

تأثیر پوزولان و فیلر بر نتایج فاز خمیری، مقاومت و رفتار محصورشده‌ی نانوبتن خودمتراکم مقاومت بالا

علی اکبر مقصودی* (دانشیار)

میثم نوری (کارشناس ارشد)

بخش مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۳ (ص. ۱۰۷-۹۹، شماره ۱/۱، یادداشت نثی)
دوری ۲-۳، شماره ۱/۱، ص. ۱۰۷-۹۹، یادداشت نثی

به دلیل جایگاه ویژه‌ی بتن در صنعت ساخت و ساز، امروزه تولید نسل‌های جدید بتن، بتن خودمتراکم حاوی نانو (نانو بتن خودمتراکم)، مواد افزودنی با کاربری‌های مختلف مطرح است. نانو بتن خودمتراکم مقاومت بالا (NHSSCC)^۱ به عنوان نمونه‌ی بارز بتن‌های نسل جدید در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور، ابتدا نانو بتن خودمتراکم مقاومت بالا همراه با ویژگی‌های فاز خمیری مطابقت آن طراحی و ساخته شد و سپس تأثیر پوزولان بر مقاومت فشاری تک محوره، میزان جذب آب و تعیین مقاومت بتن در شرایط محصورشده با انجام آزمایش سه محوره و رسم دواير مور تعیین و در این تحقیق گزارش شده است. نتایج حاکی از تأثیر مثبت استفاده از پوزولان در این نوع بتن‌هاست.

واژگان کلیدی: بتن خودمتراکم حاوی نانو مقاومت بالا، فاز خمیری، پوزولان، فیلر، آزمایش سه محوره، دایره مور.

maghsoudi.a.a@mail.uk.ac.ir
nourimeisam@gmail.com

۱. مقدمه

۱.۱. بتن خودمتراکم

در واقع SCC مخلوط بتنی با روانی فوق‌العاده است، که قابلیت شکل‌پذیری بسیار بالایی دارد و بدون به وجود آمدن جدایش می‌تواند محصولی متراکم با سطحی کاملاً صاف به وجود آورد. سه معیار اساسی به منظور ایجاد خودتراکمی عبارت‌اند از: شکل‌پذیری بالا، توانایی عبورکنندگی یا تغییرشکل و مقاومت بالا در برابر جدایش. به منظور اطمینان از بتن‌ریزی صحیح و عملکرد موفق SCC وجود موارد فوق الزامی است.^[۲]

از مزایای چنین بتنی می‌توان به کاهش زمان و هزینه‌ی ساخت، و آلودگی صوتی ناشی از لرزاندن و به دست آوردن بتنی با کیفیت بالا و همگن اشاره کرد. امروزه بتن خودمتراکم در پروژه‌های مختلف عمرانی در سطح دنیا به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد و همچنان تحقیقات در این زمینه برای شناسایی بهتر و کامل‌تر خصوصیات این نوع بتن در فاز خمیری و سخت‌شده رو به گسترش است.

۲.۱. پوزولان

در حال حاضر فناوری نوین سیمان فقط در فرایند ساخت آن خلاصه نمی‌شود، اکثر پژوهشگران به محصول سیمان پرتلند خالص به مثابه یک محصول نیمه‌تمام می‌نگرند، زیرا نمی‌توان خصوصیات کیفی انواع سیمان پرتلند خالص را در فرایند پخت کوره و در آسیاب‌های سیمان تغییر زیادی داد. از اوایل قرن بیستم از سیمان‌های مخلوط به خصوص از پوزولان طبیعی برای پایین آوردن گرمای هیدراتاسیون در بتن‌ریزی‌های

بتن به عنوان پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی، نقش مهمی در ساخت و ساز جهانی دارد. در سازه‌های بتنی معمولی برای حصول مقاومت هدف، کاهش تخلخل و هوای درون بتن و حصول پایایی، بتن به روش‌های مختلف لرزانده می‌شود. در سازه‌های بتنی اغلب به علت کمبود نسبی کارگران ماهر یا سهل‌انگاری آنان و یا حتی عدم دسترسی لوله‌ی لرزاننده به محل موردنظر به علت متراکم میلگردها (مانند متراکم میلگردها در محل اتصال تیر به ستون)، عمل لرزاندن به طور کامل و صحیح انجام نشده است و در نتیجه مشخصات مکانیکی مورد انتظار بتن حاصل نمی‌شود.

در دهه‌ی ۸۰، بررسی‌های انجام‌شده بر سازه‌های بتن مسلح در ژاپن نشان داد که عامل اصلی تخریب و ضعف این سازه‌ها عدم کیفیت بتن اجرایی است، بدین علت پژوهشگران ژاپنی به دنبال راهکاری برای رفع این مشکل برآمدند. در سال ۱۹۸۶ ایده‌ی بتن خودمتراکم (بتن بدون نیاز به لرزش) ارائه شد و مورد استقبال مهندسان قرار گرفت و سپس با حمایت‌های شرکت‌های ساختمانی ژاپنی، تحقیقات گسترده در مورد این نوع بتن صورت گرفت.^[۱]

بتن خودمتراکم (SCC)^۲ به بتنی اطلاق می‌شود که به علت داشتن روانی بسیار زیاد، بدون نیاز به تراکم یا لرزش، به راحتی در هر قالبی و با هر تراکمی از آرماتور قرار می‌گیرد و با پرکردن کامل قالب، بتنی با تراکمی نزدیک به ۱۰۰٪ ایجاد می‌کند.

* نویسنده مستقر

تاریخ: دریافت ۱۳۹۰/۰۹/۲۷، اصلاحیه ۱۳۹۱/۰۵/۱۵، پذیرش ۱۳۹۱/۰۷/۱۰.

حجم استفاده می‌شود. انگیزه‌های مصرف پوزولان‌ها شامل بهبود کیفیت بتن مصرفی (کاهش نفوذپذیری، کاهش آسیب‌پذیری به دلیل ترکیب شدن با هیدروکسید کلسیم حاصل از واکنش آبرگیری سیمان و کاهش گرمایی جسم چسبیده)، افزایش میزان تولید سیمان بدون کاهش کیفیت بلکه با ارتقاء آن، کاهش مصرف انرژی و در نتیجه کمک به حفظ محیط زیست و کاهش آلودگی هواست.^[۲] استاندارد ۷۸-۶۱۸ C ASTM، مواد پوزولانی را چنین تعریف می‌کند:

«ماده‌ی سیلیسی یا سیلیس آلومیناتی که به خودی خود ارزش سیمانی شدن ندارد، اما به صورت پودر شده است و در مجاورت رطوبت و در دمای معمولی با هیدروکسید کلسیم واکنش شیمیایی می‌دهد و ترکیباتی را که خواص سیمانی شدن دارند، به وجود می‌آورد.»

