مروری بر ترکیب و برخی خواص بتن‌های خودتراکم

سعید بختیاری[۱]، علی اله وردی[۲*]، علی‌اکبر رمضانیانپور[۳]، طیبه پرهیزکار[۴]، مازیار رییس‌قاسمی[۴]

۱- تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، گروه مهندسی شیمی

۲- تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی

۳- تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی عمران

۴- مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن،

پیام نگار: **ali.allahverdi@iust.ac.ir**

چکیده

در این مقاله مرور نسبتاً جامعی در زمینهٔ ترکیب و خواص مهم بتن‌های خودتراکم ارائه شده است. بتن خودتراکم برای غلبه بر مشکلات عملیات لرزاندن توسعه داده شد و به علت برخورداری از خواص مناسب، به سرعت گسترش یافت. خمیر و ملات مورد استفاده در بتن خودتراکم باید دارای لزجت و نیز قابلیت تغییر شکل زیاد باشد و با برقراری تعادل بین این دو، ضمن تأمین قابلیت تغییر شکل و روانی زیاد، از جداشدگی اجزاء جلوگیری شود. بنابراین استفاده از مواد افزودنی شیمیایی و پودری مختلف، ضروری است. محدود کردن درصد سنگدانه‌ها به همراه استفاده از مقادیر زیاد پودرهای معدنی و غلظت مناسب فوق‌روان‌کننده‌ها برای دستیابی به این خواص، ضروری است. حجم زیاد پودرهای معدنی که در بتن‌های خودتراکم استفاده می‌شوند، می‌تواند اثرهای متعددی بر خواص آن داشته باشد. پودر سنگ آهک می‌تواند باعث بالا رفتن گرمای هیدراسیون (آبپوشی) و کاهش قابل ملاحظه دوام بتن در برابر سولفات شود که مربوط به تشکیل ترکیباتی نظیر گچ، اترنجیت و تاماسیت است. همچنین پودرها با توجه به نوعشان می‌توانند باعث کاهش مقاومت بتن‌های خودتراکم در برابر آتش، در مقایسه با بتن‌های معمولی شوند.

کلمات کلیدی: بتن خودتراکم، پودر، دوام، مقاومت فشاری، طرح اختلاط، حرارت آبپوشی، مقاومت در برابر آتش

۱- مقدمه

یکی از عوامل مهم برای دستیابی به بتن با ویژگی‌های مناسب (از جمله برای بهبود دوام)، متراکم کردن بتن است. برای این منظور اغلب لازم است از عملیات لرزاندن یا ویبره استفاده شود، تا تخلخل و هوای درون بتن کاهش یابد. این موضوع به افزایش مقاومت مکانیکی و دوام بتن کمک می‌کند. عملیات لرزاندن از مشکلات اساسی در این صنعت به شمار می‌رود. مشکلات مختلف مانند کمبود نسبی کارگران ماهر، سهل‌انگاری، مزاحمت‌های جسمی و روحی ناشی از لرزاندن و یا دشواری دسترسی مناسب به فضاهای داخلی قالب‌ها و محل‌هایی که دارای تراکم زیادی از میلگردها هستند، باعث می‌شود تا عمل لرزاندن به طور کامل انجام نگیرد و در نهایت مشخصات مطلوبی از بتن حاصل نشود. بنابراین ساخت بتنی بدون نیاز به لرزاندن، هدف مهمی برای متخصصین بتن بوده است که با آن بتوان نقص‌ها و مشکلات عملیات اجرایی تراکم را برطرف ساخت.

ابداع بتن خودتراکم[1] (بتن متراکم شونده یا روان رو) یا SCC نتیجه این تلاش‌ها بوده است. استفاده از این بتن نه تنها به حل مشکلات عدم کارایی و یا ضعف اجرائی کارگران کمک می‌کند، بلکه می‌تواند موجب صرفه‌جویی‌های قابل توجهی از نظر مدت اجرا و به تبع آن در هزینه‌ها بشود [۲و۱]. در این مقاله مرور نسبتاً جامعی بر روی ترکیبات و خواص مهم بتن‌های خودتراکم، با استفاده از تعداد زیادی مقالات پژوهشی و سایر مدارک فنی معتبر صورت گرفته است. تعریف، تاریخچه و دلایل گسترش نسبتاً سریع این نوع بتن ارائه شده است. چگالی تراکم، مفهوم مهمی در دستیابی به خواص خودتراکمی است، که در این خصوص و سنجه‌های مؤثر بر روی آن بحث شده است. روش‌های طرح اختلاط و خواص بتن خودتراکم، از جمله مقاومت فشاری، دوام و مقاومت در برابر آتش با استفاده از ادبیات علمی موضوع مورد بحث قرار گرفته است. حجم زیاد پودرها در بتن خودتراکم می‌تواند اثرات قابل توجهی بر خواص آن داشته باشد و این موضوع باید در تحقیقات تجربی مورد توجه قرار گیرد. لذا به این موضوع نیز در مرور ادبیات علمی توجه و بحث شده است.

۲- تعریف بتن خودتراکم و دلایل گسترش آن

طبق تعریف بارتوس[2] [۳]، بتن خودتراکم بتنی است که تحت وزن خود جاری شده و بدون نیاز به هر نوع لرزاندن، به طور کامل (حتی با وجود میلگردهای متراکم)، قالب‌ها را پرکرده و همگنی خود را حفظ نماید. طبق تعریف اوزاوا[3] [۴] بتن خودتراکم تازه باید سه خاصیت زیر را داشته باشد:

الف ـ توانایی پرکنندگی: جاری شدن بتن خودتراکم درتمام فضاهای قالب تحت وزن خود.

ب ـ توانایی عبور: امکان عبور از فواصل تنگ بین میلگردها و قالب تحت وزن خود.

ج- مقاوم در مقابل جداشدگی: شکل و ترکیب یکنواخت خود را در جریان حمل و بتن‌ریزی حفظ کند.

مزایای چشمگیر بتن خودتراکم موجب گسترش سریع آن در دنیا شده است. از مزایای مهم آن می‌توان حذف عملیات لرزاندن، سهولت بتن‌ریزی، افزایش سرعت اجرا، اطمینان از تراکم مناسب، مقاومت خوب در برابر جداشدگی سنگدانه‌ها، امکان ایجاد سطوح تمام شده صاف و زیبا و در نتیجه تهیه طرح‌های متنوع معماری در نما و نیز کاهش آلودگی صوتی در محیط کار و محیط‌های شهری را نام برد [۱].

۳- تاریخچه بتن خودتراکم

توسعه بتن خودتراکم نخست در سال ۱۹۸۶ توسط اوکامورا[4] در ژاپن پیشنهاد شد [۷و۶]. در پی آن مطالعات و آزمایش‌های اساسی در دانشگاه توکیو توسط اوزاوا و میکاوا[5] برای توسعه این بتن صورت گرفت [۷-۶]. اولین نمونه‌های بتن خودتراکم در ۱۹۸۸ با استفاده از مواد و مصالح موجود در بازار ساخته شد و نتایج مناسبی از نظر جمع‌شدگی‌های ناشی از خشک شدن و سخت شدن، گرمای آبپوشی، سختی و سایر خواص به دست آمد. در ابتدا این بتن، بتن توانمند[6] (HPC) نام‌گذاری شد، اما همزمان، آیتسین[7] و همکارانش [۸]، بتن توانمند را به عنوان بتنی معرفی کردند که دارای مقاومت و دوام بالا بر اثر نسبت آب به سیمان پایین باشد. بنابراین نام این نوع بتن تغییر یافت و تحت عنوان "بتن خودتراکم توانمند" یا به طور خلاصه "بتن خودتراکم" خوانده شد [۹و۵]. تفاوت بتن‌های خودتراکم و توانمند در این است که در بتن توانمند، جریان‌پذیری تنها تا حدودی بهبود یافته است و نمی‌تواند تحت وزن خود، قالب و یا فواصل بین میلگردها را پر کند و کماکان به عملیات لرزش نیاز دارد [۹].

مقالات اوزاوا و اوکامورا در کنفرانس‌های مختلف بین‌المللی، توجه به بتن خودتراکم را افزایش داد [۵]. در ۱۹۹۶ یک پروژه اروپایی با عنوان «تولید و محیط کاری بهبود یافته با استفاده از بتن خودتراکم» آغاز و باعث گسترش سریع‌تر کاربرد SCC در پروژه‌های ساختمانی و عناصر بتنی پیش‌ساخته شد. در ۲۰۰۵ راهنمای اروپایی بتن خودتراکم توسط «فدراسیون اروپایی متخصصین شیمی ساختمان و سیستم‌های بتنی»[8] [۱۰] منتشر شد. صنعت بتن پیش‌ساخته در امریکا نیز از سال ۲۰۰۰ بتن خودتراکم را برای ساخت عناصر سازه‌ای و غیرسازه‌ای و پانل‌های معماری مورد

1. Self-Compacting or Self-Consolidating Concrete
2. Bartos
3. Ozawa
4. Okamura
5. Meakawa
6. High Performance Concrete
7. Aitcin
8. The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems (EFNARC)

www.SID.ir
Archive of SID

استفاده قرار داد. کاربرد بتن خودتراکم در ساخت قطعات پیش‌ساخته پیش‌تنیده از حدود ۱ درصد در سال ۲۰۰۰ به تقریباً ۱۵ درصد در سال ۲۰۰۵ افزایش یافت و استفاده از آن در صنایع بتن آمادهٔ امریکا نیز با شتاب کمتری در حال افزایش است [۱۱].

از سازه‌های مهم یا معروف ساخته‌شده با بتن خودتراکم در دنیا می‌توان پل معلق آکاشی-کایکو[1] در ژاپن، دیواره‌های مخازن عظیم LNG شرکت گاز اوزاکا در ژاپن، بازار بزرگ میدسامر[2] در لندن و پروژه‌های متعدد دیگر را نام برد [۱]. در ایران نیز استفاده از بتن خودتراکم از چند سال قبل آغاز شده است که برای مثال می‌توان از کاربرد آن در لایه سطحی تونل رسالت تهران، برخی قسمت‌های نما و کتیبه نویسی قرآن در طرح توسعه حرم حضرت معصومه در قم و ساخت قطعات بتنی خاص برای عبور ماشین‌های حفاری تونل در پروژه متروی شیراز را نام برد [۱۲].

۴- خودتراکمی و مفهوم چگالی تراکم

چگالی تراکم[3] مفهومی کلیدی برای دستیابی به بتن‌های توانمند و خودتراکم است. چگالی تراکم به معنای «نسبت حجم مواد جامد به حجم توده‌ای ذرات جامد» است و آن را می‌توان در دو قسمت تراکم سنگدانه و سیمان مورد بحث قرارداد [۱۳]. تراکم سنگدانه مستقیماً با اندازه‌گیری چگالی انبوهی سنگدانه قابل اندازه‌گیری است و نشان می‌دهد که سنگدانه‌ها به چه میزان به یکدیگر فشرده شده‌اند. به این وسیله حجم حفرات بین سنگدانه‌ها که باید به وسیله خمیر سیمان پر شود، از کم کردن چگالی تراکم از عدد یک به دست می‌آید [۱۳]. چنانچه دانه‌های با اندازه‌های مختلف و به نسبت مناسب در مخلوط وجود داشته باشد، دانه‌های کوچک فواصل بین دانه‌های بزرگ را پر کرده، فضای خالی کمتری برای پر شدن توسط مواد ریزتر باقی می‌ماند و بنابراین به مقدار سیمان کمتری نیاز خواهد بود. به علاوه، با فرض یک مقدار ثابت مواد سیمانی، خمیری که اضافه بر مقدار لازم برای پر کردن فضاهای خالی وجود دارد، باعث می‌شود تا دانه‌ها به نحو بهتری با خمیر پوشانده شوند و توزیع جریان بهتری به دست آید. بنابراین دانه‌بندی سنگدانه تأثیر به سزایی در تقاضای خمیر و کارایی مخلوط دارد. کاهش تقاضای خمیر، علاوه بر بهبود کارایی، باعث پایداری ابعادی بهتر بتن می‌شود. در عمل دلایلی نظیر عدم وجود تمام اندازه‌های سنگدانه از درشت تا بسیار ریز در مخلوط، شکل هندسی دانه‌ها، زبری دانه‌ها، اصطکاک و مزاحمت‌های فضایی ناشی از اثر جداره‌ها باعث می‌شود تا چگالی تراکم کاهش یابد.

مفهوم چگالی تراکم را می‌توان به مواد سیمانی نیز بسط داد. همان‌گونه که تراکم سنگدانه‌ها تعیین‌کنندهٔ میزان تقاضا برای سیمان است، تراکم مواد سیمانی نیز تقاضای آب را تعیین می‌کند. مواد سیمانی گوناگون دارای اندازه‌های مختلف هستند، بنابراین پودرهای ریزتر می‌توانند فضاهای خالی بین ذرات درشت‌تر را پر کنند و تقاضای آب را کاهش دهند. فنگ[4] [۱۴] در همین زمینه نشان داد که مخلوط کردن سرباره با سیمان، جریان‌پذیری خمیر را بهبود می‌بخشد. وونگ و کوان[5] [۱۳] چگالی تراکم سیمان‌های مخلوط را اندازه‌گیری و مشاهده کردند که افزودن میکروسیلیس به طور قابل توجهی چگالی تراکم سیستم را افزایش می‌دهد. آنها نشان دادند که به ازای نسبت آب به سیمان ۰/۲، افزایش میکروسیلیس باعث بهبود چشمگیر قابلیت روانی خمیر سیمان می‌شود. کوان [۱۵] در حین توسعه بتن خودتراکم با مقاومت زیاد (HS-SCC) دریافت به ازای در نسبت آب به سیمان ۰/۲۸، با استفاده از میکروسیلیس به اندازه متوسط ۰/۱ میکرون، کارایی بتن به نحو قابل توجهی بهبود می‌یابد. وی این بهبود را به بسیار ریز بودن میکروسیلیس نسبت داد که با پر کردن فضاهای خالی بین دانه‌های سیمان باعث می‌شود تا آب اضافی بیشتری برای روان کردن خمیر موجود باشد. اوبلا[6] [۱۶] نیز نشان داد که مخلوط کردن سیمان با خاکستر بادی بسیار ریز، با اندازهٔ متوسط ۳ میکرون، تقاضای آب را کاهش می‌دهد.

