بتن‌های توانمند و کاربردهای آن‌ها

(چاپ دوم)

تألیف

اس. اچ. احمد اس. پی. شاه

ترجمه

دکتر موسی مظلوم- دکتر علی‌اکبر رمضانیانپور

سر شناسنامه	:	**سورندراشاه، شعیب هارون احمد**
عنوان و نام پدید آور	:	**بتن‌های توانمند/ [ویراستاران سورندرا شاه، شعیب هارون احمد]،/ ترجمه موسی مظلوم، علی اکبر رمضانیانپور**
مشخصات نشر	:	**تهران؛ دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، ۱۳۸۳.**
مشخصات ظاهری	:	**۱۴۶ ص.: مصور، جدول، نمودار.**
شابک	:	**۹۷۸-۹۴۶-۹۲۷۰۴-۷-۷**
وضعیت فهرست نویسی	:	**فیپا.**
عنوان اصلی	:	**High performance concrete properties and applications, ۱۹۹۴**
یادداشت	:	**کتابنامه.**
موضوع	:	**۱- بتن. ۲- ساختمانی بتنی. الف. احمد شعیب، هارون، ۱۹۵۳- م Ahmad, Shuaib Haroon.- ب. مظلوم موسی، ۱۳۴۷، مترجم- ج. رمضانیانپور، علی‌اکبر، ۱۳۳۰-**
شناسنامه افزوده	:	**دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی.**
رده بندی کنگره	:	**TA ۴۳۹ /ش۲۳ب۲ ۱۳۸۳**
رده بندی دیویی	:	**۶۲۰/۱۳۶**
شماره کتابشناسی ملی	:	**۸۳-۹۵۱۴م**

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

عنوان	:	بتن‌های توانمند و کاربردهای آن‌ها
تألیف	:	سورندراشاه، شعیب هارون احمد
ترجمه	:	دکتر موسی مظلوم(دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی)، دکتر علی‌اکبر رمضانیانپور
نوبت چاپ	:	سوم- پاییز ۱۳۹۲
انتشارات	:	دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی
لیتوگرافی	:	نگین سبز
چاپ	:	برهان
کارشناسان چاپ	:	محمد معتمدی‌نژاد- نیره فیروزی
شمارگان	:	۱۰۰۰ جلد
قیمت	:	۵,۰۰۰ تومان
شابک	:	۹۷۸-۹۶۴-۹۲۷۰۴-۷-۰ ISBN: ۹۷۸-۹٦٤-۹۲۷۰٤-۷-۰

کلیهٔ حقوق این اثر برای مؤلفین و دانشگاه تربیت دبیر شهیدرجائی محفوظ است.

نشانی: تهران، لویزان – کد پستی ۱۵۸۱۱-۱۶۷۸۸ – صندوق پستی ۱۶۳ – ۱۶۷۸۵ – تلفن: (۲۶۳۲) ۹ – ۲۲۹۷۰۰۶۰، ۲۲۹۷۰۰۷۰، نمابر: ۲۲۹۷۰۰۰۳، پست الکترونیکی: Publish@srttu.edu، وب سایت: http://Publish.srttu.edu

پـیـشگفـتـا ر

بتن توانمند در نتیجه پیشرفت‌های اخیر در صنعت بتن‌سازی به‌وجود آمده است. منظور از بتن توانمند یک نوع بتن دارای خواصی ویژه نمی‌باشد بلکه شامل مخلوط‌های مختلفی می‌گردد که هر یک برای رسیدن به هدفی خاص طراحی شده‌اند. در گذشته توجه خاصی به مقاومت فشاری بتن می‌گردید و برآن اساس در مورد بتن قضاوت می‌شد و انتظار می‌رفت که هر چه مقاومت فشاری آن بالاتر رود سایر خواصش نیز بهتر شوند. اما تجربه نشان داده است که دوام بتن در بسیاری از موارد مانند سازه‌های موجود در مناطق خورنده، پل‌ها و کف‌های صنعتی از اهمیت بیشتری برخوردار است. لذا در بتن‌های توانمند علاوه بر بالابردن مقاومت بتن به میزان دوام آن نیز توجه می‌شود.

این کتاب ترجمه فصول طرح اختلاط، خواص مکانیکی کوتاه مدت، تغییر شکل‌های وابسته به زمان و دوام بتن‌های توانمند از کتاب High Performance Concretes and Applications نوشته آقایان

S. P. Shah و S. H. Ahmad می‌باشد. نویسندگان فوق در زمینه تکنولوژی بتن تحقیقات و مطالعات ارزنده و فراوانی را انجام داده‌اند و کاملا شناخته شده می‌باشند.

امید است مجموعه حاضر مورد توجه بتن شناسان، مهندسین مشاور، پیمانکاران و همچنین دانشجویان علاقه‌مند به صنعت بتن واقع گردد.

