

# فرآیند تولید سیمان و تکنولوژی آن

تهیه و تنظیم:

ماهانامه فن‌آوری سیمان



## ۱- مقدمه

بیش از ۱۶۵ سال از شروع مصرف انبوه سیمان پرتلند می‌گذرد و هم اکنون بصورت یکی از مهمترین مصالح ساختمانی درآمده است. تولید و مصرف جهانی این فرآورده در سال ۱۹۸۶ از مرز یک میلیارد تن گذشت و تا سال ۲۰۰۶ رقم ۲ میلیارد تن را پشت سر خواهد گذاشت. این ارقام به مفهوم اینست که سیمان به‌عنوان یک کالای صنعتی بالاترین رقم تولید را در میان تمام کالاهای صنعتی دیگر داراست و جالب اینکه سیمان اولین کالای صنعتی استاندارد شده آن هم در ۱۲۸ سال پیش است.

در قسمت‌های قبلی گفته شد که کلمه سیمان یعنی چسب و منظور از سیمان در مصالح ساختمانی چسبی است که در اثر ترکیب با آب قادر به چسباندن ذرات شن و ماسه (سنگدانه) است و پس از سفت و سخت شدن، در آب حل نمی‌شود. به همین خاطر به این سیمان، سیمان هیدرولیک گفته می‌شود و اساساً از اکسید کلسیم تشکیل شده است و این اکسید با اکسیدهای سلیسیم، آلومینیوم و آهن ترکیب می‌شود و ترکیبات مینرالی یا فازهایی با خاصیت سیمانی را به وجود می‌آورد.

آشنایی بشر با ملات‌ها یا مصالحی که خاصیت هیدرولیکی (میل ترکیبی با آب) دارند، یا به عبارت دیگر ملات‌های آبی که پس از سخت شدن در آب حل نمی‌شوند سابقه چند هزار ساله دارد، اما از حدود ۲۱۰ سال پیش بود که بررسی‌های علمی و سیستماتیک روی

اینگونه ملات‌ها و عوامل اصلی سیمانی بودن آن‌ها شروع شد.

در ابتدای کار از کوره‌هایی مشابه کوره‌های آهک‌پزی برای تولید سیمان استفاده می‌شد و بدلیل استقبال زیاد از این کالای معجزه‌گر، در اواخر قرن نوزدهم کوره‌های دوار ابداع شد و هم اکنون تکنولوژی به حدی رسیده است که با حداقل ممکن انرژی مصرفی و نیروی انسانی کوره‌هایی با ظرفیت ۱۰۰۰۰ تن در روز عرضه می‌شود.

## ۲- ترکیبات سیمان (مواد اولیه برای تولید سیمان)

مواد اصلی به منظور تولید سیمان عبارتند از سنگ آهک و خاک رس (سلیس و آلومین) که در طبیعت به وفور یافت می‌شوند ولی به شکلی نیستند که بتوان مستقیماً در تولید سیمان از آن‌ها استفاده نمود.

سنگ‌های آهکی بیش از ۷۵ درصد  $\text{CaCO}_3$  و سنگ‌های آهکی همراه با خاک رس بین ۷۵-۴۰ درصد  $\text{CaCO}_3$  و خاک‌های آهکی کمتر از ۴۰ درصد  $\text{CaCO}_3$  دارند و از مخلوط این مواد می‌توان مخلوط لازم را برای تهیه سیمان به دست آورد.

### آهک زنده یا اکسید کلسیم ( $\text{CaO}$ )

آهک از مهمترین و اصلی‌ترین مواد مورد استفاده در ساخت سیمان است، اکسید کلسیم از پختن سنگ آهک یا کربنات کلسیم در

را می‌دهد. اکسید آهن زیاد گیرش سیمان را کندتر و رنگ سیمان را نیز تیره می‌کند، به همین دلیل برای ساخت سیمان سفید از این اکسید استفاده نمی‌شود. اکسید آهن جزء اصلی تشکیل دهنده اغلب سنگ آهن‌ها است، از این رو، اکسید فریک کم و بیش در اغلب کانی-ها خصوصاً خاک رس، و در اغلب مواد اولیه ساخت سیمان به طور اجتناب ناپذیر وجود دارد. در سیمان پرتلند تولیدی نیز اکسید مرکب آن به وجود می‌آید که رنگ سیمان را تیره می‌کند. سیمان سفید فاقد اکسید آهن است. به علاوه تولید سیمان فاقد اکسید آهن (سیمان سفید) مشکلاتی را به وجود آورده و هزینه تولید افزایش می‌یابد.

### اکسید منیزیم (MgO)

این اکسید در فرآیند پخت، نقش کمک نوب را ایفا می‌نماید و نباید از مقدار معینی (۵ درصد) بیشتر باشد، زیرا با سایر ترکیبات سیمان ترکیب و وارد فازهای سیمانی نمی‌شود و به صورت آزاد در سیمان باقی می‌ماند. نظر به اینکه MgO پس از گرفتن ملات سیمان خیلی به کندی با آب ترکیب گشته و شکفته می‌شود و این شکستگی منجر به انبساط حجمی می‌گردد. در نتیجه ترک‌های موئی در ملات سیمان و بتن ایجاد می‌شود که در طول زمان باعث تخریب آنها می‌گردد. از این رو میزان MgO در سیمان نباید بیشتر از ۵٪ وزنی آن باشد. شایان ذکر است که کلینکر سیمان یک ماده هیدرولیکی است که حداقل دوسوم آن از کلسیم سیلیکات  $2CaO.SiO_2$  یا  $3CaO.SiO_2$  و بقیه شامل  $3CaO.Al_2O_3$ ،  $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$  و سایر ترکیبات می‌باشد. ضمناً نسبت CaO به  $SiO_2$  باید حداقل ۲ باشد.

