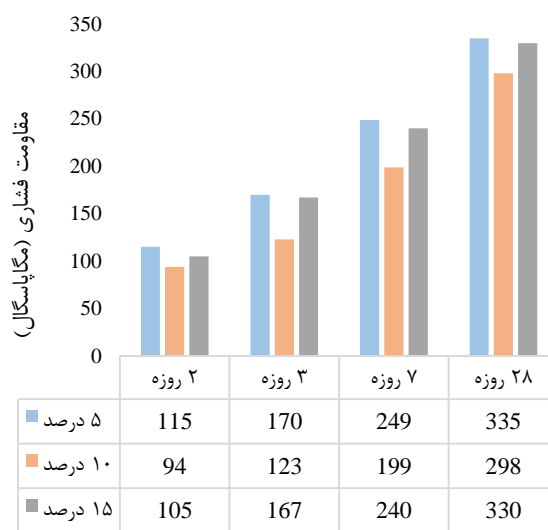
عمر بتن	مقاومت فشاری بتن بدون کمک ساینده (MPa)			مقاومت فشاری بتن حاوی کمک ساینده پرلیت (MPa)			مقاومت فشاری بتن حاوی کمک ساینده پومیس (MPa)			مقاومت فشاری بتن حاوی کمک ساینده پوزولان (MPa)		
	٪۱۵	٪۱۰	٪۵	٪۱۵	٪۱۰	٪۵	٪۱۵	٪۱۰	٪۵	٪۱۵	٪۱۰	٪۵
۲ روزه	۱۲۱	۱۱۶	۸۷	۱۰۲	۸۷	۱۱۶	۱۰۴	۸۷	۱۰۴	۹۴	۱۱۵	۱۰۵
۳ روزه	۱۷۲	۱۶۹	۱۴۰	۱۵۰	۱۴۰	۱۶۹	۱۳۵	۹۹	۱۱۱	۱۲۳	۱۷۰	۱۶۷
۷ روزه	۲۱۶	۲۳۴	۱۸۸	۲۲۰	۱۸۸	۲۳۴	۲۰۷	۱۶۰	۱۷۲	۱۹۹	۲۴۹	۲۴۰
۲۸ روزه	۲۹۵	۳۰۷	۲۷۵	۲۸۵	۲۷۵	۳۰۷	۳۲۵	۲۳۲	۲۶۲	۲۹۸	۳۳۵	۳۳۰

نتایج آزمایش‌های اندازه‌گیری مقاومت فشاری بتن حاوی کمک ساینده سیمان، در سنین مختلف ۲، ۳، ۷ و ۲۸ روزه در نمودارهای شکل ۵ نمایش داده شده است. با توجه به شکل، با گذشت زمان مقاومت فشاری بتن در تمامی حالات افزایش چشمگیری داشته است. نتایج مشابه در مطالعات صورت گرفته در رابطه با مقاومت فشاری بتن گزارش شده است (Neville, 1981). علت این امر روند نسبتاً کند پدیده هیدراته شدن سیمان است. با گذشت زمان و افزایش هیدراسیون سیمان، مقاومت فشاری بتن ساخته شده از آن افزایش می‌یابد. در تمامی دوره‌ها یا سنین اندازه‌گیری مقاومت فشاری و در مورد تمامی کمک

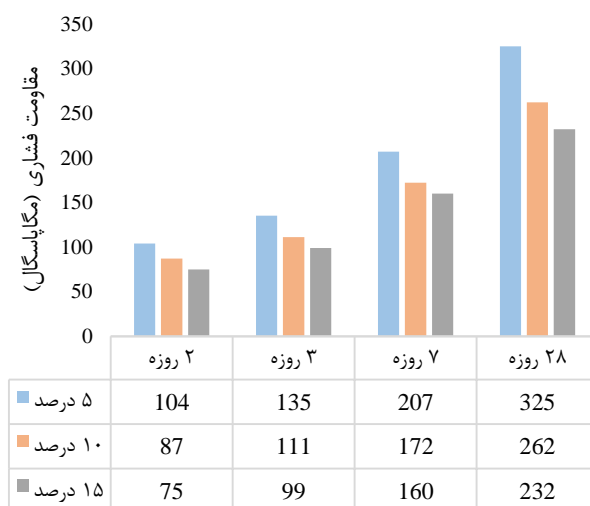
ساینده‌ها، افزودن ۵ درصد کمک ساینده به کلینکر سیمان، موجب حصول ماکزیمم مقاومت فشاری تک محوره شده است. این امر ناشی از درصد وزنی بیشتر کلینکر (۹۵ درصد) در ترکیب سیمان نسبت به سایر حالات است.



