تاريخ:1403/04/10
شماره:354014/70
پيوست:3

معاونت فنی و عمرانی

بسم الله الرحمن الرحيم

معاونين محترم شهردار تهران
مشاوران محترم شهردار تهران
شهرداران محترم مناطق 22 گانه شهرداري تهران
رؤسا و مديران عامل محترم سازمانها و شركتهاي تابعه شهرداري تهران
مديران كل محترم ستادي
رئيس محترم سازمان بازرسي

موضوع:ابلاغيه شوراي فني "دستورالعمل ساخت و اجراي بتن خودتراكم (SCC)"

با سلام و احترام؛

به استناد مصوبه شماره 160/2482/20025 مورخ 1397/7/12 شوراي اسلامي شهر تهران و با عنايت به مصوبه شوراي فني شهرداري تهران، بدينوسيله **"دستورالعمل ساخت و اجراي بتن خودتراكم (SCC)"** ابلاغي سازمان برنامه و بودجه كشور به شماره 1403/163925مورخ 1403/04/04در چارچوب نظام فني و اجرايي شهرداري تهران به كليه واحدهاي شهرداري تهران ابلاغ مي گردد.

بديهي است رعايت مفاد اين دستورالعمل بر عهده ي بالاترين مقام واحد مربوطه بوده و مرجع رسيدگي، تفسير، داوري و اظهار نظر درخصوص اجراي مفاد اين ابلاغيه كه در كليه واحدهاي شهرداري تهران مورد استفاده قرار مي گيرد شوراي فني شهرداري تهران مي باشد.

هادی حق بین
معاون فنی و عمرانی

رونوشت: جناب آقاي مهندس اللهورديزاده، دبير محترم شوراي فني شهرداري تهران، جهت اطلاع؛

جمهوری اسلامی ایران

سازمان برنامه و بودجه کشور

آیین‌نامه بتن ایران

جلد پنجم

دستورالعمل ساخت و اجرای بتن خودتراکم (SCC)

ضابطه شماره ۵-۱۲۰

آخرین ویرایش ۱۴۰۳/۰۲/۰۱

معاونت تولیدی، فنی و زیربنایی

امور نظام فنی و اجرایی

nezamfanni.ir

وزارت راه و شهرسازی

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

aba.bhrc.ac.ir

۱۴۰۳

باسمه تعالی

ریاست جمهوری
سازمان برنامه و بودجه کشور
رئیس سازمان

بخشنامه به دستگاه های اجرایی،مهندسان مشاور و پیمانکاران	شماره :	۱۴۰۳/۱۶۳۹۲۵
	تاریخ :	۱۴۰۳/۰۴/۰۴

موضوع: آیین‌نامه بتن ایران (آبا) - جلد پنجم دستورالعمل ساخت و اجرای بتن خودتراکم (SCC)

در چهارچوب ماده (۳۴) قانون احکام دائمی برنامه‌های توسعه کشور، ماده (۲۳) قانون برنامه و بودجه و به استناد تبصره (۲) ماده (۴) » نظام فنی و اجرایی یکپارچه کشور «موضوع مصوبه شماره ۲۵۲۵۴/ت۵۷۶۹۷ هـ مورخ ۱۴۰۰/۰۳/۰۸ هیئت محترم وزیران، به پیوست ضابطه شماره **۵-۱۲۰** امور نظام فنی و اجرایی با عنوان «**آیین‌نامه بتن ایران – جلد پنجم: دستورالعمل ساخت و اجرای بتن خودتراکم (SCC)**» به صورت راهنما ابلاغ می‌شود تا از تاریخ ۱۴۰۳/۰۷/۰۱، برای همه قراردادهایی که از محل وجوه عمومی ویا به صورت مشارکت عمومی و خصوصی منعقد می‌شوند به مورد اجرا گذاشته شود.

دبیرخانه دائمی آیین‌نامه بتن ایران، دریافت‌کننده نظرات و پیشنهادهای اصلاحی در مورد مفاد این ضابطه بوده و اصلاحات لازم را امور نظام فنی و اجرایی این سازمان اعلام خواهد کرد.

داود منظور

اصلاح مدارک فنی

خواننده گرامی:

امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور، با استفاده از نظر کارشناسان برجسته مبادرت به تهیه این ضابطه کرده و آن را برای استفاده به جامعه‌ی مهندسی کشور عرضه نموده است. با وجود تلاش فراوان، این اثر مصون از ایرادهایی نظیر غلط‌های مفهومی، فنی، ابهام، ایهام و اشکالات موضوعی نیست.

از این‌رو، از شما خواننده گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده هر گونه ایراد و اشکال فنی، مراتب را بصورت زیر گزارش فرمایید:

۱- در سامانه مدیریت دانش اسناد فنی و اجرایی (سما) ثبت‌نام فرمایید: sama.nezamfanni.ir

۲- پس از ورود به سامانه سما و برای تماس احتمالی، نشانی خود را در بخش پروفایل کاربری تکمیل فرمایید.

۳- به بخش نظرخواهی این ضابطه مراجعه فرمایید.

۴- شماره بند و صفحه موضوع مورد نظر را مشخص کنید.

۵- ایراد مورد نظر را بصورت خلاصه بیان دارید.

۶- در صورت امکان متن اصلاح شده را برای جایگزینی ارسال کنید.

کارشناسان این امور نظرهای دریافتی را به دقت مطالعه نموده و اقدام مقتضی را معمول خواهند داشت.

پیشاپیش از همکاری و دقت نظر جنابعالی قدردانی می‌شود.

تبصره: در مورد آیین‌نامه بتن ایران (آبا)، دبیرخانه مستقر در مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی به طور اختصاصی، عهده‌دار جمع‌آوری و رسیدگی به نظرات می‌باشد که نشانی آن در این صفحه ارائه شده است.

نشانی برای مکاتبه : تهران، میدان بهارستان، خیابان صفی علی‌شاه - مرکز تلفن ۳۳۲۷۱

سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، امور نظام فنی و اجرایی

Email: nezamfanni@chmail.ir **web: nezamfanni.ir**

دبیرخانه آیین‌نامه بتن ایران (آبا):

aba.code@bhrc.ac.ir **aba.bhrc.ac.ir**

باسمه تعالی

پیشگفتار

بتن به‌عنوان یکی از پر مصرف‌ترین موادی که انسان استفاده می‌کند نقش مهمی در توسعه زیرساخت‌های جامعه صنعتی و ساخت ساختمان دارد. طبق آمار، میزان تولید سیمان بالغ بر ۴/۲ میلیارد تن در سال ۲۰۲۲ بوده که برآورد می‌شود حدود ۱۴ میلیارد متر مکعب بتن و ملات نیز تولید شده باشد. اگرچه میزان تولید بتن هرساله با رشد همراه بوده است.

با رشد و توسعه علوم مختلف، در چند دهه اخیر تولید و بکارگیری انواع مواد افزودنی معدنی و شیمیایی در انواع بتن نیز توسعه یافته و به همراه پیشرفت‌هایی که در زمینه ساخت ماشین‌آلات تولید، حمل و ریختن بتن بوجود آمده و همچنین اصلاح آیین‌نامه‌های مرتبط، توجه به توسعه انواع بتن‌های توانمند و توسعه کاربرد آن‌ها بیش از پیش، رو به گسترش می‌باشد.

یکی از این انواع بتن توانمند، بتن خودتراکم می‌باشد که اگرچه از ابداع آن حدود ۴۰ سال می‌گذرد ولی در دو دهه اخیر است که توانسته است با سرعت بیشتری گسترش پیدا کند. بتن خودتراکم بتنی است که بدون اعمال انرژی خارجی (یا مقدار انرژی کم) و تحت اثر وزن خود متراکم می‌شود. این بتن که بسیار سیال و روان و مخلوطی همگن است، برخی از مشکلات بتن معمولی نظیر جداشدگی و آب‌انداختن را رفع کرده است. علاوه بر این، بتن خودتراکم بدون نیاز به هیچ لرزاننده داخلی یا لرزاننده بدنه قالب، تحت اثر وزن خود متراکم می‌شود. این بتن به راحتی توانایی پر کردن قالب با وجود میلگرد انبوه را دارا می‌باشد و حتی در جاهایی که امکان حرکت و تراکم بتن معمولی وجود ندارد، به راحتی عبور می‌کند و متراکم می‌شود.

دستورالعمل حاضر با توجه به نیاز جامعه مهندسی در هشت فصل شامل کلیات، تاریخچه و ویژگی‌های بتن خودتراکم، مروری بر مشخصات و ویژگی‌های مواد و مصالح مورد استفاده، مروری بر روش‌های آزمایش بتن تازه، مروری بر روش‌های رایج طرح مخلوط، معیارهای انتخاب ویژگی‌های بتن تازه، روش طرح مخلوط، الزامات و توصیه‌های اجرایی و در نهایت کنترل کیفی و چک لیست‌های اجرایی تدوین شده است.

شایان ذکر است بطور کلی مطالب این دستورالعمل جنبه راهنما و توصیه دارد و تا آنجا که با ضوابط و مقررات آیین نامه بتن ایران (ضابطه شماره ۲-۱۲۰) منافات نداشته باشد، قابل اجرا می‌باشد.

این ضابطه با هماهنگی امور نظام فنی و اجرایی در دستور کار مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی قرارگرفت، که پس از بررسی براساس نظام فنی اجرایی یکپارچه، موضوع ماده ۳۴ قانون احکام دائمی برنامه‌های توسعه کشور و آیین‌نامه اجرایی آن و ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه، تصویب و ابلاغ گردید.

با وجود تلاش، دقت و وقت زیادی که برای تهیه این مجموعه صرف شد، این ضابطه مصون از وجود اشکال و ابهام در مطالب آن نیست. لذا در راستای تکمیل و پربار شدن محتوی این ضابطه از کارشناسان محترم درخواست می‌شود موارد اصلاحی را به امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور ارسال کنند. کارشناسان سازمان پیشنهادهای دریافت شده را بررسی کرده و در صورت نیاز به اصلاح در متن ضابطه، با همفکری نمایندگان جامعه فنی کشور و کارشناسان مجرب این حوزه، نسبت به تهیه متن اصلاحی، اقدام و از طریق پایگاه اطلاع رسانی نظام فنی و اجرایی کشور (Nezamfanni.ir) برای بهره‌برداری عموم، اعلام خواهند کرد. به همین جهت و برای تسهیل در پیدا کردن آخرین ضوابط ابلاغی معتبر، در بالای صفحات، تاریخ تدوین مطالب آن صفحه درج شده‌است که در صورت هرگونه تغییر در مطالب هر یک از صفحات، تاریخ آن نیز اصلاح خواهد شد. از اینرو همواره مطالب صفحات دارای تاریخ جدیدتر معتبر خواهد بود.

سید مهدی نیازی

معاون تولیدی، فنی و زیربنایی

بهار ۱۴۰۳

تهیه و کنترل «دستورالعمل ساخت و اجرای بتن خودتراکم»

[ضابطه شماره ۵-۱۲۰]

مجری: مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

اعضای گروه تهیه‌کننده:

امیر مازیار رئیس قاسمی	مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی	کارشناس ارشد عمران
محسن تدین	هیات علمی بازنشسته دانشگاه بوعلی سینا، مهندسین مشاور سیناب غرب	دکتری عمران

اعضای کمیته تخصصی:

پرویز قدوسی	دانشگاه علم و صنعت ایران	دکتری عمران
علی اکبر شیرزادی جاوید	دانشگاه علم و صنعت ایران	دکتری عمران
بابک احمدی	مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی	دکتری عمران
مهدی نعمتی	مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی	دکتری عمران
محمد حسین تدین	گروه مهندسی آرا بتن اروند، مدرس دانشگاه علم و صنعت ایران	دکتری عمران

اعضای کمیته هماهنگی آیین نامه بتن ایران (تایید کننده):

هرمز فامیلی	دانشگاه علم و صنعت ایران	دکتری عمران
محسن تدین	هیات علمی بازنشسته دانشگاه بوعلی سینا، مهندسین مشاور سیناب غرب	دکتری عمران
محمد شکرچی زاده	دانشگاه تهران	دکتری عمران
امیرمازیار رئیس قاسمی (دبیر)	مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی	کارشناس ارشد عمران

اعضای گروه هدایت و راهبری (سازمان برنامه و بودجه کشور):

علیرضا توتونچی	معاون تدوین ضوابط و معیارهای فنی
سجاد حیدری حسنکلو	کارشناس امور نظام فنی و اجرایی

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

پیشگفتار ۵

فصل ۱

کلیات ۳

۱-۱ مقدمه ۳

۱-۲ تاریخچه بتن خودتراکم ۴

۱-۳ مزایا و محدودیت‌های بتن خودتراکم ۸

۱-۴ انواع بتن خودتراکم از نظر ساختار ۹

۱-۵ خواص بتن خودتراکم تازه (خمیری) ۱۰

۱-۶ بررسی اقتصادی ۱۰

۱-۶-۱ بررسی اقتصادی هزینه‌های تولید و اجرا ۱۱

۱-۶-۲ بررسی اقتصادی هزینه‌های زمان ۱۲

۱-۶-۳ بررسی اقتصادی هزینه‌های کیفیت ۱۲

فصل ۲

مروری بر مشخصات مواد و مصالح بتن خودتراکم ۱۵

۲-۱ کلیات ۱۵

۲-۲ مشخصات مصالح بتن خودتراکم ۱۵

۲-۲-۱ سنگدانه‌ها ۱۵

۲-۲-۲ پُرکننده‌های پودری معدنی (غیر فعال) ۲۵

۲-۲-۳ سیمان و مواد جایگزین سیمان ۲۹

۲-۲-۴ مواد افزودنی شیمیایی ۳۱

فصل ۳

مروری بر آزمایش‌های رایج بتن خودتراکم تازه ۳۹

۳-۱ کلیات ۳۹

۳-۲ آزمایش‌های کارایی بتن خودتراکم ۴۰

۳-۲-۱ آزمایش جریان اسلامپ و زمان ۵۰ سانتیمتر (T_{50}) ۴۰
۳-۲-۲ شاخص پایداری چشمی ۴۲
۳-۲-۳ آزمایش حلقه J ۴۴
۳-۲-۴ آزمایش جعبه L ۴۶
۳-۲-۵ آزمایش قیف V ۴۷
۳-۲-۶ آزمایش ستون جدا شدگی (پایداری) ۴۹
۳-۲-۷ ارزیابی سریع مقاومت در برابر جدا شدگی ایستا (آزمون نفوذ) ۵۲
۳-۲-۸ آزمایش جداشدگی دینامیکی ۵۳
۳-۲-۹ آزمایش پایداری الک GTM (GTM Screen Stability Test Method) ۵۴
۳-۲-۱۰ بررسی خواص رفتارشناسی بتن با استفاده از دستگاه رئومتر ۵۵

فصل ۴

مروری بر روش‌های رایج طرح مخلوط بتن خودتراکم ۶۱

۴-۱ کلیات ۶۱
۴-۲ توصیه های ارائه شده توسط انجمن‌ها و موسسات معتبر بین المللی ۶۱
۴-۲-۱روش انجمن بتن آمریکا ACI 237 ۶۱
۴-۲-۲ روش کمیته اروپایی EN ۶۴
۴-۲-۳ توصیه نامه ژاپنی بتن خود تراکم (JSCE) ۶۷
۴-۲-۴ روش ارائه شده توسط موسسه ICAR ۶۷
۴-۳ توصیه‌ها و روش‌های ارایه شده (در مقالات) توسط برخی از محققین ۶۹
۴-۳-۱ روش مستدل طرح مخلوط ۶۹
۴-۳-۲ روش حداقل حجم خمیر سیمان ۶۹
۴-۳-۳ روش ارائه شده قدوسی و همکاران [81] ۷۱
۴-۳-۴ روش ارائه شده Su و همکاران ۷۲
۴-۳-۵ روش ارائه شده توسط Shen و همکاران ۷۴
۴-۳-۶ روش مطرح شده توسط Santhanam و همکاران ۷۶
۴-۳-۷ روش ارائه شده توسط Ghazi و همکاران ۷۹

فصل ۵

معیارهای انتخاب کارایی و رئولوژی SCC ۸۵

۵-۱ کلیات ۸۵

۵-۱-۱ قابلیت عبور ۸۶
۵-۱-۲ قابلیت پُر کنندگی ۸۷
۵-۱-۳ پایداری ۸۷
۵-۲ انواع ناپایداری بتن خودتراکم ۸۷
۵-۲-۱ آب انداختگی ۸۸
۵-۲-۲ انسداد ۸۸
۵-۲-۳ جدا شدگی ۸۸
۵-۲-۴ ته نشینی (نشست) ۸۹
۵-۳ ارتباط نتایج آزمایش‌های بتن تازه با شکل عضو و مشخصات عضو ۸۹

فصل ۶

مشخصات مصالح و طرح مخلوط بتن خودتراکم ۹۹

۶-۱ راهنمای انتخاب مصالح ۹۹
۶-۱-۱ سنگدانه ۹۹
۶-۱-۲ سیمان ۱۰۲
۶-۱-۳ مواد جایگزین سیمان ۱۰۲
۶-۱-۴ مواد افزودنی شیمیایی ۱۰۳
۶-۲ روش پیشنهادی طرح مخلوط بتن خودتراکم ۱۰۵
۶-۲-۱ کلیات و مبانی ۱۰۶
۶-۲-۲ دامنه کاربرد ۱۰۷
۶-۲-۳ گام‌های طرح مخلوط ۱۰۷
۶-۲-۴ اصلاح طرح مخلوط ۱۲۷
۶-۲-۵ بررسی ابقاپذیری (ثبات) طرح مخلوط نهایی بتن خودتراکم ۱۲۸

فصل ۷

نکات اجرایی ۱۳۱

۷-۱ کلیات ۱۳۱
۷-۲ طراحی قالب بر اساس آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌ها ۱۳۱
۷- ۳ اجرای بتن خودتراکم ۱۳۲
۷-۳-۱ الزامات آماده سازی محل بتن‌ریزی ۱۳۳
۷-۳-۲ انبار کردن مصالح ۱۳۳

۷-۳-۳ مخلوط کن‌ها ۱۳۴
۷-۳-۴ روش‌های مخلوط‌کردن در کارخانه ۱۳۴
۷-۳-۵ انتقال بتن ۱۳۴
۷-۳-۶ بتن‌ریزی ۱۳۷
۷-۳-۷ پرداخت دال‌ها ۱۳۹
۷-۳-۸ عمل‌آوری ۱۴۰

فصل ۸

کنترل کیفی و چک لیست‌های اجرایی ۱۴۳

۸-۱ کلیات ۱۴۳
۸-۲ کنترل کیفی مواد و مصالح اولیه ۱۴۴
۸-۲-۱ سنگدانه‌ها ۱۴۴
۸-۲-۲ مواد پودری خنثی (پرکننده پودری) ۱۴۴
۸-۲-۳ سیمان ۱۴۵
۸-۲-۴ آب ۱۴۵
۸-۳ کنترل کیفی و پذیرش آزمایش‌های بتن تازه ۱۴۶
۸-۳-۱ روانی و کارایی بتن خودتراکم ۱۴۷
۸-۳-۲ کنترل فرآیند تولید ۱۴۹
۸-۳-۳ تضمین کیفیت ۱۵۰
۸-۴ چک لیست‌های کنترل کیفی و نظارتی ۱۵۱
۸-۴-۱ چک لیست کنترل مواد و مصالح ۱۵۱
۸-۴-۲ چک لیست‌های تجهیزات، انبارش و اختلاط ۱۶۱
۸-۴-۳ چک لیست‌های آزمایش‌های بتن‌تازه و سخت شده و تواتر نمونه‌برداری ۱۶۳

منابع ۱۶۵

فصل ۱

کلیات

فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه

امروزه پیشرفت‌هایی که در زمینه‌های مختلف حاصل شده و گسترش آن به سطوح مختلف زندگی انسان، نگرش و سطح انتظارات را از نحوه زندگی متفاوت ساخته است. شاید بتوان ادعا کرده که در صنعت بتن و ساخت و ساز، ابداع و توسعه انواع بتن توانمند (HPC[۱]) یکی از ابزارهای پاسخگویی به این انتظارات می‌باشد. از میان انواع بتن‌های توانمند، بتن خودتراکم (SCC[۲]) یکی از ابداعاتی است که بدلیل مزیت‌های متنوع، با موفقیت در سراسر جهان استفاده شده و حجم زیادی از تحقیقات در زمینه فناوری بتن را در چهار دهه اخیر به خود اختصاص داده است. این بتن با توجه به سیال (بسیار روان)، به راحتی تحت نیروی گرانش و وزن خود جاری شده و بدون جداشدگی، از میان میلگردها عبور کرده و قالب را پر می‌کند.

در ادبیات فنی، بتن خودتراکم «بتن خیلی روانی است که ضمن حفظ پایداری، بدون جداشدگی به راحتی حرکت کند و درون قالب و اطراف و لابلای میلگردها را پُر نماید، بدون آن‌که نیازی به تراکم داشته باشد».

مهمترین ویژگی این نوع بتن، جریان‌پذیری خیلی‌زیاد و مقاومت زیاد در مقابل جداشدگی است. خاصیت جریان‌پذیری[۳] بتن خودتراکم با تغییر در طرح مخلوط بتن معمولی حاصل می‌شود. این تغییرات با استفاده از مقدار زیاد مواد پودری (سیمان، پودر سنگ و مواد افزودنی معدنی) و یا مواد افزودنی اصلاح کننده گرانروی[۴]، و نسل جدید فوق روان کننده‌ها حاصل می‌شود.

در کنار ویژگی‌ها و مزیت‌هایی که این نوع بتن می‌تواند به همراه داشته باشد، توجه به این موضوع که توسعه فناوری این نوع بتن مستلزم مطالعات عمیق و همه جانبه خواص و عملکرد آن در شرایط مختلف اقلیمی و اجرایی، تجهیز امکانات اجرایی اعم از سخت‌افزاری و نرم‌افزاری، گسترش علوم پایه مواد اولیه و تدوین دستورالعمل‌های اجرایی، می‌باشد.

---

۱ - High Performance Concrete
۲- Self Consolidating Concrete
۳- Flow ability
۴- Viscosity modifying admixture

در این دستورالعمل سعی شده است ضمن گردآوری نتایج تحقیقات انجام شده در کشور، از آخرین دستاوردهای تحقیقاتی و اجرایی دنیا نیز استفاده شده و بعنوان یکی از ضوابط و مقررات فنی اجرایی، ضوابط و الزامات مربوط به انتخاب مصالح، طرح مخلوط، نکات اجرایی و ضوابط کنترل کیفیت و پذیرش را ارایه نماید.

۱-۲ تاریخچه بتن خودتراکم

در سال‌های پس از ۱۹۸۳ میلادی، مشکل دوام سازه‌های بتنی، مهمترین زمینه تحقیقات در ژاپن بوده است. از طرف دیگر، کاهش تدریجی کارگران ماهر در صنعت ساخت ژاپن باعث کاهش کیفیت ساخت و افزایش هزینه کارگران ماهر شد. بر همین اساس در سال ۱۹۸۶ لزوم استفاده از SCC توسط Okamura پیشنهاد شد [4]. اولین مقاله‌های تحقیقاتی که نگاهی به اصول مورد نیاز SCC در ژاپن داشتند، حدود ۱۹۸۹ تا ۱۹۹۱ منتشر شدند. این مطالعات تحت عناوین بتن توانمند[۱] و بتن فوق کارا[۲] بر خواص بتن تازه مانند قابلیت پُرکنندگی، جاری شدن و مقاومت در مقابل جداشدگی متمرکز بودند [5 و 6].

نمونه اول SCC در سال ۱۹۸۸ تکمیل شد. این بتن، «بتن توانمند» نامیده شد، در حالی که در همان زمان بتن توانمند توسط Aitcin و همکاران [7] به بتن با «دوام و مقاومت زیاد» اطلاق شد. از آن زمان در دنیا، بتن با مقاومت زیاد به بتن توانمند موسوم شد. بنابراین Okamura و Ouchi [4] از آن زمان نام بتن «خودتراکم توانمند» را پیشنهاد دادند. هرچند در مقاله‌ها با نام‌های فوق العاده کارا، جاری شونده در حد زیاد[۳]، خودپخش‌شونده[۴] نیز نامیده شده است [8]. در سال ۱۹۹۵، اولین مقاله‌ها در مورد استفاده واقعی از SCC تحت عنوان خودتراکم[۵] منتشر شدند. اولین کارگاه SCC در سال ۱۹۹۸ در دانشگاه Kochi ژاپن برگزار شد. در سال ۱۹۹۹، اولین دستورالعمل برای کاربرد SCC در ژاپن توسط انجمن مهندسین عمران ژاپن (JSCE)[۶] منتشر شد.

سوئد اولین کشور اروپایی بود که توسعه SCC را آغاز کرد. در سال ۱۹۹۳ نیز تحقیقات گسترده‌ای تحت عنوان پروژه Brite-Euram با همکاری کشورهای اروپایی در نروژ آغاز شد و پروژه‌های واقعی عمرانی و خانه‌سازی ساخته شدند [9]. به موازات این پروژه، CBI با همکاری سازمان راه‌سازی سوئد، اولین پُل را خارج از ژاپن در سال ۱۹۹۸ به اتمام رساندند. گزارش پروژه نشان داد که SCC نسبت به بتن معمولی از مقاومت و دوام بهتری برخوردار بود؛ و در عین حال هزینه‌ها را حدود ۱۰ درصد کاهش داد.

---

۱. High-performance
۲. Super-workable
۳. Highly-fluidized
۴. Self-placable
۵. Self-compacting
۶. Japanese Society of Civil Engineering

اولین سمینار SCC توسط RILEM در سوئد در سال ۱۹۹۹ برگزار شد. ۲۳ مقاله از آسیا، ۳۸ مقاله از اروپا، ۵ مقاله از آمریکا و یک مقاله از استرالیا در این کنفرانس ارائه شدند. دیگر کشورهای اروپایی نیز فعالیت‌های خود را از نظر پژوهش و پروژه‌های واقعی آغاز کردند و تقریباً تا سال ۲۰۰۳ اکثر کشورهای اروپایی دستورالعمل‌هایی برای SCC منتشر کردند. از آن جمله اولین گزارش توسط موسسه EFNARC در انگلیس به سفارش کمیته اروپایی بتن انتشار یافت. در سال ۲۰۰۵ راهنمای اروپایی بتن خودتراکم (مرجع) به همت ۵ موسسه ERMCO، EFCA،EFNARC ، CEMBUREAU و bibm ارایه گردید.

در آمریکای شمالی از سال ۲۰۰۰ پژوهش‌های گسترده‌ای آغاز شد و پژوهش‌های متعددی در دانشگاه Sherbrooke و Laval انجام شدند. کمیته‌هایی در ACI[۱]، ASTM[۲] و PCI[۳] فعال شدند. گزارش کمیته ACI 237 در سال ۲۰۰۷ منتشر شد. در این گزارش ضعف‌هایی مشاهده می‌شود. این مشکل بی دلیل نیست، چون هنوز راه طولانی برای توسعه و تثبیت کاربرد SCC در پیش می‌باشد.

اگرچه سابقه استفاده از بتن خودتراکم در ایران کمتر از دو دهه است، اما در سال‌های اخیر توسعه کاربرد آن دارای آهنگ به نسبت زیادی بوده است. از جمله می توان به برگزاری چندین همایش ملی و بین المللی (دانشگاه تهران سال ۱۳۸۵، مرکز تحقیقات راه مسکن و شهرسازی سال ۱۳۹۱، و دانشگاه علم و صنعت ایران سال ۱۳۹۶) و همچنین انجام پروژه‌های اجرایی همچون، طرح توسعه حرم حضرت معصومه در قم، بخش زیادی از بتن‌ریزی ایوان و شبستان مرکزی مصلی تهران، بخشی از تونل نیایش و قطعات عرشه و سرستون‌های پل صدر و ... اشاره نمود که در زیر به معرفی چند طرح به عنوان نمونه اشاره شده‌است.

۱-۲-۱ ایوان و شبستان مرکز مصلی تهران، ایران

مجتمع بزرگ مصلّای امام خمینی در ۲۰۴ هکتار از اراضی عبّاس‌آباد در زمینی به وسعت ۶۵ هکتار که از شمال به بزرگراه شهید همت، از جنوب به خیابان شهید بهشتی، از شرق به خیابان شهید قنبر زاده و از غرب به بزرگراه شهید مدرس محدود است، در حال احداث می باشد. در طراحی معماری مصلی از اعداد طلایی استفاده شده است به‌طوری‌که به یاد و نام معصومین علیهم السلام دارای ۱۴ گلدسته، ۱۲ صحن و ۵ ورودی می باشد. ارتفاع ایوان بزرگ مصلی ۷۲ متر به عدد شهدای کربلا و ارتفاع گنبد مسجد جامع ۶۳ متر به عدد سالهای عمر پیامبر اکرم است. مصلی دارای ۷ گنبد می‌باشد که متاثر از معماری گنبدهای ایرانی مناطق مختلف کشور طراحی شده اند. گنبد اصلی مصلی، از بزرگترین گنبدهای جهان اسلام بوده و بدیع‌ترین طرح را دارد (شکل ۱-۱).

۱. American Concrete Institute
۲. American Society for Testing and Materials
۳. Precast/Prestressed Concrete Institute

شکل ۱-۱ تصویری از طرح گنبد، ایوان و شبستان مرکزی

در ساخت قسمت‌های اصلی ایوان و شبستان مرکزی و همچنین قسمت‌هایی از گنبد، از بتن خودتراکم استفاده شده است. حجم بتن خودتراکم حدود ۷۰،۰۰۰ مترمکعب می‌باشد.

حداکثر اندازه سنگدانه‌ها در بخش‌هایی ۱۹ میلی‌متر و در برخی از المان‌ها که حجم میلگرد بسیار زیاد بوده، به ۱۲/۵ میلی‌متر محدود شده است. مقاومت فشاری بتن در ۲۸ روز MPa ۴۵ می‌باشد. از ویژگی‌های این بتن استفاده از پوزولان طبیعی خاش می‌باشد (شکل ۱-۲).

شکل ۱-۲ حجم زیاد میلگرد در یکی از ستون‌ها و دال‌های ایوان و شبستان مرکزی پروژه مصلی تهران

۱-۲-۲ پل بزرگراه صدر و تونل نیایش ایران

اجرای این پروژه با هدف اصلی کاهش بار ترافیکی یکی از اصلی‌ترین شریان‌های بخش شمالی تهران انجام شد که در زیر به اختصار به زیر شاخه‌های آن اشاره می‌شود.

۱. تکمیل و توسعه شریان‌های ارتباطی شرقی-غربی کلان شهر تهران.
۲. افزایش ظرفیت ترافیکی بزرگراه شهید صدر.
۳. توزیع ترافیک ورودی شمال شرق که از طریق بزرگراه‌های پردیس و شهید بابایی صورت می‌گرفت.
۴. اتصال شرق به غرب تهران پس از گذر از تونل نیایش، بزرگراه نیایش و شهید همّت.

احجام اصلی پروژه:

کل حجم بتن‌ریزی به میزان ۲۹۴،۰۰۰ مترمکعب، و بتن خودتراکم حدود ۶۰،۰۰۰ مترمکعب

خاک‌برداری به میزان ۳۱۰،۰۰۰ مترمربع

آرماتوربندی به میزان ۷۵،۰۰۰ تن

قالب‌بندی به میزان ۶۶۳،۰۰۰ مترمربع

عیار سیمان ۴۳۰ کیلوگرم در مترمکعب

مقاومت فشاری طرح ۴۵ MPa

شکل ۱-۳ نمایی از پل صدر (سمت چپ) و پایه‌های دروازه‌ای که با استفاده از بتن خودتراکم ساخته‌شده‌اند (سمت راست)

شکل ۱-۴ حجم میلگرد در قطعات پیش‌ساخته سرستون و سطح تمام شده در قطعات عرشه

۱-۳ مزایا و محدودیت‌های بتن خودتراکم

مزایای متعددی برای SCC ارایه شده است که می‌توان اهم آن‌ها را به شرح زیر بیان کرد:

- قابلیت جاری شدن از میان میلگردهای متراکم، و درون قالب‌هایی با اشکال پیچیده؛
- کاهش برخی از هزینه ساخت ناشی از عدم نیاز به تراکم کردن و نیاز به عملیات کمتر در پرداخت سطح؛
- انعطاف‌پذیری بیشتر در جاری‌شدن در قالب، در نتیجه نیاز کمتر به تعدد نقاط بتن‌ریزی؛
- دستیابی به بتن یکنواخت و همگن، در نتیجه بهبود خواص مکانیکی و دوام؛
- کاهش آلودگی صوتی و سرعت بیشتر در ساخت به دلیل حذف متراکم کننده؛
- بهبود سطح بتن مجاور قالب، در نتیجه حذف تعمیر جهت رفع منافذ سطحی.

همچنین بتن خودتراکم می‌تواند مزایایی در اجرای سازه‌های بتنی خاص داشته‌باشد که به نمونه‌هایی از آن‌ها اشاره می‌شود:

- سازه‌های بتنی معماری ـ هنری که نیاز به ظرافت خاصی با میلگردگذاری متراکم دارند؛
- پل‌های با دهانه‌های بزرگ که به دلیل طولانی بودن خط انتقال بتن اجرای آن‌ها با بتن معمولی امکان‌پذیر نمی‌باشد و اجرای پایه‌های پل با توجه به ملاحظات معماری؛
- ساختمان‌های بلند و برج‌ها؛
- ستون‌ها و دیوارهای بلند با میلگردهای متراکم؛
- بتن‌ریزی کف‌ها و سطوح افقی؛
- بتن‌ریزی در زیر آب.

بتن خودتراکم دارای محدودیت‌هایی هم می‌باشد که البته با انتخاب مناسب مصالح، مواد و طرح مخلوط مناسب می‌توان آن‌ها را به حداقل رساند، از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- افزایش هزینه قالب‌ها به دلیل افزایش احتمالی فشار بر روی قالب؛
- نیاز به منابع انسانی ماهر و متخصص در هنگام انتخاب مصالح، طرح مخلوط، انجام آزمایش‌ها و اجرا؛
- افزایش ریسک و عدم قطعیت به دلیل استفاده از مواد و مصالح جدید مانند نسل جدید فوق روان کننده، ماده اصلاح کننده گرانروی ویا پودر سنگ؛
- افزایش الزامات کنترل کیفیت؛
- احتمال تغییرات عمده در خواص بتن تازه و سخت شده به دلیل کوچکترین تغییر در نوع و مقدار مواد مصرفی.

۱-۴ انواع بتن خودتراکم از نظر ساختار

بتن‌های SCC بر اساس مواد تشکیل دهنده (یا بعبارت دیگر مقاومت در برابر جداشدگی) به دسته‌های زیر تقسیم می‌شوند:

الف- حاوی مواد پودری[۱]: در این نوع بتن فقط از مواد پودری برای ایجاد مقاومت در مقابل جداشدگی استفاده می‌شود. مواد پودری شامل سیمان، مواد افزودنی معدنی (فعال و غیر فعال) مانند انواع پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی، سرباره‌ها و موادی مانند پودر سنگ آهک است. موادی که دارای ذرات کوچکتر از ۱۲۵ میکرو متر (۰/۱۲۵ میلی‌متر) می‌باشند، پودر محسوب می‌شوند، در ایران مواد پودری به ذرات کوچکتر از ۱۵۰ میکرو متر (۰/۱۵۰ میلی‌متر) اطلاق می‌شود. گاهی به این مواد پودری، «پُر کننده یا فیلر» نیز اطلاق می‌شود، این واژه برای مواد پودری خنثی (غیر فعال) مانند پودر سنگ به کار می‌رود. در این نوع بتن خودتراکم مقدار کل مواد پودری (شامل سیمان، مواد جایگزین سیمان و فیلرهای خنثی) بطور معمول بین ۴۵۰ تا ۶۰۰ kg/m^3 است.

ب- حاوی مواد اصلاح کننده گرانروی[۲]: در این نوع بتن برای حفظ مقاومت در مقابل جداشدگی از ماده افزودنی شیمیایی اصلاح کننده گرانروی (VMA)[۳] استفاده می‌شود. در این نوع بتن مقدار کل مواد پودری تقریباً ۳۵۰ تا kg/m^3 ۴۵۰ است.

پ- ترکیبی[۴]: در این نوع بتن هم پودر و هم اصلاح کننده گرانروی استفاده می‌شود تا مقاومت در مقابل جداشدگی افزایش یابد. در این نوع بتن مقدار کل مواد پودری بطور معمول بین ۴۰۰ تا kg/m^3 ۵۰۰ است.

در تمام انواع SCC از ماده افزودنی شیمیایی فوق روان کننده قوی استفاده می‌شود تا تغییر شکل زیادی را در بتن تازه ایجاد کند.

۱. Powder-type
۲. Viscosity agent type
۳. Viscosity Modifier Admixture
۴. Combintion- type

۱-۵ خواص بتن خودتراکم تازه (خمیری)

اگرچه بتن خودتراکم به لحاظ ویژگی‌هایی که دارد از جنبه‌های مختلفی مورد بررسی قرار می‌گیرد ولی سه ویژگی یا خاصیت اصلی، که به نوعی بتن خودتراکم را با آن تعریف می‌کنند، به شرح زیر می‌باشند:

- قابلیت پُرکنندگی[۱]: قابلیت جاری شدن SCC تحت وزن خود و پُرکردن تمام فضای درون قالب می‌باشد.
- قابلیت عبور[۲]: قابلیت عبور کردن از موانعی مانند مقاطع نازک، قالب و میلگردهایی با فاصله کم از یکدیگر، بدون جدا شدن و انسداد که ناشی از قفل و بست شدن ذرات سنگدانه است، اطلاق می‌شود.
- مقاومت در برابر جدا شدن[۳]: این خاصیت به پایداری[۴] نیز موسوم است و قابلیت SCC برای همگن‌ماندن در مدت انتقال و بتن‌ریزی گفته می‌شود.

به دلیل سه خاصیت ذکر شده، بتن خودتراکم از بتن معمولی متمایز می‌شود. به عبارت دیگر، فقط با انجام آزمایش ساده اسلامپ، امکان بررسی قابلیت‌های SCC وجود ندارد، بلکه نیاز به آزمایش‌های متعدد، مانند: جریان اسلامپ[۵]، جعبه L[۶]، قیف V و حلقه J است. همچنین برای ارزیابی بهتر SCC در حالت تازه، ضروری است که پارامترهای رئولوژی مانند تنش تسلیم (تنش‌جاری شدن) و گرانروی خمیری نیز اندازه‌گیری شوند. خواص SCC در حالت تازه نه تنها در رفتار رئولوژیک بتن اثر گذارند، بلکه نقش مهمی در خواص و دوام بتن سخت شده را ایفا می‌کنند.

۱-۶ بررسی اقتصادی

از آنجائی‌که زمان، کیفیت و هزینه، سه عامل اصلی در پروژه‌های اجرایی می‌باشند، کاربرد بتن‌های خودتراکم را نیز باید با توجه به این جنبه‌ها، مورد بررسی و مقایسه قرار داد. کاربرد بتن‌های خودتراکم در هر سه پارامتر فوق تاثیرگذار می‌باشد. به عبارت دیگر، استفاده از بتن‌های خودتراکم باعث افزایش سرعت اجرا و بهبود خواص مکانیکی و دوام می‌شود. از نظر هزینه‌ها نیز، چنان‌چه کل هزینه‌های ساخت، اجرا و حتی هزینه‌های بهره‌برداری، در نظر گرفته شود، بر اساس بررسی‌های انجام شده در داخل و خارج از کشور [90 و 91]، مشخص می‌شود که بتن‌های خودتراکم حتی می‌توانند از بتن‌های معمولی با رده مقاومتی یکسان، ارزان‌تر نیز تمام شوند.

---

۱. Filling ability
۲. Passing ability
۳. Segregation resistance
۴. Stability
۵. Slump flow
۶. L-Box

نکته قابل توجه در این بررسی‌ها، عدم امکان برآورد دقیق هزینه‌های افزایش سرعت اجرا، بهبود کیفیت، کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌باشد، ضمن اینکه در تحقیقاتی که در خارج از کشور انجام شده برآوردهای بدست آمده با توجه به قیمت مصالح و هزینه نفر – روز در آن کشورهای بوده که لزوماً با قیمت‌های موجود در کشور، تناسب ندارند.
با توجه به موارد فوق، در ادامه سعی شده با کمّی کردن برخی از پارامترهای موثر، تا حدودی مزیت اقتصادی استفاده از بتن‌های خودتراکم را مورد بررسی قرار داد:

۱-۶-۱ بررسی اقتصادی هزینه‌های تولید و اجرا

بررسی‌های انجام شده در چند پروژه داخل کشور نشان می‌دهد، برای بتن‌های خودتراکمی که با استفاده از مواد پودری ساخته می‌شوند (در ایران استفاده از مواد پودری نسبت به مواد اصلاح کننده گرانروی، بسیار رایج‌تر است)، هزینه مواد و مصالح بتن‌های خودتراکم تقریباً ۱۲ تا ۱۸ درصد بیشتر از بتن‌های معمولی با همان رده مقاومتی می‌باشد. شایان ذکر است، در بتن‌های با مقاومت بیشتر، افزایش هزینه تولید بتن خودتراکم دارای افزایش نسبی هزینه کمتر، و در بتن‌های با مقاومت کمتر، به نسبت گران‌تر از بتن‌های معمولی خواهند بود.
هزینه‌های غیر مستقیم تولید و جایدهی نیز از چند جنبه مورد توجه می‌باشد، بدلیل اختلاط مناسب و ایجاد یکنواختی در هنگام اختلاط، معمولاً مدت زمان اختلاط بتن‌های خودتراکم بیشتر از بتن‌های معمولی است ولی در عوض در هنگام تخلیه و پمپ کردن بدلیل روانی و انسجام بیشتر، مدت زمان تخلیه و جایدهی کاهش یافته و به همین دلیل مدت زمان توقف تراک میکسر و وسایل انتقال (مانند پمپ) کاهش می‌یابد و اگرچه نمی‌توان هزینه‌های دقیق افزایش زمان اختلاط و کاهش مدت زمان توقف تراک میکسر و یا پمپ را محاسبه نمود، ولی استفاده از بتن خودتراکم، مسلماً باعث کاهش هزینه‌های حمل و نقل می‌شود.
یکی دیگر از پارامترهای موثر در کاهش هزینه‌های اجرا، عدم نیاز به تراکم و در نتیجه حذف فرد مسئول لرزاننده و تراکم بتن و اجاره یا استهلاک دستگاه لرزاننده می‌باشد. همچنین بدلیل سهولت در پرداخت سطح بتن (در دال‌ها و یا سقف‌ها) استفاده از بتن خودتراکم باعث کاهش هزینه‌های پرداخت سطح بتن می‌شود.
نکته دیگر در بحث هزینه‌های اجرا، هزینه‌های مربوط به قالب‌بندی می‌باشد. اگرچه در اعضایی که نمایان[۱] نیستند، جنس قالب در بتن‌های خودتراکم و بتن معمولی تفاوت ندارد، ولی رعایت یکسری نکات اجرایی در بتن‌خودتراکم اهمیت بیشتری دارد. بطور مثال، قالب‌ها باید دارای حداقل درز بوده و به نحوه مناسبی آب‌بند شوند تا از خروج شیره بتن جلوگیری شود. همچنین با توجه به فشار بیشتر بتن خودتراکم، در برخی اعضا، طراحی قالب با توجه به فشار بتن از اهمیت بیشتر برخوردار می‌باشد.
در خصوص هزینه‌های کنترل کیفیت و نظارت نیز، بطور معمول هزینه‌های مربوط به تجهیز آزمایشگاه، آموزش کارکنان و همچنین نظارت و نمونه‌برداری از بتن‌های خودتراکم، بیش از بتن‌های معمولی است، ولی در مقایسه با بتن‌های توانمند

۱ – Expose

که امروزه کاربرد آن در اکثر نقاط جهان رایج شده و در کشور ما نیز در حال گسترش می‌باشد، هزینه‌های کنترل کیفیت و نظارت بتن خودتراکم با بتن توانمند، تفاوت چندانی وجود ندارد.
به غیر از موارد فوق، هزینه‌های موارد اجرایی دیگری نیز می‌تواند بسته به مورد، قابل توجه باشد، بطور مثال افزایش سرعت اجرای بتن‌های خودتراکم، باعث کاهش تعداد درزهای اجرایی (سرد) و در نتیجه هزینه مربوط به تعبیه درز سرد (مانند هزینه‌های میلگرد انتظار و ...) نیز می‌گردد.

۱-۶-۲ بررسی اقتصادی هزینه‌های زمان

همان‌گونه که در بند قبل اشاره گردید، استفاده از بتن‌های خودتراکم به غیر از افزایش زمان اختلاط هر پیمانه، در بقیه موارد شامل: حمل، ریختن، تراکم و تسطیح سطح بتن، باعث افزایش سرعت اجرا می‌شود.
افزایش سرعت اجرا در هر یک از مراحل فوق، بسته به مورد و حتی در کشورهای مختلف، باعث کاهش هزینه‌های مختلفی خواهد شد که باید در کشور ما نیز با توجه به هزینه نیروی متخصص، فنی و کارگری و همچنین ماشین‌آلات و ابزار مورد استفاده محاسبه گردد. بر اساس کارهای انجام شده در خارج از کشور، این کاهش هزینه‌ها، گهگاه تا ۸۰ درصد در هزینه‌های کارکنان و ۳۰ درصد در ماشین‌آلات، نسبت به بتن‌های معمولی نیز برآورد شده است.

۱-۶-۳ بررسی اقتصادی هزینه‌های کیفیت

بحث کیفیت و کمّی کردن پارامترهای آن دشوار بوده و معمولاً امکان انجام آن وجود ندارد. بر اساس نتایج تحقیقات انجام شده، دوام بتن‌های خودتراکم در اکثر موارد بیش از بتن‌های معمولی هم رده می‌باشد و به همین دلیل باعث افزایش عمر مفید و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌شود.
بحث کیفیت را می‌توان از جنبه‌های دیگر نیز مورد بررسی قرار داد، بطور مثال بتن‌ریزی در مقاطعی با ابعاد کم و یا با حجم زیاد و فاصله کم میلگرد، یا نیاز به سطح نمای بتن بسیار خوب، از جمله عواملی است که طراحان را مجبور به استفاده از بتن‌های خودتراکم می‌نماید. در این موارد بدلیل اینکه استفاده از بتن‌های دیگر، اجرایی نبوده و یا هزینه‌های زیادی را بوجود می‌آورد، استفاده از بتن‌های خودتراکم دارای مزیت زیادی می‌باشند.
با توجه به موارد فوق، بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد، اگرچه هزینه مصالح یا به عبارت دیگر هزینه تولید بتن‌های خودتراکم می‌تواند حدود ۱۵ درصد بیشتر از بتن‌های هم رده خود باشد، ولی با درنظر گرفتن صرفه‌های ناشی از افزایش سرعت اجرا، حذف لرزاننده و .... و بهبود کیفیت، هزینه تولید، اجرا و نگهداری بتن خودتراکم از بتن‌های معمولی هم رده خود کمتر می‌باشد.

فصل ۲

مروری بر مشخصات مواد و مصالح بتن خودتراکم

فصل دوم

مروری بر مشخصات مواد و مصالح بتن خودتراکم

۲-۱ کلیات

در این فصل بطور اجمال مروری به آنچه که در منابع و مراجع ملی و بین‌المللی در ارتباط به مشخصات مواد و مصالح بتن خودتراکم ارایه شده است، پرداخته می‌شود.

۲-۲ مشخصات مصالح بتن خودتراکم

اگرچه بتن خودتراکم را می‌توان با طیف گسترده‌ای از مواد و مصالح ساخت، ولی برای ساخت بتن خودتراکمی با مشخصات فنی و اقتصادی بهینه، باید از مواد و مصالحی با مشخصات مناسب استفاده نمود. به طور کلی بتن‌های خودتراکم در مقایسه با بتن‌های معمولی، به تغییر در مشخصات مصالح، بسیار حساس هستند. در این فصل به بررسی مشخصات و ویژگی‌های مصالح مناسب برای SCC پرداخته شده است و در انتها نیز راهنمای انتخاب هر یک از مصالح ارائه شده است.

۲-۲-۱ سنگدانه‌ها

بطور کلی بتن خود تراکم در مقایسه با بتن معمولی دارای مقدار کمتری سنگدانه می باشد. همچنین این بتن دارای نسبت کمتر سنگدانه درشت نسبت به سنگدانه ریز در مقایسه با بتن‌های معمولی است. اگرچه بتن خودتراکم را می‌توان با طیف گسترده‌ای از منابع سنگدانه تولید کرد، اما استفاده از سنگدانه‌هایی با ویژگی‌های مناسب می‌تواند منجر به بهبود خواص رئولوژی و کاهش تقاضا برای مواد سیمانی، آب و افزودنی‌های شیمیایی شود. در انتخاب معدن سنگدانه بتن خودتراکم، اگرچه بطور معمول شکل، تیزگوشه بودن، بافت، دانه‌بندی (از جمله حداکثر اندازه)، و مشخصات پودرهای پر کننده را بعنوان ویژگی‌های کلیدی برمی‌شمارند، اما محدود به آن‌ها نیست. در پیش‌بینی خواص رئولوژی، این ویژگی‌ها ممکن است بر اساس مدل‌های تجربی یا مبتنی بر رفتار رئولوژی، بکار گرفته شوند [1].

۲-۲-۱-۱ تشریح خواص کلیدی سنگدانه

شکل، گوشه‌دار بودن یا تیزگوشه‌گی (تیزگوشه بودن) و بافت به روش‌های مختلفی تعریف و اندازه‌گیری می‌شوند. «شکل» به طور کلی «ویژگی‌های هندسی» را در بزرگ‌ترین مقیاس، «بافت» در کوچک‌ترین مقیاس، و «تیزگوشه بودن» در مقیاس متوسط، توصیف می‌کنند. شکل، بافت و تیزگوشه بودن مستقل از یکدیگر هستند، اگرچه ممکن است برای نمونه‌های خاصی از ذرات سنگدانه به هم وابسته باشند. روش‌های توصیف شکل، تیزگوشه بودن و بافت ممکن است با روش‌های غیر ریاضی، ریاضی تجربی، یا کاملا ریاضی طبقه‌بندی شوند. اگرچه می‌توان ذرات را بر اساس اندازه‌گیری‌های دو یا سه بعدی توصیف کرد، اما اندازه‌گیری‌های دو بعدی می‌توانند دارای انحراف و جانبدارانه[1] باشند، به ویژه برای دانه هایی با درجه کرویت کمتر.

شکل، اغلب بر حسب پارامترهای سه بعد اصلی یک ذره تعریف می‌شود. بعنوان مثال Powers فاکتور شکل را با استفاده از رابطه زیر تعریف می‌کند [108]:

$$\text{فاکتورشکل} = \frac{LS}{I^2} \qquad (۱-۲)$$

که در آن:

L بزرگ‌ترین بعد اصلی، S کوچک‌ترین بعد اصلی، و I بعد اصلی میانی است.

ضریب شکل کمتر از واحد نشان دهنده، ذرات کشیده (دراز) است در حالی که ضریب شکل بزرگتر از واحد نشان دهنده شکل پهن است. شکل ممکن است با توجه به روابط زیر بر حسب تطویل و تورق نیز تعریف شود:

$$\text{تطویل} = \frac{L}{I} \qquad \text{پهن شدگی (تورق)} = \frac{I}{S} \qquad (۲-۲)$$

کرویت، که نشان دهنده نزدیکی شکل یک ذره به کره است، بیشتر برای توصیف شکل استفاده می‌شود [108]. کرویت ممکن است به عنوان قطر یک کره معادل با ابعاد ذره واقعی تعریف شود که دارای حجم برابر می‌باشد. به طور مشابه، ممکن است به عنوان مساحت سطح یک کره معادل با حجمی برابر با ذره واقعی تقسیم بر مساحت سطح ذره واقعی تعریف شود. ضریب کرویت Wadell به عنوان ریشه دوم حجم واقعی ذره تقسیم بر حجم کره معادل تعریف می شود [109]. از نظر ابعاد اصلی، کرویت را می‌توان همانطور که در روابط زیر نشان داده شده است نیز تعریف کرد[110]:

$$\text{کرویت} = \left(\frac{IS}{L^2}\right)^{\frac{1}{3}} \qquad (۳-۲)$$

$$\text{حداکثر کرویت ظاهری} = \left(\frac{S^2}{LI}\right)^{\frac{1}{3}} \qquad (۴-۲)$$

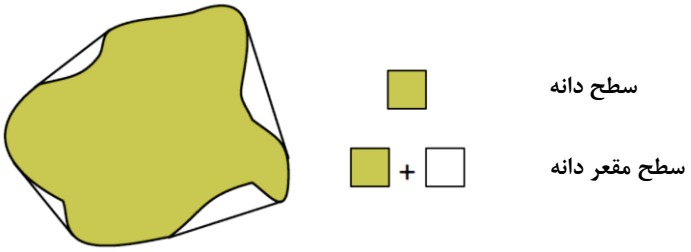
۱- Biased

تعاریف جامع‌تر از شکل ذرات توسط Ozol و Barrett [110,110] ارائه شده است. ساده ترین و پرکاربردترین رویکرد در طرح مخلوط بتن، فرض کردن ذرات کروی با قطر معادل چشمه الک است [111,112]. بیضی‌های دو پارامتری را می‌توان با استفاده از حجم و مساحت سطح یا حجم و نسبت ابعاد ترسیم کرد. بیضوی های سه پارامتری یا منشورهای متوازی السطوح را می توان با ابعاد اصلی یا با ممان اینرسی معادل ایجاد کرد.

به عبارتی تیزگوشه بودن، تیزی لبه‌ها و گوشه‌های یک ذره را توصیف می‌کند. از نظر کیفی، ذرات را می‌توان به صورت تیزگوشه، نیمه تیزگوشه، نیمه گرد گوشه، یا گرد گوشه یا به خیلی گردگوشه توصیف کرد. Powers [108] تیزگوشه‌بودن را به عنوان نقطه مقابل گردگوشه بودن (کرویت) توصیف می‌کند.

$$\text{گرد گوشه بودن} = \frac{\text{متوسط شعاع انحنا گوشه‌ها و لبه‌ها}}{\text{حداکثر شعاع دایره محاطی}} \qquad (۵-۲)$$

تیزگوشه‌گی را می توان با مقایسه مساحت سطح ذرات با مساحت سطح ناحیه محدب مشابه آن چه که در شکل ۲-۱ تعریف شده، تعریف کرد. نسبت تحدب را از تقسیم مساحت ذرات بر سطح محدب است در حالی که نسبت کامل آن، جذر این کسر است. با این حال، این نسبت‌ها به وضوح تیزگوشه‌گی را به طور کامل توصیف نمی‌کنند [145].



شکل ۲-۱ تعریفی از مفهوم سطوح مقعر در شکل ظاهری دانه‌ها

بافت، زبری یک ذره را در مقیاسی کوچکتر از مقیاسی که برای شکل و تیزگوشه بودن استفاده می‌شود، توصیف می‌کند. به عنوان مثال، Bouwman زبری را به عنوان تابعی از محیط اندازه‌گیری شده با وضوح کمتر (P_{smooth}) به وضوح بیشتر(P_{rough}) بر اساس رابطه زیر تعریف می‌کنند [113].

$$\text{زبری} = 1 - \frac{P_{smooth}}{P_{rough}} \qquad (۶-۲)$$

بطور مشابه، Ozol بافت را به عنوان درجه برآمدگی سطح یا مقدار سطح در واحد بعد یا سطح پیش‌بینی شده تعریف می‌کند و اشاره می‌کند که بافت به دامنه و فرکانس برجستگی‌ها بستگی دارد [109]. توصیف‌های متعدد دیگری برای شکل، زاویه و بافت موجود است. تفاوت این توصیف‌ها در پیچیدگی روش‌های تصویری و مفاهیم ریاضی هستند [109,110,113].

روش‌های اندازه‌گیری شکل، زاویه و بافت از ساده و ارزان تا پیچیده و گران قیمت وجود دارند. تغییرات زیادی در مورد هر رویکرد انجام شده است. روش‌های ساده شامل مشاهده بصری قطعات یا اندازه‌گیری دستی ابعاد اصلی یک قطعه است. شکل سنگدانه‌های درشت را می‌توان به صورت تخت (پهن)، طویل (دراز یا کشیده) و «تخت و طویل» طبقه‌بندی کرد.
در تعریف سنگدانه شکسته، وجهی که حداقل یک چهارم سطح آن وجه دارای شکستگی باشد، بعنوان وجه (سطح) شکسته محسوب می‌شود. اگر یک قطعه دارای تعداد مشخصی وجوه شکسته باشد، یک قطعه شکسته محسوب می‌شود. مشخصات شکل و بافت در هر دو سنگدانه ریز و درشت را می‌توان با یک شاخص، تعیین شده بر اساس ASTM D 3398 نشان داد. این آزمایش عمدتاً برای مخلوط‌های سنگدانه خاکی و مخلوط بتن آسفالتی در نظر گرفته شده است، اما با موفقیت برای بتن نیز بکارگرفته شده است [114]. این آزمایش شامل قرار دادن سه لایه سنگدانه در یک قالب استوانه‌ای و متراکم کردن سنگدانه‌ها با ۱۰ یا ۵۰ ضربه در هر لایه است. درصد فضاهای خالی برای حالت ۱۰ ضربه در هر لایه، V_{10}، و ۵۰ ضربه در هر لایه، V_{50} تعیین می‌شود و سپس برای محاسبه شاخص ذرات، I_a، از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$I_a = 1.25V_{10} - 0.25V_{50} - 32.0 \quad (۷-۲)$$

در استاندارد EN 933-5 نیز روشی برای محاسبه درصد شکستگی سنگدانه‌های درشت ارایه شده است. در این روش دانه‌های شکسته از گرد گوشه بصورت ظاهری و بوسیله دست جدا و هر گروه وزن می‌شود. همچنین در استاندارد EN 933-6 روشی برای تعیین فاکتور زبری سطحی دانه‌ها ارایه شده است.
روش‌های کامل‌تر شامل استفاده از حسگرهای مختلف برای به دست آوردن داده‌های دیجیتال برای تعیین هندسه[۱] ذرات، پردازش داده‌ها و محاسبه پارامترهای ریخت‌شناسی[۲] است [115].
روش‌های به دست آوردن داده‌های هندسی می‌تواند شامل تصویربرداری خارجی دیجیتال، نمایش نیمرخ[۳] سطح یا پرتونگاری مقطعی[۴] باشد [116].
نمایش نیم‌رخ سطح شامل تعیین مختصات سه بعدی است و می‌توان آن را با لیزر دامنه‌دار[۵]، محدوده آکوستیکی[۶]، کاوشگری[۷] مکانیکی مستقیم یا تداخل سنجی نقطه‌ای[۸] انجام داد [116].
در بتن، اندازه، شکل و بافت سنگدانه‌ها بر فضاهای خالی و درگیری و اصطکاک سنگدانه‌ها تأثیر می‌گذارد [117]. فضای خالی در سنگدانه‌های ترکیبی می‌تواند به دلیل تغییرات در شکل و بافت بین ۸ تا ۹ درصد متفاوت باشد، اما در عمل این

۱ - Geometry
۲ - Morphological parameters
۳ - Profilometry
۴ - Tomography
۵ - Laser ranging
۶- Acoustic ranging
۷ - Probing
۸ - Speckle interferometry

محدوده معمولاً بسیار کمتر است [109]. Hudson ادعا می‌کند که شکل و بافت مهم‌تر از دانه‌بندی هستند و تاکید می‌کند که تمرکز بر دانه‌بندی به دلیل استفاده تاریخی از ماسه‌های طبیعی است که در شکل، بافت و تیزگوشه‌بودن به میزانی که ماسه‌های فرآوری شده تغییر می‌کنند، تفاوتی ندارند. این استدلال مبتنی بر داده‌هایی است که نشان می‌دهد مخلوط‌هایی با سطح ویژه برابر اما با دانه‌بندی‌های متفاوت، نیاز به آب یکسان دارند و مقاومت فشاری مشابهی را بدست می‌دهند [118]. بطور کلی (در حالت تئوری) دانه‌های مکعبی شکل برای ساخت بتن مطلوب هستند. سنگدانه‌های بدشکل ممکن است نیاز به افزایش بیشتر سیمان داشته باشند. بافت دانه‌ها با کاهش اندازه ذرات اهمیت بیشتری پیدا می‌کند زیرا سطح بیشتری در دسترس است و همچنین تیزگوشه بودن بیش از شکل بر کارایی تأثیرگذار است.

