

## بررسی خواص بتن خود متراکم (SCC)

محمد قاسمیان بالف، دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه سمنان\*

احمد دالوند، دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه سمنان\*\*

\*پست الکترونیکی Moh\_Ghasemian@yahoo.com ، تلفن: 09112125114

\*\*پست الکترونیکی Dalvand0611@yahoo.com ، تلفن: 09163229574

چکیده:

امروزه در پی گسترش صنعت ساختمان در کشور به دنبال زیان‌های جانی و مالی گسترده که در اثر حوادث طبیعی همچون زلزله هر از چند گاهی از گوشه و کنار کشور ما به گوش می‌رسد، افزایش دقت و ایمنی در تولید و سپس اجرای مهندسی امری ضروری است. از جمله راهکارهای مناسب می‌توان به دستیابی به ترکیبات جدید از مصالح ساختمانی جهت تسهیل پروژه‌های پیچیده، به منظور افزایش میزان اطمینان و ایمنی در ساخت آنها از طریق مکانیزه کردن امور و کاهش دخالت نیروی انسانی اشاره نمود. همچنین به نظر می‌رسد که در تقلیل هزینه‌های مالی در طرح‌های پُرخرج مؤثر واقع گردد.

بتن از جمله پُر مصرف‌ترین مصالح ساختمانی در دنیا شناخته شده است. با گسترش استفاده از بتن ویژگی‌هایی همچون دوام، کیفیت، تراکم و بهینه‌سازی آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌شوند. بتن خود متراکم SCC بتنی بسیار سیال، روان و مخلوطی همگن است که بسیاری از مشکلات بتن معمولی نظیر جداسدگی، آب‌انداختن، جذب آب، نفوذپذیری و ... را مرتفع نموده و علاوه بر آن بدون هیچ لرزاننده داخلی یا ویبره بدنه قالب، تحت اثر وزن خود متراکم می‌شود. این ویژگی کمک شایانی به اجرای عناصر سازه‌ای بخصوص با تراکم زیاد آرماتور خواهد نمود. از مزایای استفاده از این نوع بتن تفاوت حداقل بین نتایج آزمایشگاهی و کارگاهی می‌باشد. مخلوط SCC با بتن‌هایی که در گذشته با روانی بالا کاربرد داشتند، تفاوت اساسی دارد، چرا که در گذشته با بالا بردن نسبت آب به سیمان این امر انجام می‌شد که مضرات زیادی برای بتن در بر داشت. اما در بتن SCC با ثابت نگهداشتن W/C و استفاده از مواد افزودنی به روانی بالا دست پیدا می‌کنیم.

۱- مقدمه:

بتن خود متراکم اولین بار برای دستیابی به ساختار بتن پایدار در سال ۱۹۹۸ مطرح گردید و از آن زمان تحقیقات متنوعی برای ارائه یک طرح اختلاط معقول و روش‌های مناسب برای کنترل آزمایش خود تراکمی و برآوردن ویژگی‌های منحصر به فرد بتن خود متراکم جهت ترویج این بتن همانند بتن معمولی انجام گرفت. ایجاد ساختار پایدار در بتن نیاز به تراکم کافی توسط کارگر ماهر و استفاده از لرزاننده دارد. کمبود کارگر ماهر در کشورها اغلب موجب نقص و خطا در اجرای سازه‌های مختلف بویژه سازه‌های بتنی شده است. راه‌حل مناسب برای کاهش دخالت نیروی انسانی در ساختمان جهت دستیابی به پایداری و قوام مناسب که سبب افزایش کیفیت و سرعت کار سازه‌ای می‌شود، بکارگیری بتن خود متراکم است. بتن SCC ابتدا در ژاپن تولید شد و هم‌اکنون در بسیاری از کشورهای جهان مورد آزمایش و بررسی و استفاده قرار می‌گیرد. این صنعت هم بصورت بتن درجا، هم بصورت بتن پیش‌ساخته کاربرد وسیعی دارد. در شکل ۱ کاربرد بتن SCC در صنعت ژاپن و در نمودار ۱ پیشرفت کاربرد SCC در این کشور را می‌دهد.



(c) بتن پیش ساخته در طراحی پل

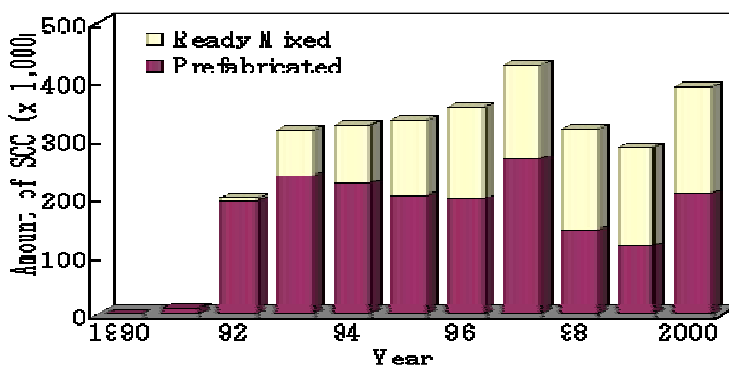


(b) بتن پیش ساخته



(a) بتن درجا

شکل (۱): کاربرد بتن SCC در ژاپن



(نمودار ۱): پیشرفت کاربرد SCC در ژاپن

علی‌رغم توسعه روزافزون استفاده از این نوع بتن در سطح کشورهای جهان، متأسفانه به دلایل نامعلوم این صنعت در ایران رواج نیافته است. در این مقاله که برگرفته از چندین مقاله معتبر به همراه نتایج آزمایشگاهی موجود و جمع‌بندی آنهاست، سعی بر آن است تا با آشنایی هر چه بیشتر مهندسين عمران با این تکنولوژی، این صنعت جای خویش را در ایران باز کرده و مشکلات کارگاهی موجود را کاهش دهد.