۳.۱. فناوری نانو

در چند سال اخیر، فناوری نوظهور نانو، امیدهای بسیاری برای بهبود خواص مواد مختلف در جهان به وجود آورده است و به منزه‌ی نقطه‌ی تلاقی تفکر و عمل تمام دانشمندان و پژوهشگران علوم مختلف و یکی از اجزای کلیدی پیشرفت‌های فنی قرن حاضر است. ایده‌ی فناوری نانو در سال ۱۹۵۹ میلادی توسط ریچارد فاینمن طی یک سخنرانی با عنوان «فضای زیادی در سطوح پایین وجود دارد» با ارائه‌ی این نظریه که در آینده‌ی نزدیک می‌توانیم مولکول‌ها و اتم‌ها را به صورت مستقیم دستکاری و آرایش کنیم، مطرح شد.^[۳] این فناوری به بررسی خواص مواد در ابعاد کوچک‌تر از ۱۰۰ نانومتر و چگونگی به کارگیری آنها می‌پردازد. از آنجا که بسیاری از خواص بتن به عنوان یک نانوماده، از جمله خواص مکانیکی (مانند: مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول ارتجاعی، خزش و جمع‌شدگی) و خواص دوامی (مانند: دوام در برابر حملات شیمیایی سولفات‌ها و یون کلر، دوام در برابر سیکل آب‌شدگی و یخ‌زدگی، و دوام در برابر پدیده‌ی کربناتاسیون)، ناشی از ساختار در ابعاد نانو است، امیدهایی برای استفاده از فناوری نانو در بهبود خواص یادشده‌ی بتن وجود دارد.

تفاوت اصلی فناوری نانو با فناوری‌های دیگر، در مقیاس مواد و ساختارهایی است که در این فناوری مورد استفاده قرار می‌گیرند. ذرات مواد در ابعاد میکرو معمولاً خواصی مشابه حالت توده‌ی ماده از خود نشان می‌دهند، در حالی که در مقیاس نانومتری، مواد خصوصیات فیزیکی کاملاً متمایزی نسبت به حالت توده دارند. در واقع در ابعاد نانو در یک حالت گذرای اتم یا مولکول به توده‌ی ماده هستیم و در این حالت خصوصیات ویژه‌ی از ماده بروز می‌کند. برای مثال بلورهای با ابعاد نانو، دمای ذوب بسیار کمتری نسبت به حالت توده‌ی ماده دارند و این تفاوت در برخی موارد تا ۱۰۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد نیز خواهد رسید.^[۴]

با توجه به این توضیحات می‌توان چنین بیان کرد که فناوری نانو بیشتر از آنکه علمی جدید باشد، رویکرد جدیدی است که در زمینه‌های مختلف علوم وارد شده و تغییراتی در دیدگاه‌ها و روش‌ها ایجاد کرده است. به منظور درک ضرورت رویکرد نانو فناوری در بتن لازم است که ریزساختار آن برای شناسایی فضاهای خالی در ابعاد نانو مورد مطالعه قرار گیرد، از مهم‌ترین انواع این فضاهای خالی می‌توان به فضاهای بین لایه‌ی در ژل سیلیکات کلسیم، فضاهای مویینه و حباب‌های هوای محبوس‌شده در خمیر سیمان و یا بتن اشاره کرد. مسئله‌ی قابل توجه آن است که قطر اسمی فضاهای بین لایه‌ی در ژل سیلیکات کلسیم (C-S-H، حفره‌های ژلی) که در حدود ۲۸٪ کل حجم ژل را تشکیل می‌دهند، توسط پژوهشگران در حدود ۲-۳ نانومتر و یا بین ۵-۲۵ نانگستروم (10^{-9} متر) بیان شده است.

نوع دیگر حفره‌های موجود در ریزساختار بتن یا خمیر سیمان هیدراته‌شده

فضاهای مویینه هستند که با قسمت جامد خمیر سیمان (محصولات هیدراتاسیون سیمان) پر نمی‌شوند. در یک خمیر سیمان کاملاً هیدراته‌شده با نسبت آب به سیمان کم، اندازه‌ی فضاهای مویینه ممکن است بین ۱۰-۵۰ نانومتر تغییر کند. آن‌گونه که از نتایج تحقیقات بر می‌آید، حفره‌هایی با اندازه‌ی متوسط کوچک‌تر از ۵۰ نانومتر در خمیر سیمان هیدراته‌شده در جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدگی و خزش و حفره‌های بزرگ‌تر از ۵۰ نانومتر در خواص مقاومتی و تراوبی، تأثیر اساسی دارند.^[۵]

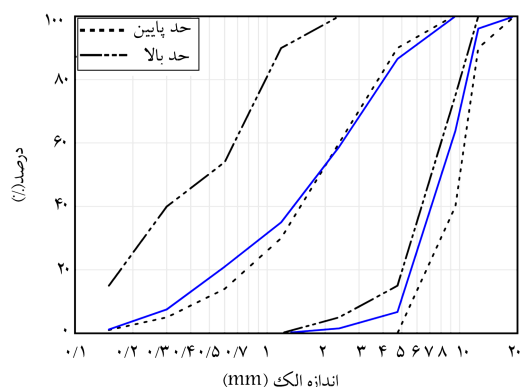
آن‌گونه که از تحقیقات بر می‌آید، نانوسیلیس مانند میکروسیلیس با پر کردن فضای خالی بین ذرات بزرگ (در مقیاس نانو)، ذرات سیمان و پوزولان، باعث کاهش میزان تخلخل خمیر سیمان هیدراته می‌شود. به علاوه نانوسیلیس با تسریع فعالیت‌های پوزولانی باعث افزایش سرعت کسب مقاومت در بتن‌های حاوی پوزولان می‌شود.^[۶] استفاده از نانوسیلیس باعث کاهش میزان سیمان مصرفی می‌شود و در نتیجه این کاهش مصرف، گرمای هیدراتاسیون و میزان انقباض، که نتیجه‌ی مصرف سیمان زیاد است، کاهش می‌یابد.^[۷]

همچنین تحقیقات نشان می‌دهند که استفاده‌ی توأم از نانوسیلیس و میکروسیلیس باعث بهبود خصوصیات مکانیکی بتن خودمترکم می‌شود.^[۸] به علاوه، برخلاف طرح اختلاط‌های حاوی میکروسیلیس، در طرح اختلاط‌های حاوی نانوسیلیس مصرف $Ca(OH)_2$ ناچیز است.^[۹]

۲. مصالح مصرفی

در این تحقیق از شن و ماسه‌ی معادن کرمان استفاده شده است. منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های درشت (شن) و ریز (ماسه)، مطابق ASTM C ۳۳ اندازه‌گیری و مقایسه‌ی آنها با حدود بالا و پایین آیین‌نامه در شکل ۱ نشان داده شده است. مدول نرمی شن و ماسه به ترتیب ۶٫۹۲ و ۲٫۹۶ به دست آمد و چگالی آنها به ترتیب ۲٫۷ و ۲٫۴۹ تعیین شد. مقدار جذب آب سنگدانه‌های مصرفی به ترتیب ۶٪ و ۱۷٪ به دست آمده است.

سیمان مصرفی، از نوع سیمان تیب دوکارخانه‌ی سیمان کرمان و پوزولان مصرفی از معادن اطراف شهر رفسنجان که توسط کارخانه‌ی سیمان کرمان در اختیار گذاشته شد، استفاده شده است. آنالیز شیمیایی سیمان و پوزولان در جدول ۱ آمده است. فوق روان‌کننده‌ی مصرفی از نوع PCE^۳ با وزن مخصوص ۱٫۱۳ و میزان ذرات جامد ۴۰٫۲٪ است. همچنین از محلول (Colloidal Silica, Nano Silica) با وزن مخصوص ۱٫۰۳ و دارای ۵۰٫۹٪ ذرات جامد که اندازه‌ی آنها کوچک‌تر از ۵۰ نانومتر است، استفاده شد.



