

## مروری بر سازه بتنی و کاربردهای آن

حسن صفرزاده<sup>۱\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۲ تاریخ چاپ: ۱۴۰۱/۰۳/۲۷

### چکیده

سالهاسست دردنیابتن مقاومت بالا درمقیاس وسیع به کارگرفته میشود شناخت تاریخچه بتن مقاومت بالا و روند گسترش کاربرد و نیز موارد عمومی استفاده ازآن به پی بردن پتانسیل کاربرد بتن مقاومت بالا درایران کمک می کند دراین مطالعه کاربردهای بتن مقاومت بالا و مزیت آن نسبت به بتن معمولی سنجیده شده است مشکلات موجود درراه ساخت و کاربرد بتن مقاومت بالا و ساخت سازه های موردنظر مشتمل برمشکلات مربوط به مشاغل و ذینفعان صنعت بتن کشور طراحی سازه مشکلات موجود درتامین مصالح تشکیل دهنده مشکلات مربوط به طرح مخلوط ومشکلات موجود دراجرا و بهره برداری مطرح و تشریح گردید درپایان پس ازشناخت موانع ومشکلات راه کارهایی جهت فرار ازاین بن بست پیشنهاد گردید.

### واژگان کلیدی

سازه، بتن، شهرداری

۱. کارشناس ارشد عمران (safaramir\_1391@yahoo.com).

## مقدمه

سال ها قبل، انسان به این کشف مهم و ارزنده نائل آمد و دریافت که وقتی مواد سیلیسی بسیار ریز با آهک مخلوط می شود، سیمان های دارای خواص هیدرولیکی تولید می نماید. یک نوع از این مواد، خاکستر آتشفشانی تحکیم یافته یا توف بود که در حوالی پوزولی ایتالیا پیدا شد. پس از آن، واژه پوزولان به هر نوع ماده ای با خاصیت مشابه فوق صرف نظر از منشأ زمین شناسی آن، اطلاق گردید.

ASTM-C618 پوزولان را به این صورت تعریف می کند: «ماده سیلیسی یا سیلیسی آلومیناتی که به خودی خود ارزش چسبندگی ندارد، اما به شکل ذرات بسیار ریز و در مجاورت رطوبت با درجات حرارت معمولی با هیدروکسید کلسیم واکنش شیمیایی داشته و ترکیباتی را به وجود می آورد که خاصیت سیمانی و چسبندگی دارد.» بنابراین، پوزولان یک ماده طبیعی یا مصنوعی است که حاوی سیلیس فعال است. لازم است که ماده پوزولانی به شکل پودر شده باشد، زیرا فقط در این صورت سیلیس می تواند در حضور آب با آهک (که بر اثر هیدراتاسیون سیمان پرتلند ایجاد می گردد) سیلیکات های کلسیم پایدار را که دارای خواص چسبندگی اند، تشکیل دهند. ضمناً در بررسی کلی پوزولون ها باید متذکر شد که سیلیس آنها باید بی شکل (آمورف) باشد، زیرا قابلیت ایجاد واکنش سیلیس متبلور بسیار کم است. سیمان پرتلند پوزولانی به مخلوط های توأم آسیاب شده یا مخلوط شده سیمان پرتلند و مواد پوزولانی اطلاق می گردد. غالباً مواد پوزولانی از سیمان پرتلندی که جایگزین آن می شوند ارزانترند.

ولی امتیاز عمده آنها در هیدراتاسیون کند و بنابراین، روند توسعه حرارت کم نهفته است. در ساختمان های انبوه بتنی این امر اهمیت زیادی دارد و دقیقاً در این نوع ساختمان هاست که غالباً سیمان پرتلند پوزولانی با جایگزینی بخشی از سیمان پرتلند با مواد پوزولانی مصرف می شود. همچنین سیمان های پرتلند پوزولانی در برابر حمله سولفات ها و بعضی دیگر از عوامل مخرب مقاومت خوبی از خود نشان می دهند. این امر به دلیل واکنش پوزولانی است که مقدار کمتری آهک به جا می گذارد تا به خارج راه یابد و نیز نفوذپذیری بتن را کاهش می دهد. لیکن مقاومت در برابر یخ زدن و آب شدن تا سنین بعدی که واکنش عمده پوزولانی تخلخل خمیر سیمان را کاهش داده است، نمی تواند ایجاد شود. باید به خاطر داشت که آثار خوب و بد مواد پوزولانی بسیار متغیرند و بدین جهت توصیه می شود که هر ماده پوزولانی آزمایش نشده ای در ترکیب با سیمان و سنگدانه هایی که در ساختمان واقعی مصرف خواهند شد، مورد آزمایش قرار گیرد. به علت کنش آهسته پوزولان ها باید عمل آوردن پیوسته مرطوب و دمای عمل آوردن مناسب برای مدتی بیشتر از آنچه به طور معمول لازم است، فراهم شود.

## طبقه بندی و مشخصات استاندارد برای پوزولان ها

پوزولان ها را از لحاظ منشأ وجودی به پوزولان های طبیعی و مصنوعی تقسیم می کنند. پوزولان های طبیعی شامل خاک های دیاتمه، چرت های اپالینی و شیل ها، توف ها و خاکستر آتشفشانی است. منابع اصلی پوزولان های مصنوعی عبارتند از کوره های استخراج فلزات تولید کننده آهن خام، فولاد، مس، نیکل، سرب، سیلیس و آلیاژهای فروسیلیس و

نیروگاه هایی که از زغال سنگ به عنوان سوخت استفاده می کنند. امروزه این مواد مصنوعی که با قیمت کم عمدتاً قابل دسترس اند، به عنوان جایگزین بخشی از سیمان پرتلند مصرفی در بتن مورد استفاده وسیعی قرار گرفته است. به علاوه، بدیهی است که بیشتر این مصنوعات قادرند مقاومت نهایی و دوام بتن با سیمان پرتلند را بهبود بخشند.

یکی از اولین طبقه بندی ها برای پوزولان های طبیعی توسط میلز پیشنهاد گردید. در این سیستم طبقه بندی، پوزولان های طبیعی بر اساس شش نوع فعالیت دسته بندی شدند. جدیدترین طبقه بندی که توسط ماسازا پیشنهاد گردید، پوزولان های طبیعی را به سه دسته تقسیم می نماید. گروه اول، شامل سنگ های پیروکلاستیک که مواد با منشأ آتشفشانی اند. توف های پوزولانی و تراس از این دسته محسوب می شوند. گروه دوم، مواد تغییر یافته با درصد سیلیس زیاد است که طی یک روند شامل ته نشین ساختن مواد با منشأهای متفاوت، شکل داده شده اند. گروه سوم، موادی با منشأ کلاستیک، شامل رس ها و خاک های دیاتمه است.