(ب)



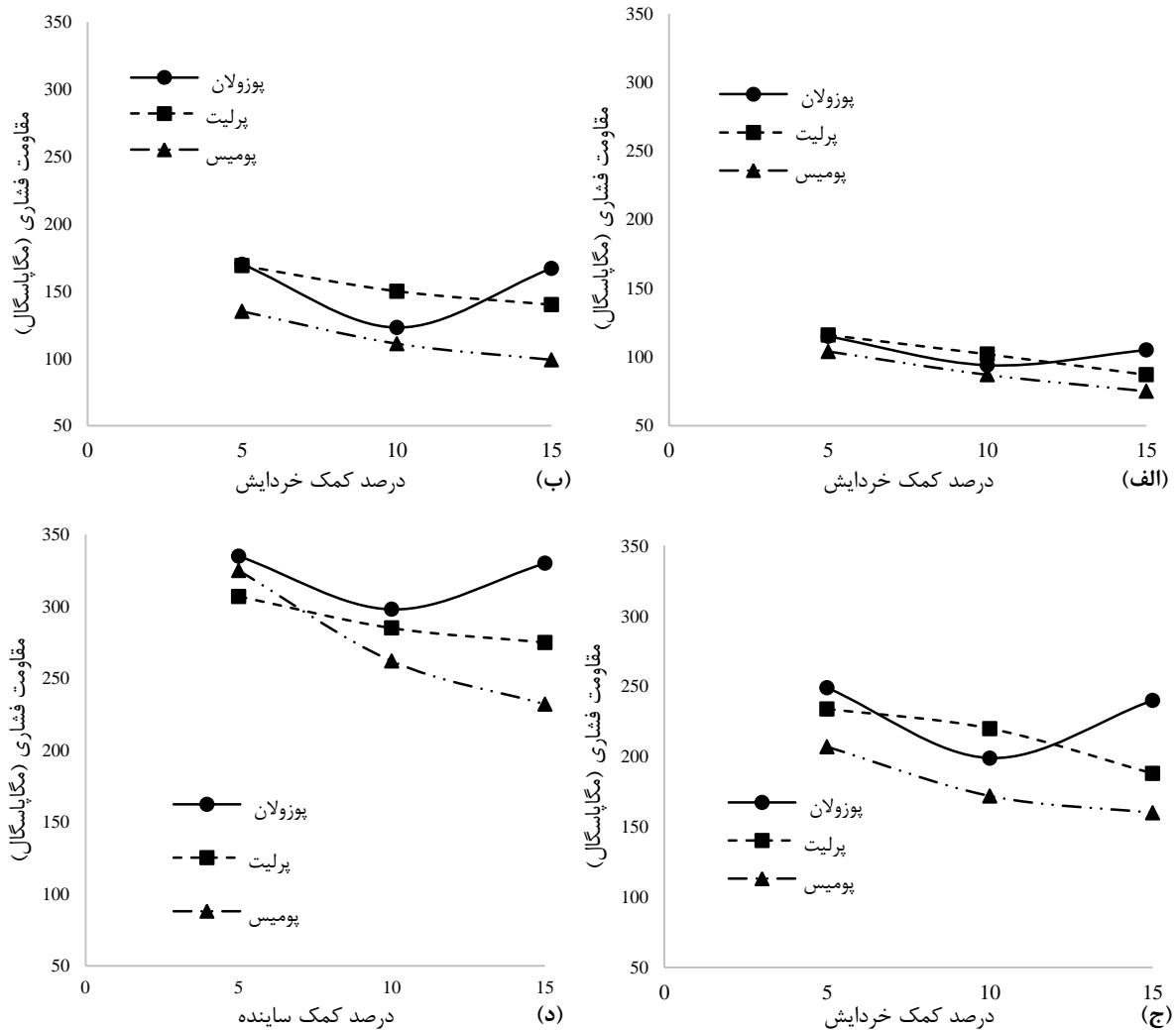
(الف)



(ج)

شکل ۵- مقاومت فشاری بتن محتوی کمک ساینده (الف) پوزولان، (ب) پرلیت و (ج) پومیس در سنین مختلف.