شکل یک ذره سنگدانه با درجه ناهمسانگردی[1] ماده، شکل اولیه ذره، اثرات حمل و جابجایی، سایش طبیعی و خرد شدن دانه‌ها و اندازه ذرات خرد شده تعیین می‌شود. در مورد شن، شکل اولیه، به ویژگی‌های ساختاری در مقیاس بزرگ مانند درزه‌ها، شکستگی‌ها و گسل‌ها بستگی دارد. برای ماسه‌های طبیعی، شکل اصلی ذرات عمدتاً تابعی از شکل دانه معدنی است. میزان گرد شدگی ذرات طبیعی بستگی به سختی و سفتی سنگ و وجود شکاف یا ترک دارد که باعث شکستگی می‌شود. برای سنگدانه‌های خرد شده، شکل اصلی تشکیل شده توسط انفجار تحت تأثیر ویژگی‌های ساختاری در مقیاس بزرگ در سنگ بستر و همچنین معایب و ناپیوستگی‌های کوچک است. در فرآوری سنگدانه، استفاده از سنگ شکن ضربه‌ای به سنگ شکن‌های فشاری مانند سنگ شکن‌های فکی، چرخشی و مخروطی ارجحیت دارند. سنگ شکن‌های ضربه‌ای «سنگ روی سنگ» برای تولید سنگدانه‌های بتن با شکل، بافت و دانه‌بندی بهینه توصیه می‌شود. هر چه «ضریب کاهش» سنگ‌شکن بزرگتر باشد، ذرات به احتمال زیاد پهن (تخت یا پولکی) و کشیده‌تر (سوزنی یا طویل) خواهند بود.

دانه‌بندی، یا پراکندگی اندازه ذرات، که شامل همه مواد دانه‌ای مخلوط بتن (از جمله سنگدانه‌ها، مواد سیمانی، و سایر مواد افزودنی پودری)، عملکرد بتن را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. با توجه به گستره اندازه این دانه‌ها برای دانه‌بندی باید از روش‌های مختلفی استفاده کرد که بتوان از مقیاس نانومتر تا ده‌ها میلی‌متر را پوشش دهد.

دانه‌بندی با الک، مطابق با استانداردهای ملی ایران به شماره ۱۵۹۹ و ۴۹۷۷ (ASTM C136) رایج‌ترین روش برای دانه‌بندی سنگدانه‌های بزرگتر از ۷۵ میکرومتر است. دانه‌بندی مواد ریزتر از ۷۵ میکرومتر باید با روش‌های پیچیده‌تری تعیین شود، مانند دانه‌بندی با الک‌ها با امواج صوتی، پرتو لیزر و شمارش ذرات در تصاویر میکروسکوپ الکترونی [119]. بعنوان روش جایگزین، نرمی (ریزی) را می‌توان با روش نفوذپذیری هوا (روش بلین ASTM C204)، کدورت سنج واگنر (ASTM C115)، یا روش BET جذب نیتروژن (ASTM C1069) به دست آورد.

برای یک منبع قرضه سنگدانه با مشخصات شکل، زاویه و بافت مشخص، دانه‌بندی می‌تواند به طور قابل توجهی بر عملکرد سنگدانه در بتن تأثیر بگذارد. اهمیت یک سنگدانه با دانه‌بندی خوب با توزیع گسترده‌ای از اندازه ذرات، برای تولید بتن با کیفیت، ثابت شده است. با کوچکتر شدن اندازه سنگدانه، هزینه آن برای بتن افزایش می‌یابد، زیرا تولید آن پرهزینه‌تر می‌شود و ویژگی‌های آن تأثیر بیشتری بر ویژگی‌های بتن می‌گذارد [117].

۱- Anisotropy

برای سنگدانه درشت، استفاده از حداکثر اندازه سنگدانه بزرگتر باعث کاهش نیاز آبی بتن می‌شود. با این حال، خواص بتن سخت شده می‌تواند به دلیل افزایش ضخامت ناحیه انتقال و این واقعیت که ذرات بزرگتر دارای عیوب داخلی بیشتری هستند، اثر منفی داشته باشند [120]. به طور کلی، بهتر است که از بزرگترین حداکثر اندازه سنگدانه ممکن (کاربردی) استفاده شود [118].

۲-۲-۱-۲ روش‌های تجربی برای انتخاب مصالح

روش‌های تجربی متعددی برای انتخاب سنگدانه‌ها ممکن است به طور کامل یا جزئی در طرح مخلوط SCC بکار رود. بسیاری از روش‌هایی که در قرن گذشته در مقالات توصیف شده است، امروزه منسوخ شده‌اند.

در این بخش، روش‌های چگالی انباشتگی، تئوری خمیر اضافی و مشتقات آن، روش شیلستون، معادلات نیاز آب و روش ACI 211 شرح داده شده است. علیرغم دقت تئوری برخی از مدل‌های چگالی انباشتگی، روش چگالی انباشتگی را یک روش تجربی در نظر می‌گیرند.

- ***روش چگالی انباشتگی[۱]***

چگالی انباشتگی، که به عنوان حجم مواد جامد به حجم کل مواد تعریف می‌شود، به طور گسترده‌ای برای ارزیابی و ترکیب سنگدانه‌ها استفاده می‌شود. ویژگی‌های هندسی شکل، زاویه، بافت، و توزیع اندازه ذرات بر چگالی انباشتگی تاثیر می‌گذارد، بنابراین، چگالی انباشتگی را می‌توان به عنوان یک شاخص غیرمستقیم برای ویژگی‌های هندسی سنگدانه استفاده کرد. چگالی انباشتگی همچنین نشان دهنده فضای خالی است که باید با خمیر پر شود. خمیر اضافی بیش از حجم فضاهای خالی برای امکان اینکه دانه‌ها براحتی حرکت کنند و یک سطحی از روانی مورد نیاز را بدست دهند، لازم است. بنابراین، سنگدانه‌هایی با چگالی انباشتگی بیشتر، بطور معمول اجازه می‌دهند حجم بیشتری از سنگدانه‌ها و حجم کمتری از خمیر استفاده شود. به طور کلی، چگالی انباشتگی بیشتر (مطلوب) ترجیح داده می‌شود، اگرچه بیشترین چگالی انباشتگی ممکن است بهینه نباشد [108,121,122].

چگالی انباشتگی مفهومی کلیدی برای دستیابی به بتن با توانمند است. امروزه به دست آوردن بتن‌هایی با مقاومت زیاد، حتی تا ۱۰۰ مگاپاسکال و بیشتر چندان دشوار محسوب نمی‌شود. اما مقاومت تنها عامل مهم در تکنولوژی بتن نیست و عملکردهای دیگر نظیر کارایی، دوام و پایداری ابعادی نیز بسیار مهم هستند. برای رسیدن به مقاومت زیاد می‌توان از نسبت آب به سیمان کم و مقدار مواد جایگزین سیمان زیاد استفاده کرد. اما نسبت آب به سیمان کم به معنای کاهش کارایی مخلوط، و از طرف دیگر مقدار زیاد سیمان نیز به معنای افزایش انبساط یا انقباض حرارتی در هنگام افزایش مقاومت و جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن در سنین بیشتر است که پایداری ابعادی بتن را کاهش می‌دهد. بدین لحاظ، ساخت بتن پر مقاومت[۲] لزوماً به معنای دستیابی به بتن توانمند[۳] نیست.

۱- Packing density

۲ - High Stregth Concrete (HSC)

۳ - High Performance Concrete (HPC)

استفاده از چگالی انباشتگی با دانه‌بندی پیوسته با یک محدوده منحنی دانه‌بندی باریک، از جداشدگی جلوگیری می‌کند [123].

چگالی انباشتگی، علاوه بر مشخصات هندسی، به روش تراکم نیز بستگی دارد. برای تراکم از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود، برخی حالت بدون تراکم و برخی حالت تراکم با لرزش و فشار متغیر را توصیه کرده‌اند. بدلیل کاهش انحراف معیار در روش‌هایی که چگالی انباشتگی را تحت فشار و لرزش بدست می‌آورند، این روش‌ها ارجح هستند. در این روش‌ها که معروف به مدل تراکمی هستند، De Larrard پیشنهاد می‌کند که به طور همزمان یک لرزش با فشار ۱۰ کیلو پاسکال اعمال شود. برای مواد سیمانی و سایر مواد ریز، روش‌های دیگری وجود دارد [123]. برای این منظور De Larrard پیشنهاد می‌کند که چگالی انباشتگی را با اندازه‌گیری مقدار آب، با یا بدون مواد افزودنی، برای اینکه سیمان از یک پودر مرطوب به یک خمیر غلیظ تبدیل شود، را می‌توان بعنوان شاخص چگالی انباشتگی منظور کرد. در روش دیگر، که مطابق ASTM C 187انجام می‌شود، این مقدار را می‌توان با استفاده از آزمون ویکات برای اندازه‌گیری میزان آب لازم برای رسیدن به غلظت نرمال محاسبه کرد [123].

برای دستیابی به چگالی انباشتگی سنگدانه‌ها در حالت مطلوب، ممکن است از یک یا چند مدل توزیع اندازه ذرات ایده‌آل پیشنهادی، انجام آزمون‌های تجربی بر روی ترکیب‌های مختلف سنگدانه‌ها یا استفاده از مدل ریاضی چگالی انباشتگی، استفاده نمود. امروزه استفاده از مفهوم چگالی انباشتگی بهینه در بسیاری از کارهای صنعتی مورد توجه است و به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است.

مدل‌ها و روابط متعددی برای توزیع اندازه ذرات ایده‌آل با هدف دستیابی به چگالی انباشتگی مطلوب پیشنهاد شده‌است، که می‌توان برای کسب اطلاعات بیشتر به مراجع این دستورالعمل مراجعه نمود [108, 123].

- ***نظریه خمیر اضافی***

تئوری خمیر اضافی در ابتدا توسط Kennedy ارائه شد، اساس این روش استفاده از مقدار خمیری بیش از مقدار مورد نیاز برای پر کردن فضای خالی بین دانه‌ها بود. مقدار خمیر اضافی، به غلظت خمیر و سطح سنگدانه‌ها بستگی دارد. این نظریه بر اساس کارایی ضریب K است، که حجم خمیر سیمان اضافی تقسیم بر سطح سنگدانه و ضرب در ۱۰۰۰۰ است. در این تئوری فرض می‌شود که لایه خمیر اضافی برای همه اندازه سنگدانه‌ها برابر است [124]. Powers دریافت که این روش با توجه به درجه دقت آن بسیار پیچیده است و پیشنهاد کرد که مفهوم یک غشای روان کننده با ضخامت مشخص در اطراف سنگدانه‌ها توجیه‌پذیر نیست زیرا تغییر شکل‌ها در خمیر بسیار پیچیده‌تر است [108].

امروزه مفاهیم تئوری خمیر اضافی برای SCC بکارگرفته شده است. به عنوان مثال، روش طرح مخلوط ارایه شده توسط Bui و Montgomery تا حدی بر اساس فاصله متوسط بین ذرات سنگدانه است، با این فرض که ذرات کروی هستند. اثر شکل و بافت به طور جداگانه با در نظر گرفتن وزن واحد حجم سنگدانه‌های خشک متراکم با میله در نظر گرفته می‌شود [125]. Midorikawa و همکاران تئوری خمیر اضافی را برای ملات اعمال کردند و نظریه لایه آب را برای ملات بر اساس

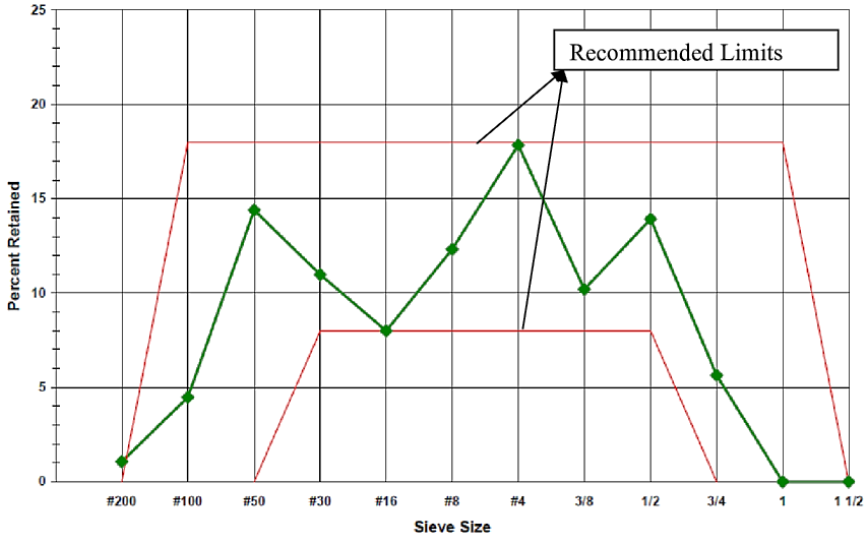
مدل خمیر اضافی توسعه دادند. این مدل را می‌توان برای انتخاب مقدار ماسه بهینه و مقایسه اثر آب و فوق‌روان کننده استفاده کرد [126].

Hasholt و همکاران و Oh و همکاران نیز از نظریه خمیر اضافی استفاده کرده‌اند [127,128].

- ***روش shilestone***

shilestone یک روش تجربی برای توسعه کاربرد روش‌های طرح مخلوط مبتنی بر مشخصات سنگدانه ارائه کرده است [129,130]. تمرکز اصلی این روش بر دانه‌بندی کل سنگدانه است، زیرا shilestone دریافت که دانه‌بندی تک تک سنگدانه‌ها اهمیت چندانی ندارد، اما منحنی دانه‌بندی ترکیبی مهم است (شکل ۲-۲). سنگدانه‌ها در سه بخش در نظر گرفته می شوند: بزرگتر از "3/8 (بعنوان با اهمیت که با "Q" مشخص می‌شود). بین "3/8 تا الک شماره 8 (با اندازه متوسط "I" نشان داده می‌شود)، و کوچکتر از الک شماره 8 (که با "W" نشان داده شده و برای کارایی است.). shilestone محدودیت‌های دانه‌بندی موجود هر یک از سنگدانه را به دلیل در نظر نگرفتن دانه‌بندی ترکیب سنگدانه‌ها، خطا می‌داند و سه ملاحظه مهم زیر را برای طرح مخلوط بتن اعلام می‌کند:

- رابطه بین درشتی بخش‌های Q و I و بخش W؛
- مقدار کل ملات؛
- توزیع اندازه ذرات سنگدانه.



شکل ۲-۲ نمونه‌ای از منحنی دانه‌بندی ترکیبی سنگدانه‌ها بر اساس روش shilestone

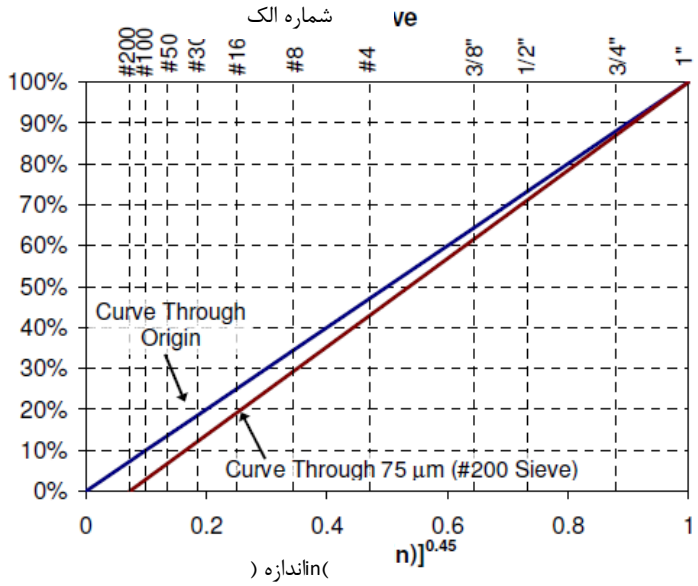
- ***معادلات آب مورد نیاز***

Powers تعدادی رابطه را خلاصه می‌کند که مقدار آب را به عنوان تابعی از مشخصات سنگدانه بیان می‌کند. با استفاده از این معادلات، مشخصات سنگدانه‌ها مانند دانه‌بندی و سطح ویژه را تغییر داد تا کمترین نیاز آب را به دست آورد [108]. این روابط قبل از استفاده متداول از مواد افزودنی شیمیایی و مواد سیمانی و بتن‌های خودتراکم داده شده است.

- ***روش توان ۰/۴۵ (Power 0.45)***

اگرچه سنگدانه‌هایی با دانه‌بندی گسسته، اغلب منجر به کاهش نیاز بتن به فوق روان‌کننده و گرانروی خمیری می‌شوند. با این حال، توصیه می‌شود که از آن‌ها استفاده نشود زیرا احتمال جداشدگی افزایش می‌یابد. در کشور آمریکا در بسیاری از موارد، منحنی توان ۰/۴۵ را دانه‌بندی مطلوبی قلمداد می‌کنند زیرا چگالی انباشتگی افزایش پیدا می‌کند و با نیاز آبی و فوق روان‌کننده کم، و گرانروی خمیری همراه است. منحنی توان ۰/۴۵ را با رسم خط موربی در نموداری که اندازه سنگدانه روی محور افقی (بصورت لگاریتمی) و درصد عبوری سنگدانه در محور عمودی است، رسم می‌کنند ((۲-۸).

همانطور که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است، معمولاً یک خط مستقیم از مبدا تا بزرگترین اندازه سنگدانه رسم می‌شود. در این دانه‌بندی، حجم زیادی از مواد ریزتر از الک شماره ۲۰۰ وجود دارد که بهتر است به عنوان پودر در نظر گرفته شود و به عنوان بخشی از خمیر در بتن محسوب می‌شود. دانه‌بندی‌های ریزتر از منحنی توان ۰/۴۵ (پایین منحنی) معمولاً به دانه‌بندی‌های درشت‌تر ترجیح داده می‌شوند، زیرا دانه‌بندی‌های درشت‌تر منجر به بتن خشن‌تری می‌شوند. از آنجا که معمولاً از حداکثر اندازه سنگدانه در بتن خودتراکم ۱۹ میلی‌متر است، مشکلات مربوط به دانه‌بندی گسسته ممکن است به میزانی که از حداکثر اندازه سنگدانه از ۲۵ بزرگتر است، شدید نباشد.



شکل ۲-۳ یک نمونه منحنی دانه‌بندی به توان ۰/۴۵ (Power 0.45)

$$P = \left(\frac{d}{D}\right)^{0.45} * 100 \qquad (۸-۲)$$

که در آن:

d: اندازه چشمه الک؛

D: بزرگترین اندازه اسمی سنگدانه.

- ***انجمن بتن آمریکا***

روش ACI 211 برای انتخاب نسبت‌های بتن، یک روش تجربی ساده و پرکاربرد است که به طور غیرمستقیم مقادیر نسبی سنگدانه‌های ریز و درشت را برحسب نسبت تعیین می‌کند. مقادیر توصیه شده در این روش معمولاً برای سنگدانه‌هایی با دانه‌بندی خوب و استاندارد در نظر گرفته شده است، ضمن اینکه هیچ راهنمایی صریحی در مورد ترکیب دو یا چند سنگدانه ارایه نشده است.

در این روش، حجم کل سنگدانه درشت در مخلوط بتن صرفاً تابعی از وزن واحد حجم سنگدانه درشت خشک متراکم با میله، مدول نرمی سنگدانه ریز و حداکثر اندازه سنگدانه است. با ثابت نگه داشتن سایر عوامل، حجم سنگدانه درشت با افزایش وزن واحد حجم سنگدانه درشت خشک متراکم با میله، کاهش مدول ریزدانه ماسه، یا افزایش حداکثر اندازه سنگدانه (بر اساس ابعاد عضو)، افزایش می‌یابد. حجم مطلق سنگدانه ریز به حجم همه مواد دیگر بستگی دارد، یعنی سنگدانه‌های ریز برای پر کردن حجم باقی مانده پس از انتخاب همه اجزای دیگر استفاده می‌شود. بنابراین، مقدار نسبی سنگدانه درشت به ریز نه تنها زمانی که حجم سنگدانه درشت افزایش می‌یابد، بلکه زمانی که مقدار سیمان و آب افزایش می‌یابد، نیز افزایش می‌یابد. با افزایش مقاومت فشاری مورد نظر یا افزایش مقدار آب، مقدار سیمان افزایش پیدا می‌کند، در نتیجه برای همان نسبت آب به سیمان، سیمان بیشتری نیاز است. مقدار آب اختلاط با افزایش تیزگوشه‌گی سنگدانه (که بعنوان سنگدانه شکسته یا گردگوشه تعریف می‌شوند)، افزایش اسلامپ مورد نظر، کاهش حداکثر اندازه سنگدانه، عدم حباب‌زایی، یا استفاده از افزودنی‌های کاهنده آب، افزایش می‌یابد. اگرچه استفاده از حباب هوا باعث کاهش حجم آب و سیمان مورد نیاز می‌شود، اما افزایش حجم هوا به طور کلی بیشتر از کاهش حجم آب و سیمان است.

جدول ۲-۱ تعیین حجم سنگدانه‌های درشت در یک کتر مکعب بتن

حداکثر اندازه اسمی سنگدانه، in (mm)	حجم سنگدانه خشک متراکم شده با میله در واحد حجم بتن، بر اساس مدول نرمی سنگدانه ریز			
	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8 (9.5)	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2 (12.5)	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4 (19.0)	0.66	0.64	0.62	0.60
1 (25.0)	0.71	0.69	0.67	0.65
1-1/2 (37.5)	0.75	0.73	0.71	0.69

به طور خلاصه، نسبت حجم سنگدانه درشت به حجم سنگدانه ریز با افزایش وزن واحد حجم سنگدانه درشت خشک متراکم با میله، کاهش مدول ریزی سنگدانه ریز، افزایش حداکثر اندازه سنگدانه، افزایش مقاومت فشاری هدف، استفاده از سنگدانه گوشه‌دار (شکسته) به جای سنگدانه درشت گردگوشه (طبیعی)، افزایش اسلامپ مورد نظر، استفاده از حباب هواساز یا عدم استفاده از مواد افزودنی کاهنده آب، افزایش می‌یابد.

با استفاده از روش ACI 211، یک تقریب کلی و اولیه از نسبت‌های مخلوط بدست می‌آید که به ساخت مخلوط‌های آزمایشی و اصلاحات بیشتر نیاز دارد. برخی از جنبه‌های این روش بیش از حد ساده شده است. به عنوان مثال، استفاده از مدول نرمی ریزدانه برای تمایز بین مشخصات ماسه‌ها ناکافی است. در سال ۱۹۴۰، کندی نوشت که مدول نرمی "به طور آشکاری نامناسب" است و دیگر استفاده نمی‌شود.

۲-۲-۲ پُرکننده‌های پودری معدنی (غیر فعال)

پرکننده‌های معدنی، شامل پودر ریز حاصل از تولید سنگدانه‌ها و برخی مواد دیگر بوده و معمولاً بر اساس ذرات عبوری از الک ۱۵۰ میکرومتر تعریف می‌شوند. دیگر منبع تولید پرکننده‌های پودری معدنی، آسیاب کردن مواد ریز است اگرچه این نوع محصول، یک فرآورده جانبی است و برای کاربرد خاص دارای ویژگی مشخصی نیستند. این نوع از پرکننده‌ها، به طور معمول منشا آهکی دارند. این مواد ریزدانه ممکن است داخل ماسه باشند یا بصورت جداگانه اضافه شوند. ویژگی‌های پودرهای پُرکننده آهکی باید مطابق یکی از استانداردهای ASTM C1797، EN 12620 یا استاندارد ملی ایران ۲۲۹۵۶ باشد. در ادامه برخی از ویژگی‌های این مواد و تاثیر آن‌ها بر خواص بتن تشریح شده است.

در استاندارد ملی ایران به شماره ۳۸۹ اجازه داده شده تا ۵ درصد سنگ آهک به سیمان اضافه شود، به شرط آنکه دیگر الزامات استاندارد برآورده شود. سنگ آهک اضافه شده به سیمان باید دارای خلوص حداقل ۷۰ درصد کلسیم کربنات باشد. همچنین در استاندارد سیمان آمیخته نیز امکان تولید سیمان آمیخته با اضافه کردن ۱۵ درصد سنگ آهک وجود دارد.

مشابه ماسه، شکل، گوشه‌دار بودن، بافت و دانه‌بندی پرکننده‌های بسیار ریز نیز مهم می‌باشد. همچنین، وجود رس و دیگر مواد مضر باید مورد توجه قرار گیرد. رس‌ها می‌توانند آب موجود در بتن تازه را جذب نمایند و منبسط شوند. همچنین باعث کاهش آب در دسترس، و افت میزان کارایی می‌شوند [131]. اگر رس‌ها بعداً خشک و جمع شوند، منافذی را از خود باقی می‌گذارند که باعث کاهش مقاومت و افزایش نفوذپذیری می‌شود [117]. علاوه بر این رس‌ها ممکن است عملکرد مواد افزودنی را کاهش، و تحت تاثیر قرار دهند [132,133].

میزان تاثیر رس‌ها بستگی به ریزی و واکنش‌پذیری آن‌ها دارد [131]. اسمکتایت (مونت مریلونیت) بیش از ایلیت یا کائولینیت آب جذب می‌کند [134]. وجود رس یا مواد آلی در پرکننده پودری را می‌توان با آنالیز حرارتی، هم ارز ماسه‌ای یا آزمایش متیلن بلو، شناسایی کرد. آنالیز حرارتی با حرارت دادن نمونه پودر مورد نظر به تدریج و تا دمای ۱۲۰۰ درجه

انجام شده و در حین افزایش حرارت، افت وزن اندازه‌گیری می‌شود. تغییرات وزن در دماهای مختلف می‌تواند نشان دهنده وجود رس باشد [134]. در آزمایش هم ارز ماسه‌ای نیز مواد پودری در یک استوانه مدرج ریخته شده و با مایع لخته‌ساز پر می‌شود (ASTM D2419 و INSO 1685 و EN 933-8). استوانه حاوی مواد با استفاده از شیکر برقی یا دستی تکان داده می‌شود. محلول لخته ساز اضافه می‌شود و نمونه برای مدت زمات مشخص دست نخورده باقی می‌ماند تا فرصت ته‌نشینی فراهم شود، به طوری که ماسه در پایین استوانه و خاک رس به سمت بالا شناور می‌شود. مقدار معادل ماسه به صورت نسبت ارتفاع ماسه به ارتفاع رس ضرب در ۱۰۰ بیان می‌شود.

آزمایش متیلن بلو[1]، از محاسبه مقدار محلول متیلن بلو جذب شده توسط رس‌های موجود در سنگدانه تشکیل شده‌است، این روش آزمایش در استاندارد ملی ایران به شماره ۹-۱۰۴۴۷ با اقتباس از EN 933-9 نیز آورده شده است. در این آزمایش قابلیت جذب رنگ به سطح فعال ذرات رس تعیین و در آن ظرفیت تبادل یونی و سطح ویژه، مشخص می‌شود [131]. چنان‌چه این آزمایش طبق استاندارد AASHTO T330 یا ASTM C1777 انجام شود، باید سنگدانه‌های ریز خشک و سپس الک شده تا مواد عبوری از الک ۷۵ میکرون آن بدست آید. محلول متیلن بلو از حل کردن ۵ میلی‌گرم متیلن‌بلو جامد ($C_{16}H_{18}Cl.N_3S$) در ۱ میلی‌لیتر آب بدست می‌آید. ۱۰ گرم از موادی که از الک ۷۵ میکرون عبور کرده را داخل بشر ریخته و ۳۰ میلی‌لیتر آب مقطر به آن اضافه کنید. با استفاده از مخلوط‌کن مغناطیسی که دارای همزن می‌باشد، محلول دوغاب مانند ایجاد می‌شود. مقادیر ۰٫۵ میلی‌لیتر متیلن بلو را مرحله به مرحله به این مقدار دوغاب اضافه می‌گردد. بعد از هر مرحله اضافه کردن، محلول را به مدت ۱ دقیقه مخلوط شود. با استفاده از یک همزن شیشه‌ای، یک قطره محلول را برداشته و روی کاغذ صافی قرار داده شود. زمانی آزمایش به پایان می‌رسد که هاله آبی روشن، اطراف قطره قرار داده شده روی کاغذ، ایجاد شود. تا زمانی‌که ذرات رس رنگ را جذب می‌کنند، قطره ریخته شده از ذراتی به رنگ آبی که توسط یک حلقه از آب بی رنگ احاطه شده، خواهد بود. زمانی‌که ظرفیت جذب ذرات رس تمام شود، مازاد متیلن بلو به‌صورت هاله‌ای به رنگ آبی روشن پدیدار می‌شود. بعد از این مرحله، باید دوغاب به‌مدت ۵ دقیقه مخلوط شده و مجدداً مورد آزمایش قرار گیرد. با این روش می‌توان ابتدا مقدار بیشتری متلین بلو را در دوغاب ریخت، تا سرعت آزمایش بیشتر شود. ارزش متیلن بلو (MBV)، بر اساس مقدار متیلن بلو اضافه شده، بر حسب گرم نسبت به وزن مواد و مطابق رابطه زیر بدست می‌آید.

$$MBV = {}^{CV}/_{W} \qquad (۹-۲)$$

که در آن C غلظت محلول متیلن بلو (میلی‌گرم متیلن بلو نسبت در هر میلی‌لیتر محلول)، V حجم محلول متیلن بلو مصرفی در تیتراسیون (mL)، و W وزن مصالح به گرم می‌باشد.

1 -Methylene blue test

آزمایش متیلن بلو در استاندارد شماره ۹-۱۰۴۴۷ وجود دارد که بر گرفته از EN 933-9 است. با توجه به تفاوت‌های روش آمریکایی و اروپایی، نتایج یکسانی بدست نمی‌آید و معیار مربوطه نیز یکسان نیست.

با آزمایش متیلن‌بلو، نمی‌توان تفاوتی بین انواع رس قائل شد، بعبارت دیگر بر اساس نتایج بدست آمده نمی‌توان از میزان خرابی ناشی از رس‌ها ایده‌ای داشت. بعنوان مثال، نتایج برخی تحقیقات نشان داده که رس اسمکتایت ۵ بار بیشتر از رس کائولینیت باعث کاهش مقاومت می‌شود، در حالی‌که ارزش متیلن‌بلو برای اسمکتایت ۳۴ برابر رس کائولینیت بدست می‌آید. این مشکل را می‌توان با اضافه کردن مقادیر مناسبی اتیلن گلیکول یا استفاده از رنگ آبی کارتاسول به جای متیلن‌بلو اصلاح کرد [131].

استعداد بروز خرابی‌های جدی ناشی از کاهش دوام بر اثر استفاده از پرکننده‌های آهکی در مناطق سردسیر و در معرض سولفات، بدلیل تشکیل تامازایت، حمله سولفاتی (TSA) وجود دارد. تامازایت(CaSiO3•CaCO3•CaSO4•15H2O) معمولاً بر اثر واکنش بین یون‌های سولفات، C-S-H، آب و دیگر یون‌های کربناتی یا اکسیدهای آهکی تشکیل می‌شود [135]. تامازایت ممکن است به روش‌های مختلفی تشکیل شود [136]. پرکننده‌های ناشی از آسیاب کردن سنگ آهک بعنوان منبع بالقوه یون کربنات محسوب می‌شوند. قطعات ریزتر دارای واکنش‌پذیری بیشتری نسبت به سنگدانه‌های آهکی هستند. از دیگر منابع تامین یون‌های کربنات، سنگدانه‌های دولومیتی، آب دریا و آب‌های زیرزمینی می‌باشند [138, 137]. بر خلاف انواع معمول خرابی ناشی از سولفات‌ها که منجر به انبساط و ترک خوردگی می‌شوند، TSA باعث نرم و خمیری شدن C-S-H می‌شود [139]. تامازایت بدلیل در دسترس بودن یون‌های سولفات و کربنات به واکنش ادامه داده و از نظر تئوری تا تخریب کامل کلیه C-S-H ادامه پیدا خواهد کرد، و از این جهت یک تهدید جدی محسوب می‌شود [140]. از نظر ساختار، تامازایت و اترینگایت مشابه هم می‌باشند با این تفاوت که، سیلیکات به جای آلومینات و یون‌های کربنات به جای یون‌های سولفات هستند. تشکیل تامازایت معمولاً در دمای کم (کمتر از ۱۵ درجه) مشاهده شده و در دماهای کمتر، آهنگ واکنش آن سریع‌تر می‌شود. هرچند تامازایت در اقلیم‌های گرم مانند جنوب کالیفرنیا نیز مشاهده شده است [138, 141]. گسترش استفاده از پرکننده‌های آهکی در سراسر جهان احتمال تشکیل تامازایت و تخریب ناشی از آن را افزایش می‌دهد [142]؛ هرچند که تامازایت در بناهای تاریخی و در آمریکا نیز شناسایی شده است [144, 143]. بر این اساس استفاده از سنگ آهک (بصورت پر کننده در بتن یا افزودنی در سیمان) در بتن‌هایی که در معرض هوای سرد قرار دارند باید محدود و مورد توجه قرار گیرد.

شکل، تیزگوشه‌گی و بافت پرکننده‌های سنگدانه و دیگر پرکننده‌های پودری معدنی را می‌توان با استفاده از روش‌هایی همچون ریز پرتونگاری مقطعی و تصویر برداری الکترونی مورد ارزیابی قرار داد [134, 145]. توزیع اندازه ذرات را می‌توان با الک مجهز به امواج صوتی، دانه‌بندی لیزری، شمارش دانه‌ها در میکروسکوپ الکترونی و روش‌های رسوبی، مورد ارزیابی قرار داد. ریزی را نیز می‌توان با آزمایش بلین با نفوذ هوا، کدورت سنجی واگنر یا اندازه‌گیری BET بوسیله نیتروژن تعیین نمود. ترکیب کانی‌ها را می‌توان با پراش اشعه X یا تصویر برداری الکترونی با انرژی طیف سنج پراش تعیین نمود [134].

تاثیر پرکننده‌های بسیار ریز و دیگر پرکننده‌های معدنی در کارایی (که تحت تاثیر پارامترهایی همچون شکل، گوشه‌دار بودن، بافت و دانه‌بندی است) را می‌توان با اندازه‌گیری میزان آب مورد نیاز مورد ارزیابی قرار داد. بطور مثال، آزمایش

ویکات را می‌توان برای تعیین میزان آب مورد نیاز برای رسیدن به روانی نرمال، مطابق استاندارد ASTM C187 استفاده کرد. در آزمایش «تک قطره[۱]» یک قطره آب به حجم ۰٫۲ ml روی بستری از پودر قرار داده می‌شود، در نتیجه یک کلوخه ایجاد می‌شود. این سطح می‌تواند شامل پرکننده‌های بسیار ریز، یا ترکیبی از پرکننده پودری ریز و مواد جایگزین سیمان باشد. بعد از ۲۰ ثانیه، کلوخه خارج شده و وزن آن تعیین می‌شود. این آزمایش را باید حداقل ۱۵ بار، برای حداقل کردن خطا انجام داد. نسبت آب به پودر در هر دو آزمون ویکات و «تک قطره»، تعیین می‌شود. اگرچه آزمون «تک قطره» و ویکات برای پرکننده‌های معدنی با ریزی، شکل و بافت متفاوت، نتایج متفاوتی را ارائه می‌دهند.

پرکننده‌های ریز یا دیگر پرکننده‌های معدنی به صورت موفقیت آمیزی در بتن‌های معمولی یا خودتراکم مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نتایج تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که بتن‌هایی حاوی ماسه فرآوری شده (ماسه شکسته) که دارای مقادیر زیادی گرد ناشی از خرد شدن هستند، عملکردی معادل یا حتی بهتر از بتن‌های ساخته شده، از ماسه طبیعی، داشته‌اند [146].

برای ارزیابی تاثیر استفاده از پرکننده‌های ریز دو پارامتر کلیدی مورد توجه بوده‌است، چگونگی جایگزینی پرکننده‌های ریز پودری به جای سیمان یا ماسه، و دوم، نحوه ثابت نگه‌داشتن نسبت آب به سیمان یا آب به پودر. هنگامی‌که پرکننده‌های ریز بعنوان جایگزین ماسه مورد استفاده قرار می‌گیرند، معمولاً مقدار آب مورد نیاز به‌دلیل زیاد شدن مقدار مواد ریزدانه، افزایش پیدا می‌کند. اگر پرکننده ریزها بعنوان جایگزین سیمان مورد استفاده قرار گیرند، در اکثر موارد و بسته به شکل و دانه‌بندی مواد پرکننده پودری، می‌توان مقدار آب را کاهش داد. اگر نسبت آب به سیمان ثابت نگاه‌داشته شود، با اضافه کردن پرکننده ریز، ممکن است بدلیل بهتر شدن چگالی انباشتگی مخلوط و اثر متقابل پرکننده پودری در هیدراته‌شدن سیمان، مقاومت فشاری نیز افزایش پیدا کند. در مواردی‌که آب به پودر ثابت نگاه داشته می‌شود، بدلیل اضافه کردن پرکننده ریز، مقاومت فشاری بدلیل افزایش نسبت آب به سیمان، می‌تواند کاهش یابد اگرچه تا حدودی کاهش مقاومت بدلیل بهتر شدن چگالی انباشتگی و فعل و انفعال پرکننده پودری در هیدراته‌شدن سیمان، جبران می‌شود.

اکثر مدارک موجود در ادبیات فنی مرتبط با استفاده از پرکننده‌های پودری معدنی، حاکی از کاربرد پرکننده پودری سنگ آهک پودر شده می‌باشد، که بطور گسترده‌ای در قسمت‌های مختلف اروپا مورد استفاده قرار گرفته‌اند [147] ولی در آمریکا به این‌صورت نیست. دانه‌بندی و ریزی پرکننده سنگ آهک پودر شده، بسته به منبع آن می‌تواند بسیار متغیر باشد. استاندارد پودر سنگ‌های آهکی مطابق ASTM C1797 و استاندارد ملی ایران ۲۲۹۵۶ می‌باشد. از آن‌جایی‌که دانه‌بندی، به روش‌های مختلف آسیاب کردن بستگی دارد، پرکننده‌های آهکی را بر اساس محدوده اندازه ذرات، تقسیم بندی می‌کنند. سنگ آهک آسیاب شده غالباً از کلسیم کربنات تشکیل شده و مقدار کانی‌های دیگر در آن بسیار کم است.

استفاده از پرکننده سنگ آهک پودر شده، بعنوان جایگزین سیمان، احتمال دارد مقدار آب مورد نیاز یا فوق‌روان کننده را کاهش دهد. بطور معمول علت بهبود کارایی، به رغم افزایش نرمی، به بهبود توزیع اندازه ذرات و دانه‌بندی مرتبط می‌باشد [147, 148, 149]. در بحث رئولوژی، پرکننده پودری آهکی در نقش کاهش دهنده تنش تسلیم و گرانروی خمیری، عمل

۱- Single drop test

می‌کند [150, 151]. سنگ آهک آسیاب شده می‌تواند در مخلوط SCC، پایداری استاتیکی را افزایش داده و آب انداختن را کاهش دهد [150].

پودرهای سنگ آهک همچنین می‌توانند آهنگ هیدراته‌شدن را تسریع کنند، در نتیجه مقاومت در سنین اولیه نیز افزایش می‌یابد. تاثیر پرکننده سنگ آهک در سنین بعدی کمتر است [150]. این ذرات می‌تواند بستری را برای هسته‌زایی فراهم کند [152]. همچنین پرکننده سنگ آهک می‌تواند با C_3A واکنش داده و کربوآلومینات بوجود آورده و با C_3S کلسیم کربوسیلیکات هیدراته را تولید نماید [149]. پرکننده سنگ آهک چگالی خمیر را افزایش می‌دهد، که اغلب موارد برای بهبود مقاومت و مشخصات ناحیه انتقالی (ITZ)، مهم می‌باشد. در مواردی که مقاومت فشاری را کاهش می‌دهد، به خصوص در مواردی که درصد جایگزینی به جای سیمان زیاد است، بهبود در کارایی این امکان را فراهم می‌کند که مقدار آب را کاهش داد و در نتیجه تا حدی جبران کاهش مقاومت می‌گردد [150].

به غیر از پرکننده سنگ‌آهک آسیاب شده، دیگر مواد آسیاب شده را نیز می‌توان استفاده نمود. غبار و پودرهای ناشی از شکستن و خرد شدن، هم می‌تواند بعنوان مواد جایگزین سیمان و هم به عنوان سنگدانه مورد استفاده قرار گیرد. در مواردی که جایگزین سیمان می‌شود، معمولاً نتایج رضایت‌بخش‌تر است. غبار و خرده‌سنگ‌های ناشی از شکستن سنگ‌های سیلیسی مانند گرانیت و شیشه پودر شده می‌تواند در بتن خودتراکم مورد استفاده قرار گیرد. این غبار و خرده سنگ ناشی از خرد شدن گرانیت باعث بیشتر شدن مصرف فوق‌روان‌کننده، نسبت به پورد سنگ آهک می‌شود، این موضوع به ریزی بیشتر، پولکی و سوزنی بودن ذرات خرد شده وابسته است.

۲-۲-۳ سیمان و مواد جایگزین سیمان

سیمان و مواد جایگزین سیمان در بتن خود تراکم به عنوان جزء چسباننده بکار می‌رود. طیف وسیعی از انواع سیمان‌ها و مواد جایگزین را می‌توان در این بتن بکار برد. مقدار و نوع این مواد بگونه‌ای انتخاب می‌شود که خواص مورد نظر در بتن تازه و سخت شده حاصل شود.

۲-۲-۳-۱ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سیمان و مواد جایگزین سیمان

در راهنمای PCI [1] ذکر شده است که نوع سیمان باید به نحوی انتخاب شود که دوام، مقاومت و مشخصات سازه‌ای و معماری طرح بتنی مورد نظر را فراهم نماید. سیمان مورد استفاده در این بتن باید مطابق با استاندارد ASTM C150, C595, C1157 باشد. افزودنی‌های معدنی و پوزولان‌ها باید مطابق با ASTM C618, C989, C1240 باشند. با افزودن این مواد و جایگزینی آن با سیمان می‌توان کارایی و خواص مرتبط با دوام این بتن را بهبود بخشید.

راهنمای اروپایی بتن خود تراکم [2] در مورد استفاده از سیمان و مواد جایگزین سیمان بیان کرده که سیمان مورد استفاده باید منطبق بر EN 197 باشد. همچنین دوده سیلیسی خواص رئولوژیکی و مکانیکی و شیمیایی را بشدت بهبود می‌بخشد

و دوام بتن را بالا می‌برد (بویژه در برابر خوردگی میلگردها) سرباره ریز آسیاب شده (GGBFS) غالباً یک ماده چسباننده هیدرولیکی تلقی می‌شود که همچنین می‌تواند خواص رئولوژیکی بتن خودتراکم را بهبود بخشد.
در نشریه ACI 237 [3] که به بتن خود تراکم و راهنمایی در مورد ترکیب و خواص آن اختصاص دارد مطالب زیر بیان شده است:

- بدلیل اینکه مقدار سیمان در بتن خود تراکم بیشتر از مقدار آن در بتن معمولی می‌باشد لذا جمع شدگی خودزا، خمیری و درازمدت در این بتن بیشتر است و باید تمهیدات لازم را در این رابطه فراهم کرد.
- جایگزینی درصدی از سیمان با دوده‌سیلیس باعث افزایش پایداری بتن خودتراکم در مقابل جداشدگی و افزایش استفاده از آب یا مواد افزودنی فوق‌روان کننده می‌شود.
- خاکستر بادی بدلیل داشتن ذرات کروی و سطح صاف باعث افزایش کارایی و جریان اسلامپ بتن خودتراکم می‌شود. بدلیل اینکه چگالی خاکستر بادی کمتر از سرباره آسیاب شده می‌باشد، بنابراین برای یک جرم مشخصی از آن حجم بیشتری خاکستر بادی را می‌توان استفاده نمود.
- استفاده از سرباره آسیاب شده می‌تواند باعث کاهش یا عدم افزایش مصرف آب یا مواد افزودنی فوق روان‌کننده شود. سرباره آسیاب شده باید مشخصات ASTM C989 را داشته باشد.

موسسه Rilem نتایج تحقیقات خود را درباره افزودن خاکستربادی و دوده‌سیلیس در بتن خودتراکم بصورت زیر بیان نموده است [10]:

- هیدراته‌شدن سیمان به تاخیر می‌افتد.
- بطور کلی منطقه انتقالی تماس بین سنگدانه و سیمان در بتن خود تراکم وضع بهتری به نسبت بتن معمولی دارد.
- استفاده از دوده‌سیلیس و خاکستر بادی و سرباره آسیاب شده در بتن خود تراکم باعث کاهش اندازه منافذ مویینه شده و دوام بتن را افزایش می دهد.

۲-۲-۳-۲ اثر پودرها و مواد جایگزین سیمان در چگالی انباشتگی

تحقیقات متعدد موید تاثیر استفاده از مواد پرکننده خنثی و همچنین مواد جایگزینی مانند دوده‌سیلیس در بهبود چگالی انباشتگی سنگدانه‌ها و بهبود خواص رئولوژی بتن خودتراکم می‌باشد. نوع و میزان استفاده از مواد پودری و جایگزین سیمان بر اساس روابط چگالی انباشتگی و خواص مورد انتظار از بتن خودتراکم و با آزمون و خطا بدست می‌آید.

۲-۲-۴ مواد افزودنی شیمیایی

اصلی‌ترین مواد افزودنی شیمیایی مورد استفاده در بتن خودتراکم، مواد فوق کاهنده آب (HRWRA) یا فوق‌روان کننده (SP) و در برخی موارد مواد اصلاح کننده گرانروی (VMA) می‌باشند. از جمله دیگر مواد افزودنی مورد استفاده، می‌توان به مواد حباب‌ساز و مواد افزودنی کنترل کننده گیرش اشاره کرد که بصورت موفقیت‌آمیزی در بتن خودتراکم بکار رفته‌اند. با توجه به اینکه بطور معمول استفاده از مواد فوق روان کننده، مواد اصلاح‌کننده گرانروی و گاه مواد افزودنی حباب‌ساز در بتن‌های خودتراکم رایج‌تر می‌باشند، در این فصل مشخصات هر یک از آنها بیان شده و در نهایت توصیه‌های لازم جهت انتخاب آن‌ها ارائه شده‌است.

۲-۲-۴-۱ مواد افزودنی فوق کاهنده آب یا فوق‌روان کننده (HRWRA[۱] یا SP[۲])

بتن‌های خودتراکم را معمولاً با مواد فوق کاهنده‌ای بر پایه پلی‌کربوکسیلات می‌سازند که عملکرد مناسب‌تری نسبت به نسل قدیمی که بر پایه سولفونات‌ها بودند (مانند: نفتالین سولفونات فرمالدیید متراکم شده NSFC و ملامین سولفونات فرمالدیید متراکم شده MSFC) از خود نشان داده‌اند. اگرچه SCC را می‌توان با مواد کاهنده آب بر پایه NSFC، MSCF یا لیگنو سولفونات نیز ساخت [83،84،85]، ولی توسعه بتن‌های خودتراکمی که با استفاده از مواد فوق کاهنده آب بر پایه پلی‌کربوکسیلات ساخته می‌شوند، کاربرد و پذیرش آن‌را تسهیل کرده است [93].

در مقایسه با مواد کاهنده آب پایه سولفونات، مواد افزودنی پایه پلی‌کربوکسیلات، دارای میزان مصرف کمتر، تاثیر کمتر بر زمان گیرش، بهبود دهنده کارایی و حفظ آن (حفظ اسلامپ) و افزایش پایداری هستند. در واقع مواد افزودنی پایه پلی‌کربوکسیلات دارای میزان مصرفی معادل ۷۰ تا ۸۰ درصد NSFC یا MSFC در درصد مواد جامد برابر، هستند [94].

با مقایسه مواد افزودنی پایه سولفونات، نسبت به مواد پایه پلی‌کربوکسیلات، مشخص می‌شود، معمولاً مواد پایه پلی‌کربوکسیلاتی خواص رئولوژیکی بهتری را ایجاد نموده که برای تولید بتن خودتراکم بهتر می‌باشند. فوق‌روان‌کننده‌های پایه پلی‌کربوکسیلات، قادر به کاهش تنش تسلیم به نسبت بیشتری نسبت به مواد افزودنی پایه NSFC و MSFC می‌شوند [۹۶].

ساختار منحصر به فرد کاهنده‌های آب پلی‌کربوکسیلاتی کمک شایانی به بهبود عملکرد آن‌ها می‌کند. این مواد را می‌توان در سطح مولکولی و برای یک کاربرد خاص با تغییر در مشخصات زنجیر اصلی مانند طول زنجیر، چگالی یا نوع زنجیره‌های فرعی، طراحی نمود [93, 103, 105]. این گونه تغییرات می‌تواند بر میزان کاهش آب، حفظ کارایی، زمان گیرش و افزایش مقاومت در سنین اولیه موثر باشد [93]. بر این اساس تمام فوق کاهنده‌های آب پلی‌کربوکسیلاتی، برای بتن‌های خودتراکم مناسب نیستند. آن‌هایی مناسب هستند که گرانروی خمیر بیشتری را در اسلامپ‌ها و میزان مصرف یکسان ایجاد می‌کنند

۱- High-Range Water Reducing Admixtures
۲ - Superplastisizer

[106]. پیشنهاد شده است از ترکیب چند پلیمر پایه پلی‌کربوکسیلاتی، برای ایجاد خاصیت حفظ کارایی و کاهش حساسیت به مشخصات سیمان استفاده شود.

نتایج مطالعات متعددی منتشر شده که به تشریح چگونگی اصلاح پلیمرهای پلی‌کربوکسیلاتی برای بهبود میزان کاهش آب، حفظ کارایی، زمان گیرش و توسعه مقاومت پرداخته‌اند. بطور کلی، کاهش میزان آب می‌تواند با افزایش طول زنجیره‌های فرعی، کاهش چگالی زنجیره‌های فرعی، کاهش طول زنجیر اصلی یا افزایش گروهای سولفونیک، افزایش یابد [153, 154, 155].

سیمان‌هایی با نرمی و میزان C_3A بیشتر، دارای فعالیت بیشتری بوده و بنابراین نیاز به مقادیر بیشتری ماده افزودنی دارند [155]. Yoshioka و همکاران نشان دادند که فازهای C_3A و C_4AF جذب فوق‌روان کننده به مراتب بیشتری نسبت به C_2S و C_3S دارند، با این حال، فوق روان‌کننده جذب‌شده توسط C_3A نسبت به C_3S برای افزودنی پایه پلی‌کربوکسیلات در مقایسه با افزودنی مبتنی بر NSFC کمتر می‌باشد [156]. با این وجود Hirsch، نشان دادند که تاثیر کاهش جذب سیمان‌هایی با C_3A کمتر، در افزودنی‌های کربوکسیلاتی بیشتر از افزودنی‌های NSFC و MSFC است [154].

در واقع، نشان داده شده است که سیمان‌هایی با C_3A بیشتر، حفظ کارایی کمتری را از خود نشان می‌دهند مگر میزان مصرف به مقدار قابل ملاحظه‌ای زیاد بوده تا جذب با تاخیر انجام شود[157].

وجود یون‌های سولفات، باعث کاهش جذب پلیمرهای پلی‌کربوکسیلاتی می‌شود، دلیل آن این است که عموماً باور دارند که سولفات‌ها برای جذب روی ذرات سیمان با پلیمرهای پلی‌کربوکسیلاتی رقابت دارند [155, 157, 101]. Schober اعتقاد دارند، سیمان‌های با قلیایی کم، سولفات‌های محلول در دسترس را کاهش می‌دهند [157]. Yamada نشان داده است که مقدار سولفات‌های قلیایی علت اکثر تغییرات بین عملکرد سیمان‌های مختلف بوده و نتیجه گرفته است که وجود یون‌های سولفات هم باعث کاهش جذب و هم کاهش طول زنجیر فرعی می‌شود [158].

افزودنی‌های پایه پلی‌کربوکسیلاتی نسبت به افزودنی‌های پایه سولفوناتی، حساسیت کمتری در خصوص زمان اضافه کردن به مخلوط دارند. در حالی‌که بازدهی افزودنی‌های پایه سولفوناتی می‌تواند با تاخیر در زمان اضافه کردن، بدلیل شروع زمان کوما، بهبود یابد، در صورتی‌که این موضوع کمترین تاثیر را در افزودنی پلی‌کربوکسیلاتی دارد [102, 97, 100].

مواد افزودنی فوق کاهنده آب پایه پلی‌کربوکسیلات، بیشتر از مواد پایه سولفوناتی به میزان انرژی اختلاط، حساس هستند. در مورد مواد افزودنی پایه پلی‌کربوکسیلات، افزایش انرژی اختلاط به صورت پلکانی مقاومت برشی فاز سیمانی را کاهش می‌دهد، اما برای مواد پایه ملامین سولفونات، این تاثیر بسیار ناچیز است [97].

وجود رس خالص به همراه سنگدانه‌ها، می‌تواند باعث کاهش عملکرد مواد افزودنی پایه پلی‌کربوکسیلاتی شود. راه‌حل این مشکل تغییر روش اختلاط می‌باشد، به‌گونه‌ای که ابتدا آب، مواد افزودنی و بخشی از سیمان مخلوط شده و سپس سنگدانه‌های حاوی رس اضافه شوند. راه‌حل دیگر استفاده از موادی است که بتوانند ذرات رس را جذب و در خود جای دهند، در حالی‌که اثر مضری برخواص بتن نداشته و با دیگر اجزاء بتن سازگار باشند. یکی از این دسته مواد، پلی‌اتیلن گلیکول است، اگرچه استفاده از این ماده به تنهایی نیز، می‌تواند باعث کاهش کارایی شود. راه‌حل سوم، استفاده از نمک‌های

کلسیم، مانند کلسیم نیترات است که می‌تواند قبل از اضافه نمودن ماسه، اضافه شود. راه‌حل دیگر، اضافه کردن محلول پلی‌فسفات است که می‌تواند در طول مدت اختلاط و مستقل از ترتیب اختلاط دیگر از اجزا، به مخلوط اضافه شود.

۲-۲-۴-۲ مواد افزودنی اصلاح کننده گرانروی (VMA)

مواد افزودنی اصلاح کننده گرانروی، که ضد آب شستگی نیز به‌آن‌ها اطلاق می‌شود، به طور معمول باعث افزایش بخشی یا همه مشخصات رئولوژی مخلوط بتن مانند: تنش تسلیم، گرانروی خمیری، غلیظ‌شدگی (تغلیظ‌پذیری)[۱] و درجه رقیق‌شدگی برشی[۲] می‌شوند. از این نوع مواد می‌توان برای بتن‌های خودتراکم استفاده کرد و مقاومت در برابر جداشدگی، قوام و چسبندگی را افزایش، آب‌انداختگی را کاهش، قابلیت کاربرد بازه وسیعی از مصالح (مانند سنگدانه‌هایی با دانه‌بندی گسسته و ماسه شکسته) را امکان‌پذیر نمود و همچنین اثرات تغییر در مشخصات مصالح را کاهش داد [92]. استفاده از مواد اصلاح کننده گرانروی جایگزینی برای مصرف مواد پودری یا کاهش آب اختلاط هستند. Berke و همکاران نشان دادند، SCC باید در صورت امکان بدون استفاده از VMA ساخته شود، ولی ممکن است، استفاده از VMA در شرایطی همچون زمانی‌که رطوبت سنگدانه‌ها را نمی‌توان با دقت کنترل نمود یا در مواردی‌که دانه‌بندی سنگدانه‌ها مناسب نبوده و مقدار مواد ریزدانه‌کم است، ضروری باشد [105]. مواد اصلاح کننده گرانروی که در بتن مورد استفاده قرار می‌گیرند، معمولاً پلیمرهای محلول در آب هستند؛ هرچند مواد دیگری مانند سیلیس غیر محلول (سیلیس رسوبی) نیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد [159, 160, 161]. پلیمرهای محلول در آبی که بعنوان VMA در بتن استفاده می‌شود را می‌توان عموماً به طبیعی، نیمه مصنوعی و مصنوعی دسته بندی کرد. نمونه‌ای از این دسته بندی در جدول ۲-۲ ارایه شده است. مواد اصلاح کننده معمولی، شامل مشتقات سلولز (که حاوی اتر سلولزی غیر یونی با مقادیر مختلف اترهستند) و صمغ مالین (که پلی ساکارید تخمیر شده تحت شرایط کنترل شده، یونی و با وزن مولکولی زیاد است) می‌باشند [162, 163].

معمولاً، مواد اصلاح کننده‌ای که بر پایه پلیمرهای محلول در آب هستند، بر روی فاز آبی بتن تاثیرگذار هستند. در برخی مراجع، سه مرحله را برای فعالیت VMA تشریح کرده‌اند. اول، پلیمرهای VMA جذب مولکول‌های آب می‌شوند که سبب می‌شوند بخشی از آب در داخل پلیمر به دام افتاده و باعث انبساط آن شود. دوم، پلیمرها نیروی جاذبه خود را بهبود داده و در نتیجه مانع تحرک آب می‌شود. سوم، زنجیره پلیمر در سرعت کم برشی درهم تابیده شده ولی در سرعت زیاد نیروی برشی شکسته می‌شوند در نتیجه رفتار رقیق کنندگی دارند. این رفتار رقیق شدگی مناسب و مورد نظر است، زیرا گرانروی ظاهری زیاد در آهنگ برشی کم، پایداری استاتیکی را تضمین می‌کند، در حالی‌که گرانروی ظاهری کمتر در آهنگ برشی زیاد، سبب کمتر شدن انرژی مورد نیاز برای فرآیند اجرا، مانند اختلاط، حمل و تراکم می‌شود. مواد اصلاح کننده گرانروی را به دو دسته: سفت (غلیظ) کننده و چسبنده تقسیم می‌کنند. نوع سفت کننده، گرانروی را با غلیظ و سفت‌کردن بتن،

---

۱ – Thixotropy

۲ - Shear thinning (در رئولوژی، رقیق‌شدگی برشی رفتار غیر نیوتنی سیالاتی است که گرانروی آن‌ها تحت کرنش برشی کاهش می یابد. گاهی اوقات آن را (مترادف رفتار شبه پلاستیک در نظر می گیرند.

افزایش داده ولی تاثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر نیاز به مقدار فوق کاهنده آب ندارند. نوع چسباننده، که از نوع سفت کننده قوی‌تر است، مولکول‌های آب را به هم می‌چسباند و در نتیجه خواص تغلیظ‌پذیری و کاهش آب انداختگی را بوجود می‌آورد [92].

جدول ۲-۲ انواع مواد اصلاح کننده گرانروی پلیمری محلول در آب

طبیعی	نیمه مصنوعی	مصنوعی
• نشاسته پیش‌ژلاتینه • صمغ گوار • آلژینات • صمغ آگار • صمغ ولان • صمغ زانتان • صمغ گِلان • صمغ خرنوب[۱] • صمغ کاراگینان[۲] • صمغ رامسان[۳] • صمغ تراناکانت[۴] • صمغ دیوتان[۵] • صمغ کتیرا[۶] • صمغ مالی[۷] • صمغ عربی[۸]	• مشتقات نشاسته • مشتقات سلولز- اتر مانند: سلولز هیدروکسی پروپیل متیل، سلولز هیدرکسی اتیل و سلولز کربوکسی متیل • الکترولیت‌ها مانند: آلژینات سدیم • آلژینات پراپیلن گلیکول	• پلیمر پایه اتیلن مانند اکسید پلی اتیلن، پلی اکریلامید و پلی اکریلات • پلیمر پایه وینیل مانند الکل پلی وینیل • پلیمرهای پایه وینیل مانند: • الکل پلی وینیل PVA • پلی وینیل پیرولیدون PVP • Poly Vinyl Pyrrolidone ○کوپلیمرهای استایرن با گروه کربوکسیل ○امولسیون های آکریلیکی

۱ - Locus(carob)bean gum
۲- Carrageenan gum
۳- Rhamsan gum
۴ - Tranacanth gum
۵ - Diutan gum
۶ - Tragacanth gum
۷ - Mallee gum
۸ - Arabic gum

بهبود خواص بتن ناشی از استفاده VMA غالباً بدلیل افزایش گرانروی و درجه رقیق‌شدگی برشی می‌باشد. افزایش تنش تسلیم معمولاً باید با افزودن آب اضافی یا فوق‌کاهنده آب، متعادل شود. به‌عنوان مثال طبیعت یونی پلیمرهای طبیعی ممکن است باعث جذب آن‌ها به ذرات سیمان شده و در نتیجه نیاز به افزودن HRWRA افزایش می‌باشد [164]. با وجود این افزایش در میزان مصرف فوق‌کاهنده آب، میزان آب یا هر دو، بتن همچنان دارای گرانروی بیشتر و درجه رقیق‌شدگی برشی بیشتری می‌باشد. زیاد بودن گرانروی و درجه رقیق‌شدگی برشی، باعث افزایش مقاومت در برابر جداشدگی می‌شود. آب‌انداختگی، بدلیل افزایش گرانروی، کاهش می‌یابد و آب آزاد (اضافی) موجود نیز کاهش پیدا می‌کند. کاهش آب انداختگی می‌تواند قابلیت بروز ترک ناشی از جمع‌شدگی خمیری را افزایش دهد [40].