افزایش چگالی تراکم به دلیل کاهش نسبت آب به سیمان و کمتر شدن تقاضای آب، نفوذپذیری و آب انداختگی را کاهش می‌دهد. همچنین در اثر کم شدن فضاهای تخلخلی که به علت اثر دیواره در مجاورت سنگدانه‌ها ایجاد می‌شود، تخلخل منطقه انتقالی کاهش می‌یابد [۱۷و۱۳]. بنابراین کیفیت منطقه انتقالی، که ضعیف‌ترین اتصال در بتن محسوب می‌شود، بهبود می‌یابد [۱۸]. در بتن‌های با

1. Akashi- Kaiko
2. Midsummer
3. Packing Density
4. Feng
5. Wong and Kwan
6. Obla

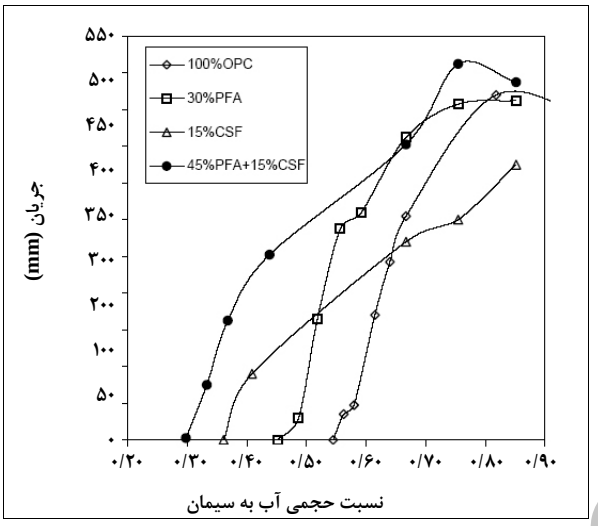
Archive of SID

www.

مقاومت بالا که چگالی تراکم به وسیله میکروسیلیس در آنها افزایش یافته بود، به طور واضح مشاهده شد که سطح شکست از میان سنگدانه‌ها (و نه از منطقه گذار) عبور کرده است، که نظریه بالا را تائید می‌کند [۱۹]. لیمن[1] [۲۰] اثر افزایش تراکم در کیفیت و نفوذپذیری منطقه انتقالی بتن، برای طرح‌های اختلاط معمولی و خودتراکم را با بهره‌گیری از میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی بررسی و اثر قابل توجه آن در تخلخل و پهنای منطقه انتقالی را گزارش کرد.

در مورد اندازه‌گیری چگالی تراکم سیمان در مراجع مختلف بحث شده است [۱۹و۱۳]. برای بتن‌های توانمند و خودتراکم توصیه شده است که چگالی خمیر با افزودن فوق روان‌کننده، اندازه‌گیری شود [۱۳]، تا با واقعیت نزدیک‌تر باشد. افزایش چگالی تراکم، علاوه بر مقاومت، باعث بهبود کارایی بتن نیز می‌شود، زیرا در یک نسبت ثابت آب به سیمان، قابلیت جریان یافتن خمیر بهتر می‌شود. همچنین چسبندگی خمیر سیمان بهبود یافته و در نتیجه مقاومت بتن در برابر جداشدگی افزایش می‌یابد. این مشخصات، به دستیابی به خاصیت خودتراکمی کمک زیادی می‌کند. آزمایش‌های وونگ [۱۳] بهبود اساسی قابلیت جریان یافتن خمیر سیمان با افزایش چگالی تراکم را، بخصوص در نسبت‌های پایین آب به سیمان، نشان داد.

شکل (۱)، مقدار جریان اسلامپ را برای نسبت‌های مختلف مخلوط و آب به سیمان در آزمایش‌های وی نشان می‌دهد. نسبت‌ها در این شکل حجمی هستند. قطر بالایی و پایینی مخروط اسلامپ به ترتیب ۶۰ و ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع آن ۷۰ میلی‌متر بوده است. وی برای بهینه کردن چگالی تراکم و اثر آن در بتن، یک طرح اختلاط سه مرحله‌ای شامل مخلوط‌های خمیر سیمان، ملات و بتن را پیشنهاد کرد. در مرحله اول چگالی تراکم مواد سیمانی، تقاضای آب را تعیین می‌کند و آب اضافی عامل اثرگذار بر روی جریان یابی (رئولوژی) و چسبندگی خمیر سیمان (مواد سیمانی، آب و فوق‌روان‌کننده) است. در مرحله دوم، ملاتی در نظر گرفته می‌شود که شامل خمیر سیمان و سنگدانه‌های ریزتر از ۱/۲mm است. چگالی تراکم دانه‌های کوچکتر از ۱/۲ mm تقاضای خمیر را مشخص کرده و خمیر اضافی عامل تعیین‌کنندهٔ جریان‌پذیری ملات است. در مرحله سوم بتن، به معنای ملات به اضافه سنگدانه‌های درشت‌تر از ۱/۲ mm، در نظر گرفته می‌شود که در آن چگالی تراکم سنگدانه‌های بزرگتر از ۱/۲mm تقاضای ملات را مشخص می‌کند و ملات اضافی عامل تعیین‌کنندهٔ کارایی مخلوط است. وونگ گزارش کرد که حتی در نمونه‌های بتنی که جداشدگی مشاهده شد، دانه‌های ریزتر از ۱/۲ mm، همراه با خمیر باقی ماندند.



شکل ۱- مقدار جریان خمیر سیمان در نسبت‌های مختلف مواد و آب به سیمان [۱۳]

۵- طرح اختلاط‌های بتن خودتراکم

۵-۱ اصول و روش‌های ارزیابی

اصولاً بتن با توجه به تعدد اجزای آن که دارای چگالی‌های مختلف هستند، مستعد به جداشدگی است. احتمال وقوع این پدیده با افزایش قابلیت تغییر شکل بیشتر می‌شود، به همین علت، در فناوری بتن به طور رایج، استفاده از بالاترین لزجتی[2] که قابل کار کردن باشد، توصیه می‌شود. در این صورت، قابلیت تغییر شکل کاهش می‌یابد و عملیات لرزاندن ضرورت پیدا می‌کند. اما برای دستیابی به خاصیت خودتراکمی لازم است تا خمیر یا ملات دارای قابلیت تغییر شکل زیاد باشد، به علاوه در هنگام جریان یافتن بتن از یک محفظه بسته یا بین میلگردهای تقویت، مقاومت مناسب در برابر جدا شدگی سنگدانه‌های درشت و ملات وجود داشته باشد. قابلیت تغییر شکل بالا به این مفهوم است که انرژی در داخل بتن به علت اصطکاک در مرزها، کمتر مصرف شود. در مقابل، لزجت بیشتر به معنای نیاز به

1. Leeman

۲. ویسکوزیته، نارونی یا گرانروی

www.SID.ir
Archive of SID

انرژی بیشتر برای تغییر شکل است. بنابراین نکته کلیدی برای دستیابی به بتن خودتراکم این است که یک تعادل مناسب بین این دو نیاز برقرار شود تا ضمن تأمین قابلیت تغییر شکل و روانی زیاد، از جداشدگی اجزاء جلوگیری شود [۲۱].

بدیهی است که طرح اختلاط نهایی بستگی به پارامترهای مختلف، نظیر نوع و کیفیت مواد، مقاومت مورد نیاز، دوام و شرایط محیطی و غیره دارد. مقادیر مناسب مواد را نمی‌توان بدون اختلاط آزمایشی، ثابت در نظر گرفت. بنابراین بلافاصله پس از تعیین نسبت اختلاط، باید خودتراکمی را به وسیله آزمون‌های خودتراکمی مانند جریان اسلامپ، آزمون قیف V و آزمون جعبه L ارزیابی کرد. خلاصه‌ای از این روش‌های آزمون در قسمت ۵-۱-۱ ارائه شده است.

روش‌هایی برای تحلیل نتایج آزمون و ارتباط آن با نسبت‌های مواد و تخمین مقادیر مناسب، مورد نیاز است. روابط بین خواص ملات در بتن خودتراکم و نسبت‌های اختلاط مورد پژوهش قرار گرفته و فرمولبندی شده است. چنانچه خودتراکمی بتن به وسیله آزمایش، ناکافی تشخیص داده شود، علت آن باید به طور کمّی پیدا شود، تا بتوان نسبت اختلاط را تنظیم کرد. آزمایش‌های جریان اسلامپ و قیف به ترتیب برای آزمون قابلیت تغییر شکل و لزجت پیشنهاد شده و شاخص‌های Γ_c و R_C برای آنها به شرح زیر تعریف شده است [۶]:

(معادله ۱) شاخص قابلیت تغییر شکل:

$$\Gamma_C = (Sfl_1.Sfl_2 - Sfl_0^2)/Sfl_0^2$$

که در آن sfl_1 و sfl_2 قطرهای اندازه‌گیری‌شده جریان اسلامپ و sfl_0 قطر مخروط اسلامپ است (برای درک بهتر معادله، به شکل (۲) و توضیحات آزمون مراجعه شود).

(معادله ۲) شاخص لزجت:

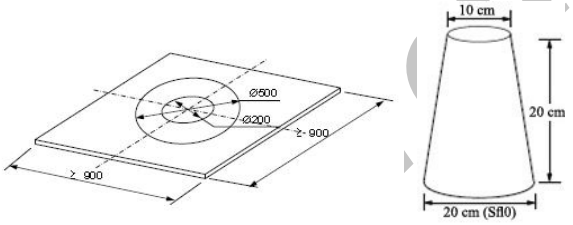
$$R_c = \frac{10}{t}\alpha\frac{1}{\text{لزجت}}$$

که در آن t زمان اندازه‌گیری شده برحسب ثانیه برای بتنی است که از میان قیف عبور می‌کند. آزمون‌های جریان و قیف، علاوه بر بتن برای ملات یا خمیر، برای تعیین اثر مواد مورد استفاده در بتن‌های خودتراکم، نظیر مواد پودری، ماسه و فوق‌روان‌کننده‌ها پیشنهاد شده‌اند. از این شاخص‌ها می‌توان برای تعیین یک روش منطقی در مورد تنظیم نسبت آب به پودر و مقدار فوق‌روان‌کننده و برای به دست آوردن لزجت و قابلیت تغییرشکل مناسب، استفاده کرد. اوکامورا و اوشی [۶] دربارهٔ ارتباط بین فاکتورهای خودتراکمی و نتایج آزمون‌های خودتراکمی بحث کرده‌اند.

۵-۱-۱ روش‌های آزمون بتن تازه برای بتن‌های خودتراکم

آزمایش جریان اسلامپ یکی از آزمایش‌های رایج برای سنجش خصوصیات بتن خودتراکم است و به منظور ارزیابی قوام و تعیین توانائی جریان‌پذیری بتن تحت اثر وزن خود بدون وجود هیچ قیدی به جز اصطکاک صفحه جریان تعریف شده است. طبق استاندارد ASTM C1611:2006 این آزمایش برای بتن‌هایی با سنگدانه‌های به اندازه حداکثر ۲۵ mm قابل انجام می‌باشد. نتایج این آزمایش برای تعیین قابلیت پخش‌شدگی (پُر کنندگی) بتن‌های خود تراکم، مفید است. در شکل (۲) وسایل لازم برای آزمایش نشان داده شده است [۶].

پس از توقف جاری شدن بتن، بزرگترین قطر پخش‌شدگی (Sfl_1) و قطر عمود بر آن (Sfl_2) اندازه‌گیری و میانگین آن‌ها به‌عنوان مقدار جریان اسلامپ بیان می‌شود. بر اساس توصیه‌های مؤسسه اروپایی متخصصین شیمی ساختمان [۱۰]، جریان اسلامپ بین ۵۵۰ تا ۸۵۰ میلی‌متر قابل قبول است و به سه رده مختلف طبقه‌بندی می‌شود [۶].



شکل ۲- ابزار و وسایل اندازه‌گیری جریان اسلامپ

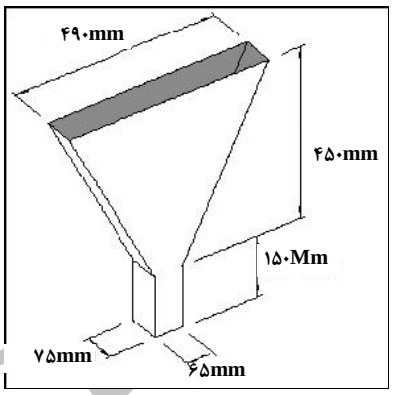
(Sfl_0 = قطر دهانه پایینی مخروط)

آزمون قیف V: در این آزمون، مدت خروج بتن از یک قیف V شکل استاندارد اندازه‌گیری شده و به‌عنوان معیاری برای تعیین قابلیت پرکنندگی و لزجت خمیری بتن استفاده می‌شود. این آزمایش می‌تواند به عنوان معیاری برای تعیین جداشدگی بتن نیز مورد استفاده قرار گیرد (شکل (۳)). علاوه بر مدت خروج بتن که در این آزمایش اندازه گیری می‌شود، نحوهٔ خروج بتن از قیف و یکنواختی

Archive of SID

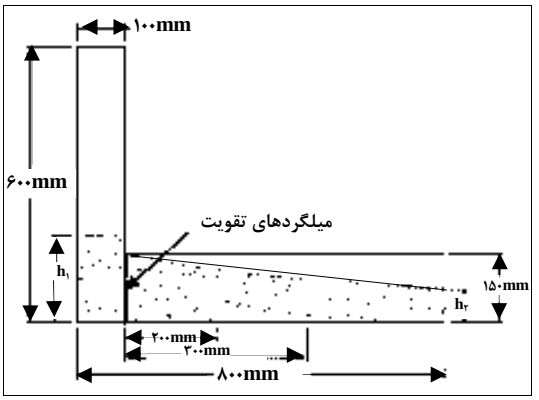
www.

بتن خارج شده نیز مهم است. این آزمون می‌تواند شاخص خوبی در خصوص میزان همگنی بتن به صورت ظاهری باشد. زمان مناسب تخلیه بتن از قیف V برای بتن خود تراکم حدود ۶ تا ۱۲ ثانیه است [۶].