در شکل ۶ روند تاثیر میزان کمک ساینده بر مقاومت فشاری بتن نمایش داده شده است. براساس شکل، در رابطه با مواد معدنی پرلیت و پومیس، افزایش میزان کمک ساینده موجب کاهش مقاومت فشاری تک محوره شده، که این روند نزولی در مقاومت ۲ روزه از شیب بیشتری برخوردار است. افزایش پوزولان ابتدا موجب کاهش مقاومت فشاری و سپس در تمامی سنین بتن روند افزایشی از خود نشان داده است. با توجه به شکل ۶، با گذشت زمان و در مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن، تاثیر تغییرات میزان کمک ساینده‌ها بر مقاومت فشاری به مراتب کمتر شده و نمودارها از شیب ملایمی برخوردار هستند.



شکل ۶- رابطه مقاومت فشاری بتن با کمک خردایش‌های معدنی سیمان. الف) مقاومت ۲ روزه، ب) مقاومت ۳ روزه، ج) مقاومت ۷ روزه و د) مقاومت ۲۸ روزه.

در این تحقیق همچنین تاثیر استفاده از کمک ساینده‌های آلی بر مقاومت فشاری بتن بررسی شده است. در جدول ۶ نتایج مربوط به اندازه‌گیری مقاومت فشاری بتن در حضور و عدم حضور کمک ساینده آلی آمده است. براساس نتایج حاصله، افزودن کمک ساینده آلی به ترکیب سیمان و کمک ساینده‌های معدنی، موجب افزایش چشمگیر مقاومت فشاری بتن در سنین مختلف شده است. بیشترین تاثیر کمک ساینده آلی، در ترکیب آن با پوزولان و در مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن است.

جدول ۶- تاثیر کمک ساینده‌های آلی سیمان بر مقاومت فشاری بتن

مقاومت ۲۸ روزه	مقاومت ۷ روزه	مقاومت ۳ روزه	مقاومت ۲ روزه	افزودنی
۲۹۵	۲۱۶	۱۷۲	۱۲۱	بتن فاقد کمک ساینده
۳۳۰	۲۴۰	۱۶۷	۱۰۵	پوزولان
۳۶۸	۲۷۴	۲۰۷	۱۷۱	پوزولان + کمک ساینده آلی
۲۷۵	۱۸۸	۱۴۰	۸۷	پرلیت
۳۳۹	۲۴۵	۱۵۵	۱۱۷	پرلیت + کمک ساینده آلی
۲۳۲	۱۶۰	۹۹	۷۵	پومیس
۳۳۰	۲۴۱	۱۵۲	۱۰۶	پومیس + کمک ساینده آلی

بطور کلی با مقایسه و بررسی نمودارهای شکل ۶ مشاهده می‌شود که در تمامی بتن (۲، ۳، ۷ و ۲۸ روزه)، کمک خردایش پوزولان با درصدهای وزنی ۵ و ۱۵، موجب تولید بتن با بیشترین مقاومت فشاری نسبت به حالات دیگر شده است. همچنین در تمامی حالات، کمترین مقاومت فشاری مربوط به بلوک‌های بتنی حاوی کمک ساینده معدنی پومیس است. در حالت ۱۰ درصد وزنی کمک خردایش نیز ماکزیمم مقاومت فشاری مربوط به بلوک حاوی کمک ساینده پرلیت است.

پوزولان عمدتاً شامل خاکسترهای اسیدی با ترکیب داسیت و روداسیت بوده، که از دو فاز آمورف (شیشه‌ای) و بلورین تشکیل شده است. فاز شیشه‌ای عمدتاً متشکل از سیلیس و آلومینوسیلیکات‌ها و فاز بلورین نیز تشکیل یافته از کوارتز، فلدسپات و کانی‌های آهن و منیزیم‌دار است. وجود سیلیس و سیلیکات آمورف در پوزولان موجب ایجاد خاصیت اسیدی در آن و به تبع میل ترکیبی شدید آن با آهک و سایر قلیاها شده است (مر و مدبری، ۱۳۸۹). با توجه به اینکه سیلیس یکی از اجزای اصلی تشکیل دهنده پوزولان است، مقاومت بالای بتن‌های حاوی پوزولان را می‌توان ناشی از وجود میزان بالای سیلیس در ساختار آن نسبت به سایر مواد (جدول ۲) و میل ترکیبی شدید پوزولان با آهک موجود در کلینکر سیمان دانست.

