



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده عمران و معماری

موضوع:

بررسی رفتار برشی و شکل پذیری تیرهای بتن آرمه ساخته شده
از بتن SCC با مقاومت بالا و حاوی الیاف پلی پروپیلن

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد
رشته مهندسی عمران - گرایش سازه

اساتید راهنما:

دکتر علی کیهانی

دکتر مرتضی حسینعلی بیگی

استاد مشاور:

مهندس پیام شفیق

نگارش:

مهدی زرین مهر

تابستان ۱۳۸۷

تقدیم به دو موهبت الهی که پروردگار
سخاوتمندانه به من هدیه داد:
پدرم و مادرم

چکیده

بتن خودمتراکم (Self-Compacting Concrete) یک فن‌آوری نوپا در عرصه ساخت و ساز دنیاست. این نوع بتن که کارایی بسیار بالایی دارد می‌تواند تحت اثر وزن خود و بدون جدا شدن دانه‌ها در میان انبوه اجزای سازه‌ای جریان یابد.

از طرفی استفاده از بتن مقاومت بالا در صنعت ساختمان در سالهای اخیر پیوسته رو به افزایش است. این امر میتواند به این دلیل باشد که طرح مقاطع بتونی با استفاده از بتن مقاومت بالا، مقاطع کوچکتر را نتیجه می‌دهد و وزن مرده کاهش یافته، ساختمانها را بسوی دهانه های بزرگتر و ارتفاع بلندتر سوق می‌دهد. کاهش جرم همچنین برای طرح سازه‌های مقاوم در برابر زلزله از لحاظ اقتصادی مهم است. این چنین فوایدی اغلب به مراتب مهمتر از هزینه‌های اضافی تولید بتن مقاومت بالا می‌باشد.

بتن مقاومت بالا عموماً یک ماده شکننده است و هنگامیکه تنش بتن به نقطه حداکثر رابطه تنش-کرنش بتن برسد، به صورت ناگهانی خواهد شکست. مشخصه شکنندگی بتن در حالت عمومی و بخصوص در مورد بتن مقاومت بالا می‌تواند بطور صحیحی توسط دورگیری کافی و با افزودن الیاف اصلاح گردد.

استفاده از الیاف، هرچند که بر خواص خودمتراکم بودن این نوع بتن تاثیر بسزایی دارد لیکن در صورتیکه بمیزان بهینه و همراه میلگردهای برشی باشد، موجب کنترل بهتر ترک خوردگی، خیز، بازتوزیع یکنواخت‌تر تنشها، همچنین بهبود شکلپذیری (نتیجتاً جلوگیری از تخریب ناگهانی) و تنشهای برشی بیشتر، در مرحله ترک خوردگی اولیه و نیز افزایش مقاومت گسیختگی میشود.

با وجود مشخص شدن نقش مفید الیاف، فقدان روابط و ضوابط لازم و کافی برای طراحی اجزای سازه‌ای، موجب متداول نشدن استفاده از الیاف در بتن می‌باشد. به منظور تهیه ضوابط و شرایط لازم و کافی آیین‌نامه‌ای همچنان نیاز به تحقیقات آزمایشگاهی و تئوریک فراوانی است.

در این تحقیق تاثیر مقاومت بتن و مقادیر مختلف الیاف پروپیلن بر شکل‌پذیری و مقاومت نهایی برشی و نیز نحوه ترک خوردگی تیرهای بتن آرمه ساخته شده از بتن خودمتراکم مقاومت بالا و حاوی الیاف پروپیلن بررسی می‌شود. همچنین اثر الیاف بر مقاومت فشاری و مقاومت کشش غیر مستقیم نمونه‌های استوانه‌ای مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

فهرست

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: کلیات بتن فودمتراکم
۲	۱.۱. مقدمه
۲	۲.۱. بتن فودمتراکم (SCC)
۲	۱.۲.۱. تعریف
۳	۲.۲.۱. تاریخچه
۳	۳.۲.۱. خصوصیات
	۴.۲.۱. نیازهای کلی در طرح افتلاط و ارزیابی عملکرد هر یک از اجزای تشکیل دهنده SCC [4]
۴	۱.۴.۲.۱. حجم بالای فمیر
۵	۲.۴.۲.۱. حجم بالای ذرات ریز کوچکتر از $80\mu\text{m}$
۵	۳.۴.۲.۱. کاربرد فاکستر آتشفشانی در سافت بتن SCC
۶	۴.۴.۲.۱. کاربرد مصالح ریز دانه سنگ آهک در SCC
۷	۵.۴.۲.۱. مصرف فوق روان کننده
۷	۶.۴.۲.۱. حجم کم سنگدانه‌های درشت
۷	۵.۲.۱. مراحل طرح افتلاط [5]
۱۰	۱.۵.۲.۱. تناسب مقدار درشت دانه و ریز دانه
۱۱	۲.۵.۲.۱. تناسب مقدار سیمان
۱۱	۳.۵.۲.۱. مقدار آب مورد نیاز سیمان
	۴.۵.۲.۱. تناسب مقدار فاکستر بادی (FA) و فاک فرد شده سرباره
۱۲	کوره ذوب آهن (GGBS)
۱۳	۵.۵.۲.۱. مقدار آب کلی مورد نیاز SCC
۱۳	۶.۵.۲.۱. تناسب مقدار SP
۱۴	۷.۵.۲.۱. تنظیم مقدار آب مخلوط
۱۴	۸.۵.۲.۱. انجام افتلاط و انجام آزمایشات فواص SCC

صفحه	عنوان
۱۴	تنظیمات سهم مواد افتلاط .۹,۵,۲,۱
۱۴	آزمایشهای بتن تازه SCC .۶,۲,۱
۱۵	آزمایش اسلامپ روانی [6] .۱,۶,۲,۱
۱۶	آزمایش L-Box .۲,۶,۲,۱
۱۷	آزمایش V-Funnel .۳,۶,۲,۱
۱۹	منافع تولید کنندگان SCC .۷,۲,۱
۱۹	محدودیت‌های SCC .۸,۲,۱
۲۱	الیاف .۳,۱
۲۱	مقدمه .۱,۳,۱
۲۲	تاریخچه الیاف .۲,۳,۱
۲۳	انواع الیاف .۲,۳,۱
۲۵	افزودن الیاف به بتن .۳,۳,۱
۲۶	مزایای بتن الیافی .۴,۳,۱
۲۷	رفتار گسیفتگی بتن الیافی .۵,۳,۱
۲۸	فصل دو: مروری بر مطالعات انجام شده
۲۹	مقدمه .۱,۲
۳۱	مروری بر خواص مکانیکی بتن های سفت شده SCC [11] .۲,۲
۳۲	مقاومت فشاری .۱,۲,۲
۳۵	ضریب تأثیر پسبندگی (سیمانی) .۲,۲,۲
۳۵	مقاومت فشاری و کششی .۳,۲,۲
۳۵	مدول الاستیسیته .۴,۲,۲
۳۷	نتایج .۵,۲,۲
	تأثیر نسبت آب به سیمان بر روی خواص تازگی .۳,۲
۳۸	و سفت شدگی بتن فودمتراکم [12] .۳,۲
۴۰	تمقیقات آزمایشگاهی .۱,۳,۲

