



معرفی سیمان‌های بلیتی در راستای کاهش CO2

■ علی‌اکبر کفاش بازاری؛ رئیس مرکز تحقیق و توسعه سیمان تهران

چکیده: طی سال‌های اخیر تولیدکنندگان بتن بر پارامتر مقاومت فشاری سیمان تأکید زیادی داشته‌اند که منتهی به ازدیاد بی‌رویه فاز آلایت (فاز اصلی تأمین استحکام میان‌مدت بتن) در سیمان‌های تولیدی شده است. ازدیاد فاز آلایت غالباً کاهش فاز بلیت را به همراه دارد که چندان مطلوب نمی‌باشد. از این رو در این مقاله به معرفی و تشریح سیمان‌های بلیتی پرداخته می‌شود. سیمان بلیتی نوعی سیمان با فاز بلیت (C2S) زیاد است که مصرف آن فواید و معایبی دارند. مهم‌ترین مزیت این سیمان، مصرف انرژی کمتر و کاهش انتشار CO2 و مهم‌ترین ایراد آن کسب مقاومت فشاری پائین‌تر در سنین اولیه نسبت به سیمان‌های پرتلند معمولی است که با مواد مکمل قابل‌جبران می‌باشد. واژگان کلیدی: سیمان بلیتی، BC، کم‌انرژی، CO2، هیدراسیون، BYF.

با بلیت زیاد^۲ برای بتن‌ریزی‌های حجیم پیشنهاد می‌شوند.

۱- مقدمه:

سیمان، ماده‌ای منحصر به فرد است که در صنعت ساختمان به‌عنوان چسباننده قوی مصالح مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیمان عنصر اصلی در بتن و عضو مهمی در پروژه‌های کوچک و بزرگ ساختمانی در سراسر جهان است. اصطلاح "سیمان کم‌انرژی" برای سیمان‌هایی استفاده می‌شود که با انرژی کمتری تولید می‌شوند و می‌توان جایگزین سیمان‌های معمولی یا OPC^۱ گرد. استفاده گسترده‌تر از این سیمان‌ها منجر به کاهش هزینه‌های تولید مواد چسباننده و همچنین کاهش انتشارهای نامطلوب گاز دی‌اکسید کربن می‌شود که در راستای اهداف نقشه جهانی صنعت سیمان تا سال ۲۰۵۰ است [۱-۲]. سیمان غنی از بلیت از این گروه است که سیمان بلیتی^۲ (شکل ۱) نامیده می‌شوند [۳]. سیمان‌های

۲- معرفی سیمان بلیتی و مطالعات انجام شده:

قبل از تشریح سیمان‌های بلیتی، انواع فاز بلیت (C2S) در



▲ شکل ۱- سیمان بلیتی

3 High Belite Cement (HBC)

1 Ordinary Portland Cement (OPC)

2 Belite cements (BCs)

دما (درجه سانتیگراد)	نوع بلیت	شکل بلور
>1425	α	هگزاگونال
1160-1425	α'_{II}	اورتورومبیک
680-1160	α'_I	اورتورومبیک
500-680	β	مونوکلینیک
<500	γ	اورتورومبیک

▲ جدول ۱- انواع بلیت [۴]

جدول ۱ به طور مختصر معرفی می‌گردد [۴].

مطابق منابع مختلف هیدراسیون بلیت، کندتر از آلیت است [۵-۱۰]؛ بنابراین روند کسب مقاومت بتن نیز کندتر می‌باشد. در جدول ۲ درجه هیدراسیون بلیت و آلیت طی مرور زمان دیده می‌شود [۱۱-۱۳].

