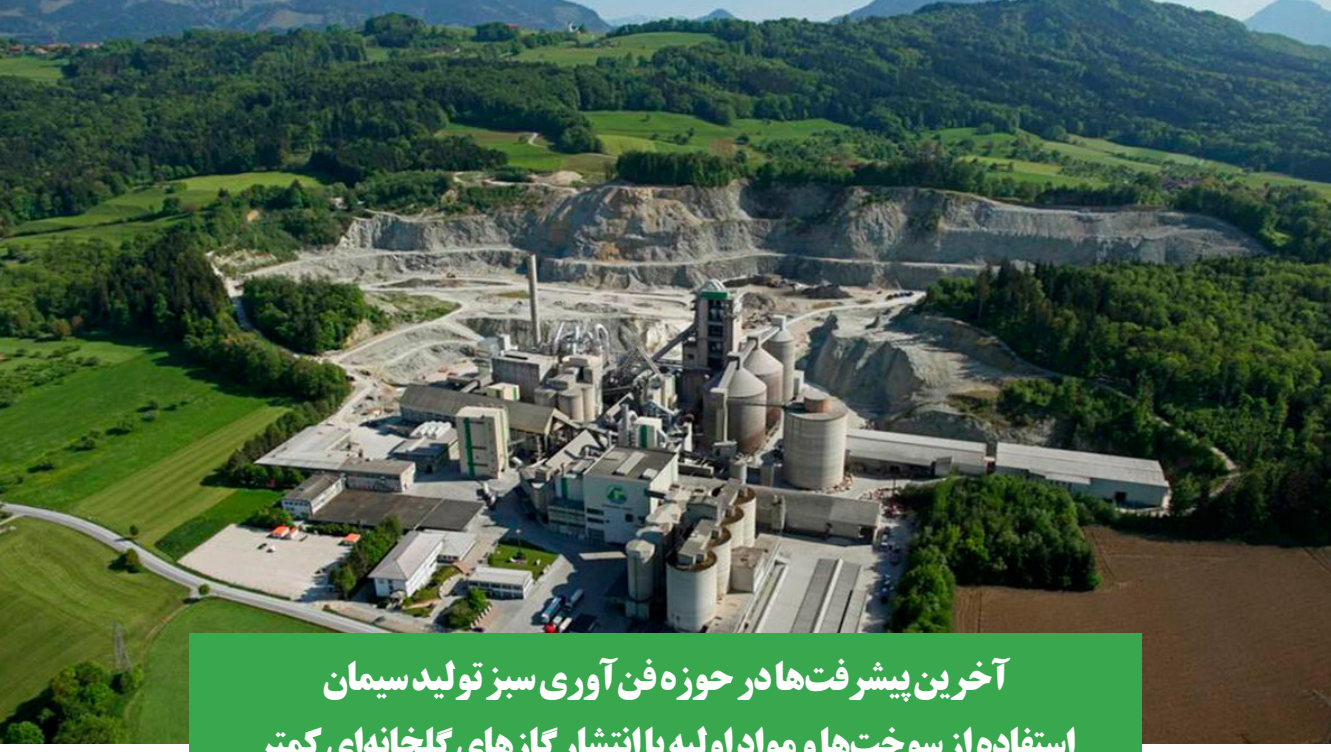


آخرین پیشرفت‌ها در حوزه فن‌آوری سبز تولید سیمان
استفاده از سوخت‌ها و مواد اولیه با انتشار گازهای گلخانه‌ای کمتر

■ **نویسندگان:** Ali Naqi & Jeong Gook Jang
Division of Architecture and Urban Design, Institute of Urban Science, Incheon National University

■ **مترجم:** **پریسا خطیب زاده**، عضو هیئت‌مدیره شرکت پایکار صنعت

انتشار در نشریه MDPI ۲۱ ژانویه ۲۰۱۹

• چکیده:

صنعت سیمان در قرن ۲۱ با چالش‌های متعددی روبه‌روست: ازیک‌طرف استخراج بی‌رویه منابع سوخت طبیعی، کمبود مواد اولیه خام و افزایش تصاعدی تقاضای سیمان و از طرف دیگر دغدغه‌های تغییرات اقلیمی. به ازای هر تن از سیمان پرتلند معمولی (OPC) یک‌تن گاز CO_2 وارد جو می‌شود. ازاین‌رو، با بهره‌برداری از منابع معدنی محلی و با استفاده از پسماندهای صنعتی تلاش می‌شود کلینکربا ترکیبات جدید شناسایی و تا حد ممکن یا به‌طور کامل جایگزین OPC شوند. با استفاده از سیمان‌های جایگزین می‌توان مصرف انرژی و انتشار کربن در طی فرآیند تولید سیمان را کاهش داد.

زمانی می‌توان به ویژگی‌های نهفته در سیمان‌های نوین به‌عنوان جایگزینی برای سیمان متداول پرتلند به‌طور کامل پی برد که مطالعه دقیقی بر خصوصیات انواع چسب‌های سیمانی با فناوری‌های مدرن صورت گیرد. این مقاله به بررسی هفت نوع از سیمان‌های نوین و جایگاه هریک در مقایسه باسیمان پرتلند می‌پردازد. این مطالعه نه‌تنها تحلیلی جامع از جایگزین‌های آینده سیمان ارائه می‌دهد بلکه شرایط به‌روز شده سوخت‌ها و چسب‌های سیمانی متنوع و جدیدی را ارائه می‌کند که موجب کاهش انتشار CO_2 در فرآیند تولید سیمان می‌شود. به‌علاوه، کاربردی بودن و صرفه تولید موادی با هزینه کمتر در قبال نیاز رو به افزایش سیمان است را بررسی می‌شود.

لغات کلیدی: سیمان سبز، چسب‌های سیمانی جایگزین، صنعت سیمان، انتشار CO_2، سوخت جایگزین

۱. مقدمه

بتن و ماده اصلی آن: سیمان، صنعت ساخت‌وساز را در ۱۵۰ سال گذشته در سیطره خود داشته است. به‌طوری‌که نرخ تولید سیمان با افزایش ۱,۵ گیگا تنی در سال ۲۰۰۰ به میزان دو برابر یعنی ۳ گیگا تن در سال ۲۰۱۲ رسیده بود [۱]. اکنون سیمان پرتلند معمولی (OPC)[1] در جایگاه کالایی راهبردی و حیاتی [۲] قرار دارد و دلیل این‌چنین وابستگی به سیمان پرتلند – با میزان تولید کنونی ٤ گیگا تن در سال– رشد فزاینده زیرساخت‌ها در کشورهای درحال‌توسعه است [۳].

برآوردها حاکی از آن است که سالانه حدود ۵۰٪ از OPC در جهان به‌منظور تولید ۱۱ گیگا تن بتن مصرف می‌شود. درحالی‌که نیمی دیگر در تولید انواع ملات، درزگیر، روکار سیمانی و انواع پوشش‌ها استفاده می‌شود [٤]. با افزایش تقاضا برای زیرساخت‌ها در آینده نزدیک، تولید سیمان سازگار با توسعه پایدار، عمر بالا و مقرون‌به‌صرفه بسیار ضروری می‌نماید [٦]. تخمین زده می‌شود که تقاضا برای سیمان تا سال ۲۰۵۰ تقاضا به میزان ۱۸ گیگا تن در سال برسد [۵]. در سال‌های اخیر آفریقای شمالی، کشورهای خاورمیانه و کشورهای درحال‌توسعه ازجمله چین و هند شاهد رشد عظیمی بوده‌اند. امروز چین با ۵۸,۱۳ درصد مصرف جهانی، بازار جهانی سیمان را در دست گرفته است [۳]. با در نظر گرفتن تخمین ۳,۵ گیگا تنی تولید سیمان در سال و انتشار حدودا ۹۰۰ کیلوگرم گاز CO_2 به ازای هر تن سیمان، سالانه بیش از ۳ گیگا تن گاز گلخانه‌ای وارد جو می‌شود [۷]. درنتیجه صنعت سیمان مسئول حدود ۵ تا ۷ درصد از کل انتشار گاز CO_2 است [۸]. نه‌تنها انتشار گاز CO_2 از کارخانجات سیمان بلکه گازهای SO_2 و NOx موجب اثرات گلخانه‌ای و باران‌های اسیدی می‌شوند [۹]. جدای از انتشار گازهای گلخانه‌ای، تولیدات سیمان مصرف مقدار عظیمی از منابع طبیعی را در پی دارد. بر اساس آمارها برای تولید یک‌تن از OPC حدود ۱,۵ تن از مواد اولیه خام استفاده می‌شود [۱۱,۱۰]. به‌علاوه، تولید کلینکر مستلزم مصرف حجم عظیمی از انرژی است [۱۲]؛ بنابراین صنعت سیمان با چالش‌های زیادی روبه‌روست که می‌توان به: استخراج منابع طبیعی، افزایش هزینه‌های مربوط به تأمین انرژی، الزام به کاهش انتشار گاز CO_2 و اطمینان از موجودی منابع خام طبیعی با رشد فزاینده اشاره کرد [۱٤,۱۳].

ازاین‌رو ضروری است که در پی یافتن کامپوزیت‌های سیمانی بود که بتوان کاملا یا تا حدی جایگزین سیمان شود که به‌مراتب دوستدار محیط‌زیست بوده و تأثیرات زیست تخریبی کمتری داشته باشد. یک شیوه جایگزین برای کاهش آلاینده‌های هوا استفاده از محصولات جانبی (خاکستر بادی[2]، سرباره، غبارات SiO_2، مواد بازیافتی و سایر پسماندها) به‌عنوان جایگزین موردی برای سیمان است [۱۸–۱۵].

گزینه دیگر، جایگزینی سیمان متداول با سیمان‌های با بازده بالا است – که CO_2 کمتری منتشر کرده و انرژی کمتری مصرف می‌کنند– بدون اینکه بازدهی و کیفیت چسب سیمان را تحت تاثیر قرار دهند [۲۲–۱۹]. عملکرد زیست‌محیطی جانشین‌های مواد خام توسط شاخص SUB–RAW تعیین می‌شود که با عواملی مانند میزان مصرف انرژی و میزان انتشار کربن در تولید مواد سنجیده می‌شود. شاخص SUB–RAW بیانگر شیوه کیفی ساده‌سازی شده‌ای برای ارزیابی مواد جایگزین متناسب با توسعه پایدار است [۲٤,۲۳]. این روش در کاربرد خاکستر بادی زغال‌سنگ[3] (CFA) که به‌صورت موردی در ترکیب

1 Ordinary Portland Cement

2 Flying ash

3 coal fly ash

سیمان پرتلند جایگزین می‌شود در عمل مطالعه شده است [۲٤]. مطالعه حاضر گستره وسیعی از شیوه‌های نوین را دربرمی‌گیرد که می‌توان به‌وسیله آن‌ها میزان انتشار گاز CO_2 حاصل از تولید فاز چسب سیمان را کاهش داد. این شیوه‌های نوین از جایگزینی مواد خام متداول و سوخت‌های مورداستفاده در مراحل تولید سیمان پرتلند گرفته تا جایگزینی کامل کلینکرسیمانی با کلینکر جدید همچون سیمان‌های سولفوآلومینات و سیمان‌های منیزیتی می‌باشد.