### قلیائی‌ها

سدیم (Na)، پتاسیم (K)، در سیمان نقش روانساز دارند، اگر مقدار آنها در سیمان زیاد باشد، تنظیم گیرش مختل می‌گردد، بدین جهت مجموع این دو عنصر نباید از ۱٪ وزن آن بیشتر گردد. مقدار کلر در کلیه سیمان‌ها به جهت نقش تخریبی آن در بتن، بایستی کمتر از ۰/۱۰ درصد وزنی آنها باشد.

مقدار قابل قبول انیدرید سولفوریک ( $SO_3$ ) در سیمان پرتلند و در سیمان‌های روبره‌ای و پوزولانی بستگی به میزان سطح مخصوص (بلین) آنها دارد. اگر سطح مخصوص آنها بین ۲۰۰۰ الی ۴۰۰۰ سانتیمتر مربع بر گرم باشد ۳/۵ درصد وزنی سیمان است و اگر چنانچه سطح ویژه سیمان‌ها بیش از ۴۰۰۰ سانتیمتر مربع گردد، چهار درصد وزنی سیمان است. ضمناً خاطر نشان می‌گردد که سنگ آهن ( $Fe_2O_3$ ) به عنوان کمک نوب به مواد اولیه افزوده می‌گردد.

حرارت حدود هزار درجه سانتیگراد به دست می‌آید. این عمل به طور جداگانه صورت نمی‌گیرد، بلکه در فرآیند تولید سیمان و در موقع حرارت دادن پودر مخلوط آهک و خاک رس ابتدا ذرات آهک (کربنات کلسیم) در حرارت حدود ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد پخته شده و تبدیل به اکسید کلسیم و یا آهک زنده می‌شود. در این گرما آب شیمیایی خاک رس نیز از آن جدا می‌شود. در درجه حرارت بیشتر از ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد، اکسید کلسیم (آهک زنده) با اکسیدهای سیلیسیم، آلومینیوم و آهن ترکیب شده و اکسیدهای مرکب یا فازهای سیمان را تشکیل می‌شوند.

### سیلیس ( $SiO_2$ )

این ماده که در اغلب سنگ‌های طبیعی یافت می‌شود یکی از مواد اصلی در ساخت سیمان پرتلند است. وقتی سیلیس حرارت داده می‌شود در ساختمان کریستالی آن یک سری تغییرات به وجود می‌آید. در کوره سیمان‌پزی در حدود ۱۴۰۰ درجه سانتیگراد سیلیس با آهک ترکیب می‌شود و دو کلسیم سیلیکات و سه کلسیم سیلیکات تشکیل می‌شود. خاک رس معمولی دارای مقادیر زیادی سیلیس است. میزان سیلیس مورد نیاز ۱۷ تا ۲۶ درصد وزن سیمان است و چنانچه نتوان این مقادیر را با استفاده از خاک رس معمولی تامین کرد، می‌توان آن را با استفاده از سایر منابع تامین کرد.

### آلومینا ( $Al_2O_3$ )

آلومینا، همان اکسید آلومینیوم خالص است که مقادیر زیادی از آن در خاک رس وجود دارد. خالص‌ترین نوع خاک رس، کائولینیت ( $Al_2O_3, 2SiO_2, 2H_2O$ ) است که در آن آلومینا حدود ۴۰ درصد وزن مولکولی کل این ماده را دارد. آلومینا در سیمان‌پزی اثر کمک نوب داشته و در هنگام پخت سیمان، درجه زینتر شدن و پخت مواد خام را کاهش می‌دهد. از نظر شیمی سیمان، در اثر حرارت داخل کوره دوار، با آهک ترکیب شده و تشکیل سه کلسیم آلومینات را می‌دهد. وجود این اکسید مرکب در داخل سیمان تولیدی، باعث می‌شود سیمان زودگیرتر شود و در هنگام ترکیب سیمان با آب حرارت بیشتری ایجاد گردد. ملات سیمانی که اکسید سه کلسیم آلومینات آن کمتر از ۵ درصد باشد، در برابر آب دریا و سایر آب‌های سولفات-دار مقاوم است و تخریب نمی‌شود.

### اکسید آهن ( $Fe_2O_3$ )

اکسید فریک نیز همانند آلومینا در سیمان پزی نقش کمک نوب را دارد و باعث کاهش درجه حرارت پخت مواد خام در داخل کوره می‌شود. این اکسید در داخل کوره و در هنگام پخت، به همراه آلومینا با آهک ترکیب شده و تشکیل اکسید مرکب چهار کلسیم آلومینو فریت

۴. چهار کلسیم آلومینو فریت  $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$  یا فریت (ferrite)

همراه با مینرال‌های اصلی فوق ترکیبات دیگری نظیر  $TiO_2$  و  $MgO$  و  $Na_2O$  و  $K_2O$  و برخی اکسیدهای دیگر به مقدار جزئی وجود دارند که به صورت محلول جامد در شبکه کریستالی مینرال‌ها (فازهای) فوق جای گرفته‌اند. خواص سیمان ناشی از ترکیب خواص اجزاء تشکیل دهنده آنست، ولی عمده خواص آن مربوط به ترکیب موسوم به آلایت یا سه کلسیم سیلیکات می‌باشد. وجود ترکیباتی نظیر قلیائی‌ها، آهک ترکیب نشده، اکسید منیزیم و امثال آن، غالباً منشأ اثرات منفی روی خواص سیمان هستند. از جهتی وجود اینگونه ترکیبات باعث می‌شود که نقطه ذوب و پخت مواد خام سیمان پائین بیاید و در نتیجه عمل پختن با سهولت بیشتری صورت گیرد. از جهت دیگر، اینگونه ترکیبات دارای میل ترکیبی زیاد با آب و املاح موجود در آن می‌باشند و در اثر ترکیب با املاح و آب افزایش حجم پیدا می‌کنند. بهمین خاطر وجود آن‌ها باعث پائین آمدن مقاومت شیمیائی سیمان می‌گردد. در سطور بعد برخی خواص فازهای اصلی کلینکر ذکر می‌شود. قبل از ورود به بحث مشخصات فازهای سیمان ذکر این نکته لازم است که به خاطر اختصار و سهولت بیان و نوشتن، اکسیدها و فازهای تشکیل دهنده سیمان را بصورت جدول ۲ نمایش می‌دهند:

### فازهای موجود در سیمان<sup>۱</sup>

#### آلایت ( $C_3S$ ):

معمولاً این ترکیب بصورت خالص در کلینکر وجود ندارد و اغلب همراه با ناخالصی می‌باشد. این ناخالصی متشکل از اکسیدهایی نظیر  $Fe_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$  می‌باشند که درصد آنها در فاز آلایت جمعاً حدود ۲ درصد است. مقادیر هر یک از این اکسیدها در فاز آلایت بستگی به ترکیب کلینکر، درجه حرارت پخت و نحوه سرد کردن کلینکر دارد. وجود این اکسیدها باعث تغییر خواص آلایت می‌گردد و معمولاً مقاومت فشاری آن را بالا می‌برند. در پایین‌تر از حرارت ۱۲۵۰ درجه سانتیگراد، ممکن است سه کلسیم سیلیکات به آهک و دو کلسیم سیلیکات تجزیه شود. این اتفاق در صورتی پیش می‌آید که عمل سرد کردن به آهستگی صورت گیرد. خصوصاً در شرایط احیاء کننده و وجود  $Fe^{+2}$  تجزیه فوق سریعتر صورت می‌گیرد. چه از نظر مقدار (درصد تشکیل دهنده) و چه از نظر تاثیر

همانطور که قبلاً گفته شد سیمان پودری است جاذب آب و چسباننده خرده سنگ (شن و ماسه) که از ترکیب و پختن و گداختن اکسید کلسیم با اکسیدهای نظیر اکسید آلومینیوم، سیلیسیم، آهن، منیزیم و ... بدست می‌آید. با توجه به این تعریف و با توجه به انتظاراتی که از جنبه فیزیکی و کاربردی از سیمان و بتن حاصله مورد نیاز است، ایجاب می‌گردد که انواع و اقسام سیمان‌ها با خصوصیات کاربردی متفاوت ساخته شود. به‌عنوان مثال سیمان نوع یک یا سیمان معمولی دارای کاربرد در ساختمان سازی معمولی است. در ساختن سدهای عظیم و اسکله‌ها که هر آن مورد تهاجم املاح موجود در آب می‌باشند، مصرف این نوع سیمان مصلحت نیست و از این رو از سیمان مخصوص یا سیمان دارای مقاومت شیمیایی بالا استفاده می‌شود. این سیمان علاوه بر دارا بودن مشخصات عمومی سیمان‌ها دارای مشخصه مقاومت شیمیایی در مقابل سولفات‌ها و مواد قلیائی موجود در آب و خاک نیز می‌باشد. با ذکر مجدد این که انواع گوناگون سیمان وجود دارد، به نوعی دیگر که به نام سیمان چاه نفت معروف است و مورد کاربرد در حفاری چاه‌های نفت دارد، اشاره می‌شود. این سیمان علاوه بر دارا بودن مشخصه‌های عمومی سیمان‌ها و مقاومت لازم در مقابل سولفات‌ها و قلیائی‌ها دارای خصوصیات لازم جهت کاربرد در اعماق زمین که درجه حرارت و فشار بیش از حد متعارف است نیز می‌باشد. خوشبختانه با توجه به قدمت هفتاد و پنج ساله صنعت سیمان در ایران، هم اکنون کارخانجات سیمان ایران دارای قابلیت و تجربه لازم برای ساخت انواع سیمان‌ها هستند.

اجزاء اصلی تشکیل دهنده ترکیب سیمان عبارتند از اکسید کلسیم، اکسید سیلیسیم، اکسید آلومینیوم و اکسید آهن. همچنین اکسید منیزیم، اکسید پتاسیم و اکسید سدیم نیز در سیمان وجود دارند که مجموعاً درصد وزنی این اکسیدهای فرعی کمتر از ۵ درصد است. به خاطر وجود درجات حرارت بالا در منطقه پخت کوره، بخشی از این مواد به صورت مذاب در می‌آیند و در نتیجه در چنین محیطی اکسیدهای مذکور با یکدیگر ترکیب می‌گردند و ترکیبات چند تائی (چند اکسیدی) که موسوم به مینرال یا فازهای سیمان هستند پدید می‌آید.

البته آنچه که از کوره خارج می‌شود جسم تیره رنگ دانه دانه ایست که موسوم به کلینکر می‌باشد و اجزاء مینرالی تشکیل دهنده آن عبارتند از:

۱. سه کلسیم سیلیکات  $3CaO \cdot SiO_2$  یا آلایت (Alite)

۲. دو کلسیم سیلیکات  $2CaO \cdot SiO_2$  یا بلیت (Belit)

۳. سه کلسیم آلومینات  $3CaO \cdot Al_2O_3$  یا آلومینات (aluminate)

<sup>۱</sup>C: CaO

S: SiO<sub>2</sub>

A: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

F: Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

روی خواص سیمان، فاز آلایت دارای بیشترین سهم می‌باشد. خصوصاً اثر بارز این ترکیب تاثیر روی مقاومت سیمان است. برای بوجود آمدن این ترکیب بایستی حالت گداختگی (زینتر شدن، Sintering) در منطقه پخت ایجاد شود. این فاز در دیاگرام فازی CaO-SiO<sub>2</sub> قرار دارد.