صفحه	عنوان
۴۰	مواد .۱,۱,۳,۲
۴۱	نسبتهای افتلاط .۲,۱,۳,۲
۴۱	آزمایشات بتن تازه .۳,۱,۳,۲
۴۲	آزمایشات بتن سفت شده .۴,۱,۳,۲
۴۳	نتایج آزمایشات .۲,۳,۲
۴۳	نتایج آزمایشات بتن تازه .۱,۲,۳,۲
۴۷	نتایج آزمایش بتن سفت شده .۲,۲,۳,۲
۴۹	نتایج .۳,۲,۳,۲
	فواص بتن تقویت شده با الیاف بافته شده پلی پروپیلین .۴,۲
۵۱	تمت اثر ضربه [13]
۵۱	روش کار آزمایشگاه .۱,۴,۲
۵۱	ماشین ضربه .۱,۱,۴,۲
۵۲	نمونه‌ها .۲,۱,۴,۲
۵۴	آزمایش ضربه .۳,۱,۴,۲
۵۵	آنالیز نتایج .۴,۱,۴,۲
۵۵	بمط در مورد نتایج .۵,۱,۴,۲
۵۶	نتیجه گیری .۶,۱,۴,۲
۵۷	تأثیر الیاف پلی پروپیلین بر روی فواص بتن تازه و سفت شده [14] .۵,۲
۵۸	برنامه آزمایشگاهی .۱,۵,۲
۵۸	مواد .۱,۱,۵,۲
۵۸	آماده سازی نمونه‌های آزمایش .۲,۱,۵,۲
۶۱	نتایج آزمایش .۲,۵,۲
۶۱	تأثیر الیاف پلی پروپیلین بر روی کارایی .۱,۲,۵,۲
۶۱	تأثیر الیاف پلی پروپیلین بر روی افت ممی پلاستیک .۲,۲,۵,۲
۶۲	تأثیر الیاف پلی پروپیلین بر روی افت ممی بتن .۳,۲,۵,۲
۶۳	تأثیر الیاف پلی پروپیلین بر روی مقاومت .۴,۲,۵,۲

صفحه	عنوان
۶۴	نتیجه گیری .۴،۵،۲
	فواص مکانیکی بتنهای تقویت شده با الیاف پلی پروپیلین .۶،۲
۶۵	و تأثیر مواد پوزولانی [15]
۶۷	پیش زمینه .۱،۶،۲
۶۸	برنامه آزمایشگاهی .۲،۶،۲
۶۸	مواد .۱،۲،۶،۲
۶۹	نسبتهای اختلاط .۲،۲،۶،۲
۷۰	ساختار .۳،۲،۶،۲
۷۱	روش و نتایج آزمایش .۳،۶،۲
۷۱	نتایج مقاومت فشاری .۱،۳،۶،۲
۷۳	نتایج مقاومت و سفتی فمشی .۲،۳،۶،۲
۷۵	نتایج مقاومت ضربه .۳،۳،۶،۲
۷۶	نتیجه گیری .۴،۶،۲
	فواص مقاومتی بتنهای تقویت شده با الیاف .۷،۲
۷۹	نایلون و پلی پروپیلین [16]
۸۰	برنامه آزمایشگاهی .۱،۷،۲
۸۰	مواد .۱،۱،۷،۲
۸۱	نمونه اختلاط و شرایط نگهداری .۲،۱،۷،۲
۸۱	آزمایش سقوط وزنه .۳،۱،۷،۲
۸۲	آزمایش کاهش پتانسیل ترکیبهای جمع شدگی .۴،۱،۷،۲
۸۲	نتایج آزمایشات .۲،۷،۲
۸۲	مقاومت فشاری .۱،۲،۷،۲
۸۴	مقاومت کششی .۲،۲،۷،۲
۸۴	مدول گسیفتگی .۳،۲،۷،۲
۸۴	مقاومت ضربه .۴،۲،۷،۲
۸۵	کنترل ترکیبهای جمع شدگی .۵،۲،۷،۲

صفحه	عنوان
۸۵	نتیجه گیری .۳,۷,۲
	بررسی عملکرد سازه‌ای و تکنولوژیک بتن SCC .۸,۲
۸۷	ساخته شده از مصالح مملی واقع در اسکاتلند [17]
۸۷	انتخاب و خواص مواد خام اساسی .۱,۸,۲
۸۷	سنگدانه‌ها .۱,۱,۸,۲
۸۷	سیمان و فیلرها .۲,۱,۸,۲
۸۹	مواد افزودنی .۳,۱,۸,۲
۸۹	الیافها .۴,۱,۸,۲
۸۹	طرح اختلاط .۲,۸,۲
۹۰	خواص بتن تازه .۳,۸,۲
۹۰	نتایج آزمایشها روی بتن تازه مخلوطهای بتن SCC و مربع خواص بتن سفت شده، تعیین شده بوسیله BS1881، .۴,۸,۲
۹۲	بخش 116 و دیگر نمونه‌های تهیه شده
۹۲	مقاومت فشاری .۱,۴,۸,۲
۹۵	مقاومت کشش غیر مستقیم .۲,۴,۸,۲
۹۶	مقاومت پیوستگی .۳,۴,۸,۲
۹۹	مدول الاستیسیته .۴,۴,۸,۲
۱۰۰	عملکرد سازه‌ای اعضا در ابعاد حقیقی .۵,۸,۲
۱۰۰	طراحی تیرها .۱,۵,۸,۲
۱۰۱	روشهای بتن ریزی تیرها .۲,۵,۸,۲
۱۰۱	روش آزمایش تیرها .۳,۵,۸,۲
۱۰۳	آزمایش تیرها .۴,۵,۸,۲
۱۰۳	۱- نمونه‌های ترک و فاصله ترک خوردگی
۱۰۴	۲- لنگر ترک خوردگی
۱۰۵	۳- عرض ترک
۱۰۶	۴- رابطه بار - فیر

صفحه	عنوان
۱۰۷	نتیجه‌گیری .۸,۸,۲
۱۰۹	فصل سوم: روش اجرای آزمایش تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن
۱۱۰	مقدمه .۱,۳
۱۱۰	هدف از آزمایش و تشریح متغیرهای مورد استفاده .۲,۳
۱۱۱	طرح سازه‌ای تیرها .۳,۱,۲
۱۱۳	برنامه و روش کار آزمایشگاه .۳,۳
۱۱۳	مصالح مصرفی .۱,۳,۳
۱۱۳	شن و ماسه .۱,۱,۳,۳
۱۱۴	سیمان .۲,۱,۳,۳
۱۱۴	میکروسیلیس .۳,۱,۳,۳
۱۱۶	پودرسنگ .۴,۱,۳,۳
۱۱۶	فوق روان کننده .۵,۱,۳,۳
۱۱۸	الیاف پلیمری (پلی پروپیلن) .۶,۱,۳,۳
۱۲۰	طرح اختلاط بتن خودمتراکم مقاومت بالا حاوی الیاف .۲,۳,۳
۱۲۲	نمونه مخلوط کردن .۳,۳,۳
۱۲۳	آزمایشات بتن تازه .۴,۳,۳
۱۲۶	آزمایشات بتن سفت شده .۵,۳,۳
۱۲۶	آزمایش مقاومت فشاری .۱,۵,۳,۳
۱۲۶	آزمایش مقاومت کششی .۲,۵,۳,۳
۱۲۹	آرماتوربندی، قالب‌بندی و بتن‌ریزی تیرها .۶,۳,۳
۱۳۰	عمل‌آوری تیرها .۷,۳,۳
۱۳۰	آزمایش تیرها .۸,۳,۳
۱۳۸	فصل چهارم: بررسی نتایج حاصل از آزمایش
۱۳۹	مقدمه .۱,۴