فاز	درجه هیدراسیون (%) بعد از ۱ روز	درجه هیدراسیون (%) بعد از ۲۸ روز	عمق هیدراسیون (میکرون) بعد از ۲۸ روز	عمق هیدراسیون (میکرون) بعد از ۶ ماه	گرمای هیدراسیون (ژول بر گرم)	گرمای هیدراسیون (کالری بر گرم)
آلیت (C3S)	۲۵-۳۵	۷۸-۸۰	۳/۵	۷/۹	۱۵/۰	۵۰۰
بلیت (C2S)	۵-۱۰	۲۰-۵۰	۰/۶	۱/۰	۲/۷	۶۰

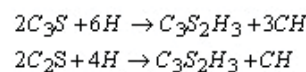
▲ جدول ۲- درجه هیدراسیون آلیت و بلیت [۱۱-۱۳]

طی فرایند هیدراسیون سیمان، فاز بلیت، ژل CSH بیشتری تولید می‌نماید (جدول ۳) [۱۴] که مطلوب می‌باشد.

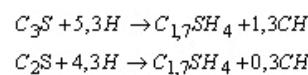
فاز		محصولات	
نام	جرم (گرم)	نام	جرم (گرم)
آلیت (C3S)	۱۰۰	CSH	۷۵
		پرتلاندیت ^۴	۴۹
بلیت (C2S)	۱۰۰	CSH	۹۹
		پرتلاندیت	۲۲

▲ جدول ۳- سهم وزنی محصولات هیدراسیون آلیت و بلیت [۱۱-۱۲]

روابط ارائه شده برای هیدراسیون فازهای آلیت و بلیت در سیمان پرتلند به صورت زیر است:



و البته کاران اسکرایونر^۵ (۲۰۰۱) ترجیح داد که واکنش هیدراسیون سیمان پرتلند را به صورت زیر بنویسد:



بنابراین می‌توان گفت که هیدراسیون فاز آلیت آبخواهی بیشتری به دنبال دارد. با توجه به مطالب بالا و دلایل دیگر، افزایش فعالیت هیدرولیکی سیمان‌های بلیتی محور اصلی تحقیقات در

۴ پرتلاندیت یک ماده معدنی که شامل هیدروکسید کلسیم (۲ (OH) Ca) و احتمالاً مونو کلسیم بروسیت (۲ (OH) Mg) می‌باشد.

5 Karen Scrivener

بسیاری از فعالیت‌های علمی است. استفاده از انواع مختلف مواد معدنی و تثبیت‌کننده‌ها، امکان بهبود سیمان‌های بلیتی و افزایش فعالیت هیدرولیکی آنها را فراهم می‌کند. اصلاح ماده معدنی پایه بلیتی و استفاده از مواد افزودنی بسیار فعال، از فاکتورهای مهم در تولید سیمان‌های بلیتی با مقاومت اولیه بالاتر است [۱۵]. باید دقت نمود که سایش بلیت در آسیای سیمان بسیار دشوارتر از آلیت می‌باشد. در حال حاضر از سیمان‌های بلیتی، که محتوی بلیت، آلیت و آلومینات کلسیم هستند، به عنوان سیمان‌های با حرارت کم استفاده می‌شود [۱۶].

مصرف سیمان اصلاح شده با بلیت فراوان (HBC)، با نام سیمان

پرتلند با حرارت پایین، مزایای مناسبی دارد:

۱. گرمای هیدراسیون پایین؛
 ۲. نیاز کمتر به آب؛
 ۳. دوام بالا؛
 ۴. نرخ بالاتر رشد مقاومت بلندمدت؛
 ۵. مقاومت بیشتر بتن؛
 ۶. افزایش دمای آدیباتیک پایین باعث کاهش مراحل کنترل دما و کاهش خطرات گسیختگی بتن و محصولات؛
 ۷. مقاومت در برابر خوردگی فوق‌العاده بالا به ویژه حمله سولفات‌ها؛
 ۸. مقاومت عالی در برابر جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن؛
 ۹. مقاوم در برابر سایش، مقاوم در برابر شستشو؛
 ۱۰. پایداری خوب حجم.
- این سیمان می‌تواند کاربردهای متنوعی داشته باشد:
۱. بتن حجیم؛
 ۲. بتن سازه‌های هیدرولیکی؛
 ۳. بتن‌های سازه‌های دریایی مانند بندر، دیواره، اسکله، جاده نزدیک دریا، پل روی دریا؛
 ۴. بتن مقاوم نسبت به حمله سولفات‌ها؛
 ۵. بتن با مقاومت بالا (HSC)؛
 ۶. بتن ضد ترک،
 ۷. لوله فولادی برای مقاومت در برابر سولفات،
 ۸. محصولات سیمانی مانند دیوار، میز، لوله، آجر (بلوک)؛
 ۹. کف‌سازی و جاده کارخانه مواد شیمیایی و غیره؛
 ۱۰. سایر محصولات بتنی و ساختمانی [۱۷].