### بلیت (C<sub>2</sub>S)

بلیت خالص در کلینکر سیمان یافت نمی‌شود و همراه با مقادیری از سایر اکسیدها می‌باشد. این ترکیب در ضمن پختن کلینکر و در حالت جامد تشکیل می‌گردد. در مواقعی که ضریب اشباع آهک (LSF) بالاست، مقادیر خیلی کمی از این ترکیب در کلینکر وجود خواهد داشت. گسترش و افزایش مقاومت بلیت، آهسته است، اما در درازمدت تقریباً به مقاومت آلایت می‌رسد. کریستال بلیت در درجه حرارت معمولی تغییر شکل کریستالی می‌دهد و از فرم معروف به بتا به فرم معروف به گاما تغییر شکل می‌دهد. در ابتدا بلیت بتا در مقایسه با نوع گاما پایدارتر است تغییر شکل کریستالی گاما به مقدار زیادی در کلینکر وجود دارد و نوع گاما دارای خاصیت هیدرولیکی نمی‌باشد. این تغییر شکل همراه با ۱۰ درصد افزایش حجمی کلینکر است. این از هم گسیختگی سریع کلینکر به نام افت کلینکر (Falling) موسوم است. از این تبدیل و افت کیفیت کلینکر می‌توان با اضافه کردن یون‌های خارجی و یا با تسریع در سرد کردن کلینکر جلوگیری کرد. در حال حاضر با توجه به تکنولوژی موجود در صنعت سیمان عملاً مشکل افت کلینکر حذف شده است.

### فاز آلومینات (C<sub>3</sub>A)

فاز آلومینات نیز مشابه دو فاز دیگر به همراه عناصر خارجی می‌باشد. در این فاز، اکسیدهای سدیم و پتاسیم قادرند تا حد ۵ درصد وزنی جای گیرند. خاصیت ترکیبی فاز آلومینات بسیار بالا می‌باشد و با حضور اکسیدهای قلیایی این میل ترکیبی شدیدتر می‌گردد. ترکیباتی از فاز آلومینات با اکسیدهای سدیم و پتاسیم گزارش گردیده است.

بدلیل میل ترکیبی شدید فاز آلومینات با آب و برای جلوگیری از گیرش سریع سیمان، مقداری سنگ گچ (سولفات کلسیم) بعنوان عامل بازدارنده و کند کننده گیرش به سیمان افزوده می‌شود. گرمای هیدراتاسیون فاز آلومینات بسیار بالا می‌باشد و وجود آن در سیمان به همراه آلایت و بلیت باعث افزایش مقاومت اولیه کلینکر می‌گردد. ولی خود به تنهایی دارای خواص هیدرولیکی چندانی نمی‌باشد و روی مقاومت نهایی تاثیر چندانی ندارد.

### فاز فریت (C<sub>4</sub>AF)

فاز فریت دارای ترکیب مشخصی نمی‌باشد و ترکیب آن بستگی به مقدار آلومینیم و آهن موجود در کلینکر دارد. این فاز در محدوده بین C<sub>2</sub>A و C<sub>2</sub>F قرار دارد و می‌تواند شامل هر یک از ترکیبات C<sub>6</sub>AF و C<sub>4</sub>AF و C<sub>6</sub>A<sub>2</sub>F باشد. حدوداً ترکیب فاز فریت در کلینکر سیمان پرتلند نزدیک به C<sub>4</sub>AF است.

در این فاز اکسید عناصر دیگر نیز وجود دارد و رنگ سیمان وابسته به این فاز و مقدار آن می‌باشد. C<sub>2</sub>(AF) خالص دارای رنگ قهوه‌ای، C<sub>2</sub>(AF) به همراه MgO دارای رنگ خاکستری سیر یا سبز می‌باشد. این فاز میل ترکیبی کمی دارد و نقش هیدرولیکی چندانی در سیمان ندارد.

### ترکیبات فرعی

این ترکیبات شامل انواعی از اکسیدها نظیر: قلیائی‌ها، اکسید منیزیم، سولفات‌ها و امثال آن می‌باشد. قلیائی‌ها از جمله ترکیبات فراوان و پراکنده در طبیعت می‌باشند. ولذا از طریق مواد خام وارد فازهای کلینکر می‌گردند. در ضمن عمل پخت، مقدار قابل توجهی از قلیائی‌ها از سیستم پخت خارج می‌شوند. درصد قلیائی‌ها در سیمان در فاصله ۰،۵ تا ۱،۳ درصد است که در سیمانهای دارای قلیائی پائین مقدار قلیائی کل بر مبنای معادل اکسید سدیم باید کمتر از ۰،۶ درصد باشد. اکسید سدیم به صورت محلول جامد و به مقدار حدود ۰،۳ درصد وارد شبکه کریستالی C<sub>3</sub>S می‌شوند. همچنین K<sub>2</sub>O و MgO (آهک آزاد) نیز همانند Na<sub>2</sub>O وارد شبکه کریستالی C<sub>3</sub>S و C<sub>2</sub>S می‌شوند.

سولفات‌ها از طریق مواد اولیه (خاک رس) و سوخت وارد فازهای کلینکر می‌گردند. ترکیبات گوگرد ممکن است به صورت سولفات قلیائی و یا ترکیباتی نظیر 3(CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).CaSO<sub>4</sub> و یا CaSO<sub>4</sub>.2(CaO.SiO<sub>2</sub>) در فازهای کلینکر و به صورت محلول جامد (Solid Solution) وجود داشته باشند. یون‌های سولفات برخلاف یون‌های فسفات باعث تجزیه C<sub>3</sub>S نمی‌شوند، ولی وجود سولفات به همراه آلومینا باعث تجزیه C<sub>3</sub>S بتا می‌شود. وجود MgO در سیمان باعث خنثی کردن اثر آلومینا و سولفات روی تجزیه C<sub>3</sub>S می‌گردد.