صمغ ولان یکی از رایج‌ترین انواع VMA است که باعث افزایش تنش جاری‌شدن، گرانروی و درجه رقیق‌شدگی برشی می‌شود ضمن این‌که حساسیت نسبت به تغییرات آب را کاهش می‌دهد. در حالی‌که مشتقات سلولز با فوق‌کاهنده‌های آب پایه نفتالین، ناسازگار هستند، صمغ ولان، سازگار است. صمغ‌های ولان، زانتان و گوار تاثیرپذیری کمی نسبت به تغییرات دما در مقایسه با پلی‌اکریلات، متیل سلولز و هیدروکسی‌اتیل سلولز دارند. در حالی‌که برخی مشتقات سلولز، حباب‌های هوای بزرگی را محبوس می‌کنند و در نتیجه نیاز به مصرف ضدکف دارند، صمغ ولان معمولاً تاثیری بر ساختار حباب‌های هوا ندارد. Phyffereon نشان دادند که صمغ دیوتان تا حدی بر صمغ ولان ارجحیت دارد، زیرا گرانروی بیشتر و درجه رقیق‌شدگی برشی بالاتری را از خود نشان می‌دهد و در نتیجه تاثیرپذیری کمتری نسبت به تغییرات مشخصات سیمان و بدلیل چگالی باریونی (الکتریکی) کمتر، نیاز به فوق‌کاهنده آب کمتری در یک روانی برابر دارد [164]. علی‌رغم مزایای زیاد صمغ ولان، Lachemi و همکاران پیشنهاد می‌کنند بدلیل قیمت زیاد صمغ ولان نسبت به دیگر انواع جایگزین، ممکن است، استفاده از صمغ ولان غیر اجرایی باشد [162].

مواد اصلاح کننده گرانروی که بر پایه صمغ ولان و مشتقات سلولز می‌باشند، ممکن است باعث تاخیر در زمان گیرش بتن شوند، در حالی‌که مواد آکریلیکی، معمولاً تاثیری در زمان گیرش ندارند. نه‌تنها موادی که بر پایه صمغ ولان یا مشتقات سلولز هستند خود باعث تاخیر در گیرش می‌شوند، بلکه بدلیل اینکه میزان مصرف فوق‌کاهنده آب نیز برای رسیدن به روانی مشابه افزایش پیدا می‌کند، ممکن است باعث افزایش زمان گیرش بیشتری شود. استفاده از VMA می‌تواند میزان مصرف مواد حباب‌ساز را نیز به مراتب افزایش دهد این امر بدلیل کاهش آب در دسترس می‌باشد. با این‌حال ایجاد حباب‌هوا به میزان مورد نیاز در مخلوط‌های حاوی VMA امکان‌پذیر است.

وجود VMA می‌تواند فرآیند هیدراته‌شدن سیمان را تغییر داده و در نتیجه خواص بتن سخت‌شده، تغییر کند.

۲-۲-۴-۳ مواد افزودنی حباب ساز

به‌طور کلی، بتن‌های معمولی دوام مناسبی در برابر چرخه‌های متوالی یخزدن و آب شدن ندارند و پس از مدتی دچار آسیب‌دیدگی و در نهایت تخریب می‌شوند. یکی از بهترین راه‌حل‌های افزایش دوام بتن در برابر یخزدن و آب شدن، ایجاد سیستم حباب‌های ریز هوا در خمیر سیمان می‌باشد. استفاده از مواد حباب‌ساز این امکان را فراهم می‌کند. افزودنی‌هایی

که باعث توسعه سیستم حباب‌های هوای میکروسکوپی در بتن، ملات و خمیر در طول اختلاط می‌شوند، را مواد افزودنی حباب‌ساز می‌نامند.

مواد افزودنی حباب ساز از نظر ماهیت به دو نوع جامد و مایع و از نظر نوع نیز به: آنیونی، کاتیونی، غیر یونی و آمفوتری تقسیم می‌شوند. عمده‌ترین موادی که به‌عنوان حباب‌ساز بکار رفته‌اند شامل موارد زیر می‌شوند:

- نمک‌های رزین چوب؛
- شوینده[۱] مصنوعی؛
- نمک‌های لیگنین سولفوناته؛
- نمک‌های اسیدهای نفت خام؛
- نمک‌های مواد پروتئین‌دار؛
- اسیدهای چرب و صمغی و نمک‌های آن‌ها؛
- نمک‌های آلی هیدروکربن‌های سولفوناته.

اگرچه هدف اصلی از استفاده مواد افزودنی حباب‌ساز محافظت بتن در برابر خرابی ناشی از چرخه‌های متوالی یخزدن و آب شدن است، اما می‌تواند مزایا و معایب دیگری را نیز به همراه داشته باشد. حباب‌های هوای ایجاد شده به علت ایجاد خاصیت ساچمه مانند باعث ایجاد روانی شده و در نتیجه امکان کاهش مقدار آب یا مواد افزودنی فوق روان کننده بوجود می‌آید. از دیگر مزایای مواد افزودنی حباب‌ساز ایجاد چسبندگی و در نتیجه کاهش احتمال آب انداختگی و جداشدگی می‌باشد.

ایجاد حباب هوا اگرچه مزایایی دارد، اما می‌تواند باعث کاهش مقاومت فشاری بتن نیز گردد. بطور کلی هر یک درصد حباب هوا می‌تواند سبب افت ۵ درصدی مقاومت فشاری شود. اگرچه در عمل، بدلیل افزایش روانی، می‌توان برای رسیدن به یک اسلامپ مشخص مقدار آب را کاهش داده و در نتیجه بدلیل کاهش نسبت آب به سیمان تا حدودی افت مقاومت فشاری جبران می‌شود.

در بتن‌های خودتراکم عمدتاً بدلیل ایجاد چسبندگی در مخلوط، افزایش حجم خمیر، کاهش آب انداختگی و کاهش احتمال جداشدگی، از مواد افزودنی حباب‌ساز استفاده می‌شود. البته در مواردی‌که نیاز به افزایش دوام در برابر چرخه‌های یخزدن و آب شدن می‌باشد، استفاده از مواد افزودنی حباب ساز الزامی است.

---

۱ - Detergents

فصل ۳

مروری بر آزمایش‌های رایج بتن خودتراکم تازه

فصل سوم

مروری بر آزمایش‌های رایج بتن خودتراکم تازه

۳-۱ کلیات

در این فصل بطور اجمال مروری به آنچه که در منابع و مراجع ملی و بین‌المللی در ارتباط آزمایش‌های بررسی کارایی بتن خودتراکم در حالت تازه آمده، پرداخته شده است. لازمه کاربرد بتن خودتراکم که در سالیان اخیر توسعه فراوانی یافته است، شناخت مناسب ویژگی‌های خاص بتن خودتراکم و روش‌های تأمین آن‌هاست. برای اطمینان از دستیابی به ویژگی‌های مورد نظر، انجام آزمایش‌های مخصوص بتن خودتراکم ضروری است. به این دلیل به موازات گسترش کاربرد بتن خودتراکم در دنیا روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری ویژگی‌های بتن خودتراکم ابداع شده و مورد استفاده قرار گرفته است که در طی زمان و بر اساس ویژگی‌هایی همچون دقت، صحت و تکرارپذیری نتایج و همچنین سهولت انجام آزمایش، تعدادی از آن‌ها رایج شده و برخی از آن‌ها منسوخ یا محدود به کارهای پژوهشی شده‌است.

در جدول ۳-۱ فهرستی از آزمایش‌های متداول جهت بررسی خواص بتن خودتراکم در حالت تازه به همراه خاصیت مورد ارزیابی، ارائه شده‌است. همچنین در جدول ۳-۲ نیز آزمایش‌های تکمیلی که ممکن است برای کاربردهای خاص مورد نظر باشد، آورده شده‌است.

جدول ۳-۱ آزمایش‌های متداول برای ارزیابی خواص بتن خودتراکم در حالت تازه

روش آزمایش	خواص مورد آزمایش
جعبه L	قابلیت عبور یا مقاومت در برابر انسداد یا جداشدگی[1]
حلقه J	قابلیت عبور یا مقاومت در برابر انسداد یا جداشدگی [1]
جریان اسلامپ، زمان ۵۰ (T_{50}) و شاخص پایداری چشمی (VSI)	مقاومت در برابر جریان، قابلیت پرکنندگی، پایداری یا مقاومت در جداشدگی، حرکت حباب‌های هوا، گرانروی نسبی
قیف V	قابلیت عبور یا مقاومت در برابر انسداد، گرانروی[1]
قیف V بعد از ۵ دقیقه	مقاومت در برابر جداشدگی
ستونک پایداری	مقاومت در برابر جداشدگی جریان، پایداری یا مقاومت در برابر نشست
پایداری الک	جداشدگی استاتیکی یا مقاومت در برابر ته‌نشینی

۱- جریان پذیری را هم اندازه‌گیری می‌کند.

جدول ۳-۲ آزمایش‌های تکمیلی برای کاربردهای خاص بتن خودتراکم

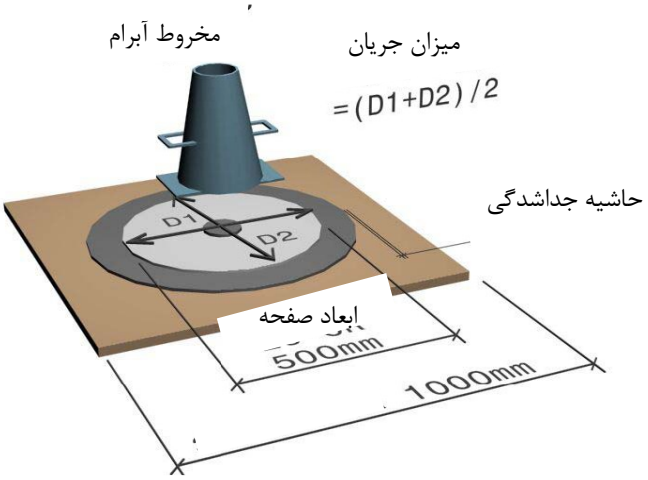
روش آزمایش	خواص مورد آزمایش
آب انداختن (روشASTM C232)	تمایل به آب انداختن
رئومتر	خواص رئولوژی، تغلیظ‌پذیری

۳-۲ آزمایش‌های کارایی بتن خودتراکم

لازمه کاربرد بتن خودتراکم که در سالیان اخیر توسعه فراوانی یافته است، شناخت مناسب ویژگی‌های خاص بتن خودتراکم و روش‌های تأمین آن‌هاست. برای اطمینان از دستیابی به ویژگی‌های مورد نظر، انجام آزمایش‌های مناسب بتن خودتراکم ضروری است. به این دلیل به موازات گسترش کاربرد بتن خودتراکم در دنیا، روش‌های مختلف برای اندازه‌گیری ویژگی های مختلف بتن خودتراکم ابداع شده و مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه رایج‌ترین آزمایش‌های بتن تازه خودتراکم که به منظور تعیین خواص رفتاری بتن تازه خودتراکم می‌باشند و مطابق با استانداردها و دستورالعمل‌های معتبر [۲۵] هستند، به طور خلاصه ارایه شده است.

۳-۲-۱ آزمایش جریان اسلامپ و زمان ۵۰ سانتی‌متر (T_{50})

آزمایش جریان اسلامپ که در شکل ۳-۱ و شکل ۳-۲ نشان داده شده است، از متداول‌ترین آزمایش‌های بتن خودتراکم است که نخستین بار در کشور ژاپن برای بررسی کارایی بتن‌های اجرا شده در زیر آب مورد استفاده قرار گرفت. هدف از این آزمایش تعیین قابلیت جاری شدن بتن تازه تحت اثر وزن خود بدون هیچ قیدی جز اصطکاک صفحه جریان می‌باشد [۲۵]. در آزمایش جریان اسلامپ قطر دایره بتن بعد از بلندکردن مخروط که به «جریان اسلامپ» معروف است به عنوان معیاری برای روانی بتن اندازه‌گیری می‌شود و زمان رسیدن بتن به قطر ۵۰ سانتی‌متر (T_{50})، نیز به عنوان معیاری از گرانروی بتن می‌باشد. استاندارد این آزمایش مطابق با INSO 11270 (ASTM C 1611) و EN 12350-8 است [۲۷ و 32]. با قرار دادن یک قیف کوتاه روی مخروط آبرام و ایستادن بر روی جا پاهای مخصوص مخروط، اطمینان حاصل می‌شود که بتن نمی‌تواند از زیر مخروط عبور کند. باید داخل مخروط تمیز و مرطوب شود و حدود ۶ لیتر بتن در آن ریخته شود و سپس مخروط مطابق شکل ۳-۲ به صورت عمودی و با سرعت ثابت بالا آورده شود تا بتن بر روی صفحه پخش گردد [۲۷ و28]. اگر زمان T_{50} مورد نظر باشد لازم است بلافاصله بعد از بلند کردن مخروط زمان رسیدن بتن به قطر ۵۰ سانتی‌متر اندازه گیری شود. علاوه بر اندازه گیری زمان T_{50}، قطر دایره‌ای که بعد از پخش شدن ایجاد می‌شود نیز اندازه گرفته می شود. بر همین اساس قطر نهایی به صورت میانگین ۲ قطر عمود بر هم (به طوری که یکی از دو قطر، حداکثر قطر ممکن باشد) اندازه گیری می‌شود [۲۷ و29].



شکل ۳-۱ مشخصات ابزار و وسایل اندازه‌گیری جریان اسلامپ

شکل ۳-۲ انجام آزمایش جریان اسلامپ

قطر نهایی بتن، نشان دهنده تنش تسلیم بتن تازه و معیار سنجش قابلیت پرکنندگی بتن تازه می‌باشد، به طوری که اگر میانگین دو قطر کمتر از ۵۵ سانتی‌متر باشد، تنش تسلیم بتن زیاد و کارپذیری آن کم می‌باشد. در صورتی که این مقدار بیش از ۸۵ سانتی‌متر باشد گرانروی خمیری کم بوده و احتمال ناپایداری وجود دارد [29].

مدت زمان رسیدن به قطر ۵۰ سانتی‌متر، T_{50} نیز معیاری برای گرانروی خمیری بتن است. برخی از محققین معتقدند که از T_{50} نمی‌توان به طور مستقیم برای محاسبه گرانروی استفاده کرد. برای مثال با افزایش جریان اسلامپ، T_{50} کمتر خواهد داشت، حتی اگر گرانروی بتن ثابت باشد. بر همین اساس این محققین معتقدند فقط در صورتی که جریان اسلامپ نمونه ها ثابت باشد، می‌توان از T_{50} در ارزیابی بتن‌های با گرانروی مختلف استفاده کرد [۳۰ و31]. توصیه اروپایی زمان رسیدن به قطر ۵۰ سانتی‌متر را بین ۳ تا ۷ ثانیه برای کاربردهای مهندسی متداول و بین ۲ تا ۵ ثانیه برای کاربردهای سازه‌های بلند قابل قبول می‌داند. انجمن مهندسان عمران ژاپن حداقل قطر قابل قبول جریان اسلامپ را برای بتن خودتراکم ۶۰۰

میلی‌متر بیان می‌کند. این مؤسسه همچنین زمان رسیدن بتن خودتراکم تازه به قطر ۵۰۰ میلی متر را بین ۳ تا ۵ ثانیه قابل قبول می‌داند.

آزمایش جریان اسلامپ به دلیل سادگی اجرا، برای تعیین کارپذیری بتن خودتراکم بسیار متداول است. این آزمایش اگرچه اطلاعاتی در مورد چگونگی عبور بتن از بین میلگردها بدست نمی‌دهد اما ممکن است به صورت کیفی مقاومت بتن در برابر انسداد را مشخص کند [29]. هر چند که T_{50} معیاری برای سنجش گرانروی می‌باشد، ولی باید دقت کرد که این امر در صورتی درست است که جریان اسلامپ نمونه‌ها یکسان باشد. در واقع نمی‌توان به طور مستقیم از T_{50} برای محاسبه گرانروی استفاده کرد [31].

۳-۲-۲ شاخص پایداری چشمی[۱]

در آزمایش جریان اسلامپ، پس از ثابت شدن وضعیت ظاهری بتن، با بازرسی چشمی سطح آن، یک عدد بین ۰، ۱، ۲ یا ۳، مطابق جدول ۳-۳، بر اساس مشخصات ظاهری (از نظر جداشدگی، آب انداختن) و حاشیه کناری بتن پخش شده، نسبت داده می‌شود. این عدد به شاخص پایداری چشمی (VSI) معروف است [32 و۳۳]. مؤسسه ICAR مطابق استاندارد ASTM C1611 (INSO 11270) و انجمن بتن آمریکا بر اساس شاخص پایداری چشمی برای پایداری بتن خودتراکم جدولی مطابق با جدول ۳-۳ ارائه کرده است که بر اساس آن شاخص پایداری چشمی بتن خودتراکم مناسب باید بین صفر و یک باشد [۳۰].

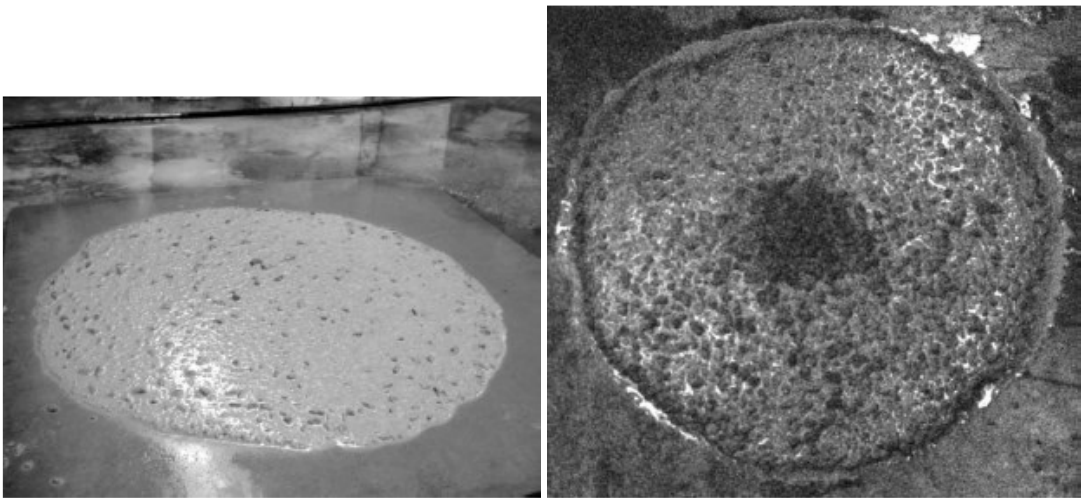
جدول ۳-۳ شاخص پایداری چشمی بر اساس استاندارد ملی ایران ۱۱۲۷۰

شاخص پایداری چشمی (VSI)	معیار
۰ (کاملاً پایدار)	هیچ‌گونه جداشدگی یا آب‌انداختگی مشاهده نمی‌شود.
۱ (پایدار)	هیچ‌گونه جداشدگی مشاهده نمی‌شود و مقدار کمی آب انداختگی، به صورت درخشندگی در حجم بتن دیده می‌شود.
۲ (ناپایدار)	لایه نازکی از ملات (کمتر از ۱ سانتی‌متر) در اطراف، و یا توده سنگدانه در وسط حجم بتن مشاهده می‌شود.
۳ (کاملاً ناپایدار)	جداشدگی مشخص، به همراه لایه‌ای از ملات (بیشتر از ۱ سانتی‌متر) و یا توده بزرگ سنگدانه‌ها در وسط بتن مشاهده می‌شود.

۱. Visual Stability Index

در شکل ۳-۳ تعاریف مختلف شاخص پایداری طبق استاندارد ملی ایران ۱۱۲۷۰ قابل مشاهده می‌باشد.

VSI=1 VSI=0



VSI=3 VSI=2

شکل ۳-۳ نمونه‌هایی از اندیس پایداری چشمی برای آزمایش جریان اسلامپ طبق استاندارد ملی ایران ۱۱۲۷۰

مطابق گزارش کمیته ۲۳۷ انجمن بتن امریکا (ACI 237)، VSI برابر با ۰ یا ۱، نشان دهنده پایدار بودن بتن است، در صورتی که VSI برابر با ۲ یا ۳، نشان دهنده این است که احتمال وقوع جدا شدگی در مخلوط بتنی وجود دارد و برای اطمینان از پایداری باید طرح مخلوط را اصلاح کرد. مؤسسه PCI نیز جدولی را در این رابطه تنظیم کرده است که در جدول ۳-۴ قابل مشاهده است.

جدول ۳-۴ مشخصات بتن خودتراکم با VSI های مختلف طبق PCI [37،36،35]

دسته‌بندی	شاخص پایداری چشمی (VSI)	ضوابط
کاملا پایدار	۰	هیچ شواهدی برای جدا شدگی اسلامپ وجود ندارد.
	۰/۵	شواهد بسیار اندکی برای جداشدگی و خروج هوا وجود دارد.
پایدار	۱	احتمال کمی برای جداشدگی و خروج هوا وجود دارد.
		جمع سنگدانه وجود ندارد.
	۱/۵	مقدار قابل توجهی جداشدگی سنگدانه وجود دارد.
ناپایدار	۲	آب انداختگی قابل توجهی رخ می‌دهد.
		خروج هاله‌ای از ملات (کمتر از ۱۰ میلی‌متر).
کاملا ناپایدار	۳	خروج هاله‌ی زیادی از ملات (بیش از۱۰ میلی‌متر).

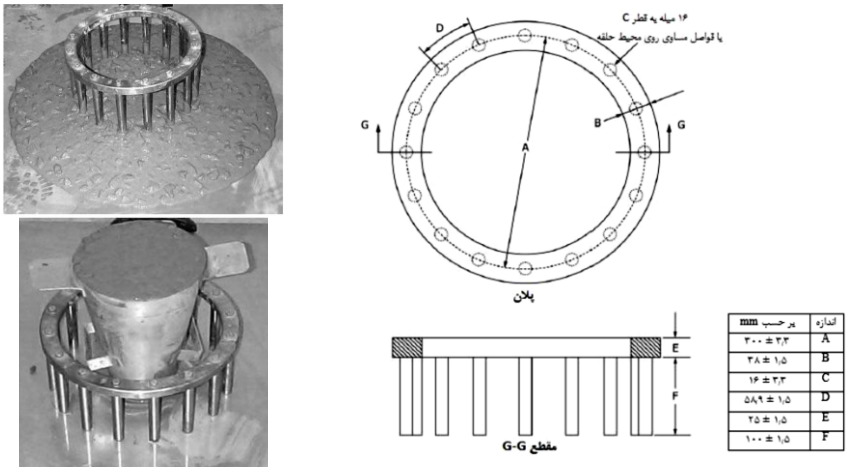
به طور کلی رده تغییرات شاخص پایداری چشمی بین ۰ تا ۳ با فاصله ۰/۵ از یکدیگر است. از آنجا که تعیین این شاخص به صورت چشمی انجام می‌شود، نتیجه آن، تقریبی بوده و به قضاوت آزمایشگر بستگی دارد. بنابراین، هرچند VSI، ابزار بسیار مناسبی برای کنترل کیفیت بتن خودتراکم است، اما نباید برای تأیید یا مردود کردن یک مخلوط بتنی به کار رود [39].

۳-۲-۳ آزمایش حلقه J[۱]

هنگامی که بتن خودتراکم در قالب‌هایی که شامل میلگرد فولادی است قرار گیرد، باید همگنی خود را حفظ کند و در هنگام جریان یافتن بتن، سنگدانه‌ها از مخلوط بتنی جدا نشوند. آزمایش حلقه J که در واقع شبیه‌سازی عبور بتن از میان میلگرد است، به منظور بررسی قابلیت عبور بکار برده می‌شود [39].

این دستگاه و جزئیات ابعاد آن، مطابق INSO 11271 یا ASTM C1621 [45]، در شکل ۳-۴ نشان داده شده است. معمولا در این آزمایش مخروط ناقص اسلامپ به صورت وارونه در وسط حلقه J گذاشته می‌شود تا لبه‌های جای پا مخروط به حلقه گیر نکند. Dazcko [46]، ابعاد این دستگاه را در سایر مراجع بررسی کرده است. که نتیجه آن، در جدول ۳-۵ خلاصه شده است.

۱. Japanese ring



شکل ۳-۴ دستگاه آزمایش حلقه J

بازشدگی بتن در آزمایش حلقه J، نشان دهنده توانایی عبور بتن از بین میلگردهاست. هرچه مقدار بازشدگی بیشتر باشد، به این معنی است که بتن خودتراکم تا مسافت بیشتری می‌تواند تحت اثر وزن خود، از بین میلگردها عبور کند و سریع‌تر می‌تواند قالب بتن با میلگردهای متراکم را پُر کند. تفاوت بین جریان اسلامپ با حلقه J و جریان اسلامپ غیر مقید می تواند نشان‌دهنده درجه عبور بتن از بین میلگردها باشد [39 و ۳۳]. برای اندازه‌گیری توانایی عبور بتن خودتراکم با استفاده از حلقه J و مخروط اسلامپ، توانایی عبور بتن با استفاده از جدول ۳-۶ تعیین می‌شود.

جدول ۳-۵ ابعاد حلقه J در مراجع مختلف [۳۳، 44، 45]

مرجع	قطر حلقه (میلی‌متر)	ارتفاع میلگرد (میلی‌متر)	قطر میلگرد (میلی‌متر)	فاصله خالص بین میلگردها (میلی‌متر)
استاندارد ملی ۱۱۲۷۱ و ASTM C 1621	۳۰۰	۱۰۰	۱۶	۱۶ میلگرد با فاصله ۴۴
EFNARC	۳۰۰	۱۰۰	۱۰	۴۸ ± ۲
انجمن بتن نروژ	۲۳۵	۱۲۰	۱۲	۳۴
انجمن بتن سوئیس	۲۷۰	۱۱۰	مشخص نشده است	۱ تا ۳ برابر طول الیاف
انجمن بتن پیش ساخته / پیش‌تنیده	۲۸۴	۱۱۰	۱۶	۱۴، ۱۹ یا ۳۹ (بسته به حداکثر اندازه سنگدانه‌ها)
استاندارد EN 12350-12	۳۰۰	۱۱۰	۱۸	۱۶ میلگرد با فاصله ۴۱ ۱۲ میلگرد با فاصله ۵۹

طبق توصیه آیین‌نامه بتن ایران، آزمایش حلقه J به دو صورت انجام می‌شود. در روش استاندارد ملی ۱۱۲۷۱، قطر پخش‌شدگی مخلوط در آزمایش جریان اسلامپ با قطر پخش شدگی به کمک حلقه J مقایسه می‌شود. این اختلاف باید از

۵۰ میلی‌متر کمتر باشد. توصیه می‌شود برای قطعات پرمیلگرد یا حرکت بتن در قالب به طول ۵ تا ۱۰ متر، این تفاوت به ۲۵ میلی‌متر محدود شود. در روش دیگر (روش اروپایی) اختلاف ارتفاع بین دو طرف حلقه اندازه‌گیری می‌شود. در این حالت بهتر است این اختلاف از ۱۰ میلی‌متر تجاوز نکند. هرچه اختلاف ارتفاع کمتر باشد، نشانه قابلیت عبور بیشتر مخلوط است.

جدول ۳-۶ تعیین درجه عبور بتن در آزمایش حلقه J و مخروط اسلامپ [48]

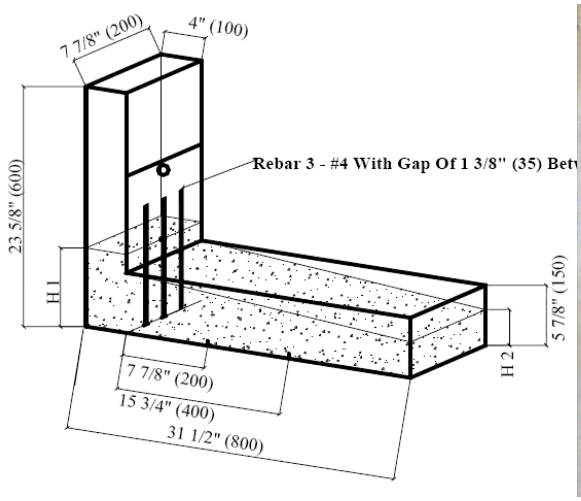
تفاوت بین جریان اسلامپ با حلقه J و جریان اسلامپ غیرمقید (میلی‌متر)	درجه عبور	ملاحظات
۰ – ۲۵	۰	توانایی عبور زیاد
۲۵ – ۵۰	۱	توانایی عبور متوسط
۵۰<	۲	توانایی عبور کم

۳-۲-۴ آزمایش جعبه L

آزمایش جعبه L شکل برای آزمایشگاه و کارگاه مناسب می‌باشد [65]. هدف از این آزمایش بررسی قابلیت پُرکنندگی و قابلیت عبور بتن تازه است به طوری که افزایش حجم خمیر سیمان سبب افزایش قابلیت عبور می‌شود [58]. همچنین می توان وجود یا عدم وجود پدیده انسداد ناشی از حضور میلگرد را مشاهده کرد.

روش انجام آزمایش به این صورت است که بعد از پرکردن دستگاه از بتن و بلند کردن دریچه، نسبت انسداد، h_2/h_1 اندازه گرفته می‌شود. پارامتر های h_2 وh_1 در ادامه توضیح داده می‌شوند. همچنین مدت زمان رسیدن بتن به فواصل ۲۰ و ۴۰ سانتیمتری (T_{20} و T_{40}) نیز که معیاری برای سنجش گرانروی خمیری بتن است، اندازه گرفته می‌شود [39].

دستگاه این آزمایش و ابعاد آن، مطابق توصیه EFNARC، در شکل ۳-۵ نشان داده شده است. Dazcko [46]، ابعاد این دستگاه را در مراجع مختلف، در جدولی خلاصه کرده است که در جدول ۳-۷ ارائه شده است.



شکل ۳-۵ دستگاه آزمایش جعبه L شکل

جدول ۳-۷ ابعاد دستگاه جعبه L شکل در مراجع مختلف [46].

مرجع	ابعاد قسمت عمودی (میلی‌متر)	ابعاد قسمت افقی (میلی‌متر)	قطر میلگرد (میلی‌متر)	فاصله خالص بین میلگردها (میلی‌متر)
استاندارد ملی ۳۲۰۳-۱۰ و EN 12350-10	۶۰۰ × ۲۰۰ × ۱۰۰	۷۰۰ × ۲۰۰ × ۱۵۰	۱۲	۴۱/۵۹
EFNARC	۶۰۰ × ۲۰۰ × ۱۰۰	۸۰۰ × ۲۰۰ × ۱۵۰	۱۳	۳۵/۴۵
جامعه مهندسان عمران ژاپن	۴۰۰ × ۲۰۰ × ۸۰	۸۰۰ × ۲۰۰ × ۱۶۰	-	-
انجمن بتن سوئیس	۶۰۰ × ۲۰۰ × ۱۰۰	۸۰۰ × ۲۰۰ × ۱۵۰	۱۲	۳۵/۴۵
انجمن بتن پیش ساخته/پیش تنیده	۶۰۰ × ۲۰۰ × ۱۰۰	۸۰۰ × ۲۰۰ × ۱۵۰	۱۳	۳۵/۴۵
Rilem	۶۰۰ × ۲۰۰ × ۱۰۰	۷۰۰ × ۲۰۰ × ۱۵۰	۱۲	۳۵/۴۵
Dazcko	۶۰۰ × ۲۰۰ × ۱۰۰	۷۰۰ × ۲۰۰ × ۱۵۰	۱۲	۳۵/۴۵

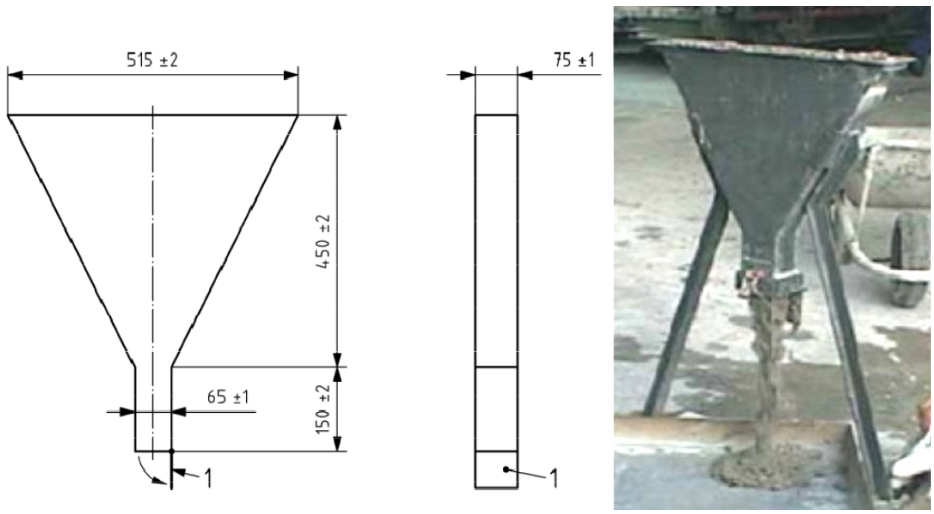
برای انجام این آزمایش، قسمت عمودی دستگاه از بتن خودتراکم پُر می‌شود. پس از یک دقیقه، دریچه باز می‌شود تا بتن در بخش افقی جریان پیدا کند [۵۵ ,42 و59]. بعد از بلند کردن دریچه ، اجازه داده می‌شود که بتن در قسمت افقی جاری شود و زمان رسیدن بتن به فواصل ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متر (T_{20} و T_{40}) اندازه‌گیری می‌شود. پس از توقف جریان، ارتفاع بتن در انتهای بخش افقی (h_2) و انتهای بخش عمودی (h_1) اندازه گرفته و از رابطه (h_2/h_1) که به نسبت انسداد موسوم است، استفاده می‌شود. کل آزمایش باید در مدت حداکثر ۵ دقیقه انجام شود [42]. برخی مراجع h_1 را ارتفاع بتن بلافاصله بعد از میلگردها [۵۵] و برخی دیگر آن را ارتفاع بتن در قسمت عمودی در نظر می‌گیرند [42،59]. در مورد h_2 نیز بهتر است که میانگین ارتفاع بتن در انتهای جعبه در سه نقطه مرکز و گوشه‌ها اندازه گرفته شود [59].

طبق توصیه آیین‌نامه بتن ایران، نسبت به‌دست آمده در آزمایش جعبه L نباید کمتر از ۰/۸ باشد و نسبت ۱ به معنی قابلیت پرکنندگی و عبور کردن کاملا مطلوب است. موسسه ICAR مقدار مناسب نسبت انسداد را بین ۰/۸ تا ۰/۸۵ پیشنهاد کرده است [۳۰]. مؤسسه EFNARC و انجمن بتن آمریکا مقدار مناسب این نسبت را بین ۰/۸ تا ۱ مناسب می دانند [۳۴،29]. حداکثر مقدار نسبت انسداد برابر یک می‌باشد که در این صورت روانی بتن بسیار زیاد و در حد آب خواهد بود [۳۴].

۳-۲-۵ آزمایش قیف V

این آزمایش، نخستین بار در کشور ژاپن، توسط ozawa و همکارانش [52]، مورد استفاده قرار گرفت. دستگاه این آزمایش، شامل یک قیف V شکل است که زمان خروج بتن از آن، با گرانروی بتن و توانایی عبور بتن از مقاطع باریک مرتبط است.

قیف V، در ابعاد مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد، این دستگاه در شکل ۳-۶ نشان داده شده و ابعاد مختلف پیشنهادی آن، در جدول ۳-۸ آورده شده است.



شکل ۳-۶ دستگاه قیف V شکل مطابق استاندارد ملی ایران

جدول ۳-۸ ابعاد دستگاه قیف V شکل در مراجع مختلف

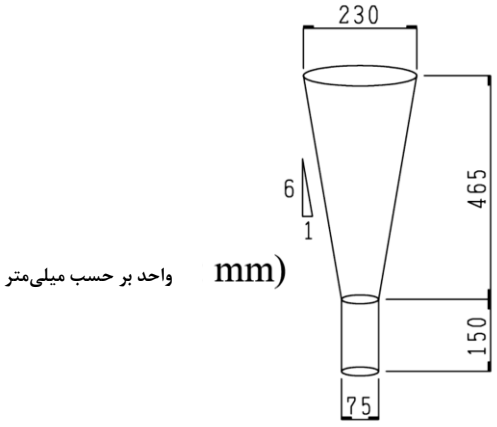
مرجع	ابعاد ورودی (میلی‌مترمربع)	ابعاد نازل خروجی (میلی‌مترمربع)	ارتفاع بخش شیب دار (میلی‌متر)	ارتفاع نازل (میلی‌متر)
استاندارد ملی ۹-۳۲۰۳ و EN 12350-9	۵۱۵ × ۷۵	۷۵ × ۶۵	۴۵۰	۱۵۰
EFNARC 2002 – Okamura	۴۹۰ × ۷۵	۷۵ × ۶۵	۴۲۵	۱۵۰
Khayyat و همکاران	۵۰۰ × ۷۵	۷۵ × ۷۵	۴۲۵	۱۵۰
انجمن بتن هلند – EFNARC 2005 *	۵۱۵ × ۷۵	۷۵ × ۶۵	۴۵۰	۱۵۰
Grünewald (برای بتن الیافی)	۵۹۵ × ۷۵	۱۲۵ × ۱۲۵	۴۶۵	۲۵۰

طبق توصیه آیین‌نامه بتن ایران، اگر نتیجه این آزمایش کمتر از ۸ ثانیه باشد به مفهوم قابلیت مناسب پرکنندگی است. چنانچه نتیجه این آزمایش خیلی کم باشد، احتمال جداشدگی وجود دارد. آزمایش قیف V را پس از ۵ دقیقه از پایان زمان آزمایش اولیه می‌توان تکرار کرد، در این حالت نتیجه حاصله نباید بیش از ۳ ثانیه از نتیجه اولیه زیادتر باشد. افزایش این مقدار می‌تواند نشان دهنده عدم پایداری بتن خودتراکم و جداشدگی آن باشد. بنابر پیشنهاد مؤسسهEFNARC، زمان مناسب تخلیه بتن از قیف V شکل بین ۶ تا ۱۲ ثانیه است. اگر زمان تخلیه بتن بیشتر از ۱۲ ثانیه باشد، بیانگر گرانروی

خمیری زیاد بتن است و اگر زمان تخلیه بتن کمتر از ۶ ثانیه باشد، نشان دهنده گرانروی کم بتن است که در این حالت احتمال وقوع پدیده جداشدگی وجود دارد [29].

برای انجام این آزمایش که به منظور بررسی قابلیت پرکنندگی و عبور بتن از بین فضاهای باریک استفاده می‌شود، حدود ۱۲ لیتر بتن مورد نیاز است. قیف باید بدون آنکه تراکمی صورت گیرد و یا ضربه‌ای به بدنه ظرف وارد شود، از بتن پر شود و سطح آن صاف گردد. بعد از گذشت ۱۰ ثانیه باید دریچه باز شود و اجازه داده شود بتن تحت اثر وزن خود از قیف خارج شود. و زمان تخلیه کامل بتن اندازه گرفته شود (زمان جریان[۱]). طبق تعریف زمان تخلیه کامل بتن زمان ظاهر شدن نور در حالتی است که از بالای قیف به خروجی نگاه می‌شود. این قسمت از آزمایش باید حداکثر در مدت ۵ دقیقه انجام شود. در ادامه بار دیگر بدون تمیز و یا مرطوب کردن قیف، باید در همان شرایط قیف از بتن پر شود و به مدت ۵ دقیقه رها گردد، تا امکان ته‌نشین فراهم شود. سپس باید دریچه باز شود و زمان تخلیه کامل بتن اندازه گرفته شود (زمان جریان در مدت ۵ دقیقه[۲]). این قسمت از آزمایش باید بلافاصله بعد از قسمت اول انجام شود [۵۵ و۳۰].

نوع دیگری از این قیف، با مقطع دایره که به قیف O شکل معروف است، نیز در ژاپن استفاده می‌شود، که ابعاد آن در شکل ۳-۷ نشان داده شده است [54و ۳۳]. این آزمایش، برای اندازه‌گیری توانایی عبور بتن با حداکثر اندازه ۲۰ میلی‌متر قابل استفاده است [۳۳].



شکل ۳-۷ دستگاه قیف O شکل [54]

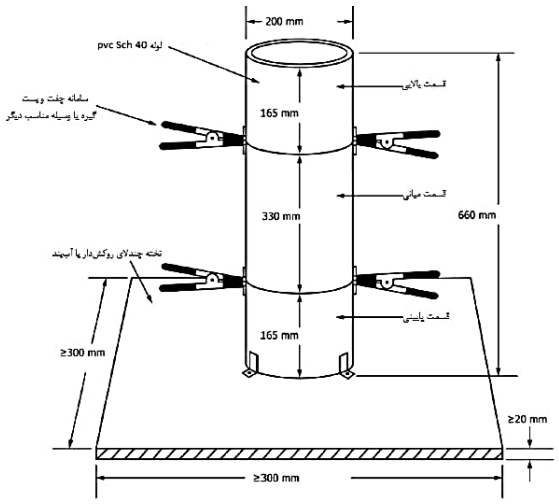
۳-۲-۶ آزمایش ستون جدا شدگی (پایداری)

آزمایش ستون جداشدگی استاتیکی (فنی)، مطابق استاندارد INSO 12255 یا ASTM C1610، برای برآورد مقاومت بتن خودتراکم در برابر جداشدگی استاتیکی بیان شده است [59]. دستگاه این آزمایش همانطور که در شکل ۳-۸ نشان داده شده است از یک استوانه از جنس پلی وینیل کلراید (PVC) به قطر ۲۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۶۶۰ میلی‌متر تشکیل شده

۱. The Flow Time
۲. The Flow Time at $T_{5minutes}$

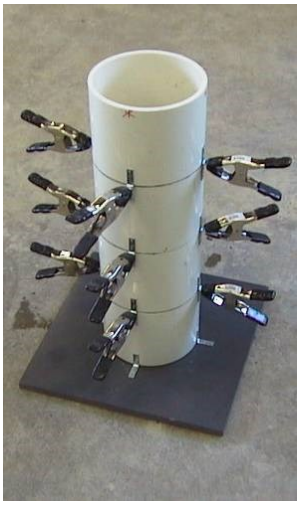
است که به سه قسمت تقسیم می‌شود. ارتفاع قسمت‌های بالا و پایین، هر کدام، ۱۶۵ میلی‌متر و ارتفاع قسمت وسط ۳۳۰ میلی‌متر است [62].

طبق توصیه آیین‌نامه بتن ایران، اگر مقدار جداشدگی کمتر از ۱۰ درصد باشد، نتیجه آزمایش قابل قبول است. در صورتی‌که طول حرکت بتن در قالب کمتر از ۵ متر باشد، ممکن است مقدار کمتر از ۱۵ درصد نیز قابل قبول تلقی شود.



شکل ۳-۸ دستگاه ستون جداشدگی ایستایی مطابق استاندارد ملی ایران ۱۲۲۵۵

انجمن بتن آمریکا و ICAR دستگاه آزمایش را چهار قسمت در نظر گرفته‌اند که ارتفاع هر قسمت ۱۶/۵ سانتی‌متر می‌باشد (شکل ۳-۹ را مشاهده کنید) [۳۰, 39].

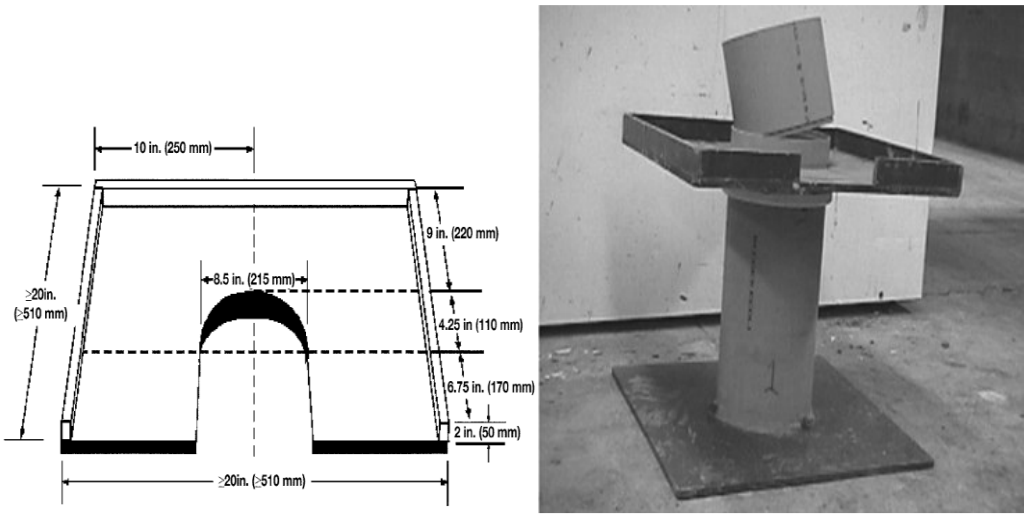


شکل ۳-۹ آزمایش ستون جداشدگی مطابق روش ICAR

برای انجام این آزمایش، دستگاه در مدت دو دقیقه، تا لبه از بتن پر شده و سپس، به مدت ۱۵ دقیقه دست‌نخورده رها می شود. حال قسمت بالایی ستون با یک حرکت چرخشی افقی و به کمک صفحه جمع‌آوری کننده[۱] که در شکل ۳-۱۰-الف نشان داده شده است، از آن جدا می‌گردد [۳۳].

سپس، هر کدام از نمونه‌های قسمت‌های بالا و پایین بر روی الک #۴ (۴/۷۵ میلی‌متر) شسته می‌شود. در این صورت، ریز دانه‌ها از الک عبور کرده و درشت دانه‌ها باقی می‌مانند. سپس، با استفاده از یک پارچه جاذب بزرگ سطح درشت دانه‌ها خشک می‌شود. سپس، وزن درشت‌دانه ها با دقت ۵۰ گرم اندازه‌گیری شده و شاخص جداشدگی ایستایی (با دقت ۰/۱ درصد) از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$SI = 2\left[\frac{\left(CA_B - CA_T\right)}{\left(CA_B + CA_T\right)}\right]\times 100 \qquad (۱-۳)$$



الف) صفحه جمع‌آوری‌کننده ب) قسمت بالایی در حال جداشدن بوسیله صفحه جمع‌آوری کننده

شکل ۳-۱۰ آزمایش ستون جداشدگی

در معادله فوق، CA_B وزن درشت‌دانه‌های قسمت پایین و CA_T وزن درشت‌دانه‌های قسمت بالای دستگاه است. محدوده شاخص جداشدگی برای بتن‌های با مقاومت مناسب در برابر جداشدگی ایستایی در استاندارد مشخص نشده است. بر اساس گزارش کمیته ۲۳۷ انجمن بتن امریکا [39]، در صورتی که بتن خودتراکم شاخص جداشدگی کمتر از ۱۰٪ داشته باشد،

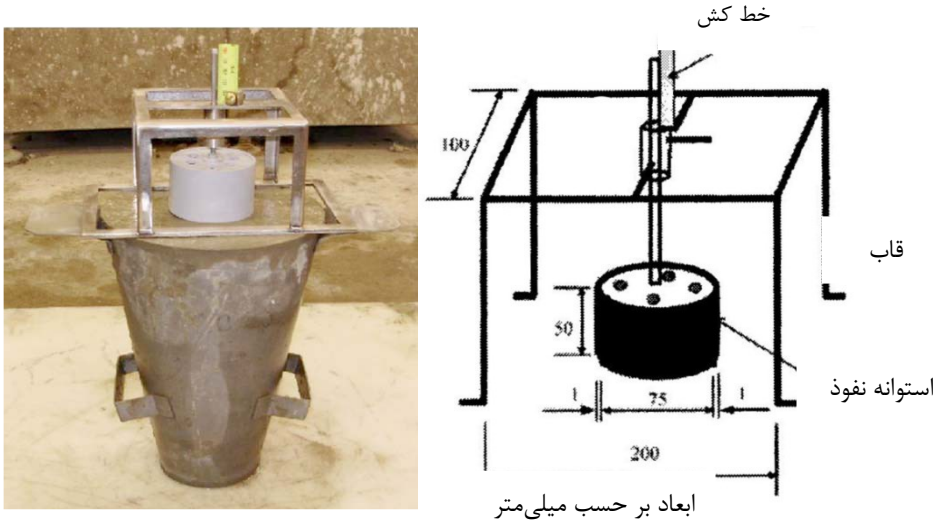
۱. Collector plate

مقاومت کافی در برابر جداشدگی ایستایی دارد. این مقدار، در مرکز حمل و نقل انجمن های ملی امریکا، برابر ۵٪ و در گزارش مرکز تحقیقات بین المللی سنگدانه در دانشگاه Austin برابر ۱۵٪ پیشنهاد شده است [۳۳].

۳-۲-۷ ارزیابی سریع مقاومت در برابر جدا شدگی ایستا (آزمون نفوذ)

این آزمایش، نخستین بار توسط Bui و همکاران [62]، برای اندازه‌گیری مقاومت بتن در برابر جداشدگی استاتیکی پیشنهاد شد. این آزمایش مطابق استاندارد ملی ۱۹۳۸۷ و ASTM C1712، آزمایشی سریع برای ارزیابی جداشدگی استاتیکی می باشد [63]. در این آزمایش با استفاده از مقاومت بتن در برابر نفوذ یک وسیله خارجی، مقاومت در برابر جداشدگی تخمین زده می‌شود.

برای طراحی این آزمایش، از این واقعیت استفاده شده‌است که در اثر جدا شدگی، درشت‌دانه‌ها در پایین نمونه بتنی ته نشین می‌شوند و این امر باعث می‌شود که یک لایه پر از ملات، در بالای نمونه بتنی جمع شود. بنابراین، تنش تسلیم بخش فوقانی بتن کمتر از سایر قسمت‌ها می‌شود و دستگاه می‌تواند در آن نفوذ کند. دستگاه نفوذ در شکل ۳-۱۱ نشان داده شده است [۳۳].



شکل ۳-۱۱ دستگاه نفوذ برای تعیین مقاومت در برابر جداشدگی

برای انجام آزمایش نفوذ، بتن در یک محفظه ریخته می‌شود و به مدت ۸۰ ثانیه دقیقه دست نخورده باقی می‌ماند. ابعاد محفظه باید به گونه‌ای باشد که اثر لبه‌ها قابل صرف نظر کردن باشد. به عنوان مثال، می‌توان از دستگاه جعبه L شکل استفاده کرد. طبق استاندارد ملی ایران ۱۹۳۸۷ بهتر است از قیف اسلامپ به صورت وارونه استفاده شود. سپس، وسیله نفوذ داخل بتن رها می‌شود و عمق نفوذ پس از ۳۰ ثانیه ثبت می‌شود. برای یک وسیله نفوذ ۴۵ گرمی، در صورتی که عمق

نفوذ (P_d) کمتر از ۱۰ میلی‌متر باشد، بتن دارای مقاومت کافی در برابر جداشدگی می‌باشد؛ در صورتی که عمق نفوذ بین ۱۰ و ۲۵ میلی‌متر باشد، بتن تا حدی در برابر جدا شدگی مقاومت دارد، و اگر عمق نفوذ بزرگتر از ۲۵ میلی‌متر باشد، بتن در معرض جدا شدگی قرار دارد.

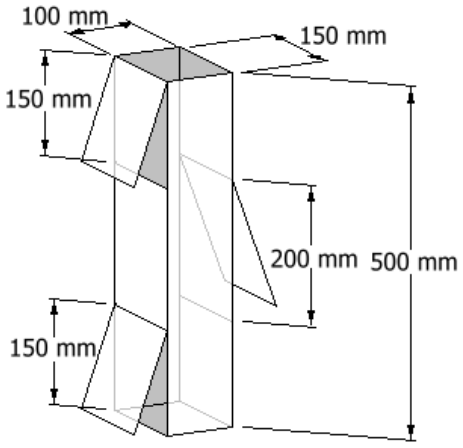
طبق توصیه آیین‌نامه بتن ایران، نتیجه کمتر از ۱۰ میلی‌متر، مطلوب و کمتر از ۲۵ میلی‌متر، قابل قبول است.

۳-۲-۸ آزمایش جداشدگی دینامیکی

آزمایش ستون جداشدگی دینامیکی [66]، برای نخستین بار در دانشگاه پیسلی (در سال ۲۰۰۲) و دانشگاه Ghent (در سال ۲۰۰۱) مورد استفاد قرار گرفت. دستگاه این آزمایش، شامل یک جعبه مکعب مستطیل شکل می‌باشد که روی یک میز سیلان ملات استاندارد، نصب شده است. سطح مقطع این ستون، همان طور که در شکل ۳-۱۲ نشان داده شده است، یک مستطیل به ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر در ۱۵۰ میلی‌متر می‌باشد و ارتفاع آن، در مراجع مختلف ۴۰۰ یا ۵۰۰ میلی‌متر ذکر شده است. سه دریچه، در وجوه مقابل ستون وجود دارند که بتن در انتهای آزمایش از آن ها تخلیه می‌شود.

برای شروع آزمایش، بتن در ستون ریخته می‌شود و به مدت یک دقیقه دست نخورده رها می‌شود. سپس، بتن با استفاده از میز جریان با سرعت ۲۰ بار در دقیقه، ضربه زده می‌شود و مجدداً ۵ دقیقه دست نخورده رها می‌شود. نمونه‌های قسمت بالا و پایین ستون هر کدام، جداگانه، روی الک ۴/۷۵ میلی‌متر شسته می‌شود. در این صورت، ریز دانه‌ها از الک عبور کرده و درشت دانه‌ها باقی می‌مانند. درشت دانه‌ها پس از خشک شدن، وزن می‌شوند و نسبت جداشدگی، به صورت نسبت وزن درشت دانه نمونه قسمت بالا به وزن درشت دانه نمونه قسمت پایین محاسبه می‌شود. در صورتی که نسبت جداشدگی بیشتر از ۰/۹۵ باشد، بتن مقاومت خوبی در برابر جداشدگی دینامیکی دارد و اگر این نسبت از ۰/۹ کمتر باشد، احتمال وقوع جداشدگی در مخلوط وجود دارد [۳۳].

این آزمایش، احتمال وقوع جداشدگی دینامیکی در مخلوط بتن خودتراکم را به خوبی نشان می‌دهد [66] و در آن، از لرزاندن برای تسریع جدا شدگی بتن خودتراکم استفاده می‌شود [67]. اساس این روش، بسیار ساده است و نتایج مستقیماً به دست می‌آیند. اما، انجام این آزمایش، زمان بر است و به تجهیزات خاصی نیاز دارد (مانند دستگاه ستون جدا شدگی، الک و وسیله وزن کردن). بنابراین، برای استفاده در آزمایشگاه مناسب تر از کارگاه است. به علاوه، با افزایش احتمال جداشدگی، تکرار پذیری اندازه گیری‌ها کاهش می‌یابد [۳۳و66].



شکل ۳-۱۲ دستگاه آزمایش ستون جدا شدگی دینامیکی [67]

۳-۲-۹ آزمایش پایداری الک GTM (GTM Screen Stability Test Method)

این آزمایش توسط یک شرکت پیمانکار فرانسوی بنام GTM برای ارزیابی مقاومت در برابر ارزیابی مقاومت در برابر جداشدگی (پایداری) بتن خودتراکم ابداع شده و توسعه یافته است. در این آزمایش نمونه ۱۰ لیتری بتن در حالت سکون قرار می‌گیرد تا در صورت استعداد جداشدگی داخلی، این اتفاق بروز نماید. سپس با ریختن نیمی از آن روی الک به قطر ۳۵۰ میلی‌متر و اندازه چشمه ۵ میلی‌متر اجازه میدهم از آن عبور کرده و به درون زیر الکی بریزد. پس از ۲ دقیقه ملات عبوری از الک وزن می‌شود و بصورت درصدی از وزن نمونه اولیه بتن روی الک گزارش می‌گردد. روش انجام این آزمایش طبق استاندارد ملی۱۱-۳۲۰۳ و EN 12350-11 انجام می‌پذیرد، که در ادامه تشریح شده است.

حدود ۱۰ لیتر نمونه بتن لازم است تا آزمایش انجام گردد. ابتدا بتن را در یک ظرف در دار به حجم ۱۰ لیتر (برای جلوگیری از تبخیر) به مدت ۱۵ دقیقه نگهداری کنید. سپس سطح بتن را بررسی کنید و مسئله آب انداختن را مورد توجه قرار دهید و گزارش کنید وزن زیر الکی خالی در این مدت بدست آورید . حدوداً ۲ لیتر از بتن فوقانی داخل سطل در دار به وزن ۴/۸±۰/۲ کیلو گرم را از طریق خالی کردن سطل در یک ظرف یا سرتاس بزرگ بریزید و وزن بتن ریخته شده و ظرف را بدست آورید . سپس این بتن را به آرامی از ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متر و بطور پیوسته روی الک (الک به قطر ۳۵۰ میلی‌متر و چشمه ۵ میلی‌متر) بریزید در حالی‌که زیر الکی در زیر الک قرار دارد، جرم بتن ریخته شده روی الک را با کسر وزن ظرف خالی از وزن ظرف بتن مشخص نمائید (M_a) اجازه دهید به مدت ۲ دقیقه ملات بتن از الک به داخل زیر الکی سرازیر شود. سپس با توزین زیر الکی و ملات، وزن ملات داخل آنرا بدست آورید (M_b). درصد وزن ملات به بتن را بعنوان ضریب یا نسبت جداشدگی محاسبه و گزارش نمائید.

ضریب یا نسبت جداشدگی = (M_b/M_a) * ٪۱۰۰ (۳-۲)

مشاهدات تجربی حاکی از آن است که اگر درصد ملات عبوری از الک بین ۵ تا ۱۵ درصد وزن نمونه باشد، پایداری در برابر جداشدگی رضایت بخش است. نتایج زیر ۵ درصد نشانه پایداری و مقاومت شدید در برابر جداشدگی است و بنظر می‌رسد بر ظاهر بتن در امر پرداخت سطح اثر بد بگذارد. طبق توصیه آیین‌نامه بتن ایران، اگر نتیجه آزمایش کمتر از ۲۰ درصد باشد، نشان‌دهنده مقاومت قابل قبول و اگر کمتر از ۱۵ درصد باشد، نشان‌دهنده مقاومت مطلوب مخلوط، در مقابل جداشدگی است. نتایج بیش از ۲۰ درصد و بویژه بالای ۳۰ درصد نمایانگر جداشدگی شدید است.

گزارش‌هایی از اینکه این آزمایش در ارزیابی پایداری بتن خود تراکم در برابر جداشدگی مفید است، وجود دارد. بهر حال علیرغم سادگی آزمایش، سرعت آن مناسب نیست و آزمایش کندی محسوب می‌شود و نیاز به توزین و دقت در آن دارد و لذا بعنوان آزمایش کارگاهی چندان مناسب نمی‌باشد. قابلیت تکرار نتایج آزمایش نیز تأمل بر انگیز است.

۳-۲-۱۰ بررسی خواص رفتارشناسی بتن با استفاده از دستگاه رئومتر

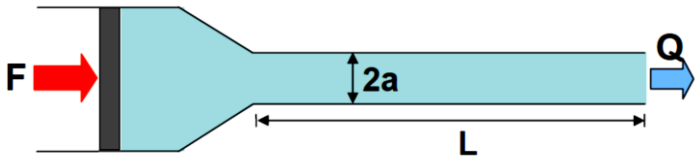
رفتارشناسی (رئولوژی) سیالات یکی از علوم پرکاربرد است که به طور مستقیم در بررسی کارایی بتن تازه نیز قابل استفاده می‌باشد. اگرچه بتن تازه را می توان یک سیال در نظر گرفت، اما توصیف رفتارشناسی بتن تازه بدلیل اینکه بتن یک ماده پیچیده با خواص وابسته به زمان و طیف گسترده‌ای از ذراتی با اندازه‌های مختلف است، بر اساس این مفاهیم بسیار پیچیده است. اساساً بتن تازه یک سوسپانسیون غلیظ از سنگدانه‌ها در خمیر سیمان است. خمیر سیمان خود یک سوسپانسیون غلیظ دانه‌های سیمان در آب است.

امروزه رئومترهای متعددی برای بتن (با طرح ها، مزایا و محدودیت های مختلف) برای اندازه‌گیری پارامترهای رفتارشناسی ساخته شده‌اند. بیشتر رئومترهای بتن برای اندازه‌گیری محدوده وسیعی از پارامترهای رفتارشناسی بتن طراحی شده‌اند. با این حال، برای اندازه‌گیری پارامترهای بتن خودتراکم نیز مناسب هستند. مخلوط‌های بتنی بسیار سیال، مانند SCC، بیشتر شبیه سیالات همگن هستند، بنابراین، می‌توانند با دقت و تکرارپذیری بیشتری اندازه‌گیری شوند و بر خلاف دیگر انواع بتن، ملات و خمیر نیازی به رئومترهایی با طراحی خاص، ندارند.

خواص رئولوژیکی را می‌توان با رئومترهای مدل «لوله موئین[۱]» یا «رئومترهای چرخشی[۲]» اندازه‌گیری کرد. رئومترهای لوله موئین را می‌توان برای اندازه‌گیری سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی استفاده کرد. در بتن، رئومترهای چرخشی عمدتاً در مواردی استفاده می‌شود که پارامترهای رئولوژی باید در واحدهای پایه‌ای تعیین شوند، در حالی که از رئومترهای لوله موئین در موارد محدود استفاده می‌شود.