پرلیت یک سنگ آتشفشانی طبیعی اسیدی حد واسط دارای بافت شیشه‌ای است. از کاربردهای پرلیت استفاده از آن برای تهیه پوزولان سیمان و بتن است. همچنین با توجه به سختی چشمگیر پرلیت (۶-۵ در استاندارد موس) از آن بعنوان کمک ساینده استفاده می‌شود. پرلیت در اثر چکش کاری یا ضربه به ذرات کوچک کروی تبدیل شده که بر روی سطوح خود دارای شکاف‌های کوچکی هستند (مر و مدبری، ۱۳۸۹).

پومیس بعنوان یک کانی سیلیسی امروزه کاربرد فراوانی در ساخت بلوک‌های بتنی سبک دارد. ساختار متخلخل پومیس موجب کاهش وزن بلوک ساخته شده از پومیس به $\frac{1}{4}$ بلوک بتنی معمولی شده است (باقریان، ۱۳۹۵). همانگونه که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد، بتن حاوی کمک ساینده سیلیس دارای کمترین مقاومت فشاری نسبت به دو کمک خردایش پرلیت و پوزولان است. ساختار متخلخل و در نتیجه چگالی پایین پومیس می‌تواند توجیه کننده مقاومت پایین بتن حاوی این کمک خردایش باشد.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش تاثیر کمک ساینده‌های معدنی مورد استفاده در خردایش کلینکر سیمان بر خردایش سیمان و مقاومت فشاری بتن بررسی گردید. براساس نتایج استفاده از کمک ساینده‌ها موجب افزایش عدد بلین (درجه نرمی سیمان) شده‌اند. طرح اختلاط ۸۵ درصد کلینکر و ۱۵ درصد پوزولان منجر به حصول بیشترین مقدار بلین سیمان به میزان ۴۵۴۶ شده است که حدود ۳۸ درصد نسبت به حالت عدم استفاده از کمک ساینده افزایش داشته است. همچنین ترکیب کمک ساینده آلی با کمک ساینده‌های معدنی پومیس و پرلیت موجب افزایش $\frac{2}{3}$ درصدی بلین آنها شده است. بنابراین استفاده از پوزولان تاثیر چشمگیری در کاهش انرژی مصرفی آسیا از طریق کاهش زمان رسیدن به اندازه ذرات موردنظر دارد.

در مقاومت‌های ۲ و ۳ روزه، استفاده از کمک ساینده‌ها موجب کاهش مقاومت فشاری بتن شده است. بیشترین میزان افت مقاومت (در تمام سنین) مربوط به بلوک حاوی کمک ساینده پرلیت است. در مورد هر کمک ساینده با گذشت زمان (افزایش سن بتن) مقاومت فشاری بتن افزایش می‌یابد. در تمامی آزمایش‌های صورت گرفته بهینه‌ترین مقدار کمک ساینده موثر بر مقاومت فشاری بتن، ۵ درصد وزنی ترکیب کمک ساینده و کلینکر است و با افزایش میزان کمک ساینده، مقاومت فشاری بتن کاهش یافته است. با گذشت زمان و در مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن، تاثیر تغییر میزان کمک خردایش‌ها بر مقاومت فشاری به مراتب کمتر شده و مقاومت‌ها از روند کاهشی ملایمی برخوردار هستند. همچنین افزودن کمک ساینده‌های آلی به

سیمان موجب افزایش چشمگیر مقاومت فشاری بتن شده است. با بررسی تاثیر نوع کمک ساینده معدنی بر مقاومت فشاری بتن نتیجه گردید که ترکیب ۱۵ درصد وزنی پوزولان، ۸۵ درصد کلینکر، ۴ درصد گچ و ۳ گرم کمک ساینده آلی، بهینه‌ترین ترکیب کلینکر سیمان بوده که موجب کمترین افت مقاومت نسبت به سایر حالات شده است. در این حالت مقاومت ۲ روزه بتن حاوی کمک ساینده، ۳ درصد نسبت به بتن فاقد کمک ساینده افزایش داشته است؛ در حالیکه مقاومت‌های ۳ و ۷ روزه به ترتیب ۸/۲۱ و ۱۳/۱۳ درصد کاهش یافته‌اند. در نهایت ترکیب ۵ درصد پوزولان و ۹۵ درصدی کلینکر و گچ منجر به حصول بیشترین مقاومت فشاری به میزان ۳۳۵ مگا پاسگال شده است. بطور کلی می‌توان گفت که تاثیر مثبت افزودن کمک ساینده بر مقاومت فشاری بتن، در سن ۲۸ روزه آن حاصل خواهد شد.