اکسید تیتان به مقدار جزئی (۰،۲ تا ۰،۳ درصد) در تمام سیمان‌های پرتلند وجود دارد. در سیمان آلومینائی مقدار آن بالاتر است (۱،۵ تا ۲ درصد). وجود مقادیر کم این اکسید باعث افزایش مقاومت سیمان می‌شود و مقادیر بالای آن (در حد ۴،۵ درصد) باعث افت فشار می‌گردد. اکسید تیتان در کلینکر سرد شده سیمان پرتلند به صورت C<sub>3</sub>T<sub>2</sub> وجود دارد.

در حدود ۰،۲ درصد پنتا کسید فسفر P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> در سیمان‌های پرتلند وجود دارد. وجود اکسید فسفر در سیمان باعث تجزیه C<sub>3</sub>S و تولید

C<sub>2</sub>S و آهک آزاد، می‌گردد. از این رو مقادیر بالای پنتاکسید فسفر (در حدود ۲/۵ درصد)، باعث افت مقاومت سیمان خواهد شد. کریستال‌های ریز و پراکنده پریکلز دارای اثر تخریبی کمتری هستند. در صورتیکه دانه‌های کریستال پریکلز درشت باشد و یا اینکه به صورت مجتمع در گودال‌هایی (Pockets) جمع شده باشند، دارای اثر تخریبی (انبساط حجمی) بیشتری در مقایسه با مقدار وزنی) مشابه کریستال‌های ریز و پراکنده می‌باشند. نکته فوق در مورد آهک آزاد نیز صادق است.

انبساط حجمی آهک آزاد ناشی از آهسته شکفته شدن آن است که همان ترکیب آهک با آب و تشکیل هیدروکسید کلسیم Ca(OH)<sub>2</sub> می‌باشد. این ترکیب دارای حجمی معادل ده برابر حجم آهک تشکیل دهنده آن است. بطور مشابه انبساط حجمی منیزی نیز ناشی از ترکیب آن با آب می‌باشد. فعل و انفعال شکفته شدن آهک آزاد و منیزی در سیمان معرف ناسالم بودن و معیوب بودن سیمان (میزان انبساط ملات یا بتن) است که اصطلاحاً بدان (Unsoundness) می‌گویند.

در جدول ۲ درصد وزنی هر یک از اکسیدهای موجود در فازها و مشخصات عمومی فازهای کلینکر ذکر شده است. غالباً کلینکر سیمان حاوی آهک آزاد و یا CaO ترکیب نشده می‌باشد. وجود آهک می‌تواند به علت وجود یکی از عوامل زیر باشد:

۱. آماده‌سازی مواد خوب انجام نشده باشد: مواد یا زبر است یا اینکه خوب همگن نشده است.

۲. سرعت سرد کردن در خنک‌کن کوره پایین باشد: در نتیجه مقداری از C<sub>3</sub>S یا C<sub>3</sub>A تجزیه شده باشند.

۳. درصد آهک (تیتراسیون) بالا باشد (L.St III > ۱۰۰)

۴. مواد خوب پخته نشده باشد: آهک فرصت ترکیب با سایر اکسیدها را نداشته است.

جدول ۲: درصد وزنی هر یک از اکسیدهای موجود در فازها و مشخصات

عمومی فازهای کلینکر

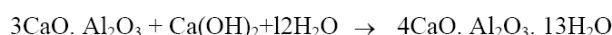
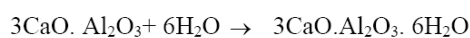
اکسید	فاز آلیت	فاز بلیت	فاز آلومینات	فاز فریت
CaO	۶۹٫۷	۶۳٫۲	۵۹٫۵	۵۱٫۴
SiO <sub>2</sub>	۲۴٫۹	۳۱٫۵	۴٫۲۱	۲٫۲۸
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱٫۱۲	۱٫۸۴	۲۷٫۵۲	۱۹٫۶
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰٫۶۴	۰٫۹۶	۵٫۷۶	۲۲٫۵۲
MgO	۰٫۸۹	۰٫۴۸	۰٫۸۵	۳٫۱۸
K <sub>2</sub> O	۰٫۱۹	۰٫۷۵	۰٫۶۶	-
Na <sub>2</sub> O	۰٫۰۶	۰٫۱۹	۰٫۲۵	-
TiO <sub>2</sub>	۰٫۱۶	۰٫۲۴	۰٫۴۸	۱٫۶
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	۰٫۲۸	-	-

وجود آهک آزاد در سیمان مطلوب نیست و مقدار آن بایستی کمتر از ۲٫۵ درصد باشد. حضور آن باعث انبساط حجمی (ناسالم بودن سیمان) بتن و ملات می‌شود.

همچنین در کلینکر ترکیب MgO (اکسید منیزیم- پریکلز) نیز وجود دارد. این ترکیب معمولاً به صورت محلول جامد وارد شبکه کریستالی سایر فازها می‌شود. درصد مجاز MgO در کلینکر کمتر از ۵ درصد است و بالاتر از این ارقام، مترادف با ناسالم بودن سیمان است. نسبت اکسید منیزیم ترکیب شده با سایر فازها، به اکسید منیزیم حل شده بستگی به ترکیب شیمیایی کلینکر دارد. وجود پریکلز در سیمان باعث ناسالم بودن سیمان و انبساط حجمی (Magnesia Expansion) ملات و بتون می‌گردد.

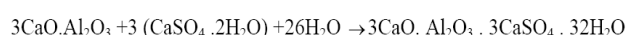
### سنگ گچ

بطوریکه بیان گردید، یکی از مینرال‌های موجود در کلینکر سیمان، فاز سه کلسیم آلومینات (C<sub>3</sub>A) است. این فاز دارای میل ترکیبی شدیدی با آب و آهک هیدراته می‌باشد. بدین صورت:



آهک هیدراته از هیدراته شدن کلسیم سیلیکات‌های موجود در کلینکر (آلیت و بلیت)، حاصل می‌شود. بطوریکه ملاحظه می‌گردد هیدراته شدن سریع C<sub>3</sub>A به معنی جذب مقدار زیادی آب در فاصله زمانی کم است که نتیجه این جذب سریع، گیرش سریع سیمان و سفت شدن آن می‌باشد و در نتیجه در کارهای بنائی و ساختمان فرصت لازم برای کار با ملات یا بتن وجود نخواهد داشت.