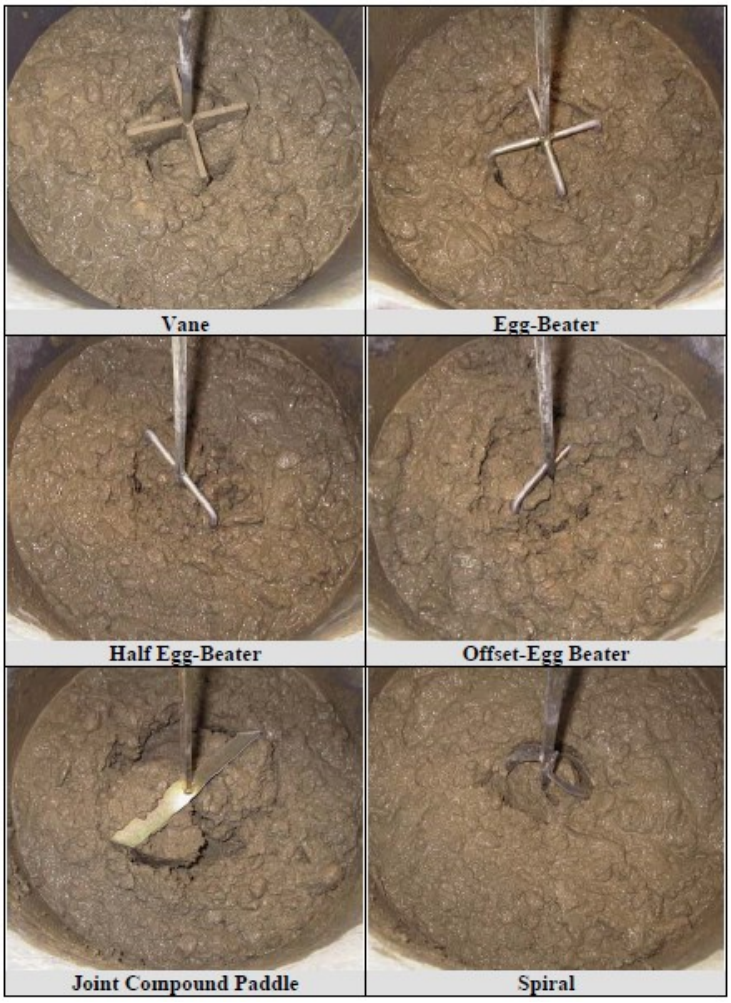
۱ - Capillary tube viscometers

۲ - rotational rheometers



شکل ۳-۱۳ ساز و کار رئومتر مدل لوله موئین

روش‌های چرخشی عموماً برای سوسپانسیون‌های غلیظ، ژل‌ها و خمیرها بهتر هستند، علی‌رغم این واقعیت که روش لوله موئین برای اندازه‌گیری گرانروی، دقیق‌تر است. برای سیالات غیر نیوتنی، توزیع آهنگ برش و تنش برشی معمولاً در یک دستگاه چرخشی بهتر از دستگاه لوله مویین تعریف می‌شود. مشکل افزایش دما در اثر برش یکی از مشکلات رئومتر چرخشی می‌باشد، اگرچه روش‌هایی برای محدود کردن تغییر دما وجود دارد. رئومترهای لوله موئین معمولاً ارزان‌تر و ساده‌تر از رئومترهای چرخشی هستند [109].



شکل ۳-۱۴ نمونه‌ای از رئومتر چرخش و شکل‌های متفاوت پره‌های آن

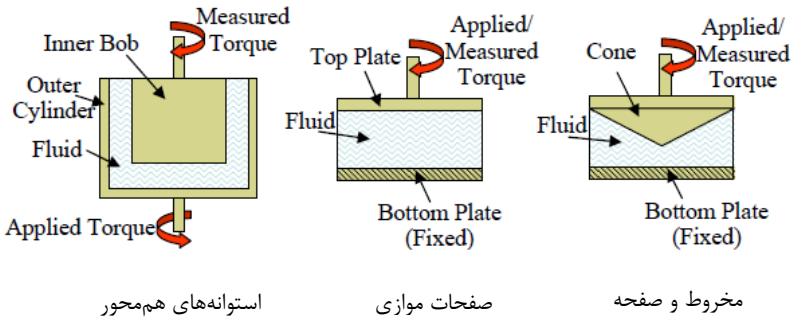
رئولوژی و کارایی بتن تا حدی تحت تأثیر طرح مخلوط، ویژگی‌های مواد و شرایط ساخت است. تاثیر بسیاری از این عوامل بر کارایی و اسلامپ به خوبی شناخته شده و گزارش شده است ولی داده‌های کمی در ارتباط با رئولوژی بتن وجود دارد. گزارش‌هایی وجود دارد که نشان می‌دهد، پارامترهای رئولوژیکی اندازه‌گیری شده توسط رئومترهای مختلف بتن، حتی برای یک بتن مشابه، می‌توانند بین رئومترهای مختلف متفاوت باشند.

عملکرد کلی رئومترهای بتن به این صورت است که ابتدا به منظور ایجاد شکست تیکسوتروپی در مخلوط، تنش اولیه‌ای اعمال شده و سپس نرخ تنش کاهش داده می‌شود و در این مدت، ارتباط بین گشتاور و سرعت چرخش اندازه‌گیری می‌گردد. در رئومترهای موجود روش‌های مختلفی برای تبدیل داده‌های گشتاور چرخشی به تنش تسلیم و لزجت خمیری به کار گرفته شده است که آن‌ها را می‌توان در دو گروه کلی روش‌ها بر پایه‌ی واحدهای نسبی و روش‌های ارائه دهنده‌ی واحدهای پایه‌ای قرار داد.

برای محاسبه‌ی واحدهای نسبی به داده‌های گشتاور (T) بر حسب سرعت چرخش (N)، خط مستقیمی برازش داده می‌شود. در دستگاه دو نقطه‌ای Tattersal نقطه‌ی تلاقی این خط با محور گشتاور، «g» و شیب خط «h» نامیده شده و مقدار g به عنوان شاخص مرتبط با تنش تسلیم و مقدار h به عنوان شاخص مرتبط با لزجت خمیری مطرح می‌شود. این روش نام‌گذاری که در رابطه‌ی زیر آورده شده است، در رئومترهای دیگر نیز به کار گرفته شده است. باید توجه داشت متغیر g با مدول برشی که با «G» نشان داده می‌شود، متفاوت است.

$$T = g + hN$$

قابل ذکر است برای محاسبه‌ی نتایج بر حسب واحدهای پایه‌ای با کمک مدل بینگام (تنش تسلیم و لزجت خمیری) یا مدل Herschel – bulkley (تنش تسلیم و مقادیر ثابت a و b)، نیاز به کالیبره کردن یا استفاده از فرضیات مشخصی در مورد توزیع تنش تسلیم و نرخ برش در رئومتر وجود دارد.



شکل ۳-۱۵ نمونه‌هایی از هندسه رئومتر چرخشی

فصل ۴

مروری بر روش‌های رایج طرح مخلوط بتن خودتراکم

فصل چهارم

مروری بر روش‌های رایج طرح مخلوط بتن خودتراکم

۴-۱ کلیات

شاید بتوان گفت فرآیند تعیین مقادیر اجزای مخلوط بتن خودتراکم مهمترین بخش فرآیند تولید این نوع بتن می‌باشد. علی‌رغم اهمیت این موضوع، بدلایل مختلف از جمله وجود پارامترهای متعدد و موثر، تاکنون روش طرح مخلوط اصولی که در برگیرنده کلیه پارامترهای موثر باشد، ارائه نشده است. بر این اساس کارهای مطالعاتی زیادی انجام شده است، که برخی از آن‌ها در قالب مقاله و برخی دیگر توسط موسسات و سازمان‌های معتبر مانند ACI و EFNARC، ارائه شده است. نکته قابل توجه در همه این روش‌ها، عدم قطعیت در نتایج بدست آمده است به‌گونه‌ای که روش‌های ارائه شده تنها جنبه راهنمایی دارند. در این فصل مروری بر تعدادی از روش‌ها یا توصیه‌های مطرح طرح مخلوط انجام و مزایا و محدودیت‌های هر کدام نیز بیان می‌شود.

۴-۲ توصیه های ارائه شده توسط انجمن‌ها و موسسات معتبر بین المللی

۴-۲-۱ روش انجمن بتن آمریکا ACI 237

کمیته ۲۳۷ انجمن بتن آمریکا ضمن ارائه مراحل تعیین اجزاء بتن خود تراکم، توصیه‌هایی نیز جهت کنترل مقادیر بدست آمده بیان نموده است و مثال‌هایی از طرح مخلوط استفاده شده بصورت واقعی در پروژه‌ها ذکر کرده است. این مراحل و توصیه ها به شرح زیر می‌باشد.

- ***گام اول: تعیین مقدار «جریان اسلامپ» مورد نیاز با توجه به مشخصات سازه یا المان***

در این مرحله جریان اسلامپ مورد نیاز برای بتن خود تراکم با توجه به مشخصات سازه بتنی و شرایط فنی عضو بتنی از جدول ۴-۱ انتخاب می‌شود. خانه‌هایی که در جدول با رنگ مشکی پر شده‌اند به این معنی است که باید از آن اجتناب نمود. این جدول حاصل یک پروژه تحقیقاتی توسط Daczko و همکاران [79] می‌باشد که ارتباط نتایج مقادیر آزمایش‌های کارایی SCC را با مشخصات عضو بتنی بررسی نموده است.

- ***گام دوم : تعیین مقادیر سنگدانه***

در این مرحله مقدار سنگدانه بتن خود تراکم تعیین می‌شود. در این روش سنگدانه‌های درشت به دو دسته تقسیم‌بندی شده‌است. دسته اول که دارای حداکثر اندازه سنگدانه بزرگتر از ۱۲/۵ میلی‌متر و دسته دوم که دارای حداکثر اندازه سنگدانه کوچکتر از ۱۲/۵ میلی‌متر می‌باشند.

اگر حداکثر اندازه سنگدانه‌ها بزرگتر از ۱۲/۵ میلی‌متر باشد، به عنوان نقطه شروع برای تعیین مقدار سنگدانه درشت باید چگالی توده‌ای خشک میله خورده (متراکم با میله) این سنگدانه‌ها تعیین شود و ۵۰ درصد حجم بتن باید با حجم توده‌ای سنگدانه درشت پُر شود. به‌عنوان مثال اگر چگالی سنگدانه درشت خشک میله خورده برابر ۱۶۰۰ کیلوگرم در متر مکعب باشد، مقدار سنگدانه درشت برابر ۱۶۰۰×۰/۵ یعنی ۸۰۰ کیلوگرم در متر مکعب خواهد بود.

جدول ۴-۱ شرایط عضو بتنی و وضعیت میلگردها و اثر آن بر تعیین مقدار جریان اسلامپ هدف

شرایط عضو بتنی و وضعیت میلگردها		آزمایش جریان اسلامپ بر حسب میلی‌متر		
		۵۵۰<	۵۵۰ تا ۶۰۰	۶۰۰>
درصد آرماتور استفاده شده در عضو بتنی	کم			
	متوسط			
	زیاد			
عمق المان بتنی	کم			
	متوسط			
	زیاد			
طول المان بتنی	کم			
	متوسط			
	زیاد			
ضخامت دیواره	کم			
	متوسط			
	زیاد			

خانه‌های که به رنگ سیاه هستند به معنی عدم مناسب بودن است.

همچنین اگر حداکثر اندازه سنگدانه‌ها، بزرگتر از ۱۲/۵ میلی‌متر باشد، برای کاهش احتمال انسداد سنگدانه‌ها در حین عبور از بین میلگردها، توصیه می‌شود حجم مطلق سنگدانه‌های ۱۲/۵ میلی‌متر و بزرگتر، بین ۲۸ تا ۳۲ درصد کل سنگدانه‌ها بوده و از سنگدانه ریزی با دانه‌بندی خوب استفاده شود.

اگر حداکثر اندازه سنگدانه مساوی یا کوچکتر از ۱۲/۵ میلی‌متر است در این حالت، یک نقطه شروع خوب ۵۰ درصد حجمی کل سنگدانه‌ها، شن، و ۵۰ درصد ماسه می‌باشد.

- ***گام سوم: تعیین مقدار پودر، مواد سیمانی و نسبت آب به مواد سیمانی***

در این مرحله مقدار پودر، مواد سیمانی و آب مورد نیاز برای ساخت بتن خود تراکم به صورت زیر تعیین می‌شود. در ابتدا مقدار پودر با توجه به جریان اسلامپ مورد نیاز که در مرحله قبل تعیین شده است از جدول ۴-۲ انتخاب می‌شود. لازم به ذکر است که پودر شامل: سیمان، مواد جایگزین سیمان (مانند پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی)، پودر سنگ و مواد ریزتر از الک ۰/۱۲۵ میلی‌متر می‌باشد.

جدول ۴-۲ مقادیر پیشنهادی پودر با توجه به جریان اسلامپ مورد نیاز

	جریان اسلامپ ۵۵۰ mm>	جریان اسلامپ ۶۵۰ تا ۵۵۰ mm	جریان اسلامپ ۶۵۰ mm<
مقدار پودر (کیلوگرم در متر مکعب)	۳۸۵-۳۳۵	۴۴۵-۳۸۵	بیشتر از ۴۵۸

تذکر۱ : مقصود از سنگدانه درشت، سنگدانه بزرگ‌تر از ۴/۷۵ و سنگدانه ریز کوچک‌تر از ۴/۷۵ میلی‌متر است. ممکن است جزئی از ماسه جزو سنگدانه درشت باشد یا جزئی از شن سنگدانه ریز باشد.

تذکر۲ : البته باید توجه داشت که تعریف ملات بر خلاف آنچه انتظار می رود مربوط به ذرات کوچکتر از ۲/۳۸ میلی‌متر است نه ۴/۷۵ میلی‌متر و این می‌تواند در برخی موارد ما را با اشکال روبرو کند.

سپس مقدار نسبت آب به مواد سیمانی از توصیه ارائه شده در جدول ۴-۳ انتخاب می‌شود. در این جدول حجم خمیر و حجم ملات بصورت زیر تعریف می‌شود:

- حجم خمیر: حجم پودر، آب، افزودنی شیمیایی و هوا
- حجم ملات: حجم خمیر به اضافه حجم سنگدانه‌های ریز عبوری از الک شماره ۸ (۲/۳۸ میلی‌متر)

خلاصه مقادیر توصیه شده از طرف کمیته ۲۳۷ انجمن بتن آمریکا جهت تعیین اجزاء بتن خود تراکم در جدول ۴-۳ مشاهده می‌شود.

جدول ۴-۳ خلاصه مقادیر توصیه شده در نشریه ACI 237 برای اجزاء بتن خود تراکم

حجم مطلق سنگدانه درشت	۲۸ تا ۳۲ درصد
سهم حجمی خمیر	۳۴ تا ۴۰ درصد کل مخلوط
سهم حجمی ملات	۶۸ تا ۷۲ درصد کل مخلوط
نسبت آب به مواد سیمانی	۰,۳۲ تا ۰,۴۵
مقدار پودر	۳۸۶ تا ۴۷۵ کیلوگرم در متر مکعب

مزایا و محدودیت‌های روش تعیین اجزاء بتن خودتراکم و توصیه‌های ارائه شده توسط این کمیته به شرح زیر می‌باشد:

- ***مزایا:***

- تنها روشی است که که در آن جریان اسلامپ هدف پروژه در ابتدا با توجه به مشخصات عضو بتنی و شرایط سازه تعیین می‌شود.

- ***محدودیت‌ها:***

- دانه‌بندی سنگدانه‌ها در این روش و توصیه‌های آن بطور مشخص مد نظر قرار نگرفته است.
- روش مطرح شده بصورت قاعده‌مند نمی‌باشد و در بعضی از قسمت‌ها صرفاً به ارائه توصیه اکتفا شده است. برای مثال مشخص نیست که اگر حداکثر اندازه سنگدانه کوچکتر از ۱۲/۵ میلی‌متر باشد حجم کلی سنگدانه‌ها در مخلوط بتن چقدر باید باشد.
- تعریف ملات بر خلاف همه روش‌ها و توصیه‌های دیگر به ذرات کوچکتر از ۲/۳۸ میلی‌متر اطلاق شده‌است در حالی‌که در روش‌های دیگر تعریف ملات مربوط به ذرات کوچکتر از ۴/۷۵ میلی‌متر یعنی ماسه می‌باشد و این باعث ایجاد اشکال برای استفاده از این روش می‌شود.
- در این روش راهکاری برای دستیابی به مقاومت فشاری مشخص ارائه نشده است، همچنین در خصوص افزایش دوام نیز توصیه و روشی ذکر نشده‌است.
- به نظر می‌رسد مقادیر توصیه شده جهت حجم ملات و حجم سنگدانه درشت و ریز با فرض ریزدانه بودن و دانه‌بندی خوب ماسه می‌باشد. به عبارت دیگر مبنای دانه‌بندی خوب ماسه در این روش، ماسه‌هایی با مدول نرمی کمتر از ۳/۱ می‌باشد. در صورتی که از ماسه‌های درشت و با مدول نرمی بیشتر استفاده شود به احتمال زیاد این مقادیر با واقعیت انطباق نخواهد داشت.
- مرز بین مواد پودری و غیر پودری ۰/۱۲۵ میلی‌متر می‌باشد که جزو الک‌های رایج در ایران نمی‌باشد (الکی ریزتر از شماره ۱۰۰ # و درشت تر از ۲۰۰ #) که این مساله باعث ایجاد اشکال و اختلاف می‌شود.
- اثر افزودنی اصلاح کننده گرانروی در طرح مخلوط مورد توجه جدی قرار نگرفته است.

۴-۲-۲ روش کمیته اروپایی EN

کمیته اروپایی EN که تا پیش از سال ۲۰۰۵ تنها از طرف موسسه EFNARC توصیه‌هایی درباره طرح مخلوط بتن SCC مطرح کرده بود، از سال ۲۰۰۵ با حضور چندین شرکت مطرح اروپایی توصیه‌نامه‌ای را با ویرایش راهنمای قبلی ارائه نموده‌است. در این بخش هم توصیه‌های مطرح شده EFNARC و هم راهنمای ارائه شده اروپایی سال ۲۰۰۵ مطرح می‌شود.

- ***توصیه های مطرح شده توسط موسسه EFNARC***

در این روش تعیین نسبت‌های اختلاط بر اساس روابط حجمی (به جای وزنی) است. نسبت‌های پیشنهادی برای دستیابی به بتن خودتراکم در قالب موارد زیر ارایه شده است:

- نسبت حجمی آب به پودر (مواد ریز) بین ۰/۸ تا ۱/۱۰ باشد.
- مقدار کل مواد پودری (کوچکتر از ۰/۱۲۵ میلی‌متر) در هر متر مکعب ۱۶۰ تا ۲۴۰ لیتر (حدود ۴۰۰ تا ۶۰۰ کیلوگرم) است.
- مقدار سیمان معمولاً بین ۳۵۰ تا ۴۵۰ کیلوگرم در متر مکعب می‌باشد. مقدار سیمان بیشتر از $500 kg/m^3$ می‌تواند خطرناک تلقی شود و موجب افزایش جمع‌شدگی می‌گردد. مقدار سیمان کمتر از $350 kg/m^3$ فقط وقتی می‌تواند مناسب باشد که مواد جایگزین سیمان مانند خاکستر بادی و پوزولان و غیره در بتن موجود باشد.
- حداکثر میزان جایگزینی پُرکننده نسبت به مواد چسباننده در حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد توصیه می‌شود.
- مقدار سنگدانه درشت* معمولاً ۲۸ تا ۳۵ درصد حجمی مخلوط می‌باشد. حداکثر اندازه سنگدانه بطور کلی ۱۶ تا ۲۰ میلی‌متر می‌باشند، هر چند سنگدانه‌هایی به حداکثر اندازه ۴۰ میلی‌متر یا بیشتر نیز در بتن خودتراکم بکار رفته است.
- نسبت آب به سیمان با توجه به استاندارد EN 206 [80] انتخاب می‌شود. بطور کلی مقدار آب از ۲۰۰ لیتر در متر مکعب تجاوز نمی‌کند.
- مقدار ماسه با توجه به سایر اجزاء بدست می آید . مقدار ماسه** معمولاً بیش از ۳۸ درصد حجمی ملات است (بطور مثال در انگلیس مقدار ماسه کمتر از ۵۰ درصد حجم ملات و بیش از ۵۰ درصد کل سنگدانه می‌باشد یا در کشور ایتالیا ماسه باید ۴۵ تا ۵۰ درصد حجم ملات باشد). مقدار خمیر باید بیش از ۴۰ درصد حجم مخلوط باشد.
- همه ماسه‌هایی که برای بتن معمولی بکار می‌رود برای بتن خودتراکم نیز مناسب است. ماسه‌های شکسته و گردگوشه می‌توانند مصرف شوند. ماسه‌های سیلیسی و کربناتی (آهکی) نیز قابل مصرف هستند. مقدار مواد ریزتر از ۰/۱۲۵ میلی‌متر بعنوان پودر تلقی می‌شود و از نظر رئولوژیکی برای بتن خودتراکم خیلی مهم هستند. حداقل مقدار مواد ریزدانه (پودر که از مواد چسباننده و ماسه تشکیل می‌شود) باید تأمین گردد تا از جداشدگی پرهیز و اجتناب شود.

* سنگدانه ریز در اروپا به ذرات ریز تر از ۴ میلی‌متر گفته می‌شود.
** یکی از علل اختلاف در انگلیس و ایتالیا می‌تواند به تعریف اندازه ذرات ماسه مربوط باشد.

- ***راهنمای ارائه شده اروپایی EN***

در این راهنما بر خلاف راهنمای اولیه EFNARC که در سال ۲۰۰۲ ارائه شده بود صرفا در یک جدول مقدار پیشنهادی پودر و خمیر و سنگدانه و نسبت آب به سیمان پیشنهادی جهت SCC ارائه شده است. لازم به ذکر است که مقادیر ارائه شده تفاوت چندانی با راهنمای سال ۲۰۰۲ ندارد. جدول ۴-۴ این مقادیر پیشنهادی را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۴ مقادیر پیشنهادی کمیته اروپایی در سال ۲۰۰۵ برای طرح مخلوط بتن خود تراکم

	محدوده پیشنهادی بصورت حجمی (lit/m^3)	محدوده پیشنهادی وزنی (kg/m^3)
پودر	-	۳۸۰-۶۰۰
خمیر	۳۰۰-۳۸۰	-
آب آزاد	۱۵۰ - ۲۱۰	۱۵۰ - ۲۱۰
سنگدانه درشت	۲۷۰ - ۳۶۰	۷۵۰ - ۱۰۰۰
سنگدانه ریز	-	۴۸ تا ۵۵ درصد وزن سنگدانه‌ها
نسبت آب به پودر	۰/۸۵ - ۱/۱	-

مزایا و محدودیت‌های راهنمای اروپایی سال ۲۰۰۲ و ۲۰۰۵ به شرح زیر می‌باشد:

- ***مزایا:***

- اطلاعات خوب و زیادی بویژه در راهنمای سال ۲۰۰۲ از طرف موسسه EFNARC برای انواع مصالح و محدوده‌های آن‌ها ارائه شده است.
- در راهنمای ارائه شده سال ۲۰۰۵ مباحث اجرایی خوبی از قبیل تقسیم بندی انواع جریان اسلامپ بتن خود تراکم و انتخاب آن با توجه به شرایط عضو بتنی و بتن‌ریزی پروژه مطرح شده است.

- ***محدودیت ها:***

- دانه‌بندی سنگدانه و نقش آن در طرح مخلوط بتن خودتراکم بطور جدی نگریسته نشده است.
- مرز بین مواد پودری و غیر پودری ۰/۱۲۵ میلی‌متر می‌باشد که جزو الک‌های رایج در ایران نمی‌باشد (الکی ریزتر از شماره ۱۰۰ # و درشت تر از ۲۰۰ #) که این مساله باعث ایجاد اشکال و اختلاف می‌شود.
- به ارتباط طرح مخلوط با مقاومت و دوام نگریسته نشده است.
- اطلاعاتی در مورد اینکه اگر ماده اصلاح کننده گرانروی (VMA) در طرح مخلوط وجود داشته باشد چه تاثیری در مقادیر پیشنهادی ایجاد می‌شود، وجود ندارد.

۴-۲-۳ توصیه نامه ژاپنی بتن خود تراکم (JSCE)

در توصیه نامه ژاپنی در رابطه با بتن SCC و جهت تعیین اجزاء آن صرفاً جدول ۴-۵ ارائه شده است.

جدول ۴-۵ مقادیر اجزاء بتن خود تراکم پیشنهاد شده توسط توصیه نامه ژاپن

پارامتر	مقادیر، درصد	مقادیر (کیلوگرم بر متر مکعب)
فقط دارای فیلر	۱۶ تا ۱۹	۵۰۰ تا ۶۰۰
فقط دارای افزودنی VMA	۹,۵ تا ۱۶	۳۰۰ تا ۵۰۰
ترکیبی (دارای فیلر و افزودنی VMA)	بیشتر از ۱۳	بیشتر از ۴۱۰

۴-۲-۴ روش ارائه شده توسط موسسه ICAR

این روش از طرف موسسه بین المللی تحقیق بر روی سنگدانه‌ها [76] ارائه شده است. مراحل گام به گام روش این موسسه به شرح زیر است:

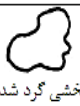
- ***گام اول: انتخاب دانه‌بندی سنگدانه‌ها***

این موسسه تاکید کرده است که در مورد دانه‌بندی سنگدانه‌ها معمولا استفاده از منحنی توان ۰/۴۵ می‌تواند بخوبی وضعیت دانه‌بندی را برای بتن خود تراکم نشان دهد. بهتر است دانه‌بندی مورد نظر ریزتر از خط کشیده شده در توان ۰/۴۵ باشد (منحنی توان ۰/۴۵ در بخش‌های قبلی تشریح شده است).

- ***گام دوم: وضعیت شکل و گوشه داری سنگدانه‌ها (R_{s-a})***

از جدول ۴-۶ وضعیت شکل و گوشه داری‌های (R_{s-a}) مختلف تعیین می‌شود:

جدول ۴-۶ ضریب شکل و گوشه‌داری (تیز گوشگی) سنگدانه

	نرخ شکل و گوشه‌داری (R_{s-A})				
	شکل مناسب، خوب گرد شده ←				→ شکل ضعیف و خیلی گوشه‌دار
	۱	۲	۳	۴	۵
شکل	تقریباً ابعاد مساوی	انحراف از ابعاد مساوی	اکثر ذرات ابعاد مساوی نمی‌باشند	تخت یا تطویل شده	اکثر ذرات تخت و تطویل شده
گوشه‌داری	گرد شده مناسب	گرد شده	 بخشی گرد شده، بخشی گوشه‌دار	گوشه‌دار	خیلی گوشه‌دار
مثال	اکثر سنگدانه‌های رودخانه‌ای	بخشی شکسته شده و بخشی رودخانه‌ای	به خوبی شکسته شده با گوشه‌های مساوی یا بیشتر از ۹۰°	شکسته شده بعضی از گوشه‌ها بیشتر از ۹۰°	شکسته شده با گوشه‌های زیادی مساوی یا بیشتر از ۹۰°

- ***گام سوم: انتخاب حجم خمیر***

حجم خمیر از رابطه (۴-۱) بدست می‌آید:

$$V_{paste-filling-ability} = 100 - \frac{(100 - V_{paste-spacing})(100 - \%voids_{compacted-agg})}{100} \quad (۱-۴)$$

$$V_{paste-spacing} = 8 + \left(\frac{16-8}{4}\right)(R_{s-a} - 1) \quad (۲-۴)$$

که در این رابطه‌ها $V_{paste-filling-ability}$ (m^3) برابر حجم خمیر لازم برای بتن خود تراکم جهت حصول قابلیت پُرکنندگی، $V_{paste-spacing}$ (m^3) برابر حجم خمیر لازم برای پر کردن فضای بین میلگردها و $\%voids_{compacted-agg}$ درصد فضای خالی سنگدانه‌ها در حالت کوبیده شده با میله در آزمایش ASTM C29 می‌باشد.

مزایا و محدودیت‌های روش ارائه شده توسط موسسه ICAR به شرح زیر می‌باشد:

- ***مزایا:***

- در این روش ویژگی‌های سنگدانه مانند شکل و گردگوشه و یا تیزگوشه بودن مد نظر قرار گرفته است و در طرح مخلوط منظور شده است.
- دانه‌بندی سنگدانه‌ها هرچند بصورت مختصر، در این روش منظور گشته است.
- هم استفاده از بتن خود تراکم نوع پودری و هم نوع توصیه شده با اصلاح کننده گرانروی بیان شده است.
- با توجه به اینکه حجم خمیر کافی جهت ایجاد روانی محاسبه می‌شود لذا بتن خود تراکم ساخته شده دارای جریان اسلامپ کافی خواهد بود.

- ***محدودیت ها:***

- با وجود اینکه بیان شده که منحنی دانه‌بندی مخلوط سنگدانه‌ها بالای منحنی توان ۰/۴۵ باشد اما می‌توان ده‌ها منحنی با شرایط گفته شده تعیین نمود که اطلاعات اضافی در مورد اینکه برای شرایط خاص بتن‌ریزی یا عضو بتنی و پروژه کدام منحنی انتخاب شود بیان نشده است.
- درست است که حجم خمیر به نحوی تعیین می‌شود که کاملا روانی بتن خود تراکم تامین شود اما به همین دلیل که حجم خمیر در این روش بیشتر از روش‌های دیگر طرح مخلوط یا توصیه نامه‌های دیگر است، بنابراین مقدار سیمان و مواد پودری بیشتری استفاده می‌شود.
- پس از تعیین حجم خمیر، در ادامه روش صرفاً یک جدول جهت تعیین ترکیب خمیر ذکر گردیده و راهنمای خاصی در مورد حداقل و حداکثر سیمان یا انتخاب نسبت آب به سیمان طرح و ارتباط آن‌ها به مقاومت فشاری و دوام ذکر نگردیده است.

۴-۳ توصیه‌ها و روش‌های ارایه شده (در مقالات) توسط برخی از محققین

۴-۳-۱ روش مستدل طرح مخلوط

این روش که در واقع اولین توصیه‌های مربوط به طرح مخلوط بتن خود تراکم است در سال ۱۹۹۵ توسط Okamura و همکارش ارائه شده است. این راهنمایی‌ها شامل موارد زیر می‌باشد:

- مقدار سنگدانه درشت برابر ۵۰ درصد حجم جامدات، به صورت ثابت در نظر گرفته می‌شود.
- مقدار سنگدانه ریز برابر ۴۰ درصد حجم ملات، به صورت ثابت در نظر گرفته می‌شود.
- مقدار نسبت حجمی آب به پودر بین ۰/۹ تا ۱ فرض می‌شود.
- درصد فوق روان کننده و مقدار نهایی نسبت حجمی آب به پودر با توجه به خصوصیات خود تراکمی مورد نیاز، تعیین می‌شود.

محدودیت راهنمایی های ارائه شده در روش مستدل به شرح زیر می‌باشد:

- روش بصورت گام به گام نیست بلکه صرفا چند راهنمایی ارائه شده است.

مباحثی مانند اثر دانه‌بندی و مقاومت فشاری مورد نیاز و نسبت آب به سیمان و ترکیب خمیر در این راهنمایی ها مد نظر قرار نگرفته است.

۴-۳-۲ روش حداقل حجم خمیر سیمان

این روش توسط مرجع [70] ارائه شده است. اساس این روش یافتن نسبت بهینه درصد سنگدانه درشت دانه به کل سنگدانه است که در این نسبت مقدار حجم خمیر سیمان در بتن خود تراکم حداقل می‌شود. مراحل این روش به شرح زیر می باشد:

- ***گام اول: تعیین حداکثر حجم مجاز سنگدانه***

حداکثر حجم مجاز سنگدانه از رابطه (۴-۳) بدست می‌آید:

$$Vab\max = \frac{\rho_g + (\rho_s - \rho_g) * Nga}{\sum \frac{Pvgm * Nga * \rho_s}{Vabm} + \sum \frac{Pvsn * (1 - Nga) * \rho_g}{Vabn}} \qquad (۴-۳)$$

که در آن:

Vab_{max} (m^3) حداکثر حجم مجاز سنگدانه، ρ_g (kg/m^3) و ρ_s (kg/m^3) به ترتیب چگالی سنگدانه درشت و ریز ، Nga نسبت وزنی سنگدانه درشت به کل سنگدانه ،Pvgn نسبت حجمی سنگدانه درشت گروه m به کل سنگدانه درشت ، Pvsn نسبت حجمی سنگدانه ریز گروه n به کل سنگدانه ریز، Vabm (m^3) و Vabn(m^3) به ترتیب حجم مسدود شده در سنگدانه‌های درشت و ریز می باشد.

- ***گام دوم: تعیین متوسط فاصله بین سنگدانه‌ها***

متوسط فاصله سنگدانه‌ها از رابطه (۴-۴) بدست می‌آید:

$$Dss = Dav\left\{\sqrt[3]{1+\frac{Vpw - Void}{Vt - Vpw}} - 1\right\} \quad (۴-۴)$$

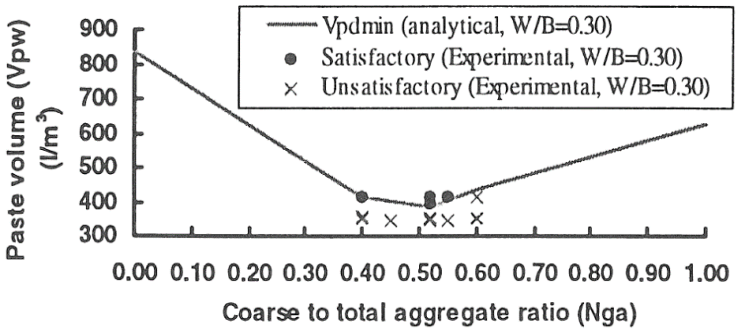
که در آن Dss(m) فاصله متوسط بین سنگدانه‌ها ،Vpw(m^3) حجم ملات، Void حجم حفرات بین سنگدانه‌های متراکم شده است،Vt(m^3) کل حجم بتن و Dav(m) قطر متوسط سنگدانه‌ها که Dav از رابطه (۴-۵) بدست می‌آید:

$$Dav = \frac{\sum Di * Mi}{\sum Mi} \quad (۴-۵)$$

که در این رابطه Di(m) متوسط اندازه سنگدانه قسمت i و Mi درصد جرمی سنگدانه‌های مانده بین الک بالایی و پایینی در قسمت i .

- ***گام سوم: تعیین حداقل حجم خمیر***

تعیین حداقل حجم خمیر نیز از شکل ۴-۱ بدست می‌آید



شکل ۴-۱ منحنی تعیین حداقل حجم خمیر در روش حداقل حجم خمیر سیمان

- ***مزایا:***

- روش بطور اصولی به رابطه بین دو فاز جداگانه در بتن خود تراکم ، یعنی فاز سنگدانه و فاز خمیر می پردازد و مفاهیمی همچون پوشش کافی خمیر دور سنگدانه، انسداد سنگدانه‌ها و عبور بتن خودتراکم از بین میلگردها مد نظر قرار می گیرد.
- مفهوم چگالی انباشتگی ذرات و دانه‌بندی و کاهش حجم خمیر با استفاده از تئوری چگالی انباشتگی مد نظر قرار گرفته است.

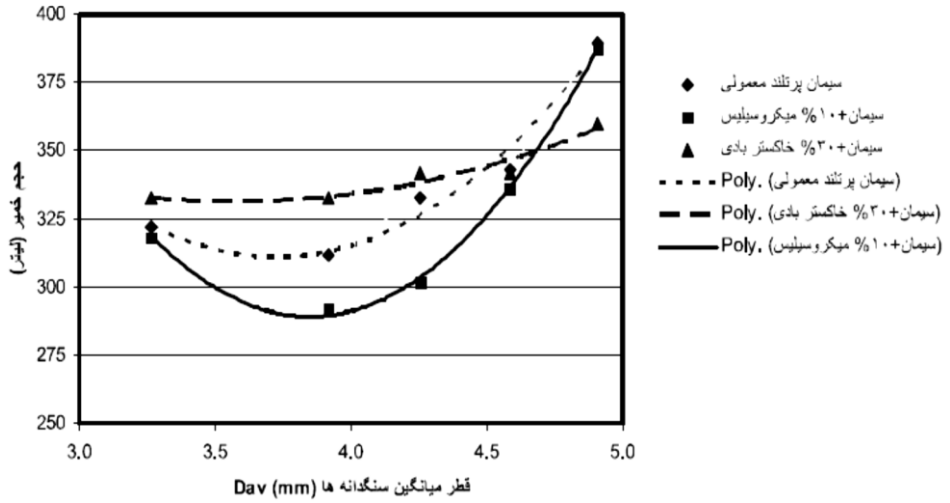
- ***محدودیت ها :***

- این روش قاعده‌مند نیست. به این معنی که مشخص نیست پارامترهایی مانند مقاومت فشاری طرح، نسبت آب به سیمان طرح، نسبت آب به پودر به چه میزان خواهند بود.
- روش بیشتر از حد انتظار و نیاز، به مفهوم فاصله بین ذرات سنگدانه و اثر آن در حجم خمیر پرداخته است. همچنین مشخص نیست که محدودیت‌ها برای فرض اولیه یعنی درصد اختلاط مصالح چقدر است، به عبارت دیگر محدودیت‌های منحنی دانه‌بندی مشخص نیست.

۴-۳-۳ روش ارائه شده قدوسی و همکاران [81]

در این روش بر اساس نظریه Bui و همکارانش، روش طرح مخلوطی ارائه داده‌اند که با استفاده از آن به علت استفاده حجم بهینه خمیر سیمان، مخلوط حاصله از نظر اقتصادی و برخی خواص دوامی نیز خصوصیات بهتری نسبت به مخلوط های حاصل از سایر روش‌های طرح مخلوط بتن خودتراکم دارد.

در این روش پس از تعیین نسبت سنگدانه‌های مختلف، قطر متوسط سنگدانه‌ها محاسبه می‌شود. پس از آن ترکیب خمیر سیمان بر اساس مقاومت و دوام مشخص می‌شود. در این مرحله خمیر سیمان به صورت تدریجی به حجم ثابتی از سنگدانه‌ها افزوده می‌شود تا خصوصیات بتن تازه بدست آید. در پایان نیز پس از تعیین مقادیر و حجم اجزای مختلف بتن، نسبت های اختلاط برای ساخت یک متر مکعب بتن محاسبه می‌شود. نتایج این مطالعه در شکل ۴-۲ ارائه شده است. در این نمودار میزان حداقل خمیر سیمان لازم بر مبنای قطر میانگین سنگدانه‌ها و ترکیب اجزای تشکیل دهنده خمیر سیمان نشان داده شده است.



شکل ۴-۲ حداقل حجم خمیر سیمان لازم

۴-۳-۴ روش ارائه شده Su و همکاران

- ***گام اول: محاسبه مقدار سنگدانه درشت و ریز***

مقادیر سنگدانه درشت و ریز از رابطه (۴-۶) و (۴-۷) بدست می‌آید:

$$W_g = PF \times W_{gl}(1-\frac{s}{a}) \quad (۶-۴)$$

$$W_s = PF \times W_{sl} \times \frac{s}{a} \quad (۷-۴)$$

که در این دو رابطه W_g (kg) و W_s (kg) به ترتیب وزن سنگدانه درشت و ریز ، $W_{gl}(^{kg}/_{m^3})$ و$W_{sl}(^{kg}/_{m^3})$ به ترتیب جرم حجمی سنگدانه‌های ریز و درشت اشباع با سطح خشک در حالت غیر متراکم، $\frac{s}{a}$ نسبت حجمی سنگدانه ریز به کل سنگدانه‌ها که این نسبت عددی بین ۵۰ تا ۵۷ درصد می‌باشد، PF فاکتور انباشتگی که به صورت نسبت جرمی سنگدانه‌های متراکم شده در بتن خود تراکم به سنگدانه‌های غیر متراکم می باشد.

- ***گام دوم: محاسبه مقدار سیمان***

مقدار سیمان از رابطه (۴-۸) بدست می‌آید:

$$C = \frac{f_c^{'}}{20} \quad (۸-۴)$$

که در این رابطه C (kg) مقدار سیمان و $f_c^{'}$ (psi) مقاومت فشاری مورد نیاز بتن خود تراکم در پروژه است.

- ***گام سوم: محاسبه مقدار آب آزاد***

مقدار آب آزاد از رابطه (۴-۹) بدست می‌آید:

$$W_{wc} = (\frac{W}{C})C \quad (۹-۴)$$

که در این رابطه $\frac{w}{c}$ نسبت وزنی آب به سیمان ، W_{wc} مقدار آب آزاد می باشد.

- ***گام چهارم: محاسبه مقدار خاکستر بادی و سرباره***

مقدار خاکستر بادی و سرباره از رابطه (۴-۱۲) و (۴-۱۳) بدست می‌آید:

$$V_{Pf} + V_{PB} = 1 - \frac{W_g}{1000 \times G_g} - \frac{W_s}{1000 \times G_s} - \frac{C}{1000 \times G_c} - \frac{W_{wc}}{1000 \times G_w} - V_a \quad (۱۰-۴)$$

$$V_{Pf} + V_{PB} = \left(1 + \frac{W}{F}\right) \times A\% \times \frac{W_{pm}}{1000 \times G_f} + \left(1 + \frac{W}{S}\right) \times B\% \times \frac{W_{pm}}{1000 \times G_B} \quad (۱۱-۴)$$

$$W_f = A\% \times W_{pm} \quad (۱۲-۴)$$

$$W_B = B\% \times W_{pm} \quad (۱۳-۴)$$

که در این رابطه‌ها $V_{Pf}(m^3)$برابر مقدار حجمی خاکستر بادی و $V_{PB}(m^3)$برابر مقدار سرباره، G_g و G_s و G_c و G_w به ترتیب برابر چگالی سنگدانه درشت، سنگدانه ریز، سیمان، آب و V_a درصد مقدار هوا در بتن خود تراکم می‌باشد، $W_{pm}(kg)$مقدار کل مواد پوزولانی استفاده شده در بتن خود تراکم، A , B به ترتیب برابر درصد وزنی استفاده از خاکستر بادی و سرباره در بتن و G_f و G_B به ترتیب برابر چگالی خاکستر بادی و سرباره می‌باشد و W_f (kg) وزن خاکستر بادی و W_B (kg) وزن سرباره می باشد.

- ***گام پنجم: محاسبه مقدار آب مخلوط***

آب اختلاط از رابطه (۴-۱۶) حاصل می‌شود:

$$W_{Wf} = \left(\frac{W}{F}\right) W_f \quad (۱۴-۴)$$

$$W_{wB} = \left(\frac{W}{S}\right) W_B \quad (۱۵-۴)$$

$$W_w = W_{wc} + W_{wf} + W_{wB} \quad (۱۶-۴)$$

که در این رابطه ها $\frac{W}{F}$ و $\frac{W}{S}$ به ترتیب نسبت وزنی آب به خاکستر بادی و سرباره، (kg) W_{wf} آب لازم برای خاکستر بادی، (kg) W_{wB} آب لازم برای سرباره، و (kg) W_w کل آب اختلاط می باشد.

- ***گام ششم: محاسبه مقدار و درصد فوق روان کننده مورد نیاز***

مقدار و درصد فوق روان کننده مورد نیاز از رابطه (۴-۱۷) بدست می‌آید:

$$W_{sp} = n\%(C + W_f + W_B) \quad (۱۷-۴)$$

که در این رابطه n درصد استفاده از فوق روان کننده ،(kg) W_{Wsp} مقدار فوق روان کننده مصرفی می‌باشد.

مزایا و محدودیت‌های روش ارائه شده توسط SU و همکاران به شرح زیر می‌باشد.

- ***مزایا:***

- این روش مفهوم واقعی چگالی انباشتگی ذرات در بتن خود تراکم را با فاکتور PF اعمال نموده است و مقدار سیمان به طور غیرمستقیم وابسته به این فاکتور است. با افزایش این فاکتور و استفاده از دانه‌بندی‌های بهتر و کاهش فضای خالی، مقدار سیمان کاهش خواهد یافت که مزیت بزرگی می‌باشد.

- ***محدودیت ها:***

- نحوه محاسبه فاکتور انباشتگی (PF) دارای ابهام است و خود نویسنگان مقاله هم مقدار این فاکتور را فرض نموده‌اند. بنابراین مشخص نیست که مقدار فرض شده در مقاله با مقدار واقعی که در بتن رخ می‌دهد یکسان باشد.
- محاسبه مقدار سیمان با فرض اینکه هر کیلوگرم سیمان مقاومت ۰/۱۴ مگاپاسکال تولید می‌نماید انجام می‌شود. خود نویسندگان مقاله هم ذکر نموده‌اند که این عدد صرفا برای مناطق ژاپن و تایوان می‌باشد و عمومی نیست. همچنین نوع و مقاومت سیمان نیز مشخص نشده است.
- مباحث مرتبط با دانه‌بندی و حداقل و حداکثر پودر و حجم خمیر و مواد پرکننده در بتن خود تراکم مورد نگرش قرار نگرفته است.

۴-۳-۵ روش ارائه شده توسط Shen و همکاران

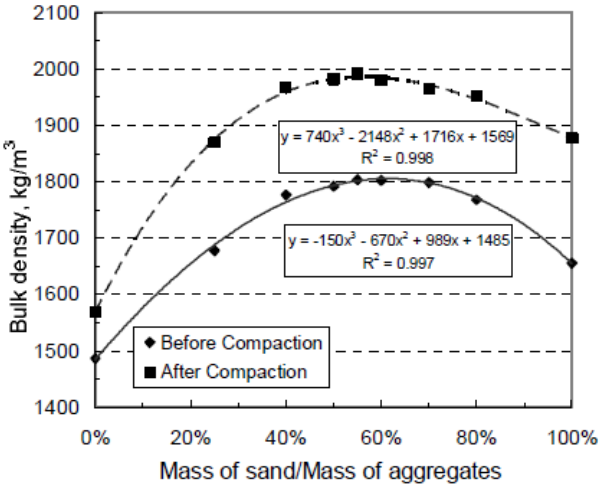
این روش توسط محققین مرجع [77] ارائه شده است. مراحل گام به گام آن به شرح زیر می باشد.

- ***گام اول: تعیین مقدار سنگدانه‌ها***

$$\frac{\rho_s V_s}{\rho_g V_g + \rho_s V_s} = R_{S/A} \quad (۱۸-۴)$$

$$V_s + V_g = 1 \quad (۱۹-۴)$$

$R_{S/A}$ نسبت جرمی بهینه سنگدانه‌های ریز به کل سنگدانه‌هاست که با رسم منحنی درصدهای مختلف سنگدانه ریز به کل سنگدانه‌ها و محاسبه چگالی توده‌ای بدست می‌آید.



شکل ۴-۳ منحنی نسبت ماسه به کل سنگدانه به چگالی توده‌ای

- ***گام دوم: تعیین حجم خمیر***

حجم خمیر از رابطه (۴-۲۰) بدست می‌آید:

$$V_p = 1 - \left(M_a / 1000 d_a\right) \quad (۲۰-۴)$$

(۲۱-۴)

$$M_a = PF\left(\rho_s V_s + \rho_g V_g\right)$$

که در این رابطه ها(V_P (m^3 برابر حجم خمیر، m_a (kg) برابر وزن کل سنگدانه‌ها، da(kg/m^3) برابر چگالی سنگدانه‌ها، pf فاکتور انباشتگی ذرات می باشد.

- ***گام سوم: تعیین ترکیب خمیر***

$$V_c = C / 1000 d_c \quad (۲۲-۴)$$

$$V_L = L / 1000 d_L \quad (۲۳-۴)$$

که در این رابطه ها(V_C (m^3) حجم سیمان،(d_c (kg/m^3) چگالی سیمان،(V_L (m^3) حجم پودر سنگ و(d_l (kg/m^3) چگالی پودرسنگ و(L (kg) وزن پودر سنگ می‌باشند.

مزایا و محدودیت‌های روش مذکور بصورت زیر بیان می‌شود:

- ***مزایا:***

- اثر چگالی انباشتگی و فضای خالی بین سنگدانه‌ها در طرح مخلوط در نظر گرفته شده است.
- به ارتباط مقاومت فشاری با نسبت آب به پودر نگریسته شده است.

- ***محدودیت ها:***

- بعضی از روابط کاملا تجربی است و برای همه مواد و مصالح عمومیت ندارد و باید برای هر کشور و مصالح و خصوصیات آن تعیین شود.
- در صورتی که از افزودنی اصلاح کننده گرانروی استفاده شود اثر آن در نظر گرفته نشده است.
- روش بصورت قاعده‌مند نیست.

۴-۳-۶ روش مطرح شده توسط Santhanam و همکاران

این روش توسط محققین مرجع [76] ارائه شده است. شرح گام به گام روش مذکور به شرح زیر است:

- ***گام اول: انتخاب ترکیب سنگدانه‌ها***

ترکیب سنگدانه‌ها بوسیله رابطه (۴-۲۴) تعیین می‌گردد:

$$C_u = D_{60}/D_{10} \qquad (۲۴-۴)$$

که در این رابطه C_u ضریب یکنواختی دانه‌بندی،(D_{60} (mm و D_{10} به ترتیب قطری هستند که ۶۰ و ۱۰ درصد ذرات ریزتر از آن‌ها هستند.

- ***گام دوم: انتخاب فضای خالی بین سنگدانه‌ها***

فضای خالی بین سنگدانه‌ها از رابطه (۴-۲۶) بدست می‌آید:

$$\text{چگالی انباشتگی} = \left(\left(M_1/S_1\right)+\left(M_2/S_2\right)+\left(M_3/S_3\right)\right)/V_c \qquad (۲۵-۴)$$

$$\text{حجم فضای خالی} = ۱ - \text{چگالی انباشتگی} \qquad (۲۶-۴)$$

که در این رابطه ها $M_1(kg)$ ، M_2 و M_3 به ترتیب جرم هر نوع از سنگدانه‌ها (ریز و درشت)، S_1 (kg/m3)، S_2 و S_3 برابر چگالی متناظر با هرکدام از نوع سنگدانه‌ها هستند.

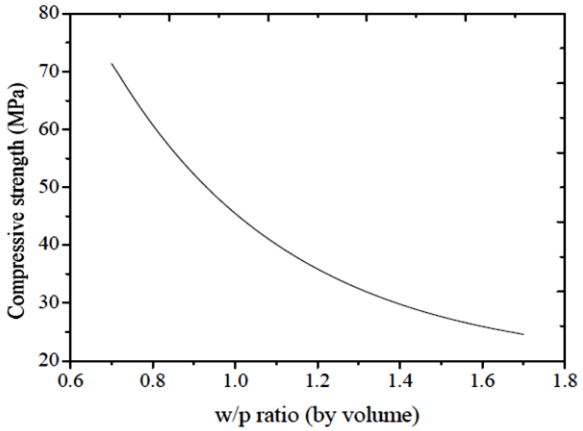
- ***گام سوم: تعیین حجم خمیر و حجم سنگدانه‌ها***

حجم خمیر از رابطه (۴-۲۷) حاصل می‌گردد:

حجم خمیر = حجم فضای خالی)+ جریان اسلامپ مورد نیاز (-۳۲۱) =۴/۰۶۸ (۴-۲۷)

- ***گام چهارم: تعیین نسبت حجمی آب به پودر***

نسبت حجمی آب به پودر با داشتن مقاومت فشاری از شکل ۴-۴ بدست می‌آید:



شکل ۴-۴ منحنی نسبت حجمی آب به پودر با داشتن مقاومت فشاری در روش Santhanam و همکاران

- ***گام پنجم: تعیین حجم پودر و حجم آب***

حجم پودر و حجم آب از رابطه (۴-۲۸) تعیین می‌گردد:

حجم پودر + حجم آب + حجم هوا = حجم خمیر (۴-۲۸)

- ***گام ششم: تعیین ترکیب پودر***

در این مرحله ترکیب پودر با استفاده از روش مطرح شده توسط puntke بدست می آید.

- ***گام هفتم: تعیین فوق روان کننده بهینه***

با استفاده از آزمایش شناخته شده mini-slump و درصد های مختلف فوق روان کننده در w/p و ترکیب پودر مشخص، جریان اسلامپی که آب انداختگی در آن مشاهده نمی‌شود تعیین و درصد فوق روان کننده متناظر محاسبه می‌شود.

- ***گام هشتم: تعیین مقدار بهینه VMA***

آزمایش پایداری در مقابل جداشدگی با الک کردن مخلوط بتن انجام شده و در صورتی که درجه جداشدگی بیشتر از ۱۵ درصد باشد استفاده از VMA توصیه می‌شود. جهت تعیین مقدار بهینه لازم VMA در طرح از روش ارائه شده marble استفاده می‌شود.

- ***گام نهم: ارزیابی انسداد مخلوط***

در این مرحله با استفاده از آزمایش J-Ring انسداد (بلوکه شدن) مخلوط بتن خود تراکم مورد ارزیابی قرار می گیرد. اساس کار به این صورت است که اگر تفاوت مقدار جریان اسلامپ قبل از آزمایش J-Ring و پس از آزمایش J-Ring بیشتر از ۵۰ میلی‌متر باشد باید به علت انسداد مخلوط بتن خود تراکم تغییراتی را در طرح مخلوط در نظر گرفت. این تغییرات می‌تواند کاهش حداکثر اندازه سنگدانه و افزایش حجم خمیر به میزان ۱۰ تا ۲۰ لیتر باشد.

مزایا و محدودیت های این روش به شرح زیر است:

- ***مزایا:***

- روش بصورت کاملا قاعده‌مند و گام به گام می‌باشد و همه مجهولات و اجزاء مورد نیاز بتن خود تراکم در این گام‌ها تعیین می‌شوند.
- بحث ارتباط مقاومت فشاری هدف طرح، جریان اسلامپ هدف و حتی فضای خالی بین سنگدانه‌ها (ارتباط مستقیم با چگالی انباشتگی) بخوبی در طرح در نظر گرفته شده است.
- دانه‌بندی سنگدانه‌ها با مطرح شدن ضریب یکنواختی (Cu) در طرح بخوبی در نظر گرفته شده است.
- وجود یا عدم وجود ماده اصلاح کننده گرانروی در طرح مخلوط بتن خود تراکم در نظر گرفته شده است.

- ***محدودیت ها:***

- نمودار مربوط به ارتباط مقاومت فشاری و نسبت آب به پودر با توجه به مصالح منطقه حضور مولفین بدست آمده است و باید برای منطقه‌ای که قرار است بتن خود تراکم در آن ساخته شود جداگانه رسم شود.
- توضیح خاصی از بعضی از روش‌های آزمایشی (مثلا آزمایش marble یا puntke) ارائه نشده است.
- رابطه‌هایی که جهت تعیین حجم خمیر با توجه به جریان اسلامپ هدف پروژه ارائه شده است مشخص نیست که همیشه صدق کند، و عمومیت ندارد.
- محدوده قابل قبول هر کدام از اجزاء مشخص نیست. برای مثال به حداقل و حداکثر حجم خمیر یا نسبت آب به سیمان و ... اشاره نشده است.

۴-۳-۷ روش ارائه شده توسط Ghazi و همکاران

این روش توسط محققین مرجع [78] ارائه شده است و تنها روشی است که بر پایه تعیین مقاومت فشاری و مرحله به مرحله پس از تعیین مقاومت، اجزاء بتن SCC را تعیین می‌کند. مراحل گام به گام این روش به شرح زیر است :

- ***گام اول: انتخاب حداکثر آب آزاد و مقدار هوا***

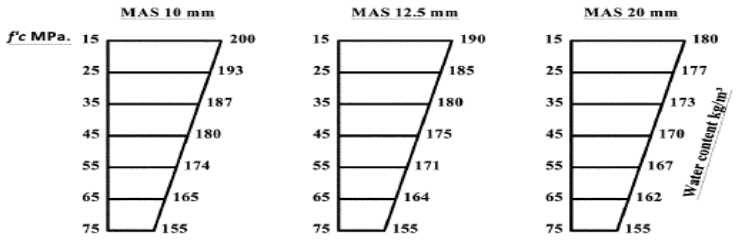
از طریق جدول ۴-۷ و با داشتن حداکثر اندازه سنگدانه مقادیر حداکثر آب آزاد و مقدار هوا بدست می‌آید:

جدول ۴-۷ مقادیر حداکثر آب آزاد و مقدار هوا در روش Ghazi و همکاران

پارامتر	حداکثر اندازه سنگدانه (میلی‌متر)		
	۹/۵	۱۲/۵	۱۹
مقدار آب (کیلوگرم در متر مکعب)	۲۲۸	۲۱۶	۲۰۵
مقدار درصد هوا	۳	۲/۵	۲

- ***گام دوم : تعیین مقدار آب آزاد و نسبت آب به سیمان***

مقدار آب آزاد بر اساس حداکثر اندازه سنگدانه و مقاومت فشاری مورد نیاز از طریق شکل ۴-۵ و نسبت آب به سیمان نیز از جدول ۴-۸ بدست می‌آید:



شکل ۴-۵ نمودار بدست آوردن آب آزاد در روش Ghazi و همکاران

جدول ۴-۸ نسبت آب به سیمان از روی مقاومت فشاری در روش Ghazi و همکاران

مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵	۵۰	۵۵	۶۰	۶۵	۷۰	۷۵
W/C	۰/۸	۰/۷	۰/۶۲	۰/۵۵	۰/۴۸	۰/۴۳	۰/۳۸	۰/۳۵	۰/۳۴	۰/۳۳	۰/۳۲	۰/۳۱	۰/۲۹

- ***گام سوم: محاسبه مقدار وزنی و حجمی سیمان***

مقدار وزنی سیمان از رابطه (۴-۲۹) و مقدار حجمی سیمان از رابطه (۴-۳۰) بدست می‌آید:

$$W_c = \frac{W_w}{W/C} \quad (۲۹-۴)$$

(۳۰-۴)

$$V_c = \frac{W_c}{SGG_c \times 1000}$$

که در این روابط SGG برابر چگالی متناظر با هر یک از اجزاء می باشد.

- ***گام چهارم: تعیین حجم و وزن شن خشک***

مقدار حجم خشک میله خورده شن بر حسب مدول نرمی و حداکثر اندازه سنگدانه درشت از جدول ۴-۹ تعیین می‌شود. سپس مقدار وزن شن تعیین می‌شود.

جدول ۴-۹ تعیین مقدار حجم شن خشک متراکم شده با میله در روش Ghazi و همکاران

حداکثر اندازه سنگدانه (میلی‌متر)	مدول نرمی (FM)			
	۲/۴	۲/۶	۲/۸	۳
۹/۵	۰/۵	۰/۴۸	۰/۴۶	۰/۴۴
۱۲/۵	۰/۵۹	۰/۵۷	۰/۵۵	۰/۵۳
۱۹	۰/۶۶	۰/۶۴	۰/۶۲	۰/۶۰

- ***گام پنجم: تعیین نسبت آب به پودر (مجموع سیمان و مواد سیمانی و پودر سنگ)***

این پارامتر از جدول ۴-۱۰ تعیین می‌گردد.

جدول ۴-۱۰ تعیین نسبت حجمی آب به پودر (مجموع سیمان و مواد سیمانی و پودر سنگ) در روش Ghazi و همکاران

مقاومت فشاری (مگا پاسکال)	$(V_w/(V_c+V_l)$
۱۵	۱/۱
۲۵	۱/۰۵
۳۵	۱
۴۵	۰/۹۵
۵۵	۰/۹
۶۵	۰/۸۵
۷۵	۰/۸

- ***گام ششم: تعیین وزن پودر سنگ آهک***

وزن پودر سنگ آهک از رابطه (۴-۳۱) بدست می‌آید:

$$W_L = V_L \times SGGL \quad (۳۱-۴)$$

- ***گام هفتم: محاسبه مقدار سنگدانه ریز به روش حجم مطلق***

مقدار سنگدانه ریز از رابطه (۴-۳۲) بدست می‌آید:

$$1m^3 = \frac{W_w}{SGG_w \times 1000} + \frac{W_c}{SGG_c \times 1000} + \frac{W_L}{SGG_L \times 1000} + \frac{W_s}{SGG_s \times 1000} + \frac{W_g}{SGG_g \times 1000} + a\% \quad (۳۲-۴)$$

روش مطرح شده در این مقاله دارای مزایا و محدویت هایی به شرح زیر است:

- ***مزایا:***

– این روش تنها روشی است که از ابتدا و گام به گام بر اساس مقاومت فشاری مورد نیاز بتن پیش‌رفته و مجهولات تعیین می‌شوند.
– مقادیر و محدوده های ارائه شده در محدوده راهنمای معتبر EFNARC قرار دارند.

- ***محدودیت ها:***

– رابطه‌ای که دانه‌بندی مخلوط سنگدانه را منظور کرده باشد به شکل جدی مطرح نشده است. فقط در یک قسمت مدول نرمی سنگدانه ریز در نظر گرفته شده است.
– استفاده از افزودنی اصلاح کننده گرانروی و اثر آن در طرح مخلوط در نظر گرفته نشده است.
– اثر و ارتباط مقدار جریان اسلامپ و یا آزمایش‌های دیگر کارایی در طرح مخلوط دیده نشده است.
– اثر نوع سیمان و شکل سنگدانه‌ها در محاسبه نسبت آب به سیمان منظور نشده است.