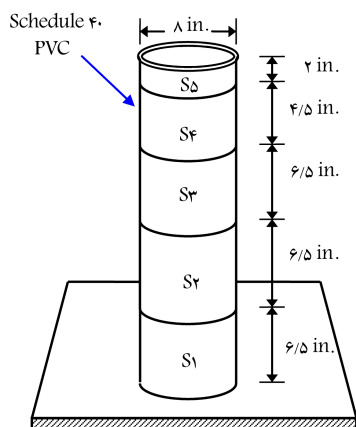
شکل ۱. نمودار دانه‌بندی سنگدانه‌ها.

جدول ۱. آنالیز شیمیایی سیمان و پوزولان.

ترکیبات	سیمان (%)	پوزولان (%)
LOI	۱٫۴۰	۴٫۱۸
SiO ₂	۲۱٫۹۰	۶۲٫۰۸
Al ₂ O ₃	۵٫۰۹	۱۸٫۳۸
Fe ₂ O ₃	۳٫۹۰	۴٫۱۶
CaO	۶۲٫۴۰	۳٫۳۳
MgO	۱٫۹۰	۱٫۵۹
SO ₂	۱٫۸۳	۰٫۰۵
Total	۹۸٫۴۲	۹۳٫۷۷

جدول ۲. نتایج آزمایش‌های فاز خمیری.

طرح اختلاط	SCC۱	SCC۲
قطر جریان اسلامپ (cm)	۷۴	۷۵٫۵
T _{۵۰} (S)	۱٫۷	۱٫۴۴
زمان تخلیه‌ی قیف V (S)	۱۱	۸٫۸۱
جعبه‌ی L (h _r /h _v)	۰٫۸۸	۰٫۹۳
اسلامپ (cm)	۶۲	۶۵
حلقه‌ی J h _r /h _v	۰٫۸۹	۰٫۸۶
شاخص پایداری عمودی V.SVIM(%)	۲۵	۳۱
شاخص پایداری افقی H.SVIM(%)	۲۱	۲۸



شکل ۲. شماتیک آزمایش ستون جدایی.

۳. طرح اختلاط نمونه‌های نانو بتن خودمتراکم مقاومت بالا

ضمن توصیه به بررسی‌های بیشتر با طرح اختلاط‌های مختلف بتن در این زمینه، در این تحقیق دو طرح اختلاط مختلف (SCC۱ و SCC۲) مورد بررسی قرار گرفته است. در هر دو طرح نسبت آب به سیمان، میزان فوق روان‌کننده، مصالح سنگدانه (درشت و ریز) ثابت نگهداشته شده است. طرح SCC۱ دارای پوزولان و از پودر سنگ به عنوان فیلر، طرح SCC۲ بدون پوزولان و از پودر سنگ به عنوان فیلر استفاده شده است. پوزولان‌ها و پودر سنگ، رد شده از الک شماره‌ی ۵۰ هستند. بدین طریق با ثابت نگه‌داشتن مواد سیمانی، تأثیر پوزولان در رفتار فازهای خمیری و سخت‌شده‌ی نانو بتن خودمتراکم مقاومت بالا بررسی شده است. اطلاعات تکمیلی در مورد طرح اختلاط بتن موجود است.^{[۱۱]، [۱۰]} این تذکر لازم است که تحقیقاتی در این مورد در کشور مشاهده نشد. همچنین بررسی‌های نویسندگان این نوشتار نشان می‌دهد، علی‌رغم اینکه در زمینه‌ی بتن خودمتراکم حاوی نانو با مقاومت معمولی، تحقیقات اندکی گزارش شده است،^{[۹]، [۸]} اما در مورد چنین نوع بتنی (و مقاومت بالا) و همچنین، آزمایش سه محوره برای این رده‌ی مقاومتی، مورد مشابهی مشاهده نشده است.

۴. شرح آزمایش‌های نانو بتن خودمتراکم مقاومت بالا

۱.۴. فاز خمیری

از آنجایی که تاکنون آیین‌نامه‌ی در مورد نانو بتن خودمتراکم تدوین نشده است، در فاز خمیری آزمایش‌های مربوط به بتن خودمتراکم از جمله آزمایش‌های جریان اسلامپ، T_{۵۰}، حلقه‌ی J، جعبه‌ی L و زمان تخلیه‌ی قیف V که رایج‌ترین آزمایش‌های فاز خمیری برای بتن خودمتراکم هستند، به‌علاوه‌ی آزمایش ستون جدایی^۴ انجام شد (جدول ۲). همچنین به منظور مقایسه، محدوده‌های مجاز بتن‌های خودمتراکم در فاز خمیری بر اساس تحقیقات انجام شده^{[۱۲]، [۱۳]} برای هر آزمایش در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌گونه که مشخص است، مقادیر به دست‌آمده در جدول ۲ به مقادیر پیشنهادی نزدیک است و بنابراین، نانو بتن خودمتراکم مقاومت بالا طراحی شده و در فاز خمیری معیارهای جهانی را کسب کرده است.

۱.۱.۴. آزمایش تعیین قطر جریان اسلامپ

این آزمایش برای تعیین قابلیت پرکنندگی نمونه‌های بتنی انجام شده است. نحوه‌ی انجام این آزمایش مطابق دستورالعمل PCI^[۱۳] صورت گرفته است.

۲.۱.۴. زمان T_{۵۰}

در آزمایش تعیین قطر جریان اسلامپ، مدت زمان رسیدن مخلوط بتن به قطر ۵۰ سانتی‌متر (T_{۵۰}) محاسبه می‌شود. این آزمایش نیز مطابق دستورالعمل PCI^[۱۳] صورت گرفته است.

۳.۱.۴. آزمایش جعبه‌ی L شکل

این آزمایش برای تعیین قابلیت عبور بتن خودمتراکم انجام شده است. نحوه‌ی انجام این آزمایش نیز مطابق دستورالعمل PCI^[۱۳] صورت گرفته و نتایج در جدول ۲ آورده شده است.

۴.۱.۴. آزمایش قیف V شکل

به منظور تعیین قابلیت پرکنندگی و همچنین عبور بتن از مقاطع تنگ این آزمایش انجام شده است. نحوه‌ی انجام آن نیز مطابق دستورالعمل PCI^[۱۳] صورت گرفته و نتایج دو طرح در جدول ۲ نشان داده شده است.

۵.۱.۴. آزمایش ستون جدایی

هدف از انجام این آزمایش محاسبه‌ی میزان عمودی، جداشدگی دانه‌ها و پایداری بتن خودمتراکم است. دستگاه اصلی این آزمایش عبارت است از یک لوله‌ی ۴۰ PVC با قطر ۲۰٫۳۲ سانتی‌متر (۸ اینچ) و ارتفاع ۶۶ سانتی‌متر (۲۶ اینچ) که به ۴ قسمت مساوی ۱۶٫۵ سانتی‌متری تقسیم شده است. از آنجایی که بیشترین نشست و جدایی دانه‌ها در بالای دستگاه اتفاق می‌افتد، قسمت بالایی به ۲ قسمت ۵ و ۱۱٫۵ سانتی‌متری تقسیم می‌شود و قسمت کوچک‌تر در بالای دستگاه قرار می‌گیرد (شکل ۲).^[۱۴]

بتن باید به‌صورت آرام و یکنواخت و فقط در یک ریزش درون لوله ریخته شود و

جدول ۳. محدوده‌ی قابل قبول آزمایش‌های فاز خمیری بتن خودتراکم. [۱۳]

