بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی عمران

پایان‌نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

مهندسی عمران- سازه

بررسی خواص مکانیکی بتن پودری واکنش‌پذیر الیافی با استفاده از مواد نانو سیلیس

استاد راهنما:

دکتر حسینعلی رحیمی

استاد مشاور:

دکتر رضا مرشد

پژوهش و نگارش:

فرهاد کشاورزیان

پاییز ۱۳۹۲

تقدیم به آنان که وجودم جز هدیه وجودشان نیست

پدر و مادر عزیزم

و تقدیم به همسر مهربانم

که مسیح وار با صبرش در تمامی لحظات رفیق راه بود

چکیده

پیشرفت‌های اخیر در مواد جدید و افزودنی‌های شیمیایی منجر به تولید انواع جدیدی از بتن‌ها شد، مانند بتن‌های با عملکرد بالا، بتن‌های با مقاومت بالا و بتن‌های با عملکرد (مقاومت) فوق‌العاده زیاد.

بتن پودری واکنش‌پذیر یکی از انواع بتن‌های با مقاومت فوق‌العاده زیاد است که اولین بار در فرانسه تولید شد. بتن‌های پودری واکنش‌پذیر به‌عنوان مواد با پایه سیمانی دارای خواص ممتازی هستند، شامل مقاومت فشاری در محدوده ۲۰۰ تا ۸۰۰ MPa و انرژی گسیختگی تا ۴۰ KJm^{-2}. اجزای اصلی این بتن، سیمان پرتلند، دوده سیلیس، پودر کوارتز، ماسه سیلیسی و فوق روان‌کننده هستند. مطالعات گذشته نشان می‌دهد بتن با مقاومت بالاتر، شکنندگی بیشتری دارد. اضافه کردن مقدار مشخصی از الیاف کوتاه فولادی به ماتریس بتن می‌تواند انعطاف‌پذیری و طاقت آن را بهبود دهد.

خواص مکانیکی بتن پودری واکنش‌پذیر توسط بسیاری از محققان مورد بررسی قرار گرفته است، ولی مطالعه‌ای در زمینهٔ استفاده از تکنولوژی نانو مخصوصا نانو مواد در بتن پودری واکنش‌پذیر وجود ندارد. بنابراین، این تحقیق در ارتباط با استفاده از نانو ذرات سیلیس در بتن پودری واکنش‌پذیر الیافی است.

هدف اصلی این پایان نامه بررسی خواص مکانیکی بتن پودری واکنش‌پذیر الیافی شامل نانو ذرات سیلیس است. در تحقیق حاضر، از روش تاگوچی به‌منظور طراحی آزمایش‌ها استفاده شده است؛ به طوری‌که تعداد آزمایشات از ۲۱۸۷ آزمایش به ۱۸ آزمایش کاهش یافت. تاثیر فاکتورهای مختلف مخصوصا نانو ذرات سیلیس و الیاف فولادی بر خواص مکانیکی بتن پودری واکنش‌پذیر الیافی بررسی شده است. همچنین نتایج، به‌وسیله بررسی‌های ریزساختاری تکمیل شد.

نتایج نشان داد پودر نانو سیلیس و الیاف فولادی می‌توانند در بهبود خواص مکانیکی بتن پودری واکنش‌پذیر الیافی موثر واقع شوند. مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی نسبت‌های بهینه

اختلاط به ترتیب MPa،۱۵۵/۳ MPa ۸/۲۶ و MPa ۵۳/۹ بودند، که نسبت به نمونه‌هـای کنتـرل به ترتیب ۱/۶٪، ۸۲/۶٪ و ۴۱/۵٪ افزایش می‌دهند.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه‌ای بر موضوع پایان‌نامه ۱