در این جستار نه‌تنها خواص شیمیایی اصلی بلکه ریزساختار و تولید چسب‌های نوین، عملکرد مهندسی و جنبه‌های زیست‌محیطی آن‌ها در مقایسه باسیمان پرتلند با جزییات بررسی می‌شود.

۲. جایگاه کنونی سیمان پرتلند

۲,۱. فرآیند تولید

سیمان پرتلند ماده‌ای بسیار ضروری و بخش عمده‌ای از مواد اولیه ساخت‌وساز را در جهان دربرمی‌گیرد. این سیمان شامل ۸۰٪ سنگ‌آهک شکفته و ۲۰٪ خاک رس است. کلینکر سیمان با تکلیس سنگ‌آهک (به‌عنوان منبع کلسیم) خاک رس یا ماسه (منبع سیلیس و آلومینیوم) در یک کوره دوار در دمای حدود ۱٤٥۰ °C تولید می‌شود. مواد اولیه مانند سنگ‌آهک و گچ به‌عنوان منبع کلسیم و خاک رس به‌عنوان منبع سیلیس به‌راحتی در دسترس هستند. آسیاب کردن کلینکر با ٥٪ سنگ گچ (سولفات کلسیم) سیمان پرتلند را شکل می‌دهد. حدود ٥۰٪ از انتشار گاز CO_2 مستقیم ا از فرآیند تکلیس (کربن‌زدایی سنگ‌آهک) منتشر می‌شود، درحالی‌که ٤۰٪ از احتراق سوخت در کوره دوار و ۱۰٪ از استخراج و انتقال مواد و محصول منتشر می‌شود [۲٥]. تکلیس، فرآیند تجزیه کربنات کلسیم (سنگ‌آهک) به اکسید کلسیم (CaO) و CO_2 است. در صنعت سیمان محصول فرآیند تکلیس؛ کلینکر خوانده می‌شود. فرآیند نهائی زمانی رخ می‌دهد که کربنات کلسیم($CaCO_3$) و سیلیسیمSiO_2 در کوره‌ای با حرارت۱٤٥۰ °C ترکیب می‌شود؛ که نهایتا منجر به تولید محصولات زیرمی‌شود: آلیت (سیلیکات کلسیم سه)[۱]

$$3CaCO_3 + SiO_2 \xrightarrow{heat} Ca_3SiO_5 + 3CO_2 \quad (1)$$

calcium carbonate — silica — calcium silicate (clinker) — carbon dioxide

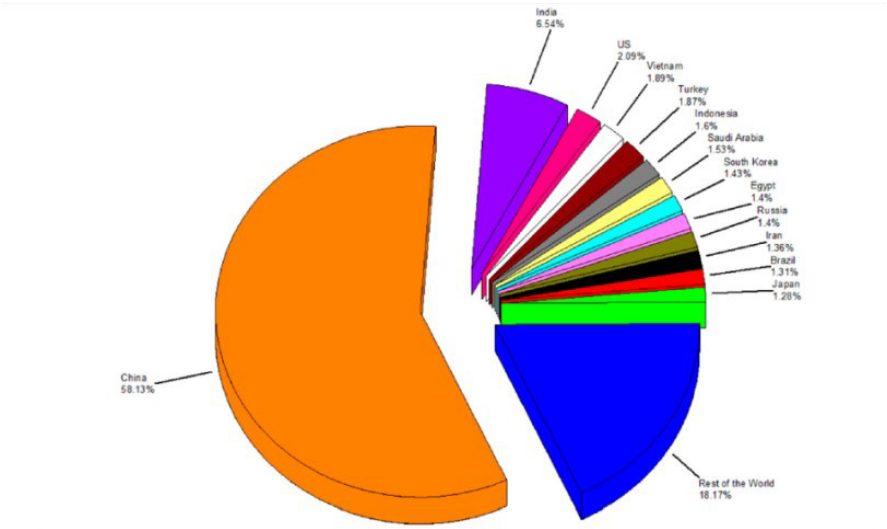
کلینکر آسیاب شده و تبدیل آن به سیمان پرتلند نرم پودری با آب واکنش می‌دهد و جامد می‌شود. جدول یک اجزای اصلی سیمان پرتلند را با درصدهای معمول بر اساس وزن آن نشان می‌دهد. این ترکیبات به دلیل فرآیند حرارت دهی بالا از سنگ‌آهک و خاک رخ شکل می‌گیرند. سیمان پرتلند در گروه سیمان‌های سیلیکات کلسیمی آب‌دوست هیدرولیکی طبقه‌بندی می‌شوند. اغلب سیمان‌های هیدرولیک از اجزای کلسیمی تشکیل می‌شوند که به‌سادگی هیدراته می‌شوند [۲٦].

در فرآیند هیدراته شدن اجزای سیمان تحت واکنش شیمیایی با آب قرار می‌گیرند تا ماده جامد هیدراته مستحکمی تشکیل شود. اگرچه ملات سیمان تنها ۱۰ تا ۱٥٪ حجم بتن را تشکیل می‌دهد، اما همین نسبت کوچک نقش به سزایی در مشخصات بتن به‌صورت ملات یا سخت شده دارد [۲۷](جدول ۱).

سیمان پرتلند، سیمانی غنی از فازهای سیلیکات

▼ جدول ۱: اجزای اصلی سیمان پرتلند بر اساس درصد وزنی [۱]

Tricalcium silicate, alite	50%	Ca_3SiO_5 or $3CaO.SiO_2$
Dicalcium silicate, belite	25%	Ca_2SiO_4 or $2CaO.SiO_2$
Tricalcium aluminate, aluminate	10%	$Ca_3Al_2O_6$ or $3CaO.Al_2O_3$
Tetracalcium aluminoferrite, ferrite	10%	$Ca_4Al_2Fe_2O_{10}$ or $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$
Gypsum	5%	$CaSO_4.2H_2O$



▲ شکل ۱. تولید جهانی سیمان در سال ۲۰۱۷

کلسیم سه (آلیت)[4] و سیلیکات کلسیم دو (بلیت)[5] است که دارای مقادیری از اکسید آلومینیوم (آلومینات)[6] و آهن فریت[7] می‌باشد. در طی فرآیند هیدراته شدن هم آلیت و هم بلیت ترکیب می‌شوند تا سیلیکات کلسیم آبدار هیدراته[8] (C–S–H) را تشکیل دهند که درواقع همچون ژلی کلوئیدی[9] اجزای سیمان را با هیدروکسید کلسیم[10] (CH) به هم پیوند می‌دهد. ماده جامد شامل ۵۰ تا ۶۰٪ C–S–H، ۲۰ تا ۲۵٪ CH و ۱۵ تا ۲۰٪ سولفا آلومینات کلسیم هیدراته می‌باشد.

در این مقاله نشانه‌های خلاصه ترکیبات سیمان بیانگر نمادهای شیمیایی زیر هستند:

$C=CaO, S=SiO_2, A=Al_2O_3, F=Fe_2O_3, \check{S}=SO_3$

☐ ۲,۲. تولیدات جهانی و تاثیرات زیست‌محیطی

تولید سیمان در کشورهای مختلف تفاوت چشمگیری دارد که این خود وابسته به میزان دسترسی به مواد اولیه خام است.

کشورهایی که سیمان کافی برای برآورد نیازهای داخلی خود تولید نمی‌کنند ناچار به واردات آن هستند. بررسی‌های اخیر حاکی از آن است که تولید جهانی سیمان فراتر از ٤ میلیارد تن است که بر اساس نمودار ۱، چین بخش اعظم بازار را در کنترل خود دارد [۳] و با توجه به ظرفیت تولید یک کارخانه سیمان معمول که چیزی حدود ۱,۵ تا ۲,۵ میلیون تن در سال است می‌توان تعداد کارخانه‌های فعال را تخمین زد [۲۸]. در دهه اخیر، نرخ تولید سیمان به‌صورت فزاینده‌ای در کشورهای درحال‌توسعه در آسیا مثل چین و هند رو به افزایش بوده است.

اصلی‌ترین اثر تخریب زیست‌محیطی در تولید سیمان عبارت‌اند از: مصرف انرژی برای تولید، انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم در حین تولید و انتقال کلینکر، برداشت از معادن و منابع طبیعی و تولید پسماندها. طی مطالعات دقیق و وسیعی در حوزه‌های زیست‌محیطی در مراحل اصلی تولید سیمان صورت گرفته است [۳۲–۲۹]، منابع اصلی انتشار گازها در تولید سیمان پرتلند به دودسته تقسیم می‌شود.

۱. فرآیند تکلیس که ۵۰٪ کل انتشار گاز را شامل

4 Alite
5 Belite
6 Aluminate
7 Ferrite
8 calcium silicate hydrate
9 Colloidal gel
10 calcium hydroxide

می‌شود.

۲. احتراق سوخت که برای حرارت دادن مواد خام استفاده می‌شود.

مباحث زیست‌محیطی چه در مقیاس محلی، مانند گردوغبار خروجی کوره (CKD)[11] و چه در مقیاس جهانی مثل انتشار گازهای (NO_x–SO_2–CO_2) مطرح می‌باشد. ذرات CKD کمتر از ۱۰ µm در طبقه‌بندی PM۱۰ قرار می‌گیرند.خلاصه‌ای از انتشار گازهای مختلف در طی فرآیند تولید سیمان در جدول ۲ نشان داده می‌شود.