ASTM-C618 طبقه بندی زیر را برای پوزولان ها ارائه می دهد:

- پوزولان رده N: پوزولان های طبیعی خام یا کلسینه شده شامل خاک های دیاتمه، چرت های اپالین و شیل ها، توف ها و خاکسترهای آتشفشانی یا پومیسیت ها، بعضی شیل ها و رس های کلسینه شده.
- پوزولان رده F: خاکستر بادی با منشأ زغال سنگ قیری.
- پوزولان رده C: خاکستر بادی، خاکستر لیگنیت با منشأ زغال سنگ قیری.
- پوزولان رده S: هر نوع مواد دیگر شامل پومیسیت های عمل شده، بعضی دیاتمه ها، رس ها و شیل های کلسینه شده و آسیاب شده.

مشخصات استاندارد و روش های آزمایش برای انواع مختلف پوزولان ها توسط آیین نامه های مختلف بیان شده است. تمام کدهای استاندارد مشخصات فیزیکی و شیمیایی پوزولان ها را جهت تشخیص مناسب یا نامناسب بودن آنها مورد بحث قرار می دهند. براساس مطالعات و تحقیقات انجام گرفته در زمینه مواد افزودنی مصنوعی این نتیجه حاصل شده است که ترکیبات کانی شناسی و مختصات ذرات مواد، تعیین کننده خاصیت پوزولانی و سیمانی بودن یک پوزولان اند. اخیراً نامبرده برخی از کدهای استاندارد در خصوص خاکستر بادی (PFA) گرد سیلیس، سرباره کوره آهنگدازی و پوزولان های طبیعی را نیز مورد بررسی قرار داده است.

برخی از کدهای استاندارد از جمله ASTM-C618, BS3892 ضوابط خاصی را برای خواص شیمیایی و فیزیکی خاکستر بادی (PFA) جهت مصرف در بتن ارائه داده اند؛ اما برای گرد سیلیس (دود سیلیس) که یک ماده پوزولانی نسبتاً جدید است، تنها در آیین نامه کانادایی CSA2 محدودیت هایی برای مقدار SO<sub>2</sub>، مقدار SO<sub>3</sub> افت سرخ شدن، میزان ذرات باقی مانده روی الک ۴۵ میکرون، اندیس فعالیت پوزولانی مقدار آب لازم جهت مصرف در بتن بیان شده است.

بیشتر استانداردها از جمله ASTM-C618 برای پوزولان های طبیعی یک حداقل ۷۰ درصد را برای مجموعه اکسید اصلی شامل  $Fe_2O_3, SiO_2$  مقرر داشته است. همچنین یک حداکثر برابر با ۱۰ درصد برای افت سرخ شدن و ۳ درصد برای درصد رطوبت دو محدودیت مفید برای خواص شیمیایی هستند که توسط استانداردها بیان شده اند. از دیدگاه خواص فیزیکی نیز برای استفاده از پوزولان های طبیعی در بتن، بیشتر کدهای استاندارد محدودیت هایی در مورد میزان ذرات مانده روی الک ۴۵ میکرون، اندیس فعالیت پوزولانی و مقدار آب را توصیه کرده اند.

### خواص بتن با مواد پوزولانی

بسیاری از خواص بتن، بر اثر استفاده از مواد پوزولانی بهبود می یابد. بعضی آثار ناشی از خواص فیزیکی ذرات شامل ریزبودن و شکل ذرات و بقیه ناشی از فعل و انفعال شیمیایی با سیمان است.

رفتار بتن تازه و درجه هیدراتاسیون سیمان پرتلند را می توان از خواص فیزیکی دانست که به اندازه ذرات پوزولان وابسته اند. مقاومت و نفوذپذیری بتن سخت شده، مقاومت در مقابل بروز ترک های حرارتی، واکنش قلیایی دانه ها و خرابی سولفاتی از خواص بسیار مهمی هستند که از فعل و انفعال شیمیایی پوزولان با سیمان ناشی می شوند. در این بخش بعضی از آثار مواد پوزولانی بر روی خواص بتن به طور خیلی کلی بیان می گردد و در بخش های بعدی به تفصیل آثار مهم چند ماده پوزولانی که در انجام دادن تحقیقات مورد استفاده قرار گرفته اند، جداگانه تشریح خواهند شد.

الف) تأثیر پوزولان ها بر روی خواص بتن تازه عموماً به صورت یک اثر پایدار کننده ظاهر می شود. این بدان معناست که افزودن ذرات خیلی ریز به مخلوط بتن باعث کاهش اساسی در ابعاد لوله های مویینه در بتن، تمایل مخلوط به جدایی را کاهش داده و مشخصات پرداخت پذیری بتن را بهبود می بخشد. کارآیی یکی دیگر از خواص بسیار مهم بتن تازه است و اساساً به میزان چسبندگی مخلوط بستگی دارد. بر طبق گزارش های داده شده، افزودن پوزولان ها به مخلوط بتن با سیمان معمولی اساساً چسبندگی مخلوط را افزایش می دهد، به جز بعضی از انواع خاکستر بادی (PFA) با درصد کربن کم که کارآیی بتن را افزایش می دهد. اضافه نمودن دوده سیلیس به بتن سبب افزایش چسبندگی و پایداری مخلوط می گردد. به علاوه آب انداختن و جدایی مخلوط به مقدار زیادی کاهش می یابد. افزایش چسبندگی مخلوط بدین معناست که جهت رسیدن به کارآیی معمول در بتن های با دوده سیلیس اسلامپ بالاتری لازم است. با افزودن مقادیر خیلی کم دوده سیلیس به بتن معمولی، به آب بیشتر با استفاده از مواد مضاف کاهش دهنده آب به منظور تثبیت کارآیی نیازی نیست ولی با افزودن مقادیر بیشتر، معمولاً آب بیشتری جهت تأمین اسلامپ معین مورد نیاز است.

گزارش های منتشر شده در خصوص اثر پوزولان های طبیعی بر روی کارآیی ملات ها و بتن ها بسیار اندک است. بررسی های مختلف نشان داده است که مخلوط های با سیمان پرتلند و پوزولان های طبیعی نسبت به بتن های با سیمان پرتلند معمولی هت حصول کارآیی ثابت، آب بیشتری را طلب می کند و مقدار آب لازم با افزایش میزان پوزولان جایگزین شده به جای سیمان به دلیل ریزی بیشتر دانه ها و سطح مخصوص زیادتر بیشتر خواهد شد. زمان گیرش اولیه و

نهایی بتن های با سیمان پرتلند و پوزولانی به مقدار پوزولان جایگزین شده به جای سیمان و ریزی و درجه فعال بودن پوزولان بستگی دارد.

ب) حرارت هیدراتاسیون مخلوط های حاوی سیمان پرتلند عموماً بیشتر از مخلوط های دارای سیمان پرتلند به اضافه پوزولان است. اولین گزارش ها از کاهش حرارت هیدراتاسیون توسط دیویس ارائه گردید و پس از آن محققان بسیار این یافته را مورد تأیید قرار دادند. کاهش حرارت هیدراتاسیون به کند شدن هیدراتاسیون تری کلسیم آلومینات C3A و تتراکلسیم آلومینوفریت C4AF مربوط است.