۱-۱ . مقدمه..... ۲

۱-۲ . بتن‌های با مقاومت بالا..... ۳

۱-۲-۱ . روش‌های ساخت بتن مقاومت بالا ۵

۱-۲-۲ . بتن پودری واکنش‌پذیر (RPC) ۹

۱-۲-۳ . کاربردهای بتن پودری واکنش‌پذیر ۱۴

۱-۳ . بتن الیافی..... ۱۵

۱-۴ . کاربرد نانو تکنولوژی در ساختمان..... ۱۵

۱-۵ . طراحی آزمایش‌ها..... ۱۷

۱-۵-۱. تعاریف و اصطلاحات ۱۷

۱-۵-۲ . اصول اساسی ۱۹

۱-۵-۳ . انواع روش طراحی آزمایش ۲۰

۱-۵-۴ . طراحی آزمایش به روش تاگوچی ۲۲

۱-۵-۵ . آنالیز داده‌ها به روش آنالیز واریانس (ANOVA) ۲۹

۱-۶ . تعریف مسئله..... ۳۲

۱-۷ . اهداف پایان نامه..... ۳۳

۱-۸ . مروری بر فصول پایان نامه..... ۳۴

۱-۸-۱ . فصل دوم- مرور بر ادبیات فنی..... ۳۴

۱-۸-۲ . فصل سوم- انتخاب مصالح ۳۴

۱-۸-۳ . فصل چهارم- روش تحقیق ۳۴

۱-۸-۴ . فصل پنجم- ارائه نتایج و تحلیل آن‌ها ۳۴
۱-۸-۵ . فصل ششم- نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۳۵
فصل دوم: مرور بر ادبیات فنی ۳۶
۲-۲ . تحقیقات انجام شده در مورد بتن پودری واکنش‌پذیر ۳۷
فصل سوم: انتخاب مصالح ۶۱
۳-۱ .مقدمه ۶۲
۳-۲ . سیمان ۶۲
۳-۳ . دوده سیلیس ۶۵
۳-۴ . نانو ذرات سیلیس ۶۷
۳-۵ . فوق روان‌کننده ۶۹
۳-۶ . ماسهٔ سیلیسی ۷۱
۳-۷ . الیاف فولادی ۷۳
فصل چهارم: روش تحقیق ۷۴
۴-۲ . آزمایشات اولیه ۷۵
۴-۲-۱ . ایمنی ۷۸
۴-۳ . آزمایشات اصلی ۸۰
۴-۳-۱ . جزئیات و شرایط اختلاط، نمونه‌گیری، عمل‌آوری و تست نمونه‌ها ۸۵
فصل پنجم: ارائه نتایج و تحلیل آن‌ها ۹۲
۵-۱ . مقدمه ۹۳
۵-۲ . داده‌های آزمایشات ۹۳
۵-۳ . آنالیز داده‌ها ۹۵
۵-۳-۱ . مقاومت فشاری ۹۶
۵-۳-۲ . مقاومت کششی برزیلی ۱۰۲