صفحه	عنوان
۱۳۹	بررسی رفتار کشش غیر مستقیم (splitting) .۲,۴
۱۴۰	بررسی رفتار بار-فیز تیرها .۳,۴
۱۴۴	بررسی شکل پذیری تیرها .۴,۴
۱۴۵	بررسی رفتار بار-کرنش خمشی A .۵,۴
۱۴۷	بررسی رفتار بار-کرنش C,B .۶,۴
۱۵۳	بررسی رفتار مقاومت برشی نهایی .۷,۴
۱۵۴	بررسی الگوهای ترک .۸,۴
۱۶۲	بررسی نمونه ترک خوردگی .۹,۴
۱۶۲	نتایج فصل .۹,۴
۱۶۴	فصل پنجم: نتایج و پیشنهادات
۱۶۵	مقدمه .۱,۵
۱۶۵	پیشنهاد برای تمقیقات آینده .۴,۵
۱۶۷	منابع

فهرست جداول

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: کلیات بتن خودمتراکم
۱۰	جدول ۱-۱ مشخصات پیشنهاد شده برای SCC توسط JSCE [5]
۲۴	جدول ۲-۱ خواص انواع مختلف الیاف
۲۸	فصل دو: مروری بر مطالعات انجام شده
	جدول ۱-۲ ضریب تأثیر پسبندگی (سیمانی) با توجه به بررسی داده‌های مقاومت فشاری [11]
۳۵	
۴۲	جدول ۲-۲ منحنی دانه‌بندی شن و ماسه استفاده شده در طرحهای SCC [12]
۴۴	جدول ۳-۲ نتایج حاصل از آزمایشات بتن سفت شده [12]
۵۴	جدول ۴-۲ نسبتهای افتلاط برای مجمهای مختلف الیاف ۱۹,۱mm [13]
۵۸	جدول ۵-۲ برخی خواص الیاف پلی پروپیلین [14]
۵۹	جدول ۶-۲ خلاصه ای از برنامه آزمایشگاهی [14]
۶۳	جدول ۷-۲ نتایج مربوط به ترک خوردگی در اثر افت مجمی پلاستیک [14]
۶۵	جدول ۸-۲ نتایج مقاومت فشاری برای بتنهای PC و PFRC [14]
۶۶	جدول ۹-۲ نتایج مقاومت کششی PC و PFRC [14]
۶۶	جدول ۱۰-۲ نتایج مقاومت خمشی PC و PFRC [14]
۶۸	جدول ۱۱-۲ برنامه آزمایشگاهی: فاز دوم [15]
۶۹	جدول ۱۲-۲ ترکیبات شیمیایی بیندرها [15]
۷۰	جدول ۱۳-۲ تناسب افتلاط: فاز ۱ (lb/yd^3) [15]
۷۰	جدول ۱۴-۲ تناسب افتلاط: فاز ۲ (lb/yd^3) [15]
۸۱	جدول ۱۵-۲ خواص فیزیکی الیاف نایلون و پلی پروپیلین [16]
	جدول ۱۶-۲ نتایج مقاومتی بتنهای تقویت شده با نایلون و پلی پروپیلین در مقایسه با بتن معمولی [16]
۸۳	جدول ۱۷-۲ بررسی آماری نتایج آزمایش ضربه برای بتنهای تقویت شده

۸۶	با الیاف نایلون و پلی پروپیلین و بتن معمولی [16]	
۸۷	دانه بندی سنگدانه‌ها [17]	جدول ۱۸-۲
۸۸	فواصل فیزیکی و شیمیایی سیمان - LSP-GGBS [17]	جدول ۱۹-۲
۹۰	طرح اختلاط استفاده شده [17]	جدول ۲۰-۲
۹۱	فواصل بتن تازه [17]	جدول ۲۱-۲
۹۲	نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های استاندارد [17]	جدول ۲۲-۲
۹۶	مقاومت کششی غیر مستقیم (شکاف خوردگی) [17]	جدول ۲۳-۲
۹۹	مدول الاستسیته استاتیکی [17]	جدول ۲۴-۲
۱۰۴	متوسط فواصل ترک خوردگی - میلیمتر [17]	جدول ۲۵-۲
۱۰۵	لنگر تجربی و تئوریک در ابتدای ترک خوردگی [17]	جدول ۲۶-۲
۱۰۶	عرض متوسط ترک [17]	جدول ۲۷-۲

فصل سوم: روش اجرای آزمایش تأثیر الیاف پلی پروپیلین

۱۱۱	مشخصات فولاد مصرفی در تیرها	جدول ۱-۳
۱۱۲	دسته بندی تیرهای مورد آزمایش	جدول ۲-۳
۱۱۳	مشخصات دانه بندی و مدول نرمی ماسه استفاده شده	جدول ۳-۳
۱۱۴	وزن مخصوص مصالح دانه ای	جدول ۴-۳
۱۱۴	ترکیبات شیمیایی سیمان نگا، تیپ ۲	جدول ۵-۳
۱۱۵	آنالیز شیمیایی میکروسیلیس	جدول ۶-۳
۱۱۶	ترکیبات شیمیایی پودر سنگ	جدول ۷-۳
۱۲۰	مشخصات فیزیکی الیاف پلی پروپیلین	جدول ۸-۳
۱۲۱	نسبتهای اختلاط بتنهای SCC حاوی الیاف پلی پروپیلین	جدول ۹-۳
۱۲۴	نتایج آزمایشات بتن تازه طرح اختلاطها	جدول ۱۰-۳
۱۳۴	داده های آزمایش تیر Fc800 f0.0%	جدول ۱۱-۳
۱۳۴	داده های آزمایش تیر Fc800 f0.1%	جدول ۱۲-۳
۱۳۵	داده های آزمایش تیر Fc800 f0.2%	جدول ۱۳-۳

صفحه	عنوان
۱۳۶	جدول ۳-۱۵ داده های آزمایش تیر Fc900 f0.0%
۱۳۶	جدول ۳-۱۶ داده های آزمایش تیر Fc900 f0.1%
۱۳۷	جدول ۳-۱۷ داده های آزمایش تیر Fc900 f0.2%
۱۳۷	جدول ۳-۱۸ داده های آزمایش تیر Fc900 f0.3%
۱۳۸	فصل چهارم: بررسی نتایج حاصل از آزمایش
۱۴۵	جدول ۴-۱ بررسی شکلپذیری تیرهای 'گروه Fc800
۱۴۵	جدول ۴-۲ بررسی شکلپذیری تیرهای 'گروه Fc900
۱۵۳	جدول ۴-۳ برش نهایی