ج) اثر پوزولان ها بر روی مقاومت بتن طی مقالات بسیار زیادی مورد بررسی قرار گرفته است. هم سرعت افزایش مقاومت و هم میزان مقاومت نهایی توسط هیدراتاسیون سیمان و مواد پوزولانی کنترل می گردد، زیرا میزان مقاومت تابعی از روند پر شدن منافذ توسط محصولات ایجاد شده بر اثر هیدراتاسیون است. بنابراین به دلیل کندی واکنش های بیشتر پوزولان ها، مقاومت بتن با مواد پوزولانی در سنین کم معمولاً از مقاومت بتن معمولی کمتر است.

مطالعات انجام شده در مورد تأثیر پوزولان های طبیعی بر روی مقاومت ملات ها و بتن ها نشان می دهد که مقاومت بتن های حاوی مقدار پوزولان زیاد، در سنین کم یک کاهش جزئی دارد، اما مقاومت نهایی این بتن ها ممکن است از بتن معمولی بیشتر باشد.

ماسازا تأثیر بعضی از پوزولان های طبیعی ایتالیا بر روی مقاومت فشاری ملات ها را بررسی کرده است و ی دریافته است که افزودن بیش از ۲۰ درصد از بعضی پوزولان ها، مقاومت ملات را کاهش خواهد داد. علاوه بر این، مقاومت ملات های حاوی سیمان پرتلند و مواد پوزولانی تا ۲۸ روز، از مقاومت ملات های معمولی کمتر و این نتیجه برای تمامی درصد های پوزولان جایگزین سیمان صادق بوده است. در فاصله ۲۸-۹۰ روز فعالیت پوزولانی بسیار مهم است زیرا مقاومت سیمان با ۲۰ درصد پوزولان بیشتر از بتن کنترل در سن ۹۰ روزه است.

د) مدول الاستیسیته و خزش بتن اساساً بستگی به مقاومت بتن و سختی دانه ها دارد. در بتن های حاوی سیمان پرتلند و پوزولان طبیعی با مقاومت اولیه پایین، به طور کلی مدول الاستیسیته به مقدار خیلی جزئی کمتر و خزش به مقدار خیلی جزئی بیشتر از بتن بدون پوزولان است. اطلاعات زیادی در مورد خواص مربوط به مدول الاستیسیته و خزش بتن با دوده سیلیس وجود ندارد، اما با توجه به توانایی دوده سیلیس در افزایش مقاومت اولیه بتن واضح است که مدول الاستیسیته را افزایش داده و خزش را کم می کند. با آزمایش های انجام شده بر روی بتن با ۲۵ درصد دوده سیلیس جایگزین شده به جای بخشی از سیمان پرتلند این نظریه تأیید شده است.

ه) یکی از مهمترین خواص پوزولان ها وقتی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان پرتلند استفاده می شوند، عبارت از توانایی قابل ملاحظه آنها در کاهش منافذ بزرگ و نفوذ پذیر بتن است. بررسی های مختلف نشان داده است که پوزولان ها مؤثرترین کاهش دهنده نفوذ پذیری در مخلوط های کم مایه اند. از یک بررسی بر روی مقاومت و نفوذ پذیری (به روش آب) سیمان پرتلند به اضافه مواد پوزولانی، این نتیجه حاصل شده که در مراحل مختلف روند عمل آوردن بتن،

حجم منافذ بزرگ با قطر بیشتر از ۱۰۰۰ آنگستروم (و نه کل تخلخل خمیر هیدراته شده) به طور معکوس با مقاومت و نفوذپذیری بتن ارتباط دارد. نتایج برخی تحقیقات حاکی از آن است که افزودن پوزولان‌هایی چون PFA و سرباره کوره ذوب آهن دانه ای به سیمان پرتلند باعث ایجاد منافذ خیلی ریز با تبدیل منافذ بزرگ به منافذ ریز می گردد.

## پوزولان های مصنوعی

### دوده سیلیس

دوده سیلیس یک محصول مصنوعی حاصل از کوره های قوسی الکتریکی در جریان تولید فلز سیلیسیم یا آلیاژهای سیلیسیم به خصوص آلیاژهای فروسیلیس است. این ماده با داشتن بیش از ۸۰ درصد سیلیس با حالت غیر کریستالی و به شکل ذرات بی نهایت ریز با قطر متوسط ۰/۱ میکرون یک ماده پوزولانی قوی است. این محصول برای استفاده به عنوان یک ماده سیمانی در بتن بسیار مناسب است. به علاوه از نظر اقتصادی و پتانسیل انرژی مصرفی، استفاده از یک پوزولانی در بتن دارای فواید تکنیکی زیادی از جمله کاهش ترک های حرارتی ناشی از هیدراتاسیون سیمان، دوام بهتر در مقابل آسیب های سولفات ها و آب های اسیدی و حصول مقاومت های نهایی بالاست.

گرچه اولین گزارش های استفاده از این ماده به عنوان پوزولان به اوایل ۱۹۵۰ برمی گردد، تحقیقات اساسی پیرامون استفاده از آن، در مخلوط بتن با سیمان پرتلند در دهه ۱۹۷۰ آغاز شده است. علت انجام دادن تحقیقات و بررسی ها آن است که سیمان پرتلند ماده ای است که جهت تولید آن، انرژی زیادی صرف می گردد و لذا صرف هزینه برای این انرژی در مقیاس غیرمعمول در ۱۹۷۰ انگیزه ای برای استفاده از یک محصول صنعتی مصنوعی که به عنوان جایگزین بخشی از سیمان پرتلند استفاده شود و در جریان تولید آن، انرژی خیلی کم یا هیچ مورد نیاز باشد، به وجود آمده بود. البته باید توجه داشت همان گونه که قبلاً ذکر شد علاوه بر صرفه جویی در انرژی، از مواد پوزولانی مثل دوده سیلیس بهره های تکنیکی و اقتصادی بسیار مهمی در صنعت بتن به دست می آید.

این ماده بی شکل با ذرات بسیار ریز به نام های مختلفی از قبیل:

Silica dust, Aerosol, Microsilica, Silica flour, Pyrogenic Silica, Condensed Silica fume, Silica fume.

نامیده می شود؛ اما از آنجا که فرایند تولید شامل اکسیداسیون بخار SiO و تراکم گرد SiO<sub>2</sub> است، بیشتر مقالات در زمینه های سیمان و بتن، از تعبیر دوده سیلیس ((Silicafume یا دوده سیلیس متراکم ((Condensed silica fume استفاده می کنند.

سیلیسیم، فروسیلیس و سایر آلیاژهای سیلیسیم در کوره های الکتریکی از نوع قوسی غوطه ور که در دماهای بسیار زیاد کوارتز را به کربن تبدیل می کنند، تولید می شود. بنابراین، کارخانه های سازنده عموماً در مناطقی که قدرت هیدروالکتریک ارزان قابل دسترس است، مستقرند. واکنش های شیمیایی که در کوره اتفاق می افتد، پیچیده بوده ولی یکی از این واکنش ها اکسیداسیون SiO و تراکم آن در شکل ذرات کروی بسیار ریز و غیر کریستالی سیلیس است.