فـهـرست

فصل ۱انتخاب مصالح، طرح اختلاط و کنترل کیفیت ۹
۱-۱ مقدمه ۹
۱-۲ انتخاب مصالح ۱۰
سیمان پرتلند ۱۱
نرمی ۱۱
ترکیبات شیمیایی سیمان ۱۲
مواد جایگزین سیمان ۱۲
میکروسیلیس ۱۴
خاکستر بادی ۱۵
روباره کوره‌های آهنگدازی ۱۶
محدودیت در استفاده از میکروسیلیس، خاکستر بادی یا روباره ۱۶
فوق روان‌کننده‌ها ۱۷
فوق روان‌کننده‌های لیگنوسولفونیت ۱۷
فوق روان‌کننده‌های ملامین سولفونیت ۱۷
فوق روان‌کننده‌های نفتالین سولفونیت ۱۸
مقدار فوق روان‌کننده ۱۸
دیرگیرکننده‌ها ۲۱
سنگدانه‌ها ۲۱
سنگدانه‌های درشت ۲۱
سنگدانه‌های ریز ۲۲
۱-۳ نسبت‌های اختلاط در بتن‌های با مقاومت بالا ۲۲
نسبت مصالح ۲۳
نسبت آب به مصالح سیمانی ۲۳

مصالح سیمانی مصرفی ۲۴
مصالح سیمانی متمم ۲۵
فوق روان‌کننده‌ها ۲۵
نسبت سنگدانه‌های درشت به ریز ۲۶
مثال‌هایی از مخلوط‌های بتن با مقاومت بالا ۲۶
۱-۴ کنترل کیفیت و آزمایش‌های مربوطه ۲۷
سن در زمان آزمایش ۲۸
شرایط عمل‌آوری ۲۸
نوع قالب برای ساخت نمونه‌های استوانه‌ای ۲۹
اندازه نمونه ۳۰
شرایط انتهایی نمونه ۳۱
مشخصات دستگاه آزمایش ۳۳
تأثیر صفحات بارگذاری ۳۴
۱-۵ نتیجه‌گیری ۳۴
مراجع ۳۴

فصل ۲خواص مکانیکی کوتاه‌مدت ۳۷
۲-۱ مقدمه ۳۷
۲-۲ مقاومت ۳۸
مواد تشکیل‌دهنده و نسبت‌های اختلاط ۳۹
سنگدانه‌های درشت ۳۹
خصوصیات خمیر ۴۳
افزایش مقاومت و دمای عمل‌آوری ۴۵
مقاومت فشاری ۵۲
مقاومت کششی ۵۸
مقاومت کششی مستقیم ۵۸
مقاومت کششی غیر مستقیم ۵۹
۲-۳ تغییر شکل ۶۳
مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی ۶۳

مدول استاتیکی ۶۳
مدول دینامیکی ۶۸
۲-۴ ظرفیت کرنشی ۶۹
رابطه بین تنش و کرنش در فشار ۶۹
رابطه بین تنش و کرنش در کشش ۷۲
کشش ناشی از خمش ۷۳
۲-۵ ضریب پواسون ۷۴
مراجع ۷۵

فصل ۳جمع شدگی، خزش و خواص حرارتی ۸۱
۳-۱ مقدمه ۸۱
۳-۲ جمع‌شدگی ۸۲
سنگدانه‌ها ۸۲
نسبت آب به سیمان ۸۲
اندازه عضو ۸۴
شرایط محیطی متوسط ۸۴
مواد افزودنی ۸۴
نوع سیمان ۸۵
کربناتاسیون ۸۵
گیرش و سخت شدن ۸۶
ته‌نشینی ۸۷
انقباض ۸۷
حرارت هیدراتاسیون ۸۷
خشک شدگی خود به خودی ۸۷
خشک شدگی ۸۷
گیرش و زود سخت شوندگی جنبشی ۸۸
افزایش حرارت ۸۹
سخت شوندگی جنبشی ۹۲
جمع‌شدگی خود به خودی ۹۴

۳-۳ خزش ۹۷
ارتباط بین خزش اصلی و ریز ساختار بتن ۹۷
خزش اصلی و ارتباط آن با طرح اختلاط و سن بارگذاری ۹۹
خزش تحت اثر تنش‌های زیاد ۱۰۱
مدل‌های خزش اصلی ۱۰۲
۳-۴ جمع‌شدگی و خزش ناشی از خشک‌شدن ۱۰۵
روند خشک‌شدن ۱۰۵
جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن ۱۰۷
خزش ناشی از خشک‌شدن ۱۱۲
۳-۵ خواص حرارتی ۱۱۵
۳-۶ اثرات سازه‌ای: مطالعات موردی ۱۲۱
ترک‌های حرارتی در سازه محافظ هسته‌ای ۱۲۱
آزمایش‌های مقایسه‌ای بتن‌ها ۱۲۳
بتن توانمند بدون میکروسیلیس مصرف شده در پل پیش‌تنیده فرانسوی ۱۲۶
۳-۷ خلاصه و نتیجه‌گیری ۱۲۸
مراجع ۱۲۹