شکل ۳- ابعاد و شکل قیف V

آزمایش جعبه L: این آزمایش بیانگر قابلیت پُرکنندگی و قابلیت عبور بتن خودتراکم است. همچنین می‌توان وجود یا عدم وجود جداشدگی بتن را به صورت چشمی مشاهده کرد. این آزمایش به منظور بررسی قابلیت جریان پذیری بتن تازه و پدیدهٔ انسداد ناشی از حضور میلگردها طراحی شده است (شکل (۴)) [۶].



شکل ۴- ابعاد و شکل جعبه L

۲-۵ روش‌های طرح اختلاط

خودتراکمی به طور وسیعی به مشخصات مصالح و طرح اختلاط بستگی دارد. برای افزایش قابلیت تغییر شکل خمیر، باید نسبت آب به پودر (مجموع پودرهای چسباننده و پرکننده‌های معدنی) را بالا برد و یا از فوق روان‌کننده استفاده کرد. اما در مقابل برای به دست آوردن لزجت زیاد، باید نسبت آب به پودر را کاهش داد یا از افزودنی‌های اصلاح لزجت[1] استفاده کرد. استفاده از مقادیر زیاد مواد اصلاح‌کننده لزجت در سازه های بتنی زیر آب رایج است تا از حل شدن سیمان در آب جلوگیری شود. اما استفاده از چنین مخلوطی برای سازه‌های خارج از آب مناسب نیست، زیرا لزجت آن چنان بالا است که هوا از آن خارج نمی‌شود و آن را به راحتی نمی‌توان در قالب جای داد. اولین بار تاکشیتا[2] با چنین روشی به بتن خودتراکم دست یافت [۲۱]، اما در این روش حفظ تعادل بین فوق‌روان‌کننده و مواد اصلاح لزجت بسیار مهم و دشوار است [۲۱].

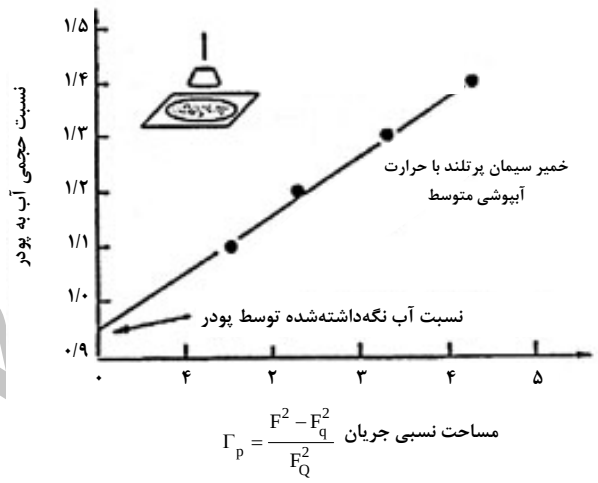
اوکامورا و اوزاوا برای حل مشکل فوق فرضیات دیگری را برای طرح اختلاط خود در نظر گرفتند، به این ترتیب که حجم سنگدانه‌های درشت را محدود کردند تا از مسدود شدن بتن در پشت موانع جلوگیری شود. همچنین با استفاده از مقادیر بالای پودر و حفظ نسبت آب به پودر، لزجت بتن تنظیم شد. با توجه به اینکه مقادیر بالای سیمان، باعث مشکلات مختلف در بتن می‌شود، قسمتی از آن با پودرهای خنثی مانند پودر سنگ آهک جایگزین شد. تفاوت اصلی روش اوکامورا و اوزاوا با روش‌های قبلی برای رسیدن به خودتراکمی را باید استفاده از مقادیر زیاد پودر ذکر کرد که اساس طرح اختلاط را تشکیل داده است. استفاده از پودر باعث حذف یا کاهش نیاز به مواد اصلاح کننده لزجت شد [۲۱].

نکته مهم در طرح اختلاط اوکامورا، درک اثر کلیدی پودر برای دستیابی به خودتراکمی است که در چگالی تراکم بحث شد. آزمایش‌ها نشان داد که یک رابطه خطی بین مساحت نسبی جریان و نسبت آب به پودر وجود دارد. مساحت نسبی جریان (برای مخلوط آب و پودر) برابر با نسبت $\frac{F^2-F_0^2}{F_0^2}$ است (شکل (۵)) که در آن F جریان اسلامپ مخلوط پودر و آب و F0 برابر با اندازهٔ قطر مخروط اسلامپ است. با استفاده از این رابطه می‌توان نسبت حدّی آب به پودر را، که در آن تغییر شکل خمیر برابر با صفر می‌شود، برون‌یابی کرد [۲۱] (شکل (۵)). این حد را می‌توان مقدار آب محبوس‌شده توسط پودر در نظر گرفت (حد پایینی آب به پودر در شکل (۵))، که بسته به نوع پودر، شکل هندسی و دانه‌بندی ذرات، بین ۰/۷ تا ۱/۰

1. Viscosity Modifying Agent (VMA)
2. Takeshita

www.SID.ir
Archive of SID

قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر، پودر تقریباً به اندازهٔ حجم خود، آب را محبوس می‌کند. حال برای رسیدن به لزجت مناسب برای خودتراکمی، باید نسبت حجمی آب به پودر را بهینه کرد. برای پودرهای با شکل هندسی نزدیک به کروی، این نسبت کوچک است. ضمن این که واکنش پذیر بودن پودر و گیرش آن نیز بر روی نسبت بهینه تأثیر می‌گذارد. این موضوع برای چند نوع سیمان و پودر مختلف گزارش شده است [۲۱]. سیمان پرتلند نوع معمولی در مقایسه با سیمان با حرارت آبپوشی کم، مقدار بیشتری آب در خود نگاه می‌دارد. همچنین اضافه کردن پودرهای خاکستر بادی و سرباره، به علت افزایش چگالی تراکم، مقدار آب به دام افتاده را کاهش می‌دهد [۲۱].



شکل ۵- رابطه بین مساحت جریان نسبی و نسبت حجمی آب به پودر [۲۱]

جزء مهم دیگر طرح اختلاط، سنگدانه است. معمولاً از نسبت (۱:۱: ۲) برای (سیمان: سنگدانه ریز : سنگدانه درشت) به عنوان نسبت مناسب برای دستیابی به مقاومت حداکثر یاد می‌شود و بیشتر شدن مقادیر سنگدانه می‌تواند باعث کاهش مقاومت شود. توکوجیرو[1] [۲۲] در ۱۹۴۰ نشان داد که اگر نسبت حجمی سیمان به سنگدانه‌های ریز، ۱ به ۱/۵ گرفته شود، آنگاه نسبت حجمی بیشتر از ۱ به ۱/۵ برای سیمان به سنگدانه‌های درشت، منجر به سقوط قابل ملاحظه مقاومت می‌شود. وی اثر تراکم را به دقت مطالعه کرد و نسبت آب به سیمان را در قالب به وسیله فشار و با خارج شدن آب در این حالت، به ۲۲ درصد رساند. نسبت وزنی بهینه آب به سیمان، پیش از قالب‌ریزی و فشار، ۳۱ درصد بود. توکوجیرو برای دستیابی به حداکثر مقاومت، نسبت ۱ به ۲ را برای نسبت حجمی سنگدانه‌های ریز به درشت توصیه کرد، اما اوکامورا نسبت کمتر (۱ به ۱) از سنگدانه را برای دستیابی به خودتراکمی و قابلیت عبور از موانع موجود در قالب، برای کاربردهای واقعی لازم می‌داند. مقایسه نتایج اوکامورا [۲۱] و توکوجیرو [۲۲] در نسبت برابر سنگدانه‌های درشت و ریز، بیانگر این است که بتن خودتراکم اوکامورا همان بتن با حداکثر مقاومتی است که توکوجیرو به دست آورده و برای دستیابی به خودتراکمی، به آن، در حد نیاز، فوق‌روان‌کننده اضافه شده است [۲۱].

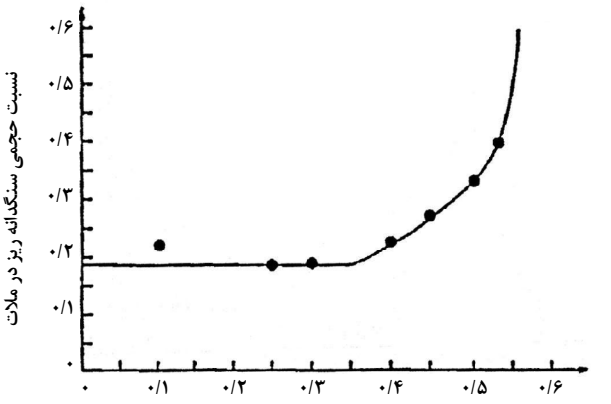
آزمایش‌های اوکامورا [۲۱]. نتایج مهمی در خصوص سنگدانه‌های ریز به دست می‌دهد. مقدار آب نگهداشته شده به وسیله سنگدانه‌های ریز، در یک محدودهٔ مشخص، تقریباً متناسب با حجم انبوهی آن و در حدود ۲۰ درصد وزنی است (یعنی تقریباً یک پنجم پودرها). بر اساس نتایج وی سنگدانه‌های ریزتر از ۹۰ میکرون را باید به عنوان پودر در نظر گرفت (و نه سنگدانه). به غیر از تفاوت در مقدار نگه‌داشتن آب، یک تفاوت دیگر نیز بین پودر و سنگدانه ریز وجود دارد: نسبت آب نگه داشته شده توسط سنگدانه ریز، وقتی که مقدار آن از یک حد مشخص فراتر رود، به شدت افزایش می‌یابد (شکل (۶))، (در حالی که برای پودر ثابت است). اوکامورا علت این موضوع را توضیح نداده است، اما دلیل اصلی باید چگالی تراکم باشد[ن]. با افزایش درصد ریزدانه‌ها در ملات، تماس این دانه‌ها با یکدیگر افزایش یافته و چگالی تراکم کاهش می‌یابد، بنابراین آب بیشتری برای پر کردن فضای خالی مورد نیاز است. لازم به ذکر است که برای سنگدانه‌های درشت، آب به دام افتاده یا نگه‌داشته شده توسط آنها عملاً در نظر گرفته نمی‌شود [۲۱].

اجزای دیگر مخلوط خودتراکم، آب و فوق‌روان‌کننده است. نقش اصلی آب در بتن تازه بعد از آبپوشی، تأمین قابلیت تغییر شکل به مقدار کافی است. در شکل‌های (۷) و (۸) آب آزاد (به معنای آب موجود در خمیر منهای آب به دام افتاده به وسیله پودر و سنگدانه‌های ریز) بر حسب پارامترهای مساحت جریان نسبی و سرعت نسبی قیف برای خمیر و ملات رسم شده است [۲۱]. به ازای یک مقدار ثابت سنگدانه ریز، مساحت جریان و سرعت قیف برای

1. Tokujiro

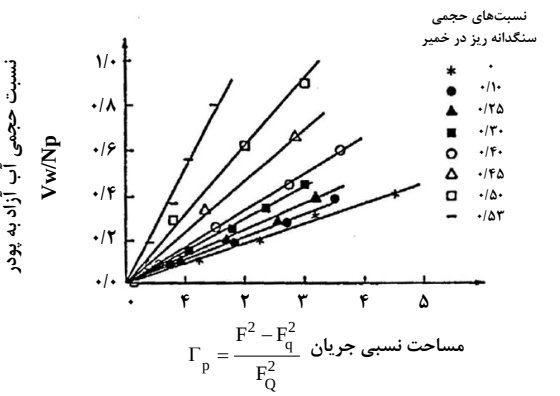
www.
Archive of SID

خمیر و ملات متناسب با نسبت آب آزاد به پودر است. هر چه مقدار سنگدانه‌های ریز افزایش می‌یابد، نسبت تناسب کاهش یافته، مقدار آب آزاد بیشتری برای افزایش مساحت جریان و سرعت قیف لازم است [۲۱].

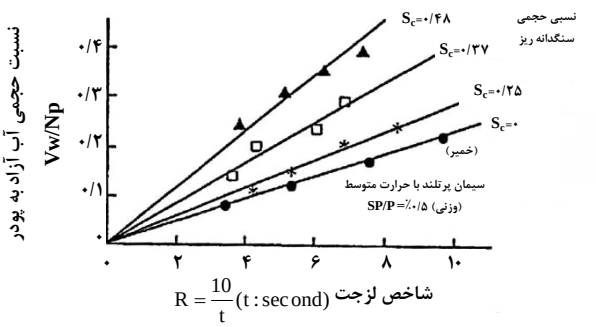


شکل ۶- رابطه بین نسبت آب نگه‌داشته‌شده و نسبت حجمی ریزدانه‌ها در ملات [۲۱]

نقش فوق‌روان‌کننده مشابه با آب آزاد است، اما مقادیر بسیار کمتری از آن ضروری است. برخلاف آب آزاد، تغییر کم در فوق‌روان‌کننده باعث تغییر زیاد در مساحت جریان می‌شود، اما تغییرات در سرعت قیف به مراتب کمتر است. فوق‌روان‌کننده، بر خلاف آب آزاد، باعث آب انداختگی نمی‌شود، اما ایراد اصلی آنها این است که عملکردشان شدیداً به نوع پودر، دما، گذشت زمان و روش اختلاط بستگی دارد [۲۱].



شکل ۷- رابطه بین نسبت آب آزاد به پودر و مساحت جریان نسبی [۲۱]



شکل ۸- رابطه بین نسبت آب آزاد به پودر و سرعت نسبی در قیف [۲۱]

اوکامورا و اوزاوا بر اساس مفاهیم و نتایج فوق، اصول طرح اختلاط خود را به شرح زیر ارائه می‌دهند [۲۱، ۶ و ۵]:

۱- با بالا رفتن درصد سنگدانه درشت، احتمال تماس بین آنها و مسدود شدن فضای بین موانع افزایش می‌یابد. بنابراین درصد سنگدانه‌های درشت باید محدود شود. برای این منظور، درصد سنگدانه درشت نسبت به حجم کل جامدات، مهم‌تر از مقدار سنگدانه است و آن را باید به ۵۰٪ حجم کل جامد محدود ساخت.

۲- مقدار سنگدانه‌های ریز باید محدود شود و معادل ۴۰٪ حجم ملات باشد. ذرات ریزتر از ۹۰ میکرون موجود در سنگدانه ریز، باید پودر در نظر گرفته شود. اگر از خمیر مناسبی استفاده شود و مقدار سنگدانه ریز به این مقدار محدود شود، برخورد چندانی بین سنگدانه‌های ریز رخ نخواهد داد.