بنابراین دوده سیلیس یک محصول از فرآیند تولید است که توسط گازهای خروجی از کوره به خارج انتقال می یابد. نمودار ساده جریان تولید در شکل ۵-۱ و مواد اولیه و تغییرات در انرژی در جریان تولید سیلیس و آلیاژهای سیلیسیم در شکل ۵-۲ نشان داده شده است. کارخانه های دارای کوره قوسی غوطه ور به انواع مختلف طراحی می شوند، اما آنچه از دیدگاه تولید دوده سیلیس اهمیت دارد، تشخیص بین دو نوع کوره شامل کوره های با سیستم بازیابی حرارتی و بدون سیستم بازیابی حرارتی است، زیرا مقدار کربن و رنگ دوده سیلیس حاصل از این دو نوع کوره تفاوت های مهمی دارد. اگر کوره مجهز به سیستم یاد شده باشد، گازهای خروجی حدود  $800^{\circ}\text{C}$  حرارت دارند و در این دما بیشتر کربن سوخته می شود و دوده سیلیس حاصل، رنگ روشن خواهد داشت. در حالی که اگر کوره مجهز به این سیستم نباشد، گازهای با حرارت حدود  $200^{\circ}\text{C}$  خارج شده و مقداری کربن سوخته نشده باقی می ماند و نتیجتاً این افت گرمایی باعث می شود که دوده سیلیس با رنگ خاکستری حاصل شود. به علت ریزی بیش از حد ذرات، وزن مخصوص ظاهری دوده سیلیس عموماً بین  $200$  تا  $250\text{ kg/m}^3$  است و پایین بودن این مقدار مشکلات زیادی را در حمل و مصرف آن ایجاد می نماید.

### خاکستر بادی

خاکستر بادی ماده ای است که از سوختن زغال سنگ به خصوص در نیروگاه ها و در فیلترها به صورت غبار تهیه می شود. ذرات ریز خاکستر بادی از گاز حاصل از سوختن قبل از اینکه وارد هوا شود جدا می گردند. این ذرات ریز با قطرهای بین  $0/1$  تا  $150$  میکرون به صورت کروی قابل تشخیص اند. حدود  $85$  درصد ذرات این ماده از اکسیدهای سیلیسیم، آلومینیوم، آهن، کلسیم و منیزیم تشکیل شده و عموماً بافت شیشه ای دارند. از آنجایی که زغال سنگ های مختلف در تولید خاکستر بادی مصرف می شوند لذا در پاره ای از آنها، گاه ذرات کربن نسوخته نیز مشاهده می گردد. در سال های اخیر به علت تغییرات در خواص خاکستر بادی تولید شده در جهان، دسته بندی های مختلفی برای این ماده صورت پذیرفته است. بر اساس استاندارد کانادا (ASTM, CSA) به طور کلی دو نوع خاکستر بادی طبقه بندی شده است: خاکستر بادی گروه C که اغلب از زغال سنگ های لیگنیتی تولید می شود و دارای میزان کلسیم بالایی بوده و خاصیت سخت شدگی بدون حضور سیمان را نیز داراست. خاکستر بادی نوع دوم به نام گروه F است که از زغال سنگ های قیری به دست می آید و کلسیم کمتری نسبت به گروه C دارد.

### خواص فیزیکی و شیمیایی

به منظور اندازه گیری و مشخص کردن شکل ذرات خاکستر بادی، آزمایش های متعددی توسط پژوهشگران کشورهای مختلف صورت گرفته و این نتیجه به دست آمده است که اندازه ذرات بین  $0/1$  تا  $150$  میکرون و غالباً به شکل کروی اند. سطح مخصوص این ماده بین  $130\text{ m}^2/\text{kg}$  در خاکستر بادی با زغال های قیری و  $580\text{ m}^2/\text{kg}$  برای خاکستر بادی با زغال های لیگنیتی اندازه گیری شده است. توده ویژه این ماده نیز بر اساس ماده اولیه تولید کننده آن بسیار متغیر و بین  $1/90$  تا  $2/96$  گزارش شده که به طور متوسط توده ویژه معادل  $2/5$  را می توان به آن نسبت داد.

از نظر شیمیایی، خاکسترهای بادی به دست آمده از سوختن زغال سنگ های مختلف، از لحاظ نوع اکسیدها و ترکیبات تشکیل دهنده آن متفاوت اند. آزمایش های انجام شده توسط دستگاه های اشعه ایکس (X) نشان داده اند که اجزای اصلی تشکیل دهنده انواع خاکستر بادی شامل  $\text{CaO}, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{SiO}_2$  و اجزای فرعی آن شامل  $\text{C}, \text{TiO}_2, \text{MnO}, \text{SO}_3, \text{K}_2\text{O}, \text{Na}_2\text{O}, \text{MgO}$  هستند.

در اثر عمل سرد شدن خاکستر بادی که خیلی سریع انجام می گیرد، ذرات با بافت غیر کریستالی و شیشه ای به دست می آید و ذرات کمی به صورت کریستالی ظاهر می شود. به علت بافت غیر کریستالی و شیشه ای خاکستر بادی، این ماده فعالیت پوزولانی بالایی داشته و با آهک و سیمان واکنش های شیمیایی ایجاد می کند.

### سرباره کوره ذوب آهن

سرباره ها محصولات مصنوعی از صنعت متالورژی اند. به هنگام تولید آهن خام در کوره بلند آهنگدازی، ناخالصی های موجود در سنگ آهن و سوخت را به کمک یک ماده گدازآور از آهن خام جدا می کنند. سرباره محصولی فرعی از فرآیند ذوب آهن است. کانی های آهن و ترکیبات اکسیدی آهن با زغال کک مخلوط می گردند و تا درجه حرارتی حدود ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد حرارت داده می شوند. تحت این شرایط اکسیدهای آهن با کربن کک ترکیب می شوند و دی اکسید کربن  $\text{CO}_2$  و منواکسید کربن  $\text{CO}$  ایجاد می نمایند. در این فرآیند پس از عمل احیاء آهن خام به صورت مذاب در قسمت تحتانی کوره جمع می شود. عمدتاً این چنین ناخالصی هایی که خاصیت رسی نیز دارند، از جنس سیلیس و آلومین اند. درجه ذوب سیلیس و آلومین بسیار بالاتر از نقطه ذوب آهن است. به دلیل اینکه از نظر فنی جدا کردن این ناخالصی از آهن در حالت جامد مشکل است، بنابراین ضروری است که به بار کوره متشکل از آهن و کک، مقداری سنگ آهک اضافه شود تا مخلوطی از آهک، سیلیس و آلومین که درجه ذوب آنها پایین است، به دست آید. لذا علاوه بر ذوب شدن آهن، یک لایه سطحی از سرباره ذوب شده تشکیل می گردد که به دلیل سبکتر بودن به صورت مذاب و کف بر روی آهن خام قرار می گیرد. بنابراین، سرباره کوره ذوب آهن یک محصول گداخته است که در پایین کوره بلند و بر روی آهن خام ظاهر می شود. دمای آن نزدیک به دمای آهن یعنی بین ۱۴۰۰ تا ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد است. شکل ۵-۱۷ تشکیلات یک کوره بلند آهن گدازی را نشان می دهد. ترکیبات شیمیایی سرباره را می توان توسط نمودار چهار وجهی  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$  یا به طور ساده تر در سیستم سه وجهی  $\text{C-S-A}$  با یک مقدار ثابت  $\text{MgO}$  نشان داد.