۵-۳-۳ . مقاومت خمشی ۱۰۴

۵-۴ . بررسی ریزساختار بتن پودری واکنش‌پذیر الیافی..... ۱۰۷

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۱۰

۶-۱ . نتیجه‌گیری..... ۱۱۱

۶-۲ . پیشنهادات..... ۱۱۲

منابع و مراجع ۱۱۳

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱. تصویر ذرات دوده سیلیس ۹

شکل ۱-۳. نمودار مقادیر وزنی سیمان برای انواع بتن‌های رایج ۱۲

شکل ۱-۴. نمودار حداکثر بعد سنگدانه‌های انواع بتن‌های رایج ۱۳

شکل ۱-۵. نمودار مقاومت فشاری انواع بتن‌های رایج ۱۳

شکل ۱-۶. پل ساخته شده از بتن پودری واکنش‌پذیر در ایالت کبک کانادا ۱۴

شکل ۳-۱. نمونهٔ سیمان مورد استفاده در آزمایشات ۶۵

شکل ۳-۲. نمونهٔ دوده سیلیس استفاده شده در آزمایشات ۶۶

شکل ۳-۳ . نمونهٔ پودر نانو سیلیس استفاده شده در آزمایشات ۶۸

شکل ۳-۴ . تصاویر SEM از نانو ذرات سیلیس مورد استفاده در آزمایشات ۶۹

شکل ۳-۵ . آنالیز XRD نانو ذرات سیلیس ۶۹

شکل ۳-۶ . نمونهٔ فوق روان‌کنندهٔ مورد استفاده در آزمایشات ۷۱

شکل ۳-۷ . نمودار دانه‌بندی فیلرهای کوارتزی مورد استفاده قرار گرفته ۷۲

شکل ۳-۸ . ماسه سیلیسی M50 استفاده شده در آزمایشات ۷۳

شکل ۳-۹ . ماسه سیلیسی M15 استفاده شده در آزمایشات ۷۳

شکل ۳-۱۰ . الیاف فولادی مورد استفاده در آزمایشات ۷۳

شکل ۴-۱ . از سمت راست، همزن مارپیچ شکل و همزن پنجه‌ای شکل ۷۷

شکل ۴-۲ . حمام آب اولتراسونیک ۷۸

شکل ۴-۳ . ماسک ایمنی، عینک ایمنی و لباس آزمایشگاه ۸۰

شکل ۴-۴ . ترازوی دیجیتالی با دقت صدم گرم ۸۵
شکل ۴-۵ . مخلوط‌کن هوبارت برای اختلاط سریع انواع ملات ۸۶
شکل ۴-۶ . نمونه قالب‌های مکعبی ۸۷
شکل ۴-۷ . نمونه قالب‌های منشوری ۸۷
شکل ۴-۸ . میز ویبره ۸۷
شکل ۴-۹ . حمام بخار ۸۸
شکل ۴-۱۰ . قرار گرفتن نمونه‌ها در دستگاه حمام بخار ۸۸
شکل ۴-۱۱ . جک فشاری ۳۰۰ تنی ۹۰
شکل ۴-۱۲ . دستگاه اعمال نیروی خمشی ۹۱
شکل ۵-۱. تصاویری از نرم‌افزارهای MINITAB و Design-Expert..... ۹۵
شکل ۵-۲. نمودار اثر اصلی فاکتورهای آزمایش بر مقاومت فشاری..... ۱۰۰
شکل ۵-۳. نمودار اثر اصلی فاکتورهای آزمایش بر مقاومت کششی برزیلی..... ۱۰۳
شکل ۵-۴. نمودار اثر اصلی فاکتورهای آزمایش بر مقاومت خمشی..... ۱۰۵
شکل ۵-۵. تصاویر SEM از نمونه‌های کنترل و بهینه..... ۱۰۸
شکل ۵-۶. نتایج تست XRD نمونه‌های کنترل و بهینه..... ۱۰۹

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۱-۱ . جدول طراحی آزمایش کامل $۲^{۳}$ ۲۰

جدول ۱-۲ . جدول طراحی آزمایش $۲^{۳-۱}$ ۲۱

جدول ۱-۳ .تعیین سطوح فاکتور سه سطحی با استفاده از سطوح فاکتورهای دو سطحی ۲۲

جدول ۱-۴ . آرایه‌های متعامد استاندارد ۲۶

جدول ۳-۱ . مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی در مرجع ۶۳

جدول ۳-۲ . مشخصات فیزیکی سیمان پرتلند نوع ۵ مصرفی ۶۴

جدول ۳-۳ . مشخصات مکانیکی سیمان پرتلند نوع ۵ مصرفی ۶۴

جدول ۳-۴ . مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند نوع ۵ مصرفی ۶۴