کوبرس و همکاران (۲۰۰۹) توسعه فاز در خمیرهای سیمان بلیتی معمولی و فعال با تجزیه و تحلیل ریتولد و محدودیت‌های

6 drying shrinkage
7 High-strength Concrete (HSC)

شیمیایی آن را مطالعه نمودند. سیمان‌های با بلیت بالا می‌تواند انتشار CO₂ را تا ۱۰٪ کاهش دهد، اما واکنش هیدراتاسیون فازهای بلیت کند بوده که منجر به کاهش مقاومت مکانیکی بتن در سنین اولیه می‌شود. به منظور افزایش واکنش هیدرولیکی این سیمان‌ها، فعال‌سازی با تغلیظ اکسیدهای قلیایی پیشنهاد شده است. این محققان با یک کلینکر بلیتی آزمایشگاهی بدون فعال‌سازی (۴۷٪ وزنی β -C₂S و ۱۹٪ α H'-C₂S) و دو کلینکر فعال شده با اکسید قلیایی را سنتز کردند: یکی را با ۱۳٪ β -C₂S، ۲۴٪ α H'-C₂S و ۱۹٪ α -C₂S؛ و دومی را با ۱۲٪ β -C₂S، ۴۲٪ α H'-C₂S و ۵٪ α -C₂S. آنها همچنین یک روش برای تجزیه و تحلیل کمی تکامل فاز خمیر سیمان ایجاد کردند و آن را در این سیمان‌های با بلیت بالا استفاده نمودند. تجزیه و تحلیل فاز کمی ریتولد^۸، داده‌های پراش پودر اشعه ایکس (XRF)، همراه با محدودیت‌های شیمیایی، برای تعیین توسعه فازها طی هیدراتاسیون یک‌ساله در خمیرهای سیمان بلیتی استفاده شد. مطابق نتایج این مطالعات، β -C₂S تقریباً طی ۳ ماه اول واکنشی نشان نداد، در حالی که α H'-C₂S به طور متوسط بیش از ۵۰٪ در همان دوره واکنش نشان می‌دهد. همچنین، درجه واکنش α -C₂S نسبت به α H'-C₂S کمی بیشتر (به طور متوسط حدود ۷۰٪ پس از سه ماه) است [۱۸].

تانتوای و همکاران (۲۰۱۴) سنتز دمای پایین سیمان بلیتی بر پایه میکروسلیس و آهک را مطالعه نمودند. آنها سنتز بلیت دمای پایین (β -C₂S) حاصله از بخار سیلیس را توصیف کردند. مخلوط آهک، کلرید باریم و میکروسلیس با نسبت مشخص در محفظه فولاد ضدزنگ در دمای ۱۵۰-۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵-۲ ساعت به صورت هیدروترمال عمل‌آوری نمودند که در دمای ۷۰۰-۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ ساعت کلسینه شد. این محققان به روش‌های TGA / DTA، XRD، FTIR و SEM تجزیه و تحلیل انجام دادند. هیدرات سیلیکات دی کلسیم (هیلبراندیت) با عمل‌آوری هیدروترمال مخلوط بخار آهک / سیلیس در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵ ساعت تهیه شد. هیلبراندیت تا حدی در دو مرحله با دماهای ۴۲۲ و ۵۰۸ درجه سانتی‌گراد از بین می‌رود و در ۷۳۴ درجه سانتی‌گراد به γ -C₂S تبدیل می‌شود؛ حال آنکه در دمای ۹۵۵ درجه سانتی‌گراد به α '-C₂S تبدیل می‌گردد و حین سرد شدن به β -C₂S تبدیل می‌شود. در حضور یون‌های Ba^{۲+} β -C₂S می‌تواند با تبدیل جزئی به γ -C₂S تثبیت شود. از مخلوط بخار سیلیس، آهک و کلزید باریم با نسبت $(Ca + Ba) / Si = 2$ سنتز β -C₂S با عمل‌آوری هیدروترمال در ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد

