

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ



دانشگاه تربیت مدرس تهران

## انواع سیمان

معرفی سیمان سنگ آهک - رس کلسینه

مؤلفین

دکتر امیر طریقت

(عضو هیأت علمی دانشگاه تربیت مدرس شهید رجائی)

مهندس فاطمه ارباب

|                         |  |
|-------------------------|--|
| سرشناسه                 | : طریقت، امیر، ۱۳۴۵ -  |
| عنوان و نام پدیدآور     | : انواع سیمان: معرفی سیمان سنگ آهک - رس کلسینه/مولفین امیر طریقت، فاطمه ارباب. |
| مشخصات نشر              | : تهران: دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، ۱۴۰۰.                                  |
| مشخصات ظاهری            | : ۱۷۴ ص: مصور (بخشی رنگی)، نمودار (بخشی رنگی).                                 |
| شابک                    | : ۹۷۸-۶۲۲-۶۵۸۹-۱۷-۸  |
| وضعیت فهرست نویسی       | : فیبا   |
| یادداشت                 | : واژه‌نامه.   |
| یادداشت                 | : کتابنامه: ص. [۱۴۱]-۱۵۲.  |
| یادداشت                 | : نمایه.   |
| عنوان دیگر              | : معرفی سیمان سنگ آهک - رس کلسینه.   |
| موضوع                   | : سیمان  |
| موضوع                   | : Cement   |
| موضوع                   | : خاک رس   |
| موضوع                   | : Clay   |
| موضوع                   | : سنگ معدن رسی   |
| موضوع                   | : Clay minerals  |
| شناسه افزوده            | : ارباب، فاطمه، ۱۳۷۰-  |
| شناسه افزوده            | : دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی  |
| شناسه افزوده            | : Shahid Rajaee Teacher Training University                                    |
| رده بندی کنگره          | : TP۸۸۱  |
| رده بندی دیویی          | : ۹۴/۶۶۶   |
| شماره کتابشناسی ملی     | : ۸۴۲۷۵۰۰  |
| اطلاعات رکورد کتابشناسی | : فیبا   |



دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

|                        |   |
|------------------------|---|
| عنوان                  | : انواع سیمان معرفی سیمان سنگ آهک- رس کلسینه                                      |
| مؤلفین                 | : دکتر امیر طریقت، عضو هیأت علمی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی/ مهندس فاطمه ارباب |
| ویراستار ادبی          | : دکتر ساغر سلمانی نژاد مهرآبادی  |
| نوبت چاپ               | : اول- زمستان ۱۴۰۰  |
| انتشارات               | : دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی   |
| لیتوگرافی، چاپ         | : رجاء نقشینه، شریف   |
| طراح جلد               | : عباس مرادی  |
| ناظر چاپ               | : محمد معتمدی نژاد  |
| کارشناس چاپ و صفحه‌آرا | : نیره فیروزی   |
| شمارگان                | : ۱۰۰ جلد   |
| قیمت                   | : ۶۰۰.۰۰۰ ریال  |
| شابک                   | : ۹۷۸-۶۲۲-۶۵۸۹-۱۷-۸   |
|                        | : ISBN: 978-622-6589-17-8   |

کلیه حقوق این اثر برای مؤلفان و دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی محفوظ است.  
 نشانی: تهران، لویزان، کد پستی ۱۵۸۱۱-۱۶۷۸۸، صندوق پستی ۱۶۳ - ۱۶۷۸۵، تلفن: (۲۶۳۲) ۹ - ۰۶۰ ۲۲۹۷۰۰۶۰، ۰۷۰ ۲۲۹۷۰۰۷۰، تلفکس: ۰۴۲ ۲۲۹۷۰۰۴۲، پست الکترونیکی: [publish@sru.ac.ir](mailto:publish@sru.ac.ir)، وبسایت: <http://publish.sru.ac.ir>

## مقدمه مؤلفین

سپاس ایزد منان را که در سال‌های متمادی لطف خود را از نویسندگان این کتاب دریغ نکرده و به ما انگیزه‌ای دوچندان داده است تا با تألیف کتاب آموزشی در شاخه مهندسی عمران، قدمی هرچند کوچک برای موفقیت شما مهندسين عزیز برداریم.