فصل ۴دوام ۱۳۷
۴-۱ مقدمه ۱۳۷
۴-۲ نفوذپذیری ۱۳۷
۴-۳ مقاومت در برابر خوردگی ۱۴۱
۴-۴ مقاومت در برابر یخ‌زدن ۱۴۷
۴-۵ مقاومت شیمیایی ۱۴۸
۴-۶ مقاومت در برابر آتش ۱۵۰
۴-۷ مقاومت در برابر سایش و فرسایش ۱۵۳
۴-۸ نتیجه‌گیری ۱۵۶
مراجع ۱۵۷

فصل ۱

انتخاب مصالح، طرح اختلاط و کنترل کیفیت

۱-۱ مقدمه

بتن توانمند، بتنی است که دارای خصوصیات لازم برای ارضای معیارهای ساخت باشد. عموماً استفاده از بتن‌های دارای مقاومت بالاتر از بتن‌های معمولی، در صنعت ساخت و ساز بسیار مطلوب می‌باشد. به‌طورکلی بتن توانمند را می‌توان بر حسب مقاومت و دوام آن تعریف نمود. گروهی از محققین [۱] بتن توانمند مورد استفاده در روسازی را برحسب مقاومت، دوام و نسبت آب به مصالح سیمانی به‌صورت زیر تعریف نموده‌اند :

-۱این بتن باید یکی از خصوصیات مقاومتی زیر را داشته باشد :

الف) مقاومت فشاری ۴ ساعته آن بیش از ۱۷/۵ مگاپاسگال باشد. که به آن **بتن زود سخت‌شونده** گویند (VES).

ب) مقاومت فشاری ۲۴ ساعته آن بیش از ۳۵ مگاپاسگال باشد. که به آن **بتن با مقاومت اولیه بالا** گویند (HES).

پ) مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن بیش از ۷۰ مگاپاسگال باشد. که به آن **بتن با مقاومت بسیار بالا** گویند (VHS).

-۲پس از ۳۰۰ مرتبه یخ‌زدن و آب‌شدن دارای ضریب دوام بیش از ۸۰٪ باشد.

-۳نسبت آب به مصالح سیمانی آن کمتر از ۰/۳۵ باشد.

اگر بتن با مقاومت بالا دارای خواص دیگر موردنیاز بر حسب نوع کاربرد آن باشد، می‌تواند به‌عنوان بتن توانمند درنظر گرفته شود. عموماً با بالارفتن مقاومت بتن، سایر خواص آن نیز بهبود می‌یابند. در کارگاه‌های آمریکای شمالی معمولا به بتن‌های با مقاومت فشاری ۲۸ روزه بیش از ۴۲ مگاپاسگال بتن با

مقاومت بالا اطلاق می‌شود. در گزارش‌های به روز CEB-FIP [۲]به بتن‌های با مقاومت فشاری ۲۸ روزه بیش از ۶۰ مگاپاسگال بتن با مقاومت بالا گفته می‌شود. بنابراین واضح است که تعریف بتن با مقاومت بالا نسبی است و به زمان اجرای کار و محل پروژه مربوط می‌شود.

در طرح اختلاط بتن‌های معمولی نسبت آب به سیمان در درجه اول اهمیت است. حداقل برای بتن‌های با مقاومت تا ۴۲ مگاپاسگال به‌صورت ضمنی فرض می‌شود که هر نوع سنگدانه معمولی قویتر از خمیر سیمان سخت شده است. بنابراین روی مقاومت سنگدانه یا مدول الاستیسیته آن در طرح اختلاط‌های معمولی، نظیر آنچه توسط انجمن بتن آمریکا[۳] پیشنهاد شده است، توجه خاصی نمی‌شود. همچنین روی ناحیه انتقال (اطراف سنگدانه) به‌طور صریح بحث خاصی نمی‌شود. در این بتن‌ها فرض می‌شود که مقاومت خمیر سیمان سخت شده عامل تعیین‌کننده مقاومت بتن است.

اما در بتن‌های با مقاومت بالا، تمام اجزای تشکیل‌دهنده مخلوط به حد بحرانیشان می‌رسند. بتن‌های با مقاومت بالا را می‌توان به‌صورت ماده‌ای مرکب از سه بخش زیر درنظر گرفت :

-۱خمیر سیمان سخت شده

-۲سنگدانه‌ها

-۳ناحیه انتقال بین خمیر سیمان سخت شده و سنگدانه‌ها

تمام بخش‌های فوق باید بهینه باشند و در طرح اختلاط به‌طور دقیق مورد بررسی قرار گیرند. به توصیه آقایان یانگ و مینداس [۴] باید به تمامی جوانب مربوط به تولید بتن (انتخاب مصالح، طرح اختلاط، حمل و ریختن) توجه خاص نمود. کنترل کیفیت یکی از قسمت‌های ضروری در تولید بتن‌های با مقاومت بالاست و نیاز به هماهنگی کامل بین مصالح و تولیدکننده بتن آماده و مهندس و پیمانکار می‌باشد.

اصولا طرح اختلاط بتن‌های بامقاومت بالا شامل سه گام مربوط به یکدیگر زیر می‌گردد :

-۱انتخاب صحیح مصالح مصرفی که شامل سیمان، مواد سیمانی متمم، سنگدانه‌ها، آب و افزودنی‌های شیمیایی می‌شود.