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: کلیات بتن فودمتراکم
۱۶	شکل ۱-۱ صفحه و مفروضه آزمایش اسلامپ روانی [6]
۱۷	شکل ۲-۱ نمایی ساده از دستگاه L-Box
۱۸	شکل ۳-۱ نمونه اندازه گیری مقادیر H_1 و H_2
۱۸	شکل ۴-۱ ابعاد V-Funnel
۲۷	شکل ۵-۱ یک نمونه منمنی مقاومت رشد تری R
۲۸	فصل دو: مروری بر مطالعات انجام شده
۳۳	شکل ۱-۲ مقاومت فشاری مکعبی و نسبت آب به سیمان معادل [11]
۳۴	شکل ۲-۲ مقاومت فشاری استوانه و نسبت آب به سیمان معادل [11]
۳۴	شکل ۳-۲ رابطه بین مقاومت فشاری مکعبی و استوانه ای [11]
	شکل ۴-۲ رابطه بین مقاومت دوزیم شدن استوانه و
۳۶	مقاومت فشاری مکعبی [11]
۳۷	شکل ۵-۲ رابطه بین مقاومت فشاری مکعبی با مدول گسیفتگی [11]
۳۷	شکل ۶-۲ رابطه بین مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری مکعبی [11]
۴۱	شکل ۷-۲ منمنی دانه بندی شن و ماسه استفاده شده در طرحهای SCC [12]
۴۵	شکل ۸-۲ رابطه بین زمان V-Funnel و T50 [12]
	شکل ۹-۲ تأثیر نسبت W/P مقدار روان کننده بر روی اسلامپ روانی
۴۶	و زمان V-Funnel [12]
۴۶	شکل ۱۰-۲ تأثیر نسبت W/C بر روی قابلیت پرمکنندگی و حجم هوای بتن [12]
۴۷	شکل ۱۱-۲ نمونه پیشرفت مقاومت فشاری مخلوطهای SCC [12]
	شکل ۱۲-۲ رابطه بین مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته برای
۴۹	بتنهای SCC و NVC [12]
۵۰	شکل ۱۳-۲ نسبتهای $E/\sqrt{f_c}$ برای تمقیقات مختلف و ACI318 [12]

	شکل ۲-۱۴	رابطه بین مقاومت کششی دو نیم شدن و مقاومت
۵۰		فشاری برای SCC و NVC [12]
	شکل ۲-۱۵	جزئیات دستگاه ضربه استفاده شده. ارتفاع قاب
۵۳		مدود ۴/۵m بالای طبقه [13]
	شکل ۲-۱۶	تأثیر حجم الیاف بر روی ماکزیموم بارخمشی و انرژی ترک
		تیرها تحت اثر بار ضربه، به صورت درصدی از مقدار تیرها
۵۶		بدون الیاف شرح داده شده است. [13]
۶۰	شکل ۲-۱۷	شرایط آب وهوایی در یک روز تابستانی
	شکل ۲-۱۸	اسلامپ بتنهای تقویت شده با پلی پروپیلین (PFRC)
۶۲		و بتن معمولی (PC) [14]
۶۴	شکل ۲-۱۹	افت حجمی بتنهای PFRC و PC [14]
۷۱	شکل ۲-۲۰	نمودار تنش-کرنش فشاری در درصدهای مختلف الیاف [15]
۷۲	شکل ۲-۲۱	نتایج آزمایش مقاومت فشاری در درصدهای مختلف الیاف [15]
۷۲	شکل ۲-۲۲	نتایج آزمایش سفتی فشاری در درصدهای مختلف الیاف [15]
۷۳	شکل ۲-۲۳	نتایج آزمایش سفتی فشاری در درصدهای مختلف الیاف [15]
	شکل ۲-۲۴	نتایج آزمایشات سفتی فشاری برای بتن الیافی با
۷۴		مواد پوزولانی مختلف [15]
۷۵	شکل ۲-۲۵	منمنی بار-تغییرمکان خمشی برای درصدهای مختلف الیاف [15]
۷۶	شکل ۲-۲۶	نتایج آزمایش خمشی برای درصدهای مختلف الیاف [15]
۷۶	شکل ۲-۲۷	نتایج آزمایش سفتی خمشی برای درصدهای مختلف الیاف [15]
	شکل ۲-۲۸	تأثیر مواد پوزولانی و درصد حجمی آلیاف بر روی
۷۷		مقاومت خمشی [15]
۷۷	شکل ۲-۲۹	تأثیر مواد پوزولانی و درصد حجمی آلیاف بر روی سفتی خمشی [15]
	شکل ۲-۳۰	نتایج آزمایشات مقاومت در مقابل ضربه برای
۷۸		درصدهای مختلف الیاف [15]
	شکل ۲-۳۱	تأثیر مواد پوزولانی و درصد حجمی آلیاف بر روی

۷۸	مقاومت اولین ترک در ضربه [15]	
	تأثیر مواد پزولانی و درصد مچمی آلیاف بر روی	شکل ۲-۳۲
۷۹	مقاومت در مقابل شکست در ضربه [15]	
۸۹	دانه‌بندی سیمان پرتلند - LSP-GGBS [17]	شکل ۲-۳۳
۹۳	گسترش مقاومت فشاری [17]	شکل ۲-۳۴
	مقاومت فشاری در دوره‌های مختلف نسبت به	شکل ۲-۳۵
۹۴	مقاومت ۲۸ روزه استاندارد [17]	
۹۴	اثر شرایط عمل‌آوری روی مقاومت فشاری [17]	شکل ۲-۳۶
۹۷	آزمایش بیرون کشیدن برای تعیین مقاومت پیوستگی [17]	شکل ۲-۳۷
۹۸	تغییرات حداکثر مقاومت پیوستگی تمام مخلوطها [17]	شکل ۲-۳۸
۹۹	تغییرات نسبت $(T_{max} / \sqrt{f_{cu}'})$ مخلوطهای آزمایش شده [17]	شکل ۲-۳۹
۱۰۰	جزئیات آرماتورگذاری و ابعاد تیرها [17]	شکل ۲-۴۰
۱۰۱	بتن‌ریزی تیرهای SCC [17]	شکل ۲-۴۱
۱۰۲	آزمایش ۴ نقطه فمشی روی تیرها [17]	شکل ۲-۴۲
۱۰۲	دستگاهی برای آزمایش واقعی تیرها [17]	شکل ۲-۴۳
۱۰۳	اندازه‌گیری عرض ترک [17]	شکل ۲-۴۴
۱۰۴	مد نوع گسیفتگی تیر SCC [17]	شکل ۲-۴۵
۱۰۶	نمودار عرض ترک - حداکثر لنگر اعمال شده [17]	شکل ۲-۴۶
۱۰۷	نمودار لنگر اعمال شده - فیز [17]	شکل ۲-۴۷
۱۰۹	فصل سوم: روش اجرای آزمایش تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن	
۱۱۰	فلاصه روند آزمایش	شکل ۳-۱
	مشخصات هندسی تیرها نسبت به بار وارده و	شکل ۳-۲
۱۱۲	نمونه آرایش میلگردها	
۱۱۸	الیاف پلی‌پروپیلن	شکل ۳-۳
۱۱۹	جدایی دانه‌ها در اثر افزودن آب اضافی به بتن الیافی فودمتراکم	شکل ۳-۴