۲- مزایای استفاده از بتن خود متراکم:

مهم‌ترین مزایای بتن SCC عبارتند از:

- کاهش دوره ساخت بتن
  - اطمینان از تراکم، بخصوص در مقاطعی که کاربرد لرزاننده دشوارتر است.
  - دوام بهتر و قدرت آزادی بیشتر در طراحی
  - امکان ساخت مقاطع نازک‌تر بتنی
  - صرف انرژی کمتر و کاهش آلودگی صوتی ناشی از ویبره
  - کاهش نیروی انسانی و هزینه مصرفی
- طبق تحقیقات انجام شده در سوئد، ۵۰٪ هزینه بتن‌ریزی به صورت معمولی، هزینه مربوط به نیروی انسانی است، لذا با استفاده از بتن SCC علی‌رغم اینکه هزینه بکار بردن مصالح جهت ساخت بتن افزایش می‌یابد، اما در هزینه نیروی انسانی کاهش بسزایی را خواهیم داشت. در واقع در این نوع بتن‌ریزی به نیروی انسانی متخصص و کارآمد ولی به میزان کمتری نسبت به بتن معمولی نیازمندیم، بطوری که هزینه کاهش نیروی انسانی بیشتر از هزینه خرید مصالح می‌باشد. (با توجه به هزینه بالای نیروی کار در ایران)

۳- خصوصیات بتن SCC :

- قابلیت پُرکنندگی (filling ability): یکی از ویژگی‌های این بتن پُر کردن و جای گرفتن آسان در لابه‌لای آرماتورهای سازه بوسیله وزن خود است.
- قابلیت گذردهی (passing ability): یکی دیگر از ویژگی‌های بتن خود متراکم قابلیت گذردهی است، یعنی در فضای بین آرماتورها بدون جداشدگی و گرفتگی به راحتی عبور می‌کند.
- پایداری (stability): خاصیت پایداری و حفظ همگنی در طول حمل‌ونقل بتن یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های بتن SCC است.
- کارایی (work ability): منظور از کارایی، جای‌گیری آسان در مکان مورد نظر و متراکم شدن تحت وزن خود می‌باشد. در واقع کارایی ترکیبی از ویژگی‌های مختلف، همچون روانی، پیوستگی، قابلیت حمل، تراکم‌پذیری و چسبندگی می‌باشد.

۴- مصالح مصرفی در بتن خود متراکم:

با چشم‌اندازی به بتن خود متراکم در می‌یابیم که این بتن از اجزایی مشابه بتن معمولی که با ویبراسیون متراکم می‌شوند نظیر سیمان، سنگ‌دانه و آب به همراه چند ماده افزودنی و ترکیباتی دیگر تشکیل شده است. مواد مصرفی در این نوع بتن باید به صورت عمومی و کلی با شرایط EN206 مطابقت نماید. این مواد می‌بایست برای کاربردهای در نظر گرفته شده مناسب بوده و نباید شامل اجزای مضر به قدری باشند که به کیفیت و قوام بتن آسیب برسانند یا باعث خوردگی میله‌گردهای مسلح‌کننده شود.

۴-۱- سنگ‌دانه‌ها: حداکثر اندازه سنگ‌دانه‌های بکار رفته در این نوع بتن بستگی به کاربرد عملی آن دارد ولی عموماً حداکثر اندازه آن به ۲۰ mm محدود می‌شود. سنگ‌دانه‌ها به دو قسمت تقسیم می‌شوند:

الف) شن: تمامی انواع درشت‌دانه که حداکثر اندازه معمولی آن (۲۰-۱۶) mm باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر چه اجزایی که تا حدود ۴۰ mm می‌باشند نیز در این نوع بتن استفاده شده است. سنگ‌دانه‌های گوشه‌دار باعث بهبود مقاومت می‌شوند چرا که قسمت‌های گوشه‌دار بهتر با هم اتصال برقرار می‌کنند. استفاده از دانه‌های گردگوشه به دلیل کاهش اصطکاک داخلی، سبب افزایش روانی بتن می‌شود و استفاده از دانه‌بندی گسسته بطور معمول به دلیل اصطکاک داخلی و اصلاح روانی بتن، مطلوب‌تر می‌باشد. در مواقعی که از سنگ‌دانه‌های درشت استفاده می‌شود باید ماکزیمم بعد آن را کنترل کرد چرا که وقتی درصد حجم سنگ‌دانه‌های درشت زیادتر از حد شود، برخورد بین سنگ‌دانه‌ها و اجزای تشکیل دهنده بیشتر شده و ریسک در بلوکه شدن افزایش می‌یابد.

ب) ماسه: هر دو نوع ماسه شکسته و گردگوشه، اعم از سیلیسی و آهکی را می‌توان مورد استفاده قرار داد. ذرات ریزتر از (۰/۱۲۵ mm) که به عنوان پودر تلقی می‌شوند بر خواص روانی بتن SCC می‌افزایند. به منظور تولید بتن یکنواخت و جلوگیری از جداشدگی، حداقل باید میزان مینی‌موم مواد ریزدانه (شامل: ماسه، مواد چسباننده و پودری) را بکار برد.