-۲تعیین مقادیر نسبی این مواد برای تولید بتنی که هم اقتصادی باشد و هم روانی و مقاومت و دوام لازم را داشته باشد.

-۳کنترل کیفیت دقیق هر مرحله از عملیات تولید بتن.

۲-۱ انتخاب مصالح

همان‌طور که در بالا ذکر شد، لازم است که حداکثر بازده از تمامی مصالح مصرف شده در تولید بتن با

مقاومت بالا گرفته شود. برای سادگی، مصالح مختلف به‌صورت جداگانه در زیر مورد بررسی قرار می‌گیرند. اما لازم به یادآوری است که پیش‌بینی دقیق عملکرد آنها هنگامی‌که وارد مخلوط بتن می‌گردند ممکن نیست. به‌ویژه هنگام تولید بتن‌های با مقاومت بالا هر گونه ناسازگاری در مصالح، باعث کاهش کیفیت قابل توجهی در محصول نهایی می‌گردد.
بنابراین برای رسیدن به طرح اختلاط نهایی باید آزمایش‌های زیادی روی مخلوط‌های مختلف صورت گیرد.
بتن‌های بامقاومت بالا عموماً علاوه بر سیمان پرتلند، سنگدانه و آب شامل مصالح دیگری از قبیل فوق روان‌کننده‌ها و مواد سیمانی متمم نیز می‌باشند. با استفاده از موادی نظیر خاکستر بادی و روباه دانه‌ای پودر شده به‌عنوان مواد سیمانی متمم، می‌توان به مقاومت فشاری تا حد ۹۸ مگاپاسگال دست یافت. اما برای رسیدن به مقاومت‌های بالاتر از ۱۰۰ مگاپاسگال استفاده از میکروسیلیس ضروری است. البته برای تولید بتن‌های دارای مقاومتی بین ۶۳ و ۹۸ مگاپاسگال نیز از این ماده به کرات استفاده شده است.

سیمان پرتلند

هر سیمانی باید دو ویژگی زیر را دارا باشد :

-۱مقاومت لازم را ایجاد نماید.

-۲از نظر روانی رفتار مناسبی از خود نشان دهد.

سیمانهای پرتلند تیپ یک و دو و سه از استاندارد ASTMC150 با موفقیت کامل در تولید بتن‌های با مقاومت بالا مورد استفاده قرار گرفته‌اند. متأسفانه استاندارد ASTMC150 در رابطه با خواص فیزیکی و شیمیایی سیمان خیلی حساس نیست و نرمی و ترکیبات شیمیایی آن به مقدار قابل توجهی می‌تواند تغییر کند. بنابراین سیمانهایی که عموماً از یک نوع می‌باشند، به خصوص وقتیکه به همراه افزودنی‌های شیمیایی و مواد سیمانی متمم مصرف می‌شوند، می‌توانند از نظر ایجاد مقاومت و روانی کاملا متفاوت عمل نمایند. پس هنگام انتخاب سیمان پرتلند برای استفاده در بتن با مقاومت بالا باید به نرمی و شیمی آن توجه خاص نمود.

نرمی

با افزایش نرمی سیمان پرتلند مقاومت اولیه بتن افزایش می‌یابد، چرا که سطح سیمان در تماس با آب افزایش یافته و هیدراتاسیون سریعتر انجام می‌شود. از طرف دیگر نرمی بسیار زیاد باعث ایجاد مشکلاتی در رابطه با روانی می‌گردد، زیرا با افزایش میزان واکنش‌ها در سنین اولیه، به خصوص به‌علت

تشکیل اترینگایت، نرخ کاهش اسلامپ بیشتر می‌شود. کارهای اولیه انجام شده در این زمینه نشان داده‌اند که نرمی زیاد سیمان مقاومت اولیه بتن را بالا می‌برد اما تأثیر چندانی روی مقاومت نهایی آن ندارد. اکثر سیمانهایی که امروزه در تولید بتن‌های با مقاومت بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند دارای نرمی بلین بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ متر مربع بر کیلوگرم می‌باشند. البته در صورت استفاده از سیمان نوع سه مقدار نرمی آن به حدود ۴۵۰ متر مربع بر کیلوگرم می‌رسد.

ترکیبات شیمیایی سیمان

مطالعات اولیه نشان داده‌اند که با افزایش مقدار C3A مقاومت بتن افزایش می‌یابد [۵]. اما در تحقیقات بعدی مشخص شد که افزایش C3A عموماً باعث کاهش سریع روانی بتن تازه می‌شود[۶]. بنابراین در بتن‌های با مقاومت بالا نباید از سیمانهای دارای مقدار زیاد C3A استفاده نمود. همچنین باید توجه نمود که اصولا C3A به‌صورت مکعبی باشد و به شکل ارتورومبیک نباشد[۷]. در ضمن نباید فقط به مقدار کل SO_3 موجود در سیمان توجه نمود، بلکه مقدار سولفات قابل حل نیز مهم است[۷]. بنابراین درجه سولفوره‌شدن کلینکریک مشخصه مهم آن است.