8 Rietveld

طی ۵ ساعت با موفقیت انجام شد [۱۹].

استانک و سولوسکی (۲۰۱۵) سیمان بلیتی کم‌انرژی فعال را مطالعه نمودند. کلینکرهای بلیتی خالص با مواد بینابینی متشکل از C₃A و C₄A_F تولید نشده‌اند، زیرا از مقاومت کافی برخوردار نیستند. این تحقیق نتایج فعال‌سازی هیدرولیکی کلینکرهای غنی از بلیت با آنیون‌های سولفات را توصیف نمود. سیمان‌های تهیه شده از این کلینکرهای غنی از بلیت، حاوی حداکثر ۲۰٪ آلایت بوده که در دمای ۱۳۵۰ درجه سانتی‌گراد پخت شده و دارای همان مشخصات فنی سیمان پرتلند معمولی (OPC) بودند [۲۰].

مورین و همکاران (۲۰۱۷) تأثیر مقدار انیدریت، نسبت آب به مواد سیمانی و نرمی بر روی سینتیک و شکل‌گیری فازهای سیمان BYF^۹ را مطالعه نمودند. یکی از چالش‌های اصلی در سیمان BYF، کنترل واکنش فاز بلیت است که این محققان دو مکانیزم اثرگذار بر هیدراتاسیون بلیت را مطالعه نمودند: الف- به فضای موجود برای محصولات هیدراتاسیون مرتبط است و می‌تواند به‌عنوان کاهش دسترسی آب در سطح سیمان دیده شود؛ ب- مربوط به نرمی سیمان است. آنها از یک مدل ترمودینامیکی استفاده نمودند که می‌تواند مجموعه فاز را پیش‌بینی کند و همبستگی خوبی بین این مدل و نتایج به‌دست‌آمده با اندازه‌گیری XRD و ریتولد پیدا کردند [۲۱].

سو و همکاران (۲۰۱۹) تحقیقی در مورد تهیه و خواص سیمان سولفوآلومینات با بلیت بالا (HBSAC) بر اساس ضایعات جامد صنایع مختلف انجام دادند. در این مطالعه، از انواع زباله‌های جامد صنعتی، از جمله سرباره گوگردزایی کک نفتی، خاکستر بادی و سرباره کاربرد با بوکسیت طبیعی، به‌عنوان مواد اولیه برای تهیه سیمان سولفوآلومینات با بلیت بالا استفاده شد که محتوی سولفات کلسیم خالص (بدون افزودن گچ طبیعی به کلینکر) بود. آنها دمای پخت، ترکیب مواد معدنی و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی کلینکرهای سیمان را بررسی نمودند. روش‌های مورد استفاده در این مطالعه شامل آنالیز حرارتی (DSC-TG)، پراش اشعه ایکس (XRD)، اشعه فلورسانس (XRF) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بوده است. نتایج این محققان نشان داد که تهیه سیمان سولفوآلومینات با بلیت بالا به کمک انواع مواد زائد جامد صنعتی ذکر شده کاملاً امکان‌پذیر است و میزان استفاده از مواد زائد جامد تا ۸۰٪ است. دمای پخت حدود ۱۳۵۰-۱۲۲۵ درجه سانتی‌گراد و دمای مطلوب پخت تقریباً ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد بود. کلینکرهای آماده شده در دمای ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد زودگیر بوده، به‌سرعت