بدیهی است که کنترل دقیق رطوبت مصالح در حین ساخت بطور مستقیم در کیفیت بتن تولیدی اثر خواهد گذاشت.

۴-۲- سیمان مصرفی: بطور کلی تمامی انواع سیمان‌های استاندارد می‌تواند در SCC بکار رود. انتخاب نوع سیمان بستگی به پارامترهای مورد انتظار مثل مقاومت و دوام و ..... دارد.

دامنه عمومی میزان مصرف سیمان در این نوع بتن (۳۴۰-۴۵۰) کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد و عیار بیش از  $500 \text{ Kg/m}^3$  می‌تواند سبب افزایش خطر جمع‌شدگی شود و همچنین میزان کمتر از  $350 \text{ Kg/m}^3$  نیز در صورتی قابل قبول است که به همراه مواد پوزولانی، خاکستر بادی، دوده سیلیسی و ..... بکار رود.

۴-۳- مواد افزودنی: مواد غیرآلی (کانی و معدنی) هستند که برای بهبود برخی از ویژگی‌های بتن تازه و سخت شده، جهت دستیابی به خواص ویژه مورد نظر به آن افزوده می‌شود.

این افزودنی‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند:

- ① افزودنی‌های نیمه فعال: شامل ریزدانه‌ها و رنگ‌دانه‌ها می‌باشد.
  - ② افزودنی‌های فعال: افزودنی‌های پوزولانی یا هیدرولیکی نهفته‌ای هستند که در مجاورت آب خاصیت خود را آشکار می‌سازند و شامل خاکستر بادی، دوده سیلیسی و سرباره دانه‌ای غیر کریستالی کوره ذوب آهن است.
- پاره‌ای از مواد مضاف عمومی به شرح زیر است:

۴-۴- پودرسنگ: پودرسنگ آهک، دولومیت، گرانیت خرد شده که اندازه آنها ریزتر از ۰/۱۲۵ mm می‌باشد، در قسمت پُرکننده‌ها قرار گرفته و فواید زیادی از جمله پُر کردن منافذ خالی و دوام و مقاومت دارند که در بتن خود متراکم نقش اساسی را ایفا می‌کنند.

استفاده از پودر سنگ دولومیتی به دلیل واکنش‌های کربنات قلیایی می‌تواند دوام بتن را با مشکل دچار کند. در ضمن باید توجه داشت که استفاده از پودر سنگ سبب افزایش درصد جذب آب خواهد داشت که برای رفع این مشکل باید توسط آزمایشات مکرر به نسبت بهینه‌ای از فوق روان‌کننده و فیلرها دست یافت که این مقدار افزایش، سبب جداسازی بتن نشود.

پُرکننده‌ها در سطح مخصوص و بسیاری فاکتورهای دیگر با هم فرق دارند. سؤال اصلی در استفاده از پُرکننده‌ها، نوع و میزان مصرف آنها در ترکیبات بتن خود متراکم است.

۴-۵- پُرکننده‌های شیشه‌ای: این فیلرها از بازافت مواد شیشه‌ای پودر شده بدست می‌آیند که اندازه ذرات آن باید کمتر از  $0.1 \text{ mm}$  بوده و دارای سطح مخصوص کمتر از  $2500 \text{ cm}^2/\text{gr}$  باشند. استفاده از ذرات بزرگتر می‌تواند باعث ایجاد واکنش‌های (سیلیکاتی قلیایی) شود.

۴-۶- میکروسیلیس (SF): در آغاز گسترش بتن SCC، میکروسیلیس اولین ماده‌ای بود که به عنوان فیلر مورد استفاده قرار می‌گرفت. این ماده دارای سطح مخصوص  $300000 \text{ cm}^2/\text{gr}$  بوده و حدوداً دارای ۹۰٪ دی‌اکسید سیلیس می‌باشد که نقش مهمی در تغییر شکل و همچنین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بتن و بخصوص در افزایش مقاومت هر نوع بتنی ایفا می‌کند و استفاده از آن از نظر اقتصادی قابل توجه می‌باشد. در صورتی که بتن SCC با مقاومت کمتری مورد نیاز باشد می‌توان از مواد درشت‌تری نظیر (خاکستر بادی، تغال کوره آهن‌گذاری و خاکستر برنج) و مواد مشابه استفاده کرد.

۴-۷- نانوسیلیس: یک ماده شیمیایی جدید می‌باشد که همان محلول دی‌اکسید سیلیس است و ذرات آن در ابعاد نانومتری است. محلول نانوسیلیس متشکل از ذراتی گلوله‌ای با قطر کمتر از  $100 \text{ nm}$  می‌باشد که به دو صورت ذرات خشک پودری و یا معلق در مایع محلول قابل انتشار است. نانوسیلیس معلق کاربردهای چند منظوره از خود نشان می‌دهد مانند: خاصیت ضد سایش، ضد لغزش، ضد حریق و ضد انعکاس سطوح.