فصل ۵

معیارهای انتخاب کارایی و رئولوژی بتن خودتراکم

فصل پنجم

معیارهای انتخاب کارایی و رئولوژی بتن خودتراکم

۵-۱ کلیات

علم رفتارشناسی تغییر شکل و جریان مواد را رئولوژی می‌نامند. در مقایسه با بتن معمولی، تنش جاری‌شدن بتن خودتراکم در حد قابل توجهی کمتر است تا اجازه دهد که بتن تحت وزن خود جریان یابد. اگر گرانروی خمیری بتن زیاد باشد، بتن چسبنده می‌شود و بتن‌ریزی و پمپاژ سخت می‌گردد و چنان‌چه گرانروی خمیری، کم باشد، بتن مستعد جداشدگی می‌شود. علت اصلی تمایز بتن خودتراکم از سایر بتن‌ها، کارایی زیاد آن است. کارایی مفهومی پیچیده‌ای است و تعاریف گوناگونی از آن در استانداردهای مختلف ارائه شده است.

انجمن بتن آمریکا (ACI)[۱] کارایی را خاصیتی از بتن تازه معرفی می‌کند که تعیین کننده میزان سهولت و یکنواختی مخلوط هنگام اختلاط، جایدهی و در هنگام بتن‌ریزی می‌باشد [39].

مؤسسه استاندارد انگلستان (BS)[۲] کارایی را خاصیتی از بتن تازه، ملات یا مشابه آن می‌داند که بیانگر سهولت و امکان تراکم کامل آن است [42].

انجمن مهندسان ژاپن (JSCE)[۳] کارایی را به صورت خاصیتی از بتن تازه یا ملات تعریف نموده است که بیانگر سهولت اختلاط، جایدهی و تراکم یا حفظ روانی و مقاومت در برابر جدا شدگی است [54].

بتن خودتراکم کارا، بتنی است که قابلیت جریان تحت وزن خود و عبور از میان میلگردها و دست‌یابی به تراکم کامل را دارا می‌باشد [26 و28].

کارایی بتن خود تراکم توسط پارامترهای زیر و مطابق جدول ۵-۱ بیان می‌گردد،:

- قابلیت عبور
- قابلیت پرکنندگی
- پایداری

۱. American Concrete Institute
۲. British Standards
۳. Japan Society of Civil Engineering

جدول ۵-۱ کارایی بتن خودتراکم

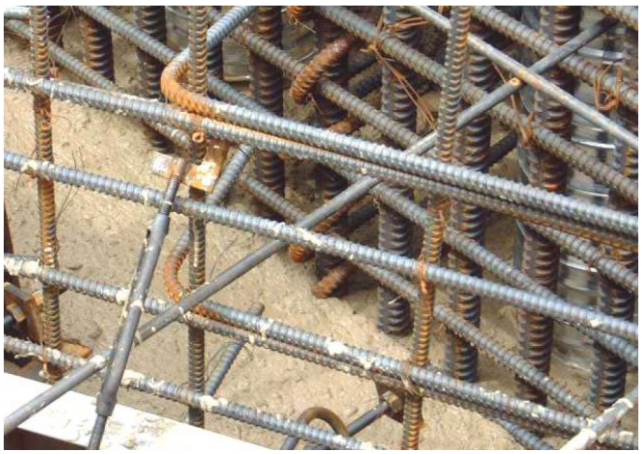
	تعاریف	مشخصات و وضعیت اجرایی
قابلیت پُر کردن	توانایی جریان بتن تحت وزن خود و پُر کردن زوایای مختلف قالب	توانایی پُر کردن اعضایی با فضای محدود (مانند: اعضایی با عرض یا ضخامت کم و یا با تراکم زیاد میلگرد) و مواردی که بتن باید بصورت افقی مسافت زیادی را طی کند.
قابلیت عبور	توانایی جاری شدن بتن در شرایط محدود مانند فضاهای باریک بین میلگردهای متراکم	توانایی کاربرد برای قطعاتی بدون میلگرد یا میلگرد کم و بدون نیاز با الزامات عبور تا قطعاتی با عرض کم و حجم زیاد میلگرد و الزامات ویژه برای عبور
مقاومت در برابر جداشدگی (پایداری)	توانایی حفظ انسجام و یکنواختی بتن در طی مراحل ریختن تا سخت شدن	تمام مخلوط‌ها باید مقاومت در برابر جداشدگی داشته باشند. الزامات مورد نیاز برای پایداری دینامیکی ممکن است برای قطعاتی با تراکم خیلی زیاد میلگرد، شرایطی که بتن تحت لرزش و ویبره قرار دارند، یا در شرایطی که بتن از ارتفاعی ریخته شده یا فاصله زیادی را بصورت افقی طی کند، سخت‌گیرانه‌تر باشد.

هر یک از این سه مشخصه کارایی، باید بصورت مستقل مورد ارزیابی قرار گیرد. این‌که بتن خودتراکم تا چه حد باید قابلیت پرکنندگی، قابلیت عبور و مقاومت در برابر جداشدگی داشته باشد بسیار متغیر و به شدت وابسته به نوع کاربرد است. برای انتخاب مشخصات کارایی، مهم است که پارامترهای مورد نظر در طراحی به همراه رواداری‌های قابل قبول در ساخت تعیین شود.

افزایش قابلیت پُر کنندگی و عبور و همچنین مقاومت در برابر جداشدگی، معمولاً با افزایش هزینه‌ها همراه است. علاوه بر این معمولاً با افزایش قابلیت پرکنندگی، استعداد جداشدگی نیز افزایش می‌یابد. در ادامه قابلیت‌های اصلی بتن خودتراکم مورد بررسی قرار گرفته است.

۵-۱-۱ قابلیت عبور

قابلیت عبور، قابلیتی است که بتن خودتراکم می‌تواند تحت اثر وزن خود جریان یابد و در برخورد با تراکم میلگرد، بدون بروز پدیده انسداد عبور کند. عوامل تأثیرگذار بر قابلیت عبور: تنش تسلیم و گرانروی می‌باشند. تنش تسلیم حداکثر تنشی است که باید به بتن وارد شود تا در آستانه جاری شدن قرار بگیرد و گرانروی عامل مقاومت کننده در برابر جریان است (شکل ۵-۱).



شکل ۵-۱ قابلیت عبور و پر کنندگی SCC در مقطعی با حجم زیاد میلگرد

۵-۱-۲ قابلیت پُر کنندگی

قابلیتی است که بتن خودتراکم می‌تواند تحت اثر وزن خود و با وجود تراکم زیاد میلگرد تمام سطح قالب را پر کند و سطحی، هم تراز با افق بسازد. قابلیت پر کنندگی تحت اثر اصطکاک بین ذرات تشکیل‌دهنده بتن قرار دارد و هرچه اصطکاک کمتر باشد، قابلیت پرکنندگی بیشتر خواهد بود.

۵-۱-۳ پایداری

منظور از پایداری بتن تازه، توانایی حفظ همگنی بتن و مقاومت در برابر جداشدن هر یک از اجزای تشکیل دهنده آن، در تمام مدت جاری شدن و گیرش بتن، می‌باشد. بنابراین، در صورتی بتن تازه، پایدار نامیده می‌شود که کلیه اجزای تشکیل دهنده آن، توزیع کاملاً یکنواخت داشته باشند. به طور کلی، پایداری بتن، به دو دسته پایداری دینامیکی و پایداری استاتیکی تقسیم می‌شود. پایداری دینامیکی، به معنای مقاومت بتن در برابر جداشدن اجزای تشکیل‌دهنده آن، در حین اختلاط، حمل و نقل، بتن‌ریزی و پر کردن قالب‌ها می‌باشد. پایداری استاتیکی، به معنی مقاومت بتن در برابر جداشدگی اجزای بتن در هنگام سکون می‌باشد.

۵-۲ انواع ناپایداری بتن خودتراکم

همان‌طور که گفته شد هرگونه ناهمگنی در توزیع مصالح تشکیل دهنده بتن، از زمان اختلاط تا زمان سخت شدن بتن، یک نوع ناپایداری محسوب می‌شود. ناپایداری ممکن است در بتن معمولی نیز رخ دهد، اما، بتن خودتراکم به دلیل روانی

بسیار زیاد، بیشتر از بتن معمولی در معرض انواع ناپایداری قرار دارد. ناپایداری به شکل‌های مختلفی مانند آب‌انداختگی[۱]، انسداد جریان[۲]، جدا شدگی اجزا[۳] و ته‌نشینی ذرات[۴] ممکن است در بتن خودتراکم تازه اتفاق بیفتد. علل وقوع این ناپایداری ها بسیار زیاد است. از خصوصیات مصالح خام تشکیل دهنده بتن و طرح مخلوط بتن، تا نحوه قرارگیری میلگرد، ارتفاع بتن‌ریزی و فشار پمپ کردن، همه می‌توانند از علل بروز ناپایداری به شمار آیند. در ادامه درباره هر یک از انواع ناپایداری در بتن خودتراکم، علل وقوع و مشکلات ناشی از هر یک از آن‌ها، توضیح داده خواهد شد.

۵-۲-۱ آب انداختگی

آب انداختگی، یا جداشدن آب از مخلوط بتنی و حرکت آن در داخل بتن، یکی از انواع ناهمگنی و ناپایداری در بتن تازه محسوب می‌شود. این نوع ناپایداری، به دلیل کم بودن چگالی آب در مقایسه با سایر مصالح تشکیل دهنده بتن به وجود می‌آید و سرعت آن در ابتدا زیاد است، اما به مرور زمان، کاهش می‌یابد و به تدریج، متوقف می‌شود.

۵-۲-۲ انسداد

یکی از انواع ناپایداری دینامیکی بتن، انسداد یا قفل شدن جریان می‌باشد. انسداد در شرایطی به وجود می‌آید که سنگدانه‌های درشت به صورت موضعی در یک محل (به عنوان مثال در محل تراکم میلگردها یا مقاطع باریک) جمع می شوند و از عبور جریان، جلوگیری می‌کنند. علت اصلی این نوع ناپایداری، عدم وجود چسبندگی کافی بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها می‌باشد که منجر به جدا شدن موضعی سنگدانه‌ها در حین عبور از فواصل محدود، تجمع موضعی آن‌ها در پشت موانع و در نتیجه، قفل شدن جریان می‌شود.

۵-۲-۳ جدا شدگی

جداشدگی، به جداشدن سنگدانه‌های درشت از ملات، در طول حمل و نقل، بتن‌ریزی، و یا در زمان گیرش بتن‌تازه گفته می‌شود. جدا شدگی، عموماً در اثر تفاوت در چگالی مصالح تشکیل دهنده بتن و گرانروی نسبتاً کم ملات، اتفاق می‌افتد و احتمال وقوع آن در بتن خودتراکم، به دلیل روانی زیاد این نوع بتن، بسیار زیاد است.

جداشدگی در بتن، به دو دسته جداشدگی دینامیکی و جداشدگی استاتیکی تقسیم می‌شود. جداشدگی دینامیکی به حالتی گفته می‌شود که سنگدانه‌ها، در حین حرکت جدا می‌شوند. این نوع جداشدگی، عموماً، به صورت یک لایه خمیر یا ملات

---

۱. Bleeding
۲. Blockage
۳. Segregation
۴. Settlement

در مسیر جریان بتن مشاهده می‌شود. نمونه دیگری از جداشدگی، جداشدگی استاتیکی می‌باشد که عبارت است از جداشدن سنگدانه‌های درشت، تحت اثر نیروی وزن خود، هنگامی که بتن در حالت سکون قرار دارد. در اثر این نوع جداشدگی، سنگدانه‌های درشت در پایین قالب جمع می‌شود و لایه‌ای از ملات در بالای آن، قرار می‌گیرد.

۵-۲-۴ ته نشینی (نشست)

یکی از انواع ناپایداری بتن خودتراکم، مربوط به شرایطی است که در آن، سنگدانه‌ها تمایل دارند در قسمت پایین قالب رسوب کنند. این امر، منجر به نوعی ناهمگنی در بتن می‌شود که به آن، ته نشینی می‌گویند. همان‌طور که از این تعریف مشخص است، ته نشینی سنگدانه‌ها، در واقع نوع خاصی از جداشدگی سنگدانه‌ها می‌باشد. به همین دلیل، در برخی از مراجع، ته‌نشینی معادل جداشدگی در نظر گرفته شده است.

۵-۳ ارتباط نتایج آزمایش‌های بتن تازه با شکل عضو و مشخصات عضو

آزمایش‌های متعددی برای ارزیابی کارایی بتن خودتراکم وجود دارند. آزمایش‌های جعبه L ، جعبه U و قیف V علاوه بر اندازه‌گیری قابلیت پُرکنندگی قادر به اندازه‌گیری مقاومت بتن در برابر جدا شدگی نیز می‌باشند. به منظور دستیابی به خواص رئولوژی مناسب بتن خودتراکم در حالت تازه، محدوده‌های قابل‌قبولی برای آزمایش‌های کارایی بتن تعریف شده‌اند که در جدول ۵-۲ نشان داده شده است.

همان‌گونه که در جدول ۵-۲ مشاهده می‌شود، آزمایش‌های کارپذیری بتن تازه خودتراکم و مقادیر قابل قبول آن‌ها که در مراجع مختلف از جمله آیین‌نامه بتن ایران، EFNARC، انستیتو بتن پیش تنیده، Rilem، انجمن بتن سوئد و انجمن مهندسین عمران ژاپن آمده است، نشان داده شده است. همان‌گونه که نشان داده شده است، به منظور بررسی هر کدام از خواص بتن تازه خودتراکم چندین آزمایش مختلف نشان داده شده است.

آزمایش‌های پیشنهاد شده و مقادیر مجاز ذکر شده معمولاً به صورت ترکیبی و برای بتن‌های خودتراکم مختلف استفاده می‌شوند. برای مثال مطابق انجمن بتن سوئد و انجمن تحقیقات بتن و سیمان سوئد، بتن خودتراکمی که برای سازه‌های مهندسی عمران استفاده می‌شود باید دارای جریان اسلامپ بین ۶۵ تا ۷۵ سانتی‌متر، T_{500} (T_{50}) بین ۳ تا ۷ ثانیه و همچنین نتیجه آزمایش جعبه L شکل بیشتر از ۰/۸ باشد.

محدوده‌های مجاز و قابل قبول که در جدول ۵-۲ نشان داده شده‌اند، بستگی زیادی به شرایط بتن‌ریزی، میزان تراکم میلگردها و نوع قطعه دارند. در واقع با تغییر این شرایط، محدوده‌های مناسب آزمایش‌ها نیز تغییر می‌کند. برای مثال با افزایش میزان میلگرد، باید از بتنی با روانی و قابلیت عبور و پرکنندگی بیشتری استفاده کرد. در ادامه به صورت اختصار بررسی رابطه میان نتایج آزمایش‌های کارایی بتن تازه خودتراکم با شکل و مشخصات عضو صورت گرفته است.

جدول ۵-۲ مقادیر مجاز و قابل قبول پیشنهادی توسط مراجع مختلف برای نتایج آزمایش‌های کارایی بتن تازه

مشخصات کارایی	آزمایش	مقادیر پیشنهاد شده در مراجع مختلف
شکل پذیری و آهنگ جریان (قابلیت عبور، بدون قید)	جریان اسلامپ	• آیین نامه بتن ایران: بین ۵۵ تا ۷۵ سانتی‌متر، با رعایت ضوابطی تا ۸۵ سانتی‌متر • توصیه اروپایی: بین ۶۵ تا ۸۰ سانتی‌متر • انجمن مهندسین ژاپن: بین ۶۰ تا ۷۰ سانتی‌متر • انستیتو بتن پیش‌تنیده: بیش‌تر از ۶۶ سانتی‌متر • انجمن بتن سوئد: بین ۶۵ تا ۷۵ سانتی‌متر
	زمان ۵۰ سانتی‌متر (T_{50})	• آیین نامه بتن ایران: بین ۲ تا ۵ ثانیه • توصیه اروپایی: بین ۲ تا ۵ ثانیه • انستیتو بتن پیش‌تنیده: بین ۳ تا ۵ ثانیه • انجمن بتن سوئد: بین ۳ تا ۷ ثانیه
قابلیت عبور (بازشوهای باریک، قابلیت عبور همراه با میلگرد و مقید شده)	قیف V شکل	• آیین نامه بتن ایران: کمتر از ۸ ثانیه • توصیه اروپایی: بین ۶ تا ۱۲ ثانیه • انستیتو بتن پیش‌تنیده: بین ۶ تا ۱۰ ثانیه
	قیف V بعد از ۵ دقیقه	• آیین نامه بتن ایران و توصیه اروپایی: نباید بیش از ۳ ثانیه از نتیجه اولیه بیشتر باشد.
	جعبه L شکل (h_2/h_1)	• آیین نامه بتن ایران: بزرگتر از ۰/۸ • توصیه اروپایی: بزرگتر از ۰/۸ • انستیتو بتن پیش‌تنیده: بزرگتر از ۰/۷۵ • انجمن بتن سوئد: بزرگتر از ۰/۸
	حلقه J	• آیین نامه بتن ایران: اختلاف بین نتایج جریان اسلامپ با حلقه J و بدون حلقه، بین ۲۵ تا ۵۰ میلی‌متر • توصیه اروپایی: اختلاف ارتفاع بتن قبل و بعد از حلقه، کمتر از ۱۰ میلی‌متر • انستیتو بتن پیش‌تنیده: اختلاف بین نتایج جریان اسلامپ با حلقه J و بدون حلقه،کمتر از ۲۵ یا ۵۰ میلی‌متر
جداشدگی استاتیکی (مقاومت در برابر جداشدگی، ته نشینی و آب انداختگی)	VSI	• آیین نامه بتن ایران و انستیتو بتن پیش‌تنیده: بین ۰ تا ۱
	نفوذ	• آیین نامه بتن ایران: کمتر از ۱۰ مطلوب، کمتر ۲۵ میلی‌متر قابل قبول • انجمن بتن سوئد: کمتر از ۸ میلی‌متر • Rilem: کمتر از ۸ میلی‌متر
	پایداری الک	• آیین نامه بتن ایران: کمتر از ۲۰٪ قابل قبول و کمتر از ۱۵٪ مطلوب
	ستون پایداری	• آیین نامه بتن ایران: کمتر از ۱۵ درصد، قابل قبول و کمتر از ۱۰ درصد مطلوب • انجمن بتن آمریکا: کمتر از ۱۰ درصد قابل قبول
حدود و توصیه‌های ارایه شده در جدول با توجه به روش آزمایش هر یک از مراجع می‌باشد.		

همان‌طور که قبلاً هم اشاره شد، کاربرد اصلی بتن خودتراکم در اعضا و قطعاتی که حجم میلگرد زیاد و زوایای قالب غیر قابل‌دسترس می‌باشند. در واقع هر چه مقطع، میلگرد بیشتری داشته باشد، باید از بتن خودتراکمی با روانی و قابلیت عبور بیشتری استفاده شود. علاوه بر این، در صورتی که امکان لرزاننده نباشد و مقاطع غیر قابل دسترس باشند، بهتر است از بتنی با روانی کافی استفاده شود که بتواند مقاطعی که امکان دسترسی به آن‌ها وجود ندارند را پر کند. از طرف دیگر، مقاطعی مانند دال‌ها که میلگرد کمتری نسبت به سایر مقاطع دارند، لزومی به استفاده از بتنی با روانی زیاد نیست. ضوابط و معیارهای بتن‌خودتراکم باید مرتبط با نوع و مشخصات المان که شامل عمق، طول و ضخامت قطعه (عضو)، تراکم میلگردها نیز تعریف شوند.

علاوه بر این، روش‌های بتن‌ریزی مانند استفاده از شوت، تراک و یا پمپ و همچنین میزان اهمیت سطح تمام شده نهایی نیز در ضوابط و مقادیر مجاز و قابل قبول بتن خودتراکم تاثیر می گذارند. در جدول ۵-۳، مقادیر مجاز و مناسب نتایج آزمایش‌های بتن خودتراکم با توجه به مشخصات و شکل اعضا نشان داده شده است.

در این جدول که حاصل تحقیقات Dazcko و همکاران می‌باشد، بتن خودتراکمی که در سازه‌های با میزان میلگرد زیاد و شکل پیچیده استفاده می‌شود، باید جریان اسلامپ بیشتر از ۶۶ سانتی‌متر، زمان ۵۰ سانتی‌متر (T50) بین ۳ تا ۵ سانتی متر، نسبت انسداد در آزمایش شکل (h_2/h_1) بیشتر از ۰/۷۵ و زمان خروج از قیف V شکل بین ۶ تا ۱۰ ثانیه باشد. مناطق هاشور خورده، معرف ناحیه‌هایی هستند که مناسب نیستند و بتن دچار مشکل می‌شود.

جدول ۵-۳ راهنمای انتخاب نوع آزمایش مناسب برای بررسی خواص SCC بر اساس درصد میلگرد استفاده شده و مشخصات عضو بتنی

شرایط و مشخصات المان		نتیجه جریان اسلامپ (میلی‌متر)			نتیجه جعبه L			آزمایش حلقه J (میلی‌متر) ۱- بر اساس استاندارد اروپا ۲- بر اساس استاندارد آمریکا			آزمایش قیف V (ثانیه)		
	کمیت	کمتر از ۵۵۰	۵۵۰ تا ۶۵۰	بیشتر از ۶۵۰	کمتر از ۷۵	۷۵- ۸۵	بیشتر از ۸۵	عالی (کمتر از ۵)[1] (کمتر از ۲۵)[2]	خوب ۱(۵-۱۰) -۲(۲۵ ۵۰)	ضعیف (بیشتر از ۱(۱۰) (بیش از ۲(۵۰	کمتر از ۶	۶-۱۰	۱۰-۱۲
درصد میلگرد استفاده شده در عضو بتنی	کم												
	متوسط												
	زیاد												
عمق عضو بتنی	کم												
	متوسط												
	زیاد												
طول عضو بتنی	کم												
	متوسط												
	زیاد												
ضخامت دیواره	کم												
	متوسط												
	زیاد												

مناطق هاشور خورده، معرف ناحیه‌هایی هستند که مناسب نیستند و توصیه نمی‌شوند.

علاوه بر این موارد، راهنمای اروپایی بر مبنای نتایج بدست آمده از آزمایش جریان اسلامپ، بتن خودتراکم تازه را به سه دسته مطابق جدول ۵-۴ تقسیم می‌کند.

جدول ۵-۴ طبقه بندی بتن خودتراکم بر اساس جریان اسلامپ

رده بتن	جریان اسلامپ (سانتی‌متر)
SF1	۶۵ – ۵۵
SF2	۷۵-۶۶
SF3	۸۵-۷۶

رده SF1 برای سازه‌های بتنی غیر مسلح یا کم میلگرد، شمع ها و شالوده‌های عمیق که در آن‌ها نیازی به جریان افقی طولانی بتن نیست، استفاده می‌شود. رده SF2 برای بسیاری از کاربردهای متداول بتن‌ریزی مناسب می‌باشد و رده SF3 در سازه‌های پر میلگرد با شکل و قالب بندی پیچیده استفاده می‌شود.

در جدول ۵-۵ نیز خلاصه‌ای از نتایج قابل قبول آزمایش جریان اسلامپ با توجه به نوع قطعه آورده شده است.

جدول ۵-۵ خلاصه‌ای از معیار های آزمایش جریان اسلامپ

معیار	T50 (ثانیه)	جریان اسلامپ (میلی‌متر)
آیین نامه بتن ایران	۵-۲	۵۵۰ تا ۷۵۰ در موارد خاص با حداکثر اندازه سنگدانه ۱۲/۵ میلی‌متر یا کمتر و بافت دانه‌بندی فوق‌العاده ریز تا ۸۵۰ میلی‌متر
راهنمای اروپایی	۲ -۵ (کاربردهای ساختمانی)	۸۵ -۵۵
	۳-۷ (کاربردهای مهندسی عمران)	
ICAR	——	بیش از ۵۶
نروژ	ستون و دیوار ۲-۱۲	ستون و دیوار ۶۰-۷۵
	پوسته ۲-۱۰	پوسته ۵۰-۶۵
المان	——	بیش از ۷۰
انجمن مهندسان عمران ژاپن	۳-۱۵	بیش از ۶۰

جدول ۵-۶ راهکارهای اصلاحی

اقدامات ممکن		تاثیر بر روی:					
ردیف	شرح	قابلیت پر کردن	قابلیت عبور	پایداری	مقاومت	جمع‌شدگی	خزش
الف	گرانروی خیلی زیاد است						
الف۱	افزایش آب	+	+	−	−	−	−
الف۲	افزایش حجم خمیر	+	+	+	+	−	−
الف۳	افزایش فوق‌روان کننده	+	+	−	+	0	0
ب	گرانروی خیلی کم است						
ب۱	کاهش آب	−	−	+	+	+	+
ب۲	کاهش حجم خمیر	−	−	−	−	+	+
ب۳	کاهش فوق‌روان کنند	−	−	+	−	0	0
ب۴	افزایش مواد اصلاح کننده گرانروی	−	−	+	0	0	0
ب۵	استفاده از پرکننده پودری ریزتر	+	+	+	0	−	−
ب۶	استفاده از ماسه ریزتر	+	+	+	0	−	0
پ	تنش تسلیم خیلی زیاد است						
پ۱	افزایش فوق روان‌کننده	+	+	−	+	0	0
پ۲	افزایش حجم خمیر	+	+	+	+	−	−
پ۳	افزایش حجم ملات	+	+	+	+	−	−
ت	جداشدگی						
ت۱	افزایش حجم خمیر	+	+	+	+	0	0
ت۲	افزایش حجم ملات	+	+	+	+	−	−
ت۳	کاهش مقدار آب	−	−	+	+	+	+
ت۴	استفاده از پودر ریزتر	+	+	+	0	−	−
ث	افت سریع کارایی						
ث۱	استفاده از سیمان‌هایی با وکنش‌پذیری آهسته	0	0	−	−	0	0
ث۲	افزایش میزان کندگیر کننده	0	0	−	−	0	0
ث۳	استفاده از نوع دیگر فوق‌روان‌کننده	؟	؟	؟	؟	؟	؟
ث۴	تغییر پرکننده سیمان	؟	؟	؟	؟	؟	؟
ج	انسداد						
ج۱	کاهش حداکثر اندازه سنگدانه	+	+	+	−	−	−
ج۲	افزایش حجم خمیر	+	+	+	+	−	−
ج۳	افزایش حجم ملات	+	+	+	+	−	−
چ	نتایج غلط						
چ۱	کنترل شرایط آزمایش	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a

+ معمولاً نتایج بهتری گرفته می‌شود.
0 معمولاً اثر قابل توجهی نداشته است.
- معمولاً اثر بدتری برای بتن داشته است.

؟ تاثیر آن قابل پیش‌بینی نیست.
n.a. قابل اجرا نیست.

در نشریه ۲-۱۲۰ سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور (جلد دوم آیین نامه بتن ایران) ضمن ارایه توصیه‌هایی برای کاربرد هر رده بتن خودتراکم از نظر جریان اسلامپ، تعاریفی از انبوهی(تراکم) میلگرد، بافت دانه‌بندی بتن (سنگدانه) و رده بندی ضخامت قطعه ارایه شده است. در جدول ۶-۱ الی جدول ۶-۴ این توصیه ها ارایه شده است.

فصل ۶

مشخصات مصالح و طرح مخلوط بتن خودتراکم

فصل ششم

مشخصات مصالح و طرح مخلوط بتن خودتراکم

۶-۱ راهنمای انتخاب مصالح

به طور کلی از مصالحی که برای بتن‌های معمولی استفاده می‌شود، می‌توان در ساخت بتن خودتراکم نیز استفاده نمود. اگرچه مشخصات مصالح باید مطابق با الزامات ارایه شده در استانداردها، آیین نامه بتن ایران و مقررات ملی ساختمان باشد، ولی جهت اطمینان از یکنواختی در تولید و برآورده نمودن الزامات مورد نیاز، لازم است تا علاوه بر آن، الزامات و توصیه‌های زیر نیز لحاظ شود. در این بند ویژگی‌های سیمان، مواد جایگزین سیمان، پودرهای خنثی، مواد اصلاح کننده گرانروی، سنگدانه و مواد افزودنی ارایه شده‌است.

۶-۱-۱ سنگدانه

در بتن خودتراکم می‌توان از سنگدانه‌های سبک و معمولی استفاده نمود. الزامات کلی سنگدانه‌های معمولی، باید مطابق با استاندارد ملی ایران به شماره ۳۰۲ و سنگدانه‌های سبک مطابق با استاندارد ۴۹۸۵، باشد. کنترل مداوم رطوبت، جذب آب، دانه‌بندی و درصد ریزدانه‌ها از اهمیت زیادی برخوردار بوده و می‌تواند خواص بتن خودتراکم را دچار تغییرات زیادی کند. شکل و نحوه توزیع اندازه ذرات بسیار با اهمیت بوده و می‌تواند بر چگالی انباشتگی و درصد تخلخل بتن بسیار تاثیر گذار باشند. همچنین در برخی روش‌های طرح مخلوط بتن، تعیین درصد تخلخل، مبنای محاسبه میزان خمیر و ملات مورد نیاز است. استفاده از سنگدانه‌های درشت با دانه‌بندی تک اندازه و یا دانه‌بندی ناپیوسته در مخلوط سنگدانه نیز می‌توانند به‌کار روند.

۶-۱-۱-۱ سنگدانه‌های درشت

- حداکثر اندازه سنگدانه بسته به کاربرد مورد نظر انتخاب می‌شود و معمولاً به ۱۹ میلی‌متر محدود می‌شود.
- حداکثر اندازه سنگدانه‌های درشت را باید بر اساس قابلیت عبور و پایداری مخلوط تعیین نمود. بر این اساس توصیه می‌شود، حداکثر اندازه سنگدانه را، یک اندازه (بر اساس الک‌های استاندارد) کوچکتر از مقادیر توصیه شده

در مقررات و آئین‌نامه‌های مورد استفاده، انتخاب نمود. همچنین توصیه می‌شود، حداکثر اندازه اسمی سنگدانه درشت از مقادیر زیر کوچکتر باشند:

- یک پنجم کوچکترین فاصله قالب‌های قائم؛
- یک سوم ضخامت قطعه یا دال بتنی؛
- سه چهارم حداقل ضخامت پوشش روی میلگردها؛
- سه چهارم فاصله آزاد بین میلگردها.

- توصیه می‌شود، حداکثر اندازه سنگدانه‌ها را جهت کاهش انسداد به ۱۲/۵ میلی‌متر محدود کرد.
- توصیه می‌شود، اگر حداکثر اندازه سنگدانه بزرگتر از ۱۲/۵ میلی‌متر است برای اینکه انسداد سنگدانه‌ها حداقل شود، بهتر است حجم سنگدانه درشت بین ۲۸ تا ۳۲ درصد باشد و از سنگدانه ریز خوب دانه‌بندی شده استفاده کرد.
- آزمایش «جعبه L» و «قیف V» می‌تواند معیاری برای کنترل انسداد باشد.
- اگرچه شکل سنگدانه‌های درشت می‌تواند در کارایی موثر باشد (به عنوان مثال، با مقدار آب ثابت، سنگدانه گردگوشه قابلیت عبور بهتری نسبت به سنگدانه تیزگوشه و شکسته دارند)، ولی محدودیتی برای استفاده از سنگدانه‌های گردگوشه و یا شکسته در بتن خودتراکم وجود ندارد.
- ترکیب سنگدانه‌هایی با اندازه‌های مختلف در بهبود مشخصات کلی مخلوط بتن موثر می‌باشد.
- استفاده از سنگدانه‌های سوزنی و پولکی (ورقه‌ای) باید مطابق ضوابط استاندارد ملی ایران ۳۰۲ (۵ تا ۸ درصد) باشد اگرچه توصیه می‌شود از کاربرد آن‌ها در بتن خودتراکم اجتناب شود.

۶-۱-۱-۲ سنگدانه ریز

- تاثیر سنگدانه‌های ریز بر خواص بتن خودتراکم تازه، بسیار با اهمیت‌تر از سنگدانه‌های درشت است.
- در برخی مراجع دانه‌های ریزتر از الک ۰/۱۵۰ یا ۰/۱۲۵ میلی‌متر و در برخی، ریزتر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر را به عنوان مواد پودری منظور کرده‌اند.
- اگرچه افزایش حجم خمیر باعث کاهش اصطکاک بین ذرات سنگدانه‌های ریز می‌شود، امّا همچنان، دانه‌بندی خوب، بسیار با اهمیت است.
- در اکثر موارد برای دستیابی به دانه‌بندی مطلوب، از ترکیب چند سنگدانه ریز (به‌طور مثال ترکیب سنگدانه‌های ریز طبیعی و شکسته) استفاده می‌شود.
- توصیه می‌شود برای دستیابی به خواص رئولوژی بهتر، از منحنی دانه‌بندی ویژه «بتن خودتراکم» یا منحنی «رده ۱» ارایه شده در استاندارد ۳۰۲ ایران استفاده شود.

۶-۱-۱-۳ پرکننده پودری

- پرکننده‌های پودری معدنی، شامل پودرهای حاصل از خردایش و آسیاب کردن و پودر ریز حاصل از تولید سنگدانه‌ها و برخی مواد دیگر بوده و معمولاً بر اساس ذرات عبوری از الک ۷۵ میکرومتر تعریف می‌شوند.
- پرکننده‌های بسیار ریز که بصورت پودر می‌باشند، معمولاً ناشی از تولید ماسه هستند. در برخی موارد این پرکننده‌های ریز، در دانه‌بندی ماسه نیز وجود دارند، اگرچه مقدار آن کم می‌باشد.
- دیگر منبع تولید پرکننده‌های معدنی، آسیاب کردن مواد ریز است؛ اگرچه این نوع محصول، یک فرآورده جانبی است و برای کاربردهای خاص دارای ویژگی مشخصی نیستند. این نوع از پرکننده‌ها، به طور معمول منشا آهکی دارند.
- این مواد ریزدانه ممکن است بخشی از ماسه باشند یا بصورت جداگانه اضافه شوند.
- مشابه ماسه (یا سنگدانه‌ها)، شکل، گوشه‌دار بودن، بافت و دانه‌بندی پرکننده‌ها نیز مهم می‌باشد. همچنین، وجود رس و دیگر مواد مضر باید مورد توجه قرار گیرد. رس‌ها می‌توانند آب موجود در بتن تازه را جذب نموده و منبسط شوند. علاوه بر این، رس‌ها ممکن است عملکرد مواد افزودنی را مختل نمایند.
- میزان تاثیر رس‌ها بستگی به نوع، ریزی و واکنش‌پذیری آن‌ها دارد.
- افت مقاومت ناشی از رس، عموماً ناشی از افزایش مقدار آب مورد نیاز برای ایجاد روانی مشخص است. در مواردی که نسبت آب به سیمان ثابت نگه‌داشته شود، مقاومت تقریباً بدون تغییر مانده و در عوض کارایی کاهش می‌یابد.
- در استفاده از پرکننده‌های آهکی نیز خطر خرابی سولفاتی ناشی از تشکیل تامازایت، بخصوص در مناطق سردسیر و در معرض سولفات باید بررسی شود. بر این اساس استفاده از پرکننده‌های ریز در برخی از مشخصات فنی محدود شده است.
- تاثیر پرکننده‌های ریز و دیگر پرکننده‌های پودری معدنی در کارایی (که تحت تاثیر پارامترهایی همچون شکل، گوشه‌دار بودن، بافت و دانه‌بندی است) را می‌توان با اندازه‌گیری میزان آب مورد نیاز مورد ارزیابی قرار داد.
- وجود رس یا مواد آلی در پرکننده پودری را می‌توان با آنالیز حرارتی یا آزمایش متیلن بلو، شناسایی کرد. با آزمایش متیلن‌بلو، نمی‌توان تفاوتی بین انواع رس قائل شد، بعبارت دیگر بر اساس نتایج بدست آمده نمی‌توان از میزان خرابی ناشی از رس‌ها ایده‌ای داشت. اگرچه روش‌های اصلاح شده آن نیز وجود دارد.
- هنگامی‌که پرکننده‌ها بعنوان جایگزین ماسه مورد استفاده قرار می‌گیرند، معمولاً مقدار آب مورد نیاز به‌دلیل زیاد شدن مقدار مواد ریزدانه، افزایش پیدا می‌کند. اگر پرکننده‌ها بعنوان جایگزین سیمان مورد استفاده قرار گیرند، در اکثر موارد و بسته به شکل و دانه‌بندی مواد پرکننده پودری، می‌توان مقدار آب را کاهش داد. اگر نسبت آب به سیمان ثابت نگاه‌داشته شود، با اضافه کردن پرکننده پودری، ممکن است بدلیل بهتر شدن چگالی انباشتگی مخلوط و اثر متقابل پرکننده پودری در هیدراته‌شدن سیمان، مقاومت فشاری نیز افزایش پیدا کند.

- پوردهای سنگ آهک همچنین می‌توانند آهنگ هیدراته‌شدن را تسریع کنند، در نتیجه مقاومت در سنین اولیه نیز افزایش می‌یابد. تاثیر پرکننده سنگ آهک در سنین بعدی کمتر است و حتی ممکن است، بدلیل کمبود واکنش‌های پوزولانی، در سنین بیشتر دچار کاهش آهنگ رشد مقاومت شود.

۶-۱-۲ سیمان

الزامات مربوط به استفاده از انواع سیمان در بتن خودتراکم، مشابه بتن‌های معمولی می‌باشد و ویژگی خاصی برای بتن خودتراکم در نظر گرفته نمی‌شود. بر این اساس باید مشخصات سیمان‌های مورد استفاده، مطابق با الزامات استانداردهای ملی ایران، برای سیمان‌های پرتلند و سیمان‌های آمیخته باشد.
توصیه‌های زیر می‌تواند برای استفاده از انواع سیمان، مورد توجه قرار گیرد:

- از آن‌جایی‌که برخی مشخصات سیمان، مانند، C_3A و نرمی، بر میزان مصرف یا عملکرد فوق‌روان کننده تاثیرگذار می‌باشد، لازم است تا سازگاری و نحوه عملکرد این دو پارامتر کنترل شود، به خصوص در مواردی‌که امکان تغییر فوق‌روان کننده مقدور نیست، انتخاب نوع یا مشخصات سیمان حائز اهمیت است.
- نوع سیمان مناسب برای شرایط اقلیمی مهاجم و خاص، باید بر اساس الزامات مربوطه مطابق فصل ششم آئین‌نامه بتن ایران، انتخاب شود.

۶-۱-۳ مواد جایگزین سیمان

به طور معمول، در SCC جهت دستیابی به خواص رئولوژی مورد نظر، از مواد پودری معدنی یا مواد افزودنی پوزولانی (جایگزین سیمان) استفاده می‌شود. کاربرد این مواد در بهبود و حفظ انسجام و مقاومت در برابر جداشدگی موثر می‌باشد. همچنین پوزولان‌ها می‌توانند در کاهش عیار سیمان و در نتیجه دمای هیدراته‌شدن و ترک‌های حرارتی موثر باشند.

۶-۱-۳-۱ دوده‌سیلیس

نرمی بسیار زیاد و شکل کروی دانه‌های دوده‌سیلیس، سبب چسبندگی خوب و بهبود مقاومت در برابر جداشدگی مخلوط بتن می‌شود. از آنجایی‌که دوده‌سیلیس در کاهش آب انداختگی یا رو زدن آب، بسیار موثر می‌باشد، استفاده از آن می‌تواند مشکلاتی را به‌دلیل خشک شدن سریع لایه سطحی بتن، بوجود آورد، که در این مورد می‌توان به ایجاد درز سرد، ترک خوردگی، مشکلاتی در زمان انتقال و تسطیح سطح بتن اشاره کرد. دوده‌سیلیس مصرفی باید مطابق با الزامات استاندارد ملی ایران به شماره ۱۳۲۷۸ باشد.

تاثیر میزان جایگزینی دوده‌سیلیس، تابع اندازه و نحوه توزیع اندازه ذرات سیمان می‌باشد، امّا درصدهای جایگزینی کم (کمتر از ۵ درصد)، معمولاً باعث کاهش گرانروی خمیری می‌شود. حداکثر میزان مصرف دوده‌سیلیس نیز به ۱۰ درصد محدود می‌شود.

۶-۱-۳-۲ سرباره کوره آهن‌گدازی

سرباره کوره آهن‌گدازی به عنوان یک پودر فعال با دمای هیدراته‌شدن کم می‌باشد، که معمولاً به صورت آمیخته با سیمان پرتلند، عرضه می‌شود، اگرچه در برخی کشورها، به صورت مجزا عرضه و در هنگام اختلاط دیگر اجزا، به مخلوط بتن اضافه می‌نمایند. استفاده از مقادیر زیاد سرباره بر پایداری و در نتیجه کاهش ثبات (بقاء)، موثر می‌باشد. مشخصات سیمان‌های سرباره‌ای باید مطابق با استاندارد ملی ایران باشد.

۶-۱-۳-۳ خاکستر بادی

ذرات خاکستر بادی به علت شکل کروی و صاف می‌توانند همچون ساچمه عمل کرده و سبب بهبود کارایی و جریان اسلامپ شوند. استفاده از خاکستر بادی سبب کاهش حساسیت مخلوط بتن به تغییرات آب مصرفی می‌شود، همچنین درصدهای جایگزینی بیشتر، سبب افزایش چسبندگی و مقاومت در برابر جریان نیز می‌شود. مشخصات خاکستر بادی باید مطابق با الزامات استاندارد ASTM C618 باشد.

۶-۱-۳-۴ دیگر مواد جایگزین

استفاده از موادی همچون متاکائولن، پوزولان‌های طبیعی، خاکستر پوسته برنج، زئولیت و دیگر مواد پودری در بتن خودتراکم، به شرطی مجاز است که تاثیر آن‌ها بر خواص کوتاه مدت و بلند مدت بتن به دقت و جداگانه مورد بررسی قرار گیرد.

۶-۱-۴ مواد افزودنی شیمیایی

فوق روان‌کننده یا کاهش دهنده قوی آب، از اصلی‌ترین مواد افزودنی شیمیایی مورد استفاده در بتن خودتراکم می‌باشند. مشخصات انواع مواد افزودنی مورد استفاده باید مطابق با الزامات استاندارد ملی ایران به شماره ۲۹۳۰ باشد. از دیگر مواد افزودنی مورد مصرف، می‌توان به مواد اصلاح کننده گرانروی (VMA)، مواد حباب ساز، زودگیر و کندگیر نیز اشاره نمود. مشخصات و ویژگی‌های مواد اصلاح کننده گرانروی در بند ۲-۲-۲ به تفصیل مورد بحث قرار گرفته است. به طور کلی

مشخصات و نحوه استفاده از مواد افزودنی شیمیایی (به غیر از مواد اصلاح کننده گرانروی)، مشابه بتن‌های معمولی و مطابق با توصیه تولید کننده است.

انتخاب نوع و مشخصات مواد افزودنی، برای دستیابی به عملکرد بهینه، تابع خواص فیزیکی و شیمیایی ماده افزودنی و یا مواد سیمانی است. عواملی همچون ریزی، مقدار کربن، قلیائیت و درصد C_3A می‌توانند، بر میزان مصرف و عملکرد آن در بتن موثر باشند. بر این اساس توصیه می‌شود، سازگاری مواد افزودنی به دقت مورد بررسی و آزمون قرار گیرد. همچنین در صورت تغییر در تامین‌کننده مواد نیز، باید کنترل‌های لازم انجام شود.

۶-۱-۴-۱ مواد افزودنی فوق‌روان کننده/کاهنده قوی آب

بتن‌های خودتراکم را معمولاً با مواد فوق کاهنده‌ای بر پایه پلی‌کربوکسیلات می‌سازند که عملکرد مناسب‌تری نسبت به نسل قدیمی که بر پایه سولفونات‌ها بودند (مانند: نفتالین سولفونات فرمالدیید متراکم شده NSFC و ملامین سولفونات فرمالدیید متراکم شده MSFC) از خود نشان داده‌اند.

در مقایسه با مواد کاهنده آب پایه سولفونات، مواد افزودنی پایه پلی‌کربوکسیلات، دارای میزان مصرف کمتر، تاثیر کمتر بر زمان گیرش، بهبود دهنده کارایی و حفظ آن و افزایش پایداری هستند.

به طور معمول تولیدکنندگان مواد افزودنی، میزان مصرف و سازگاری آن با دیگر مواد را بر اساس نیازهای مشتری اعلام می‌کنند. به غیر از آزمون‌های ارایه شده در استاندارد، در اغلب پروژه‌ها لازم است تا قابلیت حفظ اسلامپ (روانی)، تا مدت زمان مورد نیاز کنترل شود. مدت زمان لازم برای حفظ روانی، معمولاً بر اساس وسایل حمل و نقل، مشخصات قالب و شرایط اقلیمی (مانند دما، رطوبت و باد و ...)، تعیین می‌شود.

تغییر در مشخصات زنجیر اصلی مانند طول زنجیر، چگالی یا نوع زنجیره‌های فرعی، می‌تواند بر میزان کاهش آب، حفظ کارایی، زمان گیرش و توسعه مقاومت در سنین اولیه موثر باشد. بر این اساس فوق کاهنده‌های آب پایه پلی‌کربوکسیلاتی، که گرانروی خمیر بیشتری را در اسلامپ‌ها و میزان مصرف یکسان ایجاد می‌کنند، برای استفاده در بتن خودتراکم پیشنهاد می‌شوند. همچنین پیشنهاد می‌شود از ترکیب چند پلیمر پایه پلی‌کربوکسیلاتی، یک ماده افزودنی که می‌تواند حفظ کارایی و کاهش حساسیت به مشخصات سیمان را از خود نشان دهد، ساخت.

معمولاً قابلیت حفظ کارایی فوق‌کاهنده‌های آب پلی‌کربوکسیلاتی به دو دلیل عمده، نسبت به افزودنی‌های سولفوناتی ارجح هستند. اول، زنجیرهای فرعی پلیمرهای پلی‌کربوکسیلاتی در فواصل دورتری از دانه‌های سیمان فعال بوده و به همین دلیل در زمان‌های کوتاه، تاثیری بر هیدراته‌شدن سیمان ندارند. دوم، برخی از پلیمرهای پلی‌کربوکسیلاتی می‌توانند در محلول‌های آبی باقی‌مانده و به تدریج و در طی فرآیند هیدراته‌شدن جذب ذرات سیمان شوند.

۶-۱-۴-۲ مواد حباب‌ساز

به طور معمول از مواد حباب‌ساز برای افزایش دوام در برابر چرخه‌های یخزدن و آب‌شدن استفاده می‌شود. همچنین در دال‌های تخت برای سهولت در پرداخت سطح نهایی یا افزایش پایداری در مخلوط‌هایی با میزان مواد پودری کم (مانند بتن‌هایی با مقاومت کم)، مواد افزودنی حباب‌ساز مفید می‌باشد. مشخصات مواد حباب‌ساز باید مطابق با الزامات استاندراد ملی ایران به شماره ۲۹۳۰ باشد.

۶-۱-۴-۳ مواد افزودنی اصلاح کننده گرانروی (VMA)

مواد افزودنی اصلاح کننده گرانروی، که مواد مقاوم در برابر آب شستگی نیز به‌آن‌ها اطلاق می‌شود، به طور معمول باعث بهبود بخشی یا همه مشخصات رئولوژی مخلوط بتن مانند: تنش تسلیم، گرانروی خمیری، غلیظ شدگی[۱] و درجه رقیق‌شدگی برشی[۲] می‌شوند.

VMA مقاومت در برابر جداشدگی، قوام و چسبندگی را افزایش، آب‌انداختگی را کاهش، قابلیت کاربرد بازه وسیعی از مصالح (مانند سنگدانه‌هایی با دانه‌بندی گسسته و ماسه شکسته) را ممکن و اثرات تغییر در مشخصات مصالح را کاهش می‌دهند.

توصیه می‌شود حتی الامکان بتن خود تراکم را بدون استفاده از VMA ساخت، ولی ممکن است، استفاده از VMA در شرایطی همچون زمانی‌که رطوبت سنگدانه‌ها را نمی‌توان با دقت کنترل نمود یا در مواردی‌که دانه‌بندی سنگدانه‌ها مناسب نبوده و مقدار مواد ریزدانه‌کم است، ضروری باشد.

صمغ ولان یکی از رایج‌ترین انواع VMA است که باعث افزایش تنش جاری‌شدن، گرانروی و درجه رقیق‌شدگی برشی می‌شود ضمن این‌که حساسیت نسبت به تغییرات آب را کاهش می‌دهد. مواد اصلاح کننده گرانروی که بر پایه صمغ ولان و مشتقات سلولز می‌باشند، ممکن است باعث تاخیر در زمان گیرش بتن شوند، در حالی‌که مواد آکریلیکی، معمولاً تاثیری در زمان گیرش ندارند. همچنین صمغ ولان و هیدروکسی متیل سلولز معمولاً مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته را کاهش می‌دهند.

۶-۲ روش پیشنهادی طرح مخلوط بتن خودتراکم

اگرچه کلیه روش‌های طرح مخلوط بتنی (بتن‌های معمولی، خودتراکم و ...) که در دنیا ارائه شده، تنها جنبه راهنمایی داشته و در هیچ یک از روش‌ها ساخت مخلوط آزمایشی حذف نمی‌شود، با این حال تفاوت روش‌های مختلف در منظور کردن پارامترهای متغیر بیشتر، سهولت استفاده، اقتصادی بودن طرح‌های حاصله، کم کردن تعداد مخلوط‌های آزمایشی و

۱ - Thixotropy
۲ - Shear thinning

غیره می‌باشد. بر این اساس اکثر کشورها یا محققین، بر مبنای امکانات و شرایط اقلیمی، مشخصات مصالح بومی و پارامترهای دیگر، روش‌هایی را برای طرح مخلوط پیشنهاد می‌کنند.

در کشور ما نیز کارهای محدودی برای تدوین روش طرح مخلوط بتن‌های خودتراکم انجام شده است، ولی با توجه به اینکه روش طرح مخلوط بتن‌های معمولی، در مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی تدوین شده، تجربیات موجود در این خصوص و همچنین تحقیقات انجام شده در زمینه بتن‌خودتراکم، بستر مناسبی را برای تدوین روش طرح مخلوط بتن خودتراکم بوجود آورده است، که نتایج آن به شرح زیر ارایه شده‌است.

۶-۲-۱ کلیات و مبانی

به‌طور کلی طرح مخلوط، فرآیند تعیین نسبت‌ها و مقادیر اجزای بتن است، به نحوی که بتن تولید شده تا حد امکان مقرون به‌صرفه باشد و الزامات مورد نیاز را تأمین کند. این الزامات در بتن خود تراکم به دو بخش: خواص بتن تازه و سخت شده تقسیم می‌شود و معمولاً برآورده نمودن خواص بتن، در حالت تازه (خواص رئولوژی) دارای اهمیت زیادی است و تامین مقاومت فشاری و دوام پس از آن مطرح می‌باشد.

روش پیشنهادی تعیین نسبت‌های مخلوط بتن خودتراکم، مبتنی بر تامین رئولوژی برای کارایی مناسب بتن است. به منظور سهولت در استفاده و عدم نیاز به محاسبات عددی پیچیده، سعی شده در هر گام با ساده سازی، روشی اجرایی را در اختیار کاربر قراردهد.

اساس این روش طرح مخلوط بر پایه سنگدانه‌های معلق در خمیر سیمانی[۱] است، که بصورت طرح‌وار در شکل ۶-۶ نشان داده شده است، که در آن اساس و چارچوب فرضیه ارایه شده است. در این روش برای دستیابی به طرح مخلوط SCC، سه عامل تغییر می‌کنند: سنگدانه‌ها، حجم خمیر و ترکیب خمیر.

سنگدانه‌ها ابتدا بر اساس دانه‌بندی، حداکثر اندازه، شکل، گوشه‌داری و بافت انتخاب می شوند. به جای در نظر گرفتن خواص سنگدانه‌های ریز، میانی و درشت به طور جداگانه، خواص سنگدانه‌ها در حالت ترکیبی (مخلوط سنگدانه‌های ریز و درشت) ارزیابی می‌شوند.

سپس، حجم خمیر برای سنگدانه‌های داده شده تعیین می‌شود. خمیر از آب، هوا و همه مواد جامد ریزتر از حدود ۷۵ میکرومتر که شامل سیمان، مواد سیمانی، سنگدانه‌ها و پرکننده‌های معدنی است، تعریف می‌شود. برای دستیابی به خواص SCC باید حداقل مقدار خمیر مورد نیاز تعیین شود. حداقل حجم خمیر مورد نیاز بطور کلی به خواص سنگدانه‌ها بستگی دارد و تا حد زیادی مستقل از ترکیب خمیر است.

در نهایت، ترکیب خمیر (مقادیر آب، پودر خنثی، هوا، سیمان و مواد جایگزین سیمان) برای دستیابی به رئولوژی بتن و خواص سخت شده مطلوب، بهینه می‌شود. افزایش حجم خمیر لزوماً با افزایش مقدار سیمان یا مواد سیمانی همراه نیست.

---

۱ - Solid Suspension, Suspension of aggregates in paste

کارایی مورد نیاز و خواص سخت شده مخلوط‌ها SCC می‌تواند بسته به کاربرد بسیار متفاوت باشد. کارایی باید از نظر توانایی پر کردن، توانایی عبور و مقاومت در برابر جداشدگی ارزیابی شود. هر یک از این سه ویژگی کارپذیری باید به طور مستقل ارزیابی شوند.

قابل ذکر است که روش ارائه شده به عنوان راهنمای اولیه طرح مخلوط بتن خودتراکم به‌کار می‌رود و باید مخلوط‌های آزمایشی در آزمایشگاه و همچنین مطابق با شرایط کارگاه ساخته شوند و پس از بررسی نتایج مقاومت فشاری و دیگر الزامات طرح، نسبت‌ها و مقادیر اجزای مخلوط، نهایی گردند.

۶-۲-۲ دامنه کاربرد

دامنه کاربرد این روش طرح مخلوط بتن خودتراکم به شرح زیر است:

- تعیین نسبت‌ها و مقادیر اجزای بتن‌های خودتراکم مورد مصرف در ساختمان‌ها و سازه‌های بتنی مختلف تا رده C50 با در نظر گرفتن رده‌های مختلف میزان روانی (آزمایش جریان اسلامپ)، مقاومت مشخصه فشاری، دوام، شرایط ساخت و کنترل کارگاهی و شرایط حمل و ریختن و سایر ضوابط مشخصات فنی، آیین‌نامه بتن ایران و مقررات ملی ساختمانی؛
- این روش، برای طرح مخلوط بتن‌های دیگر بطور مستقیم قابل کاربرد نمی‌باشد.

۶-۲-۳ گام‌های طرح مخلوط

۶-۲-۳-۱ گام اول: تعیین انحراف معیار و مقاومت فشاری هدف طرح

با توجه به فصل پنجم جلد دوم آیین نامه بتن، برای تعیین مقاومت فشاری هدف، باید انحراف معیار با استفاده از بندهای ۵-۵-۱ تا ۵-۵-۳ تعیین و سپس مطابق بند ۵-۵-۴ این آیین نامه، مقاومت فشاری هدف محاسبه شود.

۶-۲-۳-۲ گام دوم: انتخاب میزان جریان اسلامپ هدف

در این مرحله میزان جریان اسلامپ هدف (مطابق رده بندی جدول ۶-۱) با توجه به مشخصات ابعادی و وضعیت تراکم میلگردها از جدول ۶-۱ الی جدول ۶-۴ تعیین می‌شود.

جدول ۶-۱ راهنمای اولیه برای انتخاب کارآیی و روانی بتن‌های آسان‌تراکم و خودتراکم (جریان اسلامپ) (۱)

رده جریان اسلامپ	بازه جریان اسلامپ، میلی‌متر	موارد کاربرد
SF0	**۴۵۰-۵۵۰**	برای قطعات نازک یا با حجم میلگرد زیاد و وسایل تراکمی ضعیف، بتن آسان تراکم (ECC)، بافت دانه‌بندی ریز تا خیلی ریز، حداکثر اندازه سنگدانه ۲۰ میلی‌متر و گاه تا ۲۵ میلی‌متر.
SF1	**۵۵۰-۶۵۰**	برای قطعات نازک یا با حجم میلگرد خیلی زیاد با پیچیدگی کم در قالب بندی و حرکت افقی محدود تا ۵ متر، بافت دانه‌بندی خیلی ریز، یا امکان تراکم وجود ندارد، حداکثر اندازه سنگدانه ۲۰ میلی‌متر یا کمتر.
SF2	**۶۵۰-۷۵۰**	برای قطعات خیلی نازک یا با حجم میلگرد خیلی زیاد، دارای پیچیدگی در قالب بندی و حرکت افقی تا ۱۰ متر، بافت دانه‌بندی فوق العاده ریز، حداکثر اندازه سنگدانه ۱۲/۵ میلی‌متر یا کمتر و عدم امکان تراکم.
SF3 (۲)	**۷۵۰-۸۵۰**	برای قطعات خیلی نازک یا با حجم میلگرد فوق‌العاده زیاد، دارای پیچیدگی زیاد در قالب‌بندی و حرکت افقی تا ۱۰ متر، بافت دانه‌بندی فوق‌العاده ریز، حداکثر اندازه سنگدانه ۱۲/۵ میلی‌متر یا کمتر و عدم امکان تراکم.

(۱) بدیهی است بتن آسان تراکم یا خود تراکم را می‌توان در سایر قطعات نیز بدلیل عدم امکان بکارگیری تراکم یا سایر مزایای فنی و اقتصادی بتن خودتراکم، بکار برد.

(۲) به‌کارگیری رده SF3 به‌خاطر مشکلات طرح مخلوط بتن و جلوگیری از جداشدگی و آب‌انداختن نیاز به تدابیر خاص دارد و حداکثر اندازه سنگدانه آن نیز از ۱۲/۵ میلی‌متر تجاوز نمی‌کند.

جدول ۶-۲ راهنمای بافت دانه‌بندی مخلوط سنگدانه بتن با توجه به توان رابطه دانه‌بندی «فولر تامسون اصلاح شده»

بافت دانه‌بندی	خیلی درشت	درشت	متوسط	ریز	خیلی ریز	فوق‌العاده ریز
بازه توان n	۰/۶- ۰/۶۷	۰/۵- ۰/۶	۰/۴- ۰/۵	۰/۴- ۰/۳	۰/۳ — ۰/۲	۰/۱ — ۰/۲

• **-رابطه (اصلاح شده فولر و تامسون) بکار رفته برای منحنی مخلوط سنگدانه بتن** $P = \frac{d^n - 0.075^n}{D^n - 0.075^n}$

که در آن D حداکثر اندازه سنگدانه و d اندازه هر الک به میلی‌متر می‌باشد.

جدول ۶-۳ راهنمای تراکم میلگرد در شالوده‌ها و دال‌ها با توجه به وزن میلگرد در هر متر مکعب بتن (۱)

تراکم میلگرد	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد	فوق‌العاده زیاد
بازه وزن، کیلوگرم در متر مکعب	کمتر از ۵۰	۷۵-۵۰	۱۰۰-۷۵	۱۵۰-۱۰۰	۲۰۰-۱۵۰	بیش از ۲۰۰

(۱) **این مقادیر برای تیر و ستون و دیوار باید در ۱/۵ ضرب شود.**

جدول ۶-۴ طبقه‌بندی ضخامت قطعات بتنی

طبقه‌بندی	خیلی نازک	نازک	نسبتاً نازک	نیمه ضخیم	ضخیم	بسیار ضخیم
بازه ضخامت، میلی‌متر	کمتر از ۱۵۰	۱۵۰- ۳۰۰	۶۰۰-۳۰۰	۹۰۰-۶۰۰	۹۰۰- ۱۸۰۰	بیش از ۱۸۰۰

۶-۲-۳-۳ گام سوم: انتخاب درصد اختلاط سنگدانه‌ها و منحنی دانه‌بندی

سنگدانه‌ها را باید بگونه‌ای انتخاب کرد که مقدار آن‌ها در بتن حداکثر شود، چون از یک جهت سنگدانه‌ها از نظر اقتصادی (به غیر از آب)، ارزان قیمت‌ترین جزء بتن بوده و از جهت دیگر، معمولاً افزایش درصد سنگدانه‌ها باعث بهبود خواص بتن سخت‌شده می‌شوند. سه عاملی که در انتخاب ویژگی سنگدانه موثر است، شامل: «حداکثر اندازه»، «دانه‌بندی و شکل»، «گوشه‌داری و بافت» می‌باشند. علاوه بر این، وجود برخی از انواع خاک رس موجود در سنگدانه ممکن است نیاز به فوق‌روان‌کننده را برای دستیابی به جریان اسلامپ مشخص، افزایش دهد.

