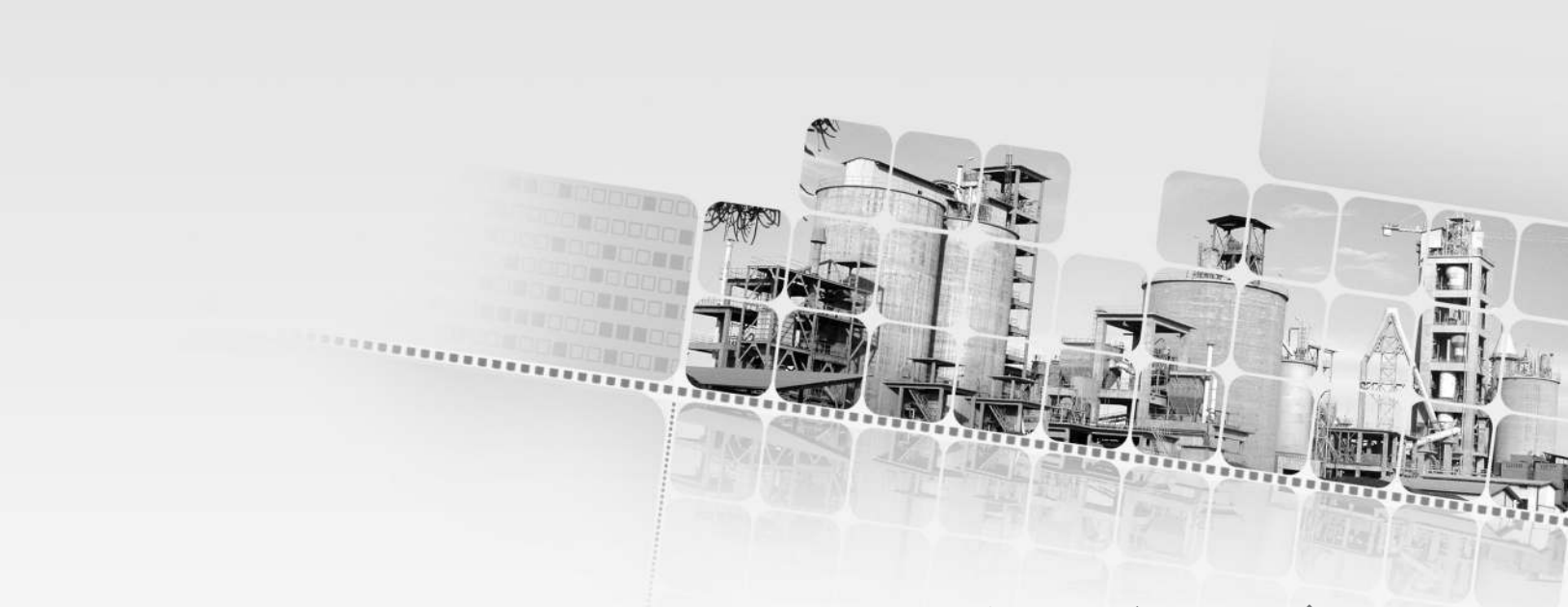




پیشرفت در تکنولوژی سیمان: مروری جامع بر افزودنی‌ها و تأثیرات آن بر خاصیت مواد

■ مهندس فاطمه ذاکری
سیمان آذرآبادگان خوی

چکیده:

این مقاله مروری، پژوهشی بر روی بررسی انواع مختلف مواد افزودنی و تأثیر آنها بر مواد با خاصیت سیمانی می‌باشد. افزودنی‌ها نقش اساسی و مهم در افزایش کارایی و بازدهی سیمان از جمله: استحکام، مقاومت، کارایی بتن و زمان گیرش سیمان دارند. این پژوهش مطالعه‌ای ژرف بر انواع مختلف افزودنی از جمله افزودنی‌های شیمیایی، افزودنی‌های معدنی و الیاف تقویت کننده و نحوه تأثیر و عملکرد آنها بر روی خاصیت سیمان تولید شده داشته است. همچنین این مقاله مروری، بر اهمیت شناخت و داشتن اطلاعات از واکنش‌های بین مواد افزودنی و مواد سیمانی را جهت دستیابی به عملکرد مطلوب، تأکید داشته است. علاوه بر موارد ذکر شده، تأثیر زیست محیطی افزودنی‌ها نیز در نظر گرفته شده است. این پژوهش با هدف استفاده از افزودنی‌های مناسب بر اساس نقطه نیازها جهت دستیابی به عملکرد مطلوب بر اساس خواص مواد افزودنی داشته است.

۱- مقدمه

سیمان نقش اساسی در صنعت ساخت و ساز داشته و به‌عنوان ماده اولیه اصلی با کاربردهای متنوع در این صنعت می‌باشد. ترکیب سیمان با شن و ماسه به‌عنوان عامل اصلی تشکیل بتن می‌باشد. اهمیت سیمان در ساخت و ساز در چندین جنبه از جمله موارد زیر خلاصه می‌گردد:

ماده مهم در تعیین ساختار: سیمان نقش اساسی در تشکیل نوع ساختار ساختمان‌ها، پل‌ها، سدها و دیگر پروژه‌های مربوط به ساخت و ساز دارد.

تنوع در کاربرد: تنوع پذیری سیمان در کاربرد، آن را جهت استفاده در ساخت و سازهای متنوع و مختلف میسر می‌سازد. بدین صورت که سیمان در پی‌ریزی ساختمان‌ها، دیوارچینی،

کف‌چینی و سایر موارد در ساختمان‌سازی کاربرد دارد. چنین کاربردهایی سیمان را به ماده اساسی در ساخت و سازهای مسکونی و اقتصادی تبدیل کرده است.

مقاومت و طول عمر: مقاومت به‌عنوان خاصیت ذاتی مواد بر پایه سیمان، منجر به داشتن ویژگی بارز طول عمر زیاد سیمان‌ها شده است. ساختار بتن نیز با داشتن افزودنی‌هایی نظیر استیل خاصیت ارتجاعی و قابل تطابق با عوامل زیست محیطی همچون: فرسایش بتن با هوا، خوردگی، آتش سوزی و همچنین یک ماده مطمئن با طول عمر بالا به آن می‌بخشد.

به کارگیری در توسعه زیربناها: شالوده و زیربنای بسیاری از صنایع ساخت و ساز همچون بزرگراه‌ها و سیستم‌های

تأمین و نگهداری آب بطور قابل توجهی وابسته به سیمان می باشد. کاربرد آن در توسعه و نگهداری از شبکه های ساختمانی عظیم و پایدار و مقاوم حائز اهمیت می باشد.

انعطاف در کاربردهای مربوط به معماری ساختمانی: سیمان در خلق ساختار و اشکال مختلف، تنوع پذیری جالب توجهی به معماران داده است. چنین خاصیتی در ایجاد تنوع خلق اشکال مختلف، آن را به انتخابی اصلی برای معماران و سازندگانی تبدیل می کند که به دنبال جذابیت زیبایی شناختی و یکپارچگی سازه های هستند.