یکی از نمودهای بارز توسعه و پیشرفت در هر کشور، رشد اقتصادی ناشی از فعالیت صنایع مختلف است. صنعت سیمان به عنوان یکی از هفت صنعت استراتژیک، از صنایع بسیار مهم و تأثیرگذار در توسعه و رشد صنعتی کشور محسوب می‌شود. در جهان امروز، سیمان از اصلی‌ترین مصالح ساختمانی و پیش‌نیاز برنامه‌های ساخت‌وساز و توسعه است. صنعت سیمان در افق ۱۴۰۴ با ظرفیت تولید سالیانه ۱۲۰ میلیون تن و رتبه اول در صادرات جهانی و ظرفیت تولید در منطقه ترسیم شده است. بر اساس چشم‌انداز ترسیم‌شده، دستیابی به ارتقای بهره‌وری، افزایش توان رقابت‌پذیری، بهینه‌سازی مصرف انرژی و آب، تکمیل زنجیره ارزش و توسعه صنایع پائین‌دستی، ارتقای سطح کیفیت و استاندارد محصولات در سطح جهانی، دستیابی به شاخص‌های استاندارد زیست‌محیطی به‌عنوان اهداف کلی در این برنامه پیش‌بینی شده است. برای رسیدن به اهداف ذکر شده باید شناخت دقیقی از انواع سیمان وجود داشته باشد تا با انتخاب بهترین نوع سیمان و کمک به تولید آن گامی مهم در رشد و توسعه کشور برداشت.

گسترده‌گی و در دسترس بودن و هزینه کم استفاده از سیمان باعث استفاده فراگیر از سیمان شده و حدود ۵ تا ۸ درصد از انتشار گاز دی‌اکسید کربن را به خود اختصاص دهد. یکی از استراتژی‌های تثبیت‌شده برای کاهش انتشار دی‌اکسید کربن در تولید سیمان، کاهش مقدار کلینکر است که از طریق استفاده از مواد سیمانی مکمل به‌عنوان جایگزین کلینکر به دست آید. سیمان سنگ‌آهک-رس کلسینه ( $LC^2$ ) از جایگزینی ۵۰ درصد کلینکر با رس کلسینه شده، سنگ‌آهک و گچ تهیه می‌شود. این سیمان از لحاظ زیست‌محیطی، هزینه، مصرف انرژی، خواص مکانیکی و دوام، عملکرد بهتری نسبت به سایر انواع سیمان دارد.

با توجه به اینکه تاکنون کتابی به جزئیات ساخت سیمان LC<sup>3</sup> نپرداخته و تحقیقات و مطالعات انجام شده نوید جایگزینی سیمان LC<sup>3</sup> را با سیمان پرتلند در آینده نزدیک می‌دهد، لزوم ارتقای دانش مهندسين، پژوهشگران و دانشجویان در شناخت این سیمان آشکار می‌شود. این کتاب در دو قسمت تألیف شده است. در قسمت اول ابتدا ویژگی‌های سیمان پرتلند، سپس چالش‌های صنعت سیمان در ساخت انواع سیمان از لحاظ انتشار دی‌اکسید کربن، دسترسی به منابع، شرایط اقتصادی و کیفیت بتن ساخته شده با این سیمان‌ها مطرح و سپس به معرفی سیمان LC<sup>3</sup> پرداخته شده است. کشور عزیز ما ایران پتانسیل ساخت این سیمان را دارد. علاوه بر این تولید سیمان LC<sup>3</sup> با توجه به مزایایی که نسبت به سایر انواع سیمان دارد، به دست‌یابی هر چه سریع‌تر اهداف افق ۱۴۰۴ صنعت سیمان کمک شایانی می‌کند. سعی بر آن شده است که این سیمان از لحاظ شرایط خردایش، هیدراتاسیون، خواص مکانیکی، دوام، هزینه تولید و ملاحظات زیست‌محیطی، تولید سیمان و دسترسی به رس کائولینیت و سنگ‌آهک در ایران و پیشرفت LC<sup>3</sup> در دنیا بررسی شود. از آنجا که نوع رس مورد استفاده در LC<sup>3</sup> نقش مهمی در عملکرد این نوع سیمان از جنبه مقاومت و دوام دارد، در قسمت دوم کتاب به شناخت انواع رس، ویژگی‌ها و واکنش‌پذیری آن‌ها نیز پرداخته شده است.