جدول ۳-۵ . مشخصات فیزیکی دوده سیلیس مصرفی ۶۵

جدول ۳-۶ . مشخصات شیمیایی دوده سیلیس مصرفی ۶۵

جدول ۳-۷ . خواص فیزیکی پودر نانوسیلیس استفاده شده در آزمایشات ۶۸

جدول ۳-۸ . خواص شیمیایی پودر نانو سیلیس استفاده شده در آزمایشات ۶۸

جدول ۴-۱ . طرح نسبت‌های اختلاط پایه به‌کار گرفته شده در آزمایشات ۸۱

جدول ۴-۲ . طرح اختلاط پایه به‌کار گرفته شده در آزمایشات ۸۱

جدول ۴-۳ . آرایهٔ متعامد استاندارد L18 ..... ۸۲

جدول ۴-۴ . جدول طرح آزمایشات ۸۴

جدول ۵-۱ . مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه مکعبی ۹۳

جدول ۵-۲ . مقاومت کششی برزیلی ۷ روزه نمونه مکعبی ۹۴

جدول ۵-۳ . مقاومت خمشی ۷ روزه ۹۴
جدول ۵-۴ . جدول آنالیز واریانس مربوط به مقاومت فشاری به روش استاندارد ۹۶
جدول ۵-۵ . جدول آنالیز واریانس مربوط به مدل جدید ۹۷
جدول ۵-۶ . جدول آنالیز واریانس مربوط به مقاومت فشاری به روش $\frac{S}{N}$ ۹۹
جدول ۵-۷ . طرح نسبت‌های اختلاط نمونه‌های کنترل و بهینه برای مقاومت فشاری ۱۰۱
جدول ۵-۸ . نتایج مقاومت‌های فشاری نمونه‌های کنترل و بهینه ۱۰۱
جدول ۵-۹ . جدول آنالیز واریانس مربوط به مقاومت کششی برزیلی ۱۰۲
جدول ۵-۱۰ . طرح نسبت‌های اختلاط نمونه‌های کنترل و بهینه برای مقاومت کششی ۱۰۳
جدول ۵-۱۱ . نتایج مقاومت‌های کششی برزیلی نمونه‌های کنترل و بهینه ۱۰۴
جدول ۵-۱۲ . جدول آنالیز واریانس مربوط به مقاومت خمشی ۱۰۴
جدول ۵-۱۳ . طرح نسبت‌های اختلاط نمونه‌های کنترل و بهینه برای مقاومت خمشی ۱۰۶
جدول ۵-۱۴ . نتایج مقاومت‌های خمشی نمونه‌های کنترل و بهینه ۱۰۶

فصل اول:

مقدمه‌ای بر موضوع پایان‌نامه

۱-۱. مقدمه

بیش‌تر تحقیقات و پیشرفت‌های ناشی از آن، به دلیل احساس نیاز جوامع بشری بوده است. ساختمان و یا به عبارتی پناهگاه، یکی از نیازهای اساسی انسان است؛ به همین دلیل روز به روز تکنولوژی ساختمان سازی پیشرفت‌های چشمگیری از خود نشان می‌دهد. همان‌گونه که می‌دانیم، پیشرفت در امر ساختمان سازی به سمتی هدایت می‌شود که بتواند مواردی را ارضاء نماید؛ که از جمله موارد عبارت انداز: ۱- کاهش هزینه‌های اجرا، ۲- افزایش عمر ساختمان، ۳- کوتاه شدن زمان اجرا، ۴- کم کردن محدودیت‌های اجرا و آسان‌ترکردن آن، ۵- آسیب رسانی کم‌تر به محیط زیست، ۶- زیبایی ساختمان و ....

یکی از اجزای اصلی ساختمان‌ها، سازه یا اسکلت آن می‌باشد. یکی از مصالحی که در ساخت سازه‌ها از آن استفاده می‌شود، بتن می‌باشد. بتن نیز از موضوعاتی است که روز به روز محققان تلاش می‌کنند تا نقاط ضعف آن را با روش‌های نوین از بین ببرند و هم‌چنین قابلیت‌های آن‌را افزایش دهند. برای همین امر در این چند دهه انواع متنوعی از بتن‌های جدید بوجود آمده و همچنین ویژه‌گی آن‌ها بهبود یافته است.

مصالح مختلفی مثل فولاد، چوب، مصالح بنایی و بتن ممکن است به عنوان گزینه‌هایی برای ساخت یک بنا مطرح باشند. این گزینه‌ها برای بسیاری از سازه‌های متداول وجود دارند؛ اگر چه در ساخت اسکلت سازه‌های بلند، ممکن است به فولاد و بتن محدود گردند. با این وجود امروزه بتن به عنوان یک گزینه‌ی قابل اعتماد برای ساخت بسیاری از سازه‌های کوچک و بزرگ محسوب می‌گردد؛ به طوری که شاید بتوان از آن به عنوان مهم‌ترین ماده‌ی ساختمانی موجود با کاربردی فراگیر در تمام دنیا نام برد. امروزه بسیاری از ساختمان‌های کوچک و بزرگ، پل‌ها، سدها، تونل‌ها، کانال‌ها، مخازن و تانک‌ها، دیوارهای حائل، لوله‌ها و روسازی‌ها از بتن ساخته می‌شود.