عمده‌ترین دلیل افزودن گچ خام به کلینکر سیمان، کنترل گیرش سیمان یا در حقیقت کنترل سرعت هیدراته شدن آلومینات موجود در سیمان می‌باشد. بعبارت دیگر گچ خام نقش به تأخیر انداختن گیرش را بازی می‌کنند. علت آن هم اینست که فاز آلومینات دارای میل ترکیبی با گچ خام است و در حضور گچ خام فعل و انفعال هیدراته شدن به صورت زیر است:



کریستال حاصله در فرمول فوق به نام سه سولفات یا اترینجیت (Ettringite- trisulfate) موسوم است. اولاً این کریستال دارای حجمی معادل ۸ برابر حجم آلومینات اولیه است، ثانیاً کریستالهای آن در مقایسه با کریستالهای آلومینات، بسیار ریزتر و پراکنده‌تر می‌باشند، ثالثاً این کریستال نوظهور به صورت قشر نازکی روی سایر ذرات موجود در سیمان را می‌پوشاند و برای چند ساعت اولیه عمل هیدراتاسیون، مانع از رسیدن سریع آب به سایر ذرات می‌شود،

در نتیجه از سفت شدن سیمان جلوگیری می‌گردد. نقش دیگر لایه نازک کریستال سه سولفات اینست که در برابر لغزش ذرات سیمان ممانعتی ایجاد نمی‌نماید و بلکه عمل لغزش را تسریع می‌کند. این خاصیت بدین معنی است که شکل پذیری و خاصیت پلاستیکی را در سیمان افزایش می‌دهد.

پس از مراحل فوق کریستال‌های اترینجیت به صورت سوزنی شکل (رشته‌ای) شروع به رشد می‌نماید. در نتیجه از حالت غشاء (پوشش ذرات دیگر سیمان) بیرون می‌آید و آب محصور شده در فاصله بین این غشاء و سایر ذرات سیمان، فرصت تماس با سایر ذرات و ترکیب با آن‌ها و در نتیجه هیدراته کردن سایر ذرات را، پیدا می‌کند. از این مرحله به بعد است که گیرش سیمان شروع می‌شود با گذشت زمان کریستال‌های سه سولفات نیز به کریستال‌های یک سولفات تبدیل می‌گردند.

مقدار سولفاتی (گچ خام) که می‌بایستی به سیمان افزوده شود، باید آنچنان باشد که جوابگوی مصرف واکتس مذکور باشد. افزودن مقدار اضافی سولفات دارای عوارض سوئی است که از جمله آن‌ها انبساط حجمی بیش از حد مجاز بتن و ملات سیمان می‌باشد. از این روست که در استانداردهای مختلف مقدار گچ مصرفی متناسب با  $C_3A$  موجود در سیمان است. معمولاً در صد گچی که همراه با کلینکر در آسیاب سیمان مصرف می‌شود بین ۳ تا ۵ درصد است. لازم به ذکر است که سنگ گچ به منظور جلوگیری از گیرش سریع و فوری سیمان و کنترل زمان آن اضافه می‌شود.

## روش‌های تولید سیمان

براساس طبقه‌بندی بین المللی، صنعت سیمان جزء گروه صنایع کانی غیر فلزی محسوب می‌شود. اصولاً سه روش برای تولید سیمان وجود دارد:

۱- روش تر

۲- روش نیمه‌تر

۳- روش خشک

نوع این روش‌ها بستگی به مواد خام ورودی به کوره از نظر غلظت و میزان آب اضافه شده به آن‌ها دارد. مهمترین و پرکاربردترین روش تولید سیمان در جهان روش خشک است. سیستم پخت اکثر کارخانه‌های سیمان کشور ما نیز بر این روش استوار است.

در فرآیند نخست (تر) مواد خام بطور مرطوب و به حالت دوغاب بداخل کوره تغذیه می‌گردد. در فرآیند تولید سیمان به صورت خشک، مواد خام خشک، آسیاب شده و به صورت پودر خشک به درون کوره تغذیه می‌شود. در فرآیند نیمه‌تر مواد خام ابتدا

به صورت خشک آسیاب شده و سپس گرانول یا گویچه‌های حاصل به درون کوره تغذیه می‌شود.

خط تولید سیمان از معدن شروع و به بارگیرخانه و بسته‌بندی سیمان خاتمه می‌یابد. در تولید سیمان به روش خشک نخست مواد خام و اولیه نظیر سنگ آهک، خاک رس، مارل (خاک آهک دار)، سنگ گچ، سنگ آهن و سنگ سیلیس از معادن استخراج می‌گردند. در استخراج موادی نظیر سنگ آهک، سنگ آهن و سنگ گچ ممکن است نیاز به چال‌زنی و ایجاد انفجار بوسیله دینامیت و مواد منفجره باشد. موادی نظیر خاک رس و مارل (خاک آهک دار) نیاز به چال‌زنی و انفجار ندارند و صرفاً از بولدوزرها و یا دستگاه‌های مشابه جهت دپو کردن مواد استفاده می‌شود.

روش‌های مختلفی برای تولید سیمان‌های مختلف وجود دارد که عمدتاً بستگی به تکنولوژی مورد استفاده و جنس سیمان دارد. تکنولوژی مورد استفاده برای تولید سیمان به مرور دستخوش تحول و پیشرفت بوده است. هم‌اکنون صنعت سیمان با برخورداری از آخرین تکنیک‌های اعجاب‌انگیز، با استفاده از روش خشک و به کمک سیستم‌های اتوماتیک، شاهد پیشرفت‌های شگرف در طول تاریخ ۱۶۰ ساله تولید صنعتی خود می‌باشد.