علاوه بر سیمان‌های تجارتی نوع یک و دو و سه، سیمانهای به‌خصوص دیگری برای مصرف در بتن‌های با مقاومت بالا ساخته شده‌اند. به‌عنوان مثال در نروژ دو نوع سیمان مخصوص برای استفاده در بتن‌های با مقاومت بالا تولید می‌شود. مشخصات این سیمان‌ها در جدول ۱-۱ آمده است[۸]. توجه کنید که در هر دو نوع سیمان مخصوص، مقدار C3A به ۵/۵٪ محدود شده است.

مواد جایگزین سیمان

همان‌طور که قبلا نیز اشاره شد، اکثر بتن‌های با مقاومت بالای جدید حداقل دارای یک ماده سیمانی متمم می‌باشند. این مواد عبارتند از: خاکستری بادی، روباه کوره‌های آهنگدازی و میکروسیلیس. اغلب میکروسیلیس یا خاکستر بادی به همراه میکروسیلیس مورد استفاده قرار می‌گیرند. تمامی این مواد در آیین نامه کانادیی CSA A23.5 مشخص شده‌اند[۹]. در آمریکا، خاکستر بادی در آیین‌نامه ASTMC618 [۱۰] و روباه کوره‌های آهنگدازی در آیین‌نامه ASTMC989 [۱۱]مشخص شده است، اما در رابطه با میکروسیلیس استانداردی وجود ندارد. این مواد در کتاب «مواد جایگزین سیمان در بتن» به‌طور کامل تشریح گردیده‌اند[۱۲].

جدول ۱-۱ مقایسه سیمان‌هاي مخصوص براي استفاده در بتن‌هاي با مقاومت بالا.

SP30*SP30, 4ASP30, 4A MOD

C*2*S (%)182828

C*3*S (%)555050

C*3*A (%)85.55.5

C*4*AF (%)999

MgO (%)31.5 - 2.01.5 - 2.0

SO*3* (%)3.32 - 32 - 3

Na*2*O equivalent (%)1.10.60.6

Blaine Fineness (m*2*/kg)300310400

Heat of hydration (kcal/kg)715670

Setting time (min): initial120140120

final180200170

* Ordinary portland cement for comparison

l m2/kg = 4.89 ft2/lb

در جدول ۱-۲ اجزای سیمانی با عنوان «سیمان پرتلند دارای مدول سیلیسی بالا» آمده است [۱۳]. توجه کنید که این نوع سیمان در مقایسه با سیمان‌های معمولی (شبیه SP-30 جدول ۱-۱) دارای مقدار بسیار زیادی سیلیکات می‌باشد (۸۴٪) و C3A موجود در آن فقط ۳/۶٪ است. ذرات این نوع سیمان نسبتاً درشت می‌باشند و نرمی بلین آنها در حدود ۳۲۰ متر مربع بر کیلوگرم است. کلینکر آن ترکیبی از کریستال‌های C3S و C2S و C3A است. همان‌طور که در جدول ۱-۳ مشهود است با استفاده از این سیمان به همراه جایگزینی ۱۰٪ میکروسیلیس، می‌توان به مقاومت‌های فشاری ۲۸ روزه بسیار خوبی رسید.

جدول ۱-۲ ترکیبات و خواص دیگر سیمان پرتلند داراي مدول سیلیس بالا.

۲۲	(%)S۲C
۶۲	(%)S۳C
۳/۶	(%)A۳C
۶/۹	(%)AF۴C
۰/۳۸	(%)O equivalent۲Na
۹۲/۷	Time saturation factor
۴/۸	modulus silica

۳۲۰	Blaine fineness	kg/۲m
	lb/۲ft ۴٫۸۹kg = /۲۱ m	

جدول ۱-۳ مقاومت فشاري ۲۸ روزه بتن‌هاي ساخته شده از سيمان پرتلند داراي مدول سيليس بالا و ۱۰ درصد ميكروسيليس.

W/C	f_c (MPa)
0.3	174
0.23	106
2.2	0115
0.17	124

1ksi=6.89MPa

1MPa = 0.145ksi

میکروسیلیس

برای ساختن بتن‌های با مقاومت فشاری تا ۹۸ مگاپاسگال می‌توان از میکروسیلیس استفاده نکرد. اما برای رسیدن به مقاومت‌های بالاتر، وجود میکروسیلیس ضروری است. حتی برای ساختن بتن‌های با مقاومت بین ۶۳ تا ۹۸ مگاپاسگال، استفاده از میکروسیلیس کار را برای رسیدن به آن مقاومت ساده‌تر می‌کند. بنابراین اگر از نظر اقتصادی مشکلی وجود نداشته باشد، عموماً میکروسیلیس جزئی از مخلوط بتن با مقاومت بالا درنظر گرفته می‌شود.