سرباره مذاب را که بدین طریق به دست می آید، از کوره خارج نموده و پس از سرد کردن به مصارف گوناگونی می رسانند که اهم آنها عبارتند از: تولید سیمان های سرباره ای، مواد نسوز، پشم سرباره، بالاست راه آهن، مصالح زیرسازی جاده، مصالح سنگی آسفالت و بتن و...

## ساخت سیمان های سرباره ای

همانطور که قبلاً اشاره شد سرباره دانه دانه را جهت ساخت سیمان های سرباره ای استفاده می کنند، برای انجام شدن این امر سه روش وجود دارد:

- ۱- گرد سرباره را به مواد اولیه سیمان پرتلند اضافه می کنند.
  - ۲- به همراه کلینکر سیمان پرتلند و قدری سنگ گچ، آن را آسیاب می کنند که به سیمان آهنگدازی معروف است.
  - ۳- از آسیاب کردن آن با سنگ گچ و قدری کلینکر، سیمان سوپر سولفات می سازند.
- زمان زیادی طول کشیده است تا سیمان های سرباره ای جای خود را به عنوان یک سیمان پرتلند استاندارد بیابند. کاربرد و مصرف این سیمان ها اثر نامطلوب در مقاومت و دوام بتن های ساخته شده ندارد و کلاً هدف از ساخت سیمان های پرتلند آهنگدازی با استفاده از ضایعات ذوب آهن، کاهش قیمت تمام شده آهن خام و صرفه جویی در هزینه تولید سیمان پرتلند است. شکل (۵-۲۰) نمودار شماتیک جریان تولید سیمان های سرباره ای را نشان می دهد.
- سیمان های پرتلند آهنگدازی که از آسیاب کردن کلینکر سیمان پرتلند به همراه سرباره دانه دانه و قدری سنگ گچ تولید می شود. دارای نسبت های اختلاف گوناگون در کشورهای مختلف است. در اکثر کشورها با توجه به موارد استفاده از سیمان پرتلند سرباره ای و خواص شیمیایی سرباره از درصد های مختلف سرباره در تولید سیمان فوق استفاده می کنند.

ASTM-C565 انواع سیمان های هیدرولیکی از جمله دو نوع سیمان سرباره ای را ذکر نموده است، که در نوع S1 نسبت به سرباره از ۲۵ تا ۶۵ درصد و در نوع S میزان سرباره حداقل ۶۰ درصد است که در این نوع بقیه اجزا تشکیل دهنده، کلینکر سیمان پرتلند یا آهک هیدراته است.

در آلمان غربی دو نوع سیمان پرتلند سرباره ای وجود دارد که یکی به نام EPZ یا سیمان پرتلند آهنی که دارای حداکثر ۳۰ درصد سرباره و نوع دوم به نام HOZ یا سیمان سرباره ای که حاوی ۳۶ تا ۸۵ درصد سرباره است. در کشورهای بلژیک، آلمان شرقی، هلند، شوروی و انگلیس و... نیز دسته بندی های مختلفی برای سیمان های سرباره ای وجود دارد. در ارتباط با روش ساخت سیمان های سرباره ای باید توجه داشت که سختی سرباره دانه ای از کلینکر سیمان پرتلند بیشتر است. چون آسیاب کردن توأم سرباره و کلینکر، سبب ریزتر شدن ذرات کلینکر سیمان پرتلند می شود، در نتیجه ناهمگنی در درشتی و اندازه ذرات سیمان ایجاد می گردد. بعضی ها ترجیح می دهند که سرباره دانه دانه و کلینکر سیمان پرتلند را به طور جداگانه آسیاب کرده و بعد با هم مخلوط کنند. همچنین کاربرد سرباره دانه دانه را نمی توان فقط محدود به ساخت سیمان سرباره ای در کارخانه های سیمان دانست، بلکه می توان سرباره نرم شده را به همراه مقداری گچ به مخلوط بتن حاوی سیمان پرتلند و سنگدانه افزود و بتن با سیمان سرباره ای ساخت. آزمایش های گسترده نشان داده است که مخلوطی که بدین طریق از سرباره و سیمان پرتلند به دست می آید به همان کیفیت است که از آسیاب کردن توأم این دو جزء حاصل می شود.

یک روش مناسب دیگر برای استفاده در کارگاه های بزرگ ساختمانی نظیر سدسازی یا در کارخانه های ساخت قطعات پیش ساخته پیشنهاد شده است، بدین صورت که سرباره دانه ای را به شکلی که از کارخانه ذوب آهن تحویل می شود، در آسیاب گلوله ای به روش تر، آسیاب می کنند تا تبدیل به دوغاب رقیق شود. سپس این دوغاب به همراه سیمان پرتلند و مصالح سنگی مستقیماً به داخل مخلوط کن بتن ریخته می شود. امتیاز روش تر این است که نیاز به قدرت و انرژی کمتری دارد و محصول آن دارای نرمی بیشتری نسبت به آسیاب کردن به روش خشک است.

### دوام بتن های ساخته شده با خاکستر پسته برنج

تحقیقات و بررسی های انجام شده نشان می دهد که بتن و ملات ساخته شده با سیمان دارای خاکستر پسته برنج در مقایسه با بتن ساخته شده با سیمان پرتلند معمولی و دیگر سیمان های پوزولانی، مقاومت بالایی در محیط اسیدی دارد. برای روشن شدن عملکرد مناسب خاکستر پسته برنج در محیط های خورنده، نمونه های استوانه ای شکل بتنی با مخلوط ۳۵ درصد خاکستر پسته برنج و ۶۵ درصد سیمان پرتلند نوع ((II ساخته شده و به مدت ۱۵۰۰ ساعت در محلول اسیدی (۵ درصد اسید سولفوریک یا اسید کلریدریک) قرار داده شدند. در محلول اسید کلریدریک، نمونه سیمان پرتلند کنترل ۳۵ درصد و نمونه دارای خاکستر پسته برنج ۸ درصد افت وزن داشته است. این افت ها در محلول اسید سولفوریک به ترتیب ۲۷ و ۱۳ درصد بوده است.

همچنین مخلوط های آهک- خاکستر پسته برنج قرار داده شده در محلول یک درصد اسید استیک به مدت بیش از ۵ سال دارای شرایط بسیار خوبی بوده، در حالی که در ملات های سیمان پرتلند، در یک سال، تردشدگی سطحی و افت وزن قابل توجه بوده است. همچنین گزارش شده که مقاومت ملات های دارای خاکستر پسته برنج در برابر اسید بیشتر بوده است. در این آزمایش ها نمونه های ملات ساخته شده از مخلوط (۵۰-۵۰) سیمان پرتلند و خاکستر در محلول ۱/۹۷ نرمال اسید کلریدریک قرار داده شدند. بعد از ۷۲ روز محلول اسیدی روی سطح ملات های دارای خاکستر پسته برنج تأثیری نداشته است در حالی که نمونه های ساخته شده با سیمان پرتلند معمولی بر اثر اسید کلریدریک خورده و حفره دار شدند.