۳ـ نسبت حجمی آب به پودر بین ۰/۹ تا ۱/۰، بسته به خواص پودر، درنظر گرفته می‌شود.

۴ـ مقدار فوق‌روان‌کننده و نسبت نهایی آب به پودر به گونه‌ای تنظیم شود که خودتراکمی به دست آید.

(لازم به ذکر است که مقادیر و نسبت های پودر به سیمان، به مقاومت مورد نیاز و نیز تنظیم مشخصات خودتراکمی – یعنی جریان‌پذیری و شکل‌پذیری- بستگی دارد). برای رسیدن به شرایط طرح اختلاط بتن‌های معمولی، ابتدا نسبت آب به سیمان ثابت گرفته می‌شود تا مقاومت کافی به دست آید. اما در بتن‌های خودتراکم، با توجه به حساسیت و وابستگی شدید خودتراکمی به نسبت آب به پودر، این نسبت باید برای رسیدن به خودتراکمی تنظیم شود. برای بتن خودتراکم، در اکثر اوقات، مقاومت،

Archive of SID

www.SID.ir

تعیین‌کنندهٔ نسبت آب به پودر نیست، زیرا نسبت آب به پودر جهت دستیابی به مقاومت لازم برای اکثر سازه‌ها، به اندازهٔ کافی کم است، مگر این که بیشتر مواد پودری استفاده شده، از نوع غیرواکنش‌زا باشند.

ناگاموتو[1] [۲۳] با مطالعات تجربی، صحت روش مذکور در فوق را بررسی کرد. نتایج نشان داد که افزایش مقادیر سنگدانه درشت تا بیش از ۵۰ درصد حجمی نسبت به مواد جامد، باعث می‌شود تا خواص خودتراکمی به شدت و به صورت ناخطی سقوط کند. تغییر مقدار سنگدانه ریز از ۴۰ درصد حجمی ملات به ۴۵ درصد، با ثابت نگاه داشتن درصد سنگدانه درشت، باعث تغییر چندانی در خواص خودتراکمی نشد. تغییر سنگدانه‌های درشت، با ثابت نگاه داشتن درصد سنگدانه‌های ریز، تغییری در نسبت آب به پودر ایجاد نکرد، ولی لازم شد که مقدار فوق‌روان‌کننده تغییر کند.

دامون [۲۴] ۶۸ طرح اختلاط بتن خودتراکم استفاده شده در پروژه‌های مختلف را آنالیز کرده است. آنالیز این طرح‌ها، اصول ارائه شده در طرح اختلاط اوکامورا را تائید می‌کند. وی در مورد اجزای کلیدی مخلوط‌ها، شامل درصد حجمی درشت‌دانه‌ها، درصد حجمی خمیر، درصد وزنی پودر، نسبت وزنی آب به پودر و حجم ریزدانه‌ها به حجم ملات بحث و بررسی کرد. بر این اساس، میانگین درصد حجمی سنگدانه‌های درشت ۳۱/۲، درصد حجمی خمیر ۳۴/۸، مقدار پودر ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، نسبت آب به پودر ۰/۳۴ بوده است. به استثنای دو مورد، محتوای پودر در محدودهٔ (۶۲۵-۴۲۵) کیلوگرم بر مترمکعب و ۸۰٪ آن در محدودهٔ (۶۰۵-۴۴۵) کیلوگرم برمترمکعب بوده است. حدود نصف مخلوط‌ها دارای VMA بودند که منجر به پایداری مخلوط‌های با درصد کمتر پودر (با یک تفاوت حدود (Kg/m^3) ۳۰ در مقدار میانگین) شده است. نسبت‌های آب به پودر در محدودهٔ ۰/۲۶ تا ۰/۴۸ بوده است که ۸۰٪ آن در محدودهٔ (۰/۴۲-۰/۲۸) قرار می‌گیرد.

نسبت آب به پودر دارای آثار قابل توجهی بر روی خواص بتن‌های تازه و سخت شده است، اما در بتن خودتراکم، اغلب، این خواص بتن تازه است که محدودکنندهٔ این نسبت در مخلوط می‌باشد. برخلاف آن، ترکیب پودر اثر مهمتری روی فرایند آبپوشی (و در نتیجه گرمای آزاد شده، مقاومت و غیره) دارد و لذا برای کنترل این خواص به کار می‌رود. از نظر درصد پودر، تفاوت روشنی را برای مخلوط‌های دارای VMA و بدون آن نشان می‌دهد. در هنگام توسعه بتن خودتراکم، مخلوط‌ها بسته به روش به دست آوردن لزجت خمیری مناسب و جلوگیری از جداشدگی، به سه دسته تقسیم می‌شوند [۲۴، ۱۱ و ۱۰]:

برپایه پودر، با نسبت‌های بسیار پایین آب به چسباننده، مقدار بالای پودر و مقادیر بالای فوق روان‌کننده.

برپایه VMA، با نسبت‌های بالاتر آب به چسباننده و مقادیر قابل ملاحظه VMA.

نوع مخلوط دارای مقادیر متوسط این دو (یعنی نسبت متوسط تا پایین آب به چسباننده با مقداری VMA).

مرور دامون [۲۴] نشان داد که عمدهٔ بتن‌های خودتراکم یا بر پایه پودر یا از نوع مخلوط بودند و فقط در موارد اندکی از پایهٔ VMA استفاده شده است. در عین حال یک امتیاز استفاده از مواد اصلاح‌کننده لزجت این است که حساسیت نسبت به برخی تغییرات مخلوط، مانند دانه‌بندی یا درصد رطوبت سنگدانه کاهش می‌یابد.

ترکیب ملات برحسب درصد حجمی ریزدانه‌ها بین ۰/۳۸ تا ۰/۵۴ متغیر بود که ۸۰ درصد از آن در محدودهٔ ۵۲ــ۴۱ درصد قرار می‌گیرد. آنالیز اطلاعات نشان داد که کنترل درصد سنگدانه، خمیر و درصد ریزدانه ملات، مهم‌تر از کنترل درصد پودر و نسبت آب به پودر بوده است.

نان سو [۹] نیز یک روش برای طرح اختلاط بتن‌های خودتراکم پیشنهاد کرده است که در آن ابتدا مقدار سنگدانه مورد نیاز تعیین و سپس خمیر چسباننده داخل حفرات سنگدانه‌ها پر می‌شود تا از خواص جریان‌پذیری سایر خواص خودتراکمی اطمینان حاصل شود. این روش ساده‌تر از روش‌های قبلی، از جمله روش اوکامورا است. نکته اساسی طرح اختلاط سو، این است که خمیر چسباننده به داخل قالبی ریخته شود که سنگدانه‌ها در آن به صورت غیر فشرده ریخته شده‌اند. سو ذکر می‌کند که طبق ASTM C29 انتظار می‌رود که فضای خالی میان سنگدانه‌ها بین ۴۲ تا ۴۸ درصد حجمی باشد. سو [۹] برای به دست آوردن خاصیت خودتراکمی مناسب از راهنمای ارائه شده توسط انجمن مهندسین عمران ژاپن استفاده کرد (جدول (۱)).

1. Nagamoto

Archive of SID
www.

جدول ۱- ویژگی‌های بتن خودتراکم پیشنهادشده توسط انجمن مهندسان عمران ژاپن (برداشت شده از مرجع ۹)

کلاس قابلیت پرشدن بتن	۱	۲	۳
شرایط ساخت: حداقل فاصله بین تقویت‌کننده‌ها (mm)	۳۰-۶۰	۶۰-۲۰۰	≥۲۰۰
مقدار تقویت‌کننده‌ها (kg/m^3)	≥۳۵۰	۱۰۰-۳۵۰	≤۱۰۰
ارتفاع پرشدن آزمون جعبه U (mm)	≥۳۰۰(RankR۱)	≥۳۰۰(RankR۲)	≥۳۰۰(RankR۳)
حجم مطلق سنگدانه‌های درشت به ازای حجم SCC (m^3/m^3)	۰/۲۸-۰/۳	۰/۳۰-۰/۳۳	۰/۳۰-۰/۳۶
جریان‌پذیری: جریان اسلامپ (mm)	۶۵۰-۷۵۰	۶۰۰-۷۰۰	۵۰۰-۶۵۰
مقاومت به جداشدگی سنگدانه:			
زمان لازم برای جریان از قیف V (s)	۱۰-۲۰	۷-۲۰	۷-۲۰
زمان لازم برای رسیدن جریان اسلامپ به ۵۰۰ mm (s)	۵-۲۵	۳-۱۵	۳-۱۵

در روش سو ابتدا با استفاده از مفهوم درجه تراکم، مقادیر سنگدانه‌های ریز و درشت محاسبه می‌شود. انجمن معماران ژاپن سه گروه ۱۵، ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر را برای حداکثر اندازهٔ سنگدانه مشخص می‌کند [۹]، که اندازهٔ ۲۰ میلی‌متر از همه رایج‌تر است [۹]. همچنین پیشنهاد شده است که مقدار سنگدانه‌های درشت حدود ۵۰ درصد حجمی متراکم شده در حالت خشک (طبق ASTM ۲۹ C) باشد. مقدار هوای لازم بستگی به دما دارد. سپس مقدار سیمان باید محاسبه شود. برای تضمین جریان‌پذیری و مقاومت خوب به جداشدگی، مقدار پودرها نباید کم باشد. بر اساس راهنمای انجمن مهندسین عمران ژاپن، حداقل مقدار سیمان که برای بتن‌های معمولی بتن با دوام بالا باید استفاده شود، به ترتیب ۲۷۰ و ۲۹۰ کیلوگرم بر مترمکعب است [۹]. مقدار زیادی مصالح پودری باید اضافه شود تا جریان‌پذیری و خودتراکمی افزایش یابد. چنانچه به این منظور فقط از سیمان استفاده شود، مقدار اضافی سیمان باعث افزایش هزینه‌ها و جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن خواهد شد. به علاوه افت اسلامپ افزایش یافته و مقاومت فشاری نیز بیشتر از مقدار لازم طرح خواهد شد. بنابراین در یک طرح اختلاط مناسب برای بتن خودتراکم، باید مقدار مناسب سیمان و نسبت آب به سیمان را برای رسیدن به مقاومت لازم تنظیم و در کنار آن برای رسیدن به خودتراکمی و مقاومت در برابر جداشدگی از مواد پودری دیگر (غیر از سیمان) استفاده کرد. مقادیر فوق‌روان‌کننده و آب در مرحله بعدی تعیین و مخلوط‌های تجربی برای رسیدن به خواص مورد نظر خودتراکمی و مقاومت ساخته می‌شوند.

ونگالا[1] [۲۶] با آزمایش‌های مختلف، روش ساده زیر را برای طرح اختلاط بتن خودتراکم ارائه کرده است:

۱- ابتدا یک اختلاط معمولی با استفاده از طرح اختلاط ACI (یا هر روش پذیرفته شده دیگر) با اسلامپ ۱۰۰ میلی‌متر بدون استفاده از فوق‌روان‌کننده تهیه می‌شود.

۲- با افزودن فوق روان‌کننده به طرح اختلاط فوق، یک اسلامپ ۱۶۰ تا ۱۸۰ میلی‌متر به دست می‌آید. در صورت مشاهده هرگونه جداشدگی یا آب انداختگی ظاهری، قسمتی از سنگدانه‌های درشت به وسیله سنگدانه ریز جایگزین شود. درصد جایگزینی اندک و حدود ۵٪ در نظر گرفته می‌شود.

۳- برای رسیدن به بتن خودتراکم، سنگدانه درشت با یک پودر ریز جایگزین می‌شود. برای این کار از افزایش‌های ۵ درصدی استفاده می‌شود تا یک جریان اسلامپ ۵۰۰ تا ۷۰۰ میلی‌متر به دست آید. برای ارزیابی قابلیت عبور باید از آزمون‌های قیف V و جعبه L استفاده شود. دربارهٔ آزمون‌ها و شاخص‌های مورد نیاز برای این ارزیابی بحث شده است [۲۶].

۴- در صورت نیاز، افزودنی VMA نیز به مخلوط افزوده می‌شود.

روش‌های اختلاط دیگری نیز توسط پژوهشگران بررسی و ارائه شده است. برخی از این طرح‌ها برای بررسی امکان استفاده از مصالح ارزان محلی ارائه شده‌اند [۲۷]. برخی دیگر نیز مانند طرح اوزبای[2] [۲۸] حاوی مطالعات عمیق‌تر با بررسی چندین پارامتر مختلف

1. Vengala
2. Ozbay

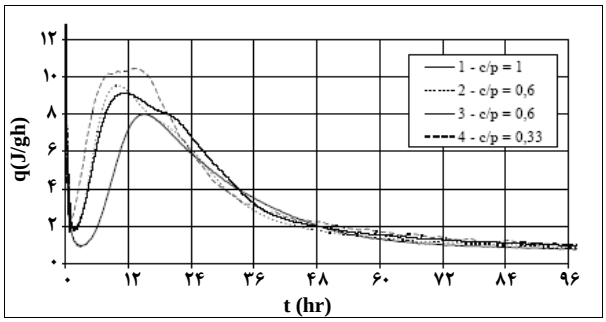
www.SID.ir
Archive of SID

است. خیاط [۳۰ و ۲۹] برای تعیین نسبت مخلوط بتن خودتراکم، از مدل‌های آماری استفاده و دربارهٔ آنها بحث کرده است. وی خواص خودتراکمی و مقاومت فشاری ۲۸ روزه مخلوط‌ها را بر اساس آزمون‌های متعدد و روش‌های آماری با سنجه‌های مقدار سیمان، نسبت آب به سیمان، غلظت‌های اصلاح‌کننده لزجت و فوق‌روان‌کننده و حجم سنگدانه‌ها همبسته کرده است. ضرایب همبستگی خوبی برای روابط به دست آمده و گزارش شده است [۲۹]. اثرگذاری هر یک از سنجه‌ها نیز بررسی شده است.