- ***حداکثر اندازه***

معمولاً حداکثر اندازه سنگدانه‌ها را تا حد ممکن بزرگ انتخاب می‌کنند، تا جایی‌که الزامات کارایی را بتوان به دست آورد. حداکثر اندازه سنگدانه‌ها را می‌توان برای افزایش قابلیت عبور و مقاومت در برابر جداشدگی، کاهش داد. حداکثر اندازه دانه‌هایی تا ۱۹ میلی‌متر برای اکثر کاربردها قابل قبول است. حداکثر اندازه سنگدانه‌ها، برای اطمینان از قابلیت عبور، ممکن است به ۱۲/۵ یا ۹/۵ میلی‌متر نیز کاهش یابد. حداکثر اندازه اسمی سنگدانه بتن نباید از مقادیر زیر بزرگتر باشد، اگرچه توصیه می‌شود حداکثر اندازه سنگدانه در بتن خودتراکم یک اندازه از بتن معمولی کوچکتر انتخاب شود:

الف) یک پنجم فاصله جداره قالب‌ها از هم؛

ب) یک سوم ضخامت دال یا قطعاتی که صرفا از یک طرف دارای قالب هستند؛

پ) سه چهارم فاصله آزاد میلگردهای افقی یا قائم؛

ت) سه چهارم ضخامت پوشش بتنی روی میلگردها افقی یا قائم؛

- ***دانه‌بندی***

یک دانه‌بندی استاندارد و مطلوب برای SCC وجود ندارد. بهترین دانه‌بندی بستگی به کاربرد و مشخصات سنگدانه‌ها دارد. به عنوان مثال، ممکن است یک دانه‌بندی با بخش زیادی از ذرات درشت، نیاز به فوق‌روان کننده و گرانروی پلاستیک را کاهش دهد، اما باعث کاهش قابلیت عبور شود.

به طور کلی، سنگدانه با دانه‌بندی یکنواخت (پیوسته) که دارای چگالی تراکمی زیادی هستند، مناسب است. اگرچه، در اغلب موارد استفاده از سنگدانه‌هایی با دانه‌بندی ناپیوسته، نیاز به فوق‌روان کننده و گرانروی پلاستیک را کاهش می‌دهد، ولی با این حال، اکیدا توصیه می‌شود از آن‌ها استفاده نشود، زیرا احتمال جداشدگی افزایش می‌یابد.

برای ساخت بتن همگن، ضروری است که سنگدانه‌های ریز و درشت به گونه‌ای با یکدیگر مخلوط شوند که ضمن ایجاد انسجام کافی، بتن نیز دارای کارایی مناسب باشد. بدین منظور اهمیت دانه‌بندی مخلوط سنگدانه را می‌توان به این صورت مطرح کرد که مقدار خمیر سیمان در بتن، تابع فضای خالی بین سنگدانه‌ها و کل مساحت سطح جانبی سنگدانه‌ها می‌باشد، زیرا منافذ بین سنگدانه‌ها توسط خمیر سیمان اشغال می‌گردد و سطح سنگدانه‌ها باید با خمیر سیمان اندود شود. وقتی که اندازه سنگدانه‌ها تقریباً مشابه و یکسان، یا یکنواخت باشند، حجم منافذ بین سنگدانه‌ها افزایش می‌یابد. اما اگر از سنگدانه‌هایی با اندازه‌های مختلف استفاده شود، ذرات کوچکتر بین دانه‌های بزرگتر قرار می‌گیرند و به این ترتیب، منافذ

کاهش می‌یابند و از مقدار خمیر سیمان مورد نیاز کاسته می‌شود. به طور نظری می‌توان برای هر حداکثر اندازه سنگدانه و نیز شکل خاص ذرات آن، یک منحنی دانه‌بندی با حداقل فضای منافذ را به دست آورد. اما چنین توزیعی از اندازه ذرات، علیرغم بهبود مقاومت و کاهش مصرف سیمان نمی‌تواند بتنی با کارایی مناسب تولید کند، بنابراین باید بین کارایی، مقاومت و اقتصاد تعادل برقرار نمود.

تولید سنگدانه‌ها به نحوی است که ممکن است دانه‌بندی آن‌ها در محدوده دانه‌بندی استاندارد قرار نگیرد. لذا ضروری است که سنگدانه‌ها با دانه‌بندی‌های مختلف به گونه‌ای اصلاح شوند که در محدوده‌های استاندارد سنگدانه‌های ریز یا درشت (استاندارد ملی ایران ۳۰۲) و یا در محدوده مطلوب مخلوط آن‌ها قرار گیرند. بهرحال می‌توان با سنگدانه‌هایی که دانه‌بندی آن‌ها در محدوده استاندارد نیست، تا حد امکان مخلوطی را بوجود آورد که مخلوط سنگدانه در محدوده دانه‌بندی مطلوب باشد.

در این روش، دانه‌بندی مطلوب بتن بر اساس رابطه فولر ـ تامسون اصلاح شده بدست آمده است. در زیر رابطه اصلاح شده فولر- تامسون، در صورتی‌که مرز سنگدانه و مواد ریز دانه ۰/۰۷۵ میلی‌متر فرض شود، ارایه شده‌است (رابطه (۶-۱)):

$$P = \frac{d^n - 0.075^n}{D^n - 0.075^n} \qquad (۶-۱)$$

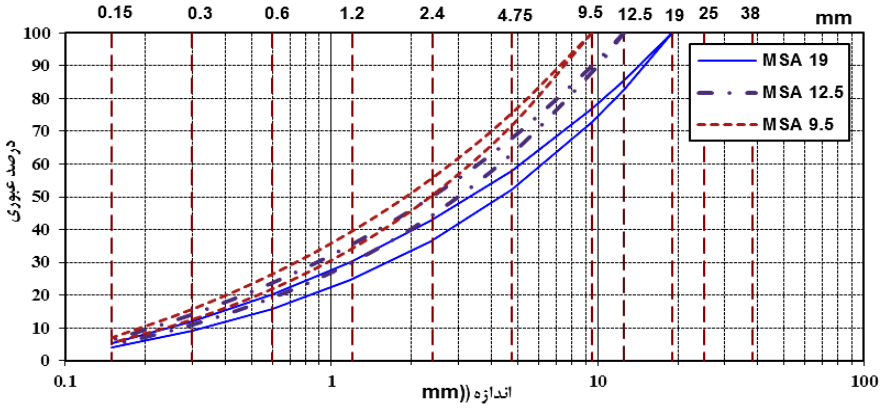
که در آن P درصد گذشته تجمعی از الک d (به صورت درصد حجمی)، D حداکثر اندازه سنگدانه و n توانی است که مقادیر توصیه شده آن برای قطعات مختلف و رده روانی بتن خودتراکم در جدول ۶-۵ ارائه شده است.

جدول ۶-۵ مقدار n (توان منحنی فولر و تامسون اصلاح شده) با توجه به مشخصات عضو و کاربرد بتن خودتراکم

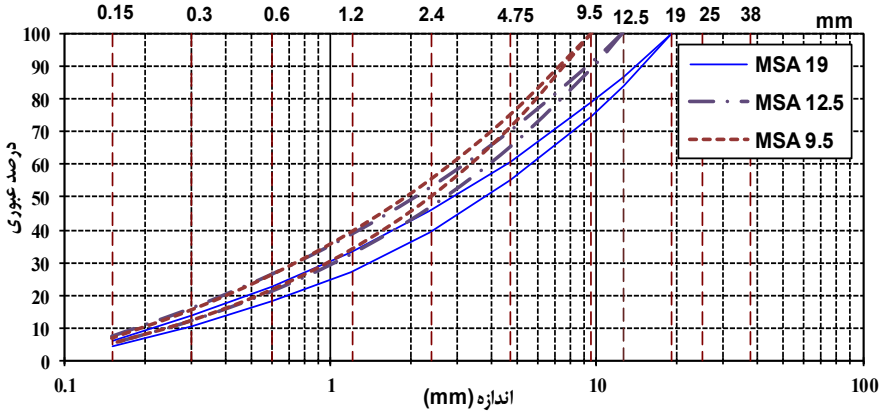
ردیف	موارد کاربرد پیشنهادی مناطق مختلف	توان منحنی پایینی منطقه مطلوب دانه‌بندی	توان منحنی بالایی منطقه مطلوب دانه‌بندی
۱	بتن خودتراکم با جریان اسلامپ بین ۵۰۰ تا ۵۵۰ میلی‌متر* جهت ستون‌ها و شالوده‌ها با حجم میلگرد کم و یا قطعات غیر نازک با طول حرکت کم و شمع‌ها یا بتن‌ریزی زیر آب	۰/۴	۰/۳
۲	بتن خودتراکم با جریان اسلامپ بین ۵۶۰ تا ۶۵۰ میلی‌متر جهت ستون‌ها و شالوده‌ها با حجم میلگرد متوسط و یا قطعات نازک با طول حرکت متوسط و شمع‌ها یا بتن‌ریزی زیر آب	۰/۳۵	۰/۲۵
۳	بتن خودتراکم با جریان اسلامپ بیشتر از ۶۶۰ میلی‌متر جهت تیر و دال با طول حرکت و حجم میلگرد متوسط	۰/۳	۰/۲
۴	بتن خودتراکم با جریان اسلامپ بیشتر از ۶۶۰ میلی‌متر جهت تیر و دال با طول حرکت زیاد و حجم میلگرد بالا و قطعات نازک	۰/۲۵	۰/۱۵
۵	بتن خودتراکم برای تعمیر سطوح بتنی- بتن خودتراکم بسیار ریز بافت	۰/۲	۰/۱

*بتن با جریان اسلامپ بین ۵۰۰ تا ۵۶۰ میلیمتر ممکن است به تراکم جزئی نیاز داشته باشد.

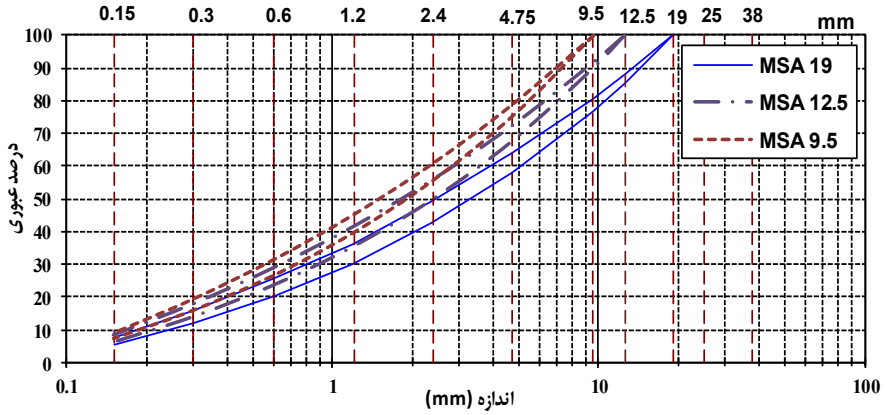
با انتخاب مقدار n از جدول ۶-۵ و جاگذاری در رابطه (۶-۱)، که در آن D (حداکثر اندازه سنگدانه، بر اساس روابط آبا یا مشخصات فنی پروژه) و d اندازه هر الک می‌باشد می‌توان منحنی دانه‌بندی مطلوب را ترسیم نمود. در شکل ۶-۱ الی شکل ۶-۵ محدوده‌های دانه‌بندی مطلوب برای حداکثر اندازه سنگدانه ۱۹ میلی‌متر و هر یک از کاربردهای تعریف شده در جدول ۶-۵ ارایه شده است. بدیهی است برای حداکثر اندازه‌های دیگر باید منحنی‌های متناسب رسم شود.



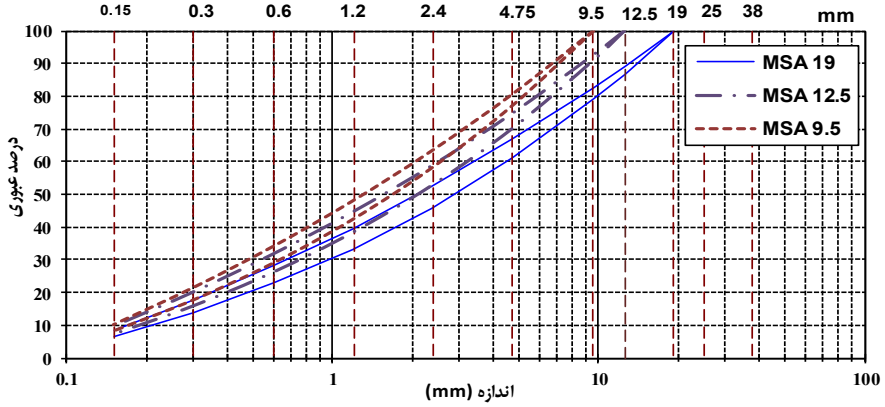
شکل ۶-۱ منحنی دانه‌بندی پیشنهادی برای حداکثر اندازه‌های ۱۹، ۱۲/۵ و ۹/۵ میلی‌متر و مقادیر n=0.3, 0.4



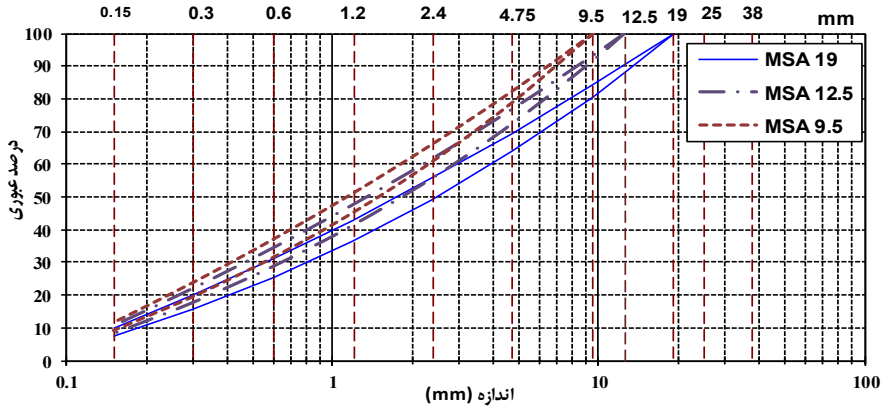
شکل ۶-۲ منحنی دانه‌بندی پیشنهادی برای حداکثر اندازه‌های ۱۹، ۱۲/۵ و ۹/۵ میلی‌متر و مقادیر n=0.25, 0.35



شکل ۶-۳ منحنی دانه‌بندی پیشنهادی برای حداکثر اندازه‌های ۱۹، ۱۲/۵ و ۹/۵ میلی‌متر و مقادیر n=0.2, 0.3



شکل ۶-۴ منحنی دانه‌بندی پیشنهادی برای حداکثر اندازه‌های ۱۹، ۱۲/۵ و ۹/۵ میلی‌متر و مقادیر n=0.15, 0.25



شکل ۶-۵ منحنی دانه‌بندی پیشنهادی برای حداکثر اندازه‌های ۱۹، ۱۲/۵ و ۹/۵ میلی‌متر و مقادیر n=0.10, 0.20

- ***شکل، گوشه‌دار بودن و بافت***

شکل و گوشه‌دار بودن سنگدانه‌ها می‌تواند به طور قابل‌توجهی بر کارایی موثر باشند. مقدار فضای بین سنگدانه‌ها (در حالت متراکم)، و اصطکاک بین ذرات سنگدانه‌ها از جمله پارمترهایی هستند که تحت تأثیر قرار می‌گیرند. اگرچه سنگدانه‌های هم‌بُعد و به خوبی گرد شده برای کارایی مناسب‌تر هستند، ولی سنگدانه‌هایی با هر شکل و زاویه‌ای را می‌توان با افزایش حجم خمیر در SCC بکار برد. هنگامی که حجم خمیر برای یک سنگدانه کافی باشد، کارایی بتن را می‌توان با تنظیم ترکیب خمیر بیشتر افزایش داد. «بافت» کمترین اثر را بر کارایی دارد. معمولاً بررسی ظاهری برای مشخص کردن شکل و گوشه‌دار بودن سنگدانه کافی است.

۶-۲-۳-۴ گام چهارم : تعیین سهم سنگدانه درشت و سنگدانه ریز

نسبت اختلاط سنگدانه‌های ریز و درشت بر اساس منحنی انتخاب شده در گام سوم بدست می‌آید. اگرچه ممکن است با سنگدانه‌هایی که دارای منحنی دانه‌بندی مطابق استاندارد ملی ایران ۳۰۲ نیز نمی‌باشند به ترکیب مناسب دست یافت (از طریق ترکیب چند سنگدانه با دانه‌بندی مختلف یا اصلاح دانه‌بندی آن‌ها)، ولی توصیه می‌شود برای سهولت و امکان انطباق بهتر با منحنی‌های ترکیبی ارایه شده، از سنگدانه‌های ریزی مطابق با الزامات جدول ۱ استاندارد ملی ایران ۳۰۲، استفاده شود.

بر این اساس ترکیب سنگدانه‌های ریز و درشت باید بگونه‌ای انتخاب شود که تا حد امکان و با یکنواختی مناسب در محدوده منحنی‌های یکی از ردیف‌های جدول ۶-۵ (شکل ۶-۱ الی شکل ۶-۵) باشد.

بدیهی است نمی‌توان انتظار داشت که در کارهای اجرایی بطور کامل به دانه‌بندی مطلوب دست یافت. معمولاً سعی می‌شود با توجه به دانه‌بندی سنگدانه ریز و بخش ریز منحنی دانه‌بندی مطلوب ابتدا سهم تقریبی سنگدانه ریز را بدست آورد و سپس سهم‌های سنگدانه درشت را فرض نمود تا سریع‌تر به نتیجه رسید.

ناپیوستگی در مخلوط حاصله یا قطع منحنی مطلوب با زوایای قابل توجه، مطلوب نیست. بدیهی است اگر نتوان به محدوده مورد نظر نزدیک شد و رعایت آن الزامی باشد، تعویض سنگدانه (به ویژه سنگدانه ریز) ضرورت خواهد داشت و یا لازم است دانه‌بندی موجود با بکارگیری سنگدانه دیگری اصلاح شود.

با توجه به سهم‌های تعیین شده برای هر یک از سنگدانه‌های مورد استفاده، دانه‌بندی مخلوط سنگدانه‌ها بدست می‌آید.

۶-۲-۳-۵ گام پنجم: تعیین درصد فضای خالی مخلوط سنگدانه در حالت متراکم شده با میله

از آن‌جایی‌که اساس این روش طرح مخلوط، بر معلق بودن ذرات سنگدانه در خمیر می‌باشد، تعیین میزان تخلخل مابین دانه‌ها برای محاسبه مقدار خمیر لازم، بسیار با اهمیت است. اگرچه روش‌های متعددی برای تعیین فضای خالی ارایه شده است ولی هریک دارای محدودیت‌هایی می‌باشند. در این روش با توجه به میزان حساسیت مورد نیاز و شرایط و امکانات

کشور، از روش استاندارد ملی ایران به شماره ۴۹۸۱ استفاده شده است. در این روش ابتدا چگالی انبوهی سنگدانه‌ها در حالت متراکم شده با میله از رابطه (۶-۲) محاسبه و سپس درصد تخلخل مابین دانه‌ها از رابطه (۶-۳) بدست می‌آید.

$$M=(G-T)/V \quad (۶-۲)$$

$$\text{درصد فضای خالی} = 100[(S*W)-M]/(S*W) \quad (۶-۳)$$

که در آن‌ها:

M: چگالی انبوهی خشک سنگدانه‌ها، kg/m^3

G: جرم سنگدانه خشک و ظرف پیمانه، kg

T: جرم ظرف پیمانه، kg

V: حجم ظرف پیمانه، m^3

S: چگالی (وزن مخصوص) خشک سنگدانه‌ها طبق استاندارد ملی ایران ۴۹۸۰ و ۴۹۸۱، kg/m^3

W: چگالی آب (در دمای متعارف معادل kg/m^3 ۹۹۸)

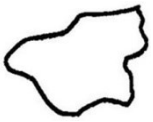
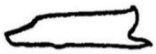
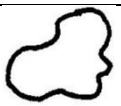
۶-۲-۳-۶ گام ششم: انتخاب رده شکل و گوشه‌داری سنگدانه‌ها (Rs-A)

در این گام، ابتدا با توجه به شکل و گوشه‌داری سنگدانه‌ها یک رده از ۱ تا ۵ اختصاص داده می‌شود. در جدول ۶-۶ رده‌بندی سنگدانه‌ها برای این منظور در مقیاس ۱ تا ۵، و با در نظر گرفتن شاخص شکل و میزان گوشه‌دار بودن ارایه شده است. (یک معدن ممکن است سنگدانه‌هایی با شکل خوب داشته باشد اما از نظر گوشه‌دار بودن مناسب نباشد یا برعکس. در یک رده‌بندی واحد، هم شکل و هم گوشه‌دار بودن سنجیده و در رده‌بندی در نظر گرفته می‌شود). برای هر ترکیب دانه‌بندی باید رده‌بندی مجزا انجام شود. به عنوان مثال، یک سنگدانه درشت خرد شده با امتیاز ۵ که با یک ماسه طبیعی خوش‌شکل با امتیاز ۱ مخلوط شده است رده‌بندی ترکیبی آن، ۳ خواهد بود. در صورت امکان، داده‌های تاریخی در مورد عملکرد یک مجموعه خاص در SCC بهترین راهنما برای تخصیص شکل ظاهری و رده‌بندی است.

برای انتخاب سنگدانه مناسب باید منابع مختلف سنگدانه را در نظر گرفت (برای ریزدانه و درشت‌دانه). مخلوط‌های مختلف سنگدانه‌ها باید از نظر حداکثر اندازه سنگدانه، دانه‌بندی، شکل و گوشه‌دار بودن ارزیابی شوند. مقدار حفرات در حالت متراکم، شکل ظاهری و رده گوشه‌دار بودن باید در همه ترکیب‌ها تعیین شود. اندازه‌گیری مقدار فضای خالی در حالت متراکم در یک سری از ترکیب‌ها (مانند محدوده‌ای از نسبت ریزدانه به کل سنگدانه S/A) می‌تواند برای شناسایی حداقل مقدار فضای خالی استفاده شود. حداقل مقدار فضای خالی (حداکثر چگالی انباشتگی) ممکن است در همه موارد بهینه نباشد زیرا ملاحظات دیگر، مانند توانایی عبور، مقاومت در برابر جداشدگی ممکن است مهمتر باشند.

توصیه می‌شود که از سنگدانه‌هایی استفاده شود که دارای رتبه ۱ و یا ۲ و یا حداکثر ۳ (گرد گوشه بودن و یا نیمه گرد گوشه) باشند.

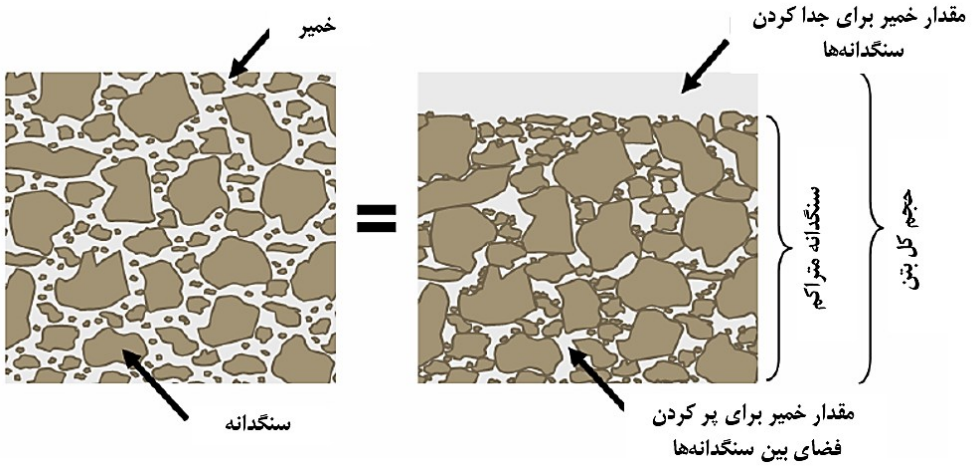
جدول ۶-۶ تعیین رده و امتیاز شکل سنگدانه‌ها

	رده شکل و گوشه‌داری (Rs-A)				
	شکل مناسب، خوب گرد شده ←				→ شکل ضعیف و خیلی گوشه‌دار
	۱	۲	۳	۴	۵
شکل	تقریباً ابعاد مساوی	 انحراف از ابعاد مساوی	اکثر ذرات ابعاد مساوی ندارند	تخت یا تطویل شده	 اکثر ذرات تخت و تطویل شده
گوشه‌داری	گرد شده مناسب	گرد شده	 بخشی گرد شده، بخشی گوشه‌دار	گوشه‌دار	خیلی گوشه‌دار
مثال	اکثر سنگدانه‌های رودخانه‌ای	بخشی شکسته شده و بخشی رودخانه‌ای	به خوبی شکسته شده با گوشه‌های مساوی یا بیشتر از ۹۰°	شکسته شده بعضی از گوشه‌ها بیشتر از ۹۰°	شکسته شده با گوشه‌های زیادی مساوی یا بیشتر از ۹۰°

۶-۲-۳-۷ گام هفتم: محاسبه حجم خمیر

روش حداقل حجم خمیر برای اطمینان از قابلیت پرکردن و قابلیت عبور است. بدون حداقل حجم خمیر، و در نظر گرفتن ترکیب خمیر (مانند نسبت w/p، استفاده از VMA و غیره) نمی‌توان به خواص کارپذیری SCC دست یافت. حجم خمیر اضافی بیش از حداقل مورد نیاز برای پر کردن یا عبور، قابلیت ابقا را افزایش می‌دهد.

حداقل حجم خمیر برای توانایی پر کردن در شکل ۶-۶ نشان داده شده است. بتن بدون حداقل حجم خمیر لازم برای توانایی پر کردن، ممکن است بدون توجه به میزان استفاده از فوق روان‌کننده، به جریان اسلامپ مورد نظر نرسد، ممکن است بسیار چسبناک باشد، ممکن است دچار آب‌انداختگی و جدایی شدید شود یا ممکن است خشن به نظر برسد.



شکل ۶-۶ **مفهوم حداقل خمیر و خمیر اضافی**

برای پر کردن فضای خالی بین سنگدانه‌ها در حالت متراکم، نیاز به مقدار مشخصی خمیر می‌باشد. اگر فقط این مقدار خمیر در مخلوط باشد، بتن به دلیل اصطکاک قابل توجه بین ذرات سنگدانه جاری نمی‌شود. بنابراین باید خمیر اضافی برای جدا کردن سنگدانه‌ها وجود داشته باشد. این خمیر که برای ایجاد فاصله بین سنگدانه‌ها استفاده می‌شود تا با کاهش اصطکاک بین دانه‌های سنگدانه‌ها باعث خاصیت روانکاری می‌شود.

مقدار کل خمیر برای پر کردن، شامل مجموع خمیر برای پر کردن فضاهای خالی و ایجاد فاصله بین دانه‌ها است، که در رابطه (۶-۴) ارایه شده است:

$$V_{paste\ filling\ ability} = V_{paste\ voids} + V_{paste\ spacing} \quad (۶-۴)$$

حداقل مقدار خمیر مورد نیاز برای ایجاد فاصله بین سنگدانه‌ها در درجه اول به شکل و گوشه‌دار بودن مخلوط سنگدانه‌های ریز و درشت، بستگی دارد و از ۸ درصد برای سنگدانه‌های هم اندازه و کاملا گرد (رده ۱ از نظر شکل ظاهری و گوشه‌داری) تا ۱۶ درصد برای سنگدانه‌های بد شکل و گوشه‌دار (رده ۵ از نظر ظاهری و گوشه‌داری)، متغیر است (سنگدانه‌هایی با خواص بسیار ضعیف از نظر شکل و گوشه‌داری ممکن است به بیش از ۱۶ درصد خمیر نیاز داشته باشند). حداقل حجم خمیر برای توانایی پر کردن، تا حد زیادی مستقل از اجزای تشکیل دهنده خمیر است (به شرطی که ترکیب خمیر در محدوده مخلوط بتن‌های خوتراکم معمولی باشد). حجم کل خمیر برای توانایی پر کردن (بیان شده به عنوان درصد حجم بتن) را می‌توان به عنوان تابعی از حجم خمیر برای فاصله (بیان شده به عنوان درصد حجم بتن) و درصد فضاهای خالی در سنگدانه متراکم شده ($\%voids_{compacted_agg}$) محاسبه کرد. همان‌گونه که در رابطه (۶-۵) نشان داده شده است، به عنوان درصدی از حجم کل دانه بیان می‌شود:

$$V_{paste\ filling\ ability} = 100 - \frac{\left(100\text{-}V_{paste\ spacing}\right)\left(100 - \%voids_{compacted_{agg}}\right)}{100} \quad (۵\text{-}۶)$$

که $\%voids_{compacted_agg}$ برابر درصد فضای خالی بین سنگدانه‌ها در حالت متراکم شده با میله است که از گام پنجم بدست می‌آید. حجم خمیر لازم جهت پر کردن فضای بین سنگدانه‌ها ($V_{paste\ spacing}$) نیز از رابطه (۶-۶) محاسبه می‌شود:

$$V_{paste\ spacing} = 8 + (\frac{16-8}{4})(R_{s-a} - 1) = 8 + 2(R_{s-a} - ۱) \quad (۶\text{-}۶)$$

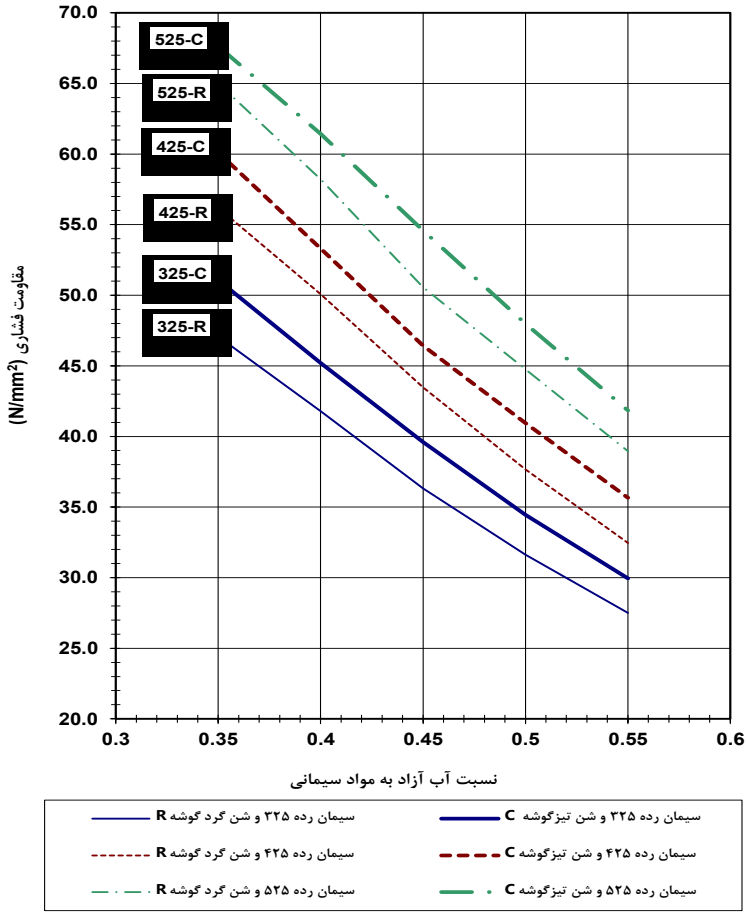
پس از محاسبه حجم خمیر جهت اطمینان از قابلیت پرکنندگی کافی بتن خودتراکم، باید حجم خمیر ۵ تا ۲۰ درصد بیشتر از حجم محاسبه شده در نظر گرفته شود. این مقدار برای بتن‌های حاوی مواد اصلاح کننده گرانروی حدود ۵ تا ۷ درصد و برای بتن‌های حاوی مواد پودری ۱۰ تا ۲۰ درصد توصیه می‌شود، برای بتن‌های ترکیبی نیز بین ۶ تا ۱۵ درصد می‌تواند متغیر باشد. برای مثال اگر مقدار حجم خمیر از رابطه (۶-۶) برابر ۳۴ بدست آمد، می‌توان آن را بین ۳۵/۷ تا ۴۰/۸ در نظر گرفت. این افزایش به قابلیت عبور مورد نظر و حجم انبوهی میلگردهای قطعه و ترکیب خمیر بستگی دارد.

۶-۲-۳-۸ گام هشتم: تعیین نسبت آب به سیمان

در این گام، نسبت آب آزاد به سیمان با توجه به نوع و رده مقاومتی سیمان و شکستگی سنگدانه درشت، از شکل ۶-۷ بدست می‌آید.

نسبت آب به سیمان را می‌توان با توجه به درصد شکستگی متوسط سنگدانه‌های درشت با درون‌یابی بین منحنی‌های C و R بدست آورد. چنانچه از دو یا چند نوع سنگدانه درشت با درصد شکستگی‌های مختلف استفاده شود، میانگین درصد شکستگی درشت‌دانه‌ها (شن‌ها) با توجه به سهم آن‌ها در مخلوط سنگدانه قابل محاسبه است. لازم به ذکر است که برای سهولت از تأثیر ناچیز تیزگوشه‌گی سنگدانه‌های ریز بر مقاومت بتن و نسبت آب به سیمان صرفنظر شده است.

در صورتی که مقاومت فشاری سیمان مورد استفاده که طبق روش آزمایش ملات ماسه-سیمان (مطابق روش استاندارد ملی ایران به شماره ۳۹۳) بدست آمده، کمتر یا بیشتر از رده‌های مقاومتی داده شده در شکل ۶-۷ باشد، نسبت آب به سیمان، از درون‌یابی یا برون‌یابی منحنی‌های ارایه شده در شکل ۶-۷ محاسبه خواهد شد. در منحنی‌های شکل ۶-۷، مقدار هوای ناخواسته بتن در حدود ۱ تا ۲ درصد فرض شده است.



شکل ۶-۷ رابطه نسبت آب به سیمان و مقاومت فشاری در بتن‌های خودتراکم

هوای عمدی معمولاً مانند هوای غیرعمدی، مقاومت فشاری بتن را با فرض ثابت بودن نسبت آب به سیمان کاهش می‌دهد. مقدار این کاهش (r_2) در حدود (۱/۵ ± ۴/۵) درصد برای هر یک درصد هوا می‌باشد. این کاهش در نسبت‌های آب به سیمان کم، بیشتر و در نسبت‌های آب به سیمان زیاد، کمتر خواهد بود (در محدوده نسبت آب به سیمان بین ۰/۳۵ تا ۰/۵۵).

چنانچه مقاومت فشاری بتن را ثابت در نظر بگیریم، لازم است نسبت آب به سیمان را در بتن حبابدار کمتر در نظر گرفت. این کاهش نسبت آب به سیمان (r_1) در حدود (۱/۵ ± ۳/۵) درصد برای هر ۱ درصد هوای بتن می‌باشد. برای بتن‌هایی با نسبت آب به سیمان کمتر این کاهش باید بیشتر و برای نسبت آب به سیمان بیشتر باید کمتر منظور شود (در محدوده نسبت آب به سیمان اولیه بتن معمولی بین ۰/۴۵ تا ۰/۶۵).

در صورت استفاده از مواد حباب‌زا، برای یافتن نسبت آب به سیمان بتن به دو طریق می‌توان عمل کرد. روش اول استفاده از شکل ۶-۷ و بدست آوردن نسبت آب به سیمان برای بتن معمولی بدون حباب هوای عمدی است و سپس درصد کاهش نسبت آب به سیمان بسته به مقدار درصد هوای عمدی a_2 (با توجه به حدود کاهش r_1 برای این نسبت آب به سیمان) ضربدر این کاهش برای (درصد هوای عمدی) اعمال می‌گردد.

بتن حبابدار= w/c بتن معمولی (۷-۶) $w/c\ (1- r_1 . a_2)$

(r_1 درصد کاهش نسبت آب به سیمان به مقدار ۱/۵± ۲/۵ درصد به ازای ۱ درصد هوا) می‌باشد.

روش دوم یافتن مقاومت هدف مجازی طرح مخلوط برای بتن حبابدار f_{cm}' با توجه به مقاومت هدف طرح برای بتن بدون حباب هوای عمدی است. به این منظور از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$\frac{f_{cm}}{1-r_2 a_2} = f_{cm}' \qquad (۸-۶)$$

r_2 برابر میزان کاهش مقاومت بتن حبابدار به ازای ۱ درصد هوای عمدی است که در بازه (۱/۵ ± ۴/۵) درصد قرار دارد. a_2 درصد هوای عمدی بتن می‌باشد (بصورت اعشاری).

۶-۲-۳-۹ گام نهم: تعیین مقدار و ترکیب خمیر

پس از تعیین حجم خمیر، نوبت به انتخاب ترکیب خمیر برای دستیابی به کارایی و خواص سخت شده مورد نیاز می‌رسد. انتخاب ترکیب خمیر شامل انتخاب مقادیر نسبی آب، پودر، هوا و ترکیب پودر است (جدول ۶-۷). انتخاب ترکیب خمیر مرحله‌ای است که در آن تمایز بین SCC نوع پودری و نوع VMA ایجاد می‌شود (جدول ۶-۱۰).

SCC نوع پودری شامل حجم به نسبت زیاد مواد معدنی پودری خنثی یا فعال (مواد جایگزین سیمان) و نسبت آب به پودر کم است.

SCC دارای اصلاح کننده گرانروی دارای حجم به نسبت کم یا بدون مواد معدنی پودری خنثی یا فعال و نسبت آب به پودر بیشتر است و بنابراین، برای اطمینان از پایداری باید از ماده اصلاح کننده گرانروی (VMA) نیز استفاده شود. شایان توجه است با توجه به اینکه «حداقل حجم خمیر» برای «قابلیت پرکردن» به دانه‌بندی و مقدار فضای خالی مرتبط است، در هر دو نوع بتن خودتراکم (دارای پودر و VMA)، حداقل حجم خمیر مقدار ثابتی است.

جدول ۶-۷ راهنمای انتخاب ترکیب خمیر

اجزای اصلی خمیر	پارامتر	عملکرد
آب	آب به سیمان	خواص بتن سخت شده در سنین اولیه
	آب به مواد سیمانی	خواص بتن سخت شده در دراز مدت
	آب به پودر	کارایی
پودر	سیمان	مقاومت و دوام
	مواد جایگزین سیمان	بهبود کارایی و دوام، کاهش حرارت هیدراسیون، کاهش هزینه
	مواد معدنی خنثی	بهبود کارایی، کاهش هزینه، کاهش حرارت هیدراسیون
هوا	درصد هوا	دوام

- ***مقدار آب:***

مقدار آب با انتخاب محدودیت‌هایی برای نسبت آب به سیمان (خواص سخت شدن اولیه)، نسبت آب به مواد سیمانی (دوام و خواص سخت‌شده درازمدت) و نسبت آب به پودر (کارایی) تعیین می‌شود. میزان زیاد مواد پودری به همراه استفاده از مقادیر زیاد فوق‌روان کننده، ممکن است w/c یا w/cm مورد نیاز برای یک مقاومت فشاری معین را در مقایسه با بتن معمولی بدون استفاده از فوق‌روان کننده یا مقدار کم آن را افزایش دهد. اگر پودر فقط از سیمان و مواد جایگزین سیمان تشکیل شده باشد، w/p برابر w/cm است و مقدار کل آب در واحد حجم بتن (به عنوان مثال kg/m^3) معمولاً مشابه بتن‌های معمولی است. w/p معمولاً از ۰/۳۰ تا ۰/۴۵ متغیر است (اگرچه می‌توان از مقادیر بیشتر w/p نیز استفاده کرد).

با افزایش w/p نیاز به فوق‌روان کننده برای دستیابی به جریان اسلامپ ثابت، کاهش می‌یابد و گرانروی پلاستیک را کاهش می‌دهد. با افزایش حجم خمیر برای یک سنگدانه معین، گرانروی خمیری باید کاهش یابد. به عنوان اولین تقریب، مقدار کل آب در واحد حجم بتن باید با افزایش حجم خمیر ثابت نگه داشته شود.

- ***ترکیب پودر:***

با توجه به مقدار به نسبت زیاد مواد پودری که برای دستیابی به کارایی SCC لازم است، اغلب لازم است که مواد جایگزین سیمان یا پرکننده‌های معدنی خنثی را به عنوان بخشی از پودر اضافه کنید. مقدار پودر لازم باید حاوی حداقل مقدار سیمان برای استحکام و دوام باشد. مواد جایگزین سیمان را می‌توان برای بهبود کارایی و دوام، کاهش گرمای هیدراسیون و کاهش هزینه استفاده کرد. پرکننده‌های معدنی ریزتر از سیمان معمولاً کارایی را افزایش می‌دهند و ممکن است به افزایش مقاومت اولیه کمک کنند. پرکننده‌های معدنی خنثی تقریباً هم اندازه سیمان معمولاً تأثیر کمتری بر کارایی دارند و به افزایش مقاومت نیز کمک نمی‌کنند.

- ***مقدار هوا:***

الزامات مقدار هوا برای بتن خودتراکم - یعنی مقدار کل هوا، اندازه حباب و فاصله حباب‌ها - شبیه به بتن‌های معمولی است.

در جدول ۶-۸ تاثیر اجزای بتن خودتراکم بر خواص آن را نشان می‌دهد. برای دستیابی به کارایی مناسب، ترکیب خمیر باید تنظیم شود تا به جریان اسلامپ و گرانروی مناسب برسد. جریان اسلامپ با تغییر میزان فوق‌روان‌کننده، تنظیم می‌شود. نیاز به فوق‌روان کننده برای یک جریان اسلامپ معین را می‌توان با تغییر ترکیب خمیر، حجم خمیر و سنگدانه‌ها کاهش داد. گرانروی تعیین کننده سهولت قرار دادن بتن است و نباید خیلی کم (پایداری ضعیف) یا خیلی زیاد (چسبنده و منسجم) باشد. برای ارزیابی اثرات نسبی اجزای مختلف، می‌توان آزمایش‌هایی را روی خمیر یا ملات انجام داد. با این حال، ترکیب خمیر نهایی باید در مخلوط‌های بتن مورد بررسی قرار گیرد زیرا:

(۱) ترکیب خمیر مورد نیاز به ویژگی‌های سنگدانه و حجم خمیر بستگی دارد.

(۲) خمیر آزمایش شده جدا از بتن رفتار متفاوتی با خمیر مشابه در بتن دارد.

آزمایش‌های مربوط به توانایی پر شدن، توانایی عبور و مقاومت در برابر جداشدگی باید قبل از انتخاب نسبت‌های مخلوط نهایی انجام شود.

جدول ۶-۸ تاثیر اجزا و پارامترهای طرح مخلوط بر کارایی بتن خودتراکم

		جریان اسلامپ	گرانروی	توانایی پرکردن	توانایی عبور	مقاومت در برابر جداشدگی
سنگدانه	حداکثر اندازه ↑	↑	↑	↓↑	↓	↓
	دانه‌بندی	افزایش چگالی تراکم، بافت درشت‌تر یا دانه‌بندی گسسته ↑	افزایش چگالی تراکم، دانه‌بندی گسسته ↓	↓↑	دانه‌بندی با بافت ریزتر ↑	دانه‌بندی یکنواخت یا بافت ریز تر ↑
	بهبود شکل	↑	↓	↑	↑	↓
	افزایش تیزگوشه‌گی	↓	↑	↓	↓	↑
حجم خمیر ↑		↑	↓	↑	↑	↑
ترکیب اجزا خمیر	نسبت آب به پودر ↑	↑	↓	↑	↑	نه خیلی زیاد و نه خیلی کم ↑
	پوزولان طبیعی	↓	↓	↓↑	↓	↑
	سرباره	↓↑	↓↑	↓↑	↓↑	↓↑
	دوده‌سیلیس (درصد کم)	↓↑	↓	↑	↑	↓↑
	دوده‌سیلیس (درصد زیاد)	↓	↑	↓↑	↓	↓↑
	اصلاح کننده گرانروی	↓	↑	↑	↓↑	↑
	فوق‌روان‌کننده	↑	↓	↑	↑	↓
	حباب هوا	↓↑	↓	↑	↑	↓↑

یادآوری:

۱- برای موارد فوق استثناهایی وجود دارد.

۲- جریان اسلامپ با تنش جاری شدن رابطه معکوس دارد. گرانروی با T50 یا قیف V همبستگی مستقیم دارد.

۳- روابط نشان داده شده در این جدول برای بتن خودتراکم معمول صادق است ولی ممکن است برای شرایط شدیدتر صادق نباشد. بعنوان مثال افزایش خیلی زیاد نسبت آب به پودر، باعث بهبود توانایی پرکردن یا عبور نمی‌شود.

در این مرحله فارغ از اینکه بتن خودتراکم نوع پودری است یا دارای اصلاح کننده گرانروی و یا ترکیبی از هر دو، ابتدا با استفاده از جدول ۶-۹ مقدار آب آزاد اولیه، با توجه به مقاومت فشاری متوسط هدف تخمین زده می‌شود.

جدول ۶-۹ تخمین مقدار آب آزاد اولیه با توجه به رده مقاومت فشاری و حداکثر اندازه سنگدانه

حداکثر اندازه سنگدانه، mm	مقاومت فشاری، MPa			
	۲۵	۳۵	۴۵	۵۵
۱۹/۵	۱۷۷	۱۷۲	۱۶۸	۱۶۴
۱۲/۵	۱۸۵	۱۸۰	۱۷۵	۱۷۰

سپس از رابطه (۶-۹) مقدار مواد پودری (P) تعیین می‌شود:

$$\left(\frac{P}{\rho_P}\right) + (W) + V_{\mathrm{a}} = (Ex) * V_{paste\ filling\ ability} \qquad (۹-۶)$$

که در آن:

ρ_P : متوسط چگالی مواد پودری (با توجه به ترکیب مواد پودری و چگالی آن‌ها می‌توان چگالی متوسط را محاسبه نمود؛

Ex : ضریبی است برای در نظر گرفتن حجم خمیر اضافی و ایجاد قابلیت پرکنندگی که بین ۱/۰۰۵ تا ۱/۰۶ درصد بسته به نوع بتن خودتراکم از نظر پودری یا دارای VMA (توصیه جدول ۶-۱۰) لحاظ می‌شود. مقدار این ضریب همچنین به قابلیت عبور مورد نظر، تراکم میلگردهای در قطعه و ترکیب خمیر نیز بستگی دارد.

$V_{paste\ filling\ ability}$: حجم خمیر محاسبه شده است که از گام هفتم بدست می‌آید.

W : مقدار آب آزاد که با استفاده از جدول ۶-۹ تخمین زده می‌شود، ممکن است مقدار آب تخمین زده شده، پس از محاسبه مقدار مواد پودری و مقدار مواد سیمانی یا پس از ساخت مخلوط آزمایشی و عدم دستیابی به مقاومت فشاری هدف یا کارایی مناسب نیز نیاز به اصلاح داشته باشد.

جدول ۶-۱۰ راهنمای انتخاب مقدار مواد پودری با توجه به نوع بتن خودتراکم

نوع بتن خودتراکم	مقدار مواد پودری	
	درصد وزنی	وزن (kg/m^3)
فقط دارای مواد پودری	۱۶ تا ۱۹	۵۰۰ تا ۶۰۰
فقط دارای افزودنی VMA	۹/۵ تا ۱۶	۳۰۰ تا ۵۰۰
ترکیبی (دارای پودر و افزودنی VMA)	حداقل ۱۳	حداقل ۴۱۰

با تخمین مقدار آب، مقدار مواد افزودنی معدنی خنثی (فیلر) از روابط (۶-۱۰) و (۶-۱۱) بدست می‌آید:

مقدارسیمان معادل $\mathrm{C_e} = \frac{W}{\frac{W}{C}}$ (۱۰-۶)

مواد افزودنی معدنی خنثی $= \mathrm{P} - \mathrm{C_e}$ (۱۱-۶)

که درآن:

W/C : نسبت آب به سیمان بدست آمده از شکل ۶-۷ (گام هشتم)؛

P : کل مواد پودری بدست آمده از رابطه (۶-۹)؛

C_e: مقدار سیمان معادل که با توجه به بند ۴-۳-۱۲-۱ تعیین می‌شود؛

در صورتی که مقادیر مواد سیمان و مواد افزودنی معدنی خنثی بدست آمده خارج از بازه‌های پیشنهادی و اجرایی باشد باید با اصلاح ضریب Ex و مقدار آب، نسبت به اصلاح این مقادیر اقدام نمود.

در مواردی‌که بنا به الزامات دوام و یا موارد اجرایی و اقتصادی، استفاده از مواد جایگزین سیمان پیش‌بینی شده باشد باید با توجه به موادر زیر نسبت به تعیین مقدار سیمان و مواد جایگزین سیمان (دوده سیلیسی، سرباره کوره آهنگدازی، پوزولان‌های طبیعی، خاکستر بادی و متاکائولن) و همچنین مقدار آب اقدام نمود:

- ***تعریف ضریب تاثیر k (تاثیر مواد جایگزین سیمان)***

استفاده از ضریب تصحیح k فقط در مواردی که از مواد جایگزین سیمان در خمیر استفاده می‌شود کاربرد دارد، بنابراین در بتن‌های خودتراکمی که فقط از مواد معدنی خنثی، به تنهایی یا در ترکیب با مواد اصلاح کننده گرانروی استفاده می‌شود، کاربرد ندارد.

با توسعه کاربرد مواد جایگزین سیمان در انواع بتن و نتایج تحقیقات انجام شده در زمینه تاثیر استفاده از این مواد در بهبود دوام درازمدت و کوتاه مدت بتن، در برخی مراجع بین المللی ضریبی را به نام ضریب تاثیر استفاده از مواد جایگزین سیمان تعریف نموده‌اند. با اعمال این ضریب می‌توان تا حد زیادی تاثیر استفاده از این مواد را در بهبود عملکرد دوام و همچنین تغییر در مقاومت فشاری و تصحیح نسبت آب به مواد سیمانی در نظر گرفت. در همین راستا در تجدید نظر دوم آیین نامه بتن ایران (بند ۶-۴-۳ نشریه ۲-۱۲۰ سازمان برنامه و بودجه) نیز نسبت به تعریف این ضریب اقدام شده است.

در طرح مخلوط بتن‌های خودتراکم، به لحاظ اینکه بطور معمول از مقادیر زیادی از مواد جایگزین سیمان استفاده می‌شود، استفاده از این ضریب می‌تواند در تخمین دقیق‌تر مقاومت فشاری و تصحیح نسبت آب به مواد سیمان کمک کرده و تعداد ساخت مخلوط‌های آزمایشی را کاهش دهد. در ادامه ضمن ارایه رابطه تصحیح سیمان و نسبت آب به مواد سیمانی، بطور مختصر تاثیر استفاده از هر یک از مواد جایگزین سیمان و محدودیت‌های کاربرد آن‌ها تشریح شده است.

$$\text{مقدار سیمان معادل } C_e = \text{مقدار سیمان} + \left(k * \text{مقدار مواد جایگزین سیمان}\right) \qquad (۶-۱۲)$$

که در آن:

k: ضریب تاثیر مواد جایگزین سیمان (مواد افزودنی معدنی فعال) که از جدول ۶-۱۱ بدست می‌آید؛

جدول ۶-۱۱ - ضریب تاثیر مواد جایگزین سیمان، k

نوع ماده جایگزین سیمان	حداکثر درصد جایگزینی نسبت به مواد سیمانی	ضریب اصلاح k	استاندارد ملی یا بین‌المللی
پوزولان طبیعی	۲۵	۰/۴	۳۴۳۲ و ۳۴۳۳
دوده‌سیلیس	۱۰	۴/۰-۲/۰	۱۳۲۷۸
سرباره کوره آهن‌گدازی	۵۰	۰/۸-۰/۴	۳۵۱۷
خاکستر بادی	۲۵	۰/۴-۰/۲	EN 450-1
حداکثر میزان جایگزینی زئولیت ۱۵ درصد و متاکائولن ۲۰ درصد توصیه می‌شود. در مورد ضریب اصلاح k این مواد اطلاعات دقیقی در دست نیست.			

- ***ضریب k برای دوده سیلیس***

چنانچه مقدار جایگزینی دوده سیلیسی مساوی یا کمتر از ۱۰ درصد وزنی مواد سیمانی (۱۱ درصد وزنی سیمان پرتلند) باشد، مقدار k بین ۲ تا ۴ در نظر گرفته می‌شود، به عبارتی هر کیلو دوده سیلیس معادل ۲ تا ۴ کیلو سیمان (از نظر مقاومتی) منظور می‌شود.

در صورتی که نسبت دوده سیلیس به سیمان بیشتر از ۱۱ درصد باشد، مازاد بر آن در این رابطه منظور نمی‌گردد. هر چه دوده سیلیس دارای فعالیت پوزولانی بیشتر و درصد جایگزینی آن کمتر باشد و از طرفی هرچه نسبت آب به سیمان کمتر و رده مقاومتی سیمان زیادتر باشد مقدار k بیشتر خواهد بود و بر عکس.

هر کیلوگرم دوده سیلیسی جایگزین سیمان (بسته به ریزی و اسلامپ مورد نظر) می‌تواند آب آزاد لازم را ۰/۷۵ تا ۱ kg/m^3 افزایش دهد. معمولاً در بتن‌های کم عیار و همچنین در جایگزینی کمتر از ۵ درصد، دوده سیلیس تأثیر چندانی بر افزایش آب طرح مخلوط بتن ندارد. بدیهی است به دلیل پرهیز از افزایش آب و به دلیل پراکندگی بهتر دوده سیلیس در خمیر سیمان و بتن، مصرف افزودنی فوق‌روان‌کننده در بتن حاوی دوده سیلیس ضرورت دارد.

- ***ضریب k برای سرباره کوره آهنگدازی***

چنانچه مقدار جایگزینی سرباره مساوی یا کمتر از ۵۰ درصد وزن مواد چسباننده (۱۰۰ درصد وزنی سیمان پرتلند) باشد، مقدار k بین ۰/۴ تا ۰/۸ خواهد، به عبارت دیگر هر کیلو سرباره موجود از نظر مقاومتی معادل ۰/۴ تا ۰/۸ کیلو سیمان در نظر گرفته می‌شود. هر چه خاصیت هیدرولیکی سرباره بیشتر و جایگزینی آن کمتر و نسبت آب به سیمان نیز کمتر باشد، مقدار k بیشتر خواهد بود و برعکس. بهرحال فرض شده است، سرباره موجود در ایران از پایین‌ترین حد خاصیت هیدرولیکی اما منطبق با استاندارد ASTM C989 و استاندارد ملی شماره ۳۵۱۷ برخوردار باشد و محدوده فوق در این حالت برای k ارائه شده است.

معمولاً هر ۱۰ کیلوگرم سرباره، بسته به ریزی و اسلامپ مورد نظر، می‌تواند آب را به میزان ۰/۵ تا ۱ کیلوگرم در متر مکعب بتن کاهش دهد. بنظر می‌رسد با توجه به سرباره‌های موجود در ایران و سطح ریزی آنها مقدار کاهش ۰/۵ کیلوگرم در متر مکعب منطقی باشد.

- ***ضریب k برای خاکستر بادی معمولی***

چنانچه مقدار جایگزینی خاکستر بادی معمولی مساوی یا کمتر از ۲۵ درصد وزن مواد چسباننده (۳۳ درصد وزنی سیمان پرتلند) و مساوی یا کمتر از ۲۰ درصد وزن مواد چسباننده (۲۵ درصد وزنی سیمان‌های آمیخته) باشد مقدار k بین ۰/۲ تا ۰/۴ خواهد بود به عبارت دیگر هر کیلوگرم از خاکستربادی معادل ۰/۲ تا ۰/۴ کیلوگرم سیمان منظور می‌شود.

در صورتی که مقدار خاکستربادی، بیش از مقادیر فوق باشد مقدار مازاد آن در رابطه فوق منظور نمی‌گردد. هرچه فعالیت پوزولانی خاکستربادی بیشتر و جایگزینی آن کمتر و نسبت آب به سیمان نیز کمتر و رده مقاومتی سیمان بیشتر باشد، k بیشتر خواهد بود. در صورتی که از خاکسترهای بادی ریز یا خیلی ریز با فعالیت زیاد پوزولانی استفاده شود، ممکن است مقدار K بیشتر از مقادیر ذکر شده باشد.

در مورد خاکستربادی معمولی با ریزی تا حدود $۴۰۰ m^2/kg$، به ازای هر ۱۰ کیلوگرم، آب آزاد بتن ۱ تا ۲ کیلوگرم در هر متر مکعب بتن (بسته به روانی بتن) کاهش می‌یابد. این کاهش در مورد خاکسترهای بادی ریز و خیلی ریز به تدریج کمتر می‌شود و حتی ممکن است به صفر برسد یا نیاز به افزایش آب نیز داشته باشد.

- ***ضریب k برای پوزولان‌های طبیعی***

هرچند پوزولان‌های طبیعی از تنوع زیادی برخوردار هستند، اما برای سهولت می‌توان در طرح مخلوط اولیه، مقدار k را مانند خاکستربادی در محدوده ۰/۲ تا ۰/۴ در نظر گرفت. همچنین محدودیت‌های جایگزینی مربوط به خاکستربادی به قوت خود باقی است. در صورتی که مقدار پوزولان‌های طبیعی بیش از حدود ذکر شده برای خاکستربادی باشد مازاد آن در رابطه فوق منظور نمی‌شود. هرچه فعالیت پوزولانی پوزولان طبیعی بیشتر و جایگزینی آن کمتر و هرچه نسبت آب به سیمان کمتر و رده مقاومتی سیمان بیشتر باشد، مقدار k بیشتر خواهد بود.

پوزولان‌های طبیعی ایران بسته به ریزی و نوع آن معمولاً موجب افزایش آب آزاد مورد نیاز بتن می‌گردد. هر ۱۰ کیلوگرم پوزولان طبیعی، آب آزاد لازم را به میزان ۰/۵ تا ۲ کیلوگرم در هر متر مکعب افزایش می‌دهد. زئولیت‌ها ممکن است نقش بیشتری در افزایش آب لازم داشته باشند و به دلیل جذب آب در بین لایه‌های خود، افت اسلامپ بیشتری را نیز باعث می‌شوند و به همین دلایل، نیاز به مصرف روان کننده یا فوق‌روان‌کننده را جدی‌تر می‌کنند.

- ***تعیین درصد هوا***

آخرین جزء خمیر مقدار V_a (درصد هوای بتن) است که یا بر اساس الزامات پروژه برای درصد هوای خواسته (عمدی ایجاد شده) برای دستیابی به الزامات دوام (جدول ۶-۱ نشریه ۲-۱۲۰ سازمان برنامه و بودجه)، یا بر اساس جدول ۶-۱۲ (برای درصد هوای غیر عمدی یا ناخواسته) فرض می‌شود.

شایان ذکر است، مواد جایگزین سیمان (پوزولانی طبیعی و مصنوعی، سرباره‌ای و پودر سنگ) باعث کاهش ایجاد هوای عمدی بتن می‌شوند و لازم است مقدار مواد حبابزا را در چنین مواردی افزایش داد.

جدول ۶-۱۲ مقدار درصد هوای ناخواسته در بتن (Va)

حداکثر اندازه سنگدانه (mm)	۹/۵	۱۲/۵	۱۹	۲۵	۳۸
درصد هوای ناخواسته	۱/۵-۳	۱/۲۵-۲/۵	۱-۲	۰/۷۵-۱/۵	۰/۵-۱

۶-۲-۳-۱۰ گام دهم: تعیین مقدار سنگدانه

پس از محاسبه مقدار ترکیب خمیر، از رابطه زیر که رابطه حجم مطلق است مقدار حجم مخلوط سنگدانه‌ها محاسبه و سپس مقدار سنگدانه‌های ریز و درشت به تفکیک با توجه به سهم آن‌ها که درگام چهارم بدست آمده بودند، محاسبه می‌شود.

$$V_{ssd} = \left(1000 - \frac{C}{\rho_C} - \frac{C_r}{\rho_{Cr}} - \frac{M_a}{\rho_{Ma}} - \frac{W_f}{\rho_{Wf}} - V_a\right) \quad (۱۳-۶)$$

که در آن:

V_{SSD} : حجم کل سنگدانه‌های اشباع با سطح خشک بر حسب kg/m^3

C : جرم سیمان بر حسب kg/m^3

C_r : جرم مواد جایگزین سیمان بر حسب kg/m^3

M_a : جرم مواد معدنی خنثی kg/m^3

W_f : جرم آب آزاد بر حسب kg/m^3

V_a : حجم هوای موجود دربتن (عمدی و ناخواسته) بر حسب dm^3

ρ_c : چگالی سیمان بر حسب kg/dm^3

ρ_{cr} : چگالی مواد جایگزین سیمان بر حسب kg/dm^3

ρ_{Ma} : چگالی مواد معدنی خنثی بر حسب kg/dm^3

ρ_w : چگالی آب بر حسب kg/dm^3 (که معادل ۱ منظور می‌شود)

ρ_{SSD} = چگالی متوسط سنگدانه‌های اشباع با سطح خشک بر حسب kg/dm^3

با توجه به اینکه عبوری از الک ۷۵ میکرون سنگدانه‌ها جزو مواد معدنی خنثی می‌باشند، باید پس از تعیین مقادیر سنگدانه، میزان عبوری از الک ۷۵ میکرون محاسبه و مقدار مواد پودری اصلاح شود.