### چهار مرحله اصلی در تولید سیمان وجود دارد (روش خشک):

۱. خرید کردن و آسیاب کردن مواد خام

۲. ترکیب مواد به نسبت مناسب

۳. پخت مخلوط تهیه شده در کوره (سیستم پخت)

۴. آسیاب کردن (نرم‌کردن) محصول پخته شده که به "کلینکر"

معروف است.

## شرح مراحل تولید سیمان:

### مواد اولیه

مواد اولیه مورد استفاده در صنعت سیمان معمولاً سنگ آهک و خاک رس است که پس از استخراج بوسیله کامیون (یا در مواردی بوسیله واگن، کشتی، نوار نقاله و ...) به محل کارخانه و به قسمت سنگ شکن حمل می‌شوند. خاک و سنگ آهک بصورت جداگانه از خرد کن عبور کرده و خرد می‌گردند. در سنگ شکن که مخصوص خرد کردن سنگ‌های تا ابعاد دو متر می‌باشد، سنگ خرد (شکسته) شده و بستگی به نوع سنگ شکن و آسیاب مواد ابعاد آن به کمتر از ۸ سانتیمتر تقلیل می‌یابد. در مواردی سنگ آهک بصورت قلوه سنگ همراه با خاک می‌باشد که باین مخلوط طبیعی آلوویوم یا مارل می‌گویند. در این مورد نیز لازم است که مواد از سنگ شکن عبور نمایند.

## سالن مواد

شود و پس از عبور از پیش گرم کن و کلساینر وارد کوره دوار می-گردد. مواد خام در پیش گرم کن به مرور (در فاصله حدود ۵۰ ثانیه) خشک، گرم و کلسینه می شود. پیش گرمکن دارای دو برج است که در یکی از آنها کلساینر قرار دارد.

مواد پس از تکلیس وارد کوره شده و نهایتاً بصورت دانه های کلینکر از کوره خارج می گردد. سیستم پخت متشکل از پیش گرمکن، کلساینر، کانال هوای سوم، کوره دوار، خنک کن و دستگاه جدا سازی قلیائی (کنار گذر) می باشد. در شکل زیر ارقام و اطلاعات زیادی ارائه شده است و مقادیر مواد، گاز، هوا، سوخت، کلینکر و ... همگی بر مبنای یک کیلوگرم کلینکر می باشند.

مقدار ۱,۶۸ کیلوگرم مواد با درجه حرارت ۵۰ درجه سانتیگراد وارد پیش گرمکن می شود و پس از طی مسیر سیکلون ها، کلساینر، کوره و خنک کن، بصورت کلینکر با وزن یک کیلوگرم و درجه حرارت ۸۰ درجه سانتیگراد خارج می شود. مقدار هوای ورودی به خنک کن ۲,۳ متر مکعب است که ۰,۳۶ متر مکعب آن بعنوان هوای ثانویه، ۰,۵۴ متر مکعب آن بعنوان هوای (میانی-تالشیه) و ۱,۴ متر مکعب آن به صورت هوای اضافی از خنک کن خارج می شود. ۴۰ درصد سوخت مصرفی در مشعل اصلی کوره و ۶۰ درصد آن در کلساینر مصرف می شود. درصد تکلیس مواد در کلساینر ۹۰ درصد است. درجه حرارت کلینکر خروجی از کوره ۱۳۰۰ درجه سانتیگراد، گازهای خروجی از کوره ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد، گاز های خروجی از سیکلون ها بترتیب ۸۷۰ و ۷۵۰ و ۵۵۰ و ۳۵۰ درجه سانتیگراد می باشند. درصد اکسیژن گازهای عقب کوره ۲ درصد است و حاوی مقدار قابل توجهی مواد قلیائی هستند. مقدار ۰,۳۲ متر مکعب از گازهای خروجی از کوره وارد دستگاه جداسازی مواد قلیائی یا کنارگذر (Alkaly Bypass) شده و مقدار ۰,۰۲ کیلوگرم مواد قلیائی از آن جدا می گردد. در این دستگاه ۰,۵۴ متر مکعب هوای محیط برای پائین آوردن درجه حرارت گاز های خروجی از کوره و انجماد بخارات مواد قلیائی استفاده می شود. مقدار گاز های خروجی از پیش گرمکن به سمت آسیاب مواد ۱,۳۴ متر مکعب است و با درجه حرارت ۳۵۰ درجه سانتیگراد حاوی ۰,۱ کیلوگرم مواد برگشتی می باشد.

## خنک کن کلینکر

درجه حرارت کلینکر خروجی از کوره حدود ۱۳۰۰ درجه سانتیگراد است و این مقدار حرارت موجود در کلینکر بوسیله جریان هوای سرد باز یابی می شود. سپس کلینکر خنک شده (تا حدود ۱۰۰ درجه سانتیگراد) راهی انبار کلینکر می گردد. بخشی از هوای گرم شده از طریق کانال هوای سوم بسمت کلساینر می رود و بخشی دیگر وارد کوره می شود و اکسیژن مورد نیاز سوخت را تامین می-

پس از خرد شدن سنگ آهک و آماده شدن خاک، این دو در یک سالن با یکدیگر مخلوط می شوند و یا در دو سالن جداگانه ریخته می شوند و سپس به نسبت لازم قبل از ورود به آسیاب مواد با یکدیگر مخلوط می گردند. ممکن است به مخلوط حاصله مواد اولیه دیگری نظیر سنگ آهن به منظور کمک ذوب یا سنگ سیلیس جهت تصحیح و تنظیم ترکیب شیمیائی مواد برای ساخت سیمان ضد سولفات اضافه شود که این عمل می تواند هم در سالن مواد صورت گیرد و هم اینکه مواد اولیه اصلی در قیف های جداگانه ریخته شوند و سپس به نسبت های لازم از طریق قیف ها و سیستم توزین وارد آسیاب مواد شوند.