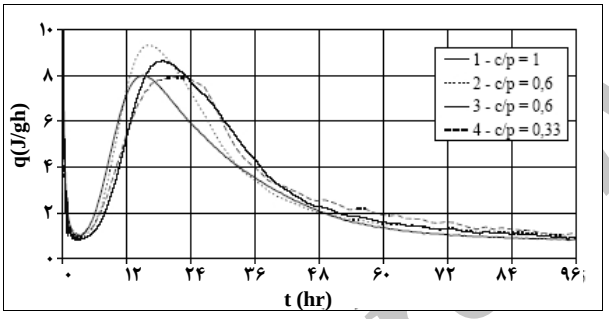
۶- حرارت آبپوشی

بتن‌های خودتراکم نسبت به بتن‌های معمولی دارای مقادیر زیادی پودر هستند. برخی از پودرها خنثی و برخی از آنها دارای واکنش آبپوشی هستند. اگر چه در منابع مختلف، استفاده از پودرهای خنثی برای جلوگیری از توسعهٔ گرمای زیاد در حین آبپوشی توصیه می‌شود، اما نتایج تجربی نشان داده است که حتی پودرهای خنثی بر روی فرایند هیدراسیون تأثیر می‌گذارد. بخصوص در مورد بتن‌های خودتراکم کارهای اندکی انجام شده و نیاز به مطالعات و تحقیقات بیشتر در مراجع تأکید شده است [۳۱].

پوپ[1] [۳۱] آزمایش‌های ایزوترمال (تکدمایی) و آدیاباتیک آبپوشی را برای ارزیابی حرارت تولیدی از دو نوع بتن خودتراکم انجام داده و نتایج آن را با دو نوع بتن معمولی مقایسه کرده است. آزمایش‌های تکدمایی روی مخلوط سیمان و دو نوع پرکننده، پودرهای کربنات‌کلسیم و کوارتزیت، با سیمان‌های مختلف انجام شد. توزیع اندازهٔ ذرات شامل سیمان و پودرهای معدنی، برای بالای ۹۰٪ حجمی، زیر ۵۰ میکرون بود. منحنی‌های شدت تولید حرارت برحسب (J/g.h) به عنوان تابعی از زمان برای آزمون‌های تکدمایی ارائه شده است. برای تمام انواع سیمان، شدت تولید حرارت نمونه‌های خودتراکم دارای پودر سنگ آهک بیش از نمونه معمولی بوده است. هرقدر مقدار پودر سنگ آهک بیشتر شده، حداکثر شدت حرارت افزایش یافته و زمان رسیدن به آن نیز کوتاهتر شده است. در مورد نمونه‌های با پودر کوارتزیت، الگوی منحنی‌ها متفاوت است به طوری‌که اولاً در (C/P)=۰/۳۳ با مقدار آن در حالتی که فقط سیمان موجود باشد، مساوی شده است. یعنی با افزایش پودر کوارتزیت، ابتدا افزایش، در شدت تولید حرارت ایجاد شده، و با ادامه افزایش آن، مجدداً شدت تولید حرارت کاهش یافته است (شکل‌های (۹) و (۱۰)). ثانیاً زمان رسیدن به حداکثر شدت تولید حرارت در نمونه‌های دارای پودر کوارتزیت نسبتاً بیشتر از نمونهٔ مرجع می‌باشد. در نمونه‌های خودتراکم دارای پودرسنگ‌آهک، با افزایش پرکننده و نیز با افزایش دما، شدت تولید حرارت افزایش یافت. نتایج آزمایش‌های آدیاباتیک نیز، در کل، نتایج آزمایش‌های تکدمایی را تأیید کرد [۳۱].



شکل ۹- شدت تولید گرما برای مخلوط سیمان CEM I 42.5 R و پرکننده سنگ آهک در ۲۰ °c



شکل ۱۰- شدت تولید گرما برای مخلوط سیمان CEM I 42.5 R و کوارتزیت در ۲۰ °c

در ادبیات علمی، موضوع اثر پرکننده‌ها (بخصوص پودر سنگ آهک) در آبپوشی سیمان، اغلب اوقات به اثر آن در شدت تولید حرارت محدود شده است. برخی نویسندگان بر این قائل هستند که سینتیک گیرش بهبود می‌یابد، زمان کما یا عدم فعالیت، کاهش می‌یابد و فرایند آبپوشی در ساعات اولیه تسریع می‌شود. کادری و دووال [۳۲] پیشنهاد داده‌اند که دانه‌های پرکننده به عنوان سایت‌های هسته‌سازی ناهمگن برای رسوب هیدراتهای کم و بیش بلوری‌شده، عمل کرده و از این طریق هیدراسیون را تسریع می‌کند.

1. Poppe

Archive of SID

www.

در برخی منحنی‌های اصلی پوپ [۳۱] یک پیک دوم نیز مشاهده شد. یک فرض برای علت ظهور این پیک، می‌تواند حضور C_3A با مقادیر بیش از ۱۲ درصد در سیمان باشد، ضمن اینکه تبدیل اترینگایت به مونوسولفات نیز می‌تواند باعث این موضوع شود (حتی در سیمان‌های دارای C_3A پایین، حدود ۷/۵٪). این واکنش تبدیل اترینگایت به مونوسولفات می‌تواند به علت وجود پرکنندهٔ پودر سنگ‌آهک، فعالتر شود. نوع سیمان در اینجا نقش مهمی دارد، به طوری‌که در سیمان CEM I 52.5 به علت بسیار ریز بودن ذرات سیمان، پیک دوم سریعتر مشاهده می‌شود و این موضوع بر اثر پرکننده، غلبه دارد. برای سیمان CEM I 52.5 HSR LA اصلاً پیک دومی مشاهده نشده است که علت آن را مقدار بسیار کم C_3A (۲/۵٪) تفسیر می‌کنند.

یی[1] [۳۳] اثر پودر سنگ آهک بر حرارت آبپوشی در بتن خودتراکم را بررسی کرد. مطالعات وی، نتایج پوپ را تائید می‌کند. وی دو نظریه در مورد علت بالا رفتن حرارت هیدراسیون با افزایش پودر سنگ آهک را مطرح کرد: ایجاد هسته‌های هیدراسیون برای C_2S و C_3S به وسیله ذرات پودر، و یا خنثی نبودن پودر سنگ آهک و واکنش‌دهی آن. مطالعات میکروسکوپی، فرضیه اول مبنی بر خنثی بودن پودر را تقویت می‌کند [۳۳].

۷- مقاومت فشاری

رمضانیانپور [۳۴] اثر افزایش پودر سنگ آهک در بتن خودتراکم با عیار سیمان ۴۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و نسبت ثابت آب به سیمان ۰/۴ را بررسی کرد. افزایش مقاومت فشاری، با افزایش پرکنندهٔ خنثی تنها تا حدّ اندکی مشاهده شد. به طور متوسط با ۶۶٪ وزنی افزایش پرکننده، کمتر از ۵٪ افزایش مقاومت فشاری در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روزه مشاهده شد.

در مطالعات دامون [۲۳] بر روی ۶۸ مورد خاص کاربردهای SCC، خواص مکانیکی مخلوط‌ها نیز بررسی شد. در تمام مقالات مرور شده توسط وی، مقدار مقاومت فشاری ۲۸ روزه ارائه شده بین ۲۰ تا ۱۰۰ مگاپاسکال متغیر بوده است که از این میان، حدود ۸۰٪ طرح‌های اختلاط دارای مقاومت بالاتر از ۴۰MPa بوده‌اند. به عبارت دیگر، امکان تولید بتن خودتراکم با مقاومت‌های مشابه با انواع بتن‌های معمولی و مقاومت بالا وجود دارد. در اینجا بر خلاف بتن‌های معمولی، مقاومت اساساً به وسیله ترکیب چسباننده، و نه با نسبت آب به چسباننده، کنترل می‌شود [۲۳]. اجزای بتن خودتراکم بسیار مشابه با بتن توانمند است، اما تفاوت اصلی آنها در افزودنی‌های خاصی است که مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین انتظار می‌رود که مشخصات بتن سخت‌شدهٔ خودتراکم نزدیک و مشابه با بتن توانمند باشد.

۸- دوام

دوام سازه‌های بتنی شدیداً وابسته به نفوذپذیری لایه سطح بتن است. بنابراین برای افزایش دوام بتن باید ورود مواد مهاجم (مانند کلرید، سولفات، آب، دی‌اکسیدکربن، اکسیژن، قلیایی‌ها، اسیدها و غیره) از طریق لایه سطحی را محدود کرد. در عمل، دوام بستگی به انتخاب مصالح، ترکیب بتن و نظارت دقیق در بتن‌ریزی، تراکم، پرداخت نهایی و عمل‌آوری دارد. عدم تراکم مناسب لایه سطحی، به علت مشکلات لرزاندن در فضاهای تنگ بین قالب و میلگردها و نظایر آن، عامل اصلی دوام ضعیف بتن‌های تقویت‌شده در برابر عوامل محیطی مهاجم است [۱۰]. غلبه بر این مشکل یکی از دلایل اصلی توسعه SCC در ژاپن بوده است.

در بتن‌های معمولی (یا رایج)، عمل تراکم به وسیله لرزاندن صورت می‌گیرد، که فرایندی ناپیوسته است. در حالت لرزاندن داخلی، با فرض این که عملیات به خوبی صورت می‌گیرد، حجم بتن در داخل محدوده‌ای که تحت تأثیر لرزاندن است، انرژی تراکم یکسانی دریافت نمی‌کند. به طور مشابه در عملیات لرزاندن خارجی، تراکم به دست آمده اساساً ناهمگن است و در هر نقطه بستگی به فاصله از منبع لرزاندن دارد. در نتیجه بتنی با تراکم نایکنواخت و نفوذپذیری‌های متفاوت به دست می‌آید. در چنین حالتی یک نوع ورود انتخابی عوامل مهاجم ایجاد می‌شود، به عبارت دیگر عوامل مهاجم با توجه به اندازهٔ خود، از منافذی که اجازه ورود به آنها را می‌دهد، در بتن نفوذ می‌کنند. عملیات ناقص یا ناصحیح لرزاندن باعث نواقصی مانند لانه زنبوری، جداشدگی، آب انداختن و غیره شده، اثرهای منفی بسیار بیشتری بر نفوذپذیری و دوام خواهند داشت. انتظار می‌رود که بتن خودتراکم با خواص مناسب، عاری از این نواقص بوده و منجر به بتنی با نفوذپذیری پایین و یکنواخت

1. Ye

www.SID.ir
Archive of SID

شود، نقاط ضعف کمتری ایجاد گردد و مواد مهاجم کمتر بتوانند اثرات مخرب بر جای بگذارند که به معنای دوام بیشتر می‌باشد [۱۰].

مقالات اولیه گروه اوکامورا [۳۸] روی بتن خودتراکم (که ابتدا آن را بتن توانمند معرفی کرده بودند)، نشان می‌دهد که به احتمال زیاد، هدف اولیه آنها دستیابی به بتنی با دوام بالا و از جمله همراه با مقداری خواص خودتراکمی بوده است. اما به احتمال زیاد پس از اینکه همزمان، آیتسین [۸] بتن توانمند را معرفی کرد، آنها ادامه مطالعات خود را بیشتر بر روی خواص خودتراکمی متمرکز نمودند.

با وجود این، نتایج تعدادی از پژوهش‌ها نشان می‌دهند که به علت بالا بودن مقدار پرکننده‌ها در بتن خودتراکم، برخی جنبه‌های دوام در این نوع بتن می‌تواند دچار ضعف‌هایی شود که بستگی به نوع پرکننده دارد. پرشون[1] [۳۷] نشان داد که ورود کلرید به بتن‌های خودتراکم دارای پودر سنگ آهک به مقدار قابل توجهی بیشتر از بتن لرزانده شده است که عمدتاً به دلیل مقدار کمتر سیمان در بتن خودتراکم در مقایسه با بتن لرزانده شده است.

استفاده از مقادیر بالای پودرسنگ آهک، کربناسیون را شدت بخشیده و می‌تواند خواص دوام بتن خودتراکم را در مقایسه با بتن لرزانده شده کاهش دهد. در نظر گرفتن یک لایه محافظت کننده بتن معمولی لرزانده شده، روی میلگردهای تقویت کننده در سطح بیرونی بتن‌های خودتراکم در شرایط تهاجمی می‌تواند به دوام این نوع بتن کمک کند. چنانچه بتن خودتراکم با مقدار پودر سنگ آهک زیاد در شرایط تهاجم سولفات تاماسیت[2] قرار گیرد، خطر زیادی از نظر کاهش دوام وجود خواهد داشت، زیرا پودر سنگ آهک دارای سطح ویژه بالایی است که می‌تواند منجر به حل CO_2 در آب حفره‌ای، بخصوص در دمای پایین شود. در صورت تهاجم تاماسیت در بتن، ژل (C-S-H) در خمیر سیمان به یک تودهٔ کم و بیش متخلخل تبدیل شده، باعث تخریب کامل بتن می‌شود. در چنین حالتی نمی‌توان از تهاجم تاماسیت با استفاده از سیمان کم قلیایی مقاوم به سولفات، پیشگیری کرد [۳۷].

پرشون [۳۷] نمونه‌های مختلف بتن خودتراکم و بتن معمولی لرزانده شده را برای ۹۰۰ روز در معرض محلول سولفات سدیم (g/l) ۱۸ در آب مقطر، قرار داد و دوام آنها را از طریق اندازه گیری وزن و مدول کشسانی، ارزیابی کرد. اثر روش اختلاط نیز، با در نظر گرفتن دو روش مختلف، ارزیابی شد. اول روش معمولی که در آن تمام مصالح خشک با آب برای ۵ دقیقه مخلوط می‌شود و سپس فوق روان کننده اضافه می‌گردد و اختلاط برای ۲/۵ دقیقه دیگر ادامه می‌یابد. در روش دوم، اختلاط تمام مصالح به جز پودر سنگ آهک برای ۰/۵ دقیقه و سپس اضافه کردن پودر سنگ آهک و اختلاط بعدی برای ۲/۵ دقیقه مورد استفاده قرار گرفت. روش دوم موفقیت آمیز نبود.

آزمایش‌ها نشان دادند که به علت حساسیت بیشتر پودر سنگ آهک به تهاجم سولفات (در مقایسه با سیمان)، در صورت استفاده از بتن خودتراکم با مقدار زیاد پودر سنگ آهک در مناطق دارای ظرفیت تهاجم سولفات، دوام بتن می‌تواند کاهش یابد. بنابراین بهتر است در مناطقی که مقدار سولفات در آب‌های زیرزمینی نامعلوم است، از بتن‌های خودتراکم با مقدار زیاد پودر سنگ آهک استفاده نشود [۳۷].