۱-۲. بتن‌های با مقاومت بالا

با پیشرفت سریع تکنولوژی بتن در جهان، امکان تولید بتن‌های با مقاومت بالاتر افزایش یافته و نیز تعریف بتن با مقاومت بالا روز به روز در حال تغییر است. در سال ۱۹۵۰، بتن با مقاومت فشاری ۳۴ MPa به‌عنوان بتن با مقاومت بالا مجسوب می‌شد، در حالی‌که در سال‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰، از بتن‌های با مقاومت فشاری در حدود ۵۲ MPa و ۶۲ MPa به‌عنوان بتن با مقاومت بالا یاد می‌شد[۱].

امروزه بتن‌های با مقاومت فشاری کمتر از ۲۰ MPa به‌عنوان بتن با مقاومت پایین[1]، بتن‌های با مقاومت فشاری در محدودهٔ ۲۰ MPa تا ۴۰ MPa به‌عنوان بتن با مقاومت معمولی یا متوسط[2]، بتن‌های با مقاومت فشاری در محدودهٔ ۴۰ MPa تا ۸۰ MPa به‌عنوان بتن با مقاومت بالا[3]، بتن‌های با مقاومت فشاری در محدودهٔ ۸۰ MPa تا ۱۵۰ MPa به‌عنوان بتن با مقاومت بسیار بالا[4]، و بتن‌های با مقاومت فشاری بیش از ۱۵۰ MPa به‌عنوان بتن با مقاومت فوق‌العاده زیاد[5] قلمداد می‌گردند. لازم به ذکر است که از انواع بتن‌های با مقاومت بالا به‌عنوان بتن با عملکرد بالا[6] و یا بتن توانمند نیز یاد می‌شود؛ چرا که چنین بتن‌هایی معمولا با نفوذپذیری کم و کیفیت بسیار خوب، دوام بسیار خوبی نیز در مقابل انواع شرایط نامناسب محیطی از خود نشان می‌دهند[۱].

سازه‌های متعددی وجود دارند که با استفاده از بتن با مقاومت بالاتر از آنچه در حال حاضر ساخته می‌شود، می‌توانند بازدهی بیشتری داشته باشند. استفاده از بتن با مقاومت‌های فشاری بین

---

[1] Low Strength Concrete

[2] Medium or Ordinary Strength Concrete

[3] High Strength Concrete

[4] Very High Strength Concrete

[5] Ultra High Strength Concrete

[6] High Performance Concrete

۹۰ MPa تا ۱۱۰ MPa در اعضای تحت فشار زیاد ناشی از بار یا پیش‌تنیدگی مثل ستون‌ها، نواحی فشاری اعضا، سازه‌های پوسته‌ای و شاهتیر خرپاها یا سازه‌هایی که در طرح آن‌ها نسبت مقاومت به وزن فاکتور مهمی است مثل پل‌های پیش‌تنیده با دهانهٔ زیاد می‌تواند پتانسیل زیاد و بهرهٔ اقتصادی آن را نشان دهد[۲].

به طور کلی به دو طریق می‌توان بتن مقاومت بالا را مورد بهره‌برداری سازه‌ای قرار داد:

۱ - جایگزین کردن بتن مقاومت بالا به‌جای بتن معمولی در المان‌های سازه‌ای رایج

۲ - به کار گرفتن و ابداع انواع جدید از المان‌های سازه‌ای

مورد دوم دامنهٔ وسیعی را جلوی دید طراح می‌گشاید تا سیستم‌های سازه‌ای یا اشکال مختلف سازه‌ای را که عملا با استفاده از مصالح موجود نمی‌توان به‌وجود آورد، توسعه دهد و این مقصود تنها در حین تجربه طراحی حاصل می‌شود. اما مزایای استفاده از بتن مقاومت بالا به‌جای بتن معمولی در چند مورد اشاره می‌گردد. در ستون‌ها افزایش مقاومت فشاری بتن، ظرفیت باربری ستون را بالا برده، کاهش مقطع را باعث می‌گردد. از طرف دیگر برای یک مقطع مفروض و بار مشخص، میزان فولاد مصرفی کاهش می‌یابد. این کاهش در مقدار فولاد حدود یک درصد در ازای هر ۷ MPa افزایش در مقاومت بتن است. در تیرهای بتن‌آرمه، از آنجا که ظرفیت باربری برای درصد معینی از آرماتورهای کششی محدود می‌گردد، تنها با افزایش همزمان مقاومت بتن و درصد فولاد می‌توان ظرفیت باربری را افزایش داد. به‌بیان دیگر برای یک ظرفیت مشخص باربری می‌توان ابعاد مقطع را با استفاده از بتن مقاومت بالا کاهش داد. در اعضای پیش‌تنیده تنش مجاز در هنگام انتقال نیروی پیش‌تنیدگی و نتیجتا ظرفیت باربری با افزایش مقاومت بتن در آن لحظه افزایش می‌یابد. قوس‌ها و سازه‌های پوسته‌ای زیرزمینی بخصوص تحت بارهای ضربه‌ای به‌نحو بسیار مؤثری از بتن مقاومت بالا می‌توانند بهرهٔ لازم را بگیرند.

کاربردهای مناسب و مؤثر دیگر برای بتن مقاومت بالا عبارتند از: شاهتیرهای خرپاها، اعضای کششی پیش‌تنیده، مقاطع لوله‌ای و میله‌های پیش‌کشیده. البته موارد فوق‌الذکر تنها چند

مورد از کاربردهای فراوان بتن مقاومت بالاست و نتایج مثبت آن در برتری خواص فیزیکی و شیمیایی بر بتن معمولی نیز مسئلهٔ پر اهمیتی است[۲].

لازم به ذکر است این نوع بتن نیز نقاط ضعفی دارد که از آن جمله می‌توان به تردی و شکنندگی، ضربه پذیری و قابلیت جذب انرژی کم بتن‌های با مقاومت بالا نسبت به سایر خواص مکانیکی آن، اشاره کرد.

۱-۲-۱. روش‌های ساخت بتن مقاومت بالا

مقاومت بتن اساسا بستگی به خواص مواد تشکیل‌دهنده، نسبت‌های اختلاط آن‌ها و روش‌های اختلاط، جا دادن، تراکم و عمل‌آوری آن دارد. بنابراین بالا بردن مقاومت بتن می‌تواند با بهبود کیفیت مصالح یا بهبود روش‌های اتخاذ شده در هر کدام از مراحل فوق انجام شود.

به‌طور کلی علاوه بر کیفیت مصالح و مقدار آن‌ها، چهار روش جهت تولید بتن مقاومت بالا وجود دارد:

۱ - انجام تراکم بهتر

۲ - بهبود ناحیهٔ انتقالی بین دانه‌ها و خمیر سیمان

۳ - کاهش نسبت آب به سیمان و استفاده از مواد پوزولانی

۴ - استفاده از عوامل خارجی مانند تزریق سولفوری یا پلیمری، گرما، فشار و ...

نکته اصلی در تهیه بتن با مقاومت بالا استفاده از نسبت آب به سیمان پایین است. در بتن نرمال این نسبت بین ۰/۴ تا ۰/۷ تغییر می‌کند اما در بتن با مقاومت بالا این مقدار به ۰/۲ تا ۰/۳۵ کاهش می‌یابد. چنین نسبت پایینی، مخلوط را خشک، سخت و در عمل غیرقابل مخلوط کردن می‌کند. برای افزایش کارایی این مخلوط به آن روان‌کنندهٔ قوی افزوده می‌شود. روان‌کنندهٔ قوی، مخلوط کردن اجزا را ممکن ساخته و ریختن بتن را ساده‌تر می‌کند.

ذیلا توجهات خاصی که در جهت انتخاب مصالح در بتن مقاومت بالا باید منظور گردد، مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

الف- سیمان: انتخاب سیمان پرتلند برای بتن مقاومت بالا فوق‌العاده مهم است و در این زمینه مطالعات مختلفی توسط محققین بر روی سیمان پرتلند و سیمان‌های پوزولانی و همچنین سیمان با آلومینیوم زیاد انجام گرفته است. نتایج تحقیقات و مطالعات انجام شده حاکی از این است که در اکثر مواقع سیمان پرتلند معمولی (تیپ یک) برای وصول به مقاومت مورد نظر کفایت می‌کند.