احتمال دارد که دوام سیمان های پرتلند دارای خاکستر پسته برنج به علت ساختار فیزیکی سیمان های هیدراته شده و کاهش در مقدار هیدروکسید کلسیم باشد. برخی محققین نشان داده اند که افزودن خاکستر پسته برنج به سیمان پرتلند، باعث مسدود شدن سوراخ های ریز و یا تبدیل آنها به سوراخ های بسیار کوچکتر با نفوذپذیری کمتر می شود.

دوام ملات های آهک- خاکستر پسته برنج نیز با قرار دادن نمونه های ملات منشوری شکل در چرخ های تر و خشک و بررسی شده است. در چرخه تر، نمونه ها در آبی با دمای ۱۸ درجه سانتیگراد برای مدت ۲۵ دقیقه غوطه ور می شوند. سپس آب موجود در محفظه تخلیه و برای رسیدن دمای آن به ۴۵ درجه سانتی گراد لامپ های حرارتی روشن می شود، سپس بعد از ۲۵ دقیقه لامپ ها خاموش و آب برای تکرار چرخه به درون محفظه فرستاده می شود، نمونه ها در پایان

چرخه خشک، وزن می شوند. نتایجی که در شکل ۵-۳۱ آورده شده، نشان می دهد که افت وزن به تعداد چرخه ها بستگی دارد. (هر هفته معادل ۱۶۸ چرخه است)

با توجه به نتایج به دست آمده ملاحظه می شود که در این واکنش عمل جدا شدن آهک از محیط به وقوع می پیوندد. در مخلوط های با آهک کم (۲۰ درصد آهک)، درصد کمی از آهک آزاد باقی می ماند. در طول چرخه تر، آهک از سیلیکات هیدراته جدا شده و بیرون رانده می شود و طبق نظر برخی محققین، سیلیس هیدراته باقی می ماند. این نوع خوردگی یک پدیده سطحی است که به وسیله عمل شستشو در چرخه تر تشدید می شود، زیرا سطح جدید در معرض جدا شدن آهک قرار می گیرد. برای مخلوط های با آهک زیاد، گرچه عمل جدا شدن آهک صورت می گیرد، آهک آزاد به مقدار کافی برای تولید سیلیکات کلسیم هیدراته وجود دارد. همچنین سطح مخلوط های دارای آهک زیاد، کربناته شده و از جدا شدن آهک تا حدی کاسته می شود.

تأثیر جدا شدن آهک بر دوام مخلوط های با آهک کم، باعث می شود که بهینه نسبت به خاکستر ۱:۲ در نظر گرفته می شود. همچنین یادآوری می شود که از دیدگاه مقاومت فشاری ملات، بهینه آهک به خاکستر ۱:۲ است.

برای استفاده از خاکستر پوسته برنج در بتن مسلح محدودیت هایی وجود دارد. برخی در تحقیقات خود به این نتیجه رسیده اند که می توان در ساخت خانه های ارزان قیمت از مخلوط های آهک-خاکستر پوسته برنج در بتن مسلح مورد استفاده در تیرهای سردر (نعل در گاهی) و ستون های مربوط به بام استفاده کرد.

بررسی هایی نیز در مورد بتن ساخته شده با سیمان پرتلند پوزولانی شامل مخلوط ۵۰:۵۰ سیمان پرتلند و خاکستر پوسته برنج انجام شده که حاکی از رضایت بخش بودن استفاده از خاکستر پوسته برنج به عنوان پوزولان در ساختن بتن مسلح بوده است. نکته مهم این است که چنانچه بتن های ساخته شده با این نوع سیمان به طور مناسبی به عمل آورده شوند، هیچگونه خرابی قابل توجهی در آرماتورهای آن دیده نخواهد شد.

## پوزولان های طبیعی

### منشأ پیدایش پوزولان های طبیعی

در بخش های پیشین ذکر شد که پوزولان ها به لحاظ منشأ وجودی به دو گروه تقسیم می شوند:

پوزولان های طبیعی و مصنوعی. مقصود از طبیعی بودن پوزولان این است که نیاز به عملیاتی که خصوصیات شیمیایی و کانی های آن را اصلاح نماید، نباشد و مستقیماً به کار رود. در صورتی که مواد مصنوعی توسط عملیات شیمیایی بر روی موادی که دارای خواص پوزولانی ضعیف اند، حاصل می گردد.

پوزولان های طبیعی در حقیقت پوک سنگ ها و خاکسترهای باقی مانده از فعالیت های آتشفشانی غیربلوری اند. سنگ های آذری آواری که از فوران انفجارات آتشفشانی حاصل می گردند، بعد از خروج از دهانه آتشفشان روی زمین یا در آب ته نشین می گردند. رسوبات روی زمین را غالباً سنگدانه های نامتجانس تشکیل داده که ترکیبی هستند از خاکسترهای حاوی ذرات سنگ های آتشفشانی مخلوط شده با ذرات حمل شده که از دیواره دودکش آتشفشان یا

انتهای آن بیرون می آیند. ذرات غیر چسبنده رسوبات با منشأ آواری با قرار گرفتن تحت پدیده دیاژنز یا سنگ شدگی به سنگ های متراکم که به توف ها موسومند، تبدیل می گردند. این پدیده که با اصلاحات کانی-شیمیایی همواره است، می تواند اثر مساعد یا نامناسب بر روی رفتار پوزولانی بگذارد. تمام رسوبات آذری آواری از خود فعالیت پوزولانی نشان نمی دهند، بلکه فقط آنهایی که اسیدی هستند و حالت شیشه ای دارند و حاوی کانی های ژئولیتی اند. این خاصیت را دارا خواهند بود برخی در این باره چنین نظریه ای ارائه می دهند: پوزولان های طبیعی با منشأ آتشفشانی در بردارنده مواد شیشه ای غیرچسبنده یا توف های متراکم به دست آمده از رسوبات خاکستر و خاک های آتشفشانی اند. آنها یا مانند پوزولان های منطقه راین آلمان لایه های زیرین رسوبات جدیدند و به حالت شبه سنگ تحکیم یافته وجود دارند و یا به صورت ناقص و غیر تحکیم یافته، مانند پوزولان های ایتالیا یافت می شوند. پوزولان های آتشفشانی ترکیبی از مخلوط سیلیکات ها و حاوی ذرات شیشه ای و کریستالی، خاکستر و خاک آتشفشانی هستند که تحت سرد شدن سریع تشکیل شده اند. در بعضی حالت ها به طور اساسی اصلاح شیمیایی قابل ملاحظه ای را تحمل کرده که به هر صورت منجر به تشکیل ترکیبات ژئولیتی می گردند. این اصلاح را معمولاً به عمل بخار آب با دمای بالا و دی اکسید کربن در زیرزمین نسبت می دهند. اثر چنین اصلاحی را باید بهبود در رفتار شیمیایی پوزولان ها دانست که طی آن، عناصر اصلی به طور جزئی تحت تأثیر واکنش بادی اکسید کربن و آب قرار می گیرند. این مطلب در تراس و بعضی پوزولان های قدیمی ایتالیا بیشتر به چشم می خورد. فعالیت پوزولانی کمی حتی گدازه های حجیم و همچنین در بعضی از سنگ های آذرین تجزیه شده مثل پسامیت و آرن که اهمیت کاربردی ندارند، مشاهده گردیده است. در بیان منشأ فعالیت پوزولان های آتشفشانی نظرات گوناگونی بیان گردیده است.