کتاب حاضر برای افرادی تهیه شده که آشنایی کلی با اصول اساسی تولید سیمان و شیمی آن را دارند. امید است این اثر، منبعی مفید برای دانشجویان، پژوهشگران و کارخانه‌های تولید سیمان در شناخت سیمان LC<sup>3</sup>، چالش‌های صنعت بتن در استفاده از انواع دیگر سیمان و همچنین انتخاب آگاهانه نوع رس مورد نیاز برای این نوع سیمان باشد. هیچ کتابی خالی از اشکال نیست، لذا از خوانندگان محترم خواهشمندیم کلیه اشکالات علمی و ویرایشی را به آدرس الکترونیکی [tarighat@sruc.ac.ir](mailto:tarighat@sruc.ac.ir) ارسال نمایند تا در چاپ‌های بعدی مدنظر قرار گیرند.

با سپاس

دکتر امیر طریقت

مهندس فاطمه ارباب

## فهرست مطالب

### بخش اول

#### انواع سیمان و معرفی سیمان سنگ آهک-رس کلسینه ( $LC^3$ )

| صفحه |  |
|------|--|
| ۳    | <b>فصل اول: سیمان پرتلند</b>                   |
| ۵    | ۱- مقدمه                                       |
| ۵    | ۱-۱- تاریخچه سیمان                             |
| ۹    | ۱-۲- ترکیبات شیمیایی و کانی‌شناسی سیمان پرتلند |
| ۱۲   | ۱-۲-۱- ترکیبات اصلی سیمان پرتلند               |
| ۱۲   | ۱-۳- کلینکر سیمان پرتلند                       |
| ۱۳   | ۱-۴- انواع سیمان پرتلند                        |
| ۱۴   | ۱-۵- هیدراتاسیون سیمان پرتلند                  |
| ۲۱   | ۱-۶- خصوصیات خمیر سیمان تازه و سخت شده         |
| ۲۱   | ۱-۷- گیرش: تعاریف و عوامل مؤثر                 |
| ۲۴   | ۱-۸- تأثیر خمیر سیمان بر خصوصیات بتن           |
| ۲۷   | <b>فصل دوم: چالش‌های صنعت بتن</b>              |
| ۲۹   | ۲- مقدمه                                       |
| ۳۰   | ۲-۱- محدودیت‌های عناصر شیمیایی در تولید سیمان  |
| ۳۳   | ۲-۲- کلینکرهای جایگزین برای تولید سیمان        |

|    |  |
|----|--|
| ۳۴ | ۱-۲-۲ کلینکرهای سیمانی پرتلند غنی از بلایت                             |
| ۳۴ | ۲-۲-۲ کلینکرهای بلایتی حاوی یئولمیت (CSA)                              |
| ۳۵ | ۳-۲-۲ سیمان‌های آلومینات کلسیم (CAC)                                   |
| ۳۶ | ۴-۲-۲ سیمان‌های حاوی منیزیم  |
| ۳۶ | ۵-۲-۲ سیمان‌های سخت شونده تحت اثر کربناتاسیون                          |
| ۳۷ | ۳-۲ توسعه جایگزینی کلینکر با استفاده از مواد معدنی یا مواد مکمل سیمانی |
| ۳۸ | ۱-۳-۲ پوزولان‌های طبیعی  |
| ۴۳ | ۲-۳-۲ سرباره کوره آهن‌گدازی  |
| ۴۵ | ۳-۳-۲ خاکستر بادی  |
| ۴۶ | ۴-۳-۲ خاکستر ضایعات کشاورزی  |
| ۴۶ | ۵-۳-۲ فیلرها به‌عنوان مواد مکمل سیمانی                                 |
| ۴۸ | ۴-۲ مواد فعال شده پایه قلیا  |
| ۵۰ | ۱-۴-۲ رس‌های کلسینه شده  |
| ۵۲ | ۵-۲ محدودیت‌های مقدار جایگزینی کلینکر                                  |
| ۵۴ | ۶-۲ نیازهای تحقیقاتی   |
| ۵۶ | ۷-۲ استانداردسازی  |