گارتنر [12] [۴۰] بین دو نوع انتشار گاز CO_2 تفکیک قائل می‌شود؛ CO_2 منتشرشده از فرآیند تکلیس مواد خام و انتشار گازهای مرتبط با مصرف انرژی(CO_2 مربوط به انرژی.) در انتشار CO_2 وابسته به انرژی، کارآمدی کوره دوارنقش مهمی ایفا می‌کند. جدول ۳ مصرف دقیق انرژی حرارتی در فرآیند کلینکر سیمان مرتبط به فناوری به‌کاررفته را نشان می‌دهد. استفاده از سیستم کوره با بهره‌وری مناسب مصرف انرژی به ازای هر تن کلینکر را تا کمتر از ۲,۹ GJ/ton می‌تواند کاهش دهد. درحالی‌که کوره‌های سیمان به‌طور متداول به ازای هر تن کلینکر ۳,۱ GJ/ton انرژی مصرف کرده و تقریبا ۰,۳۱ Kg کربن انتشار می‌دهند [۴۳].

میزان انتشار گاز مربوط به مواد خام ناچیز است. یک‌راه کار جایگزینی محدود مواد خام با مکمل‌های قابل‌ترکیب باسیمان مثل سرباره کوره بلند[13] یا خاکستر بادی است. معمولا این‌گونه مواد تا ۱۰٪ قابل‌جایگزینی هستند [۴۴]. از جنبه تئوری، به ازای جایگزینی ۱۰ درصد سنگ‌آهک انتشار CO_2 تا ۲۵٪ کاهش می‌یابد [۴۳].

▼ **جدول ۲. انتشار گازها در فرآیند تولید سیمان که با * g/kg و تولید کلینکر با ** g/kg بیان‌شده است.**

مرجع	CO_2	SO_2	NO_x	CKD/PM-10
[33]	870 g/kg *			
[34]	810 g/kg *			
[35]	800 g/kg *	0.40–0.60 g/kg *	2.4 g/kg *	0.1–10 g/kg *
[36]	820 g/kg *			
[37]	690 g/kg *	0.82 g/kg *	1.2 g/kg *	0.49 g/kg *
[38]	810 g/kg *	0.58 g/kg *	1.5 g/kg *	0.04 g/kg *
[39]	900 g/kg *	0.27 g/kg **	1–4 g/kg **	200 g/kg **
[40]	895 g/kg *			150–200 g/kg **
[41]		0.54 g/kg **		
[42]			2.5 g/kg **	0.1–0.3 g/kg **
Mean	814 g/kg *	0.5 g/kg *	2.5 g/kg *	25 g/kg *

۳. منابع مقرون‌به‌صرفه سیمان

۳,۱ سوخت‌های(نوین(جایگزین

اصطلاح سوخت‌های نوین به پسماندهایی اشاره دارد که در تولید کلینکر صنعت سیمان استفاده می‌شود که از اهمیت به سزایی نه‌تنها برای تولیدکنندگان بلکه

▼ **جدول ۳. مصرف انرژی حرارتی ویژه در فرآیند تولید کلینکر. [۴۳]**

فرآیند کوره	انرژی حرارتی مصرفی (GJ/ ton Clinker)
فرآیند تر	5.85–6.28
فرآیند خشک کوره طویل	4.60
کوره عمودی	3.70–6.60
پیش گرم کن سیکلون تک مرحله ای	4.18
پیش گرم کن سیکلون دو مرحله ای	3.77
پیش گرم کن سیکلون چهار مرحله ای	3.55
پیش گرم کن سیکلون چهار مرحله ای +کلساینر	3.14
پیش گرم کن سیکلون شش مرحله ای +کلساینر	<2.93

11 cement kiln dust

12 Gartner

13 Blast furnace slag

برای محیط‌زیست برخوردار است. به‌صورت سنتی حرارت دادن کلینکر با سوخت‌های طبیعی، گاز یا نفت کوره[14] صورت می‌گیرد. استفاده از سوخت‌های نوین در میانه دهه هشتاد میلادی رواج یافت. سوخت‌های زیست سازگار[15] (نظیر زباله‌ها، پس‌ماند محصولات کشاورزی یا حیوانی) به‌عنوان انرژی تجدید پذیر به‌صورت چشمگیری انتشار گاز CO_2 را در مقایسه با زغال‌سنگ تا میزان ۲۰ تا ۲۵٪ کاهش می‌دهد [٤٤]. ادغام این سوخت‌ها با سوخت‌های غیر ارگانیک در طی فرآیند احتراق موجب می‌شود این سوخت‌های نوین در کاهش انتشار گازها موثر بوده و محصول کلینکر بهتری داشته باشیم. سوخت‌های نوین که امروزه در صنعت سیمان استفاده می‌شوند شامل تایرهای فرسوده، گازهای خروجی فرآیندهای پتروشیمی، لجن فاضلاب، پسماند کشتارگاه، پسماند نفتی، کاغذ، پلاستیک، منسوجات و قطعات بازیافتی حجیم می‌باشند. در برخی از کوره‌های سیمان به ۱۰۰٪ جایگزینی سوخت‌های نوین دست‌یافته‌اند، درحالی‌که در بسیاری مناطق، شرایط بازار پسماند، امکان جایگزینی بیشتر را فراهم نمی‌کند [٤٥]. همچنین منحنی دما و شرایط خنک‌سازی با جایگزینی سوخت‌ها می‌تواند تغییر کند. باوجوداین، ازآنجاکه خواص شیمیایی این سوخت‌ها با سوخت‌های سنتی متفاوت است محدودیت هائی برای جایگزینی این سوخت‌ها وجود دارد. به‌عنوان نمونه، وقتی تایر در کوره سیمان می‌سوزد میزان اکسید روی در کلینکر افزایش می‌یابد که موجب ایجاد اجزای متفاوتی در کلینکر از طریق خاکستر مواد می‌شود که درنتیجه کاهش کیفیت محصول سیمان به علت کاهش زمان گیرش[16] و کاهش استحکام سیمان را در پی دارد [٤٦]. این مسئله در جایگزینی سوخت را می‌توان اولا با نظارت بر فرآیند تولید و ثانیا با افزودن میزان صحیح مواد خام کنترل کرد که جبران‌کننده ترکیبات و احتراق ایده آل در تغذیه کوره می‌باشد [٤٧]. این شیوه منجر به کیفیت بهتر محصول کلینکر منطبق با استانداردهای سیمان خواهد شد. برخی کشورهای توسعه‌یافته، استفاده از سوخت‌های نوین را از حالت آزمایشگاهی به سمت کاربردهای عملی پیش برده‌اند [٤٧] و میزان بیشتر ٤٠ –٦٠٪ سوخت جایگزین را تا سال ۲۰۵۰ امکان‌پذیر نموده‌اند؛ اما در کشورهای درحال‌توسعه این میزان ۲۵ تا ۳۵٪ خواهد بود [٤٨]. ازآنجاکه انتشار CO_2 از سوخت‌ها ٤٠٪ کل انتشار گازهای گلخانه‌ای را تشکیل می‌دهد استفاده از سوخت‌های نوین می‌تواند به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای از انتشار این گازها بکاهد.

از سوی دیگر دست‌یابی به میزان جایگزینی بالا با محدودیت‌های قانونی سختی روبه‌روست. به‌منظور استفاده از سوخت‌های غیر فسیلی، صنعت سیمان مجبور به کسب مجوزهایی از گروه‌های قانون گزار زیست‌محیطی است. برای کسب این‌چنین مجوزهایی ارزیابی‌های زیست‌محیطی باید صورت گیرد تا معلوم شود که آیا استفاده از پسماندها تاثیر بیشتری نسبت به سوخت‌های معمول دارد یا خیر [١]. همچنین تصویب قوانین مدیریت پسماند به‌شدت بر میزان دسترسی ما به پسماندها تاثیر می‌گذارد. دفن پسماندهای صنعتی در مقادیر بسیار زیاد در مقیاس میلیاردی پدیده جدیدی نیست [٤٩].

جایگزینی بیشتر با سوخت‌های نوین تنها زمانی ممکن است که قوانین دفن پسماندها را چه ازنظر محل دفن زباله‌ها و چه معدوم کردن آن‌ها محدود کند. پذیرش بهره‌برداری از پسماندها در کارخانجات سیمان بسیار در افکار عمومی تاثیر گذار است. مردم عموما برداشت نادرستی از انتشار گازهای پسماندها سوختی دارند و فکر می‌کنند که انتشار این گازها بیشتر است، درحالی‌که انتشار گاز در کارخانه سیمان

14 Fuel oil
15 Biomass
16 Setting time

توسعه‌یافته به‌مراتب کمتر از سوخت‌های متداول است [۵۰].

☐ ۳,۲ مواد مکمل سیمانی(SCMs)[17]

مواد مکمل سیمانی (SCMs) را به‌عنوان پرکننده یا از خاصیت پوزولانی[18] آن می‌توان استفاده کرد. مواد مکمل سیمانی از آلومینا سیلیکات غیر بلوری تشکیل‌شده‌اند که با آهک هیدراته مازاد واکنش می‌دهد که در طی آبگیری سیمان برای تشکیل فاز آلومینا سیلیکات غیر بلوری C–A–S–H استفاده می‌شود [۵۱]. این SCMs می‌توانند منشأ طبیعی یا صنعتی داشته باشند و مواد طبیعی خود به دودسته پوزولان طبیعی و مصنوعی تقسیم می‌شوند. پوزولانهای طبیعی سنگ‌های آذرین هستند و درنتیجه نیازی به عملیات آماده‌سازی اولیه ندارند تا با هیدروکسید کلسیم واکنش دهند درحالی‌که پوزولان های مصنوعی نیازمند فعال‌سازی اولیه هستند تا با هیدروکسید کلسیم واکنش دهند. واکنش‌پذیری پوزولانها در میزان سیلیکای بالای آن‌ها نهفته است [۵۲]. نمونه‌های متداول مواد معدنی دارای سیلیکات: کوارتز، میکا، پیروکسن و فلدسپار هستند. از انواع پوزولان مصنوعی خاک رس تکلیس شده است که واکنش‌پذیری پوزولانی آن به نوع و میزان مواد معدنی تکلیسی، میزان ناخالصی‌ها و فرآیند فعال‌سازی و سطح مقطع بعد ازتکلیس بستگی دارد [۵۳]. از انواع مختلف مواد معدنی رسی به کائولن، ایلیت، مونت موریلینیت و پالی گورسکیت می‌توان اشاره کرد [۵۵,۵۴]. در میان این مواد مختلف، کائولن بیشترین میزان واکنش دهی پوزولانی را دارد. مطالعات مختلفی اهمیت دمای واکنش دهی برای مواد معدنی رسی را نشان داده است [۶۰–۵۷]. هبرت[19] برای کائولن دمای ۷۰۰ ºC، برای ایلیت ۸۵۰ ºC، برای مونت موریلونیت ۸۰۰ ºC و برای پالی گورسکیت ۷۵۰ ºC را ثبت کرده است [۵۹]. اگرچه کائولن تکلیس شده مورد خوبی به‌عنوان ماده مکمل سیمانی می‌باشد، لزوم عملیات بهینه‌سازی برای حذف ناخالصی‌ها در طی فرآیند تولید متاکائولن انرژی زیادی مصرف می‌کند و پسماند ایجاد کرده و هزینه SCM را افزایش می‌دهد.