آزمایش	محدوده			پارامتر اندازه‌گیری شده (P)
	ضعیف	متوسط	خوب	
قطر جریان اسلامپ	$P \geq 78$ & $P \leq 61$	$71 < P \leq 78$ & $53 \leq P < 61$	$61 \leq P \leq 71$	Flow (cm)
	$P \geq 8$	$6 < P \leq 7$	$P \leq 6$	T_{50} (sec)
جعبه‌ی L	$P < 0,54$	$0,54 \leq P < 0,85$	$0,85 \leq P \leq 1,0$	h_2/h_1
	$P > 26$	$14 < P \leq 26$	$P \leq 14$	H- SVI _M (%)
ستون جدایی	$P > 26$	$14 < P \leq 26$	$P \leq 14$	V- SVI _M (%)
	$P < 0,54$	$0,54 \leq P < 0,85$	$0,85 \leq P \leq 1,0$	h_2/h_1

که در این رابطه‌ها، SVI_i و SMI_i شاخص‌های بی‌بعدی هستند که به ترتیب میزان جدایی حجمی و جرمی را بر هر قسمت دستگاه آزمایش نشان می‌دهند. در واقع SMI_i (SVI_i) وزن سنگدانه‌ها در واحد جرم (حجم) بتن در هر قسمت دستگاه آزمایش به میانگین جرم سنگدانه‌ها در واحد جرم (حجم) بتن در تمام بتن داخل دستگاه آزمایش است. در صورتی‌که جدایی رخ ندهد، این اعداد برای تمامی قسمت‌ها یکسان خواهد بود.

SMI_i و SVI_i برای هر قسمت ستون جدایی، می‌توانند مقدار متفاوتی را داشته باشند. به منظور تعیین شاخصی برای نشان‌دادن میزان مقاومت در برابر جدایی هر طرح، از رابطه‌های ۵ و ۶ استفاده می‌شود:

$$V-SMI_m = \sum_{i=1}^{i=5} |SMI_i - 1| \times 100 \quad (5)$$

$$V-SVI_m = \sum_{i=1}^{i=5} |SVI_i - 1| \times 100 \quad (6)$$

در صورت عدم وجود جدایی، میزان SVI_m و SMI_m برابر صفر می‌شود. با کمک رابطه‌های ۵ و ۶، مقادیر برای دو طرح SCC۱ و SCC۲ انجام و نتایج در جدول ۲ آمده است.

۶.۱.۴. آزمایش اندازه‌گیری جدایی افقی به کمک جعبه‌ی L

آزمایش جعبه‌ی L به منظور تعیین میزان روانی، جریان‌پذیری و بررسی بلوکه‌شدن سنگدانه‌ها به‌وسیله‌ی میلگردها انجام می‌شود. اما به منظور به‌دست‌آوردن اطلاعات بیشتر در خصوص جدایی ذرات، براساس پیشنهاد محققان [۱۳] قسمت افقی جعبه‌ی L به ۳ بخش مساوی ۲۲ سانتی‌متری (از درجه‌ی جداکننده) تقسیم می‌شود (شکل ۳). بعد از اینکه بتن از قسمت عمودی به قسمت افقی جریان پیدا کرد و ارتفاع بتن در ابتدا و انتهای قسمت افقی اندازه‌گیری شد (آزمایش جعبه‌ی L)،

هنگامی‌که سطح بتن به بالای قالب رسید، با یک صفحه‌ی نازک فلزی با حرکت در جهت عمودی و افقی صاف می‌شود. بعد از ۱۰ تا ۱۵ دقیقه، قسمت‌های مختلف دستگاه به کمک صفحه‌ی نازک فلزی از هم جدا و وزن هرکدام به‌صورت جداگانه اندازه‌گیری می‌شود. بعد از توزین، بتن هر قسمت ستون روی الک شماره‌ی ۴ با آب شسته می‌شود تا سنگدانه‌های با قطر کمتر از ۴۷۵mm جدا شوند. سپس وزن سنگدانه‌های باقی‌مانده روی الک برای هر قسمت ستون به‌صورت خشک‌شده در خشک‌کن (به مدت ۲۴ ساعت) محاسبه می‌شود.

مقاومت در برابر جداشدگی به کمک دو مفهوم شاخص جرمی پایداری قائم (V-SMI_i) و شاخص حجمی پایداری قائم (V-SVI_i)، بیان می‌شوند که عبارت‌اند از رابطه‌های ۱ و ۲:

$$V-SMI_i = \frac{\frac{MCA_i}{MC_i}}{\frac{MCA_1}{MC_1}} \quad (1)$$

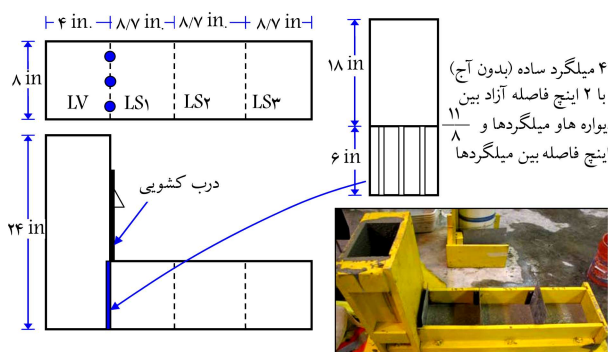
$$V-SVI_i = \frac{\frac{h_i}{MCA_i}}{\frac{h_1}{MCA_1}} \quad (2)$$

که در آنها، MCA_i جرم سنگدانه (خشک‌شده در خشک‌کن) قسمت اُم، MC_i جرم بتن تازه در ستون اُم، و h_i ارتفاع قسمت اُم است. در واقع شاخص V-SMI_i (و همچنین V-SVI_i) نمایان‌گر نسبت جرم سنگدانه در واحد جرم (حجم) بتن در هر قسمت ستون جدایی به جرم سنگدانه در واحد جرم (حجم) بتن در قسمت پایه‌ی (S۱) دستگاه آزمایش است. این تعریف به‌عنوان شاخص جدایی (نشست)، امکان مقایسه بین طرح اختلاط‌های متفاوت را ممکن می‌سازد. اگر جدایی اتفاق نیافتد، به ترتیب V-SMI_i و V-SVI_i برای تمامی قسمت‌ها، واحد خواهد شد و هر مقدار بزرگ‌تر (کوچک‌تر) از واحد نشان‌دهنده‌ی این است که آن قسمت، مقدار بیشتری (کمتری) سنگدانه نسبت به قسمت پایه دارد.

به منظور درک بهتر از میزان پراکنندگی سنگدانه‌ها در هر قسمت ستون، در هر دو روش جرمی و حجمی، با هم‌پایه کردن عدد هر قسمت با رابطه‌های ۳ و ۴ قابل بررسی است:

$$SMI_i = \frac{\frac{MCA_i}{MC_i}}{\sum_{i=1}^{i=5} \frac{MCA_i}{MC_i}} \quad (3)$$

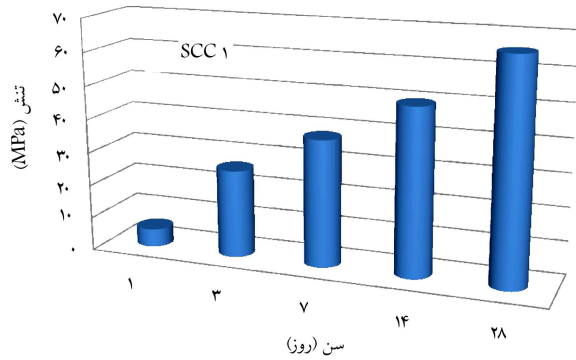
$$SVI_i = \frac{\frac{h_i}{MCA_i}}{\sum_{i=1}^{i=5} \frac{h_i}{MCA_i}} \quad (4)$$



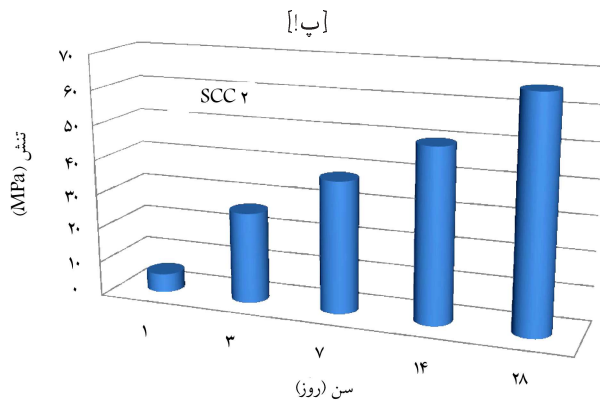
شکل ۳. تصویر و شماتیک جعبه‌ی L شکل.

آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی در سنین مختلف در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. این نتایج میانگین ۳ آزمایش برای هر سن است که در صورت اختلاف زیاد بین نتیجه‌ی یک آزمایش با میانگین نتایج (انحراف از معیار بالا)، این تعداد به ۵ آزمایش برای هر سن افزایش می‌یافت. همچنین در سنین مختلف، میزان جذب آب نمونه‌های مکعبی اندازه‌گیری شده (بر حسب گرم) و در شکل ۶ نشان داده شده است.

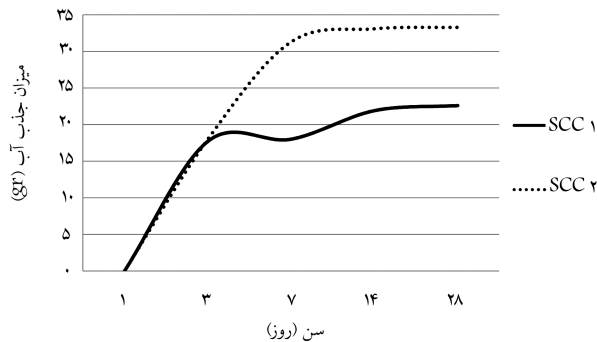
به منظور مقایسه‌ی روند کسب مقاومت طرح اختلاط‌ها شکل ۷ تهیه شده است. با توجه به این شکل، مشخص می‌شود که نمونه‌ی SCC۱ در سن ۲۸ روزه بیشترین مقاومت فشاری و کمترین مقدار جذب آب را دارد، در صورتی که در سنین کمتر از ۲۸ روز، با وجود کمترین مقدار جذب آب، کمترین مقدار مقاومت را نمونه‌ی پوزولانی (SCC۲) (به دلیل پوزولان جایگزین شده با سیمان) کسب کرده است.



شکل ۴. نمودار کسب مقاومت فشاری تک محوره SCC۱.



شکل ۵. نمودار کسب مقاومت فشاری تک محوره SCC۲.



شکل ۶. میزان جذب آب نمونه‌های مکعبی.

دستگاه به مدت ۵ تا ۱۰ دقیقه رها می‌شود؛ سپس به کمک ورق‌های نازک فلزی، بتن قسمت‌های مختلف از هم جدا می‌شوند؛ بتن هر قسمت درون ظرف جداگانه ریخته و وزن می‌شود. سپس بتن هر قسمت روی الک شماره‌ی ۴ شسته و وزن سنگدانه‌ها پس از خشک شدن درون خشک کن برای هر قسمت اندازه‌گیری می‌شود. مقاومت در برابر جداشدگی افقی به کمک دو شاخص پایداری جرمی (H-SMI_i) و حجمی (H-SVI_i) بیان می‌شود که عبارتند از:

$$H-SMI_i = \frac{MCA_i}{MC_i} \frac{MCA_{LV}}{MCLV} \quad (7)$$

$$H-SMI_i = \frac{MCA_i}{MC_i} \frac{MCA_{LV}}{MCLV} \quad (8)$$

که در این روابط، MCA_i ، MCA_{LV} جرم سنگدانه‌ی خشک شده در خشک کن برای قسمت i ام (LV)؛ MC_i ، MC_{LV} جرم بتن تازه‌ی قسمت i ام (LV)؛ و V (VLV) حجم بتن در قسمت i ام جعبه‌ی L است.

برای محاسبه‌ی شاخص مقاومت در برابر جدایی در راستای افقی، مشابه آنچه برای ستون جدایی بیان شد، از رابطه‌های ۹ الی ۱۲ می‌توان استفاده کرد:

$$H-SMI_i = \frac{MCA_i}{MC_i} = \frac{MCA_i}{\sum_{i=1}^f MCA_i} \frac{\sum_{i=1}^f MC_i}{MC_i} \quad (9)$$

$$H-SMI_i = \frac{MCA_i}{V_i} = \frac{MCA_i}{\sum_{i=1}^f MCA_i} \frac{\sum_{i=1}^f V_i}{V_i} \quad (10)$$

$$H-SMI_m = \sum_{i=1}^f |H-SMI_i - 1| \times 100 \quad (11)$$

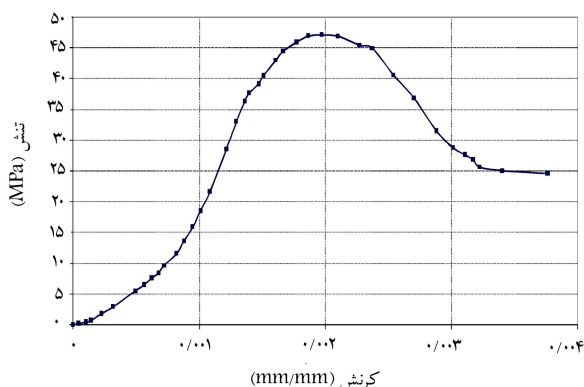
$$H-SVI_m = \sum_{i=1}^f |H-SVI_i - 1| \times 100 \quad (12)$$

۲.۴. فاز سخت‌شدگی بتن

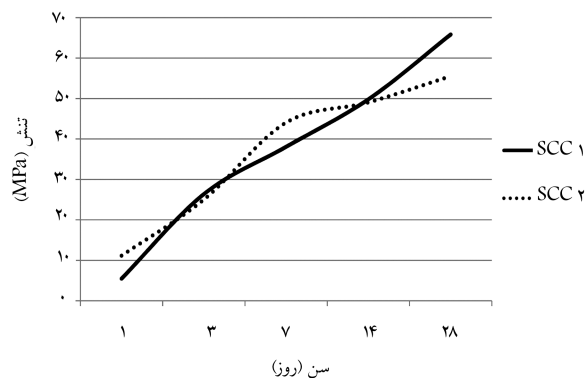
به منظور تعیین مقاومت فشاری تک‌محوره مطابق آئین‌نامه‌ی انگلستان از نمونه‌های مکعبی استفاده شد. نمونه‌های بتنی پس از ۱ روز از قالب خارج و پس از توزین، به صورت غرقاب عمل‌آوری شدند. همچنین سه نمونه‌ی استوانه‌یی به قطر ۶٫۵ و ارتفاع ۱۴٫۵ سانتی‌متر به منظور انجام آزمایش سه‌محوره‌ی بتن‌ریزی شده و همانند نمونه‌های مکعبی پس از ۱ روز از قالب خارج شدند و پس از توزین، به صورت غرقاب عمل‌آوری و در سن ۲۸ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند.