آسیاب مواد انواع مختلفی دارد و در خط تولید مورد بحث از نوع گلوله ای می باشد. اصولاً در آسیاب مواد، مواد اولیه خرد شده به نسبت های لازم وارد آسیاب می شوند و سپس بصورت پودر، با رطوبت کمتر از موقع ورود، از آسیاب خارج می گردند. آنچه که از آسیاب مواد خارج می شود بنام مواد خام یا خوراک کوره نیز موسوم است. آسیاب مواد مجهز به کوره هوای گرم برای گرفتن رطوبت مواد می باشد، غالباً از گازهای گرم خروجی از کوره برای این منظور استفاده می شود. این کوره برای مواردی است که کوره اصلی متوقف می باشد.

## غبارگیر

بمنظور خشک کردن و جابجائی مواد در آسیاب مواد از گازهای خروجی از کوره استفاده می شود. این گازها پس از انتقال مواد از آسیاب وارد الکتروفیلتر گشته و ذرات مواد و گرد و غبار از آن جدا می گردد و سپس از طریق دودکش به خارج (محیط اطراف) فرستاده می شود.

## سیلوهای ذخیره مواد

مواد پودر شده پس از خروج از آسیاب، وارد سیلوهای مخلوط کن و ذخیره سازی می شود و پس از نمونه گیری و آزمایشات لازمه توسط آزمایشگاه و اطمینان از تنظیم بودن و متناسب بودن ترکیب مواد خام، هموژن می گردد و سپس به سیلوهای ذخیره خوراک فرستاده می شود. در خط تولید مورد بحث فقط یک سیلو از نوع جریان پیوسته به ظرفیت ۲۵۰۰۰ تن منظور شده است. در این قسمت مواد ذخیره شده آماده مصرف در کوره می باشد.

## کوره و پیش گرمکن

مواد خام از قسمت بالای پیش گرم کن وارد سیستم پخت می-

کند نمونه خنک کن (مشبک) گریت را در شکل زیر می‌بینید.

## تصاویر بخشهای مختلف خط تولید



واحد هفتم سیمان تهران (با ظرفیت ۲۰۰۰ تن در روز)



دپارتمان آسیاب سنگ

### فرد کن و قیف سنگ گچ

به کلینکر خروجی از کوره حدود ۴ درصد سنگ گچ افزوده می‌شود و سپس در آسیاب سیمان پودر می‌گردند. قبلاً سنگ گچ (گچ خام) درخرد کن جداگانه‌ای به اندازه های کمتر از ۴ سانتیمتر خرد شده و سپس در قیف مربوطه ذخیره شده است. سرعت ترکیب پودر کلینکر با آب بسیار شدید است و بهمین خاطر از سنگ گچ برای کنترل این ترکیب و گیرش سیمان استفاده می‌شود.

### آسیاب سیمان

از طریق دو نوار تغذیه مجهز به سیستم توزین، سنگ گچ خرد شده و کلینکر وارد آسیاب سیمان گلوله‌ای می‌شوند و پس از پودر شدن، پودر حاصله (سیمان) از طریق بالابر کاسه ای و هوایی (الواتور و ایرلیفت) به سیلوهای ذخیره سیمان فرستاده می‌شود. در دهه اخیر استفاده از آسیاب های غلتکی برای پودر کردن کلینکر و تولید سیمان مرسوم شده است؛ از جمله در پروژه های سیمان تهران و فراز فیروز کوه برای دپارتمان آسیاب سیمان، آسیاب‌های غلتکی خریداری شده است.

### سیلوهای سیمان و بارگیرخانه

با توجه به ظرفیت تولید کارخانه تعدادی سیلوی بتونی جهت ذخیره سیمان در نظر گرفته می‌شود. سپس سیمان بکمک دستگاههای بارگیری سیمان فله یا بسته‌بندی و پر شدن در کیسه بارگیری شده و از کارخانه صادر می‌گردد. وسیله حمل سیمان از کارخانه می‌تواند کامیون، واگن، قطار و یا کشتی باشد. چگونگی حمل بستگی به موقعیت کارخانه و محل مصرف دارد.



داخل کوره دوار قبل از نسوزکاری



کوره دوار



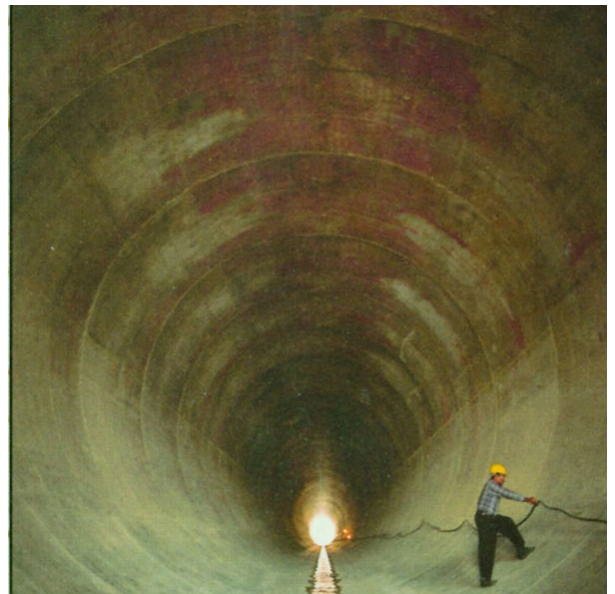
سالن هموژنیزاسیون مواد



برج پیش گرمکن



سالن هموژنیزاسیون مواد





غبارگیر از نوع الکتروفیلتر به همراه فن و دودکش



تجهیزات اتاق کنترل



مخازن سوخت



دپارتمان آسیاب سیمان (غلتکی)



دپارتمان آسیاب سیمان (گلوله‌ای)



بارگیری سیمان پاکتی