مهم‌ترین SCMs شامل سرباره کوره بلند، خاکستر بادی و در مقیاسی کوچک‌تر بخار سیلیکا می‌باشد. سرباره کوره بلند محصول جانبی صنایع فولاد است که لازم است بعدازاینکه فرآیند کوره بلند پایان یافت تبدیل به فاز شیشه‌ای شود تا خواص چسبندگی آن پدیدار شود. این مواد شامل آلومینا سیلیکات کلسیم و منیزیم می‌باشد و میزان بیشتری CaO است که امکان تولید فاز C–S–H را فراهم می‌کند. میزان دسترسی به سرباره کوره‌های بلند حدود ۳۰۰ میلیون تن در سال است [۶۱]. دسترسی به سرباره به مقدار ۸٪ تولید سیمان در سال ۲۰۱۴ کاهش‌یافته است درحالی‌که در سال ۱۹۸۰ این رقم ۱۷٪ تولید سیمان را شامل می‌شد [۶۱]. با این میزان اندک دست‌یابی، امکان جاگزینی کلینکر که به‌شدت موردنیاز است در برخی مناطق وجود ندارد.SCM دیگر خاکستر بادی است که درنتیجه احتراق در نیروگاه‌های زغال‌سنگ به دست می‌آید. خاکستر بادی بیش از همه حاوی سیلیکون است اما مقدار قابل‌ملاحظه‌ای از اکسید آلومینیوم و اکسید آهن هم دارد. میزان دسترسی به آن بیشتر از سرباره است، حدود ۹۰۰ میلیون تن در سال؛ بااین‌حال به علت تنوع بسیار زیاد در کیفیت

---

17 Supplementary Cementitious Materials

۱۸ مصرف مواد پوزولانی در بتن می تواند برای تامین یک یا چند خاصیت مشروح زیر باشد.
۱. کاهش میزان سیمان به کار رفته در بتن
۲. کاهش سرعت و میزان حرارت حاصل از فرآیند آبگیری سیمان
۳. بهبود کارایی بتن
۴. افزایش مقاومت دراز مدت بتن
۵. افزایش پایایی بتن از طریق کاهش نفوذپذیری و عملکرد مناسب در برابر تهاجم یون کلرید و سولفات

19 Habert

تنها یک‌ســوم محصول تولیدی در صنعت سیمان و بتن به کار می‌رود. بخار سیلیکا یا همان میکروسیلیکا که محصول جانبی کوره‌های قوس الکتریکی تولید فرو سیلیکون اســت. به علت واکنش پوزولانی بالا، در بتن‌های با اســتحکام بالا به کار گرفته می‌شــود. دسترسی جهانی به بخار سیلیکا حدود ۱ میلیون تن است [٦٢] که تا حدود ۱,۵ میلیون تن تا سال ۲۰۲۰ می‌تواند افزایش یابد. متاسفانه بخار سیلیکا محصول گران‌قیمتی است که اساســا در بتن‌های با استحکام بالا به کار گرفته می‌شــود و با نرخ تولید محدودش هنوز نمی‌توانــد جایگزین کافی به‌عنوان افزودنی به کلینکر باشد.

در میــان انواع مختلــف SCM در دســترس به‌عنوان افزودنی به کلینکر، خاک رس تکلیس شده، به‌خصوص در ترکیب با سنگ‌آهک(فناوری LC^{3}[20]) به‌عنوان جایگزین، جایگاه بســیار خوبی در آینده خواهد داشت که در مقادیر مکفی در دسترس خواهد بود و برای جایگزینی بخشی از کلینکر در تولید سیمان دارای پتانســیل خوبی است. در مقایسه با سرباره که تنها ۵٪ میزان کلینکر تولیدی و خاکستر بادی که البته مقدارش بیشتر از ســرباره است اما به علت کیفیت متغیر آن بــرای جایگزینی کلینکر چندان مناســب نیســت، خاک رس تکلیس شده جایگزین به‌مراتب بهتری اســت [٦٤,٦٣]. خــاک رس ماده فراوانی در سراسر جهان اســت و از ســیلیکون و اکسیدهای آلومینیوم تشکیل‌شده است و سه‌چهارم پوسته زمین را تشکیل می‌دهد [٦٥]. مناسب‌ترین نوع خاک رس کائولن است که در مناطق حاره و نیمه حاره – جایی که کشورهای درحال‌توسعه واقع‌شده‌اند و بیشترین تقاضا برای ســیمان در دهه‌های آینده از این مناطق خواهد بود به‌وفور یافت می‌شود.

واکنش پوزولانی کائولن موقعی به دست می‌آید کــه در دمایی بیــن ٦٠٠ تا ٨٠٠ °C تکلیس شــود [٥٥]. امکان افزودن دوگانه سنگ‌آهک و خاک رس تکلیسی با کلینکر(ترکیب سه‌گانه) خواص مکانیکی خوبی با ۵۰٪ افزودنی به کلینکر ایجاد می‌کند [٦٧].

☐ ۴. سیمان‌های جایگزین

نوآوری در تولید سیمان‌های جایگزین با افزودن مــوادی به فرآیند کلینکر و ســیمان باهدف کاهش انتشار CO_2 و مصرف انرژی کمتر تا آنجا موردتوجه اســت که راندمان و کیفیت ســیمان تولیدی کاهش نیابد. ازاین‌رو منابع جایگزین اعم از ســوخت‌های پسماند و مواد اولیه جایگزین موردمطالعه قرارگرفته است [٤٧]. خواص مهندسی این سیمان‌های جدید بایستی مشابه ســیمان‌های متداول باشد تا به‌عنوان جایگزین بالقوه قابل‌ارائه باشند. در ادامه مشروح این چسب‌های جایگزین با سمان پرتلند می‌آید.

☐ ۴,۱ سیمان‌های فعال‌شده قلیایی

سیمان‌های فعال‌شــده قلیایی متعلق به خانواده ســیمان‌های هیدرولیک هســتند که با مقادیر بالای فاز اتصال آلومینا سیلیکات شناخته می‌شوند. آلومینا ســیلیکات‌ها با آب واکنــش نمی‌دهند و یا به‌کندی واکنــش می‌دهند. بااین‌حال، به خاطــر میزان بالای مــواد نامتبلــور، هنگامی‌که در محیــط قلیایی قرار می‌گیرند هیدرولیز و متراکم می‌شــوند و ســاختار ســه‌بعدی چندوجهی تشــکیل می‌دهند که قابلیت تحمل بــار را دارد [٤٥]. این خاصیت قلیائی طبیعی سیستم و هیدراته شدن ســیمان است که واکنش‌ها را کامل می‌کند، درحالی‌که در غیاب ســیمان پرتلند بســتری قوی لازم است تا آلومینوسیلیکات نامتبلور را فعــال کند [٤٥]. ســیمان‌های فعال‌شــده قلیایی ازلحاظ قیمت، عملکرد و میزان کمتر انتشــار CO_2 باســیمان پرتلند قابل‌رقابت هســتند. به‌علاوه عمر بیشتر و قابلیت بازیافت میلیون‌ها تن از محصولات

20 Limestone and Calcined Clay and Clinker

جانبی صنعتی و پسماندها را در بطن خوددارند. مواد اولیه مورداستفاده شامل سـرباره کوره بلند، سرباره فولاد، متاکائولن، خاکستر بادی، رس کائولنی و گل قرمز(پسماند فرآیند تصفیه آلومینا) است [۱۹]. انواع سیمان‌های فعال‌شده قلیایی در حال حاضر با اسامی مختلف در بازار هستند اما اصول پایه مشابهی دارند. بر اسـاس ترکیب اجزائی که منجر به واکنش خود گیری می‌شوند، سیمان‌های فعال‌شـده قلیایی به ۵ دسته اساسی تقسیم می‌شوند.

۱. سیمان فعال‌شده قلیایی با پایه سرباره
۲. سیمان فعال‌شده قلیایی پوزولانی
۳. سـیمان فعال‌شـده قلیایی پوزولان-آهکی / سرباره
٤. سـیمان فعال‌شـده قلیایی ترکیبی آلومینات کلسیم
۵. سیمان فعال‌شده قلیایی ترکیبی پرتلند

خواص مکانیکی سیمان‌های با پایه سرباره نسبت به ماهیت سـرباره و نوع و میزان فعال‌کننده واکنش تعیین می‌شود.

سیمان سرباره‌ای با مخلوط دقیق و مشخص‌شده، استحکام بیشـتری نسـبت به OPC دارد [٦۹]. در بین سیمان‌های فعال‌شـده قلیایی پوزولانی، سیمان با خاکستر بادی و سیمان متاکائولن طرفداران زیادی دارند. به‌منظور سـنتز ژئوپلیمر، خاکسـتر بادی یا متاکائولن و یک فعال‌کننده قلیایی مثل هیدروکسـید سدیم، کلسیم یا پتاسیم استفاده می‌شود [۷۰].

دمـای واکنش خودگیـری ژئوپلیمر ها معمولا بین ٤۰ تا ۹۵ °C اسـت که بالاتر از دمای خوگیری سیمان پرتلند می‌باشد که در دمای اتاق اتفاق می‌افتد [۷۳-۷۱]. دمای بالاتر خوگیری، واکنش خاکسـتر بـادی را بهبود می‌دهد و در پی آن اسـتحکام اولیه بالاتری به دسـت می‌آید [۷٤]. دمای بالاتر واکنش در ژئوپلیمرهای بر پایه متاکائولن برای دسـتیابی به اسـتحکام بسیار حیاتی اسـت. دمای بالای واکنش سبب دستیابی به مقاومت اولیه فشاری[21] و خمشی[22] می‌شـود [۷۵]. ژئوپلیمرها دارای مقاومت بالائی در برابر واکنش‌های اسـیدی و سیلیکا-قلیایی هستند و هنگامی‌که خوگیری در دمـای بالاتری اتفاق بیفتد، استحکام بالاتری از خود نشان می‌دهند [۷۷,۷٦,۷۰].