ایراسار[3] [۳۹] اخیراً تهاجم سولفات بر روی مصالح سیمانی حاوی پرکنندهٔ سنگ آهک را بازنگری کرده است. مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های خمیر، ملات و بتن با ترکیبات مختلف در برابر تهاجم محلول‌های سولفات سدیم و سولفات منیزیم با غلظت‌های مختلف مرور شده است. پودر سنگ آهک می‌تواند دوام بتن در برابر هجوم سولفات بیرونی را کاهش دهد. در این رابطه، توصیه‌های گروه متخصصین تاماسیت [۴۰] استفاده از سیمان‌های حاوی پودر سنگ آهک را در جاهایی که آب زیرزمینی حاوی بیش از ۰/۴ گرم بر لیتر یون سولفات باشد، منع کرده است. دربارهٔ مکانیسم و شیمی تشکیل تاماسیت و خوردگی ناشی از آن در بتن، در مرجع [۴۱] بحث شده است. اگرچه در بین کارهای مرور شده توسط ایراسار، بتن خودتراکم نیز وجود داشته است، اما تمرکز بحث وی بر روی اثر پودر سنگ آهک در دوام در برابر سولفات بوده و بحث دقیقی در مورد ترکیبات خودتراکم به طور خاص ارائه نکرده است.

ترگارد و کالینووسکی[4] [۴۳ و ۴۲] در مورد دوام بتن خودتراکم با پودر سنگ آهک در برابر محیط‌های دارای سولفات و یون منیزیم تحقیق کردند. نمونه‌های دارای پرکنندهٔ سنگ آهک دوام کمتری

1. Persson
2. Thaumasite
3. Irassar
4. Trägård and Kalinowski

Archive of SID
www.

داشتند و مخلوط‌های با (kg/m^3)۵۰ پودر سنگ آهک ضعیف‌تر از مخلوط‌های با (kg/m^3) ۱۰۰ و یا بدون آن بود. پس از دوره‌های آزمون (۲۲ و ۴۸ ماه) نمونه‌ها دچار تخریب‌ها و پوستگی‌های سطحی شده و ترکیبات تاماسیت، گچ و اترنجیت در آنها یافت شد.

فریبرت و اشتارک[1] [۴۴] نیز در مورد دوام نمونه‌های خودتراکم دارای (kg/m^3)۲۰۰ پودر سنگ آهک مطالعه کردند. نمونه‌ها برای ۴ ماه در معرض محلول سولفات ۳۳/۸ گرم بر لیتر قرار داده شد. نتایج مقاومت کششی نسبی روی نمونه‌های خودتراکم و شاهد، مشابه با هم و معادل تقریباً ۰/۷ به دست آمد که به نفوذناپذیری خوب نمونه نسبت داده شد.

نفوذپذیری بیشتر و کمتر نسبت به بتن‌های رایج، هر دو برای بتن خودتراکم گزارش شده است. ژو[2] [۴۵] دوام بتن خودتراکم را در مقایسه با بتن رایج با مقاومت مشابه، از طریق اندازه‌گیری نفوذپذیری اکسیژن، جذب مویینه و نفوذ کلرید ارزیابی کرده است. وی دو رده C-40 و C-60 را با مقاومت‌های مشخصه ۴۰ و ۶۰ مگاپاسکال، برای آزمونه‌های مکعبی، تهیه کرد. برای هر رده، سه سری متفاوت از مخلوط‌های SCC و دو سری نمونه‌های بتن رایج لرزانده شده، تهیه شد. طرح اختلاط‌های بتن خودتراکم، شامل پودر سنگ آهک، خاکستر بادی و یکی هم بدون پودر و فقط با اصلاح‌کننده لزجت بود. برای طرح اختلاط از آزمایش‌های حدس و خطا یا از روش اروپایی استفاده شد. برای نمونه‌های مرجع (بتن معمولی غیرخودتراکم) نیز دو نوع نمونه، یکی با سیمان پرتلند و دیگری با سیمان پرتلند و خاکستر بادی با کارایی متوسط (اسلامپ= mm(۸۰ـ۵۰)) با استفاده از روش DOE [۴۶] تهیه شد. جریان اسلامپ نمونه‌های SCC و اسلامپ نمونه مرجع C۶۰ (که دارای خاکستر بادی بود) با تنظیم میزان مصرف فوق‌روان‌کننده تنظیم شد. از پودرسنگ آهک بسیار ریز (۳۰ µm>۹۸٪ و ۲ µm>۲۰٪) با خلوص بسیاربالا ($CaCO_3$ ۹۹/۳٪) و خاکستر بادی آسیاب شده مطابق با استاندارد BS3892-1 به عنوان پودر استفاده شد. از یک نوع فوق‌روان‌کننده تجاری برای رسیدن به جریان اسلامپ mm (۶۵۰ ـ۶۰۰) برای بتن‌های خودتراکم بهره‌گیری شد. در آن نمونه SCC که پودر نداشت، از اصلاح‌کنندهٔ لزجت از نوع صمغ ولان استفاده شد. نمونه‌های مکعبی ۱۵۰ mm و استوانه‌ای Φ۱۵۰×۳۰۰ تهیه شد. نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج شدند و مطابق استاندارد بریتانیا عمل‌آوری شدند. پس از ۷ روز، آزمونه‌های Φ۱۰۰ mm از نمونه‌های استوانه‌ای مغزه‌گیری شده، مقطع‌های ۱۵ تا ۲۰ میلی‌متر از دو سرآنها جدا شد. از مغزهٔ باقی‌مانده برای آزمایش نفوذپذیری، قابلیت انتشار[3]، نفوذپذیری اکسیژن، جذب مویینه آب و قابلیت انتشار کلرید استفاده شد. نتایج نفوذپذیری اکسیژن نشان داد که برای نمونه‌های ۴۰MPa، هر سه نمونه خودتراکم، نفوذپذیری کمتری در مقایسه با مخلوط‌های رایج دارند. بخصوص طرح اختلاط‌های خودتراکم که در آنها از پودرهای سنگ‌آهک و PFA استفاده شد، ضرایب نفوذی تنها در حدّ ۳۰ تا ۴۰MPa درصد طرح‌های مرجع داشتند. نمونه‌های SCC با افزودنی اصلاح‌کننده لزجت که دارای پودر نبودند، به طور قابل ملاحظه‌ای دارای ضریب نفوذپذیری بالاتری بودند. نتایج قابلیت جذب آب نشان داد که در مقاومت MPa ۴۰، جذب به طور قابل ملاحظه‌ای در تمام نمونه‌های SCC کمتر از نمونه‌های مرجع بود. در مقاومت MPa ۶۰، ضریب جذب نمونه مرجع دارای خاکستر بادی، تقریباً مشابه با نمونه‌های SCC بود.

رمضانیانپور [۳۴] آزمون نفوذپذیری یون کلرید را طبق استاندارد ASTM C۱۲۰۲ بر روی چند نمونه بتن خودتراکم انجام داد. نتایج حاکی از تأثیر مثبت افزایش پرکنندهٔ مصرفی در کاهش نفوذپذیری یون کلرید بود. به طور متوسط با ۶۶ درصد افزایش پرکنندهٔ مصرفی، ۳۶ درصد نفوذپذیری یون کلرید در نمونه‌ها کاهش یافت. آهنگ تغییرات نفوذ یون کلرید نسبت به پرکنندهٔ مصرفی تقریباً خطی بود. نتایج رمضانیانپور و ژو تفاوت‌هایی را نشان می‌دهند، اما روش مقایسه آنها نیز متفاوت بوده است. همچنین مقاومت فشاری ۲۸ روزهٔ نمونه‌های مرجع و خودتراکم ساخته شده توسط رمضانیانپور، به طور قابل توجهی متفاوت بوده‌اند. وی نشان داد که با افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها، نفوذپذیری آب و یون کلرید کاهش می‌یابد که این کاهش با تقریب نسبتاً خوبی خطی است. همچنین تحقیقات وی [۳۵] اثر مثبت افزایش عیار سیمان در کاهش نفوذپذیری یون کلرید را نشان داد.

رمضانیانپور و صمدیان [۳۶] نتایج مطالعات آزمایشگاهی بر روی انتشار یون کلرید و نفوذپذیری نمونه‌های بتن‌های پوزولانی

1. Friebert and Stark
2. Zhu
3. Diffusivity

Archive of SID

www.SID.ir

خودتراکم را در مقایسه با بتن‌های غیر پوزولانی و بتن معمولی ارائه کرده‌اند. میکروسیلیس، پوزولان‌های پومیس و خاکستر پوسته برنج، مواد پوزولانی بودند که در این تحقیق جایگزین سیمان و مواد پرکننده شدند. آزمایش‌های گوناگون بتن تازه، مقاومت فشاری، آزمایش تسریع شدهٔ نفوذ یون کلرید، جذب آب موئینه، نفوذ آب و مقاومت الکتریکی بر روی نمونه‌های ذکر شده انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که بتن‌های خودتراکم می‌توانند با پوزولان‌هایی از جمله خاکستر پوسته برنج و پومیس ساخته شوند. همچنین بتن‌های خودتراکم حاوی میکروسیلیس به طور محسوسی مقدار نفوذ یون کلرید و نفوذ آب را کاهش داده است.

در کل باید گفت که با توجه به جدید بودن بتن خودتراکم، هنوز نیاز به بررسی‌ها و تحقیقات بسیار بیشتری بر روی جوانب متعدد دوام آن وجود دارد. خصوصاً تأثیر حجم بالای پودرها بر دوام این بتن در شرایط مختلف، جای تحقیقات زیادی دارد. به عبارت دیگر، اگرچه یکی از اهداف اولیه توسعه این بتن، افزایش دوام سازه‌ها به علت تراکم بهتر بتن بوده است، اما از جنبه دیگر، وجود پودر و سایر شرایط این بتن، باعث می‌شود تا دوام بتن در شرایط محیطی مختلف نیاز به تحقیقات و بررسی بیشتر داشته باشد.

۹- مقاومت در برابر آتش

یکی از مشخصات مهم بتن در ساختمان‌ها، مقاومت آن در برابر آتش است. مقاومت لازم در برابر آتش برای اجزای ساختمان توسط مقررات و آیین‌نامه‌های ساختمانی تعیین می‌شود و توضیح در خصوص آن در مراجع مختلف ارائه شده است [۵۲-۴۷]. در مورد مقاومت بتن‌های معمولی در برابر آتش پژوهش‌ها و آزمایش‌های بی‌شماری انجام و نتایج آن منتشر شده است. هرمتی[1] [۵۵-۵۳] دربارهٔ تغییرات خواص مختلف بتن‌های معمولی و سبک در شرایط آتش‌سوزی و دمای بالا بحث کرده است. نتایج آزمون‌های آتش، تفاوت‌های قابل توجهی را بین رفتار بتن‌های معمولی با بتن‌های دارای مقاومت بالا، توانمند و خودتراکم در دمای بالا نشان داده است. تفاوت‌های مهمی نظیر مقادیر مختلف پودر، مقدار تراکم و وجود مواد افزودنی، باعث می‌شود تا بتن‌های خودتراکم دارای خواص بسیار متفاوتی در مقایسه با سایر بتن‌ها در برابر آتش باشد.

یکی از دلایل مهم شکست اجزای بتنی در برابر آتش، پدیده ترکیدن یا پوسته‌شدن[2] است. پوسته‌شدن بتن در شرایط آتش‌سوزی، به معنای جدا شدن تکه‌های کوچک و بزرگ بتن از سطح آن در دمای بالا است که در این صورت پوشش بتنی روی میلگردهای فولادی تقویت کننده نیز از بین می‌رود. این موضوع منجر به گرمایش مستقیم میلگردها شده و باعث کاهش سریع ظرفیت باربری بتن می‌شود. گاهی اوقات ابعاد پوسته‌شدن بسیار وسیع است و شکست فوری سازه را موجب می‌شود. زمینه پوسته‌شدن در بتن‌های متراکم (مانند بتن‌های HPC، HSC و SCC)، با بتن‌های معمولی بسیار متفاوت است. ساختار متراکم در بتن باعث می‌شود تا انتقال بخار و رطوبت در آن دشوارتر شده و فشار بخار بالایی در نزدیکی سطح بتن ایجاد شود. این به معنای خطر بیشتر پوسته‌شدن در مقایسه با بتن معمولی است. در بتن معمولی بخار آب با سادگی بیشتری می‌تواند به سطح بتن مهاجرت کند و از طرف دیگر، رطوبت به قسمت‌های داخلی منتقل شود. اما در نهایت درصد رطوبت می‌تواند بسیار بالا رفته و یک پوسته‌شدن انفجاری در ۲۰ تا ۴۰ میلی‌متری سطح بتن رخ دهد. آندربرگ [۵۶] از سه مکانیسم اصلی فشار بخار، تنش‌های حرارتی و تغییرات ساختاری سنگدانه‌ها به عنوان عوامل اصلی پدیده پوسته‌شدن نام می‌برد. هرتس [۵۸] چندین عامل دیگر را نیز نام برده و بحث کرده است.