تأثیر اقتصادی: استفاده و تولید سیمان به طور قابل توجهی به توسعه اقتصادی کمک می کند. صنایع سیمان با وجود ایجاد اشتغال، در بخش ساخت و ساز نیز با ایجاد شغل و رشد در صنایع مرتبط، منجر به تحریک فعالیت های اقتصادی می گردد.

استاندارد جهانی ساخت و ساز: سیمان و بتن به عنوان یکی از اصلی ترین مواد استاندارد در ساخت و ساز در سراسر جهان تبدیل شده و پایه و اساس مشترکی در شیوه های مربوط به ساخت و سازها فراهم می کنند. این استانداردسازی همکاری بین المللی را تسهیل و کیفیت جدانشدنی را در پروژه های ساختمانی در سطح جهانی تضمین می نماید.

چالش های پایداری: با وجود اینکه سیمان یکی از اصلی ترین منابع ساخت و ساز بوده است، تولید آن پیامدهای زیست محیطی، به خصوص انتشار گاز کربن داشته است. تلاش اصلی برای دستیابی به چالش های توسعه پایدار و یافتن جایگزین های سازگار با محیط زیست و اتخاذ شیوه های سبزتر در صنعت سیمان می باشد.

افزودنی ها نقش اساسی در اصلاح و افزایش خواص سیمان دارند و به بهینه سازی عملکرد بتن در ساخت و ساز کمک می کنند. نقش های کلیدی و مهم این افزودنی ها عبارتند از:

بهبود کارایی: از مواد افزودنی مانند عوامل کاهنده آب یا فوق روان کننده ها برای افزایش کارایی بتن استفاده می شود. این افزودنی ها با کاهش محتوای آب بدون به خطر انداختن سیالیت، سهولت جابجایی، قرار دادن و تکمیل مخلوط بتن را بهبود می بخشند.

افزایش مقاومت و پایداری: برخی از مواد افزودنی مانند مواد پوزولانی (مانند خاکستر بادی یا دود سیلیس) و افزودنی های شیمیایی به توسعه استحکام و دوام بتن کمک می کنند. اینگونه افزودنی ها با اجزای سیمانی واکنش داده و

ترکیباتی را تشکیل می دهند که عملکرد کلی بتن را در طول زمان افزایش می دهد.

افزایش یا تاخیر زمان گیرش: از مواد افزودنی می توان جهت تنظیم مدت زمان گیرش بتن استفاده کرد. شتاب دهنده ها فرآیند گیرش را کاهش می دهند و در هوای سرد یا ساخت وسازهای حساس به زمان مفید میرباشند، در حالی که تاخیر دهنده ها زمان گیرش را افزایش می دهند و امکان کارایی و کار در شرایط طولانی تر با سیمان را فراهم می کنند.

کاهش و یا بهبود نفوذناپذیری: افزودنی هایی نظیر دوده سیلیس و برخی مواد افزودنی شیمیایی می توانند نفوذپذیری بتن را به میزان قابل توجهی کاهش دهند. این ویژگی برای بهبود دوام سازه های بتنی با به حداقل رساندن نفوذ مواد مضر مانند آب، مواد شیمیایی و عوامل تهاجمی بسیار ضروری و مورد نیاز است.

کنترل انقباض و ترک خوردگی: انقباض و ترک خوردگی در بتن ها از جمله چالش های رایج می باشند. افزودنی هایی مانند کاهنده های انقباض و الیاف می توانند با کاهش تنش های داخلی بتن به کنترل این مسائل کمک کرده و منجر به کاهش ترک خوردگی و بهبود عملکرد طولانی مدت می شود.

افزایش مقاومت شیمیایی: برخی از مواد افزودنی ها مانند بازدارنده های خوردگی و عوامل حباب کننده هوا، مقاومت شیمیایی بتن را افزایش می دهند. این مورد به ویژه در محیط های تهاجمی که در اثر قرار گرفتن در معرض مواد شیمیایی، یکپارچگی ساختار را به خطر می اندازند، بسیار مهم است.

دستیابی به خواص ویژه مورد نظر: افزودنی ها امکان تنظیم خواص بتن را برای کاربردهای خاص و مورد نظر فراهم می کنند. به عنوان مثال، عوامل حباب زا باعث ایجاد حفره های هوا در بتن شده و آن را در برابر یخ زدگی و ذوب شدن مقاوم می کنند، در حالی که اصلاح کننده های رئولوژی می توانند برای کنترل ویژگی های بتن های خود متراکم استفاده شوند.

کاهش اثرات مخرب زیست محیطی: برخی از افزودنی ها تولید سیمان با کمترین اثر زیست محیطی و سازگار با محیط زیست را فراهم می کنند. استفاده از افزودنی ها با خاصیت سیمانی نظیر سرباره ها و خاکستر منجر به تولید محصول سازگار با محیط زیست بوده و در نتیجه منجر به پایداری صنعت ساخت و ساز می گردد. افزودنی ها در سیمان به علت تطبیق پذیری و قابل کنترل جهت تنظیم خواص محصول به عنوان نقطه قوتی برای مهندسين و سازندگان می باشد. بدین گونه که با مهندسی خواص جهت استفاده از سیمان در

جهت و پروژه مشخصی می‌توان به هدف مورد نظر خود دست یافت. این اهداف چه در زمینه افزایش کارایی، مقاومت، پایداری و اهداف زیست محیطی همگی منجر به تنظیم ساختار سیمانی در جهت مشخص می‌باشند.

۱-۱- انواع افزودنی‌ها

۱-۱-۱- افزودنی‌های شیمیایی

مواد افزودنی شیمیایی شامل موادی می‌شوند که در هنگام ساخت بتن به ترکیب جهت افزایش و بهبود خواص سیمانی افزوده می‌شوند. این افزودنی‌ها بر اساس کاربردشان به دسته‌های مختلفی قابل تقسیم می‌باشند: عوامل کاهنده یا روان کننده آب در بتن که تحت عنوان نرم کننده یا فوق روان کننده نیز شناخته می‌شوند، روان کننده‌ها به بتن کمک می‌کنند تا بدون افزایش آب مصرفی، کارایی آن افزایش یابد. شتاب دهنده‌ها با کاهش مدت زمان گیرش بتن را تسریع می‌کنند که در ساخت و ساز در هوای سرد یا در مواردی که زمان گیرش سریع مورد نیاز است، کاربرد دارد. از طرف دیگر، دیرگیر کننده‌ها زمان گیرش را کاهش می‌دهند و کارایی طولانی‌تری را برای بتن فراهم می‌آورند. افزودنی‌های هوازا (حباب‌زا) در بتن، با ایجاد حباب‌های هوایی میکروسکوپی در بتن، مقاومت در برابر یخ زدگی را بهبود می‌بخشد. سایر افزودنی‌های شیمیایی شامل بازدارنده‌های خوردگی، عوامل ضد آب و افزودنی‌های تخصصی که برای الزامات و عملکردهای ویژه‌ای طراحی شده‌اند.