در شـرکت Zeobond اسـترالیا به کمک مواد اولیه قابل‌دسـترس حاوی آلومینیات و سیلیکات - شامل سـرباره کوره بلند و خاکسـتر بادی به‌عنوان محصول جانبی کارخانجات- توانسته‌اند چسب‌های ژئوپلیمری تولید کنند که انتشار گاز کمتری داشته و جایگزین پایداری در تولید سـیمان باشند. گاهی به ژئوپلیمرها بسـیار ساده انگارانه نگاه می‌شود و فقط به‌عنوان سیمان پوزولانی به‌حساب می‌آیند. بااین‌حال بهبود استحکام در آلومینوسـیلیکات‌ها به‌عنوان فاز غالـب و با میزان تخلخل[23] کمتر می‌تواند خصیصه متمایزکننده آن از سـایر مواد پوزولانی باشد [٤۰]. سیمان‌های فعال‌شده قلیایی، پتانسیل بسیار عظیمی در فراهم آوردن منافع زیسـت‌محیطی دارند چراکه پسـماندهایی همچون سرباره، خاکستر بادی و تفاله قلیائی(گِ ل قرمز(و سایر مواد غیرپوزولانی می‌توانند به‌عنوان ماده متشکله جدید استفاده شوند [۷۱].

مطالعات بسیاری حاکی از آن است که در مقایسه باسـیمان OPC بر پایه آلومینوسیلیکات، ژئوپلیمرها تاثیرات زیسـت‌محیطی منفی چشـمگیری ندارند [۷۹,۷۸]. سیلیکات‌های قلیایی، چسبی را می‌سازند که ذرات را به هم می‌چسـباند و درنتیجه محصولی سخت شده و همبسته ازنظرشیمایی حاصل می‌شود. زمان‌گیرش بسـیار سریع‌تر از سیمان پرتلند است و مکانیسـم افزایش اسـتحکام آن مانند سیمان OPC نیسـت. بااین‌حال، به‌کارگیری پسـماندها در تولید

21 Compressive
22 Flexural
23 Porosity

سیمان و حفظ تعادل فیزیکی و شیمیایی در خواص مواد چالش بزرگی اســت که این امر حتی در مورد سیمان‌های فعال‌شــده قلیایی سخت‌تر هم می‌شود چراکه معلوم نیست پسماندها در حضور قلیا چگونه واکنش نشــان می‌دهند. حتی اظهارشــده است که حضور قلیای اضافی در سیمان‌های فعال‌شده قلیایی منجر به واکنش قلیا–سیلیکا[24] (ASR) می‌شود [۲]. باوجوداین مطالعات حاکی از آن است که وجود قلیا تاثیر زیادی بر وقوع واکنش (ASR) ندارد، حتی این پدیده را کاهش می‌دهــد [۸۳،۸۲]. زمانی که مقدار اندکی Ca^{2+} در محلول متخلخل موجود است واکنش قلیاها به نســبت سرباره و سنگ‌دانه بستگی دارد. در این مورد، آلومینو ســیلیکات کلسیم محصول اصلی سرباره فعال‌شده قلیایی با مقادیر Na و Al است. بعدا در مقادیر بالاتر قلیایی، انبســاط و تشکیل محصول واکنش ثانویه (ســدیم و ژل سیلیکات کلسیم) اتفاق می‌افتد.

☐ ۴،۲. سیمان پرتلند غنی از بلیت [25]

کانی‌شناســی کلینکر برای ســیمان پرتلند غنی از بلیت همانند ســیمان پرتلند معمولی اســت. این ســیمان‌ها همچنین به ســیمان‌های با بلیت بالا نیز شــناخته می‌شــوند [۸٤]. تفاوت اصلی در سیمان پرتلند امروزی و نوع سیمانی که یک قرن یا قبل‌تر از آن تولید می‌شد در نسبت بین الیت/بلیت در ترکیب کلینکر بوده است. در سیمان غنی از بلیت مقدار بلیت بیش از ۵۰٪ اســت درحالی‌که که الیت تنها ۳۵٪ کل را تشکیل می‌دهد که درنتیجه بلیت فاز غالب است درحالی‌که فاز غالب سیمان پرتلند معمولی متشکل از ۵۰ تا ٦۵٪ الیت اســت و تنها ۱۵ تا ۳۰٪ آن را بلیت تشــکیل می‌دهد [۸۵]. این سیمان‌های غنی از بلیت تحت استاندارد چینی GB۲۰۰–۳۰۰ قرار دارند و با سیمان‌های با حرارت پایین ٤ Type ASTM C۱۵۰ از جنبه استحکام فشاری متفاوت هستند، چراکه سیمان غنــی از بلیت بعد از ۲۸ روز خوگیری ۲۰٪ بیشــتر از سیمان‌های بلیت– دارمتداول، استحکام فشاری از خود نشان می‌دهد [۸٤]. به‌علاوه، نتایج گزارش‌شده حاکی از آن است که سیمان با بلیت بالا نه‌تنها حرارت کمتری تولید می‌کنند بلکه قابلیت روان‌سازی[26] بهتر، خواص مکانیکی بالاتر و طول عمر بیشــتر از خود نشــان می‌دهند. به‌علاوه، در مقایسه باسیمان پرتلند، مقاومت بالاتری در برابر ســولفات و کلرید دارد و انقباض کمتری در زمان خشک شدن نشان می‌دهد و هرچند دیرتر به استحکام نهائی می‌رسد اما استحکام نهایی به‌مرورزمان بالاتر است [۸۸–۸٦].

ســیمان غنی از بلیت با فرآیند مشابهی با OPC متداول اما با میزان کمتری از سنگ‌آهک در مخلوط خام کلینکر، تولیدمی‌شود. شکل‌گیری آلیت نیازمند انرژی بالاســت درنتیجه (CO_2–RM) بیشــتری در مقایسه با بلیت منتشر می‌کند. درنتیجه تولید کلینکر غنــی از بلیت انرژی کمتری مصرف می‌کند و CO_2 کمتری انتشــار می‌دهد؛ اما میزان کاهش انتشار گاز ۱۰٪ اســت که آن‌چنان در مقایسه با انتشار CO_2 در OPC متداول چشــمگیر نیست [٦۱]. تولید صنعتی ســیمان پرتلند غنی از بلیت در کوره‌های خشــک مــدرن همراه با پیش گرم‌کن انجام می‌گیرد. این نوع از ســیمان از مواد اولیه مشــابهی استفاده می‌کند اما نسبت ترکیبات متفاوت اســت. دمای تولید کلینکر در داخل کوره حدود ۱۳۵۰ ^{o}C اســت که ۱۰۰ درجه کمتر از دمای موردنیاز برای OPC سنتی است [۸٤]. در برخــی موارد، برای واکنش‌پذیر کردن بلیت، یک فعال‌کننده فیزیکی (ســرد کردن سریع کلینکر) و یا شیمیایی (افزودنی محرک) لازم است. به‌عنوان‌مثال، افزودن ۰،۵–۱٪ SO_3 بــه مخلوط مواد خام بعلاوه ســرمایش کلینکرمنجر به فعال شدن واکنش بلیت

24 alkali–silica reaction
25 Belite-rich
26 Workability

می‌شـــود. به علت دمای احتراق پایین، انتشار اندکی از NOx و SOx قابل‌مشـــاهده اســـت. ازآنجایی‌که سختی بلیت به نسبت بالاتر از آلیت است، حدودا ۵٪ انرژی الکتریکی بیشـــتری برای آسیاب کردن سیمان غنی از بلیت برای دســـتیابی به نرمی مشـــابه OPC نیاز است [۸٤]. ازآنجاکه تولید گرما در طی هیدراته شدن سیمان تاثیر به ســـزایی در استحکام اولیه بتن دارد، دلیل اصلی استفاده از سیمان غنی از بلیت این است که هیدراته شـــدن آن نصف آلیت است [۸۹]. این ویژگی به این معناســـت که برای مقدار مشابهی از مخلوط بتن، دمای حداکثری برای سیمان غنی از بلیت کمتر از دمای OPC است. دمای پایین‌تر در کار باســـیمان حجیم مطلوب است تا از ترک برداشتن به علت حرارت پیشگیری شود.

☐ ۴,۳. سیمان سولفوآلومینات کلسیم (CSA)[۲۷]

سیمان‌های سولفوآلومینات کلسیم (CSA) نوعی از ســـیمان با مقدار بالای آلومینا اســـت. برای تولید کلینکر (CSA)، بوکســـیت و ســـنگ‌آهک و سنگ گچ در کوره دوار ترکیب می‌شـــوند [۲]. سیمان‌های (CSA) برای اولین بار در چین به کار گرفته شد و در اواخر دهه ۷۰ میلادی بسیار باب شد. این سیمان‌ها دارای فـــاز بلیت (C2S)، یِ الیمیـــت[۳۰] (C٤A3Š) و گچ(CŠH۲) اســـت. در طی فرآیند هیدراته شدن ســـیمان‌های CSA، بر اساس فرمول زیر اِترینگیت[۳۱] شکل می‌گیرد [۹۳].