مقادیر کم C_3A و C_4AF در سیمان نوع V (ضد سولفات) بدین معناست که مقدار سیلیکات‌های آن زیاد بوده و مقاومت بالایی به سیمان می‌دهد، ولی چون قسمت زیادی از سیلیکات‌ها به‌صورت C_2S می‌باشد، لذا مقاومت اولیهٔ آن کم است. در ضمن حرارت توسعه یافته توسط سیمان ضدسولفات خیلی بیشتر از حرارت ناشی از سیمان با حرارت کم نمی‌باشد.

ب- دانه‌های سنگی: در تعیین نسبت‌های اختلاط بتن مقاومت بالا، دانه‌های سنگی دارای اهمیت زیادی هستند، زیرا بیشترین حجم بتن را اشغال می‌کنند. معمولا بتن مقاومت بالا با استفاده از دانه‌های دارای وزن مخصوص معمولی ساخته می‌شوند و دانه‌های سنگی مورد استفاده اعم از دانه‌های ریز و درشت باید ضوابط ASTM C-33 [۳] را به‌عنوان حداقل ضوابط دارا باشند.

ج- مواد افزودنی: افزودنی‌ها به‌طور وسیع در ساخت بتن مقاومت بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. افزایش قابل توجه در مقاومت فشاری، کنترل سرعت گیرش، مقاومت اولیهٔ زیاد، کارایی مناسب و دوام بتن از نتایج اساسی کاربرد مواد افزودنی می‌باشد.

افزودنی‌های شیمیایی با استفاده از لیگنوسولفونات‌ها، کربوهیدرات‌ها، ترکیب‌های با پایهٔ ملامین و نفتالین و زودگیرکننده‌های آلی و غیرآلی در فرمول‌های مختلف تهیه می‌شوند.

در بتن مقاومت بالا مقدار سیمان بیشتری نسبت به بتن معمولی استفاده می‌گردد، لذا یک کندگیرکننده غالبا در جلوگیری از گیرش سریع اولیه مفید خواهد بود و باعث ایجاد سهولت در ریختن و جا دادن بتن بین آرماتورها می‌شود. معمولا روان کننده‌ها به دو دسته روان کننده‌های معمولی و فوق روان کننده‌ها تقسیم می‌شوند. در بازار روان کننده‌ها به دو صورت مایع و پودری وجود دارند.انواع روان‌کننده‌ها از نظر پایهٔ تشکیل‌دهنده به‌صورت زیر است:

۱ - روان کننده بتن مناسب برای استفاده در پمپ بتن که خاصیت دیرگیر بتن دارد و بصورت مایع عرضه می گردد و خاصیت روان‌کنندگی بسیار خوبی به بتن می‌دهد. روان‌کننده بتن باعث تسهیل در عملیات پمپ بتن می‌گردد. از این روان‌کننده بتن علاوه بر این که در پمپ بتن می‌توان استفاده کرد کاربردهای دیگری چون در ساخت بتن آماده مخصوصا برای حمل در فاصله‌های نسبتا طولانی دارد. در بتن‌ریزی در هوای گرم استفاده از این روان‌کننده بتن توصیه می‌شود.

۲ - فوق روان‌کننده بتن که بر پایه نفتالین سولفونات است. این نوع فوق روان‌کننده بتن معمولا به‌صورت مایع عرضه می‌گردد. از این فوق روان‌کننده بتن در زمان بتن‌ریزی در هوایی سرد و برای بتن یا ملات ترمیمی استفاده می‌شود. همچنین این فوق روان‌کننده بتن به عنوان یک فوق روان‌کننده زودگیر و کاهش دهندهٔ آب در بتن برای کسب روانی و مقاومت بالا مخصوصا مقاومت‌های اولیه بالا استفاده می‌شود.