۱.۲.۴. آزمایش فشاری تک‌محوره

نمونه‌های مکعب فشاری در سنین مختلف ۱، ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. دو سطح از نمونه‌ی بتنی، که در تماس با سطوح جانبی قالب نمونه‌گیری صاف شده‌اند، در مرکز ماشین آزمایش قرار داده شدند. یکی از صفحات دستگاه بر روی تنظیم‌کننده‌ی خودکار کروی استوار است و خود را با سطح نمونه تطبیق می‌دهد تا شرایط آزمایش تک‌محوره ارضا شود (دستگاه آزمایش به بارسنج (load cell)، حسگر (به منظور قرائت کرنش با هر افزایش بار) و پردازش‌گر داده‌ها مجهز است و بنابراین امکان رسم نمودار تنش - کرنش نمونه‌های مقاومت فشاری فراهم است). نتایج



شکل ۸. نمودار تنش-کرنش SCC ۱ در سن ۱۴ روز.



شکل ۷. مقایسه‌ی روند کسب مقاومت طرح اختلاط‌های گوناگون.



شکل ۹. آزمایش سه‌محوره‌ی نانو بتن خودمترکم مقاومت بالا.

تک‌محوره‌ی نانو بتن خودمترکم در اختیار است. [۶] تصویری از آزمایش سه‌محوره‌ی انجام‌شده برای بتن خودمترکم حاوی نانو مقاومت بالا در شکل ۹ نشان داده شده است.

برای تحلیل نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش سه‌محوره، نظریه‌های متفاوتی وجود دارد، که نظریه موهر - کلمب از مشهورترین آنهاست. لیکن از آنجایی که در این نظریه فرض بر این است که مصالح هیچ‌گونه کششی را تحمل نمی‌کنند، برای بتن کاربرد چندانی ندارد. اما از آنجا که آسان‌ترین روش برای نشان‌دادن شکست تحت تنش‌های چند محوره است و معمولاً تحمل کششی بتن نسبت به فشار آن اندک است، مورد استفاده قرار می‌گیرد. [۵] نظریه‌ی شکستی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، معیار شکست هوک - براون است، که در این معیار مصالح قادر به تحمل کشش هستند. این معیار شکست، اساساً بر روش سعی و خطا استوار است و به‌صورت رابطه‌ی تجربی ۱۳ بیان می‌شود: [۱۶]

$$\sigma_1 = \sigma_c + \sigma_c \left[m \frac{\sigma_2}{\sigma_c} + s \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

که در آن، σ_1 تنش مؤثر اصلی بیشینه در لحظه‌ی شکست، σ_2 تنش مؤثر اصلی کمینه در لحظه‌ی شکست، σ_c مقاومت فشاری تک‌محوره، m پارامتر مربوط به خواص توده مصالح، S پارامتری بین 0° تا 1° ، مرتبط با میزان درز در مصالح که برای مصالح بدون درز از جمله سنگ بکر، برابر با ۱ است. اغلب برای بتن، مقدار S بین 0.79° تا 1° منظور می‌شود. در این تحقیق مقدار S برابر با 0.795° در نظر گرفته شد.

با توجه به اینکه روی هر طرح اختلاط ۳ بار آزمایش سه‌محوره انجام شده و مقادیر S و σ_c مشخص هستند، با جایگذاری نتایج آزمایش سه‌محوره در رابطه‌ی ۱۳

تحقیقات انجام‌شده در مورد بتن‌های خودمترکم پوزولانی، [۸] و همچنین بتن‌های سنتی پوزولانی [۵] نشان دادند که وجود پوزولان جایگزین در بتن منجر به کاهش مقاومت در سنین اولیه و افزایش مقاومت در سنین بالاتر نسبت به نمونه‌های بتنی شاهد (فاقد پوزولان) می‌شود. چنین نتیجه‌ی برای نانو بتن خودمترکم (شکل ۷) نیز دارای کاربرد است. به عبارت دیگر، هر چند وجود پوزولان جایگزین، باعث کاهش روند کسب مقاومت بتن در سنین اولیه شده است، اما در سنین بالاتر، نه فقط این افت نسبی کاهش پیدا کرده است، بلکه باعث کسب مقاومت بیشتر نسبت به نمونه‌ی فاقد پوزولان شده است (برای طرح اختلاط SCC ۱، این مهم پس از ۱۴ روز اتفاق افتاده است (شکل ۷)).

۲.۲.۴. نمودار تنش-کرنش نانو بتن خودمترکم

به منظور طراحی سازه‌های بتن مسلح در مناطق با شدت زلزله‌ی کم و زیاد، آشنایی با نحوه‌ی عملکرد بتن (منظور شناخت نمودار تنش-کرنش بتن مصرفی است) اهمیت زیادی دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهند، بیشتر تحقیقات در مورد بتن خودمترکم فقط به مقاومت فشاری بتن پرداخته‌اند، در حالی که نمودار تنش-کرنش این نوع بتن ناشناخته مانده است. همچنین به کمک نمودار تنش-کرنش مصالح می‌توان از رفتار مصالح مصرفی در سازه‌ها در هر یک از شرایط بهره‌برداری و نهایی و همچنین جهت تعیین ضریب شکل‌پذیری آن که دارای اهمیت زیادی در مناطق زلزله‌خیز است، استفاده کرد. در این تحقیق به کمک نصب حس‌گرهای الکتریکی و مکانیکی بر سطح نمونه‌های مکعبی، نمودار تنش-کرنش نمونه‌ها هم‌زمان با تعیین مقاومت فشاری آنها در آزمایش تک‌محوره‌ی تعیین شده است و نمونه‌ی از آنها در شکل ۸ نشان داده شده است (شکل گویای ضریب شکل‌پذیری بالا برای این نوع بتن است). همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، شاخه‌ی صعودی نمودار تنش-کرنش دارای تفرع رو به بالاست. در حالی که در تئوری، این قسمت خطی در نظر گرفته می‌شود. پژوهشگران دلایل متعددی را در این مورد از جمله بسته‌شدن ترک‌های از قبل موجود در بتن، ناشی از جمع‌شدگی خمیر سیمان حول سنگدانه‌ها را یادآوری می‌کنند. [۱۵] همچنین از آنجایی که نواحی بالایی بتن به دلیل آب‌انداختگی و جداسازی ضعیف‌تر از توده‌ی بتن است، کرنش‌ها نیز بزرگ‌تر از مقدار واقعی خواهد بود.