9 Belite-Ye'elimite-Ferrite (BYF)

10 High Belite Sulpho Aluminate Cement (HBSAC)

سفت شده و نیاز به آب برای تهیه غلظت نرمال (قوام استاندارد) در آنها کمی بیشتر بوده است [۲۲].

کوگا و همکاران (۲۰۲۰) در مورد هیدراتاسیون خمیرهای سیمان BYF، تأثیر نسبت آب به سیمان و وجود خاکستر بادی مطالعه کردند. این مطالعه تکامل فازها، تخلخل و مقاومت مکانیکی خمیرهای سیمان BYF را گزارش می‌دهد. آنها نسبت‌های مختلفی از آب به سیمان را در نظر گرفتند و از خاکستر بادی (FA) نیز استفاده کردند. طبق نتایج آنها شامل موارد زیر است: هیدراتاسیون اولیه (یک‌روزه) خمیر سیمان BYF با هیدراتاسیون ایلیمیت همراه با افزایش قلیایی که عمده‌تاً توسط نسبت مولی سولفات کلسیم به ایلیمیت کنترل می‌شود، مشخص شد. طی آزمایش یک‌ساله، مجموعه فازها در نمونه‌های ۰/۵۰ و ۰/۶۷ شبیه به هم بودند. هیدراتاسیون خمیر سیمان ۰/۴۰ در عرض یک ماه تقریباً کامل بود. افزودن ۲۵ درصد وزنی خاکستر بادی، باعث کاهش کسری استرلینگیته و اترینگیت، بدون افت مقاومت طولانی مدت در مقایسه با خمیر سیمان BYF ساده با همان نسبت آب به مواد سیمانی شد. نتایج حاصل از روش‌های مختلف برای هر دو مرحله (مایع و جامد) در سنن اولیه (۲۴ ساعت اول) با محاسبات ترمودینامیکی تأیید شد [۲۳].

غربا و همکاران (۲۰۲۰) سیمان با بلیت زیاد تهیه شده از مواد خام جایگزین را بررسی نمودند. این محققان سه کلینکر آزمایشگاهی با بلیت زیاد را از مواد اولیه سنتی و جایگزین تهیه کردند. آنها کلینکر مرجع (شاهد) را از ۷۷٪ سنگ آهک، ۱۱٪ خاک رس ماسه‌ای، ۱۱٪ خاک رس چاق^{۱۱} و ۱٪ سنگ‌آهن فراهم نمودند. در کلینکر دوم رس‌های چاق با پودر آجر قرمز در مواد خام جایگزین شدند و در کلینکر سوم ۱۰٪ از سنگ آهک توسط پوسته‌های تخم‌مرغ جایگزینی انجام شده است. بررسی میکروسکوپ الکترونی (SEM)^{۱۲} حضور واضح نوارهای باریک متقاطع و دوقلویی را در دانه‌های بلیت گرد - گرد کلینکر مرجع ناشی از تغییر شکل α -C2S به پلی مورف β -C2S را نشان داد. نوارها در کلینکرهای دوم و سوم ضعیف‌تر بود که نشانگر یک تثبیت احتمالی چند شکلی α -C2S است. آنها مقاومت فشاری ۲۸ روزه سیمان‌ها را اندازه‌گیری نمودند و دریافتند که مقاومت اولیه با افزایش نرمی بهبود نمی‌یابد. این محققان مقادیر مقاومت فشاری بالاتر برای سیمان تهیه شده از کلینکر دوم را به دست آوردند [۲۴].