تفاوت‌های بین بتن‌های دارای تراکم بالا و معمولی از نظر رفتار در برابر آتش به میزان زیادی وابسته به خواص ریزساختار آنهاست. با وجود این، اغلب پژوهش‌های آتش روی آزمونه‌های مقیاس بزرگ متمرکز شده، فقط تعداد اندکی از پژوهش‌ها به پدیده‌های تغییر ریزساختار، مانند تغییرات خلل و فرج، توزیع اندازهٔ منفذها و اتصال منفذها پرداخته‌اند. به این دلیل، یی [۵۹ و ۵۸] تغییرات ریزساختار چند نوع خمیر سیمان، با الیاف پلی‌پروپیلن و بدون آن را بر اثر افزایش دما بررسی کرده است. آزمونه‌های خمیر سیمان بتن خودتراکم، خمیر سیمان بتن توانمند و خمیر سیمان سنتی با نسبت‌های اختلاط یکسان با بتن‌های مربوطه، اما بدون سنگدانه، ساخته شد. برای مخلوط‌های خمیر سیمان SCC از پودرسنگ آهک به عنوان پرکننده استفاده شد. خواص ریزساختار، یعنی خلل و فرج، توزیع اندازهٔ منفذ و توزیع فاز (تخلخل، CSH، $Ca(OH)_2$ و مغزهٔ

1. Harmathy

2. Spalling

Archive of SID

هیدراتـه نـشده سـیمان) بـا اسـتفاده از تخلخـل‌سـنج جیـوه‌ای و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بررسی شد. همچنین تخریب شیمیایی خمیر سیمان خودتراکم در دماهای مختلف به وسیله آنالیز حرارتی وزن‌سنجی (TG) تعیین گردید. اثر مقدار الیاف پلی‌پـروپیلن بر تغییر ریزساختار بررسی گردید. نتایج تجربی خمیر خـودتراکم بـا خمیرهای توانمند و سنتی مقایسه شـد. همـه نمونـه‌هـا در معـرض دمای بالا در یک کوره الکتریکی بـا سـرعت گـرم شـدن ۱۰ درجـه سلسیوس بر دقیقه قرار داده شدند. حداکثر دمای به دست آمـده در کوره °C ۹۵۰ بود. هیچ‌یـک از آزمونـه‌هـا نـشانه‌ای از پوسـته‌شـدن انفجاری نشان ندادند، اما ترک‌های زیادی در آنها مشاهده شد. عـدم پوسته‌شدن نمونه‌ها به دلیل اندازهٔ کوچک آزمونه‌هـا و مهمتـر از آن سرعت اندک افزایش دما است. قابل ذکر است که در آزمـایش‌هـای استاندارد آتش، دما در دقـایق اول بـا سـرعت بـسیار زیـاد افـزایش می‌یابد و در کمتر از ۲۰ دقیقه به °C ۸۰۰ می‌رسد. مشاهده شد که نمونه‌های خمیر خودتراکم الگوی متفاوتی در مقایسه بـا خمیرهـای توانمند و سنتی نشان می‌دهند. مشاهدات با میکروسکوپ الکترونـی SEM و اندازه‌گیری‌هـای (DTA/TGA) نـشان داد کـه ترکیـب فـاز خمیرهای خودتراکم و توانمند متفاوت است [۵۹].

نتایج این پژوهش، مفید بـودن الیـاف PP بـرای بهبـود رفتـار بـتن خودتراکم در برابر آتش را نشان داد. قبلاً نیز تحقیقات زیاد، استفاده از الیـاف پلـی‌پـروپیلن را موفقیـت‌آمیـز نـشان داده بـود [۶۳-۶۰]. استفاده از این الیاف برای جلوگیری از ترکیدن بتن‌های توانمنـد در دماهای بالا، اولین بار در ۱۹۸۲ توسط کرشـنر[1] پیـشنهاد شـد، امـا هـرتس [۵۷] در آن هنگـام، آن را اساسـاً بـه عنـوان یـک موضـوع تحقیقاتی رد کرد، زیرا بنا به نظر وی اولاً چگونگی خروج فاز مـذاب پلی‌پروپیلن از محل آن در بتن جای تردید داشته و ثانیاً با توجه بـه نظریه‌های موجود، ترکیدن انفجاری از ریزساختار بتن آغاز می‌شـود که بسیار کوچکتر از فاصله بین الیاف اسـت. امـا تجربیـات مختلـف، سودمندی استفاده از این الیاف در جلوگیری از پوسته‌شـدن بـتن را نشان داد. عقیده کلی بر این است که حفرات به جای مانـده از ذوب شدن و تجزیه شدن الیاف پلی‌پروپیلن باعث ایجاد حفرات اضافی در بتن می‌شود که فضاهای اضافی برای فاز بخار مهاجرت کرده را ایجاد می‌کند. الیاف پلی‌پروپیلن در ^{o}C ۱۷۰ ذوب می‌شـوند، درحـالی‌کـه ترکیدن بتن در دمای بین ^{o}C ۱۹۰ تـا ^{o}C ۲۵۰ رخ مـی‌دهـد [۶۴].

ذوب شدن الیاف و جـذب جزئـی آن توسـط خمیـر سـیمان باعـث می‌شود تا مسیرهایی برای عبور گاز ایجاد شود. با ایجاد شـبکه‌ای از این مسیرها، گازهای ایجاد شده در داخل بتن، می‌توانند بـه بیـرون راه یافته و از بالا رفتن فشار جلوگیری نمایند. بنتس [۶۵] نشان داد که الیاف بلندتر، اثر بیشتری دارند. بختیاری برای نمونه‌هـای گچـی نشان داده است که عملاً الیاف با طول‌های متفاوت بـین ۱۲ تـا ۲۰ میلی‌متر بهترین اثر را بر مقاومت ماتریس در برابر آتـش دارد [۶۶ و ۵۲]، زیرا الیاف کوتاه‌تر دارای نفوذ کم در ماده بوده و الیـاف بلنـدتر در کارپذیری ایجاد مشکل می‌نمایند. ضمن اینکه خـم شـدن یـا تـا شدن الیاف بلندتر، اثر آنها را کاهش می‌دهد. از دیدگاه صنعتی، یک دوز kg/m^3 ۲، با الیاف بین ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متـر و قطـر ۵۰ تـا ۲۰۰ میکرون به صورت کلی بـرای جلـوگیری از پوسـته‌شـدن بـتن‌هـای توانمند پذیرفته شده است [۶۷]. در عین حال، اثر بر کارایی بتن نیز باید مورد توجه قرار گیرد، ضمن این‌که این اعداد را نباید به بتن‌های با مقاومت‌های بالاتر، تخلخل‌های کمتر و یا سایر شرایط بسط داد.

وجود پودرهای پرکننده، مانند پودر سنگ آهک، از موارد مهمی است که باعث تفاوت رفتار بتن خـودتراکم در برابـر آتـش بـا سـایر بتن‌هـا مـی‌گـردد [۳۹]. بوسـتروم [۶۸] خـواص برخـی بـتن‌هـای خودتراکم در برابر آتش را بررسی کرد. شانزده نمونه بتنی شـامل ۴ نمونه معمولی و ۱۲ نمونه خودتراکم به شکل مکعـب مـستطیلی بـا ابعاد m ۲ × ۰/۲ × ۰/۲ تحت آزمـون مقیـاس بـزرگ مطالعـه شـد. نمونه‌ها از ۴ طرف جانبی در معرض دمای بالای کوره قرار گرفتنـد. نمونه‌ها پیش‌تنیده شدند، اما بار مکانیکی دیگـری در حـین آزمـون روی آنها وارد نشد. نسبت‌های آب بـه سـیمان معـادل ۰/۴، ۰/۵۵ و ۰/۷ بررسی شد. کلیه نمونه‌هـا بـرای ۶ مـاه، تعـدادی در زیـر آب و تعدادی دیگر در هوا، عمل‌آوری شدند. برای نمونه‌های خـودتراکم از دو نوع پرکننده، یکـی پـودر سـنگ آهـک و دیگـری پـودر شیـشه، استفاده شد. در برخی از نمونه‌ها از الیاف پلی‌پروپیلن با مقـادیر ۲ و ۴ کیلوگرم بر متر مکعب استفاده شد. ستون‌ها در معـرض دو رژیـم آتش هیدروکربنی و استاندارد قرار داده شدند. تمام نمونـه‌هـا دچـار پوسته‌شدگی شدند که موارد زیر از این نظر قابل ذکر است:

۱- ترکیدن یا پوسته‌شدگی بـرای تمـام نمونـه‌هـا در همـان دقـایق ابتدایی (از ۲ تا ۷ دقیقه) رخ داد و بین ۳ تـا ۳۴ درصـد کـاهش وزن در نمونه‌ها مشاهده شد.

1. Krechner

www.SID.ir

Archive of SID

۲- مقدار ترکیدگی نمونه‌های خودتراکم بسیار بیشتر از نمونه‌های معمولی بود.

۳- با افزایش نسبت آب به سیمان، ترکیدگی در نمونه‌ها کاهش نشان داد.

۴- با افزایش الیاف، ترکیدگی در نمونه‌ها کاهش نشان داد.

۵- رفتار نمونه‌های ترکیدگی حاوی پرکننده شیشه بهتر از نمونه‌های حاوی پودر سنگ آهک بود.

۶- بدترین رفتار از نظر ترکیدگی، مربوط به نمونه‌های حاوی پودر سنگ آهک با نسبت آب به سیمان ۰/۴ بود.

رمضانیانپور و اسماعیلی [۷۰ و ۶۹] تأثیر دمای زیاد بر خواص مکانیکی بتن خودتراکم حاوی پومیس را بررسی کرده‌اند. پوزولان پومیس به صورت ۱۵ درصد وزنی جایگزین سیمان و نیز ۱۵ درصد وزنی جایگزین پرکننده شد و نسبت آب به سیمان در طرح اختلاط‌ها ثابت و برابر با ۰/۴ بوده است. نمونه‌ها پس از ۲۸ روز عمل‌آوری تحت شرایط یکسان و بدون اعمال هیچ گونه باری در کوره تا رسیدن به دماهای ۲۰۰، ۴۵۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سلسیوس حرارت داده شده و ۲ ساعت در این دماها نگه داشته شدند. سپس با رسیدن دمای کوره به دمای محیط، آزمایش مقاومت فشاری و آزمایش‌های غیر مخرب مانند چکش اشمیت و اولتراسونیک (فراصوت) و همچنین توزین نمونه‌ها انجام شد. در محدودهٔ دمایی ۴۵۰ تا ۶۰۰ درجه سلسیوس، افت مقاومتی ۷۰ تا ۷۵ درصدی در تمام نمونه‌ها مشاهده شد. نتایج حاصل از آزمایش‌های غیرمخرب چکش اشمیت و فراصوت برای بتن‌های معمولی و خودتراکم تفاوت قابل توجهی نشان داد که علت آن می‌تواند تأثیر سختی لایه سطحی نمونه‌ها در نتایج چکش اشمیت و نیز بروز ریزترک‌ها در نتایج فراصوت باشد. کلاً نتایج حاصل از نمونه‌های خودتراکم حاوی پومیس به صورت جایگزین پرکننده، مقاومت پسماند بیشتری در مقایسه با سایر نمونه‌ها نشان داد.

کلاً به علت جدید بودن موضوع بتن خودتراکم، هنوز تعداد اندکی کارهای پژوهشی در مورد خواص این نوع بتن در برابر آتش صورت گرفته است، که این کارها نیز نیاز به تحقیقات بیشتر بر روی رفتار و مقاومت این بتن در برابر آتش را نشان می‌دهد. آزمایش‌های محدود، وجود زمینه ترکیدن یا پوسته شدن بسیار بیشتر بتن خودتراکم در مقایسه با بتن‌های معمولی را نشان داده است. اثرات پرکننده، سن بتن، وجود الیاف، نوع الیاف، مقدار رطوبت، شرایط بارهای روی بتن و مسائل متعدد دیگر برای شناخت رفتار بتن خودتراکم در برابر آتش نیاز به تحقیقات وسیع دارد.

۱۰- نتیجه‌گیری

چگالی تراکم، مفهوم مهمی در دستیابی به خودتراکمی است، اگرچه رسیدن به حداکثر تراکم ممکن است جزء اهداف طرح اختلاط نباشد. بهبود چگالی تراکم، مقاومت و کارایی بتن را بهبود می‌بخشد و قابلیت جریان یافتن خمیر بهتر می‌شود. همچنین چسبندگی خمیر سیمان بهبود یافته، در نتیجه مقاومت بتن در برابر جداشدگی افزایش می‌یابد. این مشخصات، به دستیابی به خاصیت خودتراکمی کمک زیادی می‌کند. استفاده از پودرهای بسیار ریز و با اندازه‌های متفاوت در طرح اختلاط‌های خودتراکم می‌تواند باعث شود تا چگالی تراکم در محدودهٔ اندازه پودرهای استفاده شده، به نحو قابل توجهی بهبود یافته و در دستیابی به دو خاصیت جریان‌پذیری و عدم جداشدگی تأثیر به سزایی دارد. محدودیت درصد حجمی سنگدانه‌های درشت و ریز نیز، علاوه بر تنظیم قابلیت عبور از بین موانع، با مفهوم چگالی تراکم قابل تفسیر است. هر چه مقدار سنگدانه‌های ریز افزایش یابد، مقدار آب آزاد بیشتری برای رسیدن به خودتراکمی لازم است.

حجم زیاد پودرهای معدنی که از آنها در بتن‌های خودتراکم استفاده می‌شود، اثرهای متعددی روی خواص آن دارد. پودرها اثر بسیار مهمی بر روی دوام به سولفات، کربناسیون و مقاومت در برابر آتش دارند. پودر سنگ آهک می‌تواند باعث کاهش قابل ملاحظهٔ دوام بتن خودتراکم در برابر سولفات شود که به علت تشکیل ترکیباتی نظیر گچ، اترینگایت و تاماسیت است. مقاومت بتن خودتراکم در برابر آتش، با بتن‌های معمولی و حتی توانمند متفاوت است. پودرها در این میان نقش مهمی دارند. حساسیت بیشتر بتن‌های خودتراکم نسبت به بتن معمولی باعث می‌شود تا مقاومت این نوع بتن در برابر آتش سریعتر کاهش یافته و استفاده از نتایج آزمون و تجربیات موجود روی بتن معمولی برای این نوع بتن را ناممکن می‌سازد.

بتن خودتراکم به دلیل خواص متعدد مناسب، بسیار مورد توجه قرار گرفته و استفاده از آن شدیداً در حال گسترش است. اما به علت جدید بودن بتن خودتراکم، حوزه‌های وسیعی از پژوهش‌ها در این زمینه مورد نیاز است. نیاز به حجم بالای پودر (بخصوص در ایران که از مواد اصلاح‌کننده لزجت بسیار کمتر استفاده می‌شود)، حوزه‌های

Archive of SID

www.

وسیعی از پژوهش را برای این نوع بتن باز می‌کند که از جمله استفاده از انواع پودرهای معدنی محلی و ضایعات صنایع را باید نام برد. بسیاری از خواص بتن خودتراکم با بتن‌های معمولی و توانمند متفاوت است و خصوصاً جنبه‌هایی نظیر دوام در شرایط تهاجمی و مقاومت در برابر آتش، بسته به طرح اختلاط و مواد افزودنی پودری مورد استفاده، نیاز به پژوهش‌های دقیق دارد.

مراجع

[۱] فروغی‌اصل، ع.، فامیلی، هـ "بررسی ویژگی‌های عمومی بتن خودتراکم و دلایل گسترش آن در دنیا"، شکرچی‌زاده، م.، لیبر، ن. (تدوین‌کنندگان)، مجموعه مقالات اولین کارگاه تخصصی بتن خودتراکم، اسفند، ص ۱-۱۲، (۱۳۸۵).