### فصل سوم: سیمان سنگ آهک - رس کلسینه (LC<sup>۳</sup>)

|    |   |
|----|---|
| ۶۱ | ۳ مقدمه   |
| ۶۲ | ۱-۳ سیمان LC <sup>۳</sup>   |
| ۶۳ | ۲-۳ خردایش مناسب مواد LC <sup>۳</sup>                                       |
| ۶۶ | ۳-۳ هیدراتاسیون   |
| ۷۰ | ۴-۳ مقاومت فشاری-مقاومت خمشی و ضریب ارتجاعی                                 |
| ۷۹ | ۵-۳ خزش و جمع شدگی  |
| ۸۲ | ۶-۳ دوام  |
| ۹۳ | ۷-۳ استانداردسازی   |
| ۹۳ | ۸-۳ رویکردی بر هزینه و ملاحظات زیست‌محیطی LC <sup>۳</sup>                   |
| ۹۷ | ۹-۳ تولید سیمان LC <sup>۳</sup> و دسترسی به رس کائولینیت و سنگ آهک در ایران |

۱۰۲ ۳-۱۰ پیشرفت تولید سیمان LC<sup>۳</sup> در دنیا

### بخش دوم

### رس‌های کلسینه شده به‌عنوان مواد مکمل سیمانی (SCMs)

#### فصل چهارم: رس‌ها و اجزای تشکیل‌دهنده آن‌ها

|     |                        |
|-----|------------------------|
| ۱۰۷ | ۴ مقدمه                |
| ۱۰۹ | ۴-۱ تعریف رس           |
| ۱۱۳ | ۴-۲ اجزای سازنده رس‌ها |
| ۱۱۶ | ۴-۳ کانی‌های رس        |
| ۱۱۸ | ۴-۴ مواد معدنی همراه   |
| ۱۱۹ | ۴-۵ فاز همراه          |

#### فصل پنجم: ساختار داخلی کانی‌های رسی

|     |                          |
|-----|--------------------------|
| ۱۲۱ | ۵ مقدمه                  |
| ۱۲۳ | ۵-۱ طبقه سیلیکات‌ها      |
| ۱۲۵ | ۵-۲ زیر طبقه فیلوسیلیکات |

#### فصل ششم: رس کائولینیت به‌عنوان ماده مکمل سیمانی

|     |  |
|-----|--|
| ۱۳۱ | ۶ مقدمه                                    |
| ۱۳۳ | ۶-۱ واکنش‌پذیری و فرآیند کلسیناسیون خاک رس |

#### منابع

#### واژه‌نامه‌ها

|     |                         |
|-----|-------------------------|
| ۱۳۹ | واژه‌نامه فارسی-انگلیسی |
| ۱۵۵ | واژه‌نامه انگلیسی-فارسی |

#### نمایه

۱۶۳





## بخش اول

### انواع سیمان و معرفی سیمان سنگ آهک-رس کلسینه (LC<sup>3</sup>)

Limestone  
Calcined  
Clay  
Cement

LC<sup>3</sup>





**فصل اول**

**سیمان پرتلند**



## مقدمه

انواع سیمان، به معنای کلی، مواد چسبنده‌ای هستند که قادر به اتصال قطعات، اجزاء و یا ذرات ماده جامد به همدیگر بوده و باعث تولید جسم جامد مرکب و یکپارچه می‌شود. این تعریف طیف گسترده‌ای از مواد را در برمی‌گیرد، اما برای اهداف مهندسی عموماً به «سیمان‌های آهکی» محدود می‌شود، یعنی سیمان‌هایی که حاوی ترکیبات آهک به‌عنوان ماده اصلی تشکیل‌دهنده هستند. انواع سیمان را می‌توان به دو گروه طبقه‌بندی کرد.