آزمایشاتی که در زمینه تفاوت میکروسیلیس و نانوسیلیس صورت گرفته است، نشان می‌دهد که واکنش محلول نانوسیلیس با هیدروکسید کلسیم و تبدیل آن به ژل سیمان در مقایسه با میکرو سیلیکا بسیار سریع‌تر انجام شده و مقدار بسیار کم این مواد همان تأثیر پوزولانی مقدار بسیار زیادی SF را در سنین اولیه دارا می‌باشد. مطالعات نشان داده است که گروت نانو سیلیکا در مقایسه با میکروسیلیس هیچ گونه جداسازی و آب انداختگی از خود نشان نمی‌دهد.

۴-۸- فوق روان‌کننده‌ها: نقش فوق روان‌کننده‌ها در طرح اختلاط آن است باعث جدایی دانه‌های سیمان از یکدیگر می‌شوند که سبب می‌شود، دانه‌های سیمان به صورت گسترده در بتن در حال اختلاط پخش شده و از این طریق سبب کاهش نسبت آب به سیمان می‌شوند نه آن که اصطکاک بین دانه‌ها را از بین ببرند. لازم به ذکر است که مصرف بیش از اندازه مواد افزودنی سبب جلوگیری از چسبندگی و یا باعث عدم گیرایی بتن می‌شوند.

در تولید بتن SCC، ترکیبی از افزودنی‌های فوق روان‌کننده که دارای خاصیت جانبی افزایش مقاومت زود رس و افزایش دوام باشند، بکار می‌رود.

- افزودنی عامل اصلاح لزجت (VMA): مصرف این ماده در حضور پرکننده‌ها موجب اصلاح قوام بتن در طول عملیات ساخت آن و منجر به همگن شدن مخلوط می‌شود ولی در استفاده از آن باید، عملکرد بلند مدت را در نظر داشت.
  - مواد افزودنی حباب‌زا (AEA): به منظور بهبود مقاومت در مقابل سیکل یخ‌زدگی و آب شدن از این نوع مواد افزودنی استفاده می‌شود.
  - (HRWR): (روان‌کننده‌هایی که کاهنده آب در میزان متوسط هستند).
- استفاده از این روان‌کننده‌ها موجب ایجاد قابلیت‌های جانبی زیر در بتن خواهد شد:

۱. قابلیت پرداخت بتن را افزایش می‌دهد. (Flat work)
۲. قابلیت پمپاژ بتن را افزایش می‌دهد.
۳. استقرار بدون ویبره

از ویژگی‌های افزودنی‌های HRWR قابلیت‌گیری کنترل شده، کارایی عالی، کارپذیری، قابلیت پمپاژ، پرداخت افزایش یافته، حفظ یکپارچگی همچنین مقاومت‌دهی اولیه و نهایی افزایش یافته می‌باشد.

بطور کلی با استفاده از فوق روان‌کننده‌ها می‌توان تا حدود ۲۰٪ نسبت آب به سیمان را کاهش داد، اما در استفاده از آنها به هیچ عنوان نباید از مقدار مجاز تعیین شده توسط شرکت سازنده، تجاوز کرد.

۵- ویژگی‌های بتن خود متراکم:

این نوع بتن به لحاظ مقاومت فشاری، کششی، مدول الاستیته و ..... با بتن‌های معمولی فرقی نمی‌کند و تمامی پارامترها فرمول های طراحی بتن معمولی را می‌توان در مورد آن به کار بست.

- افت یا انقباض خودبه‌خود (Autogenous Shrinkage): یکی از پدیده‌های خاصی که در بتن دیده می‌شود، افت یا انقباض خودبه‌خودی بتن است که موجب ترک‌خوردگی بتن در سن جوانی آن (معمولاً در چند روز اول) می‌گردد. در بتن خود متراکم به دلیل استفاده از مقادیر زیادی مواد پودری، انقباض خمیری و خزش بیشتری را نسبت به بتن معمولی باید در نظر داشت. روند شکل‌گیری افت بدین صورت است که پس از طی یک دوران سکون به مدت ۲۴ ساعت اول که موجب شکل‌گیری آثار دیر هنگام فوق روان‌کننده‌ها روی هیدراتاسیون سیمان می‌شود، بتن شروع به افت (انقباض) می‌کند. این انقباض در اثر جمع شدن دو نوع تغییر شکل متضاد می‌باشد:

۱. افت شیمیایی به دلیل پیشرفت عمل هیدراتاسیون سیمان
۲. انبساط به دلیل افزایش دما در بتن

در چند ساعت اولیه به دلیل افزایش حرارت ناشی از هیدراتاسیون سریع سیمان، مقداری انبساط دمایی خواهیم داشت. از این پس دما در بتن کاهش یافته و انقباض شیمیایی ادامه پیدا خواهد کرد تا جایی که انقباض به دلیل کاهش دما و افت شیمیایی، بر انبساط حرارتی اولیه پیشی گرفته و بتن مجدداً جمع می‌شود.

• خزش (Creep):

به دلیل مقدار زیاد مواد پودری، بتن خود متراکم ممکن است افت پلاستیک با خزش بیشتری را نسبت به بتن معمولی از خود نشان دهد، بنابراین مسئله خزش باید در زمان طراحی در نظر گرفته شود، چرا که این موضوع از مسائل پر اهمیت در سازه‌های بتنی است که نادیده گرفتن آن اثرات مخربی را به همراه خواهد داشت. با وجود اهمیت زیاد این موضوع متأسفانه اطلاعات موجود پیرامون خزش این بتن محدود بوده و نیازمند تحقیقات و مطالعات وسیع‌تری می‌باشد.