۶-۲-۴ اصلاح طرح مخلوط

با توجه به اهمیت خواص رئولوژی بتن خودتراکم لازم است تا پس از انجام آزمایش‌های لازم، در صورت عدم دستیابی نتایج حاصله با خواسته‌های مورد نظر، نسبت به اصلاح طرح مخلوط اقدام شود. اگر چه در مرحله این اصلاحات برای دستیابی به خواص رئولوژی می‌باشد، ولی انطباق خواص بتن سخت شده از جمله نتیجه مقاومت فشاری و در صورت نیاز آزمایش‌های دوام نیز باید مورد ارزیابی قرار گرفته و با توجه به رواداری‌های مشخص شده با الزمات خواسته انطباق داشته باشد.

از آنجا که نتایج آزمایش‌های بتن تازه، در زمان کوتاهی پس از ساخت مخلوط آزمون بدست می‌آید اصلاح این موارد در همان روز ممکن می‌گردد، اما اصلاح طرح از نقطه نظر ویژگی‌های بتن سخت شده بطور معمول پس از نتایج ۲۸ روزه امکان پذیر خواهد بود. بنابراین سعی می‌شود حداقل سه طرح مخلوط متفاوت بویژه از نظر نسبت آب به سیمان و یا مقدار افزودنی‌های پودری معدنی جایگزین سیمان ساخته شود تا پس از انجام آزمایش‌های مقاومتی یا دوام در موعد مقرر بتوان طرح مناسبی را در اختیار داشت. هرچند ممکن است این طرح نیازمند اصلاحات جزئی نیز باشد.

برای اصلاح خواص رئولوژی بتن، می‌توان مقدار یا نسبت اختلاط سنگدانه، حجم یا ترکیب خمیر را در جهت مناسب بر اساس تجربه یا با استفاده از منحنی‌ها و روابط ارایه شده در بندهای قبلی را تغییر و مخلوط آزمون جدید را ساخت. بدین منظور می‌توان از راهنمایی ارایه شده در جدول ۶-۱۳ نیز استفاده کرد.

در صورت وجود خطای بیش از ۱ درصد در وزن مخصوص بتن تازه، باید دلیل اختلاف را بدست آورد. خطای زیاد در تعیین چگالی و جذب آب ذرات سنگدانه، تفاوت بیش از ۱ درصد در مقدار هوای بتن و یا خطای زیاد در ساخت مخلوط آزمون و یا اشتباه در محاسبات طرح مخلوط اولیه بتن، می‌تواند دلیل مهمی برای این اختلاف باشد.

برای اصلاح طرح اولیه در ارتباط با مقاومت فشاری بتن، نسبت آب به سیمان را باید در جهت مناسب بر اساس تجربه یا با استفاده از منحنی‌های نسبت آب به سیمان – مقاومت و واسنجی آن‌ها تغییر داد. بهرحال خطای ۵ ± درصد در دستیابی به مقاومت هدف طرح مخلوط بتن قابل صرفنظر کردن است. در مواردی که دوام بتن، تعیین کننده نسبت اب به سیمان طرح مخلوط باشد، بطور طبیعی مقاومت‌ها ممکن است به مراتب بالاتر از مقاومت هدف طرح باشد و نیازی به تغییر نسبت آب به سیمان وجود ندارد.

جدول ۶-۱۳ راهنمای انتخاب یا اصلاح نسبت‌های مخلوط، برای دستیابی به کارایی مورد نظر

مشخصه کارایی	سنگدانه‌ها	حجم خمیر	ترکیب خمیر
قابلیت پُر کردن	شکل و درصد شکستگی دانه‌ها را جهت کاهش میزان اصطکاک، اصلاح کنید؛ برای کاهش خشن بودن، از دانه‌بندی ریزتر و برای کاهش گرانروی از دانه بندی درشت‌تر استفاده کنید.	اطمینان حاصل کنید حداقل خمیر مورد نیاز برای پر کردن فضای خالی بین دانه ها و همچنین کاهش نیروی اصطکاک بین ذره‌ای وجود دارد.	اطمینان حاصل کنید که گرانروی خیلی زیاد (چسبنده) یا خیلی کم (ناپایدار) نیست؛ میزان مصرف فوق روان کننده را افزایش دهید تا جریان اسلامپ افزایش یابد.
قابلیت عبور	مقدار ذرات درشت‌تر را با کاهش شاخص زبری دانه‌بندی یا کاهش حداکثر اندازه سنگدانه، کاهش دهید؛ برای کاهش اصطکاک بین ذرات، شکل درصد شکستگی دانه‌ها را اصلاح کنید.	برای کاهش حجم سنگدانه و اصطکاک بین ذرات، حجم خمیر را افزایش دهید.	برای افزایش جریان اسلامپ، گرانروی خمیر را کاهش یا میزان مصرف فوق‌روان کننده را افزایش دهید.
مقاومت در برابر جداشدگی (پایداری)	از سنگدانه هایی با دانه‌بندی پیوسته استفاده کنید (از دانه‌بندی گسسته اجتناب شود)، ضریب زبری دانه‌بندی سنگدانه ها یا حداکثر اندازه سنگدانه‌ها را کاهش دهید.	حجم خمیر را افزایش دهید.	اطمینان حاصل کنید گرانروی خمیر نه خیلی زیاد است و نه خیلی کم، جریان اسلامپ را کاهش دهید (میزان فوق روان کننده را کاهش دهید)؛ حفظ کارایی را بهینه کنید (آهنگ افت جریان اسلامپ در قالب تسریع شود)، از VMA استفاده شود.

۶-۲-۵ بررسی ابقاپذیری (ثبات) طرح مخلوط نهایی بتن خودتراکم

ابقاءپذیری (ثبات) هر یک از آزمایش‌ها را نیز می‌توان با تغییر مقدار آب یا مواد افزودنی فوق روان کننده و جریان اسلامپ در یک بازه وسیع‌تر از آنچه که در عمل در نظر گرفته شده، مورد ارزیابی قرار داد. در این آزمایش، مخلوط ها باید با تغییر میزان آب یا مواد افزودنی فوق روان کننده، ضمن داشتن کارایی مورد نظر، دارای تغییرات قابل قبولی در میزان جریان اسلامپ نیز باشند، به نحوی که دچار جداشدگی و آب انداختن نشوند.

باید مقدار آب یا مواد افزودنی فوق روان کننده و جریان اسلامپ با هم تغییر کنند به عبارت دیگر، حداقل جریان اسلامپ با حداقل میزان آب یا مواد افزودنی فوق روان کننده، و یکبار هم حداکثر جریان اسلامپ با حداکثر میزان آب یا مواد افزودنی فوق روان کننده، مورد بررسی قرار گیرد، تا مشخص شود چه هنگام پایداری بتن از بین می‌رود یا از حالت خودتراکمی خارج می‌شود.

نقش سنگدانه‌ها، حجم خمیر و ترکیب آن در دستیابی به قابلیت پُرکردن، قابلیت عبور و پایداری، بصورت خلاصه در جدول ۶-۱۳ ارائه شده‌است.

فصل ۷

نکات اجرایی

فصل هفتم

نکات اجرایی

۷-۱ کلیات

به دلیل ماهیت متفاوت بتن خودتراکم با بتن معمولی، روش‌های تولید، انتقال و بتن‌ریزی اثر قابل توجه‌ای بر خواص بتن تازه و سخت شده دارند. همچنین به دلیل آهنگ زیاد بتن‌ریزی و سیال بودن بتن خودتراکم، باید توجه خاص به طراحی قالب و فشار روی قالب مبذول شود. از طرف دیگر بتن خودتراکم در مقایسه با بتن معمولی نسبت به تغییر کمی و کیفی مواد و مصالح اولیه (حتی مقادیر کم) بسیار حساس می‌باشد. در این فصل برخی از نکات اجرایی با اهمیت شامل، طراحی قالب، حمل و جایدهی و عمل‌آوری مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۷-۲ طراحی قالب بر اساس آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌ها

معمولاً آهنگ بتن‌ریزی به دلیل عدم نیاز به متراکم‌کردن در SCC بیشتر است، بنابراین باید توجه خاص به طراحی اجزای قالب مانند ورق پوشش، کرنش‌ها (اعضای افقی قالب)، اعضای عمودی و بست‌ها، مبذول شود. از آنجایی که نتایج تحقیقات پراکنده است و متغیرهای زیادی مانند طرح مخلوط و آهنگ بتن‌ریزی وجود دارند، امکان دارد که فشار قالب نزدیک به فشار هیدرواستاتیک باشد. حتی در صورت استفاده از پمپ برای بتن‌ریزی ممکن است فشار بر روی قالب بیش از فشار هیدرواستاتیک باشد. در آهنگ‌های کم بتن‌ریزی (مانند یک متر بر ساعت)، فشار قالب بسیار کمتر از فشار هیدرواستاتیک است. با افزایش تغلیظ‌پذیری مخلوط بتن از فشار قالب کاسته می‌شود.
همچنین رعایت موارد زیر در خصوص طراحی قالب عمودی برای SCC توصیه شده است:

- فشار قالب ناشی از SCC تابع ترکیب مخلوط، آهنگ بتن‌ریزی و روش بتن‌ریزی است. در طراحی تمام اجزای قالب باید فرض شود که فشار هیدرواستاتیک (ρgh) بتن اعمال می‌شود. اگر SCC توسط پمپ از پایین عضو به درون قالب ریخته می‌شود، فشار بر روی قالب می‌تواند بیشتر از هیدرواستاتیک باشد. اگر بتن به حد کافی تغلیظ پذیر باشد، فشار بر روی قالب کمتر از فشار هیدرواستاتیک خواهد بود. اما باید مورد بررسی و اندازه‌گیری قرار بگیرد و مورد توافق پیمانکار و سازنده قالب باشد.

- در هنگام طراحی قالب باید تمام اجزای قالب مانند میله‌های بست، قادر باشند فشار هیدرواستاتیک را تحمل کنند. همچنین درزها باید به نحو مقتضی درزگیری و آب‌بندی شوند.
- از آنجایی که معمولاً امکان پرداخت سطح بتن خودتراکم با کیفیت بهتری نسبت به بتن‌های رایج قابل انجام می‌باشد، سطح بتن پرداخت شده نیز کاملاً با سطح قالب تطابق دارد، بنابراین باید توجه خاص به سطح قالب داشت. همچنین باید از مواد رهاساز قالب با کیفیت (معمولا مواد رهاسازی که پایه غیر نفتی دارند مناسب‌تر می‌باشند)، استفاده نمود و تا حد امکان به صورت لایه بسیار نازک بر سطح قالب اعمال شود، تا از ایجاد هرگونه عیب و نقص مانند حفره (ناشی از حباب هوا) اجتناب شود.
- طراحی صحیح قالب نقش مهمی در ایمنی و هزینه دارد. عدم طراحی مناسب منجر به تخریب عضو سازه‌ای پس از بتن‌ریزی می‌شود و از طرف دیگر بخش عمده‌ای از هزینه ساخت نیز به قالب‌ها اختصاص می‌یابد. بنابراین با طراحی مناسب قالب‌ها نه تنها از ایمنی، اطمینان حاصل می‌شود، بلکه مقرون به صرفه خواهد بود. بدین منظور لازم است تا الزامات فصل نهم نشریه ۲-۱۱۲۰ (آیین نامه بتن ایران) رعایت شود.
- در خصوص فشار قالب در بتن‌های SCC توصیه می‌شود از توصیه‌ها و روابط ACI 347 نیز استفاده شود.
- در مواردی که بتن از پایین قالب پمپ می‌شود، طراحی باید بر اساس حداقل ۱/۲۵ برابر فشار کامل هیدرواستاتیک انجام شود اگرچه این مقدار می‌تواند تا دو برابر نیز (در مواردی که آهنگ بتن‌ریزی زیاد است)، باشد.

شکل ۷-۱ لزوم دقت در قالب‌بندی و درزبندی و همچنین افزایش پشت‌بند و مهارهای لازم، در بتن‌ریزی با SCC

۷-۳ اجرای بتن خودتراکم

هر چند اصول اجرا بتن خودتراکم مشابه بتن معمولی است، اما به دلیل تفاوت در مصالح از نظر نوع و کمیت و تفاوت در ماهیت بتن تازه باید به نحوه اجرا اهمیت بیشتری داده شود. عدم نیاز به لرزاننده، استمرار در عملیات بتن‌ریزی، تغلیظ پذیری و عدم رو زدن آب از جمله تفاوت‌های اساسی بین بتن‌ریزی بتن خودتراکم با بتن‌های معمولی و رایج است که اثر

مستقیم در عملیات اجرا دارند. در این بخش برخی از نکات اجرایی که علاوه بر الزامات آیین‌نامه بتن باید مورد توجه قرار گیرند ارایه شده است.

۷-۳-۱ الزامات آماده سازی محل بتن‌ریزی

موارد زیر در هنگام آماده سازی جهت بتن‌ریزی ضروری است:

- طرح مخلوط با شرایط کارگاه (از نظر مسایل اجرایی) متناسب باشد و قبل از سفارش، به تأیید دستگاه نظارت برسد.
- حجم بتن در پیمانه‌ها، متناسب با تجهیزات ریختن بوده بگونه‌ای جایدهی مناسب مقدور بوده و از درز سرد ناخواسته اجتناب شود.
- روش‌های آزمایش‌های پذیرش در کارگاه (مطابق ضوابط فصل ششم) مستندسازی شوند، چنانچه علاوه بر آزمایش‌های الزامی موارد دیگری نیز نیاز باشد باید بین دستگاه نظارت، پیمانکار و تولید کننده بتن به توافق برسد.
- نیروهای فنی و اجرایی باید دوره‌های لازم در مورد آشنایی با بتن خودتراکم و نکات فنی و اجرایی را گذرانده باشند.
- طراحی قالب‌ها باید به تایید دستگاه نظارت برسد و قبل از بتن‌ریزی نیز توسط ایشان بازرسی و مورد تایید قرار گیرد.

۷-۳-۲ انبار کردن مصالح

بطور کلی انبار کردن مصالح بتن خودتراکم مشابه مصالح مورد مصرف در بتن معمولی است که در فصل سوم جلد دوم آیین نامه بتن ایران آمده است، اما با توجه به اینکه بتن خودتراکم به تغییرات در مشخصات مصالح حساس‌تر از بتن معمولی است، باید توجه و اهمیت بیشتری نسبت به حفظ یکنواختی کیفیت و / یا ثبت تغییرات و اتخاذ تدابیر لازم مبذول شود.

سنگدانه‌ها با اندازه‌های متفاوت باید به صورت جداگانه (برای مثال با استفاده از دیوار جدا کننده) دپو شوند. تغییرات رطوبت سنگدانه‌ها به طور مستمر پایش و اندازه‌گیری شود و مقدار رطوبت در تعیین مقادیر اجزا مخلوط در نظر گرفته شود. همچنین توصیه می‌شود از مصرف سنگدانه‌های ریز خیس (رطوبت بیش از حالت اشباع با سطح مرطوب یا در اصطلاح آب چکان) اجتناب شود، زیرا بدلیل تفاوت رطوبت در لایه‌های سطحی و قسمت‌های زیرین انباشته، احتمال خطا بسیار زیاد است، بدین منظور باید ابتدا ماسه در محلی انباشته شود تا آب اضافی زهکش شده و رطوبت متعادل شود.

۷-۳-۳ مخلوط کن‌ها

استفاده از هر نوع مخلوط‌کن برای SCC بلامانع است، اما شرایط مکانیکی دستگاه باید در حد مطلوب باشد تا از مخلوط شدن یکنواخت مصالح اطمینان حاصل شود. تجربه نشان می‌دهد که زمان مورد نیاز برای مخلوط شدن کامل SCC ممکن است طولانی‌تر از بتن معمولی باشد تا نیروهای اصطکاکی کاهش یابند و فوق روان کننده به طور کامل فعال شود. یک نکته حائز اهمیت ساخت مخلوط‌های آزمایشی در کارگاه است تا مدت مورد نیاز و ترتیب اضافه کردن مواد و مصالح تعیین شود. بطور معمول زمان اختلاط بتن خودتراکم حدود ۲۵ درصد بیش از زمان اختلاط بتن‌های معمولی است.

۷-۳-۴ روش‌های مخلوط‌کردن در کارخانه

با توجه به اینکه مقدار خمیر در بتن خودتراکم بیش از دیگر بتن‌هاست، دستیابی به مخلوطی یکنواخت و با روانی زیاد می‌تواند مشکل‌تر از بتن معمولی باشد. کلوخه‌شدن مصالح به خصوص در بتن‌های خودتراکم نوع پودری، می‌تواند یکی از مشکلات باشد. استفاده از مخلوط‌کن‌های مناسب، اصلاح توالی ریختن مصالح به داخل مخلوط‌کن و مهمتر از همه نحوه اضافه کردن آب و فوق‌روان‌کننده می‌تواند در رفع این مشکلات بسیار موثر باشد. در این راستا توصیه شده است مقداری از فوق‌روان کننده به همراه آب آزاد، به مخلوط اضافه شود و پس از اختلاط مصالح و دستیابی به خمیر نسبتا یکنواخت، باقی فوق‌روان کننده نیز اضافه شود.

زمان اضافه کردن مواد افزودنی شیمیایی، بر میزان تاثیرگذاری و عملکرد آن‌ها موثر است. در بتن‌های حاوی VMA، توصیه شده است تا حد امکان VMA با تاخیر و بعنوان آخرین جزء یا به همراه باقیمانده آب اختلاط به مخلوط افزوده شود. بر اساس نتایج بدست آمده از مخلوط‌های آزمایشی، باید یک روش استاندارد در کارخانه اعمال شود تا از تغییرات پیمانه به پیمانه کاسته شود.

۷-۳-۵ انتقال بتن

برای پروژه‌هایی که بتن بصورت درجا با SCC اجرا می‌شود، باید از تجهیزات همزن مانند کامیون مخلوط‌کن استفاده شود. به هم زدن بتن در طول حمل و نقل به حفظ همگنی و کاهش استعداد جداسازی کمک می‌کند. بتن خودتراکم باید به نحوی به محل نهایی برسد که بدون جداشدگی و نیاز به تراکم، امکان بتن ریزی فراهم باشد. به همین دلیل، حفظ کارایی مخلوط باید به‌گونه‌ای انتخاب و با تمهیدات لازم در نظر گرفته شود که با زمان تحویل و جایدهی بتن مطابقت داشته باشد. حمل و نقل SCC ممکن است با بتن معمولی دارای اسلامپ که نیاز به تراکم دارد متفاوت باشد. لذا با توجه به آهنگ بتن ریزی بیشتر در بتن خودتراکم و بحث اجتناب از بروز درز سرد بدلیل عدم ترکم و امکان اتصال لایه‌های بتن ریزی، که در

اکثر موارد ترجیح داده می‌شود بتن در پیمانه (حجم) کمتری حمل شود، لازم است تعداد کامیون‌های مخلوط‌کن با توجه به حجم کل بتن ریزی، مدت زمان حمل و دیگر عوامل موثر انتخاب شود. نکته دیگری باید مورد توجه قرار گیرد نوع فوق‌روان کننده مصرفی (بر اساس زمان حفظ اسلامپ) و یا استفاده از دو مرحله افزدونی (در هنگام ساخت و قبل از تخلیه) است که می‌تواند بر نوع و تعداد وسیله حمل تاثیر گذار باشد.

۷-۳-۵-۱ کامیون مخلوط‌کن

به دلیل روانی زیاد SCC، حجم مخلوط در جام کامیون نباید بیشتر از ۸۰ درصد ظرفیت جام باشد. این نکته بسار حائز اهمیت است، به خصوص در شیب‌ها و پیچ‌ها امکان ریختن بتن از دهانه مخلوط‌کن وجود دارد. کامیون مخلوط‌کن برای مخلوط‌های بتن خودتراکم دارای رده جریان اسلامپ، بین ۴۵۰ تا ۷۶۰ میلی‌متر مناسب است.

۷-۳-۵-۲ بتن‌ریزی با جام و شوت

توصیه می‌شود در مواردی‌که از شوت استفاده می‌شود، خروجی شوت به سمت دورترین نقطه قالب هدایت شده و با ادامه بتن‌ریزی، شوت حرکت داده شود. روش بتن‌ریزی با جام برای حجم کم بتن‌ریزی (معمولاً ۱۲ تا ۲۰ m^3/h) مناسب است. جام نباید در معرض تکان شدید باشد، در غیر اینصورت احتمال جدا شدن ذرات وجود دارد. وقتی مخلوط به‌مدت طولانی در جام باقی بماند سبب سفت شدن و بروز تغلیظ شده و به راحتی از جام خارج نمی‌شود. انتقال بتن با سرعت آهسته باعث سفت شدن ناشی از تغلیظ می‌شود و می‌تواند منجر به تغییر رنگ یا ایجاد رد خطوط افقی در بین لایه‌ها گردد. در هنگام بتن‌ریزی دیوارهای نازک، یا از ارتفاع زیاد، باید از شوت قائم (یا ناوه) برای بتن‌ریزی با جام استفاده شوند در این حالت انتهای شوت باید تا حد امکان نزدیک سطح بتن ریخته شده باشد. اگر از لوله ترمی استفاده می‌شود، باید انتهای لوله ترمی، پایین‌تر از سطح بتن قرار داده شود و باید اطمینان حاصل شود که هوا وارد بتن نمی‌شود.

محدود بودن حجم جام، می‌تواند سبب وقفه در آهنگ بتن‌ریزی شود، بنابراین توصیه شده است که از جام برای بتن‌ریزهای با حجم کم استفاده شود. مخلوط SCC باید جریان اسلامپ بین ۶۱۰ تا ۷۱۰ میلی‌متر داشته باشد تا بتن‌ریزی تسهیل شود و امکان تراکم بین پیمانه‌های متوالی فراهم گردد. استفاده از شوت با جام کمک می‌کند تا بتن در محل مورد نظر تخلیه شود.

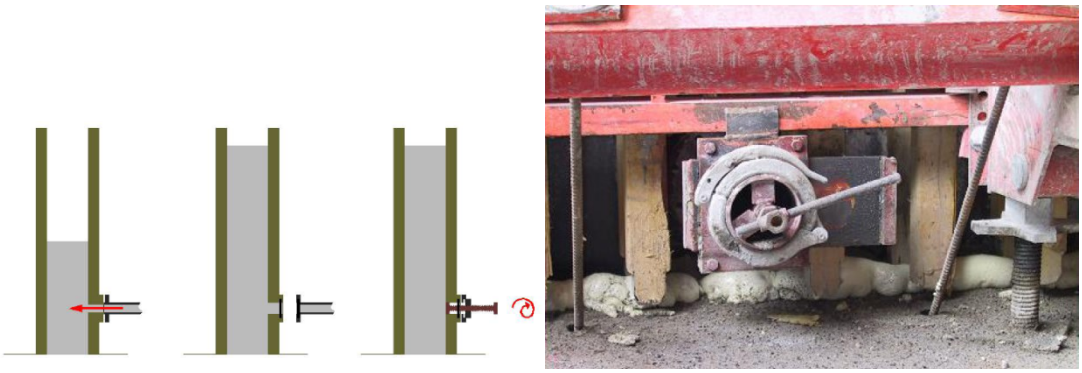
همچنین در خصوص استفاده از جام رعایت موارد به شرح زیر توصیه می‌شود:

- استفاده از جام به طور چشمگیر پتانسیل آهنگ بتن‌ریزی را کاهش می‌دهد، بنابراین برای بتن‌ریزی با حجم کم مانند ستون‌ها مناسب است.
- آهنگ آهسته بتن‌ریزی با جام ممکن است سبب علایم و تغییر رنگ قابل مشاهده، و خطوط ضعیف بین لایه‌های بتن‌ریزی شود.

- نباید جام در حین حرکت دچار لرزش‌های شدید شود.
- در صورت بتن‌ریزی در اعضای بسیار نازک، بتن باید با لوله ترمی یا شوت قائم ریخته شود.
- در هنگام استفاده از شوت توصیه می‌شود که ارتفاع سقوط به ۱/۵ متر محدود و جریان افقی نیز به ۱۰ متر محدود شود.

۷-۳-۵-۳ پمپ کردن

اگر مخلوط بتن در مقابل جداشدگی ذرات مقاومت کافی داشته باشد، پمپ کردن بتن از پایین قالب مناسب است (شکل ۷-۲). این روش سبب ایجاد سطح تمیز و صاف بتن می‌شود. همچنین هوای کمتری در مخلوط باقی می‌ماند و باعث افزایش آهنگ بتن‌ریزی می‌شود. محل تغذیه مخلوط بتن و خط لوله پمپ باید به طور کامل پر از بتن باشند تا اطمینان حاصل شود که هوا وارد مخلوط نمی‌شود. برای پمپاژ بتن از پایین قالب باید در فواصل مناسب در ارتفاع قالب، شیرهای پمپاژ نصب شوند. پس از بتن‌ریزی شیر بسته و قفل می‌شود. لازم به ذکر است در این موارد فشار قالب باید بیشتر از فشار هیدرواستاتیک در نظرگرفته شود، چون غیر از وزن بتن، فشار پمپ نیز بر قالب اعمال می‌گردد. در این خصوص رعایت الزامات فصل نهم جلد دوم آیین‌نامه بتن ایران ضروری است.



شکل ۷-۲ نحوه بتن‌ریزی دیوار از قسمت پایین قالب

در مواردی که بتن‌ریزی با پمپ از بالای قالب انجام می‌شود، باید سرشیلنگ در درون بتن باشد تا احتمال وارد شدن حباب‌های هوا کاهش یابد. بتن‌ریزی باید از پایین‌ترین بخش قالب شروع شده و سرشیلنگ باید در حد امکان نزدیک به کف قالب باشد. همچنین طول پمپ افقی بتن نیز افزایش می‌یابد. پمپ در ابتدا با فشار خیلی کم شروع شود، زیرا فشار اولیه در حد زیاد سبب جدا شدن سنگدانه‌های درشت می‌شود و می‌تواند سبب مسدود شدن لوله گردد.

مزایای پمپ کردن SCC در مقایسه با بتن معمولی را می‌تواند به شرح زیر باشد:

- فشار پمپ به حد قابل توجهی کاهش می‌یابد.
- حباب‌های هوای عمدی (ناشی از استفاده ماده افزودنی حباب ساز) پایدار باقی می‌مانند.
- پمپ اولیه با دوغاب سیمان (برای کاهش اصطکاک خطوط لوله) ضروری نیست.

۷-۳-۶ بتن‌ریزی

قبل از بتن‌ریزی، باید مشخصات قالب و میلگرد با نقشه‌ها مطابقت داده شوند. طول مناسب جریان بتن کمک می‌کند که هوای اضافی حذف شود. هر چند طول جریان نباید بیشتر از ۱۰ متر باشد، زیرا احتمال دارد که ریسک جدا شدگی دینامیکی ذرات یا هوای محبوس شده افزایش یابد. آهنگ سریع بتن‌ریزی عمودی ممکن است به هوای درون بتن اجازه خروج از بتن را ندهد و حباب‌های در درون بتن افزایش یابند. استمرار در بتن‌ریزی بدون توقف، کمک می‌کند تغییرات رنگ در سطوح کاهش یابد. وقتی بتن‌ریزی در سطوح افقی انجام می‌شود، باید یک بخش از کل سطح به اتمام برسد، سپس بخش دیگر بتن‌ریزی شود.

بعضی از مخلوط‌ها، به خصوص آن‌هایی که آهنگ جریان آهسته دارند، تمایل به تغلیظ‌پذیری دارند و در هنگام وقفه‌های کوتاه باعث سفت‌شدن ظاهری بتن می‌شود، که در هنگام اعمال نیروی برشی یا هم زدن مجدداً جریان‌پذیری خود را بدست می‌آورند. قبل از بتن‌ریزی، و در طول مدت انتقال بتن به کارگاه، با حرکت آهسته جام کامیون مخلوط‌کن (سرعت بهم زدن) می‌توان تغلیظ پذیری را کاهش داد. بتن‌ریزی باید بدون توقف باشد و نقاط بتن‌ریزی در قالب باید به نحوی انتخاب شوند که جبهه بتن‌ریزی در تمام وقت در حال حرکت باشد. وقتی که بتن‌ریزی به اتمام رسید، تغلیظ‌پذیری می‌تواند مفید باشد و فشار قالب و وجود نشتی در درزهای قالب کاهش می‌یابد.

احتمال دارد که سقوط آزاد بتن از ارتفاع سبب جدا شدن ذرات شود، بنابراین باید ارتفاع بتن‌ریزی محدود شود اگرچه توصیه شده است این فاصله به ۵ متر محدود شود ولی باید با آزمایش حداکثر ارتفاع مجاز تعیین گردد.

توصیه‌های زیر در ارتباط با بتن‌ریزی در اعضای مختلف سازه ارائه شده است:

- بتن‌ریزی در تیرهایی با اشکال مختلف امکان پذیر است، حتی تیرهای عمیق تا ۲/۴ متر به راحتی بتن‌ریزی می‌شوند.
- بهتر است نقطه بتن‌ریزی از نزدیک یک انتهای تیر شروع شود تا تمام قالب پر گردد. برای تیرهای عمیق با میلگرد انبوه، جریان اسلامپ بین ۶۱۰ تا ۷۱۰ میلی‌متر توصیه شده است.
- با توجه به خاصیت خودترازی بتن خودتراکم، در بتن‌ریزی دال‌ها باید در یک نقطه تخلیه شده و قبل از آن که نقطه بتن‌ریزی تغییر داده شود، تا حدی که می‌تواند جاری گردد. حداکثر فاصله مجاز بتن تابع پایداری مخلوط است اما معمولاً به ۱۰ متر محدود می‌شود.

- برای بتن‌ریزی دیوارها، باید SCC در مرکز دیوار ریخته شده و اجازه داده شود که مخلوط به دو طرف سمت انتهای دیوار جاری شود (شکل ۷-۳). استمرار در بتن‌ریزی باعث می‌شود که مخلوط، خود یک ستون انتقال ایجاد کند و مانند لوله ترمی نامریی عمل کند. روش دیگر بتن‌ریزی در دیوارها استفاده از پمپ از پایین قالب است (شکل ۷-۳). جریان اسلامپ ۶۶۰ تا ۷۰۰ میلی‌متر برای دیوارها مناسب است.
- بتن‌ریزی ستون‌ها باید استمرار داشته باشد و مانند دیوار می‌توان پمپاژ را از پایین قالب انجام داد.

شکل ۷-۳ روش بتن‌ریزی در دیوار (سمت راست، بتن ریزی از قسمت پایین دیوار و چپ، شروع بتن‌ریزی از قسمت وسط دیوار)

- به عنوان یک قانون کلی، باید از سقوط آزاد SCC تا حد امکان اجتناب شود، در غیر اینصورت حباب‌های هوای ناخواسته در مخلوط بیشتر می‌شوند. اما در مواردی که مخلوط به نحوی طراحی شده باشد که بتوان با وجود سقوط آزاد از آن استفاده کرد و نتایج آزمایشگاهی آن را تایید نماید، بلامانع است.

بطور کلی استفاده از متراکم کننده برای بتن‌خودتراکم مجاز نیست زیرا منجر به نشست سنگدانه‌های درشت می‌شود. اگر مخلوط نشان می‌دهد که نیاز به لرزاننده دارد باید نسبت‌های مخلوط و مواد پودری معدنی، مورد بررسی مجدد قرار بگیرند. اگر مشخصات مواد و نسبت‌های مخلوط با مشخصات فنی مطابقت دارند، اما نیاز به لرزاننده است، باید مشخصات فنی بازبینی شود. فقط در موارد به شرح زیر استفاده از لرزاننده به صورت ضعیف بلامانع است:

- در بعضی از اعضای سازه به دلیل شکل خاص قالب ممکن است منجر به محبوس شدن حباب هوا در محل‌هایی از قالب شود. در چنین مواردی می‌توان از میله زنی در محل‌های مورد نظر استفاده کرد.

- در مواردی که بتن‌ریزی در دال انجام می‌شود و به خصوص جریان اسلامپ آن در حد کم است، می‌توان از میله زنی ملایم و یا لرزاندن بسیار ضعیف استفاده کرد تا سطح پرداخت مناسب ایجاد شود. بهتر است لرزاننده روی میله تراز کننده، نصب شود.
- وقتی که توقف در بتن‌ریزی رخ می‌دهد، برای جلوگیری از ایجاد درز سرد می‌توان از میله زنی ملایم استفاده کرد.
- برای بتن‌هایی با جریان اسلامپ رده SF0.

۷-۳-۷ پرداخت دال‌ها

معمولاً دال‌ها نیاز به جریان اسلامپ کمتری نسبت به ستون‌ها و دیوارها دارند. این کارایی، همراه با عدم روزدن آب و تمایل به سفت‌شدن ناشی از تغلیظ‌پذیری می‌توانند سبب چسبندگی زیاد بتن و ایجاد مشکل در پرداخت شوند. به محض بتن‌ریزی، پرداخت اولیه (تراز کردن با شمشه یا ماله دسته بلند) باید انجام شود و این عمل باید قبل از سفت شدن ناشی از تغلیظ‌پذیری و خشک شدن سطح بتن رخ دهد. شمشه و ماله با لرزاننده ضعیف در پرداخت SCC مؤثرند ولی به شرطی که دال شیب نداشته باشد. ماله فولادی بهتر از ابزار چوبی عمل می‌کند. در صورتی که دال بیش از ۲ تا ۳ درصد شیب داشته باشد، استفاده از ابزار حتی با لرزاننده ضعیف سبب حرکت مخلوط بتن می‌شود.

تراز (تسطیح) دال‌ها با ماله دسته کوتاه یا بلند مناسب است، زیرا باعث تراکم مطلوب بتن می‌شود بدون آن که جدا شدن سنگدانه‌ها رخ دهد (شکل ۷-۴). مراحل بعدی پرداخت مانند پرداخت نهایی با ماله فولادی بدون اشکال است. در صورت سفت شدن ناشی از تغلیظ پذیری، قضاوت در مورد زمان مناسب پرداخت با ماله فولادی و پرداخت نهایی سخت است.

شکل ۷-۴ پرداخت سطح دال با استفاده از ماله دسته بلند

۷-۳-۸ عمل‌آوری

در بسیاری از موارد، آب انداختگی بتن خودتراکم در مقایسه با بتن معمولی کمتر و در حد صفر است. با این حال، میزان و زمان آب انداختگی تابعی از مشخصات مصالح و طرح مخلوط است و می‌تواند طیف وسیعی از سطوح آب انداختگی بروز نماید. لذا باید در مرحله طرح مخلوط و با انجام آزمایش، تمهیداتی در نظر گرفته شود تا از پوسته شدن سطحی و ترک خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری جلوگیری شود.

یکی از راهکارهای کنترل این موضوع استفاده از تجهیزات مه پاش یا سایر روش‌های عمل‌آوری اولیه یا محافظت، مطابق نشریه ۲-۱۲۰ سازمان برنامه و بودجه (آیین نامه بتن ایران) می‌باشد.

در مورد عمل آوری نهایی یا مراقبت می‌توان از روش‌های ارایه شده در جلد دوم آیین نامه بتن ایران که برای بتن‌های معمولی ارایه شده است، استفاده نمود. توصیه شده است برای جلوگیری از افت سریع رطوبت و جمع‌شدگی خمیری، عمل‌آوری بلافاصله پس از پرداخت آغاز گردد.

فصل ۸

کنترل کیفی و چک لیست‌های اجرایی

فصل هشتم

کنترل کیفی و چک لیست‌های اجرایی

۸-۱ کلیات

در برخی منابع کنترل کیفیت را «اقداماتی که توسط تولیدکننده یا پیمانکار برای ایجاد کنترل بر آنچه انجام می‌شود و آنچه که ارائه می‌شود می‌نامند به‌گونه‌ای که استانداردهای مرتبط برای به نتیجه رسیدن عملکرد خوب در کار حاصل شود». در بتن خودتراکم، کنترل کیفیت خوب چیزی بیش از آزمایش و تولید اعداد است، در واقع تبدیل داده‌ها به اطلاعات و استفاده از آن اطلاعات در پالایش و بهبود برنامه تولید و اجرای SCC است.

این امر به ویژه در مراحل اولیه تولید و استفاده از SCC، که تجربه عوامل تولید و اجرا نسبت به این موضوع کم است، از اهمیت بیشتر برخوردار است. در این راستا باید توجه زیادی به مواد و مصالح، خواص بتن تازه و تأثیر آن‌ها بر کیفیت نهایی بتن در محل پروژه معطوف شود. اینکه چقدر به کنترل کیفیت بیشتر برای SCC نیاز است تا حدودی به الزامات عملکردی بستگی دارد. به عنوان مثال، با افزایش جریان اسلامپ بتن خودتراکم، قابلیت آن برای جداشدگی نیز افزایش می‌یابد. بتن خودتراکم با هدف جریان اسلامپ بیشتر در مقایسه با مخلوط‌های مشابه با دارای اسلامپ کمتری هستند، به سطوح نسبتاً بیشتری برای اطمینان از پایداری مخلوط نیاز دارند. با گذشت زمان و افزایش تجربه در ارتباط با بتن خودتراکم، تولیدکننده درک درستی از رابطه متقابل بین مواد و عملکرد مخلوط پیدا می‌کند.

در ایجاد نظام کلی برای کنترل کیفیت بتن خودتراکم، باید به این نکته توجه کرد که یک طرح زمانی مؤثر است که قبل از شروع یک پروژه توسعه یافته و مورد توافق قرار گیرد، و به خوبی بین کل تیم ارتباط برقرار شود. کنترل کیفیت بر عهده تمامی اعضای تیم ساخت و ساز می‌باشد. تامین کنندگان سنگدانه ها، مواد افزودنی، سیمان و مواد پودری موظفند اطمینان حاصل کنند که محصول آن‌ها الزامات و نیازهای پروژه و تولید کننده بتن را برآورده می‌کنند. همچنین تولید کننده بتن مسئول کیفیت و کارایی بتن پیمانه شده و تحویلی است. در نهایت، هنگامی که بتن به محل پروژه حمل و جایدهی شده است، این مسئولیت پیمانکار است که از کیفیت بتن در محل اطمینان حاصل کند.

در این فصل راهنمای و پیشنهاداتی به منظور بهبود و نه به عنوان جایگزین برنامه یا نظام کنترل کیفیت ارایه شده است.

۸-۲ کنترل کیفی مواد و مصالح اولیه

۸-۲-۱ سنگدانه‌ها

با توجه به تاثیری که تغییر در دانه‌بندی و رطوبت سنگدانه و مواد پرکننده پودری می‌تواند در کارایی و رئولوژی بتن خودتراکم داشته باشد، باید ضوابط زیر علاوه بر دستورالعمل‌های رایج برای بتن‌های معمولی، مورد توجه قرار گیرد:

- توصیه می‌شود برای کنترل مداوم رطوبت سنگدانه‌های ریز، از حسگرهای دقیق رطوبت استفاده شود. این حسگرها باید قابلیت اندازه‌گیری رطوبت با دقت ۰/۵ درصد را داشته باشند. محل قرارگیری حسگرها، باید بگونه‌ای انتخاب شوند، که مقادیر اندازه‌گیری شده بیانگر رطوبت سنگدانه‌های داخل مخلوط‌کن باشند.
- در مواردی که از حسگرهای تعیین میزان رطوبت استفاده نمی‌شود، باید میزان رطوبت هر یک از سنگدانه‌ها، قبل از ساخت اولین پیمانه بتن (در هر روز) و سپس با تواتر هر چهار ساعت، یا در صورت تغییر محسوس در رطوبت مصالح، تعیین شود. لذا باید دستورالعملی برای نحوه تعیین میزان رطوبت و نمونه‌برداری تدوین گردد. این دستورالعمل بسته به روش انبار کردن مصالح، تجهیزات توزین و انتقال و میزان مصرف مصالح، متفاوت می‌باشد.
- در اصلاح طرح مخلوط و میزان آب مصرفی، نباید از تقریب یا تخمین استفاده کرد و فقط باید بر اساس رطوبت واقعی که بر اساس آزمایش بدست آمده، اصلاحات مربوطه را انجام داد.

۸-۲-۲ مواد پودری خنثی (پرکننده پودری)

دانه‌بندی و رطوبت پرکننده پودری می‌تواند بر خواص رئولوژی و کارایی بتن تازه و بدلیل تغییر نسبت آب به سیمان، بر مشخصات مکانیکی و دوام نیز بسیار موثر باشد. از آن‌جایی‌که نحوه استفاده (دوغاب، خشک، یا ...)، نحوه انبار کردن، توزین و اختلاط و دیگر پارامترها تعیین کننده می‌باشند، باید ساز و کار مناسبی برای هر یک از موارد فوق پیش‌بینی گردد تا تغییرات به حداقل ممکن کاهش یافته و امکان کنترل کیفیت نیز مقدور باشد. بر این اساس راهکارهای زیر توصیه می‌گردد:

- از آن‌جایی که معمولاً رطوبت مواد ریزدانه دارای تغییرات زیاد بوده و کنترل آن نیز دارای مشکلاتی است، توصیه می‌شود، از پرکننده‌هایی با حداقل رطوبت (یا کاملاً خشک)، استفاده شود. در این موارد، جهت جلوگیری از پخش‌شدن مواد ریز در طی فرآیند توزین و انتقال به مخلوط‌کن، در هوا و همچنین اطمینان از اختلاط مناسب و توزیع یکنواخت آن در مخلوط بتن (عدم ایجاد کلوخه یا خرد کردن کلوخه‌های احتمالی)، باید راهکارهای مناسب تدارک دیده شود.
- استفاده از دوغاب حاوی مواد ریزدانه یکی از راهکاهای قابل توصیه می‌باشد. اگرچه در این روش نیازی به کنترل رطوبت نیست اما، کنترل درصد مواد جامد یا چگالی دوغاب بسیار حایز اهمیت می‌باشد. بر این اساس باید در ابتدای ساخت اولین پیمانه بتن (در هر روز) و سپس با تواتر هر چهار ساعت، چگالی دوغاب یا درصد مواد جامد

کنترل شود. جهت جلوگیری از ته‌نشینی و ایجاد کلوخه، باید با استفاده از همزن مناسب از یکنواختی دوغاب اطمینان حاصل کرد.

- کنترل دانه‌بندی و حداکثر اندازه ریزدانه‌ها باید بطور مدوام کنترل شود. توصیه می‌شود، حداکثر اندازه دانه‌ها به‌صورت روزانه و دانه‌بندی نیز در هر محموله وارد شده به کارگاه اندازه‌گیری شوند. برای دانه‌بندی ذرات ریزتر از ۷۵ میکرون از دانه‌بندی به روش تر یا دانه‌بندی لیزری استفاده می‌شود (اگرچه از روش‌های دیگر مانند تصویر برداری سه بعدی یا روش‌هایی که در فصل ۲ ارایه شده نیز می‌توان استفاده کرد). در برخی مراجع استفاده از روش بلین نیز برای کنترل یکنواختی توصیه شده است.
- در مواردی‌که از دوغاب استفاده می‌شود، باید تدابیر لازم جهت کنترل دمای دوغاب داخل مخزن پیش‌بینی شود، به خصوص در بتن‌ریزی در هوای گرم (جهت جلوگیری از افزایش دمای دوغاب) و در هوای سرد (جهت جلوگیری از یخ زدن و کاهش دمای دوغاب).
- توصیه می‌شود از مواد پرکننده‌ایی که دارای رطوبت بوده یا بصورت کلوخه هستند، استفاده نشود.

۸-۲-۳ سیمان

الزامات مربوط به کنترل سیمان مشابه ضوابط مربوط به بتن‌های معمولی مطابق نشریه ۲-۱۲۰ سازمان برنامه و بودجه است.

۸-۲-۴ آب

با توجه به تاثیر تغییرات میزان آب در کارایی و رئولوژی بتن خودتراکم و تاثیر نسبت آب به مواد سیمانی روی مشخصات مکانیکی و دوام، باید ضوابط زیر علاوه بر دستورالعمل‌های رایج برای بتن‌های معمولی (مطابق نشریه ۲-۱۲۰ سازمان برنامه و بودجه)، مورد توجه قرار گیرد:

- باید مقدار آب مصرفی قبل از ساخت هر پیمانه بتن و سپس بر اساس هر بار اصلاح رطوبت مصالح، محاسبه و در صورت نیاز اصلاح گردد.
- اصلاح مقدار آب، باید بر اساس رطوبت واقعی سنگدانه و پرکننده پودری انجام شود و درصورتی که نیاز به تغییر رئولوژی بر اساس تغییر میزان آب باشد، باید با انجام آزمایش‌های لازم در آزمایشگاه تاثیر آن بر مشخصات بتن تازه و سخت شده، تعیین شود.

۸-۳ کنترل کیفی و پذیرش آزمایش‌های بتن تازه

اگر مقدار سنگدانه و حجم خمیر در حد قابل قبولی ثابت باشد، و میزان جریان اسلامپ نیز در طول فرآیند تولید کنترل شود، نیازی به انجام آزمایش‌های کنترل قابلیت عبور نیست. به‌علاوه، بطور معمول نیازی به اندازه‌گیری مقاومت در برابر جداشدگی نیز در طی فرآیند تولید نمی‌باشد، چراکه شاخص پایداری به خواص رئولوژی خمیر وابسته است. اگر رئولوژی خمیر برای اطمینان از این‌که جریان اسلامپ و T_{50} در محدوده از قبل مشخص شده که با مقاومت در برابر جداشدگی نیز رابطه دارد، قرار می‌گیرد، انجام دیگر آزمایش‌های کنترل مقاومت در برابر جداشدگی، ضروری نیست. محدوده کارایی مورد قبول در جدول ۸-۱ ارائه شده‌است. باید میزان کارایی مناسب برای هر کاربرد، انتخاب شود.

کنترل و پذیرش جریان اسلامپ باید بر اساس اینکه بصورت «بیشینه یا کمینه»، «جریان اسلامپ هدف» یا «رده اسلامپ» خواسته شده باشد، مطابق نشریه ۲-۱۲۰ سازمان برنامه بودجه (آیین نامه بتن ایران) یا استاندارد ملی ایران ۶۰۴۴ انجام شود. برای حداقل میزان، باید اطمینان حاصل کرد که بتن می‌تواند جاری شده و تحت وزن خود متراکم شود. همچنان‌که جریان اسلامپ افزایش می‌یابد، به خصوص در مقادیر بیش از ۶۸ سانتی‌متر، تمایل به جداشدگی نیز افزایش می‌یابد. بنابراین حداکثر مقدار جریان اسلامپ نیز باید تعیین شود. مقدار مورد نیاز برای جریان اسلامپ، بسته به نوع کاربرد بین ۵۰ تا ۸۵ سانتی‌متر متغیر است، که میزان ۶۰-۶۸ سانتی‌متر معمولاً رایج‌تر می‌باشد. توانایی دستیابی به جریان اسلامپ بیشتر بدون جداشدگی، یکی از شاخص‌های ثبات مخلوط است. با توجه به حساسیت جریان اسلامپ به تغییرات کوچک در مواد و بطور کل در طرح مخلوط و به طور خاص در میزان مصرف فوق‌روان کننده، باید بازه جریان اسلامپ کمتر از ۷ سانتی‌متر باشد (بطور مثال جریان اسلامپ بین ۶۱ تا ۶۸ سانتی‌متر مورد پذیرش قرار گیرد). آزمایش T50 را باید برای اطمینان از مناسب بودی گرانروی مخلوط بر اساس کاربری مورد نظر و همچنین کنترل و شناسایی تغییرات در مشخصات مصالح انجام داد. بطور کلی کم بودن زمان T50 مناسب‌تر است زیرا مخلوطی با گرانروی کمتر، راحت‌تر جایدهی می‌شود (سریعتر جاری می‌شود، انرژی اختلاط کمتری نیاز دارد، با فشار کمتری پمپ می‌شود). هرچند، اگر میزان T50 خیلی هم کم باشد، ممکن است پایداری مخلوط کم باشد. با توجه به مناسب بودن مقادیر کم T50، معمولاً حداکثری را برای T50 ذکر نمی‌کنند. معمولاً زمان ۲ تا ۷ ثانیه برای اکثر کارها مناسب است،ولی برای مقاطع پرمیلگرد زمان T50 بیش از ۳ ثانیه توصیه نمی‌شود.

اگرچه توصیه می‌شود که شاخص VSI برای کنترل جداشدگی‌های شدید انجام و ارزیابی شود، اما برای رد یک مخلوط بتن، تنها نمی‌توان از این روش استفاده کرد.

در آزمایش حلقه J، حداکثر تغییرات ارتفاع در حلقه J باید بر اساس حجم و فاصله بین میلگردها، مشخص شود. برای اعضایی بدون میلگرد یا تراکم کم میلگرد، نیازی به اندازه‌گیری قابلیت عبور (آزمایش حلقه J) نیست.

در آزمایش ستون جداشدگی، برای اغلب کارها، حداکثر میزان جداشدگی باید کمتر از ۱۵ درصد باشد اگرچه برای برخی موارد ممکن است نیاز باشد این مقدار را کاهش داد، مانند مقاطعی که حجم میلگرد در آن‌ها خیلی زیاد است، یا بتن از ارتفاع زیادی ریخته می‌شود و یا نیاز است تا بتن مسافت زیادی را بصورت افقی طی کند.

۸-۳-۱ روانی و کارایی بتن خودتراکم

در تعیین طرح مخلوط باید خصوصیات رئولوژی (رفتار شناسی) و کارایی بتن با انجام آزمایش‌های کنترل قابلیت عبور، قابلیت پر کردن و مقاومت در برابر جداشدگی تعیین شده در استانداردهای «الف» تا «ح» زیر بسته به مورد بررسی شود. رده بندی و روش انجام آزمایش‌ها مطابق جدول ۸-۱ می‌باشد.

الف - جریان اسلامپ و T50 ، استاندارد ملی ۱۱۲۷۰؛

ب- شاخص چشمی پایداری بتن خودتراکم، استاندارد ملی ۱۱۲۷۰؛

پ- آزمایش قیف V شکل، استاندارد ملی ۹-۳۲۰۳؛

ت- آزمایش حلقه J، استاندارد ملی ۱۱۲۷۱؛

ث- آزمایش جعبه L، استاندارد ملی ۱۰-۳۲۰۳؛

ج- مقاومت در برابر جداشدگی بتن با الک، استاندارد ملی۱۱-۳۲۰۳؛

چ- پایداری بتن (روش ستون)، استاندارد ملی ۱۲۲۵۵؛

ح- مقاومت در برابر جداشدگی بتن خودتراکم با استفاده از آزمایش نفوذ، استاندارد ملی ۱۹۳۸۷.

برای کنترل طرح مخلوط، انجام آزمایش‌های «الف» تا «پ»، یک یاز آزمایش‌های «ت» یا «ث» و یکی از آزمایش‌های مقاومت در برابر جداشدگی («ج» تا «ح») کفایت می‌کند.

همچنین برای کنترل کیفی بتن تازه در کارگاه حداقل انجام آزمایش «الف» و «ب» باید انجام شود. اگرچه بنا به مورد یا طبق مشخصات فنی پروژه انجام دیگر آزمایش‌ها نیز می‌تواند در دستور کار قرار گیرد.

جدول ۸-۱ رده‌بندی آزمایش‌های روانی و کارایی بتن خودتراکم

روانی بتن خودتراکم		استاندارد مرجع
رده	جریان اسلامپ، mm	
SF0	۴۵۰ تا ۵۵۰	استاندارد ملی ۱۱۲۷۰
SF1	۵۶۰ تا ۶۵۰	
SF2	۶۶۰ تا ۷۵۰	
SF3	۷۶۰ تا ۸۵۰	
گرانروی		
رده	زمان T50، s	
VS1	۲/۰ >	استاندارد ملی ۱۱۲۷۰
VS2	۲/۰ ≤	
رده	زمان جریان قیفV ، s	
VF1	۹/۰>	استاندارد ملی ۹-۳۲۰۳
VF2	۹/۰ تا ۱۲/۰	
قابلیت عبور		
رده	نسبت جعبه L	
PL1	۰/۸۰ ≤ برای ۲ میلگرد	استاندارد ملی ۱۰-۳۲۰۳
PL2	۰/۸۰ ≤ برای ۳ میلگرد	
رده	حلقهj ،mm	
	اختلاف بین جریان اسلامپ و جریان با حلقه J:	
J1	برای طول حرکت کمتر از ۵ متر: حداکثر ۲۵ میلی‌متر	استاندارد ملی ۱۱۲۷۱
J2	برای طول حرکت ۵ تا ۱۰ متر: حداکثر ۵۰ میلی‌متر	
مقاومت در برابر جداشدگی		
رده	ستون جداشدگی، ٪	
SS1	۱۰ ≥	استاندارد ملی ۱۲۲۵۵
SS2	۱۵ ≥	
رده	جداشدگی با الک، درصد	
SR1	۱۵ ≥	استاندارد ملی ۱۱-۳۲۰۳
SR2	۲۰ ≥	

این رده‌بندی‌ها، برای بتن‌های حاوی سنگدانه‌های بزرگتر یا مساوی ۲۵ میلی‌متر صادق نیست.

- آزمایش‌های کنترل روانی و کارایی بتن خودتراکم باید زمان ریختن و جایدهی اندازه‌گیری شود.
- هنگامی‌که بتن توسط تراک میکسر یا دیگر تجهیزات حمل و اختلاط، منتقل می‌شود، می‌توان نمونه‌برداری را بصورت یک مرحله‌ای و پس از تخلیه حدود ۰/۳ متر مکعب بتن، انجام داد. این نتایج باید با مشخصات تعیین شده یا مخلوط شاهد مقایسه شده و دارای رواداری بیش از مقادیر ارائه شده در جدول ۸-۲ نباشد.

جدول ۸-۲ رواداری مجاز نسبت به مقادیر مشخص شده

الزامات عملکردی	رواداری در نتیجه یک آزمایش	
جریان اسلامپ متوسط		
رواداری بر حسب درصد		±۷
T50 بر حسب ثانیه		±۱
قیف v		
مقادیر مشخص شده بر حسب ثانیه	۹>	۹≤
رواداری بر حسب ثانیه	±۳	±۵
این مقادیر برای مواردی است که در مشخصات فنی پروژه، حدودی مشخص نشده باشد.		

- تواتر نمونه‌برداری و انجام آزمایش جریان اسلامپ، باید مطابق مشخصات فنی، یا در صورت عدم تعیین آن باید مطابق آیین نامه بتن ایران باشد.

۸-۳-۲ کنترل فرآیند تولید

با توجه به حساسیت بتن خودتراکم به مشخصات مصالح و تغییرات آن‌ها، لازم است تا کنترل بیشتر با تواتر نمونه‌بردای بیشتر نسبت به بتن‌های معمولی، اعمال گردد. بر این اساس علاوه بر الزامات و کنترل‌های رایج برای بتن‌های معمولی، باید موارد جدول ۸-۳ برای کنترل روانی رعایت گردد.

جدول ۸-۳ تواتر نمونه‌برداری روانی بتن خودتراکم

	نوع آزمایش	پذیرش/آزمایش	هدف	حداقل تواتر
۱	روانی	مشاهده ظاهری	کنترل انطباق با مشخصات ظاهری متعارف	برای هر پیمانه یا هر محموله
۲		جریان اسلامپ	بررسی انطباق با مقادیر مشخص برای جریان‌پذیری و همچنین کنترل تغییرات در طرح مخلوط، از جمله میزان آب	۱- حداقل روزی‌یکبار ۲- به همراه نمونه‌برداری مقاومت فشاری ۳- در صورت تردید در مشخصات ظاهری ۴- حداکثر هر ۴ ساعت یکبار
۳		آزمایش‌های قیف v، جعبه L، الک جداشدگی و حلقه J	بررسی انطباق با الزامات تعیین شده	۱- در طی فرآیند تولید اولیه ۲- قبل از ساخت طرح مخلوط جدید ۳- در زمان تغییر در مواد و مصالح تشکیل دهنده، شک در نتایج بررسی ظاهری یا آزمایش جریان اسلامپ ۴- روزانه یکبار (برخی از آزمون های ردیف ۳)

۸-۳-۳ تضمین کیفیت

باید برای کنترل کلیه تجهیزات و فرآیند تولید، یک نظام تضمین کنترل کیفی تدوین شود. استفاده از نظام‌های کنترل کیفیت مانند ISO 9001 و ISO 17025 برای آزمایشگاه بسیار مفید می‌باشد.
پرسنل نیاز دارند تا قبل از تولید، توسط افراد با سابقه و متخصص، آموزش‌های لازم را فرا گیرند. سرفصل دوره‌های آموزشی ساخت مخلوط‌های آزمایشی SCC و انجام آزمایش‌های مربوطه شامل موارد زیر می‌باشد:

- تاثیر لرزاندن بر پایداری مخلوط؛
- آهنگ بتن‌ریزی؛
- تاثیر توقف یا قطع بتن‌ریزی؛
- عملیاتی که باید در هنگام توقف یا قطع بتن‌ریزی انجام داد؛
- مشاهده انسداد، جداشدگی و خروج حباب‌های هوا؛
- الزامات انتقال بتن با پمپ، ارتفاع ریزش یا شوت، شامل محل اسقرار برای جریان‌پذیری مخلوط؛
- پرداخت سطح نهایی و عمل آوری.

برنامه مدون برای کنترل مشخصات مصالح به خصوص سنگدانه‌ها و همچنین طرح مخلوط از اهمیت زیادی برخوردار است.