[2] Horta, A., "Evaluation of Self-Consolidating Concrete for Bridge Structure Applications", Georgia Institute of Technology, School of Civil & Environmental Engineering, URI:http://hdl.handle.net/1853/7159, (2005).

[3] Bartos, P.J.M., Gibbs, J.C. and Zhu, W. "Uniformity of in situ properties of Self-Compacting Concrete in full scale structural elements". Cement and Concrete Composites, (2001).

[4] Ozawa K., Maekawa, K., Kunishima, M. and Okamura, H., "Development of High Performance Concrete Based on the Durability Design of Concrete Structures". Proceedings of the 2nd East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-2), Vol. 1, pp. 445-450, January (1989).

[5] Okamura, H., Ouchi, M. "Self-compacting high performance concrete". Concrete construction, Construction Research Communications Ltd., pp. 378-383, (1998).

[6] Okamura, H., Ouchi, M. "Self-compacting concrete". Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, No. 1, 5-15, (2003).

[7] Bartos, P. J. M. and Grauers, M. "Self-Compacting Concrete". Concrete, Vol. 33, No.4, pp. 9-14, (1999).

[8] Aitcin, P. C. "High Performance Concrete". E&FN SPON, London, (1998).

[9] Su, N., Hsu, K. Ch., Chai, H. W. "A simple mix design method for self-compacting concrete". Cement and Concrete Research, 31, 1799–1807, (2001).

[10] The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems (EFNARC). "The European Guidelines for Self-Compacting Concrete, Specification, Production and Use", (2005).

[11] Ouchi, M., Nakamura, S., Osterberg, Th., Hallberg, S., and Lwin, M., "applications of self-compacting concrete in Japan, Europe and The United States", ISHPC, (2003).

[۱۲] شکرچی‌زاده، م.، لیبر، ن. (تدوین‌کنندگان)، مجموعه مقالات اولین کارگاه تخصصی بتن خودتراکم، اسفند (۱۳۸۵).

[13] Wong, H. H. C., Kwan, K. H. "Packing density: a key concept for mix design of high performance concrete". The University of Hong Kong.

[14] Feng, N.Q., Shi Y.X., Hao T.Y. "Influence of ultrafine powder on the fluidity and strength of cement paste". Advance in Cement Research, Vol.12, No.3, pp89-95, (2000).

[15] Kwan, A. K. H. "Use of condensed silica fume for making high strength, selfconsolidating concrete", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.27, No.4, pp620-627, (2000).

[16] Obla, K. H., Hill, R.L., Thomas, M. D. A., Shashiprakash, S.G., Perebatova, O. "Properties of concrete containing ultra-fine fly ash". ACI Materials Journal, Vol.100, No.5, 426-433, (2003).

[17] Trägårdh, J. "Microstructural features and related properties of selfcompacting concrete". in: Skarendahl, A., Petersson, Ö. (Eds.), Proceedings of the 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, 175–186, (1999).

[18] Mehta, P. K., Aïtcin P. C. "Microstructural basis of selection of materials and mix proportions for high-strength concrete". ACI Special Publication SP-121, pp 265-86, (1990).

[19] Kwan, A. K. H., Cai, Y. B., Chan, H. C. "Comparison of granitic and volcanic aggregates for making high strength concrete in Hong Kong". HKIE Transactions, Vol.2, No.2, 1-8, (1995).

[20] Leeman, A., Münch, B., Gasser, P., Holzer, L. "Influence of compaction on the interfacial transition zone and the permeability of concrete". Cement and Concrete Research, 36, 1425–1433, (2006).

[21] Okamura, H., Ozawa, K. "Mix-design for self-compacting concrete". Concrete Library of JSCE, 107-120, (1995).

[22] Yoshida, T. "Production of maximum strength concrete". Journal of JSCE, vol. 26, No. 11, (1940).

[23] Nagamoto, N., and Ozawa, K. "Mixture proportions of self-compacting high performance concrete". ACI International, SP-172, 623-636, (1997).

[24] Domone, P.L. "Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies". Cement & Concrete Composites, 28, 197–208, (2006).

[25] Ozkul, M. H., Dogan, H. "Properties of fresh and hardened concretes prepared by N-vinyl copolymers", International Conference on Concretes, Dundee, Scotland (1999).

Archive of SID

www.SID.ir

design of concrete structures". Proceeding of the 2nd East Asia-Pacific conference on structural Engineering & construction, Chiang Mai, 11-13 Jan. (1989).

[39] Irassar, E. F. "Sulfate attack on cementitious materials containing limestone filler – A review". Cement and Concrete Research, doi: 10.1016/g.cemconres.2008.11.007, (2009).

[40] Department of the Environment, Transport and the regions, The Thaumasite form of sulfate attack: risks, diagnosis, remidial works and guidance on new construction, DETR, London, Report of th Thaumasite Expert Group, (1999).

[41] Bensted, J. "Thaumasite — background and nature in deterioration of cements, mortars and concretes". Cement and Concrete Composites, Vol. 21, 117–121, (1999).

[42] Trägård, J., Kalinowski, M. "Investigation of the conditions for a thaumasite form of sulfate attack in SCC with limestone filler". in: O. Wallevik, I. Nielsson (Eds.), International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, RILEM, Publications 033, (2003).

[43] Kalinowski, M., Trägård, J. "Thaumasite and gypsum formation in SCC with sulfate resistant cement exposed to a moderate sulfate concentration". 2nd North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete and 4th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Chicago, USA, pp. 319–325, (2005).

[44] Friebert, M., Stark, J. "Investigations to the durability of self compacting concrete". Beton, Vol. 54, 184–186, (2004).

[45] Zhu, W., Bartos, P. J. M. "Permeation properties of self-compacting concrete". Cement and Concrete Research, Vol. 33, 921-926, (2003).

[46] Teychenne, D. C., Franklin, R. E., Nicholls, J. C., Hobbs, D. W. "Design of normal concrete mixes". Department of the Environment, UK, (1988).

[۴۷] "آیین‌نامه محافظت ساختمان‌ها در برابر آتش (پیشنهادی)"، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه شماره ض-۴۴۴، (۱۳۸۵).

[۴۸] بختیاری، سعید، قاسم‌زاده، مسعود. "تعیین انتظارات عملکردی و روش طبقه‌بندی برای مصالح و فرآورده‌های ساختمانی از نظر خطر حریق". مجله علمی – پژوهشی صفه، بهار (۱۳۸۱).

[۴۹] بختیاری، سعید. "بررسی رفتار برخی مصالح ساختمانی موجود در کشور در برابر آتش". مجموعه مقالات دومین همایش بین‌المللی محافظت ساختمان‌ها در برابر آتش، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه شماره ۴۵۷، ص ۳-۱۸، (۱۳۸۵).

[26] Vengala, J., Sudharshan M. S., Ranganath R. V. "Experimental study for obtaining self-compacting concrete". Indian Concrete J., 77(8), pp. 1261–6, (2003).

[27] Bosiljkov, V. B. "SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler", Cement and Concrete Research, Vol. 33, 1279–1286, (2003).

[28] Ozbay, E., Oztas, A., Baykasoglu. A, Ozbebek, H. "Investigating mix proportions of high strength self compacting concrete by using Taguchi method". Construction and Building Materials, Vol. 23, 694-702, (2009).

[29] Khayat, K. H., Ghezal, A., Hadriche, S. "Factorial design models for proportioning self-consolidating concrete". Materials and Structures, Vol. 32, 679-686, (1999).

[30] Khayat, K. H., Ghezal, A., Hadriche, S. "Utility of statistical models for proportioning self-consolidating concrete". Materials and Structures, Vol. 33, 338-344, (2000).

[31] Poppe, A. M., De Schutter, G. "Cement hydration in the presence of high filler contents". Cement and Concrete Research, Vol. 35, 2290 – 2299, (2005).

[32] Kadri, E. H., Duval, R. "Effect of ultrafine particles on heat of hydration of cement mortars", ACI Mater. J., Vol. 99, No. 2, 138– 142, (2002).

[33] Ye, G., Liu, X., De Schutter, G., Poppe, A. M., Taerwea, L. "Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes". Cem. Concr. Res., Vol. 29, 94–102, (2007).

[۳۴] رمضانیانپور، علی اکبر، بختیاری، یاسر. "بررسی تأثیر افزودن مواد ریز دانه خنثی بر خواص مکانیکی و دوام بتن‌های خودتراز". شکرچی‌زاده، م.، لیبر، ن. (تدوین‌کنندگان)، مجموعه مقالات اولین کارگاه تخصصی بتن خودتراکم، اسفند، ص ۱۲۴-۱۳۷، (۱۳۸۵).

[۳۵] رمضانیانپور، علی اکبر، بختیاری، یاسر. "بررسی تأثیر افزایش عیار سیمان بر خواص مکانیکی و دوام بتن‌های خودتراز". شکرچی‌زاده، م.، لیبر، ن. (تدوین‌کنندگان)، مجموعه مقالات اولین کارگاه تخصصی بتن خودتراکم، اسفند، ص ۱۶۱-۱۷۶، (۱۳۸۵).

[۳۶] رمضانیانپور، علی‌اکبر، صمدیان، مرتضی، مهدی‌خانی، مهدی. " ارزیابی دوام بتنهای خودمتراکم دربرابر نفوذ یون کلراید". مجموعه مقالات دومین کارگاه تخصصی بتن خود متراکم، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، اردیبهشت (۱۳۸۸).

[37] Persson, B. "Sulphate resistance of self-compacting concrete". Cement and Concrete Research, Vol. 33, 1933-1938, (2003).

[38] Ozawa, K. Meakawa, K., Kunishima, M., Okammura, H. "High performance concrete based on the durability

Archive of SID

[۵۰] الـه‌وردی، علـی، نجفـی‌کـانی، ابـراهیم، اسـمعیل‌پـور، سـارا. "ژئوپلیمرها، نسل جدید مواد ساختمانی مقاوم در برابر آتـش. مجموعـه مقـالات دومـین همـایش بـین‌المللـی محافظـت ساختمان‌ها در برابر آتش، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه شماره ۴۵۷، ص۴۹-۶۱، (۱۳۸۵).

[50] Bakhtiyari, S. "A Functional Approach to Fire Tests on Building Products". Asian Journal Of Civil Engineering (Building & Housing), Vol. 4, No. 2 and 3, July, pp 63-72, (2003).

[52] Bakhtiyari, S., Jafarpoor, F., Firoozyar, F. "Thermal and Mechanical Properties of Fire Resistant Gypsum Plasters". Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing), Vol. 1, No.2, PP67-82, (2000).

[53] Harmathy, T. Z. "Properties of building materials". In: SFPE handbook of Fire protection engineering, Society of Fire Protection Engineers, Boston, USA, (1995).

[54] Harmathy, T. Z., "Properties of building materials at elevated temperatures". DBR paper No. 1080, NRC 20956, National Research Council of Canada, Ottawa, (1983).

[55] Harmathy, T. Z. "Fire safety design and concrete". Longman Scientific and Technical, Harlow, U.K., (1993).

[56] Anderberg, Y. "Spalling phenomenon of HPC and OC". In Phan, L. T. (editor), Proceedings of International workshop on fire performance of high strength concrete, NIST, MD, (1997).

[57] Hertz, K. D. "Limits of spalling of fire exposed concrete". Fire safety journal, 38, 103-116, (2003).

[59] Ye, G., Liu, X., De Schutter, G., Taerwe, L., Vandevelde, P. "Phase distribution and microstructural changes of self-compacting cement paste at elevated temperature". Cement and Concrete Research, Vol. 37, 978-987, (2007).

[59] Ye, G., Liu, X., De Schutter, G., Poppe, A. M., Taerwea, L. "Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes". Cem. Concr. Res., Vol. 29, 94–102, (2007).

[60] Sarvaranta, L., Jarvela, E., Mikkola, E. "Fibre mortar composites under thermal exposure". in: Pluralis (Ed.), Proceedings of 2nd International Symposium on Textile Composites in Building Construction, Lyon, France, 23– 25 June, 47–56, (1992).

[61] Sarvaranta, L Mikkola, E. "Fibre mortar composites in fire conditions". Fire Mater, 18, 45– 50, (1994).

[62] Sarvaranta, L Mikkola, E. "Fibre mortar composites under fire conditions: Effects of ageing and moisture content of specimens, Materials and Structure, 27, 532–538, (1994).

[63] Lennon, T., Clayton, N. "Fire tests on high grade concrete with polypropylene fibres". BRE Report 395, (1999).

[64] Kalifa, P. "Spalling and Pore Pressure in HPC at High Temperatures". Cement and Concrete Research, 30, 1915-1927, (2000).

[65] Bentz, D. "Fibers, percolation and spalling of high performance concrete". ACI Mater. J., 97, 2000, 351–359.

[۶۶] بختیاری، سعید، جعفرپور، فاطمه، فیروزیار، فهیمـه، هـدایتی، محمد جعفر، محمد کاری، بهـروز. "بهبـود مقاومـت در برابـر آتش و خواص فیزیکی – مکانیکی انـدود و تختـه‌هـای گـچ و گـچ/پرلیـت بـه وسـیله الیـاف شیـشه و امولـسیون پلی‌وینیل‌اسـتات"، مجلـه علمـی-پژوهـشی امیرکبیـر، سـال هجدهم، شماره ج-۶۶، تابستان (۱۳۸۶).

[67] Kalifa, P. "High – temperature behavior of HPC with polypropylene fibers: from spalling to microstructure". Cement and Concrete Research, 31, 1487-1499, (2001).

[68] Boström, L. "The performance of some self compacting concretes when exposed to fire". SP report 2002:23, SP Swedish National Testing and Research Institute, (2002).

[۶۹] رمضانیانپور، علی‌اکبر، اسماعیلی، رضا. "تأثیر دمـای زیـاد بـر خواص مکانیکی بتن خودتراکم حاوی مواد پوزولانی". دومین کارگاه تخصصی بتن خود متراکم، دانشگاه صـنعتی امیرکبیـر، اردیبهشت (۱۳۸۸).

[70] Ramezanianpour, A.A., Esmaili, R. "SCC containing pozzolanic materials as filler replacement at elevated temperatures". 3rd International Conference on Concrete & Development, Tehran, May, pp 743-751, (2009).

Archive of SID

www.SID.ir