۱-۱-۲- افزودنی‌های معدنی

افزودنی‌های معدنی موادی می‌باشند که بعنوان جایگزین و یا مواد سیمانی مکمل در بتن کاربرد دارند. از جمله افزودنی‌های معدنی رایج عبارتند از: خاکستر بادی، محصول جانبی حاصل از احتراق زغال سنگ و دوده سیلیس، محصول جانبی تولید فلز سیلیکون. این مواد با کلسیم واکنش داده و هیدروکسید تولید شده طی واکنش هیدراتاسیون سیمان منجر به تشکیل ترکیبات اضافی در سیمان می‌شود که به افزایش مقاومت، پایداری و کاهش نفوذپذیری می‌گردد. سرباره کوره ذوب آهن نیز یکی دیگر از افزودنی‌های معدنی است منجر به بهبود خواص بتن می‌گردد. استفاده از افزودنی‌های معدنی که محصولات جانبی صنعتی می‌باشند، منجر به کاهش کربن تولید شده از ساخت بتن شده و به عنوان یک مزیت زیست محیطی حائز اهمیت می‌باشد.

۱-۱-۳- تقویت کننده‌های الیافی (فیبری)

تقویت کننده‌های الیافی به عنوان یکی از افزودنی‌های بتن، منجر به بهبود مقاومت کششی (خمشی)، سختی و کاهش ترک خوردگی بتن می‌گردد. انواع مختلفی از این فیبرها همچون الیاف فولادی، الیاف سنتزی و الیاف طبیعی می‌توانند در ساختار و ترکیب بتن به عنوان افزودنی مورد استفاده قرار گیرند. الیاف فولادی استحکام ساختاری را افزایش و انبساط طولی بتن را بهبود می‌بخشد. ویژگی این الیاف، آنها را برای استفاده در مصارف صنعتی، کف‌سازی‌ها و ساخت تونل‌ها مناسب می‌سازد. الیاف سنتزی همچون الیاف پلی‌پروپیلن یا الیاف پلاستیکی به کاهش و کنترل ترک ناشی از انقباض جمع‌شوندگی بتن شده و به پایداری آن کمک می‌کند. الیاف شیشه‌ای نیز به بتن‌های سبک، استحکام و مقاومت می‌بخشند. افزودن الیاف به بتن نه تنها خصوصیات مکانیکی آن را تقویت می‌کند، بلکه استفاده از آن در جهت کاربرد خاصی را همچون راه‌حلهایی را برای کاربردهای تخصصی مانند بتن تقویت شده با فیبر و یا بتن پاششی میسر می‌سازد.

هدف و عملکرد انواع افزودنی‌ها:

۱- عوامل کاهنده آب (روان کننده بتن)

هدف: افزایش کارایی بتن با کاهش میزان آب مورد نیاز جهت رسیدن به مقاومت مشخص
عملکرد: با پاک‌کردن ذرات سیمان، روانکاری بهتر ذرات را ممکن می‌سازند، اصطکاک را کاهش می‌دهند و تولید مخلوط‌های بتن با خاصیت سیالی و استفاده آسان را ممکن می‌سازند.

۲- شتاب دهنده‌ها

هدف: شتاب دهنده‌ها برای تسریع زمان گیرش بتن استفاده می‌شوند. این مواد در شرایط آب و هوایی سرد و یا زمانی که گیرش سریع بتن و مقاومت اولیه بالا ضروری است، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

عملکرد: با تسریع فرآیند هیدراتاسیون، شتاب‌دهنده‌ها استحکام اولیه بتن را افزایش می‌دهند، جدا کردن سریع بتن از قالب‌بندی، منجر به بارگذاری زود هنگام سازه شده و برنامه‌های ساخت‌وساز را تسریع بخشد.

۳- دیرگیرنده‌ها

هدف: زمان گیرش بتن را کاهش و کارایی بتن را افزایش می‌دهند. در شرایطی که تاخیر در زمان گیرش مد نظر باشد، این امکان را فراهم می‌سازد تا بتن در مدت زمان بیشتری به

گیرش مد نظر برسد.

عملکرد: دیرگیرنده‌ها با به تاخیر انداختن واکنش هیدراسیون، زمان بیشتری را برای حمل و نقل، ریختن و پردازش بتن فراهم می‌کنند. این امر به ویژه در پروژه‌های ساختمانی بزرگ و یا در شرایط آب و هوایی گرم بسیار مورد توجه قرار می‌گیرد.

۴- هوازها

هدف: هوازها با وارد کردن حباب‌های ریز هوا در بتن، مقاومت آن را در برابر چرخه‌های یخ زدگی و ذوب افزایش می‌دهند و در نتیجه منجر به افزایش کارایی می‌گردند.

عملکرد: هوازها با ایجاد شبکه‌ای از حفره‌های هوایی کوچک، فضایی را برای گسترش فضای کافی برای انجماد آب فراهم می‌کنند. این امر از تشکیل بلورهای یخ که می‌توانند منجر به خوردگی و ترک خوردگی بتن شود، به ویژه در شرایط آب و هوایی که چرخه‌های مکرر یخ‌زدگی و ذوب در جریان است، جلوگیری می‌کند.

۵- افزودنی‌های معدنی (خاکستر بادی، دوده سیلیس، سرباره کوره بلند)

هدف: افزودنی‌های معدنی جایگزین‌های جزئی برای سیمان پرتلند هستند یا به عنوان مکمل عمل کرده و بهبود خواص بتن و پایداری آن کمک می‌کنند.

عملکرد: این افزودنی‌ها با هیدروکسید کلسیم تولید شده در فرایند هیدراسیون واکنش داده و ترکیب شیمیایی حاصل منجر به افزایش مقاومت، کاهش نفوذپذیری و کاهش اثرات مخرب زیست محیطی می‌گردد.

۶- الیاف تقویت کننده

هدف: الیاف تقویت کننده، مقاومت کششی، چقرمگی و مقاومت در برابر ترک خوردگی بتن را افزایش می‌دهد. افزودن این الیاف همچون فولادی، سنتزی، شیشه‌ای یا طبیعی منجر به تقویت شبکه سه بعدی بتن می‌گردد و این شبکه به کنترل ترک خوردگی و بهبود مقاومت در برابر ضربه و افزایش دوام و عملکرد بتن می‌گردد.

۱-۲- مکانیسم عملکرد

مکانیسم فیزیکی و شیمیایی و تاثیر انواع افزودنی‌ها بر خواص سیمان پیچیدگی خاص خود را دارد. از نظر شیمیایی، این مواد اغلب با اجزای سیمانی به ویژه سیمان پرتلند در طی فرایند هیدراسیون بر هم واکنش می‌دهند. به عنوان مثال، مواد افزودنی کاهنده آب بروی سطح ذرات سیمان عمل می‌کنند و با