(۱) سیمان‌های غیر هیدرولیکی دسته‌ای هستند که یا قادر به گیرش و سخت شدن در آب نبوده (به عنوان مثال آهک غیر هیدرولیکی) و یا در آب پایدار نیستند (به عنوان مثال گچ).  
(۲) سیمان‌های هیدرولیکی قادر به گیرش و سخت شدن در آب هستند و محصول جامد و سختی را تشکیل می‌دهند که در آب پایدار است. سیمان پرتلند مهم‌ترین و پرکاربردترین سیمان هیدرولیکی است.

## ۱-۱ تاریخچه سیمان

سیمان به‌عنوان ماده چسبنده‌ای که قادر به یکپارچه کردن و به هم چسباندن ذرات یا مواد جامد به صورت جسمی متراکم باشد، تعریف می‌شود. چنین تعریفی شامل تعداد زیادی از مواد بسیار متفاوت است که اشتراکات کمی با یکدیگر دارند، اما خاصیت چسبندگی در آن‌ها وجود دارد و این تفاوت‌ها باعث شده است که محدودیت در تعیین یک گروه از مواد چسبنده، یعنی مواد خمیری که برای ایجاد چسبندگی بین سنگ‌ها، آجرها و غیره در ساخت ساختمان‌ها و کارهای مهندسی استفاده می‌شود، ایجاد شود. از آنجاکه این مواد حاوی ترکیبات آهک به‌عنوان اجزای اصلی خود هستند، اصطلاح سیمان معادل با سیمان‌های آهکی می‌باشد.

آهک به اشکال طبیعی وجود دارد و برای چند هزار سال گچ و سنگ‌های آهکی مختلف کلسینه شده‌اند تا مجموعه‌ای از مصالح ساختمانی مناسب و با کیفیت برای تولید سیمان حاصل گردد. با این حال، در کاربردهای مدرن، باید بین آهک‌های خالص و هیدرولیکی، گچ و سیمان‌های قوی‌تر و سخت‌تر که حاوی نسبت بیشتری از مواد سیلیسی هستند، تفاوت قائل شد، اگرچه تا انقلاب صنعتی چنین تمایزی وجود نداشت.

نویسندگان متعددی در مورد استفاده از چسباننده‌های سیمانی به سوابق تاریخی دست یافته‌اند. اطلاق انواع گزارش شده به عنوان سیمان به یک تعریف سازگار از سیمان بستگی دارد، اما موارد زیر به عنوان مثال قابل ذکر است. ساختمان مذهبی در گوبکلی تپه<sup>۱</sup> در آناتولی<sup>۲</sup>، ساخته شده در ۱۲۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ سال قبل از میلاد مسیح، ستون‌های موجود در کف موزاییک سیمانی مرمینما از سنگ آهک سوخته و خاک رس ساخته شده بودند و در مثالی دیگر شهر کاتال هایوک<sup>۳</sup> در ۹۰۰۰ سال قبل از میلاد، از گچ به عنوان نقاشی‌های دیواری تزئینی استفاده شده است. در یفتاح<sup>۴</sup> در شهر جلیل، یک کفی بتنی از دولایه ۳۰-۶۰ میلی متری در سال ۱۹۸۵ کشف شد که مربوط به ۷۰۰۰ قبل از میلاد بوده است. چسباننده آن، آهک زنده بوده و از سوزاندن سنگ آهک در کوره در دمای ۸۵۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد تهیه و با سنگ و آب مخلوط شده است. این مورد نمونه‌ای است از فرآیند تولید پیشرفته شامل خرد کردن سنگ آهک تا ساخت کوره و مدیریت دما. تجزیه و تحلیل شیمیایی، ترکیبی از کربنات کلسیم و مقدار کمی سیلیس را نشان داده و نتایج آزمایش نمونه مکعبی مقاومت ۳۴ مگا پاسکال را در لایه پایین و ۴۵ مگا پاسکال را برای لایه فوقانی گزارش می‌دهد. تولید مواد سیمانی در مصر باستان از اوایل هزاره چهارم قبل از میلاد مسیح، زمانی که از ملات به عنوان لایه زیرین برای ساختمان‌های بنایی استفاده می‌شد، آغاز گشت. سنگ آهک در دره نیل فراوان بود، اما سوخت لازم برای رسیدن به دمای ۸۵۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد در دسترس نبود. به همین دلیل، مصریان باستان از گچ ناخالص (CaSO<sub>۴</sub>) استفاده می‌کردند. این ماده هنگام سوزاندن در دمای پایین‌تر از ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد به راحتی حاصل شده و همی‌هیدرات (نیم‌هیدرات) تشکیل می‌دهد. اولین سیمان مصری در دوره باستان گچ بود. گچ‌ها و سیمان‌های ساخته شده از گچ، از مقاومت کافی برخوردار