• کارایی (Work ability):

در عمل می‌توان کارایی را با سه پارامتر مهم زیر تعریف کرد:

• قابلیت پرکنندگی (filling ability)

• قابلیت عبور (passing ability)

• مقاومت در برابر جدایش (stability)

در طبقه‌بندی بتن‌هایی را می‌توان SCC نامید که هر سه شرط فوق را ارضا نماید. به دلیل روانی زیاد بتن‌های خود متراکم، خطر جدایش دانه‌بندی زیاد بوده و لذا میزان مصرف فوق روان‌کننده‌ها و همچنین موضوع سازگاری آن با نوع سیمان مصرف شده را همواره باید در نظر داشت. برای رفع خطر جدایش در بتن SCC همان‌گونه که قبلاً ذکر گردیده می‌توان از مقدار مناسب و کافی ریزدانه‌های کوچکتر از ۰/۱۲۵ mm و افزودنی VMA استفاده کرد.

۶- آزمایش‌های SCC:

۶-۱- آزمایش‌ها: برای تعیین اینکه بتن اساساً خود تراکم است یا خیر و پس از اثبات خود تراکمی بتن، اینکه بتن از لحاظ تغییر شکل‌پذیری، لزجت و پرکنندگی در وضعیت مطلوبی بسر می‌برد، باید آزمایش‌های مخصوصی انجام شود. هیچ روشی به تنهایی یا ترکیبی از روش‌ها نمی‌تواند به طور جامع خواص SCC را پوشش دهد. پس هر طرح اختلاط را باید با بیش از یک روش، آزمایش و کنترل کرد تا بدین طریق پارامترهای مختلف کارایی که قبلاً ذکر گردید، کنترل شود. آزمایش‌های پیشنهادی برای کنترل میزان کارایی در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول (۱): روش‌های سنجش خواص کارایی SCC

ردیف	روش	ویژگی مورد سنجش
۱	جریان اسلامپ	قابلیت پرکنندگی
۲	جریان اسلامپ T <sub>50</sub> cm	قابلیت پرکنندگی
۳	حلقه J	قابلیت گذرندگی
۴	قیف V	قابلیت پرکنندگی
۵	قیف T <sub>5</sub> min V	مقاومت در برابر جدایش
۶	جعبه L	قابلیت گذرندگی
۷	جعبه U	قابلیت گذرندگی
۸	جعبه Fill	قابلیت گذرندگی
۹	غربال سنجش پایداری GTM	مقاومت در برابر جدایش
۱۰	آریمت	قابلیت پرکنندگی

۶-۲- ترکیب آزمایش‌ها: کیفیت بتن SCC در هر مرحله آزمایشگاه و سایت باید توسط آزمایشات لازم کنترل گردد. در نهایت ترکیب مناسبی از روش‌های مختلف آزمایش می‌تواند کارایی بتن تولیدی را بررسی نماید. همانطور که در جدول ۲ نشان داده شده است، برای مثال ترکیب آزمایش‌های جریان اسلامپ و قیف V یا ترکیب آزمایش جریان اسلامپ و حلقه J.

جدول (۲): ترکیب پیشنهادی آزمایش‌ها

ویژگی	روش‌های آزمایش		
	آزمایشگاه	کارگاه	اصلاح روش آزمایش بر اساس حداکثر سنگدانه
قابلیت پرکنندگی	۱- جریان اسلامپ ۲- جریان اسلامپ T <sub>50</sub> cm ۳- قیف V ۴- آریمت	۱- جریان اسلامپ ۲- جریان اسلامپ T <sub>50</sub> cm ۳- قیف V ۴- آریمت	حداکثر اندازه دانه ۲۰ میلیمتر
قابلیت گذرندگی	۱- جعبه L ۲- جعبه U ۳- جعبه Fill	۱- حلقه J	تغییر اندازه دهانه در آزمایش- های جعبه L و جعبه U و حلقه J
مقاومت در برابر جدایش	۱- آزمایش GTM ۲- قیف T <sub>5</sub> min V	۱- آزمایش GTM ۲- قیف T <sub>5</sub> min V	-----

۶-۳- ضوابط پذیرش آزمایش‌ها: شرایط و حدود مشخص شده برای نتایج آزمایش‌ها چه در زمان تولید و هم در زمان اجرا باید در محدوده استاندارد قرار گیرد. برای مثال تغییر کارایی در زمان حمل‌ونقل باید در محاسبات طرح اختلاط لحاظ شود. اصلی‌ترین ضوابط پذیرش برای بتن خود متراکم با دانه‌های کوچکتر از ۲۰ mm در جدول (۳) صفحه بعد آورده شده است. هدف انجام هر آزمایش به همراه توضیحات مربوط را می‌توانید در منابع ذکر گردیده در پایان این مقاله جستجو کنید.