صفحه	عنوان
۱۲۱	شکل ۳-۵ دستگاه مخلوط کن با ظرفیت ۲۰ کیلوگرم بتن برای اختلاط های اولیه
۱۲۳	شکل ۳-۶ الف) افزودن الیاف به مخلوط ب) مواد اختلاط ۱. میکروسیلیس ۲. پودر سنگ ۳. شن
۱۲۳	۴. ماسه ۵. سیمان
۱۲۴	شکل ۳-۷ نمونه انجام آزمایش اسلامپ روانی با کمک مخروط آبرامز
۱۲۵	شکل ۳-۸ دستگاه L-Box
۱۲۵	شکل ۳-۹ دستگاه V-funnel
۱۲۷	شکل ۳-۱۰ دستگاه آزمایش مقاومت فشاری
۱۲۸	شکل ۳-۱۱ نمونه محبب شکسته شده فاقد الیاف تمت بار مموری فشاری
	شکل ۳-۱۲ نمونه بتنی تمت کشش در آزمایش کششی
۱۲۸	دو نیم شدن (آزمایش برزلی)
۱۲۹	شکل ۳-۱۳ الف) نمونه مهار نمونه آزمایش
۱۲۹	ب) نمونه در زیر فک برای اعمال فشار
۱۲۹	شکل ۳-۱۴ آرماتور بندی تیرها
۱۳۰	شکل ۳-۱۵ قالب بندی تیرها
۱۳۰	شکل ۳-۱۶ بتن ریزی تیرها
۱۳۱	شکل ۳-۱۷ سفیدکاری تیرها
۱۳۲	شکل ۳-۱۸ دستگاه کرنش سنج
۱۳۲	شکل ۳-۱۹ دستگاه بارگذاری
۱۳۳	شکل ۳-۲۰ شکل مدل سازی شده تیر

۱۳۸ فصل چهارم: بررسی نتایج حاصل از آزمایش

۱۴۰	شکل ۴-۱ روند افزایش مقاومت کشش غیر مستقیم با افزودن الیاف
۱۴۱	شکل ۴-۲ منمنی بار- فیز تیرهای بتن فودمتراکم با مقاومت 800 kg/cm^2
۱۴۱	شکل ۴-۳ منمنی بار- فیز تیرهای بتن فودمتراکم با مقاومت 900 kg/cm^2
	شکل ۴-۴ منمنی بار- فیز تیرهای بتن فودمتراکم با مقاومتهای

صفحه	عنوان
۱۴۲	۹۰۰ و ۸۰۰ kg/cm ² با ۰,۰ درصد لیاف شکل ۴-۵ منمنی بار- فیز تیرهای بتن فودمتراکم با مقاومتهای
۱۴۲	۹۰۰ و ۸۰۰ kg/cm ² با ۰,۱ درصد لیاف شکل ۴-۶ منمنی بار- فیز تیرهای بتن فودمتراکم با مقاومتهای
۱۴۳	۹۰۰ و ۸۰۰ kg/cm ² با ۰,۲ درصد لیاف شکل ۴-۷ منمنی بار- فیز تیرهای بتن فودمتراکم با مقاومتهای
۱۴۳	۹۰۰ و ۸۰۰ kg/cm ² با ۰,۳ درصد لیاف
۱۴۶	شکل ۴-۸ نمودار بار- کرنش خمشی مربوط به تیرهای گروه Fc800
۱۴۶	شکل ۴-۹ نمودار بار- کرنش خمشی مربوط به تیرهای گروه Fc900
۱۴۷	شکل ۴-۱۰ تاثیر افزودن لیاف بر افزایش نسبی کرنش نهایی A
۱۴۸	شکل ۴-۱۱ نمودار بار- کرنش برشی B و C مربوط به تیرهای گروه Fc800
۱۴۹	شکل ۴-۱۲ نمودار بار- کرنش برشی B و C مربوط به تیرهای گروه Fc900
	شکل ۴-۱۳ نمودار بار- کرنش برشی در راستای B و C مربوط
۱۵۰	به هردو گروه Fc800 و Fc900 بدون لیاف
	شکل ۴-۱۴ نمودار بار- کرنش برشی در راستای B و C مربوط
۱۵۰	به هردو گروه Fc800 و Fc900 حاوی ۰,۱٪ لیاف
	شکل ۴-۱۵ نمودار بار- کرنش برشی در راستای B و C مربوط
۱۵۱	به هردو گروه Fc800 و Fc900 حاوی ۰,۲٪ لیاف
	شکل ۴-۱۶ نمودار بار- کرنش برشی در راستای B و C مربوط
۱۵۱	به هردو گروه Fc800 و Fc900 حاوی ۰,۳٪ لیاف
۱۵۲	شکل ۴-۱۷ تاثیر افزودن لیاف بر افزایش نسبی کرنش نهایی B و C
۱۵۴	شکل ۴-۱۸ نمونه ترک خوردگی و آزمایش تیر Fc800F0.0%
۱۵۵	شکل ۴-۱۹ نمونه ترک خوردگی و آزمایش تیر Fc800F0.1%
۱۵۶	شکل ۴-۲۰ نمونه ترک خوردگی و آزمایش تیر Fc800F0.2%
۱۵۷	شکل ۴-۲۱ نمونه ترک خوردگی و آزمایش تیر Fc800F0.3%
۱۵۸	شکل ۴-۲۲ نمونه ترک خوردگی و آزمایش تیر Fc900F0.0%

۱۵۹	نمونه ترک خوردگی و آزمایش تیر %0.1Fc900F0	شکل ۴-۲۳
۱۶۰	نمونه ترک خوردگی و آزمایش تیر %0.2Fc900F0	شکل ۴-۲۴
۱۶۱	نمونه ترک خوردگی و آزمایش تیر %0.3Fc900F0	شکل ۴-۲۵

فصل اول

کلیات بتن خود متراکم

فصل اول

۱.۱. مقدمه

بتن خودمتراکم (Self-Compacting Concrete) یک فن‌آوری نوپا در عرصه ساخت و ساز دنیاست. این نوع بتن که کارائی بسیار بالایی دارد می‌تواند تحت اثر وزن خود و بدون جدا شدن دانه‌ها در میان انبوه اجزای سازه‌ای جریان یابد. به عبارت دیگر این نوع بتن بدون نیاز به لرزاننده (ویبره) و به خاطر وزن و بدون جداشدگی دانه‌ها، خودش متراکم می‌شود. با توجه به فراگیر شدن این صنعت در دنیا و روی آوردن دست‌اندرکاران عرصه ساخت و ساز، به استفاده از بتن خودمتراکم، در طی یک روند ادامه‌دار به معرفی و ذکر نتایج تحقیقات انجام شده در مورد آن پرداخته شده است. مشکل به نظر می‌رسد که بتن به خودی خود بتواند کاری را انجام دهد، SCC می‌تواند در مناطق به هم فشرده شده آرماتورها و قسمت‌های باریک جاری شده و به حباب‌های هوا اجازه خروج داده و از جدا شدن دانه‌ها بدون انجام دادن کارهای متداول جلوگیری نماید.

علاوه بر این، در این تحقیق سعی بر آن است که پس از معرفی بتن SCC و ساخت آن که در ادامه بیشتر توضیح داده خواهد شد، بر روی خواص مکانیکی این نوع بتن شامل: مقاومت فشاری (Compressive strength)، مقاومت کششی دونیم شدن (Splitting Strength) و مدول الاستیسیته (Modulus of Elasticity) و بررسی شود.