کوئتسا و همکاران (۲۰۲۱) طی یک تحقیق، برای فعال‌سازی BCS جایگزینی مقرون‌به‌صرفه مواد برای ثبات فرم‌ها در دمای بالا،

۱۱ رس های غیرآلی با درجه خمیری بالا [۲۵]

12 scanning electron microscope (SEM)

خنک‌سازی سریع، سایش و هیدراتاسیون دمای ملایم به‌عنوان فعال‌ساز فیزیکی؛ و استفاده از دانه‌های C-S-H به‌عنوان مواد افزودنی فعال‌ساز را بررسی نمودند [۲۵].

۳- جمع‌بندی:

هم اکنون از سیمان‌های بلیتی، که محتوی مقدار زیادی بلیت و مقدار کمتری آلیت و آلومینات کلسیم هستند، به‌عنوان سیمان‌های با حرارت کم در پروژه‌های مختلفی استفاده می‌شود. این سیمان‌ها مقادیر بالایی از ژل C-S-H را تولید می‌کنند و دارای خواص دوام بسیار خوبی هستند. اهم مزایای این سیمان عبارت‌اند از: مصرف سنگ آهک کمتر و در نتیجه انتشار CO₂ کمتر؛ انرژی مصرفی کمتر؛ دمای کارکرد پایین‌تر که به معنای کاهش انتشار CO₂ و NOx حاصل از سوختن است؛ کاهش حرارت هیدراتاسیون در سنن اولیه. با این حال، روند کسب استحکام در سنن اولیه برای سیمان‌های بلیتی نسبت به سیمان‌های پرتلند قابل‌مقایسه نمی‌باشد. این روند کسب مقاومت را می‌توان با سه روش جبران نمود: الف - شیمیایی، ب- فیزیکی، ج- فعال‌سازی با مواد افزودنی.

۴- منابع:

- [1] کفاش بازاری علی‌اکبر، سرخان‌پور مهدی. (۱۳۹۸). "نقشه راه جهانی سیمان - بخش اول". ماهنامه علمی تخصصی فناوری سیمان، ۱۲۵، صفحات ۶-۲.
- [2] کفاش بازاری علی‌اکبر، تدین محسن، سرخان‌پور مهدی. (۱۳۹۹) "نقشه راه جهانی صنعت سیمان و بتن تا سال ۲۰۵۰ و لزوم تهیه نقشه راه ایران" نشریه علمی انجمن بتن ایران، شماره ۷۷، بهار ۹۹، صفحات ۳۴-۲۲.
- [3] جنت، معصوم. (۱۳۹۰). "تولید سیمان بلیتی (سیمان بالانرژی پایین) با مقاومت اولیه بالا" پی‌اپی ۱۶۵ (آبان ۱۳۹۰)، ماهنامه علمی، فنی، اقتصادی سیمان، صفحات ۵۳-۴۷.
- [4] Taylor H.F.W. (1990). "Cement Chemistry". Academic Press.
- [5] Dr. D. N. Ghosh (1992), "concrete and science technology & Cement private limited".
- [6] Duda, W. (1977) "cement data book".
- [7] Neville AM, Brooks JJ (2002). "Concrete technology". Prentice Hall.
- [8] Mehta, K.& Menterio, (2006). "Concrete Microstructure, Properties, and Materials".
- [9] تدین، ع. گلپهاری، ا. احمدی، ز. (۱۳۹۴). "هندبوک سیمان‌های جدید و خاص". انتشارات ناقوس.
- [10] Neville AM, Brooks JJ (2002). "Concrete Properties". Prentice Hall
- [11] H. Taylor, "Cement Chemistry". 2th Edition, Thomas Telford Publication, London, 1998.
- [12] S. Peukert, „Cementy powszechnego użytku i specjalne“, Polski Cement, 2000.
- [13] Walter H. Duda. (1984). "Cement data book-volume II". Third edition, p256.
- [14] A. Neville. "Właściwości betonu", Polski Cement, Kraków, 2000.
- [15] Galyna Kotsay & Roman Jaskulski (2020). "Belite

Concrete Research, Volume 99, September 2017, Pages 8-17.