ایجاد بار منفی باعث پخش شدن آنها به طور موثر می‌شوند. این کاهش تجمع ذرات، خاصیت سیالی (روانی) مخلوط را افزایش می‌دهد. شتاب‌دهنده‌ها، کندکننده‌ها، بر سینتیک هیدراتاسیون سیمان تاثیر می‌گذارند و باعث تسریع و یا تاخیر در تشکیل هیدرات‌ها می‌شوند. افزودنی‌های معدنی مانند خاکستر بادی و دوده سیلیس در واکنش‌های پوزولانی شرکت می‌کنند. به این صورت که با هیدروکسید کلسیم تولید شده در واکنش هیدراتاسیون واکنش داده و منجر به تشکیل ترکیبات سیمانی بیشتری می‌گردند. افزایش ترکیبات سیمانی منجر به افزایش مقاومت و کاهش نفوذپذیری سیمان می‌گردد. از طرفی تقویت‌کننده‌های الیافی (الیاف فولادی، مصنوعی، شیشه‌ای یا طبیعی) به صورت فیزیکی با ایجاد شبکه‌ای در ساختار بتن، به کنترل ترک خوردگی، مقاومت خمشی و چقرمگی مواد می‌گردد. در واقع، این الیاف، با فعل و انفعالات شیمیایی ترکیب و واکنش‌پذیری ماتریس سیمانی را تغییر می‌دهند. در حالی که مکانیسم‌های فیزیکی، به ویژه در مورد الیاف، تقویت‌کننده‌های می‌باشند که عملکرد کلی بتن را افزایش می‌دهد. ترکیب این دو مکانیسم منجر به دستیابی به خواص مناسب مطلوب و مورد نظر در مخلوط های بتن و به کارگیری در کاربردهای خاص ساختمانی کمک می‌کند.

مکانیسم‌های مختلف القا شده ناشی از مواد افزودنی به طور چشم گیری در ویژگی‌های کلیدی بتن همچون: مقاومت، پایداری و کارایی نقش مهمی دارند. از دیگر ویژگی‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱-۲-۱- افزایش مقاومت فشاری

افزودنی‌های شیمیایی: برخی از ترکیبات شیمیایی، همچون فوق روان کننده‌ها و تسریع کننده‌ها، با بهبود واکنش هیدراتاسیون منجر به تشکیل ریزساختار سیمانی متراکم تر و یکنواخت تر می‌گردد. مواد افزودنی معدنی مانند دوده سیلیس و خاکستر بادی به افزایش ترکیب درصد مواد سیمانی در ساختار بتن کمک کرده و در نتیجه مقاومت افزایش می‌یابد.

تقویت کننده‌های الیافی: حضور فیزیکی الیاف، به خصوص الیاف فولادی و سنتز شده، مقاومت کششی را به ماتریس ساختار بتونی اضافه می‌کند. در واقع الیاف‌ها همچون تقویت کننده عمل می‌کنند. به این صورت که از ایجاد ترک و از گسترش ترک در ساختار بتن جلوگیری می‌کنند. این خاصیت مقاومت کلی بتن را افزایش می‌دهد.

۱-۲-۲- بهبود دوام و پایداری

افزودنی‌های شیمیایی: هوازها با تشکیل و ایجاد حباب‌های میکروسکوپی در ساختار بتن، مقاومت بتن در برابر یخ‌زدگی را افزایش و منجر به سازگاری آن در آب و هوای سرد می‌گردد. ضد خوردنده‌ها، به‌عنوان محافظ، تقویت‌کننده‌های الیافی فولادی را از تخریب بازداشته و در نتیجه منجر به استفاده درازمدت و دوام این افزودنی می‌گردد.

افزودنی‌های معدنی: واکنش‌های پوزولانی با افزودنی‌های معدنی منجر به ایجاد بتن با ساختاری متراکم‌تر و کاهش نفوذپذیری شده که این امر منجر به کاهش نفوذ آب می‌گردد. افزایش نفوذناپذیری، با کاهش نفوذ مواد شیمیایی و مضر در درون ساختار بتن، به پایداری و مقاومت بتن در برابر عوامل محیطی کمک می‌کند.

تقویت‌کننده‌های الیافی: الیاف‌ها جمع‌شدگی، کاهش حجم بتن و از دست دادن آب مویرگی بتن (شرینجیج خشک) را کنترل کرده و ترک‌های بتن را به حداقل مقدار می‌رساند. همچنین این الیاف‌ها با بهبود مقاومت بتن، به پایداری بتن کمک می‌کنند.

۱-۲-۳- کارایی بتن

افزودنی‌های شیمیایی: عوامل کاهنده آب، مانند روان‌کننده‌ها و فوق روان‌کننده‌ها، با کاهش ترکیب درصد نسبت آب به سیمان، کارایی بتن و اختلاط مخلوط بتن را بهبود می‌بخشد. این امر منجر به سهولت در استفاده و در تکمیل کار با بتن، موثر می‌باشد.

کندکننده‌ها: این مواد، با کاهش زمان گیرش، دوره کارایی را افزایش داده و مدت زمان بیشتری را برای حمل، جابجایی و تکمیل بتن می‌دهند. این نوع اختلاط با دوره عمل‌آوری بال، در پروژه‌های ساختمانی بزرگ یا در شرایط آب و هوایی نامساعد بسیار مهم می‌باشد.

۱-۲-۴- ویژگی‌های مهم دیگر

افزودنی‌های شیمیایی: افزودنی‌های شیمیایی ویژه همچون کاهنده جمع‌شوندگی بتن، با کنترل جمع‌شوندگی بتن، امکان وجود ترک در بتن را به حداقل می‌رسانند. اصلاح‌کننده‌های رئولوژی به کنترل ویژگی‌های بتن خود متراکم کمک کرده و نتیجه به پایداری بین ویژگی روان‌پذیری و پایداری بتن منجر می‌گردد.

تقویت‌کننده‌های الیافی: علاوه بر مقاومت و پایداری بتن،

الیاف‌ها در تقویت دیگر ویژگی‌ها مانند شکل‌پذیری، چقرمگی و مقاومت در برابر ضربه نقش مهمی دارند. این ویژگی‌ها منجر به کاربرد آنها در شرایطی که کارایی و عملکرد بتن تحت شرایط مختلف بسیار مهم است، می‌گردد.

مکانیسم‌های فیزیکی و شیمیایی افزودنی‌ها که هر یک در شرایط خاصی کاربرد دارند، در نهایت منجر به ساخت بتن‌هایی با ویژگی‌های منحصر به فرد همچون: افزایش مقاومت و استحکام، افزایش پایداری، کارایی مطلوب و مورد نظر و دیگر ویژگی‌های اساسی و مهم مورد نیاز می‌گردند. این ویژگی‌های ظریف به مهندسين و صنعتگران ساخت و ساز این امکان را می‌دهد که فرمولاسیون و نحوه ساخت بتن را بر اساس ویژگی‌های مورد نیاز خود تطابق داده و در پروژه‌های متنوع عمرانی به‌کار گیرند.

۱-۳- اثرات بر خواص سیمان

با وجود اینکه تاثیر هر یک از افزودنی‌ها بر خواص سیمان و بتن متفاوت می‌باشند، با تجزیه و تحلیل دقیق و انجام آزمایش، می‌توان به تفاوت در ویژگی در اثر افزودن هر یک از این افزودنی‌ها پی برد. حضور عوامل کاهنده آب، که نمونه‌ای از فوق روان‌کننده‌ها هستند، با کاهش نسبت آب به سیمان کارایی قابل توجهی را به سیمان می‌بخشند. براساس پژوهش انجام شده توسط نویل و بروکس^۱، استفاده از افزودنی‌های کاهنده آب، به میزان قابل توجهی نتایج تست اسلامپ بتن (آزمون جریان‌پذیری یا روانی بتن) را از ۷۵ میلی‌متر به ۱۹۵ میلی‌متر افزایش داده است. این نتایج در حالی که به‌دست آمد که نسبت ترکیب درصد آب به سیمان ثابت بوده است که نشان از افزایش کارایی بتن توسط افزودنی کاهنده آب می‌باشد.