۲.۱. بتن خودمتراکم (SCC)

۱.۲.۱. تعریف

بتن خودمتراکم بتنی است که تحت اثر وزن خود متراکم شده و به لرزاننده (ویبره)، برای ایجاد تراکم احتیاج ندارد. با تنظیم مصالح دانه‌ای و با استفاده از مخلوطی که از ترکیبات شیمیایی و معدنی بدست آمده است، بتن خودمتراکم تولید شده و طوری عمل می‌کند که معمولاً بتن‌های استاندارد معمولی عمل نمی‌نمایند. این مخلوط شامل ماده کاهش‌دهنده آب^۱ و تنظیم‌کننده چگالی مخلوط می‌باشد که می‌تواند جوابگوی مقررات ASTM C494^۲ باشد. مصالح

¹ HRWR

² ASTM C494:Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete

پرکننده^۱ اغلب برای جایگزینی مصالح ریزدانه و تنظیم ویسکوزیته استفاده می‌شوند. مصرف بالای مواد کاهنده آب، مخلوطی را با روانی بالا برای تقلیل نسبت آب به پودر به وجود می‌آورد. از نقطه نظر SCC به موادی پودر گفته می‌شود که کوچکتر از ۰.۰۱ اینچ باشند. این مواد شامل: مصالح بسیار ریز و سیمان، خاکستر، پودر آهک، پودر سنگ، تفال، خاکستر کوره، بخار سیلیکا و ... می‌باشند. بدون استفاده از مواد تنظیم‌کننده ویسکوزیته^۲ مخلوط تبدیل به دانه‌های مجزا می‌شود. در هر حال تنظیم‌کننده ویسکوزیته مخلوط سبب افزایش ویسکوزیته گشته که این خود باعث کاهش جداسدگی دانه‌ها، نشست و عرق کردن بتن می‌گردد. مخلوط به دست آمده اگر به طور درست طراحی شود SCC نام دارد.

۲.۲.۱. تاریخچه

با این که مواد اصلی استفاده شده در SCC در بازار موجود بود اما مصرف این نوع بتن از سال ۱۹۸۰ به بعد شروع شده است. نمونه اولیه این بتن در سال ۱۹۸۶ در ژاپن توسط پروفیسور اوکامورا^۳ در پاسخ به تقاضای بالا برای بتن‌های بادوام و کمبود کارگران متخصص توسعه یافت. دوام بتن به طور مستقیم به عیار و کیفیت متراکم کردن مربوط می‌شود که این خود می‌تواند به مهارت فردی که از وسایل تراکم‌کننده استفاده می‌کند بستگی داشته باشد. مشکلات واضح در جذب و نگهداشتن کارگران ماهر با مشکلات دوام بتن وابسته است. متأسفانه قسمت‌های زیادی در دنیا مشکلات مشاغل را تجربه می‌کنند که این مشکلات شامل همه کشورها از جمله آمریکا نیز می‌شود نتیجتاً اینکه تحقیقات پیشرفته‌تری در مورد تکنولوژی SCC از آن پس انجام شد که بیشتر آنها در اروپا انجام گردید. در آمریکا تحقیقات زیادی توسط سازندگان مواد افزودنی به بتن نیز انجام شده است. بعد از ساخته شدن اولین نمونه‌ها، در پروژه‌های بزرگ بتن درجا و بتن پیش‌ساخته با استفاده از SCC با موفقیت بالایی ساخته شده است. اکنون ما می‌دانیم که تقاضای چشمگیری برای انواع بتن از جمله بتن پیش‌ساخته وجود دارد.

۳.۲.۱. خصوصیات

بتن خود متراکم یا SCC دارای خواص زیر می‌باشد:

1 Filler

2 VMA

3 Okamura

- ۱- این مخلوط باید به آسانی جریان یابد.
- ۲- به طور کامل فضاها را بین آرماتورها را پر کند.
- ۳- وابستگی بتن به تکنولوژی و بیره کردن را حذف نماید.
- ۴- دارای پایداری خوب بوده و در مقابل جدا شدن و ته نشینی دانه‌ها مقاومت نماید.
- ۵- از عرق کردن بتن جلوگیری نماید.

خاصیت دیگر بتن (SCC) این است که آنها Thixo هستند. به این معنا که این مخلوط قبل از هم زدن و بیره کردن به صورت مایع بوده و پس از آن به وضعیت نیمه جامد در می‌آیند. باید توجه داشت که بتن SCC با بتن جاری (Flowing) متفاوت است (توضیح داده شده در ASTM 1017, ACI 212).

باید توجه داشت که اساساً SCC به طور کلی تغییر تکنولوژی را در ساخت بتن‌های پیش‌ساخته به وجود آورده است. سازندگان این بتن‌ها باید متوجه پیچیدگی این تغییر قبل از شروع ساخت SCC باشند. هر تغییری در کارگاه باید به صورت تیمی با بهترین شناخت در مراحل تولید محصولات به روش SCC باشد. افزودنیهای مخلوط SCC به سادگی نمی‌تواند به یک بتن معمولی موجود برای دست یافتن به خصوصیات یک بتن خودمترکم اضافه شود، بلکه این افزودنیها باید طی یک فرآیند و طرح اختلاط مناسب به بتن عادی (شامل شن و ماسه و سیمان) اضافه شده و طی یکسری آزمایشات کنترل بتن تازه و معیارهای شناخته شده در سطح جهانی قرار گیرد تا در انتها بتن SCC تولید شود.

۱,۲,۱,۴. نیازهای کلی در طرح اختلاط و ارزیابی عملکرد هریک از اجزای تشکیل

دهنده SCC [4]

۱,۲,۱,۴. حجم بالای خمیر

اصطکاک مابین سنگدانه‌ها، سرعت پخش شدن و توانایی پر نمودن توسط SCC را محدود می‌نماید، به همین دلیل است که SCC حجم بالایی از خمیر را دربر می‌گیرد، که شامل سیمان، مواد افزودنی، آب و هوا (بطور کلی $300-400 \text{ L/M}^3$) می‌باشد که نقش آن ممانعت از جدا شدن سنگدانه هاست.

در ضمن استفاده از سیمان تیپ دو به دلیل اینکه گرمای هیدراسیون آرامتری تولید می‌کند، در تولید SCC ارجح است

۱,۲,۳. حجم بالای ذرات ریز کوچکتر از 80µm

به منظور کسب اطمینان از کارایی کافی SCC، در زمانی که جدا شدن سنگدانه‌ها و آب انداختن بتن را محدود می‌نماییم، SCC شامل مقدار زیادی ذرات ریزدانه در حدود 500 kg/m^3 می‌شود. با این حال برای اجتناب از ایجاد گرمای زیاد، قسمتی از سیمان پرتلند با مواد افزودنی از قبیل سنگ آهک یا خاکستر آتشفشانی (سیلیکا فیوم شیشه یا کوارتز) جایگزین می‌شود (سیمان نباید بعنوان یک پرکننده استفاده شود). مقدار مواد فیلر به نحوی انتخاب می‌شوند که مقاومت و دوام مورد نیاز را ایجاد نمایند.