ترکیبات شیمیایی پوزولان های غیرچسبنده آتشفشانی در طیف وسیعی متغیرند. با این حال تمام آنها سیلیس و آلومین نسبت به دیگر اجزاء میزان بالاتری دارند.

## پوزولان های ایران

### شناسایی کلی

با توجه به آتشفشان های مختلفی که در نقاط مختلف ایران وجود دارد، اساساً پوزولان های طبیعی زیادی را می توان یافت. وجود گسترده مواد پوزولانی در ایران با فعالیت نسبتاً خوبی که دارند، می تواند کمک شایان توجهی به صنعت سیمان و بتن کشور نموده و همچنین به عنوان راه حل های اساسی در حل مشکلات مربوط به خرابی های شیمیایی بتن در مناطق حاشیه خلیج فارس، به کار گرفته شوند.

روش یافتن، آسیاب نمودن پوزولان به مدت تقریبی ۴ ساعت و گذردن آنها از الک نمره ۲۰۰ است که بعداً با روش بلین میزان سطح مخصوص آنها اندازه گیری می شود.

### ارزیابی خاصیت پوزولانی دیاتمه

نمونه‌های دیاتمه به قدری قوی بوده که ظرف مدت ۳ روز تمام آهک محیط را جذب کرد، در صورتی که دوده سیلیس هنوز موفق به این عمل نگردیده است. بقیه خاک‌ها دارای خاصیت جذب آهک یکسانی بوده و با آهنگ تقریباً همانند، آهک جذب کرده اند، خاک‌های دیاتمه فعالیت تقریباً یکسانی را در طول مدت آزمایش از خود نشان می‌دهند، اما وقتی ریزدانه‌گی آن نسبت به دوده سیلیس که تقریباً نصف آن است در نظر گرفته شود دلیل دیگری بر مرغوبیت این خاک است. به عبارت دیگر، اگر اینخاک را تا اندازه‌ای آسیاب نماییم که به اندازه دوده سیلیس برسد، باید عملکرد بسیار قابل ملاحظه‌ای را انتظار داشت.

### ارزیابی خاصیت پوزولانی تراس

ماده پوزولانی تراس که در ایران نیز مورد استفاده قرار گرفته از توف‌های آتشفشانی است. به طور کلی توف‌ها، سنگ‌های پیروکلاستیک هستند که از خروج مواد آتشفشانی ناشی می‌شوند.

ذخایر بزرگی از تراس همانگونه که در جداول بخش قبلی مشاهده شد در نقاط مختلف جهان وجود دارد. با توجه به نقشه زمین‌شناسی منطقه دماوند مشاهده می‌گردد که ناحیه وسیعی از این منطقه توسط توف سبز پوشیده شده که ضخامت آن در جنوب به ۱۵۰۰ متر می‌رسد ولی هر چه به سمت شمال می‌رویم از ضخامت آن کاسته می‌شود. خصوصیات شیمیایی و سطح مخصوص ذرات تراس در جداول قبلی تشریح شده است.

ذرات تراس در حالت طبیعی و پس از عمل آوردن حرارتی در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و در حالت متراکم اند. همان گونه که مشاهده می‌گردد، این عکس‌ها محدوده وسیعی از ابعاد ذرات را تحت پوشش دارند. شکل متخلخل و گوشه دار ذرات، خود دلیلی بر کاربرد بیشتر آب جهت دستیابی به یک کارآیی معین است.

خاصیت پوزولانی تراس با استفاده از روش‌های شیمیایی و اصلاح شده توسط مؤلف اندازه‌گیری شده است. میزان آهک مصرفی در مخلوط آهک و تراس را که توسط روش ترموگراویمتری ((TG اندازه‌گیری شده است، نشان می‌دهد. به مرور زمان میزان آهک در مخلوط تقلیل می‌یابد. این کم شدن در ساعات و روزهای اولیه سریع تر است. مقایسه دو منحنی مربوط به تراس طبیعی و تراس بعد از حرارت تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد نشان می‌دهد که بعد از دو روز ۲۷/۷ درصد آهک با تراس طبیعی و ۳۸ درصد با تراس حرارت داده شده ترکیب می‌شود، این نتیجه مبین آن است که بالا رفتن و اصلاح شدن خاصیت پوزولانی تراس بر اثر حرارت است. با توجه به نتایج آزمایش اشعه ایکس در شناخته کریستال‌های تراس، این تغییر ناشی از دگرگونی در ساختمان کریستالی تراس پیش‌بینی می‌شود.

### تأثیر تراس بر مقاومت بتن

مقاومت بتن‌های ساخته شده از سیمان تراس کمتر از سیمان معمولی است ولی این نقصان با کم کردن آب بتن و استفاده از مواد تقلیل دهنده آب برطرف می‌گردد. همچنین شیب منحنی‌ها نشان می‌دهد که بتن ساخته شده با تراس در دراز مدت شروع به ازدیاد مقاومت می‌نماید و این مقاومت حتی فراتر از بتن معمولی نیز هست. در نمونه‌های ساخته

شده از تراس، نگاهداری بتن در محیط مرطوب نقش به سزایی در افزایش مقاومت دارد. شکل ۵-۳۷ به خوبی نشان می دهد که نگاهداری بتن، در محیط با ۱۰۰ درصد رطوبت نسبی و ۲۰ درجه سانتیگراد باعث ایجاد مقاومت بالا در بتن ها، نسبت به شرایط دیگر عمل آوری شده است.

### تأثیر تراس بر تخلخل و نفوذپذیری بتن

از آنجا که استفاده از تراس جهت ساختن بت با کارآیی و اسلامپ ثابت باعث افزایش آب مورد نیاز بتن نسبت به بتن معمولی با همان اسلامپ می گردد، لذا بدون استفاده از ماده روان کننده، تخلخل بتن افزایش می یابد. قابل ذکر است که آزمایش به روش نفوذ جیوه انجام گردیده است.

قابل توجه است که نفوذپذیری در ملات های ساخته شده از تراس با به کار بردن مواد تقلیل دهنده آب بتن، تقلیل یافته است. در ارتباط نفوذپذیری با تخلخل، حفره های با قطرهای مشخص در تغییر نفوذپذیری دخالت دارند. لذا عامل مهم تر از تخلخل کل بتن در تغییرات نفوذپذیری، نحوه پخش فضاهای خالی و منحنی توزیع این حفره هاست. در آزمایش های انجام شده ارتباط نزدیکی بین نفوذپذیری حفره های با قطر بزرگتر از ۰/۱ میکرون به دست آمده است. بدین معنی که افزایش حجم حفره های با قطر بزرگتر از ۰/۱ میکرون باعث افزایش نفوذپذیری در ملات شده است.