شتاب‌دهنده‌ها همچون کلسیم کلرید، مراحل اولیه واکنش هیدراسیون را تسریع کرده که این امر منجر به افزایش قابل توجه در مقاومت و گیرش اولیه شده است. پژوهش انجام گرفته توسط مالهورترا و مترا^۲، که با افزودن ۲ درصد وزنی سدیم کلرید به سیمان انجام گردید، با افزایش ۲/۵ برابری مقاومت فشاری همراه بود.

افزودنی‌های حباب‌زا، همچون رزین وینسول، با ایجاد حباب‌های کوچک در ساختار بتن، مقاومت در برابر چرخه ذوب-انجماد بتن را افزایش می‌دهند. مطالعه انجام شده

1- Neville, A. M., & Brooks, J. J. 2010. Concrete Technology. Pearson Education Limited
2- Malhotra, V. M., & Mehta, P. K. 1996. Calcium chloride in concrete. CRC Press

توسط میدنس و همکاران^۱ اثربخشی افزودنی‌های حباب را در آسیب‌های ناشی از چرخه ذوب-انجماد به اثبات رسانیده است.

افزودنی‌های معدنی، از جمله خاکستر بادی، هم بر مقاومت اولیه و هم بر مقاومت نهایی تاثیر می‌گذارند. در یک مطالعه جامع توسط توماس و گوپتا^۲ (۲۰۱۳)، ترکیب خاکستر بادی منجر به افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن، بصورت قابل توجهی شده است.

تقویت‌کننده‌های الیافی، مانند الیاف پروپیلن، چقرمگی و مقاومت در برابر ضربه را افزایش می‌دهند. بر اساس پژوهش انجام گرفته توسط مباشر و همکاران^۳ (۱۹۹۴)، افزایش سختی قابل توجه، کاهش ترک‌های عرضی بتن و همچنین قابلیت جذب انرژی با افزودن تقویت‌کننده‌های الیافی مشاهده گردید. همچنین افزایش چقرمگی در اثر افزودن تقویت‌کننده فیبری فولادی ثبت گردید.

با وجود اینکه مثال‌های ذکر شده بر تاثیرات مثبت افزودنی‌های سیمان تاکید داشته‌اند، در نظر گرفتن تطابق نوع افزودنی نسبت به الزامات و نیازهای پروژه و همچنین در نظر گرفتن معایب احتمالی حائز اهمیت می‌باشد. تاثیر افزودنی‌ها بر اساس عواملی همچون نوع طراحی مخلوط، شرایط محیطی و کاربرد، متفاوت می‌باشند. با این حال، مطالعات و مثال‌ها، تاکید بر تنوع کاربرد و هدفمند بودن افزودنی‌ها در ایجاد خواص متنوع سیمانی و بتنی در جهت کاربرد و رفع نیازهای پروژه‌های ساختمانی متنوع می‌باشند.

۱-۴-۴- واکنش بین افزودنی‌ها و ترکیبات سیمانی

استفاده از افزودنی‌های متنوع در بتن، منجر به افزایش (هم‌افزایی) و یا حتی کاهش اثرات مثبت بالقوه در بتن می‌گردد. این افزایش و یا کاهش بستگی به ویژگی‌های ذاتی افزودنی‌ها دارد. تشخیص این امر در عملکرد بتن بسیار موثر می‌باشد.

۱-۴-۱- هم‌افزایی

عملکرد افزودنی‌های هم‌افزا: در برخی موارد، به‌کارگیری افزودنی‌های مختلف در کنار یکدیگر منجر به افزایش عملکرد کلی می‌گردد. به عنوان مثال استفاده از عوامل کاهنده آب (فوق‌روان‌کننده‌های بتن) و دیرگیرکننده‌ها ضمن افزایش مدت زمان گیرش، کارایی و عملکرد بتن را حفظ می‌نماید.

افزایش مقاومت: هم‌افزاها با ترکیب مواد افزودنی معدنی (خاکستر بادی و میکروسیلیس) با فوق‌روان‌کننده‌ها، نیز ایجاد می‌شوند. واکنش‌های پوزولانی ناشی از افزودنی‌های معدنی منجر به افزایش مقاومت، و فوق‌روان‌کننده‌ها نیز با افزایش پراکندگی ذرات ریزتر در ترکیب منجر به بهینه‌سازی قرارگیری ذرات بصورت یکنواخت‌تر در ماتریس ساختاری بتن می‌شوند.

۱-۴-۲- برهم‌کنش و تضادهای بالقوه

تقابل دیرگیرکننده‌ها و زودگیرکننده‌ها: استفاده همزمان از دیرگیرکننده‌ها و زودگیرکننده‌ها منجر به ایجاد تقابل در خواص می‌گردد. زیرا زودگیرکننده‌ها بر خلاف دیرگیرکننده‌ها مدت زمان گیرش را تسریع می‌کنند. میزان اثربخشی هر یک در کنار دیگری ممکن است به طور کلی مدت زمان گیرش را تحت تاثیر قرار داده و غیر قابل کنترل کند. به همین منظور استفاده بهینه مقدار موردنیاز بر اساس هدف مد نظر بسیار مهم می‌باشد.

ناهمگونی شیمیایی: برخی از افزودنی‌ها منجر به ایجاد ناهمگونی در ترکیب شیمیایی می‌گردند که در نتیجه واکنش‌های نامطلوب به وجود می‌آیند. به عنوان مثال استفاده از عوامل کاهنده آب به مقدار مشخص بالایی منجر به کاهش کارایی در صورت ترکیب با افزودنی‌های حباب‌زا و یا افزودنی‌های تنظیم کننده زمان گیرش (دیرگیرکننده‌ها و زودگیرکننده‌ها) از خود نشان دهند. اطلاع و شناخت این برهم‌کنش‌ها برای جلوگیری از اثرات متقابل بسیار ضروری می‌باشد.

۱-۴-۳- فعل و انفعالات وابسته به ترکیبات شیمیایی

سیمان‌های پرتلند و سیمان‌های مرکب: برهم‌کنش و تقابل بین افزودنی‌ها در سیمان، بر اساس نوع سیمان متغیر می‌باشد. سیمان‌های مرکب، سیمان‌های حاوی افزودنی (سیمان‌های حاوی مکمل) همچون خاکستر بادی و یا سرباره نسبت به بتن که فقط از سیمان پرتلند استفاده می‌شود، ممکن است رفتار متفاوتی را از خود نشان دهند. واکنش‌های پوزولانی ناشی از سیمان‌های مکمل با تاثیر بر کلسیم هیدروکسید موجود در ترکیب، بر عملکرد سایر افزودنی‌ها اثرات قابل توجهی نشان دهد.