۱,۲,۳. کاربرد خاکستر آتشفشانی در سافت بتن SCC

SCC با دارا بودن خاکستر آتشفشانی می‌تواند قابلیت خوبی برای روانی و خود تحکیمی از خود نشان دهد. این تحقیق در کشور آلمان به منظور اثبات این ادعا انجام شده است. در این تحقیق دو نوع خاکستر آتشفشانی بکار برده شد. یکی از خاکسترها که عمل آمده نبود، مقدار بالایی از آهک آزاد را نشان می‌دهد. این خاکستر بنام خاکستر آتشفشانی عمل نیامده (تصفیه نشده یا (U-LFA) ۱) نام‌گذاری شده است و خاکستر دیگر که با آب عمل آمده بود (تصفیه شده بود) به نام خاکستر آتشفشانی عمل آمده تصفیه شده (T-LFA) ۲ نام‌گذاری گردید. در این نمونه از خاکستر آتشفشانی، آهک آزاد به هیدراکسید کیلسیم تبدیل شد. خلاصه و نتایج این تحقیق، با طرح اختلاط ملات SCC، شامل 40% حجم ماسه شسته شده و خشک‌شده با حداکثر قطر 2mm و مصالح ریزدانه شامل 50% سیمان و 50% پودر خاکستر آتشفشانی به شرح زیر می‌باشد:

آزمایشات خمیر SCC نشان می‌دهد که اگر سیمان 100% به 50% تغییر نماید با مصرف این دو نوع خاکستر آب مورد نیاز کم می‌شود.

همچنین اگر U-LFA مورد کاربرد قرار گیرد، به علت هیدراته‌شده آهک آزاد، دمای نمونه خیلی زیاد می‌شود و زمان گیرش به صورت آشکاری کوتاه می‌شود (زمان گیرش اولیه و نهایی ۹ و ۱۳ دقیقه اندازه‌گیری شد). و هر چه نسبت U-LFA بالاتر رود، زمان سفت‌شدن خمیر سریعتر می‌شود و در نتیجه در بتن می‌تواند به از دست‌رفتن غلظت بیانجامد، که این مورد برای SCC مطلوب نیست. جایگزینی T-LFA با سیمان، زمان گیرش را فقط به آرامی کوتاه می‌کند، در نتیجه برای ساخت SCC ارجح است.

1-Untreated lignite fly ash

2-Treated lignite fly ash

اگر U-LFA در ملات بکار رود، مقاومت بصورت آشکاری افزایش می‌یابد. در ملاتی که 20% سیمان با U-LFA جایگزین شده‌است، تقریباً مقاومتی برابر سیمان خالص دارد. در حالی که در مورد T-LFA با کاهش مقاومت روبرو هستیم.

همچنین به علت گرمای بالای هیدراسیون آهک آزاد U-LFA، افزایش حجم زیادی رخ می‌دهد که اگر U-LFA کمتر از 20% باشد، افزایش حجم صدمه‌ای برای سازه ندارد در غیر این صورت، ساختمان ملات SCC می‌تواند به وسیله افزایش حجم صدمه ببیند.

۱,۲,۳,۴. کاربرد مصالح ریز دانه سنگ آهک در SCC

نتایج تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که سنگدانه‌های ریز پودر سنگ آهک، که بهتر درجه‌بندی شده‌اند به طور قابل توجهی قابلیت شکل‌پذیری خمیر SCC را افزایش می‌دهند. وقتی که حجم زیادی از این فیلر به اختلاط اضافه شد، خواص مورد نیاز خود تراکمی در یک نسبت پایین‌تر آب به (سیمان + فیلر) بدست آمده، که همین عامل سبب افزایش چسبندگی اختلاط و اجتناب از جدایی دانه‌ها و افزایش مقاومت می‌شود، به عبارتی هر چه خاصیت خود تراکمی بیشتر شود، مقاومت بدست آمده نیز بیشتر خواهد بود.

همچنین مشخص شد که اضافه کردن این فیلر به اختلاط SCC، باعث افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه، به دلیل اثر فیلر در بهبود مواد ریزدانه ترکیب می‌شود و هر چه این نوع فیلر ریزدانه‌تر و منظم‌تر باشد، در ترکیب با سیمان درجه حرارت هیدراسیون بالاتر و در نتیجه مقاومت و چسبندگی نهایی بیشتری ایجاد می‌کند. همچنین باعث تغییرات رطوبت در بتن می‌شود که کنترل‌کننده انقباض و فشارهای خزشی می‌باشد. در ضمن اختلاط‌های بتن با مخلوط سیمان و سنگ آهک، نسبت به رفع عمل کیورینگ حساسیت بیشتری به دلیل افزایش نرخ هیدراسیون در سن اولیه دارد.

از طرفی از آنجایی که قیمت پودر آهک کمتر از قیمت سیمان پرتلند می‌باشد، لذا مصرف موفقیت آمیز گرد سنگ آهک در اختلاط SCC باعث صرفه‌جویی اقتصادی نیز می‌شود.

همچنین اگر از فیلر آهک در SCC استفاده شود، این نوع بتن علی‌رغم کم بودن خلل و فرج در سطح آن در مقابل حمله سولفات‌ها آسیب‌پذیر خواهد بود، که علت آن وجود سطح خاص پودر آهک می‌باشد که باعث حل شدن CO₂ در آب و در نتیجه فساد بتن می‌شود.

۵.۴.۲.۱. مصرف فوق روان کننده

فوق روان کننده‌ها در SCC به منظور کسب سیالیت و غلظت معرفی شده‌اند، تا با نسبت آب به سیمان پایین شکل‌پذیری را افزایش دهند

۶.۴.۲.۱. حجم کم سنگدانه‌های درشت

این امکان وجود دارد که در تولید SCC از سنگدانه گرد طبیعی یا شبه شکسته یا شکسته استفاده شود.

با این وجود چون سنگدانه‌های درشت نقش مهمی در توانایی عبور SCC در نواحی باریک و پر آرماتور دارند، حجم آن باید محدود شود. از طرفی مصرف سنگدانه‌های درشت اجازه می‌دهد تا دانسیته مجموعه کل را به حد مطلوب برساند و حجم ملات مورد نیاز جهت کارایی بتن را کاهش داد، به طور کلی گفته می‌شود حداکثر اندازه سنگدانه‌ها D_{max} مابین 10-20 mm باشد، چرا که توانایی عبور با افزایش D_{max} کاهش می‌یابد که منجر به کاهش محتوای سنگدانه‌های درشت می‌شود. انتخاب D_{max} بزرگتر فقط با کاهش مقدار آرماتور قابل توجیه است.

همچنین مخلوط‌های افزوده شده به SCC می‌تواند اثر کهنده‌ای را بر روی مقاومت و افزایش دمای بتن داشته باشد و این باید در طول ساخت در نظر گرفته شود.

۵.۲.۱. مزایای طرح اختلاط [5]

قبل از اینکه هر نوع SCC در کارخانه مرکزی بتن تولید شده و در یک محل ساختمانی استفاده شود، مخلوط باید طراحی و آزمایش شود. در حین این ارزیابی، تجهیزات و مصالح محلی مصرفی در کارخانه باید برای دستیابی به اختلاط‌های جدید بتن، ضمن توالی‌های واقعی اختلاط و زمان‌های معتبر اختلاط آن کارخانه و مصالح مصرفی آزمایش شده و نیز برای اجزایی که بتن‌ریزی می‌شوند، مناسب باشند. انواع گوناگون فیلرها می‌توانند منجر به مقاومت، جمع شدگی و خزش‌های مختلف شوند اما جمع شدگی و خزش معمولاً از آنچه که برای بتن ویبره متعارف می‌باشند بزرگتر نخواهد بود.