### تأثیر تراس بر دوام بتن

به منظور بررسی و مقایسه ملات های ساخته شده از سیمان معمولی و سیمان تراس در مقابل آب های سولفات دار، نمونه های مکعبی به ابعاد ۵۰ میلیمتر و نمونه های منشوری جهت آزمایش انبساط در محلول ۴ درصد سولفات سدیم در آب و نمونه هایی در خارج از محلول سولفات قرار داده شدند. PH خنثی با استفاده از اسید سولفوریک ۰/۱ نرمال ثابت نگهداشته شده است. مقاومت فشاری تمامی ملات های نگه داشته شده در محلول سولفات به مرور زمان همانند نمونه های خارج از محلول افزایش می یابد، لیکن در حدی متوقف و شروع به کاهش می کند. علت این امر، فعل و انفعال ترکیب سولفات و سیمان هیدراته است که ابتدا بدون اضافه حجم است و مقاومت را بالا می برد ولی پس از تشکیل اترینگایت با انبساط زیاد و کاهش مقاومت همراه است؛ اما نکته مهم نقطه شروع نقصان مقاومت است که در ملات های منشوری شکل داخل و خارج محلول سولفات نیز نشان دهنده مقاومت بیشتر آنها در موقعی است که با منشوری شکل داخل و خارج محلول سولفات نیز نشان دهنده مقاومت بیشتر آنها در موقعی است که با سیمان تراس ساخته شده باشند. میزان سولفات نفوذ کرده در ملات ها نیز با روش اشعه ایکس تعیین و در شکل ۵-۴۳ نمایش داده شده است. در این شکل مشاهده می شود که مقدار سولفات در ملات های معمولی و تراس از مقدار کمی در سطح به طرف داخل نمونه زیاد و بیشترین مقدار در چند میلیمتری سطح نمونه تشکیل می شود. همچنین منحنی فوق نشان می دهد که میزان نفوذ سولفات، بعد از یکسال در ملات معمولی ۶ میلیمتر و در ملات تراس ۴ میلیمتر است.

## جمع بندی

ر ساختمان هایی که بنا به هر دلیلی دچار آسیب می شوند، سازه اولیه فاقد سختی و استحکام مناسب بوده و می بایست نسبت به مقاوم سازی آن اقدام شود. با توجه اینکه عمر بسیاری از ساختمان های موجود در کشور زیاد شده است و در دوره ی بهره برداری نیز کم و بیش تحت بارهای لرزه ای قرار گرفته اند: نیاز است که نسبت به مقاوم سازی آنها تحقیقات لازم انجام شود. از این رو در مطالعه ی حاضر انواع روش های متعارف مقاوم سازی ساختمان های بتن مسلح معرفی خواهد شد و سپس مروری بر تعدادی از مطالعات انجام شده در زمینه ی مقاوم سازی ساختمان های بتن مسلح که توسط محققین مختلف انجام گرفته است، پرداخته خواهد شد. نتایج ارائه شده در این مطالعه می تواند اطلاعات ارزشمندی را در اختیار جامعه مهندسين در زمینه استفاده از روش های نوین و مرسوم مقاوم سازی در ساختمان های بتن مسلح قرار دهد.

زلزله های مخرب و فاجعه آمیز چند دهه اخیر نشان داد که ایران کشوری زلزله خیز است و هیچ نقطه ای از آن از خطر زلزله در امان نیست. از آنجا که متأسفانه برخی از شهر های ایران در حاشیه گسل ها شکل گرفته اند و حرکت های افقی یا عمودی آنها منجر به بروز زلزله در این گونه شهر ها یا نواحی پیرامون آنها می شود، از اینرو ضرورت مقاوم سازی ساختمان ها با معیارهای علمی احساس می شود.

نگاهی به خسارت های ناشی از زلزله های گذشته نشان می دهد که درصد بالایی از ساختمان های بتن مسلح که تاکنون ساخته شده اند در برابر زلزله مقاوم نیستند و یا مقاومت کافی و قابل قبولی ندارند، زیرا سازه های بتن مسلح موجود بر اساس آیین نامه های قدیمی طراحی شده و اکثر آنها الزامات آیین نامه های جدید زلزله را ارضا نمی کنند. همچنین ضعف های اجرایی مزید بر علت شده و ساختمان ها را آسیب پذیر ساخته است. از این رو ضرورت تقویت این ساختمان ها به خصوص برای مقابله با نیروهای جانبی و با روش های مقاوم سازی قابل اعتماد، آسان، سریع و اقتصادی احساس می شود.

از آنجا که تعداد قابل توجهی از ساختمان های آسیب پذیر قبلاً ساخته شده اند، افزایش مقاوم سازی لرزه ای آنها به شیوه های گوناگون، کم و بیش مشکلات اجرایی و تغییر در معماری سازه را در بر خواهد داشت. از این رو در مطالعه ی حاضر انواع روش های متعارف مقاوم سازی ساختمان های بتن مسلح معرفی خواهد شد و سپس مروری بر تعدادی از مطالعات انجام شده در زمینه ی مقاوم سازی ساختمان های بتن مسلح که توسط محققین مختلف انجام گرفته است، پرداخته خواهد شد.

## منابع و مآخذ

- خداینده، پیمان. (۱۳۹۸). بررسی آزمایشگاهی استفاده از روکش بتن فوق توانمند برای حفاظت از خوردگی میلگرد سازه های بتنی توسط یون کلرید. پایان نامه کارشناسی ارشد. رشته مهندسی سازه. گروه مهندسی عمران. دانشکده فنی. دانشگاه تهران.

- خان احدی، رضا. (۱۳۹۷). بررسی عملکرد پانل‌های بتن‌های فوق توانمند در برابر ضربه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. رشته مهندسی سازه. گروه مهندسی عمران. دانشکده فنی. دانشگاه تهران.
- فرنام، یعقوب. (۱۳۸۶). بررسی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی رفتار پانل‌های بتن الیافی توانمند در برابر ضربه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. رشته سازه‌های هیدرولیکی. گروه مهندسی عمران. دانشکده فنی. دانشگاه تهران.
- جعفری‌نژاد، سهیل. (۱۳۹۶). بررسی آزمایشگاهی مقاومت پیوستگی بین بتن معمولی و بتن فوق توانمند. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. رشته مهندسی سازه. گروه مهندسی عمران. دانشکده فنی. دانشگاه تهران.
- Katsumata, H., Kobatake, Y., & Takeda, T. (1988, August). A study on strengthening with carbon fiber for earthquake-resistant capacity of existing reinforced concrete columns. In Ninth World Conference on Earthquake Engineering, 517-522.
- Garzón-Roca, J., Adam, J. M., Calderón, P. A., & Valente, I. B. (2012). Finite element modelling of steel-caged RC columns subjected to axial force and bending moment. Engineering Structures, 40, 168-186.