تاثیر مواد افزودنی شیمیایی: علاوه بر موارد ذکر شده، ترکیب مواد سیمانی بر عملکرد افزودنی‌های شیمیایی نیز تاثیر گذار می‌باشد. به عنوان مثال میزان واکنش‌پذیری خاکستر بادی یا سرباره به میزان مشخصی بر خواص و عملکرد افزودنی‌های عوامل کاهنده آب تاثیرگذار است. بنابراین شناخت ویژگی‌های

- 1- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. 2003. Concrete. Prentice Hall
- 2- Thomas, M. D. A., & Gupta, R. C. 2013. Use of Fly Ash in Concrete: A Review. Journal of Civil Engineering and Architecture, 7(11), 1397-1405
- 3- Mobasher, B., Peled, A., & Verbeck, G. J. 1994. Toughness enhancement in steel-fiber concrete. ACI Materials Journal, 91(5), 447-456

خاص مواد سیمانی برای بهینه‌سازی برهمکنش بین مواد، بسیار مهم می‌باشد.

هم افزایی و تضاد بین افزودنی‌های مختلف در بتن فرایندی پیچیده بوده و به عواملی همچون عملکرد ویژه و منحصربه‌فرد افزودنی، میزان استفاده از افزودنی و نحوه ترکیب با مواد سیمانی وابسته است. برای دستیابی به نتیجه مطلوب و مدنظر، انجام آزمایش‌ها، در نظر گرفتن هدف پروژه و تنظیم دقیق و اصولی ترکیب مواد افزودنی از اهمیت بسیاری برخوردار است.

۱-۵- روش‌های بهینه‌سازی

بهینه‌سازی استفاده از افزودنی‌ها در بتن شامل مواردی همچون: کنترل میزان استفاده از افزودنی، سازش‌پذیری و زمان‌بندی صحیح افزودن آن در طی فرایند اختلاط می‌باشد. همان‌طور که اشاره گردید، در مرحله اول مقدار افزودنی مورد استفاده باید به‌صورتی باشد که ضمن ایجاد تعادل در ترکیب، عملکرد کلی بتن تحت تاثیر قرار نگیرد. همان‌طور که استفاده مازاد از افزودنی منجر به کاهش عملکرد می‌گردد، استفاده ناکافی نیز منجر به عدم دستیابی به خواص مطلوب و مورد نظر از افزودنی شود. آزمایش‌های مختلف جهت تعیین ترکیب درصد و مقدار مطلوب مورد نظر از افزودنی جهت ترکیب با بتن که در پروژه خاصی باید به کار گرفته شوند، باید انجام گیرد. میزان سازگاری بین افزودنی‌های متنوع مورد استفاده بسیار ضروری می‌باشد.

۱-۶- ملاحظات زیست‌محیطی و اقتصادی

تاثیرات زیست محیطی استفاده از افزودنی‌ها در بتن چند جانبه می‌باشد. در حالی که برخی از افزودنی‌ها مانند افزودنی‌های معدنی (خاکستر بادی و سرباره) که به‌عنوان محصول جانبی بوده و با کم کردن درصد استفاده از سیمان پرتلند به پایداری محیط زیست و چالش‌های مرتبط با آن کمک می‌کند. از طرفی دیگر، به‌عنوان مثال، تولید برخی از افزودنی‌های شیمیایی فرایندی همراه با مصرف انرژی فراوان بوده که به انتشار گازهای گلخانه‌ای منجر می‌شود. علاوه بر این استخراج و فرآوری مواد خام افزودنی‌ها ممکن است دربردارنده پیامدهای زیست‌محیطی باشد. برای حل اینگونه مسائل، اهتمام بر یافتن جایگزین‌های پایدار از جمله توسعه استفاده و یافتن افزودنی‌های سازگار با محیط زیست که از منابع تجدیدپذیر و یا پایدار زیست محیطی حاصل می‌گردند، است. ارزیابی جنبه‌های اقتصادی استفاده از افزودنی‌ها شامل ارزیابی کوتاه‌مدت هزینه‌ها و در نظر گرفتن منافع بلندمدت

می‌باشند. با وجود اینکه برخی از افزودنی‌ها هزینه‌های اولیه بیشتری را داشته باشند، استفاده از ترکیب این افزودنی‌های پرهزینه می‌تواند در راستای کاهش هزینه‌ها کمک کننده باشد. این کاهش هزینه از طریق افزایش کارایی بتن، افزایش مقاومت، دوام و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌باشد. علاوه بر موارد ذکر شده، استفاده از افزودنی‌هایی مانند خاکستر بادی و یا دوده سیلیس در جهت شیوه‌های نوین ساخت و ساز پایدار با کاهش اثرات زیست محیطی کمک کننده می‌باشد. از جنبه اقتصادی به کارگیری مستمر افزودنی‌ها وابسته به عواملی همچون در دسترس بودن افزودنی، شرایط اقتصادی بازار و الزامات پروژه ساختمانی می‌باشد. ارزیابی کلی تمامی موارد ذکر شده ملزم به شناخت دقیق افزودنی همراه با اثرات زیست محیطی آن می‌باشد. جایگزین‌های پایدار افزودنی‌ها مانند استفاده از مواد بازیافتی به عنوان افزودنی و افزودنی‌های سازگار با محیط زیست نقش به‌سزایی در کاهش رد پای زیست محیطی دارند. به‌طور همزمان نیز باید هزینه‌های کوتاه مدت با در نظر گرفتن منافع بلندمدت در کنار عملکرد و کاهش اثرات زیست محیطی مورد ارزیابی قرار گرفته شوند. بنابراین، برقراری توازن بین ملاحظات زیست محیطی و عوامل اقتصادی برای داشتن توسعه پایدار اقتصادی ساخت و سازهای بتن یک امر ضروری می‌باشد.

۱-۷- روندهای فعلی و جهت‌گیری‌های آینده

براساس آخرین پیشرفت‌های تکنولوژی در تحقیقات افزودنی‌های سیمان در صنعت، تمرکز ویژه بر روی پایداری، بهینه‌سازی عملکرد و یافتن مواد افزودنی ویژه و جدید می‌باشد. محققان و متخصصان صنعت سیمان همواره در پی یافتن مواد چسبنده با خاصیت سیمانی مانند سیمان‌های ژئوپلیمری و سیمان‌های کلسیم سولفوآلومینات‌ها می‌باشند که رد پای کربن کمتری در مقایسه با سیمان‌های پرتلند بر محیط زیست دارند. علاوه بر این، تاکید قابل توجهی بر استفاده از ترکیب نانوذرات پیشرفته از جمله نانو سیلیس و نانو آلومینا جهت افزایش خواص مکانیکی و مقاومت بتن شده است. استفاده از مواد خود ترمیم شونده و به اصطلاح هوشمند در بتن با هدف ترمیم بتن به‌صورت مستقل که منجر به افزایش طول عمر بتن می‌گردد، بسیار مورد توجه قرار گرفته شده است. در صنعت نیز با اهمیت دادن روزافزون به استفاده از افزودنی‌های سازگار با محیط زیست و بهینه‌سازی طرح‌های اختلاط، جهت دستیابی به پایداری و عملکرد مطلوب و کنترل کیفیت هوشمندانه توجه ویژه‌ای به این امر شده است. با نگاهی به افق پیش رو