#### ۷- طرح اختلاط بتن خود متراکم:

۷-۱- طرح اختلاط اولیه: هنوز هیچ طرح اختلاط ثابت و کاملی برای بتن SCC ارائه نشده است و همه ترکیبات و نسبت‌های اختلاط به صورت نسبی و تجربی است که از آزمایشات بدست آمده توصیه می‌گردد... تجربه نشان داده است چنانچه محاسبات به روش حجمی انجام شود، نتایج بهتر و دقیق‌تری نسبت به روش جرم بدست خواهد آمد. حدود مقادیر تجربی مصالح برای تولید SCC در زیر آمده است:

- نسبت حجمی آب به پودر ۰/۸ تا ۱/۱ می‌باشد. یعنی
- محتوای پودری Lit/m<sup>3</sup> ۲۴۰-۱۶۰ معادل با Kg/m<sup>3</sup> ۶۰۰-۴۰۰ می‌باشد.
- مقدار دانه‌درشت‌ها به طور معمول در حدود ۲۸ تا ۳۵ درصد حجمی از کل مخلوط در نظر گرفته می‌شود.
- نسبت آب به سیمان بر اساس شرایط EN۲۰۶ انتخاب می‌شود. این مقدار می‌تواند برابر با هر مقدار عملی نیز باشد.  $0.8 < \frac{\text{آب}}{\text{پودر}} < 1.1$  میزان Lit/m<sup>3</sup> ۲۰۰ تجاوز نماید.
- میزان ماسه باید کمتر از ۵۰٪ حجم مواد چسباننده و بیشتر از ۵۰٪ وزن کل سنگ‌دانه و ۴۰٪ حجم مخلوط باشد.
- در نهایت باید مقدار سنگ‌دانه‌ها حجم دیگر اجزا اصلی را به تعادل برساند

جدول (۳) شرایط پذیرش آزمایش برای بتن خود متراکم SCC

ردیف	روش آزمایش	واحد	حدود تغییرات اندازه‌ها	
			حداقل	حداکثر
۱	جریان اسلامپ	Mm	۶۵۰	۸۰۰
۲	جریان اسلامپ T۵۰ cm	Sec	۲	۵
۳	حلقه J	mm	۰	۱۰
۴	قیف V	Sec	۶	۱۲
۵	قیف T۵ min V	Sec	۰	+۳
۶	جعبه L	(h۲/h۱)	۰/۸	۱
۷	جعبه U	(h۲-h ۱) mm	۰	۳۰
۸	جعبه Fill	%	۹۰	۱۰۰
۹	غربال سنجش پایداری GTM	%	۰	۱۵
۱۰	آریمت	sec	۰	۵

#### ۷-۲- اصلاح طرح اختلاط اولیه:

پس از انجام آزمایشات لازم برای بازبینی خواص بتن حاصل، تمامی شرایط از پیش تعیین شده باید کنترل شود و در صورتی که عملکرد رضایت بخش بدست نیاید، بسته به مشکلات آشکار شده، دوره‌های اصلاحی می‌تواند به طرح اختلاط اختصاص یابد.

- استفاده از مواد مضاف و یا مواد پرکننده دیگر
- اصلاح نسبت سنگ‌دانه درشت و ماسه در مخلوط
- استفاده از عامل اصلاح لزجت VMA در صورت عدم استفاده از آن
- تعدیل میزان و یا استفاده از نوع دیگری از روان‌کننده‌ها، VMA بشرط سازگاری مصالح
- استفاده از افزودنی دیگر به منظور اصلاح نسبت آب به سیمان

در جدول ۴ به برخی از مشکلات اجرایی و تأثیر عکس‌العمل‌های ممکن بر کارایی، بمنظور ارائه یک راهنمای کارگشای کارگاهی اشاره شده است.

۷-۳- مسیر طراحی پیشنهادی اکامورا: نمونه مسیر طراحی Okamora که در ژاپن طراحی شده در زیر آورده شده است که نتایج حاصله ممکن است با مقادیر ذکر شده متفاوت باشد.

- تعیین هوای مخلوط: مقدار هوای مخلوط عموماً ۲٪ در نظر گرفته شده و یا ممکن است برای مقاومت بیشتر در مقابل یخ‌زدگی مقدار بیشتری لحاظ شود.

- محاسبه مقادیر حجمی مخلوط: این میزان به دلیل برخورد سنگ‌دانه‌ها و خطر توقف بتن نباید بیش از ۶۰٪ حجم مخلوط شود. لذا میزان بهینه درشت‌دانه‌ها بر اساس دو پارامتر حداکثر اندازه دانه و شکسته یا گردگوشه بودن آن بدست می‌آید. کاهش حداکثر اندازه سنگ‌دانه و یا استفاده از گردگوشه‌ها سبب افزایش سهم نسبی درشت‌دانه می‌شود.