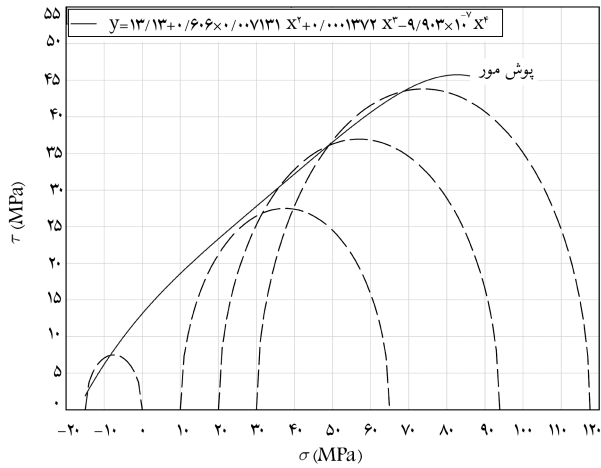
۳.۲.۴. آزمایش سه‌محوره

از آنجایی که در سازه‌های بتنی، عضو بتنی ممکن است تحت تنش‌های توأم فشار، کشش، و برش قرار گیرد، بنابراین تحلیل شکست تنش‌های چند محوره اغلب به‌عنوان یک پدیده و نه از نقطه‌نظر مصالح انجام می‌شود. [۵] بررسی‌ها نشان می‌دهد، با وجود اهمیت آزمایش سه‌محوره، چنین آزمایشی برای نانو بتن خودمترکم مقاومت بالا در اختیار نیست، هر چند چنین نتایجی برای آزمایش

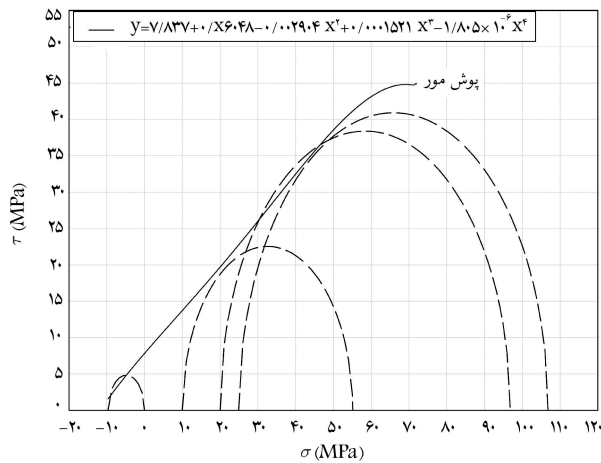
با مشخص شدن تنش نرمال و برشی و همچنین زاویه ی صفحه ی شکست، می‌توان دایره‌ی مور را برای آن رسم کرد و با تکرار مراتب فوق برای فشارهای جانبی متفاوت و رسم دایره‌ی مور، می‌توان پوش گسیختگی مور را برای نمونه در دستگاه $\sigma - \tau$ رسم کرد. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲، دایره‌ی مور برای دو طرح اختلاط رسم و سپس به کمک تنش‌های صفحه‌ی شکست، منحنی پوش با یک منحنی درجه ۴ تخمین زده شده است. با کمک رابطه‌ی نشان داده‌شده در شکل‌های ۱۱ و ۱۲، می‌توان میزان تنش برشی را بر حسب میزان تنش نرمال تخمین زد، که این تخمین می‌تواند دیدگاه مناسبی از رفتار بتن در حالت‌های مختلف بارگذاری را به ما ارائه کند.

جدول ۴. نتایج آزمایش‌های سه محوره.

طرح اختلاط	SCC۱	SCC۲
σ_t	-۱۵	-۹٫۶۶
σ_1	۱۱۷٫۶	۱۱۶٫۸
σ_2	۳۰	۳۰
2β	۶۶٫۵	۶۲٫۸
σ	۴۳٫۳۷	۴۳٫۷۴
τ	۴۱٫۲۷	۳۶٫۲۵



شکل ۱۱. رسم پوش تنش مور نمونه‌ی SCC۱.



شکل ۱۲. رسم پوش تنش مور نمونه‌ی SCC۲.

و به کمک درون‌یابی خطی (رگرسیون) مقدار m برای هر یک از طرح اختلاط‌ها به دست آمده است. بنابراین، با مشخص شدن m در رابطه‌ی ۱۳، امکان تخمین میزان تنش فشاری (σ_1) در مقادیر مختلف فشار جانبی (σ_2) مقدور است. حال می‌توان منحنی شکست را در صفحه‌ی $\sigma_1 - \sigma_2$ رسم کرد. برای حالتی که $\sigma_1 = 0$ است، مقدار σ_2 برابر با مقاومت کششی تک‌محوره (σ_t)، به عبارت دیگر در رابطه‌ی ۱۳ با فرض $\sigma_1 = 0$ و با حل رابطه‌ی ۱۳ بر حسب σ_2 ، مقاومت کششی تک‌محوره از رابطه‌ی ۱۴ به دست می‌آید:

$$\sigma_t = \frac{1}{\lambda} \sigma_c (m - \sqrt{m^2 + 4s}) \quad (14)$$

در شکل ۱۰، رابطه‌ی ۱۳ یا به عبارت دیگر پوش گسیختگی در صفحه‌ی تنش اصلی بیشینه و تنش اصلی کمینه، برای هر دو طرح اختلاط رسم و مقدار تنش کششی (رابطه‌ی ۱۴) نیز مشخص شده است، که طرح اختلاط SCC۱ مقدار تنش کششی بیشتری نسبت به طرح اختلاط SCC۲ را کسب کرده است. حال به کمک شکل ۱۰، می‌توان تخمین مناسبی از شکست نمونه‌ی تحت بار قائم در شرایط گوناگون فشار جانبی به دست آورد.

اگرچه شکل ۱۰، دیدگاه مناسبی از رفتار بتن خودمتراکم حاوی نانو تحت اثر فشار جانبی در اختیارمان می‌گذارد؛ اما در مهندسی عمران همواره به دنبال مقدار تنش‌هایی هستیم که در آن تنش‌ها، نمونه دچار گسیختگی می‌شود. به کمک رابطه‌های ۱۵ و ۱۶، می‌توان مقادیر تنش‌های برشی و عمودی که طی آن پدیده‌ی شکست بتن رخ می‌دهد را با در دست داشتن مقدار تنش‌های اصلی به دست آورد:

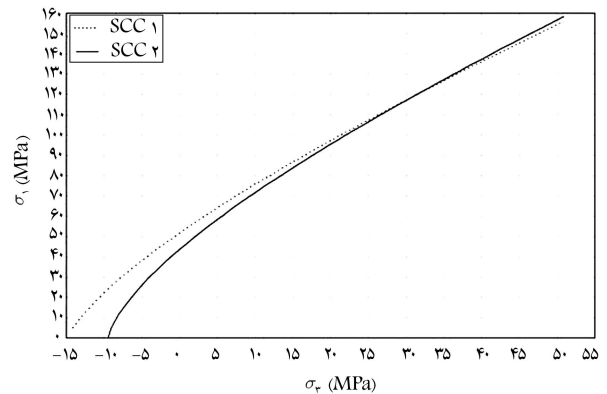
$$\sigma = \sigma_2 + \frac{(\tau_m)^2}{\tau_m + \frac{m\sigma_c}{\lambda}} \quad (15)$$

$$\tau = (\sigma - \sigma_c) \sqrt{1 + \frac{m\sigma_c}{\lambda \tau_m}} \quad (16)$$

در حالی که در رابطه‌های ۱۵ و ۱۶، $\tau_m = \frac{1}{\lambda}(\sigma_1 - \sigma_2)$ است؛ زاویه‌ی β (زاویه‌ی بین سطح شکست و جهت تنش اصلی بزرگ‌تر یعنی σ_1) نیز به کمک رابطه‌ی ۱۷ تعیین می‌شود:

$$\sin 2\beta = \frac{\tau}{\tau_m} \quad (17)$$

با جای‌گذاری σ_1 و σ_2 در شکل ۱۰ در رابطه‌های ۱۵ الی ۱۷، مقادیر تنش در صفحه‌ی شکست نمونه و همچنین زاویه‌ی گسیختگی نمونه تعیین می‌شود. مقادیر ارائه‌شده در جدول ۴، میزان تنش‌های به دست آمده برای نانو بتن خودمتراکم، در فشار جانبی ۳۰ مگاپاسکال را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. رفتار نمونه‌های نانو بتن خودمتراکم مقاومت بالا تحت آزمایش سه‌محوره.