و آینده، نشان از در نظر گرفتن و تحقیقات گسترده جهت به کارگیری افزودنی‌های سیمانی در صنعت جهت جذب کربن موجود و کاهش انتشار آلاینده‌های کربن دی اکسید می‌باشد. استفاده از مواد خام جایگزین در صنعت همچون محصولات

جدول ۱- عناوین و موارد مطالعاتی هر یک از محققان در زمینه افزودنی‌های بتن

تاریخ انجام پژوهش (سال میلادی)	نام (اسامی) پژوهشگران	عنوان تحقیق
۲۰۱۸	Scrivener K., & Snellings, R.	در این مقاله مروری انجام شده به بررسی و آنالیز دقیق انواع افزودنی‌ها و تاثیر آنها بر پایداری و خواص بتن، پرداخته شده است.
۲۰۱۸	Bentz, D. P.	ساخت بتن پایدار از طریق افزودنی‌ها: در این پژوهش تمرکز اصلی بر جنبه‌های زیست‌محیطی و عملکرد طولانی‌مدت بتن بوده است.
۲۰۱۳	Mehta, P. K.	فناوری بتن برای توسعه پایدار: این پژوهش در خصوص نقش فناوری بتن در توسعه پایدار از جمله استفاده از افزودنی‌ها جهت بهبود خواص بتن پرداخته است.
۲۰۱۲	Sanjayan, J. G., & Nazari, A.	بتن با ماسه دریایی: بررسی جامع و کلی استفاده از آب دریا و ماسه دریا در بتن به خصوص نقش افزودنی‌ها در بتن این مناطق و چالش‌های مربوطه
۲۰۰۹	Cwirzen, A., & Penttala, V.	ساخت بتن با کارایی بالا با استفاده از افزودنی خاکستر بادی ریز ساختار: بررسی استفاده از خاکستر بادی به عنوان افزودنی در بتن برای دستیابی به عملکرد و مقاومت بالا
۱۹۹۲	Balaguru, P. N., & Shah, S. P.	در این پژوهش تولید سیمان پرتلند کامپوزیتی با افزودنی تقویت کننده الیافی و بررسی انواع مختلف الیاف و تاثیر آن‌ها بر خواص مکانیکی بتن پرداخته شده است.
۱۹۹۱	Ramachandran, V. S., & Beaudoin, J. J.	کتاب راهنمای جامع تکنیک‌های تحلیلی فناوری بتن: در این کتاب راهنما به بررسی اصول، تکنیک‌ها و کاربردها، تجزیه و تحلیل انواع افزودنی‌ها پرداخته شده است.
۲۰۱۴	Scrivener, K.	تصویربرداری الکترونی از پراکندگی ریزساختار سیمانی: در این مقاله از تکنیک‌های تصویربرداری پیشرفته جهت تجزیه و تحلیل ریز ساختار مواد سیمانی از جمله افزودنی‌ها انجام شده است.
۱۹۷۶	Klieger, P., & Ben-Dor, G.	بررسی تاثیر شتاب دهنده‌ها و دیرگیرکننده‌ها بر مقاومت: این پژوهش یک مطالعه کلاسیک در مورد اثرات شتاب دهنده‌ها و دیرگیرکننده‌ها در مقاومت بتن بوده که درکی در مورد عملکرد این افزودنی‌ها در بتن به ما می‌دهد.
۲۰۱۲	Tennis, P. D., Thomas, M. D. A., & Weiss, W. J.	بررسی بتن ژئوپلیمری جهت حفاظت از محیط زیست: این پژوهش به بررسی بتن ژئوپلیمری که در آن مواد با خاصیت سیمانی و چسبندگی، جایگزین درصد مشخصی از سیمان شده است، پرداخته و نقش افزودنی‌ها در بهبود خواص آن بررسی شده است.
۲۰۰۴	Gartner, E. M.	پژوهش با رویکرد صنعتی برای تولید سیمان با حداقل مقدار CO ₂ : این پژوهش به بررسی و یافتن مواد افزودنی مناسب و جایگزین با حداقل میزان CO ₂ تولیدی می‌پردازد.
۲۰۱۵	Juenger, M. C. G., & Siddique, R.	تکنولوژی‌ها جدید در صنعت افزودنی‌های سیمانی: بررسی جامع جدیدترین تکنولوژی‌های افزودنی‌های سیمانی و بررسی تاثیر آنها بر مقاومت و پایداری بتن
۱۹۹۶	Banfill, P. F. G.	بررسی رئولوژی سیمان‌های حاوی مواد افزودنی و بررسی کارایی آنها
۲۰۰۱	Ferraris, C. F.	بررسی خواص رئولوژی سیمان با عملکرد بالا: بررسی عمیق در مورد تاثیر خواص رئولوژیکی سیمان با مواد افزودنی با تاکید بر میزان تاثیر افزودنی‌ها در عملکرد بالا
۲۰۰۶	Shi, C., & Krivenko, P. V.	سیمان کلسیم سولفوآلومینات: بررسی تحقیق و توسعه‌ای بر خواص و کاربردهای سیمان کلسیم سولفوآلومینات

جانبی صنعتی و زباله‌های کشاورزی برای توسعه و استفاده از افزودنی‌های پایدار رو به رشد خواهد بود. علاوه بر این موارد، به کارگیری فناوری‌های جدید دیجیتال همچون هوش مصنوعی و ابزار کنترلی هوشمند جهت مدل‌سازی و پیش‌بینی طرح‌های اختلاط بتن، صنعت سیمان را به طور قابل توجهی متحول سازد. پیشرفت فناوری‌های مربوط به چاپ سه بعدی جهت ساخت و ساز در محل با استفاده از مواد سیمانی، از دیگر چشم‌اندازهای آینده این صنعت می‌باشد. بطور کلی، این گونه به نظر می‌رسد که مسیر تحقیقات افزودنی‌های سیمان در جهت صنعت سبزتر و نوآورانه‌تر در حرکت می‌باشد. راهکارهای پیشرفته و فناورانه با در نظر گرفتن ملاحظات زیست محیطی و عملکردی بصورت همزمان، در چشم‌انداز تحول مصالح ساختمانی نقش ویژه‌ای خواند داشت.

۲- مروری بر تحقیقات گذشته

تحقیقات گسترده‌ای در زمینه افزودنی‌های بتن انجام گرفته شده است که در جدول ۱ عناوین و موارد مطالعاتی هر یک از محققان آورده شده است.

۳- موارد مطالعاتی

مثال‌هایی از موارد موفقیت‌آمیز استفاده افزودنی‌ها در پروژه‌های ساختمانی انجام شده در زیر آورده شده است:

مورد مطالعاتی ۱: بتن با کارایی بالا با افزودنی دوده میکروسیلیس

در یک پروژه ساخت پل در اسکاندیناوی، مهندسان قصد داشتند دوام و استحکام سازه‌های بتنی را در مجاورت یک ساحل با شرایط آب و هوایی سرد افزایش دهند. بدین منظور، دوده میکروسیلیس (افزودنی معدنی) را به مخلوط بتن اضافه کردند. دوده سیلیس به دلیل خواص پوزولانی منجر به بهبود ریزساختار بتن، کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید می‌شود. در این پروژه ساخت پل، علاوه بر افزایش طول عمر سازه، نیاز به تعمیر و نگهداری در طول استفاده را به حداقل رسانید. همه این ویژگی‌ها ناشی از اثربخشی افزودنی میکروسیلیس به عنوان افزایش دهنده دوام و طول عمر در شرایط آب و هوایی سخت می‌باشد.