میکروسیلیس یکی از محصولات فرعی کارخانه‌های تولید سیلیسیم و آلیاژهای آن می‌باشد و دارای تعریف دقیقی نیست [۱۴]. بنابراین هر منبع جدید میکروسیلیس را توسط تعیین سطح مخصوص آن به‌روش جذب نیتروژن و تعیین میزان سیلیس و کربن و قلیائی‌های آن، باید مشخص نمود. به‌علاوه، به حداقل رساندن مواد کریستالی آن، مناسب است. در جدول ۱-۴ حدود قابل قبول برای میکروسیلیس با توجه به آیین‌نامه CSA-23.5 آمده است [۹].

جدول ۱-۴ مشخصات تعیین شده براي ميكروسيليس در كشور كانادا.

Chemical requirements	SiO_2 min(%)85
	SO_3 max (%)1.0
	Loss in ignition. max(%)6.0
Physical requirements	Accelerated Pozzolanic activity index. min. (%) of control85
	Fineness. max(%) retained on 45 micron Sieve10
	Soundness-autoclave expansion or contraction(%)0.2
	Relative density. max variation from average(%)5
	Fineness. max variation from average(%)5
Optional physical requirements	
	Increase of drying shrinkage. max(%) of comtrol0.03
	Reactivity with cement alkali. min reduction(%)80

میکروسیلیس در چند شکل وجود دارد. این ماده در صورت توده‌ای شکل‌بودن دارای وزن حجمی بین ۲۰۰ تا ۲۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. این موضوع باعث ایجاد اشکال در حمل و نقل آن می‌گردد. امروزه میکروسیلیس بیشتر به‌صورت متراکم شده وجود دارد و وزن آن در حدود دو برابر حالت قبل است (۴۰۰ تا ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب). عموماً این مسئله باعث می‌شود که حمل و نقل میکروسیلیس آسانتر گردد. به‌علاوه این ماده به‌صورت لجن نیز وجود دارد (اغلب به همراه فوق روان‌کننده‌ها در بخش مایعش می‌باشد) و حدود ۵۰٪ آن‌را مواد جامد تشکیل می‌دهند. برای استفاده از این نوع میکروسیلیس نیاز به وسایل خاصی می‌باشد. میکروسیلیس به‌صورت مخلوط شده با سیمان پرتلند نیز یافت می‌شود و مقدار آن نسبت به وزن کل مصالح سیمانی بین ۶/۷ تا ۹/۳ درصد است. در کانادا، فرانسه و ایرلند باوجوداین قدرت انتخاب به ظاهر گسترده، در هر منطقه نوع خاصی از میکروسیلیس یافت می‌شود و باید از همان نوع موجود استفاده کرد.

خاکستر بادی

خاکستر بادی به‌صورت بسیار گسترده و در سال‌های طولانی در بتن مورد استفاده قرار گرفته است. متأسفانه خاکستر بادی نسبت به میکروسیلیس، هم در خواص شیمیایی و هم در خواص فیزیکی، بسیار متغیرتر است. هر نوع از خاکستر بادی که در بتن‌های معمولی خوب عمل کند در بتن‌های با مقاومت بالا نیز عملکرد مناسبی دارد. با خاکستر بادی می‌توان بتنی با مقاومت فشاری تا حدود ۷۰ مگاپاسگال را ساخت. البته گزارش‌های کمی هم در رابطه با رسیدن به مقاومت حدود ۹۸ مگاپاسگال در بتن‌های دارای خاکستر بادی وجود دارد. برای رسیدن به مقاومت‌های بالاتر باید به همراه خاکستر بادی از میکروسیلیس استفاده کرد. اگرچه در گذشته این کار مرسوم نبود.

عموماً مقدار خاکستر بادی مصرفی در بتن‌های با مقاومت بالا حدود ۱۵٪ مقدار سیمان می‌باشد. به‌خاطر اینکه حتی محصولات یک کارخانه تولید خاکستر بادی تغییرات قابل ملاحظه‌ای دارند، کنترل کیفیت در کارگاه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این موضوع شامل تعیین سطح مخصوص بلین و ترکیبات شیمیایی این ماده (به‌ویژه تعیین مقدار SiO_2 و Al_2O_3و Fe_2O_3 و CaO و قلیایی‌ها و سولفاتها و کربن) می‌شود، و مانند میکروسیلیس لازم است که درجه کریستاله‌بودن آن‌را کنترل کرد. هر قدر خاکستر بادی بیشتر به‌صورت بافت شیشه‌ای باشد بهتر است.

روباره کوره‌های آهنگدازی

در آمریکای شمالی روباره به اندازه اروپا وجود ندارد و بنابراین اطلاعات زیادی در رابطه با نحوه کار با آن در بتن‌های با مقاومت بالای این منطقه در دسترس نیست. اما مانند خاکستر بادی می‌توان گفت که روباره‌ای که در بتن‌های معمولی خوب عمل می‌کند، در بتن‌های با مقاومت بالا نیز عملکرد مناسبی دارد و مقدار آن نیز بین ۱۵ تا ۳۰ درصد وزن سیمان است. در زمستان از درصدهای کمتر جایگزینی استفاده می‌شود تا بتن با سرعت کافی بتواند افزایش مقاومت دهد. برای اینکه بتن‌های دارای روباره به مقاومت‌های بالاتر از ۹۸ مگاپاسگال برسند، لازم است که به مخلوط میکروسیلیس نیز اضافه شود.