در غیاب $Ca(OH)_2$:

(2) $C_4A_3Š+2CŠH_2+36H \rightarrow C_6AŠ_3H_{32}+2AH_3$

در حضور $Ca(OH)_2$:

(3) $C_4A_3Š+8CŠH_2+6CH+74H \rightarrow 3C_6AŠ_3H_{32}$

ریزســـاختار اِترینگیت بستگی به حضور آهک دارد [۹٤]. اِترینگیتـــی کـــه در معادله شـــماره (۲) شـــکل‌گرفته ماهیتی گران دارد که در سیمان خود-تنیده به کار گرفته می‌شود [۹۵]، درحالی‌که اِترینگیتی که در معادله (۳) شـــکل‌گرفته است گران نیست و عامل استحکام اولیه در کامپوزیت‌های سیمانی است [۹٦]. کلینکرهای کلاســـیک سولفوآلومینات کلسیم بیش از همه بـــر پایه ۳۵ تا ۷۰٪ یِ الیمیت C٤A3Š، ۳۰٪ بلیت (β-C2S) با درصد کمتری (۱۰ تا ۳۰٪) فازهایی همچون C12A7, C٤AF و CaO هستند، اما C2AŠ و CŠ به علت ماهیت زیان‌آورشـــان مطلوب

▼ جدول ۴: میزان انتشار کربن ناشی از تبدیل مواد خام در سیمان پرتلند معمولی (OPC) در مقایسه با سیمان‌های دیگر

ترکیبات کلینکر	مواد خام	انتشار CO_2 (g of CO_2 per g of Raw Material)
Magnesia	Magnesite	1.092
Calcia (Lime)	Limestone	0.785
Alite	Limestone + silica	0.578
Belite	Limestone + silica	0.511
Tricalcium aluminate	Limestone + alumina	0.489
Calcium aluminoferrite	Limestone + alumina + iron oxide	0.362
Sodium metasilicate	Soda + silica	0.361
Monocalcium aluminate	Limestone + alumina	0.279
Calcium aluminosilicate	Limestone + alumina + anhydrite	0.216

به‌منظور کاهش بادکردگـــی[۲۸] لوله‌های بتنی خود-تنیده[۲۹] تولید شدند [٤۵]. عنصر اصلی پودر سیمان نیســـتند [۹۷]. با به‌کارگیری ترکیبـــات CSA مقدار ســـنگ‌آهک در کوره کاهش می‌یابد که در مقایســـه باســـیمان پرتلند نه‌تنها تا ۲۵٪ کاهش انرژی حرارتی

27 Calcium Sulfoaluminate Cement
28 Swelling properties
29 Self-stressing
30 ye'elimite
31 Ettringite

بلکه تا ۲۰٪ کاهش انتشـــار CO_2 منافع ارزشمندی دارد. پسماندهای صنعتی را می‌توان به‌عنوان مواد خام برای تولید ســـیمان‌های CSA استفاده کرد [۹۹,۹۸] و درنتیجه ســـیمان‌های سولفوآلومینات کلسیم برای محیط‌زیست ارزشمند هستند. جدول ٤ میزان CO_2 ناشـــی از تبدیل مواد اولیه خام به ســـیمان پرتلند را در مقایسه با اجزای مختلف سیمان را نشان می‌دهد. آلیت که از سنگ‌آهک و سیلیکا تولید می‌شود ۰,۵۷۸ گرم CO_2 را به ازای هر گرم ماده خام تولید می‌کند درحالی‌که سولفوآلومینات کلسیم ۰,۲۱٦ گرم CO_2 به ازای هر گرم ماده خام که از سنگ‌آهک، آلومینا و انهیدریت[۳۲] منتشر می‌کند.

ایـــن ویژگی کلینکـــر CSA را بســـیار مطلوب می‌نماید. بااین‌حال، از سال ۲۰۰٤ تولید سیمان‌های CSA به مقدار ۱,۲ تا ۱,۳ میلیون تن در ســـال ثابت مانده اســـت [۱۰۰]. دلیل اصلی این ثبات نیاز بسیار زیاد آلومینیوم در مواد خام برای تولید کلینکر CSA اســـت که موجب بالاتر بودن هزینه‌های تولید OPC می‌شود، بنابراین اســـتفاده از آن محدود به مصارفی اســـت که خواص ویژه(سخت شدن سریع و خود-تنیدگی(موردنظر باشد.

☐ ۴,۴. سیمان سولفوآلومینات فریت بلیت کلسیم (BCSAF)[۳۳] یا بلیت- یِ الیمیت-فریت (BYF)[۳۴]

ســـه فاز اصلی در تکنولوژی BCSAF یا BYF شامل: بلیت (سیلیکات کلسیم دو C_2S) یِ الیمیت (سولفوآلومینات کلسیم $C_4A_3\check{S}$) و فریت (آلومینو فریت کلسیم C_4AF) هستند. در این مدل از سیمان، بلیت و یِ الیمیت فازهای اصلی هستند که غالب آن را بلیت تشکیل داده که فاز بعدی با مقدار قابل‌ملاحظه ای الیمیت است. ترتیب فراوانی این فازها در کلینکر بدین ترتیب اســـت: بلیت> یِ الیمیت > فریت. فاز هیدراته سیمان BYF از قرار زیر است [۱۰۱].

واکنش هیدراته شدن زمانی که هنوز $A\bar{H}_3$ هنوز موجود است:

(4) $C_2S+AH_3+5H \rightarrow C_2ASH_8$ (strätlingite)

واکنش هیدرانه شدن در مراحل بعدی

(5) $C_2(A,F)+C_2S+C_2ASH_8 \rightarrow 2C_3(A,F)SH_4$ (katoite)

(6) $2C_2S+7H \rightarrow C_3S_2H_6+CH$

(7) $2C_2S\cdot C\check{S}+7H \rightarrow C_3S_2H_6+CH+C\check{S}$

در مراحل اولیه گیرش، اســـتحکام از اِترینگیت $C_6A\check{S}_3H_{32}$ و هیدروکســـید آلومینیـــوم $A\bar{H}_3$ از واکنش شیمیایی یِ الیمیت $C_4A_3\check{S}$ و آنهیدریت $C\check{S}$ ناشـــی می‌شود. بعد از تخلیه آنهیدریت، واکنش‌های شیمیایی بیشـــتر منجر به تولید مونوسولفو آلومینات $C_4A\check{S}H_{12}$ و هیدروکسید آلومینیوم می‌شود. بلیت با آلومینیوم هیدروکسید واکنش می‌دهد و استراتلینگیت C_2ASH_8[۳۵] تولید می‌کند [۱۰۱]. در این مرحله هیچ C–S–H تشکیل نمی‌شود و این موضوع نشانگر این است که هیدرات‌های شکل‌گرفته متفاوت از سیستم OPC متداول هستند، واکنش‌های بعدی بلیت موجب تولیدکاتویـــت $C_3(A,F)SH_4$[۳٦] به‌عنوان محصول C–S–H می‌شـــود. روش کلینکـــر BYF فنـــاوری سیمان CSA که پیش‌تر پایه‌گذاری شده است دنبال می‌کند و روشی بین ســـیمان پرتلند و سیمان CSA به‌حســـاب می‌آید [۸٤]. این کلینکرها رامی‌توان در کارخانجات سیمان پرتلند متداول تنها با تغییر اندکی در نسبت ترکیبات تولید کرد که به خاطر عدم نیاز به سرمایه‌گذاری جدید مزیت مهمی محسوب می‌شود. سیمان‌های CSA کنونی موجود در بازار دارای مقدار زیادی یِالیمیت هســـتند که از مواد خام گران‌قیمت غنی از آلومینیوم به‌دست‌آمده‌اند، بنابراین کاربرد این سیمان به خواص ویژه‌ای همچون جبران انقباض[۳۷] و

32 Anhydrite
33 Belite–Calcium Sulfoaluminate Ferrite
34 Belite–Ye'elimite–Ferrite
35 strätlingite
36 katoite
37 Shrinkage compensation

استحکام سریع ناشی از فازی الیمیت محدود می‌شود [۸٤]. هدف از توسعه فناوری BYF کاهش هزینه تولید کلینکر CSA است. این هدف با کاهش مواد غنی از آلومینیوم به دست می‌آید که درعین‌حال تولید بتن مستحکم‌تر و انتشار گاز کربن کمتر نسبت به سیمان‌هایی با خصوصیات مشابه سیمان پرتلند متداول را سبب شود [۱۰۲].

تفاوت اصلی در تولید سیمان BYF و OPC در نسبت بین مواد خام ورودی کوره است. هردو از سنگ‌آهک به‌عنوان ماده خام اولیه استفاده می‌کنند که کلسیم موردنیاز را فراهم می‌کند. بااین‌حال،BYF نیاز به ۲۰ تا ۳۰٪ سنگ‌آهک کمتر در مقایسه باسیمان پرتلند دارد، درنتیجه انتشار کمتر CO_2 را موجب می‌شود [۸٤]. بیش از نیمی از انتشار CO_2 از کوره دوار در طی تکلیس سنگ‌آهک ایجاد می‌شود که مستقیما با کاهش مصرف سنگ‌آهک در مقایسه با OPC کاهش می‌یابد. از طرفی، کلینکر BYF نیازمند مقدار بیشتری محتویات آلومینیومی در مقایسه با OPC است بنابراین مواد غنی از آلومینیوم مثل بوکسیت، زغال‌سنگ، خاک رس و مواد پسماند برای کلینکر BYF موردنیاز است [٦١]. تولید کلینکر BYF نیازمند حمل مواد غنی از آلومینیوم به کارخانه است که خود دلیلی برای افزایش قیمت نسبت به OPC می‌باشد، چراکه کارخانجات کنونی سیمان همگی نزدیک معادن مواد خام اولیه برای تولید سیمان پرتلند هستند. شرکت Lafarg کلینکری را با عنوان "Aerther" به نام خود ثبت کرده است که دارای مقدار بیشتری بلیت نسبت به کلینکر CSA است و امکان استفاده از مواد خام کمتر گران تغذیه کوره را فراهم می‌کند [٤٥]. این کلینکرها قابلیت جایگزینی کلینکر OPC را برای همه کاربردها دارند به‌علاوه اینکه با استفاده از سنگ‌آهک کمتر در تولید کلینکر انتشار گاز CO_2 را تا ۲۰٪ کاهش می‌دهند [٦١]. بعلاوه کلینکر BYF این قابلیت را دارد تا در مقایسه باسیمان حاوی سرباره مقادیر بالاتری تولید شود چراکه نیاز به تأمین سرباره ندارد درحالی‌که هنوز میزان سرباره آن مشابه OPC می‌باشد. همچنین می‌تواند جایگزین سیمان پرتلند ترکیبی با سرباره آسیاب شده [۳۸] در کاربردهای ویژه شود، چراکه فاز CSA در سیمان‌های BYF بسیار واکنش‌پذیر است و می‌تواند استحکام اولیه بالاتری نسبت به سیمان پرتلند حاوی سرباره ایجاد کند [۸٤].

بدیهی است که بر اساس این نتایج سیمان‌های BYF جایگزین مناسبی برای OPC قدیمی هستند.

سیمان‌های BYF برای کاربردهای ویژه مطلوب‌ترند، چراکه سیمان‌هایی با میزان بالاتر بلیت و آلیت به‌مراتب دارای نفوذپذیری[۳۹] (تراوایی) کمتر و مقاومت بالاتر در محیط‌های شیمیایی[٤۰] هستند [۲]. اگرچه مقدار زیاد بلیت، مدت‌زمان گیرش و نرخ افزایش استحکام را بالا می‌برد، اما حضور آلومینات کلسیم و سولفات کلسیم جبران این نقص را می‌کند.