۳ - فوق روان‌کننده بتن که بر پایه تکنولوژی تولید پلیمرها ساخته می‌شود. این نوع فوق روان‌کننده بتن به‌عنوان کاهش دهندهٔ آب بتن برای کسب روانی و مقاومت بالا استفاده می‌شود و در ساخت بتن‌های پیش‌تنیده و پس‌تنیده، بتن حجیم و بتن‌ریزی در هوای گرم کاربرد دارد. فوق روان‌کننده‌های پایه پلی کربوکسیلات که نسل چهارم روان‌کننده‌ها هستند نیز از این دسته اند. این فوق روان‌کننده بر پایه پلی کربوکسیلات اصلاح شده و به‌صورت مایع می‌باشد که برای ساخت بتن‌های ویژه طراحی شده است. برای ساخت بتن خود تراز و خود متراکم و بتن‌هایی که الزامات آیین نامه‌ای آن به حداقل رساندن نسبت آب به سیمان را در حد نهایت درخواست نموده، کاربرد دارد. استفاده از این فوق روان‌کننده در ساخت بتن حجیم موجب روانی بالا می شود. هم چنین با استفاده از این فوق روان‌کننده پمپ پذیری بتن بالارفته و باعث می شود که استهلاک پمپ بتن پایین بیاید. این فوق روان‌کنندهٔ بتن نسبت آب به سیمان را در بتن حجیم کاهش می‌دهد و مقاومت آن را بالا می‌برد.

یکی از اجزاء بتن مقاومت بالا افزودنی‌های معدنی است. دوده سیلیسی اصلی ترین جزء بتن با مقاومت بالا است. در جریان تولید آلیاژهای سیلیسیم، بخصوص آلیاژ فروسیلیس، در کوره‌های الکتریکی، محصول فرعی به وجود می‌آید که به آن دودهٔ سیلیسی و یا میکروسیلیس گفته می‌شود. این ماده که یک سوپر پوزولان است علاوه بر نقش اصلی یعنی افزایش مقاومت، تاثیر زیادی بر سایر خصوصیات بتن مانند کاهش خزش و افت، افزایش مدول الاستیسیته، مقاومت در برابر سایش، سولفات‌ها و خوردگی دارد. دوده سیلیسی بسته به نوع محصول و کوره کارخانه سیلیس معمولا ۸۵٪ تا ۹۰٪ اکسید سیلیسیم دارد. این ماده، مرکب از مواد غیربلوری (آمورف[1]) با قطرهای بین ۰/۱ تا ۰/۲ میکرون است و جرم مخصوص آن با gr/cm^3 ۲/۲ دارای بزرگترین سطح مخصوص با مقدار تقریبی m^2/g ۲۰ (نسبت به سیمان m^2/g ۰/۳-۰/۴) می‌باشد. چگالی ظاهری آن kg/m^3 ۲۰۰ بوده و ذرات آن ۵۰ تا ۱۰۰ برابر از ذرات سیمان کوچکترند. نوع کوره نیز بر ترکیبات شیمیایی اثر می‌گذارد. در کوره‌های مجهز به سیستم بازیابی حرارتی، دمای گاز خروجی حدود ^{0C}۸۰۰ بوده و دوده سیلیس با درصد کربن کم و رنگ روشن تولید می‌شود. در حالی که اگر کوره مجهز به سیستم بازیابی حرارتی نباشد، گازها با دمایی حدود ^{0C}۲۰۰ خارج شده و مقداری کربن سوخته نشده در آن باقی می‌ماند که در نتیجه دوده سیلیس به رنگ خاکستری تولید می‌شود این ماده به‌عنوان پرکننده بین اجزاء بتن عمل کرده و نه تنها باعث چسبندگی بین ذرات سیمان می‌شود بلکه چسبندگی بین سیمان و سنگدانه را نیز افزایش می‌دهد. دوده سیلیس با هیدوکسید کلسیم[2] ($Ca(OH)_2$) تولید شده از آبگیری سیمان، ترکیب شده و ترکیب جدیدی بصورت ژل سیلیکات کلسیم هیدراته[3] (C-S-H) ایجاد می‌کند. این ترکیب عامل اصلی مقاومت اضافی بتن‌هایی است که دوده سیلیس به‌طور صحیحی در آنها به‌کار رفته است.

---

[1] Amorphous

[2] Calcium Hidrate

[3] Calcium Silicate Hidrate