جدول (۴): راهنمای کارگشای کارگاهی در برخورد با مشکلات

ردیف	پارامتر	مشاهدات آزمایشگاهی			عکس العمل ممکن	مؤثر بر					
		مقدار	واحد	آزمایش		پرکنندگی	عبور	جدا شدگی	مقاومت	جمع	خزش
۱	زیرین: خیلی زیاد	۶۵۰ >	mm	جریان اسلامپ	افزایش آب	+	+	-	-	-	-
		۵ <	sec	جریان اسلامپ T <sub>50</sub> cm	افزایش حجم چسباننده	+	+	+	+	-	-
		۱۰ >	mm	حلقه J	افزایش فوق روان‌کننده	+	+	+	+	۰	۰
		۳۰ <	mm	جعبه U شکل (h <sub>۲</sub> -h <sub>۱</sub> )	*						
		۱۲ <	sec	قیف V شکل	*						
۲	زیرین: کمی کم	۷۵۰ <	mm	جریان اسلامپ	کاهش آب	-	-	+	+	+	+
		۲ >	sec	جریان اسلامپ T <sub>50</sub> cm	کاهش حجم چسباننده	-	-	-	-	+	+
		۸ >	sec	قیف V شکل	کاهش فوق روان‌کننده	-	-	+	+	۰	۰
		*	*	*	افزایش VMA	-	-	+	+	۰	۰
		*	*	*	استفاده از پودرها	+	+	+	+	-	-
		*	*	*	استفاده از ماسه‌های ریز	+	+	+	+	-	-
۳	جداشدگی دانه‌بندی	۱۰ >	mm	حلقه J	افزایش حجم چسباننده	+	+	+	+	-	-
		۷۵۰ <	mm	جریان اسلامپ	افزایش حجم ملات	+	+	+	+	-	-
		*	*	*	کاهش آب	-	-	+	+	+	+
		*	*	*	استفاده از پودرها	+	+	+	+	-	-
		*	*	*	*						
۴	توقف	۱۲ >	sec	قیف V شکل	کاهش حداکثر اندازه سنگدانه	+	+	+	+	-	-
		۱۰ >	mm	حلقه J	افزایش حجم چسباننده	+	+	+	+	-	-
		۳۰ <	mm	جعبه U شکل (h <sub>۲</sub> -h <sub>۱</sub> )	افزایش حجم ملات	+	+	+	+	-	-
		۸۰ >	%	جعبه L شکل (h <sub>۲</sub> /h <sub>۱</sub> )	*						

- محاسبه میزان ماسه: مقدار بهینه ماسه در حدود ۵۰ - ۴۰ درصد کل مخلوط می‌باشد.
- محاسبه نسبت آب به پودر و فوق روان‌کننده‌ها: با آزمایشات مختلف اسلامپ و قیف V شکل میزان بهینه آب/پودر برابر ۰/۹ - ۰/۸ می‌باشد و با آزمایشات متعدد می‌توان میزان بهینه فوق روان‌کننده را نیز متناسب با کارایی مطلوب بدست آورد.
- در صورت عدم ارضا مشخصات موردنظر، اولین گام تغییر مصالح خواهد بود. در مرحله بعد می‌توان از افزودنی دیگر و یا تغییر نوع سیمان به هدف مطلوب رسید.

#### ۸- انتقال، بتن‌ریزی و عمل‌آوری:

متناسب با اندازه سازه بتنی برای تولید SCC، ظرفیت تولید و زمان انتقال، زمان آزاد (free time): زمانی است که SCC بتواند خواص روانی خود را حفظ نماید. زمان آزاد می‌تواند با استفاده مناسب از فوق روان‌کننده‌ها، کندگیر کننده‌ها و ..... متناسب با نوع سیمان مصرفی، به منظور حفظ قابلیت روانی و کارایی در انتقال و بتن‌تغییر

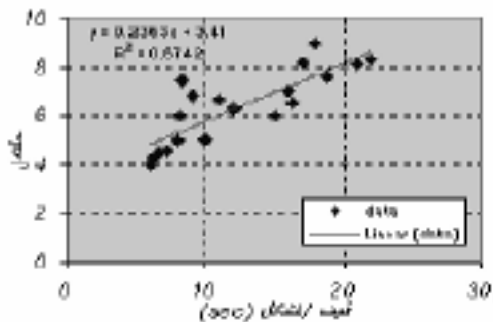
نماید. تعیین می‌شود. هرگونه توقف ناخواسته در تولید می‌تواند در ایجاد غیر یکنواختی تأثیر زیادی داشته باشد. برخی از این نکات اجرایی که باید به دقت کنترل شود به شرح زیر است:

- برای قالب با عمق بیش از ۳ متر، ارتفاع هیدرو استاتیکی به منظور ایجاد قالب مناسب و حفظ طرح اختلاط اجرا می‌شود.
- به منظور کاهش خطر جداشدگی دانه‌بندی، ارتفاع آزاد ۰/۵ متر و فاصله افقی مجاز ۱۰ متر مطلوب است.
- به لحاظ اتصالات سرد (پیوند بتن تازه و بتن سخت شده) بتن خود متراکم همچون دیگر بتن‌ها بوده و با آنها تفاوتی ندارد. درضمن با اجرای عملیات و بیره مشکل اتصالات سرد برطرف نخواهد شد.
- به لحاظ پرداخت سطحی همچون بتن‌های معمولی باید قبل از سخت شدن این عملیات انجام شود.
- عمل‌آوری Curing: به دلیل تمایل شدید بتن SCC به خشک شدن زودتر، لازم است بلافاصله بعد از بتن‌ریزی عملیات Curing انجام شود و تا حد امکان از ترک خوردگی ناشی از انقباض خمیری جلوگیری شود.

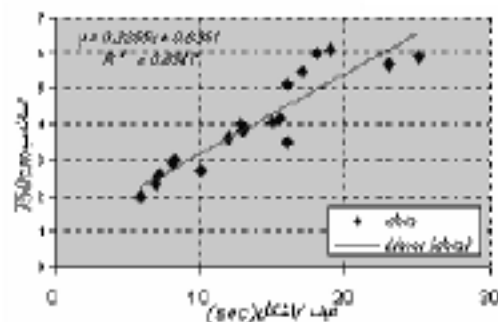
۹- نتایج آزمایشگاهی: نتایج آزمایشگاهی پارامترهای مندرج در جدول قبلی را تأیید می‌کند. در جدول ۵ نیز تعدادی از آزمایش‌ها و نتایج حاصله آورده شده است. نمودارهای 2,3 نیز حاصل از نتایج آزمایشات متعدد به منظور ایجاد روابط مختلف سهولت و سرعت کارگاهی می‌باشد.