منابع

- اکبری، محمود؛ خادمی، فائزه السات؛ خادمی، سید سروش. (۱۳۹۳). بررسی تاثیر ماده معدنی پوزولانی میکروسیلیس بر مقاومت فشاری بتن. هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران. ۱۸-۱۷ اردیبهشت-بابل.
- باقریان، علی. (۱۳۹۵). تاثیرات پوکه معدن دماوند در ساخت بتن سبک خود تراکم. هشتمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران. ۱۵ مهر. تهران.
- بهرامی، عطاله؛ کاظمی، فاطمه؛ سیدپور، سیدعلی؛ موتاب، مهدی. (۱۳۹۶). تولید بتن سنگین از سنگدانه‌های باریت معادن استان آذربایجان غربی. تحقیقات بتن. ۳(۱۰)، صص: ۴۶-۵۵.
- خادمی، فائزه السات؛ اکبری، محمود؛ خادمی، سید سروش. (۱۳۹۴). بررسی تاثیر جداگانه اجزای تشکیل‌دهنده بتن بر مقاومت فشاری بتن. ۲۸ روزه آن. دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران. ۱۵-۱۷ اردیبهشت-تبریز.
- سرخان‌پور، رضا؛ تاجیک، میلاد. (۱۳۹۱). بررسی تاثیر ۱۱ کمک سایش بر بهبود فرایند آسیاب تولید سیمان. اولین کنفرانس بین‌المللی صنعت سیمان، انرژی و محیط زیست. تهران-دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران.
- علی حسینی، افشار؛ عباس‌زاده، علیرضا، باستانی، داریوش. (۱۳۸۸). ضرورت بازنگری مصرف انرژی و راه‌های کاهش آن در صنعت سیمان. علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، ۱۶، ۷۵-۸۳.
- فرخ زاد، رضا؛ یاسری، سجاد؛ انتظاریان، محمد حسین؛ یآوری، امیر. (۱۳۹۵). بررسی تاثیرات سولفات‌ها بر مقاومت فشاری انواع بتن‌های پوزولانی و اندازه گیری میزان نفوذ با آزمون فراصوت در سنین مختلف. تحقیقات بتن (۳(۱)، صص: ۱۱۳-۱۳۰.
- کلاین، ک؛ هارلیوت، ک.اس. (۱۹۰۶). "کانی‌شناسی"، ترجمه مر، فرید؛ مدبری، سروش؛ جلد دوم، چاپ سوم (۱۳۸۹)، تهران، مرکز نشر دانشگاهی.
- مرادی شقاقی، طالب؛ علاقی پور، حسن؛ شاهدی فرد، مسعود. (۱۳۹۴). بررسی آزمایشگاهی مقاومت بتن حاوی ماده افزودنی گیاهی ماهور. تحقیقات بتن، ۷(۲)، صص: ۶۹-۷۹.

A. Avami, S.Sattari, (2007). Energy Conservation Opportunities: Cement Industry in Iran. International Journal of Energy Issue 3(1), pp. 1-7.

A. M. Neville, (1981). Properties of concrete. 3rd editon, Pitman publishing limited, London.

A.M. Diab, E.M. Abd, E. Abd, A.A. Ayman, (2016). Long term study of mechanical properties, durability and environmental impact of limestone cement concrete, Alexandria Eng. J. 55(2), pp. 1465-1482.

D. Padovani, M. Madistri, (2008). Improvement of mechanical strengths by the use of grinding aids: optimization of sulphate content in cement. 15th Arab international cement conference and exhibition. Cairo.

E. Worreler, C. Galistky, (2004). Energy efficiency improvement opportunities for cement making, an energy star Guide for Energy and plant managers. Report LBNL- 54036, Lawrence Berkley national laboratory, Berkley.

G. Appa Rao, (2003). Investigations on the performance of silica fume-incorporated cement pastes and mortars. Cement and Concrete Research, 33, pp. 1765–1770.

G.A. Boyd, (2006). Development of a performance- Based industrial Energy indicator for Cement Manufacturing Plants. Argonne National Laboratory .ANL/DIS-06-3, pp. 1-34.