جنبه مهم زیست‌محیطی مرتبط با سیمان‌های BYF این است که از محصولات جانبی صنعتی(مثل خاکستر بادی بسترسیال [۱۰۳] گازهای حاصل از گوگردزدایی لجن، سرباره کوره بلند و غیره) و مقداری سولفات برای تولید کلینکر استفاده می‌کند که در تولید کلینکر OPC امکان‌پذیر نیست. در سیمان‌های BYF همچنین می‌توان از گچ برای افزودن محصولات قابل هیدراته که در کوره فرآوری نشده‌اند سود جست که موجب ذخیره مقدار قابل‌ملاحظه‌ای انرژی می‌شود. سیمان‌های BYF هنوز در مرحله تحقیق و توسعه هستند و شرکت‌های اروپایی سیمان ازجمله LafargeHolcim،Heidelberg و Vicat به‌طور فعال پیشرو هستند [۱۰۱]، اما در رقابت کارایی کلینکر BYF در مقایسه با OPC هنوز محدودیت‌های

38 Slag-blended
39 permeablity
40 Chemical attack

فنی بی‌شـــماری وجود دارنـــد. دو چالش فنی مهم مربوط به کنترل واکنش‌پذیری در مقیاس‌های زمانی متفاوت است؛ نخست رسیدن به استحکام سریع از طریق هیدراته شـــدن الیمیت اســـت و دوم، حصول استحکام تدریجی درطی زمان از طریق واکنش کافی بلیت می‌باشد [۱۰۱].

☐ ۴،۵. سیمان‌های با پایه منیزیم

سیمان‌های منیزیتی بر پایه اکسید منیزیم (MgO) به‌عنوان ماده اولیه واکنش‌دهنده اصلی هستند. برای اولین بار این ســـیمان توســـط Sorel در سال ۱۸٦۷ معرفی شد و تحت عنوان سیمان منیزیتی[41] یا سیمان منیزیم اکســـی کلراید شناخته شد. در مراحل ابتدایی این نوع از سیمان با استفاده از اکسید منیزیم و کلرید منیزیم آبدار تولید می‌شـــد. محصول نهایی سخت‌شده شامل چهار فاز پیوندی زیر است [۱۰٦].

$2Mg(OH)_2{\cdot}MgCl_2{\cdot}4H_20$- $3Mg(OH)_2{\cdot}MgCl_2{\cdot}8H_2O$ - $5Mg(OH)_2{\cdot}MgCl_2{\cdot}5H_2O$- $9Mg(OH)_2{\cdot}MgCl_2{\cdot}H_2O$

بااین‌حال به‌زودی معلوم شد که فاز اکسی کلراید منیزیم پایدار نیســـت پس از قرار گرفتن در معرض آب به مدت طولانی موجب آب شـــویی[42] شـــده و کلرید منیزیم و اکســـید منیزیم شـــکل می‌گیرد. این موضوع سبب محدودیت کاربری این سیمان به موارد مشخصی در ساخت‌وساز شده است، اگرچه خواص اســـتحکامی و مقاومت به آتش و مقاومت سایشی بالایی دارد و در مقایسه با OPC نیازی به خوگیری مرطـــوب[43] ندارد [۱۰٦]. در دهـــه اخیر پس‌ازآنکه هریسون[44] ســـیمان واکنشی MgO را به ثبت رساند [۱۰۷] تولید این محصول به‌صورت چشمگیری تا ۱٤ میلیون تن در سال افزایش‌یافته است [۱۰۸]. سیمان اکسی سولفات منیزیتی بر پایه محلول سولفات منیزیم و اکسید منیزیم خواص مشابهی باسیمان Sorel دارد [۱۰۹]، اما مقاومت هوازدگی[45] ضعیفش، استفاده آن را در مقیاس‌های انبوه محدود کرده است.

در میان سیمان‌های منیزیتی، سیمان‌های کربنات منیزیـــم در صنعـــت موردتوجـــه قرارگرفته‌اند. این سیمان‌ها با حضور پسماندها (مثل سرباره، خاکستر بادی، بخارات سیلیکا، خاکستر فاضلاب و پسماندهای معدنی) به همراه بروســـیت[46] و تســـریع‌کننده‌های واکنش تشکیل می‌شـــوند [۱۰۷]. دلیل اصلی اینکه فناوری چســـب‌های فوق‌الذکر بر پایه منیزیم چندان موردتوجه نیســـتند نه‌تنها کمیابی مواد اولیه که منبع اصلی MgO از تکلیـــس منیزیت($MgCO_3$، عناصر نادر خاکی به‌جای $CaCO_3$) است بلکه میزان بالایی از انتشار CO_2 در طی تکلیس کربنات منیزیم حاصل می‌شود.(جدول ٤)

بااین‌حال، واکنـــش خودگیری منیزیت می‌تواند CO_2 مصـــرف کند که به معنای این اســـت که این نوع از ســـیمان می‌تواند به‌عنـــوان یک جاذب CO_2 عمل کند. در ســـال ۲۰۰۸ یک شـــرکت انگلیسی به نام Novacem با همـــکاری Lafrage یک نوآوری معرفی کرد که این‌چنین سیمانی را از سنگ سیلیکات منیزیم(الیوین و ســـرپنتین) تولید می‌کرد. ذخایر این ماده بسیار عظیم است و بر اساس تخمین‌ها بیش از ۱۰۰۰۰ گیگا تن اســـت [۱۱۰]. فرآیند شامل کربناته کردن ســـیلیکات منیزیم با CO_2 در دمای ۲۰۰ °C و فشار ۱۸۰ Bar می‌باشد. اکسید منیزیم پس از تجزیه کربنات در دمای ۷۰۰ °C به دســـت می‌آید.CO_2 که در این مرحله آزاد می‌شـــود، CO_2 فسیلی نیست که نشان می‌دهد در این فرآیند تولید CO_2 خنثی است. فرمول نهایی ســـیمان Novacem ترکیبی از اکسید منیزیـــم، کربنات منیزیم هیدراته و پوزولان اســـت.

41 Magnesite
42 Leaching
43 Wet curing
44 Harrison

45 Weathering resistance
46 Brucite

سایر کربنات‌های بالقوه که می‌تواند شامل آرتینیت[47] ، هیدرومنیزیت[48] ، بارینگتونیت[49] ، نسکیوهونیت[50] ، دایپینگیت[51] ، ولانسفورگیت[52] هستند که در راکتورهای خاص تولید می‌شوند.

این سیمان تحت عنوان "سیمان کربن منفی[53] " خوانده می‌شود، چراکه CO_2 تولیدشده بازیافتی بوده است. در سال ۲۰۱۱ تست‌های مقاومت بتن روی این نوع سیمان انجام گرفت و مقاومت Mpa ۶۰-۴۰ مشابه سیمان پرتلند به دست آمد [۴۵].

بدون توجه به امکان‌سنجی فنیِ سیمان کربن منفی Novacem، می‌دانیم اکسید منیزیم می‌تواند مستقیم ا تحت‌فشار متوسط CO_2 کربناته و سخت شود [۱۱۱]. یک شرکت استرالیایی سیمان‌های TecEco را با استفاده از اکسید منیزیم فعال- منیزیت سوزآور- تولید می‌کند که جایگزین OPC است [۱۱۲]. اکسید منیزیم هیدراته (بروسیت $MgOH_2$) در مواجهه با اتمسفر کربناته شده و به کربنات منیزیم یا منیزیت تبدیل می‌شود. ولی هنوز مساله لاینحل در تولید اکسید منیزیم از سنگ‌های سیلیکات منیزیم طبیعی، یافتن راهی مقرون‌به‌صرفه ازنظر انرژی برای تولید درمقیاسهای صنعتی است [۱۱۳].

☐ ۴،۶. سیمان‌های بر پایه هیدروسیلیکات کلسیم (Celitement)

Celitement عضوی جدید از خانواده چسب‌های سیمانی هیدرولیک است. مواد و فرآیند تولید آن توسط مؤسسه فناوری کارلسروهه (KIT) توسعه‌یافته است. مواد خام و ترکیبات و سخت شدن این چسب مشابه با چسب‌های سیمانی متداول است [۴۵]. این نوع چسب بر اساس هیدروسیلیکات‌های کلسیم هیدرولیکی غیرمتبلور می‌باشد. مواد اولیه مناسب برای تولید Celitement کربنات ها (مثل سنگ‌آهک) و سیلیکات‌ها (مثل سرباره و شن و خاکستر بادی) هستند. تکلیس پیش از فرآیند انجام می‌گیرد. مقدار مواد خام کربنات دار حدود ۴۰ تا ۵۰٪ در مقایسه با OPC که حدود ۷۰٪ است.

نسبت CaO/SiO_2 بین ۱ تا ۲ است. نسبت‌های اندازه‌گیری شده در بتن به میزان $Ca(OH)_2$ مندرج در سیلیکات کلسیم هیدراته ارجاع می‌شود [۱۱۴]. در فرآیند تبدیل مواد خام دو مرحله وجود دارد. در مرحله اول مواد خام به‌صورت هیدروترمال با فشار بخار اشباع دراتوکلاو در دمای حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ ^{o}C فرآوری می‌شوند. این فرآیند ترکیب سیلیکات کلسیم هیدراته (α-C_2SH) را تولید می‌کند. در مرحله دوم سیلیکات کلسیم هیدراته، تجزیه‌شده سپس با اجزای سیلیکات مخلوط و آسیاب می‌شود که هیدروسیلیکات کلسیم نامتبلور را تولید می‌کند [۴۶]. این عملیات گرمائی در(۱۵۰ تا ۲۰۰ ^{o}C)صورت می‌گیرد که در مقایسه با OPC (دمای ۱۴۵۰^{o}C) دمای بسیار کمتری نیاز دارد. نیاز به انرژی کمتر به علت کاهش مقدار مصرفی کربنات در مخلوط است که همچنین موجب کاهش تا ۵۰٪ انتشار CO_2 می‌شود. همچنین استحکام فشاری تا میزان MPa ۸۰ برای نمونه ملات پس از ۲۸ روزبه دست می‌آید [۱۱۵]. در سال ۲۰۱۱ یک کارگاه اولیه توسط گروه Schwenk راه‌اندازی شد که ظرفیت تولید روزانه ۱۰۰ کیلوگرم را داشت. بااین‌حال فرآیند تولید Celitement در مقایسه با OPC به علت تعدد مراحل تولید بسیار پیچیده است. هنوز از میزان صرفه اقتصادی راندمان انرژی و میزان انتشار CO_2 در شرایط واقعی صنعتی نمی‌توان تخمین قابل‌اعتمادی ارائه کرد زیرا این شیوه هنوز در مراحل توسعه آزمایشگاهی قرار دارد. جدول ۵ جایگزین‌های بالقوه مختلف سیمان را که می‌تواند