جدول (۵): نتایج آزمایشگاهی (S/A): نسبت ماسه به کل سنگدانه‌ها و W/C: نسبت آب به سیمان

ردیف	W/C	S/A	VMA (ml/kg)	اسلامپ (mm)	قیف V شکل (sec)	جعبه U شکل (mm)
۱	۰.۳۳	۰.۴۳	۰	۲۷۵	۱۱۰	۳۵.۱
۲	۰.۴۳	۰.۵	۵.۳	۲۷۵	۱۹۰	۶.۷
۳	۰.۴۳	۰.۴۳	۵.۳	۲۶۰	۳۸	۲۴.۳
۴	۰.۳۸	۰.۵	۰	۲۷۵	۱۰۳	۷۶.۹
۵	۰.۴۳	۰.۵۷	۵.۳	۲۸۵	۲۶۰	۸.۲
۶	۰.۳۴	۰.۵۷	۰	۲۷۵	۲۵	۳۵.۱
۷	۰.۷۱	۰.۵۷	۸.۶	۲۳۵	۷۰	۲۵.۹
۸	۰.۲۸	۰.۴۳	۰	۲۶۰	۶۵	۱۹۰.۲
۹	۰.۲۸	۰.۵۷	۰	۲۷۵	۱۲۵	۷۵.۱
۱۰	۰.۳۵	۰.۴۳	۵.۳	۲۷۵	۱۰۸	۳۷.۲
۱۱	۰.۳۵	۰.۵۷	۵.۳	۲۷۵	۲۷۰	۱۳.۳
۱۲	۰.۷۱	۰.۵۷	۸.۶	۲۵۰	۴۸	۴۸.۳



نمودار ۲: رابطه بین آزمایش حلقه J و قیف V شکل



نمودار ۱: رابطه بین قیف V شکل و اسلامپ T50

#### ۱۰- نتیجه‌گیری:

بنابر بحثی که گذشت کاربرد بتن خود متراکم به لحاظ ملاحظات اقتصادی و سهولت اجرایی امری ضروری است. به دلیل عدم نیاز به و بیره و به سبب روانی زیاد، استفاده از آن می‌تواند ضعف سازه‌های بتنی را در ایران که تا حدود زیادی متأثر از عدم و بیره مناسب (خصوصاً در تراکم زیاد آرماتورها) و غیر یکنواختی بتن است کاهش دهد ولی باید در استفاده از آن ملاحظات خاص اقتصادی را بکار برد. درضمن تمامی روابط و پارامترهای مورد استفاده در ساخت و طراحی سازه‌های بتنی در این نوع بتن نیز کاربرد دارد. تلاش اصلی برای ورود بتن خود متراکم به تکنولوژی بتن آماده و پیش ساخته است. هر چند سهم این نوع بتن نسبت به این تکنولوژی بسیار کم (مثلاً یک درصد از کل بتن آماده و پیش ساخته در ژاپن) می‌باشد. اما با توجه به علاقه صنعتگران ساختمان و تولید کنندگان به این نوع بتن، نرخ تقاضا برای استفاده از آن در سال‌های آینده بالا خواهد رفت و با توجه به منابع موجود در ایران بهتر است که با بهره‌گیری از نتایج آزمایشگاهی روی این بتن، ذخایر اصلی نظیر (پودر سنگ،

سرباره کوره آهن و خاکستر برنج) را به ورطه آزمایش کشانده و در جهت پیشبرد تکنولوژی مصالح ساختمانی و صنعت سازه‌های کشور همگام با تکنولوژی روز دنیا به بهره‌گیری و ساخت این نوع بتن در کشور بپردازیم. به هر حال در ارائه مطالب سعی بر معرفی کامل این نوع بتن و بخصوص مواد افزودنی و طرز استفاده از آن بوده است. امید است تا با آشنایی هر چه بیشتر دانشجویان و مهندسان عزیز با صنعت بتن و تحقیق و بررسی بیشتر در این رابطه، مشکل کمبود دانش عمرانی در سطح کشور که باعث شده است تا از این بتن‌ها در پروژه‌های کلان کشوری استفاده نگردد را رفع نمایند. آنگاه که بتن خود متراکم به گستردگی بتن نرمال و به عنوان یک بتن استاندارد و شناخته شده مورد مصرف قرار گیرد. ما موفق به خلق بتنی پایدار و قابل اطمینان شده‌ایم.

منابع:

۱- هرمز فامیلی (ترجمه) "خواص بتن" تالیف نویل چاپ اول ۱۳۷۸

۲- رضانیان، پورعلی اکبر- شاه‌نظری، محمدرضا (ترجمه) "تکنولوژی بتن" تالیف نویل چاپ نهم

۳- امیرعباس کوچکعلی، بتن خود متراکم

۴- مجتبی احمدوند، تازه‌های افزودنی بتن

5- Okamura . h , "Mix Desing for Self Compacting Concrete" Library of JSCE , No25 . pp107-120 , June 1995

6- Masahiro ouchi ; Self Compacting Concrete Development Aplication and Investigation

7- Takda,k, Self Compacting Concrete Productedby Japanese Method with Duch Material