۵. نتیجه گیری

۱. نتایج آزمایش های فاز خمیری انجام شده برای دو طرح اختلاط نانو بتن خودتراکم مقاومت بالا، SCC۱ و SCC۲ (شامل قطر جریان اسلامپ، زمان T_{۵۰}، جعبه ی L، حلقه ی J و قیف V شکل) حاکی از عملکرد رضایت بخش چنین بتنی در فاز خمیری است. از این رو می توان طرح ها را در زمره ی بتن های خودتراکم تلقی کرد. همچنین نتایج آزمایش فاز خمیری ستون جدایی دو طرح اختلاط، شرایط آئین نامه یی را ارضاء کرده است، هر چند طرح اختلاط SCC۱ با ۱۵٪ پوزولان جایگزین، دارای عملکرد بهتری در برابر جدایی سنگدانه هاست.
۲. یکی از پارامترهای مهم بتن خودتراکم در فاز خمیری، پایداری در برابر جداشدگی (میزان نشست سنگدانه های بتن) است. در صورتی میزان نشست سنگدانه ها در آزمایش ستون جدایی بیش از مقدار مجاز آئین نامه شود، چنین طرح اختلاطی منجر به تولید بتن همگن نمی شود. علی رغم اینکه نتایج به دست آمده ی فاز خمیری بند ۱، برای هر دو طرح اختلاط حاکی از عملکرد رضایت بخش فازهای خمیری بتن است، لیکن طرح اختلاط SCC۱ با ۱۵٪ پوزولان، منجر به تولید خمیر سیمان با لزوجت بیشتر نسبت به نمونه ی فاقد پوزولان SCC۲ شده است.
۳. نتایج آزمایش ستون جدایی برای دو طرح اختلاط SCC۱ و SCC۲ نشان می دهد که میزان نشست سنگدانه ها با میزان روانی نانو بتن خودتراکم با مقاومت بالا نسبت مستقیم دارد. به عبارت دیگر، در طرح اختلاط SCC۲ نسبت به SCC۱ با افزایش روانی بتن (کاهش زمان T_{۵۰} و V-funnel، افزایش قطر جریان اسلامپ و نسبت h_۲/h_۱ در آزمایش جعبه ی L شکل)، در صد نشست
۴. نمونه ی SCC۱ در سن ۲۸ روزه بیشترین مقاومت فشاری و کمترین مقدار جذب آب را کسب کرده است، در صورتی که در سنین پایین تر علی رغم مقدار جذب آب کمتر، کمترین مقدار مقاومت را در بین دو طرح (به دلیل پوزولان جایگزین) کسب کرده است. به عبارت دیگر هرچند وجود پوزولان، باعث کاهش روند کسب مقاومت نانو بتن خودتراکم در سنین اولیه شده است، اما در سنین بالاتر نه فقط این افت نسبی کاهش پیدا کرده، بلکه دارای مقاومت بیشتری نسبت به نمونه ی فاقد پوزولان (SCC۲) است.
۵. با توجه به نمودارهای دواپر مور می توان نتیجه گرفت در نانو بتن های خودتراکم، میزان تنش کششی σ_t ، با میزان تنش اصلی σ_1 متناسب است. به عبارت دیگر، در یک مقدار فشار محصورشدگی ثابت، با افزایش میزان تنش اصلی، قدرمطلق تنش کششی بتن افزایش می یابد (جدول ۴).
۶. یکی از عوامل مؤثر در طراحی شکل پذیری سازه ها، میزان کرنش نهایی بتن، ϵ_{cu} ، به ویژه در مناطق زلزله خیز است. علی رغم مقاومت بالای بتن (معمولاً چنین بتن هایی تردشکن اند)، نمودار تنش - کرنش، دارای ضریب شکل پذیری مطلوبی است.
۷. با وجود اهمیت محصورشدگی (آزمایش سه محوره) و در اختیار نبودن چنین نتایجی برای نانو بتن خودتراکم مقاومت بالا، نمودارهای مربوطه به دست آمد.

پانویس ها

1. Nano high strength self consolidating concrete
2. self-consolidating concrete
3. poly carboxylic-ether
4. column segregation

منابع (References)

1. Okamura, H. "Self-compacting high-performance concrete", *Concrete International*, **19**(7), pp. 50-54 (July 1997).
2. Maghsoudi, A.A., Hoornahad, H., "Self compacting concrete by use of kerman's material", 2nd International Concret and Development Conference, (In Persain) (2003).
3. Pasha Zanousi, A., "Microscopic construction and mechanical properties of high performance concretes with and without pozzolan", M.Sc. Dissertation, Civil Eng. Department, Shahid Bahonar University of Kerman (In Persain)(2009).

4. Raeis Ghasemi, Amir Mazeiar, Parhezkar, T, "NanoTechnology and concrete future", Center of Research for Construction and Housing (In Persain) (2012).
5. Matha, P., Monteh Earo, P, "Microstructure, properties and concrete particles advanced concrete technology", Translated by Ramezani pour, A. A., Ghodousi, P., Ganjian, E., Ashrafi, H. R., Amir-Kabeer University Publisher, pp. 85-86 (2004). (In Persain)
6. Maghsoudi, A.A. and Arabpour Dahooei, F. "Application of nanotechnology in self-compacting concrete design", *International Journal of Engineering Transactions B: Applications*, **22**(3), pp. 229-224 (Oct. 2009).
7. Corr, D. and Shah, S.P. "Concrete material science at the nanoscale", *Proceeding of the International Conference (Application of Nanotechnology in Concrete Design)*, University of Dundee, Scotland, U.K., Ed. Dhir, R.K., Newlands, M.D. and Csettenyi, L.J., London: Tomas Telford, pp. 129-136 (2005).
8. Maghsoudi, A.A. and Hoornahad, H. "Investigation of engineering properties of SCC with collodial sillica", *Proceeding of the 3rd International Conference*, University of British Columbia, Vancouver, Canada (2005).
9. Porro, A., Dolado, J.S., Campillo, I., Erkizia, E., de Migule, Y., de Ibarra, Y. and Saez, "Effect of nano-silica

- additions on cement paste”, *Proceeding of International Conference*, University of Dundee, Scotland, U.K (7th July 2005).
10. Maghsoudi, A.A., Maghsoudi, M. and Noori, M. “Effect of nano particles on SCC”, *Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, ANCONA, Italy, pp. 41-54 (28-30 June 2010).
 11. Nouri-Dolatabadi, Meisam, “Design and construction of nano high performance self compacting concretes (Confined and Unconfined) semi weight in plastic phase and hardened phase”, M.Sc. Dissertaion, Civil Eng. Departement, Shahid Bahonar University of Kerman (In Persain) (2011).
 12. *Self-Compacting Concrete (SCC) for Prestressed Bridge Girder*, Published by: Minnesota Department of Transportation Research Services Section 395 John Ireland Boulevard, Mail Stop 330 St. Paul, MN 55118 (2009).
 13. Interim Guidelines for the Use of Self-Consolidating Concrete in Precast/ Prestressed Concrete Institute Member Plants, TR-6-03 Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, IL (April 2003).
 14. Brameshuber, W. and Uebaches, S. “The application of self-compacting concrete in Germany under special consideration of rheological aspects”, *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, pp. 211-216 (2002).
 15. Neville, A.N., *Properties of Concrete*, 4th edition, Longman (1995).
 16. Madeni, H., “Tunnel consturction”, Centre of Publisher of Amir-Kabeer University, 1st ad., fifth publishing, 3rd. Vol., pp. 40-43 (In Persain) (1999).