47 artinite
48 hydro magnesite
49 barringtonite
50 nesquehonite
51 dypingite
52 lansfordite
53 Carbon negative cement

▼ جدول ۵- جایگزین‌های بالقوه سیمان‌های مختلف بر اساس میزان انتشار CO_2 [۲۱]

نام	نوع	مواد خام	دمای فرآیند	کاهش انتشار CO_2
ژئوپلیمر	مواد فعال قلیائی	خاکستر بادی، ضایعات Al/Si، محلول های قلیائی	دمای محیط	حدود ۷۰%
سیمان سولفو آلومینات	-	سنگ آهک، گچ، بوکسیت، ماسه/خاک رس	1200–1300 °C	۴۰-۳۰%
سیمان منیزیتی Novacem	اکسید منیزیم	سیلیکات منیزیم	200 °C (180 bar) + 700 °C	>۱۰۰%
سیمان منیزیتی TechEco	اکسید منیزیم+ OPC +خاکستربادی	MgCO3	<450°C (Tec-Kiln)	>۱۰۰%
Celitement (KIT)	سیلیکات کلسیم هیدراته	مشابه OPC (Ca/Si ratio 1–2)	150–200 °C بخار اشباع	حدود ۵۰%
سیمان سیلیکات کلسیم قابل کربناته شدن Solidia	سیلیکات کلسیم (wollastonite)	مشابه OPC	1200 °C	حدود ۷۰%

میزان انتشار CO_2 را کاهش دهد نشان می‌دهد.

☐ ۴,۷. سیمان سیلیکات کلسیم قابل کربناته[54]

سیلیکات کلسیم چه با کربناسیون و چه با هیدراته شدن می‌تواند سخت شود. در دوران باستان، چسب‌های بر پایه آهک توسط کربناسیون در هوا سخت می‌شد، اما فرآیند بسیار کند بود زیرا اتمسفر حدود CO_2 ۴۰۰ ppm دارد – حتی با افزایش حدود ۵۰٪ CO_2 همچنان در مقایسه با بخارآب، فرآیند سرعت کمتری دارد [۸۴]. به‌علاوه، نفوذ کربناسیون از سطح به سمت مغز باعث توزیع ناهمگون سختی می‌گردد که در بتن‌ریزی‌های حجیم می‌تواند مشکل‌ساز شود. سفت شدن توسط کربناسیون جزیی الان هم در کارخانجات بتن پیش‌ساخته در حال اجراست. هرچند فرآیند بخار سبب افزایش استحکام می‌شود بااین‌حال، این شیوه CO_2 کمتری مصرف می‌کند. توسعه فناوری کلینکرهای سیلیکات کلسیم قابل کربناته ویژه(CCSC)[55] توسط فرآیند کربناسیون بدون استفاده از انرژی مازاد پیشرفت خوبی کرده است) Solidia,USA([۱۱۶]. کلینکرهای CCSC را می‌توان در کوره‌های های سیمان متداول با استفاده از ماده معدنی سیلیکات کلسیم با آهک پایین مانند وولاستونیت(CS,CaSiO۳) تولید کرد. تولید این کلینکرها نیازمند ۴۵٪ CaO هستند که در مقایسه با OPC با ۷۰٪ CaO، سی درصد CO_2 کمتری از تکلیس مواد اولیه انتشار می‌دهند. به‌علاوه، دمای موردنیاز برای تجزیه این کلینکرها حدود °C ۱۲۰۰ است درحالی‌که در زینتر سازی OPC متداول °C ۱۴۵۰ می‌باشد. کاهش دمای کوره نیز کاهش سی‌درصدی CO_2 را به دنبال دارد [۱۱۶]. کلینکر تولیدشده در قبال سخت شدن توسط هیدراسیون غیرفعال است و تنها می‌توان با گاز CO_2 نسبتا خالص تحت دما و رطوبت نسبی کنترل‌شده فرآوری شود. این شیوه نیازمند بهینه‌سازی محفظه فرآوری است که هزینه‌های اولیه را قدری افزایش می‌دهد. CCSC طی ۲۴ ساعت به استحکام نهائی می‌رسد درحالی‌که همین پروسه برای OPC متداول با ترکیبی مشابه با CCSC، ۲۸ روز طول می‌کشد.

آب تبخیر شده از بتن تازه در حین فرآیند سفت شدن بازیابی می‌گردد درنتیجه در CCSC آب بسیار کمتری نیز استفاده می‌شود [۸۴]. بااین‌حال، به خاطر نیاز به روند فرآوری ویژه‌ای بتن، استفاده از این نوع سیمان باعث خوردگی فولاد می‌گردد (به علت PH پایین≈۹) و کاربرد آن را صرفا به محصولات بتن‌های غیرمسلح محدود می‌کند [۸۴,۶۱].

☐ ۴,۸. ارزیابی چرخه زیستی[56]

ارزیابی چرخه زیستی (LCA) روشی برای ارزیابی جنبه‌های زیست‌محیطی و تأثیرات مواد و محصولات و فناوری‌های مورداستفاده در چرخه زیستی می‌باشد. ارزیابی چرخه زیستی در ISO ۱۴,۰۴۰-۱۴,۰۴۴ تعریف‌شده است [۱۲۰,۱۱۹]. بر طبق این استانداردها چهار مرحله اصلی بررسی LCA شامل موارد ذیل است: تعریف

54 Carbonatable Calcium Silicate Cement
55 Carbonatable calcium silicate clinkers
56 Life Cycle Assessment

هدف و حوزه، تحلیل فهرست موجودی، ارزیابی تاثیرات و تفسیر. ارزیابی چرخه عمر صنعت سیمان شامل موارد زیر است اگرچه تنها به این موارد محدود نمی‌شود: استخراج مواد اولیه، تولید، زیرساخت و مواد پسماند [۱۲۱]. همچنین این ارزیابی می‌تواند از تأثیرات نسبی بر میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، تخریب لایه اوزون، تشکیل فتواکسیدانت و باران‌های اسیدی برآوردی به دست دهد. هرچند مطالعاتی در زمینه ارزیابی چرخه زیستی تولید کلینکر انجام‌گرفته است، بااین‌حال پیرامون سیمان‌های جایگزین تحقیقات اندکی صورت گرفته است. اولین مطالعه ارزیابی چرخه زیستی ژئوپلیمرها در سال ۲۰۰۹ منتشر شد [۷۸]. در این مطالعه یک مترمکعب از ژئوپلیمرها(محصول سرباره/خاکستر بادی)با یک مترمکعب بتن مقایسه شد. سه دسته‌بندی اصلی تاثیرات موردمطالعه به شرح زیر است:

۱. پتانسیل استخراج منابع غیر آلی ADP[۵۷]
۲. گرمایش بالقوه جهانی GWP[۵۸]
۳. تقاضای تجمیعی انرژی ۶۰ CED[۵۹] [۷۸].

از جنبه GWP، ژئوپلیمرها نسبت به بتن سه برابر عملکرد بهتری دارند درحالی‌که تاثیرات آن بر استخراج منابع و مصرف انرژی به یک اندازه بوده است. در زمینه کلینکر سولفوآلومینات کلسیم تنها اطلاعات موجود در رابطه ارزیابی چرخه زیست، سندی تبلیغاتی توسط گروه Italcementi است [۱۲۶]. پتانسیل گرمایش جهانی کلینکر CSA با ۱۸٪ گچ معادل ۷۲۱ eq/ton Kg CO_2 است درحالی‌که در ترکیب با ۳۰٪ گچ این مقدار معادل و ۷۲۱Kg CO_2 eq/ton و ۵۹۹Kg CO_2 eq/ton و در سیمان پرتلند ۸۴۴Kg CO_2 eq/ton می‌باشد.

۵. نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر به بررسی و بحث پیرامون گستره سیمان‌های جایگزین برای کاهش انتشار CO_2 مرتبط با تولید فاز چسب مزبور پرداخته است. این جایگزین‌ها گستره‌ای بین تغییر جزیی مواد خام متداول و سوخت‌ها در تولید سیمان متداول تا جایگزینی کامل کلینکر سیمان با کلینکرنوین مثل سیمان سولفوآلومینات و سیمان منیزیتی را دربر داشت. به‌علاوه ترکیبات مقرون‌به‌صرفه چسب‌ها از جنبه تاثیرات زیست‌محیطی نیز موردتوجه قرار گرفت. هفت جایگزین سیمان در این مطالعه بررسی شد و جایگاه نسبی هریک باسیمان پرتلند متداول بررسی گردید. در کوتاه‌مدت به فناوری‌های پیشرفته و تحقیقات بیشتری نیاز هست تا این سیمان‌های جایگزین پاسخی اساسی به نیازهای واقعی باشند.

چسب‌های جایگزین قرار است که راه‌حل‌های ساده اما امیدوارکننده‌ای برای سیمان پرتلند از جهت هزینه‌های رقابتی در مقیاس صنعتی باشند. پتانسیل چسب‌های نوین تنها زمانی شناخته می‌شود که بررسی‌های دقیق انجام گیرد و ویژگی‌های آن‌ها با کمک فناوری‌های بسیار پیشرفته تعیین گردد. پایه‌گذاری قوانین و استانداردها و تعیین خط‌مشی همراه با آموزش می‌تواند نقش کلیدی در جا افتادن مفهوم سیمان‌های جایگزین داشته باشد.

نهایتا، رویکرد بهبود توسعه پایدار تولید سیمان بستگی به چشم‌انداز برنامه‌ریزی‌های راهبردی و اقتصادی صاحبان صنایع و دولت‌ها دارد. توافق‌های جهانی، فراهم آوردن مشوق‌ها برای گزینه‌های مقرون‌به‌صرفه ممکن(کاهش انتشار CO_2) و گام زدن به‌سوی منافع بلندمدت می‌تواند منجر به توسعه و شناخته شدن با چسب‌های جایگزین شود.

منابع

با توجه به حجم زیاد منابع و مآخذ مورداستفاده در این مقاله که به این شکل [!] در متن مشخص‌شده است، در صورت نیاز به استفاده از منابع، می‌توانید به آدرس اصل مقاله مراجعه نمایید:

htm https://www.mdpi.com/۵۳۷/۲/۱۱/۱۰۵۰-۲۰۷۱/

57 Abiotic depletion potential
58 Global warming potential
59 Cumulative energy demand