ترکیبات شیمیایی روباره عموماً تغییرات زیادی ندارند. بنابراین کنترل کیفیت به آزمایش‌های تعیین سطح مخصوص بلین و تعیین درجه کریستاله‌بودن توسط تفرق اشعه X محدود می‌شود.

محدودیت در استفاده از میکروسیلیس، خاکستر بادی یا روباره

در صورت استفاده از میکروسیلیس در بتن هیچگونه اثر مخربی مشاهده نمی‌شود، اما استفاده از خاکستر بادی و یا روباره ممکن است باعث ایجاد مشکلات زیر گردد :

-۱مقاومت اولیه مخلوط‌هایی که به جای مقداری از سیمان پرتلند آن، از خاکستر بادی و یا روباره استفاده شده است، کندتر افزایش می‌یابد و در نتیجه زمان بازکردن قالب‌ها به‌ویژه در درجه حرارت‌های پایین، به تعویق می‌افتد. یکی از دلایل ایجاد این مسئله کاهش نسبت آب به سیمان، حتی در صورت استفاده از مقدار بیشتری فوق روان‌کننده است. واضح است که این موضوع از نظر اقتصادی به صرفه نیست. در صورت نیاز به بتن زود سخت‌شونده لازم است که مقدار خاکستر بادی یا روباره را کاهش داد.

-۲نتایج آزمایشگاهی موجود، در رابطه با مسئله دوام در برابر یخ‌زدن و آب‌شدن بتن‌های با مقاومت بالای دارای مواد سیمانی متمم، دارای تفسیرهای متفاوتی می‌باشند. این مسئله هم در بتن‌های دارای حباب هوا و هم در بتن‌های بدون حباب هوا صادق است. بنابراین تا رسیدن به اطلاعات کامل‌تر، طراحان باید هنگام استفاده از بتن‌های با مقاومت بالا، در جاهایی که سیکل‌های یخ‌زدن و آب‌شدن زیادی در بتن‌های کاملا اشباع به وقوع می‌پیوندد، بسیار با احتیاط عمل کنند.

-۳جایگزینی روباره و یا خاکستر بادی به جای بخشی از سیمان مصرفی در بتن‌ریزی‌های حجیم (۱۵ تا ۳۰ درصد) تأثیر ناچیزی روی حرارت هیدراتاسیون ایجاد شده در بتن دارد.

فوق روان‌کننده‌ها

در کارهای بتنی جدید، تولید بتن با مقاومت بالا و دارای کارایی کافی در کارگاه بدون استفاده از فوق روان کنده عملی نیست. متأسفانه فوق روان‌کننده‌های مختلف رفتار کاملا متفاوتی باسیمانهای مختلف دارند (حتی سیمانهایی که از نظر اسمی شبیه به یکدیگرند).

این موضوع از جهتی به‌دلیل ایجاد تغییراتی در ترکیبات فرعی سیمان (که عموماً مشخص نمی‌شوند)و از طرف دیگر به‌دلیل خیلی خشن و بسته نبودن آیین‌نامه‌های مربوط به پذیرش فوق روان‌کننده هاست. بنابراین باید سیمانهایی را که با فوق روان‌کننده‌های خاصی ناسازگارند، تعیین نمود.

اصولا سه نوع فوق روان‌کننده اصلی وجود دارد. این سه نوع عبارتند از :

-۱لیگنو سولفونیت

-۲ملامین سولفونیت

-۳نفتالین سولفونیت

به‌علاوه مولکول‌های مختلفی ممکن‌است با این ترکیبات اصلی واکنش دهند. بنابراین تعیین اجزای شیمیایی دقیق اکثر فوق روان‌کننده‌ها بسیار مشکل است. مطمئناً سازنده‌های این مواد سعی می‌کنند که ترکیبات تولیداتشان حتی‌الامکان مخفی باقی بماند.

لازم به ذکر است که اکثر اطلاعات موجود در رابطه با فوق روان‌کننده‌ها، از روی آزمایش‌های انجام شده بر روی بتن‌های معمولی و دارای مقدار کمی فوق روان‌کننده، به‌دست آمده است. رفتار فوق روان‌کننده‌ها در نسبت‌های آب به سیمان بسیار کم و مقادیر زیاد خود آن مواد، ممکن‌است متفاوت باشد.