[22] Dunlei Su & Gongbing Yue & Qiuyi Li & Yuanxin Guo & Song Gao & Liang Wang. (2019). "Research on the Preparation and Properties of High Belite Sulphoaluminate Cement (HBSAC) Based on Various Industrial Solid Wastes". Materials (Basel). 2019 May; 12(9): 1510.

[23] Guilherme Yuuki Koga & Blandine Albert & Ricardo Pereira Nogueir. (2020). "On the hydration of Belite-Ye'elimite-Ferrite (BYF) cement pastes: Effect of the water-to-cement ratio and presence of fly ash". Cement and Concrete Research, Volume 137, November 2020, 106215.

[24] H.Y. Ghoraba & M. Rizk & B. Ibrahim & M.M. Allam. (2020). "High belite cement from alternative raw materials". Materialesde ConstruCCión Vol. 64, Issue 314, April-June 2014, e012.

[25] Ana Cuesta. & Andres Ayuela & Miguel A.G.Aranda (2021). "Belite cements and their activation". Cement and Concrete Research, Volume 140, February 2021, 106319.

[۲۶] معماریان، ح. "زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک" انتشارات دانشگاه تهران. ص ۳۷۹.

cement as an ecological alternative to Portland cement - a review". Materials Structures Technology Journal (MST Journal), Vol 2, No 1 (2019), pages 70-76.

[۱۶] تدین، ع. گلپهاری، ا. احمدی، ز. (۱۳۹۴). "هندیوک سیمان‌های جدید و خاص". انتشارات ناقوس. ص ۵۴۶

[17] "High Belite Cement (HBC) for volume concrete". From: www.diytrade.com

[18] Antonio J. M. Cuberos & Ángeles G. De la Torre & M. Carmen Martín-Sedeño & Laureano Moreno-Real & Marco Merlini & Luis M. Ordóñez & Miguel. A.G. Aranda. (2009). "Phase development in conventional and active belite cement pastes by Rietveld analysis and chemical constraints". Cement and Concrete Research, Volume 39, Issue 10, October 2009, Pages 833-842.

[19] M. A. Tantawy & M. R. Shatat & A. M. El-Roudi & M. A. Taher & M. Abd-El-Hamed. (2014). "Low Temperature Synthesis of Belite Cement Based on Silica Fume and Lime". International Scholarly Research Notices.

[20] Theodor Staněk & Petr Sulovský. (2015). "Active low-energy belite cement". Cement and Concrete Research, Volume 68, February 2015, Pages 203-210.

[21] Vincent Morin & Pipat Termkhajornkit & Bruno Huet & Gerard Pham. (2017). "Impact of quantity of anhydrite, water to binder ratio, fineness on kinetics and phase assemblage of belite-ye'elimite-ferrite cement". Cement and



رسانه تخصصی توسعه پایدار با رویکرد
حفظ محیط زیست و اکوسیستم
بهینه‌سازی مصرف آب و انرژی
و توسعه انرژی‌های پاک در ایران

توسعه سبز

آخرین اخبار: محیط زیست، انرژی‌های تجدیدپذیر، توسعه پایدار در

مادر شبکه‌های اجتماعی دنبال کنید:

www.toseesabz.ir

[tosesabz](https://www.facebook.com/tosesabz) [tosesabz](https://www.instagram.com/tosesabz)
[tosesabz](https://www.twitter.com/tosesabz) [tosesabz](https://www.youtube.com/tosesabz)

جهت ارسال مقاله، خبر، گزارش و سفارش آگهی: tosehsabz.magazine@gmail.com

شماره تماس: ۰۹۲۲۶۴۰۹۶۱۲ = ۶۶۵۲۲۷۳۹

تلگرام و واتساپ: ۰۹۰۳۴۵۶۲۶۳۱