<sup>۱</sup> Gobekli Tepe

<sup>۲</sup> Anatolia

<sup>۳</sup> Catal Hayuk

<sup>۴</sup> Yiftah

بودند، اما از آنجاکه در آب قابل حل بوده، دوام کمی داشتند. باین حال، در آب و هوای گرم و خشک مصر، استفاده از این نوع سیمان در عمل هیچ ضرری نداشت و تا دوره روم با موفقیت استفاده می شد. با توجه به بحث جدال برانگیز دکتر جوزف دویدوویتس<sup>۱</sup> در دهه ۱۹۸۰، مهارت مصریان در تولید بتن آهکی-ژئوپلیمری برای ساخت اهرام بزرگ در شهر جیزه، به جای بنای سنگی اهرام بوده است.

یونانی ها و رومی ها به خصوصیات برخی کانسارهای آتش فشانی آگاهی داشتند. آن ها کانسارها را پودر کرده و با آهک و ماسه مخلوط می کردند. ملات ساخته شده نه تنها مقاومت بیشتری داشت، بلکه از دوام بالاتری در برابر نفوذ آب و همچنین آب دریا برخوردار بود. یونانیان برای این منظور از توف آتش فشانی از جزیره سانتورینی<sup>۲</sup> و رومی ها از مواد خام و توف متفاوت از خلیج ناپل<sup>۳</sup> استفاده می کردند. منشأ بهترین مواد در شهر پوزولی<sup>۴</sup> کشور ایتالیا (پوتئولی<sup>۵</sup>) بود که پوزولان<sup>۶</sup> نامیده شد. ویتروویوس<sup>۷</sup> در این باره می نویسد: نوعی ماسه وجود دارد که در حالت طبیعی دارای خصوصیات فوق العاده ای است و در خلیجی در مجاورت کوه وزوویوس<sup>۸</sup> کشف شده که با آهک و سنگ شکسته مخلوط و همچنین در اختلاط با آب برای ساخت ساختمان های معمولی سخت می شود. احتمالاً مدت ها پیش رومی ها شروع به استفاده از توف راین<sup>۹</sup> کردند که به تراس<sup>۱۰</sup> معروف است. لیا<sup>۱۱</sup> اظهار داشت که نام سیمان در زبان های متأخر - لاتین یا قدیم - فرانسوی برای اولین بار برای تعیین موادی استفاده شد که اکنون پوزولان های مصنوعی نامیده می شوند [۱]. نام سیمان هیدرولیک را مدیون رومیان هستیم، زیرا آن ها چسباننده های سخت شونده ی به کمک واکنش با آب را تعریف کردند [۲]. همچنین بعضی از مواد آمیخته برای تعریف ترکیب آن ها، سیمان های پوزولانی نامیده می شدند.

شواهدی وجود دارد که نشان می دهد در حال حاضر در ساختمان های ساخته شده در تمدن

<sup>۱</sup> Dr. Joseph Davidovits

<sup>۲</sup> Santorin

<sup>۳</sup> Neapolitan

<sup>۴</sup> Pozzuoli

<sup>۵</sup> Puteoli

<sup>۶</sup> Pozzolana

<sup>۷</sup> Vitruvius

<sup>۸</sup> Vesuvius

<sup>۹</sup> Rheine

<sup>۱۰</sup> Trass

<sup>۱۱</sup> Lea