مورد مطالعاتی ۲: بتن با افزودنی الیافی در پوشش تونل

در یک پروژه ساخت تونل در یک منطقه زلزله‌خیز، از

بتن الیافی به منظور افزایش افزایش یکپارچگی ساختار بتن استفاده گردید. الیاف فولادی به منظور افزایش مقاومت کششی و خاصیت شکل‌پذیری بتن استفاده گردید. این الیاف مقاومت بتن را نیز در برابر ترک‌خوردگی‌های ناشی از زمین‌لرزه افزایش داد. استفاده از بتن با افزودنی الیافی نه تنها ایمنی و دوام و پایداری تونل را افزایش داد، بلکه نیاز به تعمیرات پس از ساخت را به کاهش داد. موفقیت این پروژه تاثیر و کارایی تقویت کننده‌های الیافی را در کاهش تاثیر بارهای دینامیکی برجسته ساخت.

مورد مطالعاتی ۳: بتن خودتراکم برای ساخت و سازهای با ارتفاع زیاد

در پروژه ساخت یک ساختمان مسکونی با ارتفاع زیاد، مهندسان با چالش‌های مرتبط با پیچیدگی قالب‌های بتن و نیاز مبرم به بتن با کارایی بسیار بالا مواجه بودند. بتن خودتراکم که دربردارنده عوامل کاهنده آب و افزودنی‌های اصلاح کننده ویسکوزیته می‌باشد، مورد استفاده قرار گرفت. این ترکیب با نوآوری جدید در پروژه استفاده گردید و بتن بدون نیاز به هدایت فیزیکی و مکانیکی در قالب‌های پیچیده جریان یافته و تشکیل شده‌اند. استفاده موفقیت‌آمیز از این نوع بتن علاوه بر بهبود کارایی کلی بتن، افزایش کارایی ناشی از افزودنی‌ها را به وضوح نشان داد.

موارد مطالعاتی و پروژه‌های عملی انجام شده که به آنها اشاره گردید نشان دهنده کارایی و عملکرد بتن‌های حاوی افزودنی در شرایط واقعی و عملی و نشان از اهمیت ویژه آن‌ها در بهبود خواص می‌باشد.

۴- جمع‌بندی و خلاصه

بصورت خلاصه، در این پژوهش به بررسی انواع افزودنی‌ها پرداخته و به بررسی نقش‌های مختلف هر یک به عنوان ایجادکننده بتن با ویژگی متمایز پرداخته شده است. از بررسی افزودنی‌های شیمیایی که به بهبود کارایی کمک می‌کنند گرفته تا افزودنی‌های معدنی که در افزایش مقاومت نقش پیدا می‌کنند و افزودنی‌های الیافی که به در مقاومت کششی نقش دارند، انجام شده است. هر یک از افزودنی‌ها نقش کلیدی و مهمی جهت آماده‌سازی بتن در جهت و هدف خاصی را دارند. میزان اهمیت این افزودنی که نقش به‌سزایی در بهبود کارایی، افزایش مقاومت، طول عمر، دوام و سایر مزایای اقتصادی قابل چشم‌پوشی نمی‌باشد. بنابراین ضرورت و اهمیت انتخاب نوع افزودنی نیز بر اساس هدف و نوع پروژه برای دستیابی به اهداف

3- Gao, C., Yang, D., & Yu, J. (2013). Mechanical properties of fiber reinforced concrete after high temperature.

4- Richard, P., & Cheyrezy, M. (1994). Reactive powder concretes with high ductility and 200-800 MPa compressive strength.

5- Bamonte, P., & Gambarova, P. G. (2010). Thermal and Mechanical Properties at High Temperature of a Very High-Strength Durable Concrete.

6- Tai, Y.-S., Pan, H.-H., & Kung, Y.-N. (2011). Mechanical properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete following exposure to high temperature reaching 800°C. Nuclear Engineering and Design.

7-Richard, P., & Cheyrezy, M. (1995). Composition of Reactive Powder Concretes. Cement and Concrete Research.

8- Xiao, J., & Falkner, H. (2006). On residual strength of high-performance concrete with and without polypropylene fibres at elevated temperature. Fire Safety Journal.

9- Qin, D., & Zhao, L. (2011). Compressive strength of fiber reinforced slag concrete at and after high temperature. Henan Building Materials, 6(60-61) [in Chinese].

10- British Standard Institute. (1992). Eurocode 2: Design of Concrete Structures -Part 1.2: General Rules -Structural Fire Design. BS EN, X.

11- American Concrete Institute. (1989). Guide for Determining the Fire Endurance of Concrete Elements. ACI: 216R-89R, 1989.

12- Concrete Association of Finland. (1991). High Strength Concrete Supplementary Rules and Fire Design. RakMK B4, 1991.

پروژه‌های ساختمانی شناخته شده است. کاربرد و استفاده از این افزودنی‌ها با در نظر گرفتن تضادها و هم‌افزایی‌ها در کنار یکدیگر از عوامل مهم دیگر است که باید بررسی و در نظر گرفته شود. با توجه به پیشرفت‌های کنکونی و افق آینده در خصوص پیشرفت و تکنولوژی‌های جدید در صنعت سیمان، تحقیقات مداوم و استفاده از افزودنی‌هایی با نوآوری‌های جدید، از اهمیت بسیار زیادی برخوردار می‌باشد. در این شاخه پویا و در حال پیشرفت به کارگیری و استفاده از نوع مطلوب افزودنی جهت پیشبرد کارایی، دوام و مسائل زیست محیطی در ساخت و سازهای مدرن بسیار مهم می‌باشد.

منبع:

- Bhatt Hiten J., Prajapati Darshan P, Abarar A. Khalak, Mehul J. Patel, " Advancements in Cement Technology: A Comprehensive Review of Additives and Their Impact on Material Properties", International Journal of Research Publication and Reviews, Vol 4, no 12, pp 1105-1112, December 2023

منابع مقاله:

1- Abid, M., Hou, X., Zheng, W., & Hussain, R. R. (2017). High temperature and residual properties of reactive powder concrete – A review. Construction and Building Materials.

2- Zheng, W., Luo, B., & Wang, Y. (2014). Microstructure and mechanical properties of RPC containing PP fibres at elevated temperatures. Construction and Building Materials.

ماهنامه علمی تخصصی
فناورک سیمان

فین آوری سیمان

WWW.
cementtechnology

کاملترین مرکز آمار و اطلاعات علمی و تخصصی صنعت سیمان

واحد پذیرش آگهی
تلفن: ۰۲۱- ۲۲۸۶۱۳۴۳
۰۲۱- ۲۲۸۸۳۳۰۶
فکس: ۰۲۱- ۲۲۸۹۱۵۹۳