۸-۴ چک لیست‌های کنترل کیفی و نظارتی

۸-۴-۱ چک لیست کنترل مواد و مصالح

نظام فنی و اجرایی کشور	مجموعه چک لیست‌های بازرسی و پذیرش بتن خودتراکم کنترل سنگدانه‌ها، در آزمایشگاه	
نام آزمایشگاه:		شماره سریال چک لیست:
نام و مشخصات کارفرما/مشاور/پیمانکار:		تاریخ بازرسی:

آیتم‌هایی که باید کنترل شوند		
۱- مشخصات سنگدانه‌ها با الزامات ارایه شده در استاندارد ملی ایران به شماره ۳۰۲ یا مشخصات خصوصی، انطباق دارد؟	بله □	خیر □
۲- تاثیر شکل و بافت سنگدانه‌ها در مشخصات بتن تازه، رئولوژی و بتن سخت شده لحاظ شده است؟	بله □	خیر □
۳- در انتخاب حداکثر اندازه سنگدانه معیارهای مربوطه مورد بررسی قرار گرفته است؟	بله □	خیر □
۴- تاثیر حداکثر اندازه سنگدانه‌ها در بروز انسداد مورد بررسی قرار گرفته است؟	بله □	خیر □
۵- در تعیین نسبت اختلاط سنگدانه‌ها (کل مواد جامد) از منحنی‌های مخلوط استفاده شده‌است؟	بله □	خیر □
۶- در نسبت اختلاط انتخاب شده برای سنگدانه‌های ریز و درشت، دستورالعمل‌ها و راهنمایی‌های ارایه شده رعایت شده‌است؟	بله □	خیر □
۷- نوع سنگدانه‌های درشت؟	شکسته □	گردگوشه □
۸- نوع سنگدانه‌های ریز؟	شکسته □	گردگوشه □
توضیحات:		

نظام فنی و اجرایی کشور	**مجموعه چک لیست‌های بازرسی و پذیرش بتن خودتراکم** کنترل سنگدانه‌ها، در کارگاه	
نام / محل کارگاه:		**شماره سریال چک لیست:**
نام و مشخصات کارفرما/مشاور/پیمانکار:		**تاریخ بازرسی:**

آیتم‌هایی که باید کنترل شوند		
۱- آیا رطوبت سنگدانه‌ها بصورت مداوم کنترل می‌شود؟	بله □	خیر □
۲- کنترل رطوبت با استفاده از حسگرهای مخصوص انجام می‌شود؟	بله □	خیر □
۳- در صورتی که کنترل رطوبت با استفاده از حسگر انجام نمی‌شود، آیا تواتر کنترل رطوبت مطابق دستوالعمل می‌باشد؟	بله □	خیر □
۴- مقدار رطوبت سنگدانه‌ها بطور مداوم در طرح مخلوط اصلاح می‌شود؟	بله □	خیر □
۵- آیا در طرح مخلوط حداکثر اندازه سنگدانه‌ها مشخص شده است؟	بله □	خیر □
۵-۱ درصورت مشخص نشدن حداکثر اندازه سنگدانه در طرح:		
• آیا حداکثر اندازه سنگدانه‌ها کوچکتر از ۱۹ م.م. است؟	بله □	خیر □
• حداکثر اندازه سنگدانه‌ها باید از مقادیر زیر کوچکتر باشد:		
– یک پنجم کوچکترین فاصله قالب‌های قائم؛	بله □	خیر □
– یک سوم ضخامت قطعه یا دال بتنی؛	بله □	خیر □
– سه چهارم حداقل ضخامت پوشش روی میلگردها؛	بله □	خیر □
– دو سوم فاصله بین میلگردها.	بله □	خیر □
• آیا اثر حداکثر اندازه سنگدانه‌ها با استفاده از آزمایش «جعبه L» کنترل شده است؟	بله □	خیر □
۶- آیا شکل سنگدانه‌های درشت (از نظر تیزگوشه یا گردگوشه) با مشخصات طرح انطباق دارد؟	بله □	خیر □
۷- درصد دانه‌های پولکی و سوزنی با مشخصات طرح انطباق دارد؟	بله □	خیر □
۸- آیا دانه‌بندی و درصد عبوری از الک ۰/۰۷۵ سنگدانه‌های درشت با مشخصات طرح انطباق دارد؟	بله □	خیر □
۹- تواتر نمونه‌برداری و کنترل دانه‌بندی و درصد رطوبت سنگدانه‌های درشت مورد قبول است؟	بله □	خیر □
۱۰- آیا شکل سنگدانه‌های ریز (از نظر تیزگوشه یا گردگوشه) با مشخصات طرح انطباق دارد؟	بله □	خیر □
۱۱- آیا دانه‌بندی و درصد عبوری از الک ۰/۰۷۵ سنگدانه‌های ریز با مشخصات طرح انطباق دارد؟	بله □	خیر □
۱۲- تواتر نمونه‌برداری و کنترل دانه‌بندی و درصد رطوبت سنگدانه‌های ریز مورد قبول است؟	بله □	خیر □
توضیحات:		

نظام فنی و اجرایی کشور	مجموعه چک لیست‌های بازرسی و پذیرش بتن خودتراکم کنترل فیلر، در آزمایشگاه	
نام آزمایشگاه:		شماره سریال چک لیست:
نام و مشخصات کارفرما/مشاور/پیمانکار:		تاریخ بازرسی:

آیتم‌هایی که باید کنترل شوند		
۱- آیا از مواد فیلر استفاده می‌شود؟	بله □	خیر □
۲- نوع فیلر: الف) معدنی □ مصنوعی □ ب) خنثی □ ← دارای منشاء آهکی □ دارای منشاء سیلیسی □ پ) دارای فعالیت پوزولانی □ ← دوده‌سیلیس □ خاکستر بادی □ غیره □		
۳- آیا دانه‌بندی و شکل ذرات فیلر کنترل شده است؟	بله □	خیر □
۴- جذب آب فیلر با استفاده از آمایش تعیین شده است؟	بله □	خیر □
۵- وجود رس و مواد مضر در فیلرهای معدنی و خنثی کنترل شده‌است؟	بله □	خیر □
۶- از چه روشی برای کنترل وجود مواد مضر و رس استفاده شده‌است؟	الف) آنالیز حرارتی □ ب) هم ارز ماسه □ پ) آزمایش متیلن بلو □ ت) غیره (توضیح دهید) □	
۷- تاثیر استفاده از فیلرها در کارایی، میزان مواد افزودنی شیمیایی و مقاومت کنترل شده است؟	بله □	خیر □
توضیحات		

نظام فنی و اجرایی کشور	مجموعه چک لیست‌های بازرسی و پذیرش بتن خودتراکم کنترل فیلر، در کارگاه	
نام / محل کارگاه:		شماره سریال چک لیست:
نام و مشخصات کارفرما/مشاور/پیمانکار:		تاریخ بازرسی:

آیتم‌هایی که باید کنترل شوند		
۱- مشخصات فیلر با مشخصات تعیین شده در مدارک انطباق دارد؟	بله □	خیر □
۲- دانه‌بندی و حداکثر اندازه ذرات بصورت مستمر اندازه‌گیری و کنترل می‌شود؟	بله □	خیر □
۳- وجود مواد رسی یا مضر کنترل می‌شود؟	بله □	خیر □
۴- نحوه مصرف/ اضافه کردن فیلر در مخلوط‌کن؟	بصورت پودر □	بصورت دوغاب یا لجن □
۵- در صورتی‌که فیلر بصورت پودر مصرف می‌شود: الف) آیا مخلوط بتن همگن و توزیع ذرات فیلر بصورت یکنواخت می‌باشد؟ ب) رطوبت فیلر کنترل می‌شود؟ پ) تواتر کنترل رطوبت مورد تائید است؟ ت) اصلاح طرح مخلوط بر اساس مقدار رطوبت بصورت مستمر انجام می‌گیرد؟	 بله □ بله □ بله □ بله □	 خیر □ خیر □ خیر □ خیر □
۶- در صورتی‌که فیلر بصورت دوغاب یا لجن استفاده می‌شود: الف) آیا نحوه ذخیره‌سازی مناسب می‌باشد؟ ب) تدابیر لازم برای جلوگیری از ته‌نشینی انجام شده‌است؟ پ) مخزن در برابر تغییر دما و بخصوص یخزدن محافظت شده‌است؟ ت) میزان مواد جامد (چگالی) بصورت مستمر کنترل می‌شود؟	 بله □ بله □ بله □ بله □	 خیر □ خیر □ خیر □ خیر □
توضیحات		

نظام فنی و اجرایی کشور	مجموعه چک لیست‌های بازرسی و پذیرش بتن خودتراکم کنترل سیمان، در آزمایشگاه	
نام آزمایشگاه:		شماره سریال چک لیست:
نام و مشخصات کارفرما/مشاور/پیمانکار:		تاریخ بازرسی:

آیتم‌هایی که باید کنترل شوند		
۱- آزمایش‌های کنترل کیفی روی سیمان انجام شده است؟	بله □	خیر □
۲- سازگاری نوع سیمان (خواص شیمیایی) با نوع فوق‌روان کننده مورد بررسی قرار گرفته است؟	بله □	خیر □
۳- آیا نوع سیمان بر اساس الزامات دوام می‌باشد؟	بله □	خیر □
۴- حداکثر مقدار سیمان بر اساس ابعاد قطعه، شرایط محیطی و الزامات دوام کنترل شده است؟	بله □	خیر □
توضیحات		

نظام فنی و اجرایی کشور	مجموعه چک لیست‌های بازرسی و پذیرش بتن خودتراکم کنترل سیمان، در کارگاه	
نام / محل کارگاه:		شماره سریال چک لیست:
نام و مشخصات کارفرما/مشاور/پیمانکار:		تاریخ بازرسی:

آیتم‌هایی که باید کنترل شوند		
۱- آیا سیمان مصرفی (از نظر نوع، مشخصات فیزیکی و شیمیایی) با سیمان مصرفی در آزمایشگاه یکسان است؟	بله □	خیر □
۲- آیا کنترل مشخصات سیمان مصرفی در تواتر مشخص شده انجام می‌شود؟	بله □	خیر □
۳- نحوه نگهداری سیمان مورد تائید است؟	بله □	خیر □
۴- آیا در هر سیلو فقط یک نوع سیمان ذخیره می‌شود؟	بله □	خیر □
۵- مدت زمان نگهداری سیمان از مقادیر مشخص شده در دستورالعمل و مشخصات فنی، کمتر است؟	بله □	خیر □
۶- در صورتی‌که بتن بصورت نما (Expose) می‌باشد، تدابیر لازم برای کنترل رنگ و کیفیت سطح ظاهری لحاظ شده است؟	بله □	خیر □
توضیحات		

نظام فنی و اجرایی کشور	مجموعه چک لیست‌های بازرسی و پذیرش بتن خودتراکم کنترل مواد جایگزین سیمان، در آزمایشگاه	
نام آزمایشگاه:		شماره سریال چک لیست:
نام و مشخصات کارفرما/مشاور/پیمانکار:		تاریخ بازرسی:

آیتم‌هایی که باید کنترل شوند		
۱- آیا از مواد جایگزین سیمان استفاده می‌شود؟	بله □	خیر □
۲- از چه مواد افزودنی معدنی به عنوان جایگزین سیمان استفاده شده است؟ **الف) دوده‌سیلیس ب) خاکستر بادی پ) سرباره ت) زئولیت ث) متاکائولن** **ج) پوزولان‌های طبیعی چ) غیره**		
۳- آیا مشخصات مواد جایگزین سیمان مورد استفاده بر اساس آزمایش مشخص شده است؟	بله □	خیر □
۴- درصد استفاده از مواد جایگزین بر اساس ساخت مخلوط‌های مختلف بدست آمده است؟	بله □	خیر □
۵- سازگاری و میزان مصرف مواد افزودنی شیمیایی با توجه به نوع ماده جایگزین سیمان و شرایط اقلیمی، مورد بررسی قرار گرفته است؟	بله □	خیر □
۶- چنان‌چه از مواد جایگزین سیمان به منظور تامین دوام استفاده می‌شود، آیا از نظر تامین مقدار مواد پودری کنترل‌های لازم انجام شده است؟	بله □	خیر □
توضیحات		

نظام فنی و اجرایی کشور	مجموعه چک لیست‌های بازرسی و پذیرش بتن خودتراکم کنترل مواد جایگزین سیمان، در کارگاه	
نام / محل کارگاه:		شماره سریال چک لیست:
نام و مشخصات کارفرما/مشاور/پیمانکار:		تاریخ بازرسی:

آیتم‌هایی که باید کنترل شوند		
۱- مشخصات و نوع ماده افزودنی معدنی مورد استفاده با نوع ماده تعیین شده در مشخصات فنی مطابقت دارد؟	بله □	خیر □
۲- میزان مصرف ماده جایگزین سیمان با مقدار بدست آمده در طرح آزمایشگاهی انطباق دارد؟	بله □	خیر □
۳- نحوه نگهداری و مصرف مواد جایگزین سیمان مورد تائید می‌باشد؟	بله □	خیر □
۴- اگر مواد جایگزین، بصورت پودری به مخلوط اضافه می‌شود، آیا از اختلاط مناسب و همگنی بتن اطمینان وجود دارد؟	بله □	خیر □
۵- چنانچه مواد جایگزین بصورت دوغاب یا ژل مصرف می‌شود،آیا نوع، مشخصات و نحوه مصرف با طرح مخلوط آزمایشگاهی انطباق دارد و مورد تائید می‌باشد؟	بله □	خیر □
۶- در صورتی‌که مواد جایگزین سیمان بصورت دوغاب یا ژل مصرف می‌شود، آیا میزان چگالی یا درصد مواد جامد آن کنترل می‌شود؟	بله □	خیر □
توضیحات		

نظام فنی و اجرایی کشور	مجموعه چک لیست‌های بازرسی و پذیرش بتن خودتراکم کنترل مواد افزودنی شیمیایی، در آزمایشگاه	
نام آزمایشگاه:		شماره سریال چک لیست:
نام و مشخصات کارفرما/مشاور/پیمانکار:		تاریخ بازرسی:

آیتم‌هایی که باید کنترل شوند		
۱- از چه نوع / انواعی مواد افزودنی شیمیایی در طرح مخلوط استفاده شده است؟ **الف) فوق روان کننده □ ب) دیرگیر کننده □ پ) اصلاح کننده گرانروی □ ت) حباب ساز □** **ث) غیره □ (نام ببرید)**		
۲- مشخصات مواد افزودنی مورد استفاده کنترل شده است؟	**بله □**	**خیر □**
۳- در صورت استفاده از چند نوع ماده افزودنی شیمیایی، آیا سازگاری و عملکرد آن‌ها کنترل و بررسی شده‌است؟	**بله □**	**خیر □**
۴- سازگاری و عملکرد مواد افزودنی با نوع و مشخصات سیمان و همچنین شرایط اقلیمی کنترل و مورد بررسی قرار گرفته است؟	**بله □**	**خیر □**
۵- در صورت نیاز به حفظ اسلامپ، آیا در آزمایشگاه با در نظر گرفتن شرایط کارگاه، آزمایش‌های لازم برای کنترل حفظ کارایی انجام شده است؟	**بله □**	**خیر □**
۶- آیا حداکثر میزان مصرف ماده افزودنی بر اساس توصیه سازنده و همچنین عملکرد بتن مورد بررسی قرار گرفته است؟	**بله □**	**خیر □**
۷- در صورت نیاز به ایجاد مقدار مشخصی حباب هوا، آیا با توجه به مشخصات دیگر مواد افزودنی و شرایط حمل، ریختن و همچنین شرایط اقلیمی از ایجاد و حفظ مقدار حباب هوای مورد نیاز اطمینان وجود دارد؟	**بله □**	**خیر □**
۸- در صورت استفاده از مواد اصلاح کننده گرانروی، نوع و مشخصات آن ذکر شود.		
۹- آیا اثر ماده اصلاح کننده گرانروی در مقاومت و همچنین مشخصات بن تازه، با توجه به شرایط اقلیمی و الزامات مورد نیاز، به دقت مورد بررسی قرار گرفته است؟	**بله □**	**خیر □**
توضیحات		

نظام فنی و اجرایی کشور	مجموعه چک لیست‌های بازرسی و پذیرش بتن خودتراکم کنترل مواد افزودنی شیمیایی، در کارگاه	
نام / محل کارگاه:		شماره سریال چک لیست:
نام و مشخصات کارفرما/مشاور/پیمانکار:		تاریخ بازرسی:

آیتم‌هایی که باید کنترل شوند		
۱- آیا نوع و مشخصات مواد افزودنی شیمیایی مورد مصرف، با نوع و مشخصات تعیین شده در مدارک فنی و طرح اختلاط آزمایشگاهی انطباق دارد؟	بله □	خیر □
۲- آیا آزمایش‌های لازم جهت کنترل نوع، کیفیت و یکنواختی در مشخصات مواد افزودنی به صورت مستمر انجام می‌شود؟	بله □	خیر □
۳- نحوه نگهداری و استفاده از مواد افزودنی در هنگام ساخت، مورد تائید است؟	بله □	خیر □
۴- آیا عملکرد ماده افزودنی با توجه به مشخصات مصالح و الزامات مورد نیاز از بتن تازه، مورد تائید است؟	بله □	خیر □
۵- سیستم توزین و اختلاط بتن، مجهز به تجهیزات لازم برای توزین مواد افزودنی می‌باشد؟	بله □	خیر □
۶- مدت زمان نگهداری بر اساس توصیه سازنده (فروشنده) کنترل می‌شود، نحوه نگهداری، تاثیری بر مشخصات ماده افزودنی ندارد؟	بله □	خیر □
۷- آیا در هنگام نگهداری، جداسازی‌های لازم از نظر نوع و زمان خریداری برای انواع مواد افزودنی رعایت می‌شود؟	بله □	خیر □
توضیحات		

نظام فنی و اجرایی کشور	مجموعه چک لیست‌های بازرسی و پذیرش بتن خودتراکم کنترل آب، در آزمایشگاه	
نام آزمایشگاه:		شماره سریال چک لیست:
نام و مشخصات کارفرما/مشاور/پیمانکار:		تاریخ بازرسی:

آیتم‌هایی که باید کنترل شوند		
۱- در ساخت مخلوط‌های آزمایشی از چه آبی استفاده شده است؟ **الف) مطابق با نمونه آب مصرفی در کارگاه** **ب) آب مورد استفاده در آزمایشگاه**		
۲- آیا آزمایش‌های لازم برای تعیین تجزیه آب مورد مصرف در کارگاه انجام شده است؟	**بله** □	**خیر** □
۳- در صورتی‌که قرار است بتن خودتراکم بصورت نما مورد استفاده قرار گیرد، آیا تاثیر آب مصرفی از نظر شوره زدگی یا تغییر رنگ بتن مورد بررسی قرار گرفته است؟	**بله** □	**خیر** □
توضیحات		

نظام فنی و اجرایی کشور	مجموعه چک لیست‌های بازرسی و پذیرش بتن خودتراکم کنترل آب، در کارگاه	
نام / محل کارگاه:		شماره سریال چک لیست:
نام و مشخصات کارفرما/مشاور/پیمانکار:		تاریخ بازرسی:

آیتم‌هایی که باید کنترل شوند		
۱- محل تامین آب اختلاط را مشخص نمائید. **الف) آب آشامیدنی از شبکه لوله‌کشی** **ب) آب چاه** **پ) آب قنات** **ت) آب رودخانه** **ث) غیره (نام ببرید)**		
۲- آیا آزمایش‌های لازم برای تعیین مشخصات آب مصرفی انجام شده‌است؟	**بله** □	**خیر** □
۳- آیا تواترآزمایش‌های کنترل کیفیت آب طبق برنامه مشخص شده انجام می‌شود؟	**بله** □	**خیر** □
۴- آیا نحوه ذخیره آب مورد تائید می‌باشد؟	**بله** □	**خیر** □
۵- آیا مخزن نگهداری آب در برابر یخزدن و یا افزایش بیش از حد حرارت محافظت شده‌است؟	**بله** □	**خیر** □
۶- آیا کیفیت آب از محل تامین / ذخیره تا محل مصرف به مواد غیر آلوده نمی‌شود؟	**بله** □	**خیر** □
۷- مواد نامحلول و ناخالصی‌های آب تاثیر نامطلوبی بر نمای ظاهری بتن‌های خود نما ندارد؟	**بله** □	**خیر** □
توضیحات		

۸-۴-۲ چک لیست‌های تجهیزات، انبارش و اختلاط

نظام فنی و اجرایی کشور	مجموعه چک لیست‌های بازرسی و پذیرش بتن خودتراکم کنترل تجهیزات، انبارش و اختلاط	
نام / محل کارگاه:		شماره سریال چک لیست:
نام و مشخصات کارفرما/مشاور/پیمانکار:		تاریخ بازرسی:

آیتم‌هایی که باید کنترل شوند		
۱- آیا از پرسنل با تجربه و دوره دیده در فرآیند تولید استفاده می‌شود؟	بله □	خیر □
۲- آیا تعداد نیروهای فنی و اجرایی موجود در فرآیند تولید کفایت می‌کند؟	بله □	خیر □
۳- آیا مدارک و مستندات دوره‌های آموزشی پرسنل در کارگاه موجود می‌باشد؟	بله □	خیر □
۴- آیا دوره‌های گذرانده شده با مسئولیت پرسنل تطابق دارد؟	بله □	خیر □
۵- آیا در طول مدت نگهداری، مشخصات مصالح دچار تغییر قابل ملاحظه‌ای می‌شود (آلوده شدن به مواد غیر یا فاسد شدن)؟	بله □	خیر □
۶- آیا از تطابق مشخصات مصالح حمل شده با نوع ذکر شده در بارنامه، اطمینان حاصل می‌شود؟	بله □	خیر □
۷- آیا مدارک . مستندات بارنامه و مصالح ورودی به کارگاه ثبت و نگهداری می‌شود؟	بله □	خیر □
۸- آیا سیلوها یا مخازن نگهداری نام‌گذاری شده‌اند؟ و آیا نوع و مشخصات مصالح با نام‌گذاری روی آن‌ها تطابق دارد؟	بله □	خیر □
۹- آیا تجهیزات توزین بصورت ادواری و با استفاده از وسایل و تجهیزات مناسب واسنجی شده‌اند؟	بله □	خیر □
۱۰- آیا حداکثر خطا برای توزین مصالحی که کمتر از ۲۰ درصد ظرفیت تجهیزات می‌باشد، مورد قبول است؟ (باید ۲±٪ میزان بار باشد)	بله □	خیر □
۱۱- آیا حداکثر خطا برای توزین مصالحی که بیش از ۲۰ درصد ظرفیت تجهیزات می‌باشد، مورد قبول است؟ (باید ۱±٪ میزان بار باشد)	بله □	خیر □
۱۲- آیا حداکثر خطا برای پیمانه حجمی مصالحی که کمتر از ۳۰ لیتر هستند، مورد قبول است؟ (باید ۳±٪ حجم باشد)	بله □	خیر □
۱۳- آیا حداکثر خطا برای پیمانه حجمی مصالحی که مساوی یا بیشتر از ۳۰ لیتر هستند، مورد قبول است؟ (باید ۲±٪ حجم باشد)	بله □	خیر □
۱۴- نوع مخلوط کن مورد استفاده ؟ **الف) دو محوره افقی ب) یک محوره افقی پ) مخلوط کن تغاری ت) مخلوط کن تغاری از نوع سیاره‌ای** **ث)مخلوط کن درام**		
۱۵- آیا ظرفیت مخلوط کن و تجهیزات توزین و حمل مصالح، با مقدار بتن مورد نیاز تطابق دارند؟	بله □	خیر □
۱۶- آیا بتن تولیدی یکنواخت و بدون جداشدگی می‌باشد؟	بله □	خیر □

۱۷- آیا تجهیزات لازم برای توزین مکانیزه (وزنی یا حجمی) مواد افزودنی شیمیایی تدارک دیده شده‌است؟	**بله** □	**خیر** □
۱۸- آیا تجهیزات لازم برای توزین مکانیزه (وزنی یا حجمی) مواد افزودنی معدنی یا پودری تدارک دیده شده‌است؟	**بله** □	**خیر** □
۱۹- آیا مدارک و مستندات مربوط به جزئیات ساختار، نوع و ظرفیت سامانه پیمانه (وزنی یا حجمی) باید در محل کارگاه قابل دسترس است؟	**بله** □	**خیر** □
۲۰- آیا سیمان، سنگدانه‌های معمولی و سنگین، الیاف و مواد افزودنی که به شکل پودر مورد استفاده قرار می‌گیرند، بصورت وزنی، اندازه‌گیری شوند؟	**بله** □	**خیر** □
۲۱- آیا رواداری توزین مصالح، مطابق الزامات تعیین شده (جدول ۸-۳) می‌باشد؟	**بله** □	**خیر** □
۲۲- آیا مدت زمان اختلاط کنترل شده و مناسب می‌باشد (بگونه‌ای که مخلوط همگنی تولید شود)؟	**بله** □	**خیر** □
۲۳- آیا در کارگاه برنامه زمانبندی مدون و مناسبی برای سرویس و نگهداری تجهیزات و ابزار وجود دارد (مطابقجدول ۸-۳)؟	**بله** □	**خیر** □
۲۴- آیا بصورت سیستماتیک از صحت عملکرد تجهیزات و ابزار اطمینان حاصل می‌شود؟	**بله** □	**خیر** □
۲۵- آیا نحوه تخلیه بتن از مخلوط‌کن باعث تغییر در مشخصات، همگنی و یا جداشدگی نمی‌شود؟	**بله** □	**خیر** □
۲۶- آیا ظرفیت بارگیری در مخلوط‌کن، مطابق با توصیه سازنده می‌باشد؟ (توصیه می‌شود حداکثر از ۹۰ ٪ ظرفیت مخلوط‌کن استفاده شود)	**بله** □	**خیر** □
توضیحات		

۸-۴-۳ چک لیست‌های آزمایش‌های بتن‌تازه و سخت شده و تواتر نمونه‌برداری

نظام فنی و اجرایی کشور	مجموعه چک لیست‌های بازرسی و پذیرش بتن خودتراکم نمونه برداری و آزمایش‌های بتن تازه و سخت شده	
نام / محل کارگاه:		شماره سریال چک لیست:
نام و مشخصات کارفرما/مشاور/پیمانکار:		تاریخ بازرسی:

آیتم‌هایی که باید کنترل شوند		
۱- آیا نمونه‌برداری گروه »کنترل» و گروه «مقاومت» انجام می‌گردد؟	بله □	خیر □
۲- آیا نمونه‌برداری گروه «کنترلی» طبق دستورالعمل ارایه شده، انجام می‌شود؟	بله □	خیر □
۳- آیا نمونه‌برداری گروه «مقاومتی» طبق دستورالعمل ارایه شده، انجام می‌شود؟	بله □	خیر □
۴- آیا تغییرات میزان جریان اسلامپ بین نمونه‌های تهیه شده از پیمانه‌های مختلف کمتر از ۴۰ mm است؟	بله □	خیر □
۵- آیا تغییرات دیگر پارامترها، بین نمونه‌های تهیه شده از پیمانه‌های مختلف مطابق جدول ۸-۲ است؟	بله □	خیر □
۶- آیا رواداری آزمایش جریان اسلامپ، نسبت به مقدار مشخص شده، ۷± درصد و زمان T50، ۱± ثانیه است؟	بله □	خیر □
۷- آیا رواداری آزمایش قیف V، نسبت به مقدار مشخص شده، برای زمان‌های کمتر از ۹ ثانیه، ۳± ثانیه و برای زمان‌های مساوی یا بیشتر از ۹ ثانیه، ۵± ثانیه است؟	بله □	خیر □
۸- آیا تواتر نمونه‌برداری مطابق نشریه ۲-۱۲۰ سازمان برنامه و بودجه (آبا) می‌باشد؟	بله □	خیر □
۹- در صورت تغییر قابل ملاحظه در مشخصات یا نوع مصالح، طرح مخلوط کنترل و اصلاح می‌شود؟	بله □	خیر □
۱۰- آیا نمونه‌های برداشته شده از بتن، در مدت زمان نگهداری در کارگاه (یا کارخانه) طبق ضوابط نگهداری و عمل آوری می‌شوند؟	بله □	خیر □
۱۱- آیا نمونه‌ها پس از یک روز با حفظ رطوبت و شرایط مراقبتی لازم به آزمایشگاه منتقل می‌شوند؟	بله □	خیر □
۱۲- آیا دستگاه نظارت نسبت به کنترل فرآیند نمونه‌برداری، صحت و ارسال آن‌ها به آزمایشگاه نظارت دارد؟	بله □	خیر □
۱۳- آیا کارخانه تولید بتن یا مسئول تولید بتن در کارگاه، نسبت به اصلاح سریع اقدامات اصلاحی (بر اساس مشخصات بتن تازه یا سخت شده) اقدام متناسب را انجام می‌دهد؟	بله □	خیر □
توضیحات		

نظام فنی و اجرایی کشور	مجموعه چک لیست‌های بازرسی و پذیرش بتن خودتراکم نتایج کنترل مشخصات بتن تازه و سخت شده	
نام / محل کارگاه:		شماره سریال چک لیست:
نام و مشخصات کارفرما/مشاور/پیمانکار:		تاریخ بازرسی:

مشخصه/فعالیت	مرجع	الزامات	انطباق
آزمایش‌های کارایی			
جریان اسلامپ		..... تا ..... میلی‌متر	دارد □ ندارد □
شاخص چشمی پایداری		VSI 0 یا VSI 1	دارد □ ندارد □
زمان T50 در آزمایش جریان اسلامپ		..... تا ..... ثانیه	دارد □ ندارد □
حلقه J		..... تا ..... میلی‌متر	دارد □ ندارد □
قیف V		..... تا ..... ثانیه	دارد □ ندارد □
قیف V- T5 min.		+ ..... ثانیه بیشتر از زمان V	دارد □ ندارد □
جعبه L		H2/H1 = ... تا	دارد □ ندارد □
جعبه U		H2-H1 = ... میلی‌متر	دارد □ ندارد □
مشخصات بتن سخت شده			
مقاومت فشاری • ۳ روز • ۷ روز • ۲۸ روز		برای سنین به غیر از ۲۸ روز، مطابق شرایط فنی خصوصی و برای سن ۲۸ روز مطابق نشریه ۲-۱۲۰ سازمان برنامه و بودجه	دارد □ ندارد □ دارد □ ندارد □ دارد □ ندارد □
پارامترهای دوام (در صورت نیاز) • جذب آب (بعد از ۳۰ دقیقه غرقاب) • مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید • عمق نفوذ آب تحت فشار		مطابق جدول نشریه ۲-۱۲۰ سازمان برنامه و بودجه	دارد □ ندارد □ دارد □ ندارد □ دارد □ ندارد □

منابع

۱- مهتا و مونته‌ئیرو. "ریزساختار، خواص و اجزای بتن (تکنولوژی بتن پیشرفته)". ترجمه رمضانیانپور، علی‌اکبر، قدوسی، پرویز، گنجیان، اسماعیل، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۵.

۲- فروغی‌اصل، ع.، فامیلی، ه. "بررسی ویژگی‌های عمومی بتن خود تراکم و دلایل گسترش آن در دنیا". شکرچی‌زاده، م.، لیبر، ن. (تدوین‌کنندگان)، مجموعه مقالات اولین کارگاه تخصصی بتن خودتراکم، اسفند ۱۳۸۵، ص ۱-۱۲.

۳- پرویز قدوسی ، علی اکبر رمضانیانپور ، محمد شکرچی زاده ، طیبه پرهیزکار ، محسن تدین ، امیر مازیار رئیس قاسمی ، علی اکبر شیرزادی جاوید، "دستورالعمل و مشخصات فنی بتن خودتراکم"، نشریه ض - ۷۰۶، مرکز تحقیقات راه ، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۳.

4- Khayat, K.H.; Hu, C.; Laye, J.M., “Importance of Aggregate Packing Density on Workability of Self-Self-Consolidating Concrete,” *Conference Proceedings: First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Nov. 12-13, 2002,* Center for Advanced Cement-Based Materials, 2002, p. 53-64.

5- BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, EFCA an EFNARC, “European Guidelines for Self-Consolidating Concrete: Specification, Production and Use”, 2005, 63 pp., http://www.EFNARC.org/pdf/SCC Guidelines May 2005. Pdf.

6- Naji, S., Hwang, S., and Khayat, K., “Robustness of Self-consolidating Concrete Incorporating Different Voscosity-Enhancing Admixtures”, ACI Materials Journal, V. 108, No. 4, 2011, pp. 432-438.

7- Kwan, A.K.H., and Ng, I.Y.T., “Improving Performance and Robustness of SCC by adding Supplementary Cementitious Materials”, Construction and Building Material, Vol. 24, 2010, pp. 2260-2266.

8- Georgiadis, A.S., Sideris, K.K., and Anagnostropoulos, N.S., “Properties of SCC Produced with Limestone Filler or VMA, Material Civil Engineering, ASCE, 2010, Vol. 22, pp. 352-360.

9- ACI Committee 237, ACI 237R-07: Self-Consolidating Concrete, Farmington Hills (USA): American Concrete Institute, 2007, pp. 30.

10- Khayat, K.H., “Optimization and Performance of Air-entrained, Self-consolidating Concrete, ACI Material Journal, 2009, Vol. 97, pp. 526-535.

11- Nunes, S., Oliveira, P.M., Coutinho, J.S., and Figueiras, J., “Rheological Characterization of SCC Motors and Pastes with Changes Induced by Cement Delivery”, Cement and Concrete Composites, Vol. 33, 2011, pp. 103-115.

12- Billberg, P., Silfwerbrand, J., and Osterberg, T., From Pressures Generated by Self-consolidating Concrete, Concrete International, Oct. 2005, pp. 35-42.

13- Assaad, J., and Khayat, K.H., Effect of Coarse Aggregate Characteristics on Lateral Pressure Exerted by Self-consolidating Concrete, ACI Material Journal, Vol. 102, 2005, pp. 145-153.

14- Gregori, A., Ferron, R.P., Sun, Z., and Shah, S., Experimental Simulation of Self-consolidating Concrete Formwork Pressure, ACI Materials Journal, Vol. 105, 2008, pp. 97-104.

15- Leemann, A., Hoffmann, C., and Winnefeld, F., Pressure of Self-consolidating Concrete on Formwork, Concrete International. 2006, pp. 27-31.

16- Assaad, J., and Khayat, K.H., Kinetics of Formwork Pressure of Self-consolidating Concrete Containing Various Types and Contents of Binder, Cement and Concrete Research, Vol. 35, 2005, pp. 1522-1530.

17- Assaad, J.J., and Khayat, K.H., Effect of Mixture Consistency on Formwork Pressure Exerted by Highly Flowable Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 2006, Vol. 18, pp. 786-791.

18- RILEM, Technical Committee 188-CSC, Casting of Self-compacting Concrete, 2006.

19- RMCAO, Best Practices Guidelines for Self-consolidating Concrete, Ready Mixed Concrete Association of Ontario, 2009.

20- EFNARC, Specification and Guidelines for Self-compacting Concrete, European Federation of National Trade Associations, 2002.

21- RILEM, Casting of Self-compacting Concrete, Final Report of RILEM Technical Committee 188-CSC, Editors, A. Skarendahl and P. Billberg, 2006.

22-Koehler, E.P., and Fowler, D.W., Inspection Manual for Self-consolidating Concrete in Precast Members, Center for Transportation Research, The University of Texas, Project Report, 2007.

23- www.omran-ag.ir.

24- Canadian Precast/Prestressed Concrete Institute, www.cpi.ca.

۲۵-محمد شکرچی‌زاده ، نیکلاس علی لیبر ،مهرداد ماهوتیان، علیرضا محبی، سجاد بهاری یکتا،"آزمایش‌های بتن خودتراکم و تفسیر نتایج بدست آمده در برآورد پایداری بتن تازه "، اولین کارگاه تخصصی بتن خودتراکم، دانشکده فنی دانشگاه تهران، اسفند ۸۵

26-B.Ekmen, “Self-Cpmpacting Concrete For Presented Bridge Giders”,A Dissertation Submitted to the Gratuate School of the University of Minnesota, Octobr2008.

۲۷-سازمان استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، "بتن- اندازه‌گیری جریان اسلامپ بتن خودتراکم- روش آزمون"، استاندارد ملی ایران، ۱۱۲۷۰، چاپ اول.

28-EFNARC, “The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use”, May 2005, 68 pp., http://www.efnarc.org.

29-Skahn, Lawrence . F .Kurtis, Kimberly, E. and Horta, A.,” Evaluation of Self Compacting Concrete for Bridge Structure Applications”, Georgia Department of Transportation, URL.

۳۰-امیر مهدی اعتمادرضایی، "آزمایش‌های بتن تازه خودتراکم"، گزارش داخلی انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران، ۱۳۸۸.

31-Khanzadi, m.,” Fresh and Early age properties of high flowing concrete”,these submitted for Doctor of Engineering, p.p. 30-31.

32-ASTM C 1611/C 1611M-05. “Standard Test Method for Slump-Flow of Self-Consolidating Concrete,” ASTM International.

۳۳-راحیل خوش‌نظر، "بررسی ناپایداری در بتن خودتراکم، روش‌های اندازه‌گیری و شیوه‌های بهبود"، پایان نامه برای دریافت درجه کاشناسی ارشد، تابستان ۸۹.

۳۴-محمد شکرچی‌زاده، آرزو امدادی، نیکلاس علی لیبر،علیرضا محبی، سجاد بهاری یکتا،"رفتارشناسی بتن تازه"، اولین کارگاه تخصصی بتن خودتراکم، اسفند ۸۵.

35-Nevil AM, and Brooks, JJ,” Concrete technology”, Longman scientific and technology, 1983.

36-Ramkhandani, V.S.” Superplasticizers in Concrete”, Canadian Building Digest NRC.CBD-203,p.p.1-6,1979

37-Tattersal, G.,Hand Banfill,PF,” the rheology of fresh concrete”, Pitman advanced Publishing program , 1983.

38-Ramage, B., Kahn, L., and Kurtis, K., “Evaluation of Self-Consolidating Concrete for Bridge Structure Applications: Task 1 Report,” Structural Engineering Mechanics and Material Special Research Problem Report, Georgia Institute of Technology, June 2004.

39-ACI 237R-07, “Self-consolidating concrete”, ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA, 2007, 30 pp.

40-Khayat, K. H., “Workability, Testing, and Performance of Self-Consolidating Concrete”, ACI Materials Journal, V. 96, No. 3, May-June. 1999, pp. 346-354.

41-Khayat, K. H., Assaad, J., and Daczko J., “Comparison of Field-Oriented Test Methods to Assess Dynamic Stability of Self-Consolidating Concrete,” ACI Materials Journal, V. 101, No. 2, Mar.-Apr. 2004, pp. 168-176.

42-EFNARC, “Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete,” Feb. 2002, 32 pp., http://www.efnarc.org

43-Shekarchi, M., Libre, N. A., Khoshnazar, R., Bagherzadeh, A., and Babanejad, S. K., “Highly Flowable Concrete Made with Different Aggregate Grading,” Proceedings of 8th International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete, Tokyo, Japan, 2008, pp. 182.187.

44-Construction Materials Institute (CMI) at University of Tehran, Photographs were taken by Khoshnazar, 2007. http://www.cmi.ut.ac.ir

45-ASTM C 1621/C1621M-06. “Standard Test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-Ring,” ASTM International.

46-Daczko, J. A., “A comparison of passing ability test methods for self-consolidating concrete,” 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 335-344.

47-Jooste, J. P., “Approaches to Mix Design and Measurement of Workability for Self-Compacting Concrete”, A Thesis for the Degree of Master of Engineering, Faculty of Engineering and the Built Environment, University of the Witwatersrand, 2006.

48-Illinois Test Procedure SCC-3, “Standard Test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-Ring and Slump Cone”, 2007.

49-Wüstholz, T., Fresh properties of Self-Compacting Concrete (SCC). Otto-Graf-Journal, vol. 14, 2003, pp 179-188.

50-F.Larrad, C.F.Ferraise,and T.Sedran,” Fresh concrete: Herschel-Bulkley Material, Mortar”, Struct.31,4,4-498(1998)

51-G.H.Tattersall,” The Workability of Concrete, A View Point Publication”, PCA1976

52-Ozawa, K., Sakata, N., and Okamura, H., “Evaluation of Self-Compactibility of Fresh Concrete Using the Funnel Test,” Proceedings, Japan Society of Civil Engineering 25, 1995, pp. 59-75.

53-Emborg, M., Gurnewald, S., Hedin, C., and Carlsward, J. (2003). “Test Methods for Filling Ability of SCC,” 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 323-334.

54-Japan Society of Civil Engineers: Concrete Library 93, High-fluidity Concrete Construction Guideline, 1999.

۵۵-آرمین منیر عباسی،"اثر طرح مخلوط درجمع شدگی خمیری و ناشی از خشک شدن بتن خودتراکم"، پایان نامه دکتری، دانشگاه علم و صنعت ایران، اردیبهشت ۱۳۸۸، صفحه ۶۱-۶۴

56-Koehler, E. P., “Aggregates in Self-Consolidating Concrete,” A Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy, University of Texas at Austin, 2007, 426 pp. ICAR.

57-G. De. Schutter,” Guideline For Testing Fresh Self-Compacting Concrete“, September 2005.

58-ASTM C 1610/C 1610M – 06a, “Static Segregation of Self-Consolidating Concrete Using Column Technique”.

59-Shekarchi, M., Libre, N. A., and Khoshnazar, R., “Aggregate: A Key of Assessing Self-Consolidating Concrete,” Accepted for Publication in CPI Journal.

60-Shekarchi, M., Libre, N. A., Mahoutian, Mohebi, A., Behradi Yekta, S., “SCC Test Methods and Discussion of the Results of Fresh SCC Stability,” Proceedings of 1st SCC Workshop, University of Tehran, Iran, 2007, pp. 101-120.

61-E. P. Koehlor, D. W. Fowler, ICAR Project 108: ”Aggregate in Self-Consolidating Concrete”, Aggregate Fundation For Technology, Research and Education(AFTRE), International Center For Aggregate Research(ICAR), The University Of Texas at Astin, March 2007.

62-Bui, V.K., Montgomery, D., Hinczak, I., Turner, K. (2002). “Rapid test method for segregation resistance of self-compacting concrete,” Cement and Concrete Research, 32, pp. 1489-1496.

63-ASTM C 1712, “Standard Test Method for Rapid Assessment of Static Segregation Resistance of Self-Self-Consolidating Concrete Using Penetration Test”.

64-http://www.hpcbridgeviews.com/i60/Article4.asp.

65-Bartos, P.J.M., Sonebi, M., and Tamimi, A.K. (Eds.), “Workability and Rheology of Fresh Concrete: Compendium of Tests,” Cachan Cedex, France: RILEM, 2002.

66-Bethmont, S., “MECANISMES DE SEGREGATION DANS LES BETONS AUTOPLAÇANTS (BAP)”, pour obtenir le grade de Docteur de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2005, 166 pp. (in French).

67- Sonebi, M., “Medium Strength Self-Compacting Concrete Containing Fly Ash: Modelling Using Factorial Experimental Plans,” Cement and Concrete Research 34, 2004, pp. 1199-1208.

68- Okamura, h., and Ozawa, k., "Mix design for self-compacting concrete", library of JSCE, 25, 107-120.

69- JSCE, "Recommendations for Self-Compacting Concrete", Concrete Engineering Series, Japanese Society of Civil Engineers, 1999.

70- Bui, v.k., and Montgomery, d., "Mixture proportioning method for self-compacting high-performance concrete with minimum paste volume", proceeding of the first international RILEM symposium on self-compacting concrete, Stockholm, Sweden, 373-384.

71- Su N., Hsu K. and Chai H.," a simple mix design method for self-compacting concrete", cement and concrete research, vol. 31, 2001, pp. 1799-1807.

72- EFNARC, "Specification Guidelines for Self-Compacting Concrete", Farham, UK: European Federation of Producers and Contractors of Specialist Products for Structures, 2001.

73- EN, "The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification, Production and Use", European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, 2005.

74- ACI Committee 237-07, "Self-Consolidating Concrete", 2008, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mi.

75- ICAR Institute," Aggregates in Self-Consolidating Concrete", Research Report 108-2f, March 2007.

76- Nanthagopalan, P. and Santhanam, M.," A Simple snd Systematic Mix Design Procedure for Self-Compacting Concrete", SCC 2010 Conference Proceeding, Montreal, Canada, 2010.

77- Shen, j., yurtdas, I, m diagana, c., and li, a." contribution to mix design method of self-compacting concrete (SCC): case of pre-cast industry", proceeding: SCC 2010 conference, 2010, pp 76-85.

78- Ghazi, F. and Rand S.A.J "New Method for Proportioning Self-Consolidating Concrete Based on Compressive Strength Requirements", ACI Materials Journal, September-October, 2010. pp 490-497.

79- Daczko, j.a., and Kurtz, m.a.," development of high-volume coarse aggregate self-compacting concrete" proceeding of the second international symposium on SCC, Oct. 23-25, Tokyo, japan.

80- European Committee for standardization (2000), 206, "concrete-part1: specification, performance, production and conformity".

81- قدوسی، پ. منیر عباسی، آ. نامدارپور، ک. (۱۳۸۵) "روش جدید طرح مخلوط بتن خودتراکم براساس حجم بهینه خمیر سیمان" اولین کارگاه تخصصی بتن خودتراکم ، ۱۰ اسفند، تهران، ایران.

82-Interim Guidelines for the Use of Self-Consolidating Concrete in Precast/Prestressed Concrete Institute Member Plants, TR-6-03, Precast/Prestressed Concrete Institute Interim SCC Guidelines FAST Team, April 2003.

83- Lachemi, M., Hossain, K.M.A., Lambros, V., and Bouzoubaa, N. (2003). “Development of Cost Effective Self-Consolidating Concrete Incorporating Fly Ash, Slag Cement, or Viscosity- Modifying Admixtures,” ACI Materials Journal, 100(5), 419-425.

84- Assaad, J., Khayat, K.H., and Meshab, H. (2003b). “Variation in Formwork Pressure with Thixotropy of Self-Consolidating Concrete,” *ACI Materials Journal*, 100(1), 29-37.

85- Petersen, B.G., and Reknes, K. (2003). “Properties of the concrete matrix of self-compacting concrete with lignosulphonate superplasticizer,” *3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete*, Reykjavik, Iceland, 395-402.

86-Wong, H. H. C., Kwan, K. H. "Packing density: a key concept for mix design of high-performance concrete". The University of Hong Kong.

87- BS 812-2. "Testing aggregates. Methods for determination of density". British Standard Institute, 1995.

88-Kwan A. K. H., Ng I.Y.T. "Grade 80-100 self-consolidating concrete for Hong Kong". HKIE transactions, Vol. 11, No. 2, p.p. 1-7, 2004.

89-Young J. F. and Jennings H. M., in: "Cement and Concrete Science and Technology", Edited by S.N. Ghosh, p.364, ABI Books Ltd, New Dehli, 1991.

90- ایمان یادگاران، مهرداد ماهوتیان، «بررسی اقتصادی بتن خودتراکم»، اولین کارگاه تخصصی بتن خودتراکم، تهران، اسفند ۱۳۸۵.

91 – حسام آذری جعفری، حیدری دشتی ناصرآبادی، «بررسی و مقایسه اقتصادی تولید و اجرای سازه‌های بتنی توسط بتن معمولی و بتن خودتراکم در ایران»، کنگره ملی بتن خودتراکم، کرمان، اردیبهشت ۱۳۹۰.

92-Bury, M.A., and Christensen, B.J. (2002). “Role of innovative chemical admixtures in producing self-consolidating concrete,” First North American Conference on the Design and Use of Self- Self-Consolidating Concrete, Chicago, IL: ACBM.

93- Jeknavorian, A.A., Jardine, L., Ou, C.C., Koyata, H., and Folliard, K. (2003). “Interaction of Superplasticizers with Clay-Bearing Aggregates,” Seventh CANMET/ACI International Symposium on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Malhotra, V.M, ed., 143-159.

94-Yoshioka, K., Tazawa, E., Kawai, K., and Enohata, T. (2002). “Adsorption characteristics of superplasticizers on cement component minerals,” Cement and Concrete Research, 32, 1507- 1513.

95-Cyr, M., and Mouret, M. (2003). “Rheological Characterization of Superplasticized Cement Pastes Containing Mineral Admixtures: Consequences of Self-Compacting Concrete Design,”Seventh CANMET/ACI International Symposium on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Malhotra, V.M, ed., 241-255.

96-Li, C.-Z., Feng, N.Q., Li, Y-D., and Chen, R.-J. (2005). “Effects of polyethene oxide side chains on the performance of polycarboxylate-type water reducers,” Cement and Concrete Research, 35, 867-873.

97-Blask, O., and Honert, D. (2003). “The Electrostatic Potential of Highly Filled Cement Suspension Containing Various Superplasticizers”, Seventh CANMET/ACI International Symposium on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Malhotra, V.M, ed., 87-101.

98- Hanehara, S., and Yamada, K. (1999). “Interaction between cement and chemical admixture from the point of cement hydration, the adsorption behavior of admixture, and paste rheology”, Cement and Concrete Research, 29, 1159-1165.

99- Li, L.-S. and Hwang, C.-L. (2003) “The mixture proportion and property of SCC”, 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 525-529.

100- Collepardi, M. (1998). “Admixtures Used to Enhance Placing Characteristics of Concrete”, Cement and Concrete Composites, 20, 103-112.

101- Sakai, E., Yamada, K., and Ohta, A. (2003). “Molecular Structure and Dispersion-Adsorption Mechanisms of Comb-Type Superplasticizers Used in Japan”, Journal of Advanced Concrete Technology, 1(1), 16-25.

102- Golaszewski, J., and Szwabowski, J. (2004). “Influence of superplasticizers on rheological behavior of fresh cement mortars”, Cement and Concrete Research, 34, 235-248.

103- Yamada, K., Takahashi, T., Hanehara, S., and Matsuhisa, M. (2000). Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer”, Cement and Concrete Research, 30, 197-207.

104- Comparet, C., Nonat, A., Pourchet, S., Mosquet, M., and Maitrasse, P. (2003). “The Molecular Parameters and the Effect of Comb-Type Superplasticizers on Self-Compacting Concrete: A Comparison of Comb-Type Superplasticizer Adsorption onto a Basic Calcium Carbonate Medium in the Presence of Sodium Sulphate”, Seventh CANMET/ACI International Symposium on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Malhotra, V.M, ed., 195-209.

105- Berke, N.S., Cornman, C.R., Jeknavorian, A.A., Knight, G.F., Wallevik, O. (2002). “The effective use of superplasticizers and viscosity-modifying agents in self-consolidating concrete”, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Chicago, IL: ACBM, 173-178.

106- Velten, U., Schober, I., Sulser, U., and Mader, U. (2001). “Blends of polycarboxylate-type superplasticizers in use for concrete admixtures”, Proceedings of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japan, 187-194.

107- Eric P. Koehler and David W. Fowler, "DEVELOPMENT OF A PORTABLE RHEOMETER FOR FRESH PORTLAND CEMENT CONCRETE", RESEARCH REPORT ICAR –105-3F, August 2004.

108- Powers, T.C., Properties of Fresh Concrete, New York: John Wiley & Sons, 664 pp, 1968.

109- Ozol, M.A., “Shape, Surface Texture, Surface Area, and Coatings,” Significance of Tests

and Properties of Concrete and Concrete Making Materials, (STP 169B), Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 573-628, 1978.

110- Barrett, P.J., “The shape of rock particles, a critical review,” Sedimentology, 27, 291-303, 1980.

111- Bui, V.K., Akkaya, Y., and Shah, S.P., “Rheological Model for Self-Consolidating Concrete,” ACI Materials Journal, 99(6), 549-559, 2002.

112- Schwartzentruber, A., and Catherine, C., “Method of the concrete equivalent mortar

(CEM) – a new tool to design concrete containing admixture,” [in French] Materials and Structures, 33(232), 475-482, 2000.

113- Bouwman, A.M., Bosma, J.C., Vonk, P., Wesseling, J.A., and Frijlink, H.W., “Which shape factor(s) best describe granules?” Powder Technology, 146, 66-72, 2004.

114- Jamkar, S.S., and Rao, C.B.K., “Index of aggregate particle shape and texture of coarse aggregate as a parameter for concrete mix proportioning,” Cement and Concrete Research, 34, 2021-2027, 2004.

115- Pons, M.N., Vivier, H., Belaroui, K., Bernard-Michel, B., Cordier, F., Oulhana, D., and Dodds,

J.A., “Particle morphology: from visualization to measurement,” Powder Technology, 103, 44-57, 1999.

116- Taylor, M., “Quantitative measures for shape and size of particles,” Powder Technology, 124, 94-100, 2002.

117- Hudson, B., “Discovering the Lost Aggregate Opportunity: Part 1,” Pit and Quarry,95(6), 42-46, 2002.

118- Hudson, B., “Discovering the Lost Aggregate Opportunity: Part 4,” Pit and Quarry, 95(9), 40-43, 2003.

119- Ferraris, C.F., Hackley, V.A., Aviles, A.I., and Buchanan, C.E. “Analysis of the ASTM Round-Robin Test on Particle-Size Distribution of Portland Cement: Phase I,” (NISTIR 6883). National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2002.

120- Aitcin, P.-C., High Performance Concrete, New York: E&FN Spon, 591 pp, 1998.

121-Jensen, O.M., and Hansen, P.F., “Autogenous deformation and RH change in perspective,” Cement and Concrete Research, 31 (12), 1859-1865, 2001.

122- Johansen, V., and Andersen, P.J., “Particle Packing and Concrete Properties,” Materials Science of Concrete II, Skalny, J., and Mindess, S., eds. Westerville, OH: American Ceramic Society, 111-147, 1991.

123- de Larrard, F., Concrete Mixture Proportioning, London: E&FN Spon, 1999.

124- Kennedy, C.T. “The Design of Concrete Mixes,” Journal of the American Concrete Institute, 36, 373-400, 1940.

125- Bui, V.K., and Montgomery, D.“Mixture proportioning method for self-compacting high performance concrete with minimum paste volume,” Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Sweden, 373-384, 1999.

126- Midorikawa, T., Pelova, G.I., and Walraven, J.C. “Application of ‘the water layer model’ to self-compacting mortar with different size distribution of fine aggregate,” Proceedings of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japan, 237-246, 2001.

127- Hasholt, M.T., Pade, C., and Winnefield, F. “A conceptual and mathematical model for

the flowability of SCC,” Proceedings of SCC-2005, Chicago, IL: ACBM, 2005.

128- Oh, S.G., Noguchi, T., Tomosawa, F. “Toward mix design for rheology of selfcompacting concrete,” Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, Stockholm, Sweden, 361-372, 1999.

129- Shilstone, J.M. “Concrete Mixture Optimization,” Concrete International, 12(6), 33-39, 1990.

130- Shilstone, J.M., and Shilstone, J.M. “Performance-Based Concrete Mixtures and Specifications for Today,” Concrete International, 24(2), 80-83, 2002.

131- Yool, A.I.G., Lees, T.P., and Fried, A. “Improvements to the methylene blue die test for

harmful clays in aggregates for concrete and mortar,” Cement and Concrete Research, 28(10), 1417-1428, 1998.

132- Jardine, L.A., Koyata, H., Folliard, K.J., Ou, C.-C., Jachimowicz, F., Chun, B.-W., Jeknavorian,

A.A., and Hill, C.L. "Admixture and method for optimizing addition of EO/PO superplasticizer to concrete containing smectite clay-containing aggregates", US Patent 6,352,952, 2002.

133- Jardine, L.A., Koyata, H., Folliard, K.J., Ou, C.-C., Jachimowicz, F., Chun, B.-W., Jeknavorian, A.A., and Hill, C.L. "Admixture for optimizing addition of EO/PO plasticizers', US Patent 6,670,415, 2003.

134- Stewart, J.G., Norvell, J.K., Juenger, M.C.G., and Fowler, D.W. “Correlating Minus #200 Fine Aggregate Characteristics to Field Performance in Concrete,” Proceedings of the 13th Annual ICAR Symposium, Austin, TX, 2005.

135- Santhanam, M., Cohen, M.D., and Olek, J. “Sulfate attack research—whither now?” Cement and Concrete Research, 31, 845-851, 2001.

136- Bensted, J. “Thaumasite-direct, woodfordite and other possible formation routes,” Cement and Concrete Composites, 25, 873-877, 2003 .

137- Thomas, M.D.A., Rogers, C.A., and Bleszynski, R.F. “Occurrences of thaumasite in laboratory and field concrete,” Cement and Concrete Composites, 25, 1045-1050, 2003.

138- Sahu, S., Badger, S., and Thaulow, N. “Mechanism of thaumasite formation in concrete slabs on grade in Southern California,” Cement and Concrete Composites, 25, 889-897, 2003.

139- Crammond, N.J. “The thaumasite form of sulfate attack in the UK,” Cement and Concrete Composites, 25, 809-818, 2003.

140- Macphee, D., and Diamond, S. “Thaumasite in cementitious materials,” Cement and Concrete Composites, 25, 805-807, 2003.

141- Diamond, S. “Thaumasite in Orange County, Southern California: an inquiry into the effect of low temperature,” Cement and Concrete Composites, 25, 1161-1164, 2003.

142-Irassar, E.F., Bonavetti, V.L., Trezza, M.A., and Gonzalez, M.A. “Thaumasite formation in limestone filler cements exposed to sodium sulphate solution at 20C,” Cement and Concrete Composites, 27, 77-84, 2005.

143- Stark, D. “Occurrence of thaumasite in deteriorated concrete,” Cement and Concrete Composites, 25, 1119-1121, 2003.

144- Collepardi, M. “Thaumasite formation and deterioration in historic buildings,” Cement and Concrete Composites, 21, 147-154, 1999.

145- Erdogan, S.T. “Determination of Aggregate Shape Properties Using X-Ray Tomographic Methods and the Effect of Shape on Concrete Rheology,” PhD Dissertation, The University of Texas at Austin, 2005.

146- Ahn, N. “An Experimental Study on the Guidelines for Using Higher Contents of Microfines in Portland Cement Concrete,” PhD Dissertation, The University of Texas at Austin, 2000.

147- Zhu, W., and Gibbs, J.C. “Use of different limestone and chalk powders in selfcompacting concrete,” Cement and Concrete Research, 35, 1457-1462, 2005.

148- Nehdi, M., Mindess, S., and Aitcin, P.-C. “Rheology of high-performance concrete: effect of ultrafine particles,” Cement and Concrete Research, 28(5), 687-697, 1998.

149- Tsivilis, S., Chaniotaksi, E., Badogiannis, E., Pahoulas, G., and Ilias, A. “A study on the parameters affecting the properties of portland limestone cements,” Cement and Concrete Composites, 21, 107-136, 1999.

150- Ghezal, A.F., and Khayat, K.H. “Optimizing Self-Consolidating Concrete with Limestone Filler by Using Statistical Factorial Design Methods,” ACI Materials Journal, 99(3), 264-272, 2002.

151- Svermova, L., Sonebi, M., and Bartos, P.J.M. “Influence of mix proportions on rheology of cement grouts containing limestone powder,” Cement and Concrete Composites, 25, 737-749, 2003.

152- Kadri, E.H., and Duval, R. “Effect of Ultrafine Particles on Heat of Hydration of Cement Mortars,” ACI Materials Journal, 99(2), 138-142, 2002.

153- Yamada, K., Takahashi, T., Hanehara, S., and Matsuhisa, M. Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer,” Cement and Concrete Research, 30, 197-207, 2000.

154- Plank, J., and Hirsch, C. “Superplasticizer Adsorption on Synthetic Ettringite,” Seventh CANMET/ACI International Symposium on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Malhotra, V.M, ed., 283-297, 2003.

155- Sakai, E., Yamada, K., and Ohta, A. “Molecular Structure and Dispersion-Adsorption Mechanisms of Comb-Type Superplasticizers Used in Japan,” Journal of Advanced Concrete Technology, 1(1), 16-25, 2003.

156- Yoshioka, K., Tazawa, E., Kawai, K., and Enohata, T. “Adsorption characteristics of superplasticizers on cement component minerals,” Cement and Concrete Research, 32, 1507-1513, 2002.

157- Schober, I., and Mader, U. “Compatibility of Polycarboxylate Superplasticizers with Cements and Cementitious Blends,” Seventh CANMET/ACI International Symposium on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Malhotra, V.M, ed., 453-468, 2003.

158- Yamada, K., Yanagisawa, T., and Hanehara, S. “Influence of Temperature on the dispersibility of polycarboxylate type superplasticizer for highly fluid concrete,” Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Sweden, 437-448, 1999.

159- Khayat, K.H., and Ghezal, A. “Effect of viscosity-modifying admixture-superplasticizer combination on flow properties of SCC equivalent mortar,” 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 369-387, 2003.

160- Rols, S., Ambroise, J., and Pera, J. “Effects of different viscosity agents on the properties

of self-compacting concrete,” Cement and Concrete Research, 29, 261-266, 1999.

161- Collepardi, M. “Self Compacting Concrete: What Is New?” Seventh CANMET/ACI International Symposium on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Malhotra, V.M, ed., 1-16, 2003.

162- Lachemi, M., Hossain, K.M.A., Lambros, V., Nkinamubanzi, P.-C., and Bouzoubaa, N. “Performance of new viscosity enhancing admixtures in enhancing the rheological properties of cement paste,” Cement and Concrete Research, 24, 917-926, 2004.

163- Lachemi, M. Hossain, K.M.A., Lambros, V., Nkinamubanzi, P.-C., and Bouzoubaa, N. “Self-consolidating concrete incorporating new viscosity modifying admixtures,” Cement and Concrete Research, 24, 917-926, 2004.

164- Phyffereon, A., Monty, H., Skaggs, B., Sakata, N., Yanai, S., and Yoshizaki, M. “Evaluation of the biopolymer, diutan gum, for use in self-compacting concrete,” First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Chicago, IL: ACBM, 147-152, 2002.

خواننده گرامی

امور نظام فنی اجرایی، مشاوران و پیمانکاران سازمان برنامه و بودجه کشور، با گذشت بیش از پنجاه سال فعالیت تحقیقاتی و مطالعاتی خود، افزون بر هشتصد عنوان نشریه تخصصی - فنی، در قالب آیین‌نامه، ضابطه، معیار، دستورالعمل، مشخصات فنی عمومی و مقاله، به‌صورت تالیف و ترجمه، تهیه و ابلاغ کرده است. ضابطه حاضر در راستای موارد یاد شده تهیه شده، تا در راه نیل به توسعه و گسترش علوم در کشور و بهبود فعالیت‌های عمرانی به کار برده شود. ضوابط و نشریات منتشر شده در سال‌های اخیر در سایت اینترنتی **nezamfanni.ir** به رایگان برای عموم قابل دستیابی می‌باشد.

Self Compacting Concrete (SCC)

[Code.120-5]

Authors & Contributors Committee:

Amir mazair	Raeiss ghasemi (Executive)	Road, Housing & Urban Development Research Center	M.Sc. of Civil Eng.
Mohsen	Tadayon	Boali Sina University, consulting engineers of Sinab Gharb	Ph.D. of Civil Eng.

Confirmation Committee:

Parviz	Ghoddousi	Iran University of Science and Technology	Ph.D. of Civil Eng.
Ali Akbar	Shirzadi Javid	Iran University of Science and Technology	Ph.D. of Civil Eng.
Mehdi	Nemati	Road, Housing & Urban Development Research Center	Ph.D. of Civil Eng.
Babak	Ahmadi	Road, Housing & Urban Development Research Center	Ph.D. of Civil Eng.
Mohammad hossein	Tadayon	Ara Beton Co.	Ph.D. of Civil Eng.

Steering Committee(Plan and Budget Organization):

Alireza Toutounchi	Deputy of Department of Technical & Executive Affairs
Sajjad Heidari Hasanaklou	Expert in Civil Eng. , Department of Technical & Executive Affairs

Islamic Republic of Iran
Plan and Budget Organization

Self Compacting Concrete (SCC)

(Materials, Mix Design and Construction)

Annexes to

Iranian Concrete Code

Code. 120-5

Last version 20/04/2024

Deputy of Technical, Infrastructure and Production Affairs

Department of Technical & Executive affairs, Consultants and Contractors

nezamfanni.ir

Ministry of Road & Urban Development

Road, Housing & Urban Development Research Center

aba.bhrc.ac.ir

2024

این ضابطه

با عنوان «دستورالعمل ساخت و اجرای بتن خودتراکم» در راستای ارایه الزامات و راهنمایی در خصوص مواد و مصالح مصرفی بتن خودتراکم، طرح مخلوط و روش‌های ساخت و اجرای آن در هشت فصل، شامل کلیات، تاریخچه و ویژگی‌های بتن خودتراکم، مروری بر مشخصات و ویژگی‌های مواد و مصالح مورد استفاده، مروری بر روش‌های آزمایش بتن تازه، مروری بر روش‌های رایج طرح مخلوط، معیارهای انتخاب ویژگی‌های بتن تازه، روش طرح مخلوط، الزامات و توصیه‌های اجرایی و در نهایت کنترل کیفی و چک لیست‌های اجرایی تدوین شده است.