فوق روان‌کننده‌های لیگنوسولفونیت

در بتن‌های با مقاومت بالا، فوق روان‌کننده‌های لیگنوسولفونیت عموماً به همراه فوق روان‌کننده‌های ملامین یا نفتالین مصرف می‌شود. آنها به خودی خود در تولید اقتصادی بتن‌های با مقاومت بسیار بالا، به اندازه کافی مؤثر نیستند. لیگنوسولفونیت برای کنترل اسلامپ اولیه و ملامین یا نفتالین در مرحله بعد، برای کنترل اسلامپ کارگاه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

فوق روان‌کننده‌های ملامین سولفونیت

تاکنون فقط یک نوع فوق روان‌کننده ملامین با نام تجاری ملمنت مورد استفاده قرار گرفته است، اما به

زودی فوق روان‌کننده‌های ملامین دیگری نیز به بازار خواهند آمد.
فوق روان‌کننده‌های ملامین به‌صورت مایعی شفاف می‌باشند و دارای حدود ۲۲٪ ذرات جامد هستند. ذرات فوق عموماً به شکل نمک سدیم‌اند. این فوق روان‌کننده‌ها برای سال‌های طولانی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و نتایج مناسبی هم داشته‌اند، بنابراین مورد توجه تولید کنندگان بتن‌های با مقاومت بالا نیز می‌باشند.

فوق روان‌کننده‌های نفتالین سولفونیت

فوق روان‌کننده‌های نفتالین نسبت به سایر انواع فوق روان‌کننده، مدت زمان طولانی‌تری مورد استفاده قرار گرفته‌اند و دارای اسامی تجاری متعددی می‌باشند. آنها در بازار به دو صورت پودری و مایع قهوه‌ای رنگ یافت می‌شوند و در حالت مایع دارای حدود ۴۰٪ ذرات جامد می‌باشند. این ذرات عموماً از نوع نمکهای کلسیم و سدیم هستند. نمکهای کلسیم در حالاتی که سنگدانه‌های مصرفی زمینه واکنش قلیایی را دارا می‌باشند، مورد استفاده قرار می‌گیرد.
مزیت ویژه فوق روان‌کننده‌های نفتالین، جدا از اینکه کمی ارزانتر از سایر انواع فوق روان‌کننده می‌باشند، در این‌است که کنترل روانی بتن‌های با مقاومت بالای دارای این مواد، به‌خاطر اینکه کمی خاصیت دیرگیرکننده دارند، راحت‌تر است.

مقدار فوق روان‌کننده

روشی برای پیش‌بینی مقدار فوق روان‌کننده لازم وجود ندارد و برای تعیین آن باید از طریقه سعی و خطا استفاده نمود. اصولا اگر مقاومت معیار اصلی باشد، باید نسبت آب به سیمان را به حداقل ممکن رساند و بنابراین مقدار فوق روان‌کننده لازم، به حداکثر مقدارش می‌رسد. اما اگر خواص روانی بتن با مقاومت بالا خیلی مهم باشد، باید با توجه به مقاومت لازم، بیشترین نسبت آب به سیمان ممکن را انتخاب نمود، تا به همراه مقداری فوق روان‌کننده، کارایی مطلوب حاصل گردد. در حالت کلی البته حالت‌های بینابینی هم یافت می‌شود که در آنها باید ترکیبی از خواص مقاومتی و روانی را بهینه نمود. در جدول ۱-۵ تا ۱-۱۰ مقدار فوق روان‌کننده‌های مصرف شده در تعدادی از مخلوط‌های بتن با مقاومت بالا آمده است.

جدول ۱-۵ نسبت‌هاي اختلاط در مناطق دالاس و پلازا.

1 cm max25cm max
size aggregatesize aggregate

water (kg/m3)166148
Cement. Type 1 (kg/m3)360357
Fly ash. Class C(kg/m3)1501.19
Coarse aggregate (kg/m3)10521183
fine aggregate (kg/m3)683604
Watrer reducer (kg/m3)1.011.01
Superplasticizer (lit/m3)2.542.52
W/cementitious ratio0.330.29
f_c 28day (MPa). moist cured79.585.8
f_c 91 day (MPa) moist cured89.092.4

1 lb/yd3 = 0.59kg/m3or 1kg/m3 = 1.69 pcf
1in=25.4mm

جدول ۱-۶ طرح اختلاط راهنما براي بتن‌هاي با مقاومت بالا.

H.H-00H.H-01H.H-10H.H.11

water (kg/m3)195143173134
cement (kg/m3)558474391335
Fly ash(kg/m3)--167144
Coarse agg/fine agg. ratio2.02.02.02.0
Superplasticizer-yes-yes
W/cementitious ratio0.340.300.310.27
f_c 56-day(MPa)66726976

1 lb/yd3 = 0.59kg/m3or 1kg/m3 = 1.69 pcf
1in=25.4mm

جدول ۱-۷ نسبت‌هاي اختلاط براي بتن‌هاي با مقاومت بالا.

water (kg/m3)131
Cement-Type II(kg/m3)534
fly ash-Type F(kg/m3)59
Silica fume (kg/m3)40
Coarse aggregate 1 cm max. size(kg/m3)1069
fine aggregate F.M. = 3.2(kg/m3)623
Water reducer I (*l*/m3)1.77
water reducerII(*l*/m3)7.39
W/Cementitious ratio0.21
f_c 56-day(MPa)124

1lb/yd3 = 0.59kg/m3 or 1kg/m3 = 1.69pcf
1in=25.4mm