بتن خودمترکم SCC^۱، که یک نوع جدیدی از بتن‌های با کاربری بالا^۱ می‌باشد و دارای قابلیت تغییر شکل‌پذیری بالا و پایداری در مقابل جداسدگی^۲ عالی است، برای اولین بار در سال ۱۹۸۶ توسعه پیدا کرد. این بتن یک نوع ویژه‌ای است بطوریکه می‌تواند جریان پیدا کند و تمام فواصل

¹ High performance concrete (HPC)

² Segregation resistance ability

مابین تقویتها و کنجهای قالب را بدون نیاز به هیچگونه عمل ویبره و یا متراکم سازی در طول بتن ریزی پر کند. با وجود این کاربرد خوب، SCC متفاوت از بتنهای با کارایی بالایی بود که در شمال آمریکا و اروپا گسترش یافته بود. در بتنهای HPC فقط روانی بتن در تسهیل بتن ریزی مورد اصلاح قرار گرفته بود، در حالی که اینگونه بتنهای نمی توانستند آزادانه و به خودی خود در همه گوشه‌های قالب و فواصل میان تقویتها جریان یابند. به عبارت دیگر HPC هنوز نیاز به ویبره و متراکم سازی در عملیات ساختمانی داشت. در مقابل، SCC خواص مناسبی دارد مثل روانی بالا، پایداری خوب در مقابل جداسدگی، توانایی خودمتراکمی متمایز و بدون نیاز به هرگونه ویبره ای در حین عملیات بتن ریزی.

برای تولید SCC، کار اصلی وارد کردن طراحی تناسبات اجزاء مخلوط و ارزیابی خواص بتنی آنها است. در عمل، SCC در حالت تازه نشان داده است که روانی، قابلیت خود تراکمی و مقاومت جداسدگی بالایی را دارد.

در سال ۱۹۹۳، اوکامورا یک روش طرح اختلاط SCC پیشنهاد کرد. نظر اصلی او این بود که در ابتدا آزمایشاتی بر روی ملات (بدون حضور مصالح شنی) با هدف بررسی خواص SP^1 ، سیمان، ریزدانه و مواد پزولانی انجام شود، سپس اختلاط SCC سعی شود. مزیت اصلی این روش این است که از تکرار آزمایش کنترل کیفیت مشابه بر روی بتن دوری کرده و این هم خود در زمان و آزمایشگاه صرفه جویی می کند.

در روشهای طرح اختلاط SCC استاندارد شده و پیشنهاد شده توسط $JRMCA^2$ نمونه‌های ساده شده ای از روشهای اوکامورا می باشد. این روش می تواند برای تولید SCC با مقدار زیاد مواد پودری و نسبت آب به بیندر^۳ کمتر از ۰٫۳ که به عبارت دیگر $LCPC^4$ ، CBI^5 و تحقیقات مشترک چین و تایوان همگی روشهای طرح اختلاط مختلفی را برای HPC پیشنهاد داده‌اند. خط مشی $LCPC$ بر اساس دو نرم افزار $BTRHEOM$ و $RENE LCPC$ گسترش یافته است. پر واضح است که اقتباس از این روش بدون خرید این نرم افزارها مشکل می باشد. خط مشی CBI با استفاده از رابطه بین نسبت حجم انسداد و فاصله آزاد بین تقویتها برای سهم بندی قطر ذرات شکل می گیرد. با این حال این واضح نیست که چطور آزمایشات بحرانی انجام شود چراکه بتن طرح شده با شن و خمیر

¹ Super plasticizer

² Japanese Ready-Mixed Concrete Association

³ Binder

⁴ the Laboratory Central Des Ponts et Chaussées

⁵ the Swedish Cement and Concrete Research Institute

فقط در معرض جداشدگی نیست. در تایوان، روش پیشنهاد شده بوسیله هاوانگ و همکاران^۱، شامل یک الگوریتم طرح اختلاط متراکم شده که از یک تئوری چگالی ماکزیمم و تئوری اضافه خمیر مشتق شده است. با این حال در این روش اطلاعات کافی درباره رابطه بین روشها و قدرت عبور جداشدگی بتن وجود نداشت. گروه هان^۲ در چین روشهای طرح اختلاطشان را ارائه ندادند و فقط برخی اصول مفیدی را در این زمینه پیشنهاد دادند. آنها همچنین نشان دادند که حجم خمیر خیلی کم نه فقط قدرت عبور^۳ بتن را از بین می‌برند بلکه اگر متراکم سازی در حین طرح انجام نشود مقاومت فشاری را نیز کاهش می‌دهد.

در این پروژه اساس طرح اختلاط بتن SCC بر اساس یک روش طرح ساده ارائه شده توسط نان-سو^۴ از تایوان استوار است که در ادامه شرح مختصری از این طرح و محاسبات مربوطه آورده شده است..

توجه ویژه روش پیشنهادی بر شدن حفرات بین مصالح دانه ای توسط مواد چسبنده می‌باشد. وزن واحد حجم مصالحه دانه ای در حالت توده ای با توجه به ASTM C29 محاسبه می‌شود. معمولاً حجم اشغال شده توسط مصالح در این حالت حدود ۵۲-۵۸٪ می‌باشد یا به عبارت دیگر حجم فضای خالی مصالح در حدود ۴۲-۴۸٪ است. مقاومت SCC توسط چسبندگی مصالح دانه ای بر اساس خمیر چسبنده در حالت سخت شده تأمین می‌شود در صورتیکه کارایی SCC توسط چسبندگی و ویسکوزیته خمیر در حالت بتن تازه تأمین می‌شود. بنابراین حجم مصالحه ریز و درشت دانه، مواد چسبنده، مقدار SP به عنوان فاکتورهای اصلی بر روی خواص SCC تأثیرگذار می‌باشند. SCC ساخته شده توسط این طرح اختلاط بر اساس مشخصات روانی، پایداری در مقابل جداشدگی و توانایی پرکنندگی ارائه شده توسط استاندارد JSCE^۵ می‌باشد. مشخصات مربوط به این استاندارد در جدول ۱-۱، آورده شده است. این روش در نه گام تنظیم شده است. که به شرح زیر می‌باشد:

1 Hwang et al.

2 Hon

3 Passing ability

4 Nan Su

5 the Japanese Society of Civil Engineering

جدول ۱-۱ : مشخصات پیشنهاد شده برای SCC توسط JSCE [5]

رتبه بندی		۱	۲	۳
شرایط ساختمان	مینیموم فاصله بین تقویتها (mm)	۳۰-۶۰	۶۰-۲۰۰	≥۲۰۰
	مقدار تقویت (kg/m^3)	≥۳۵۰	۱۰۰-۳۵۰	≤۱۰۰
	ارتفاع پر شده در آزمایش U-Box (mm)	≥۳۰۰	≥۳۰۰	≥۳۰۰
	حجم تقریبی شن در واحد حجم SCC (m^3/m^3)	۰,۲۸-۰,۳	۰,۳-۰,۳۳	۰,۳-۰,۳۶
روانی	اسلامپ روانی ^۱ (mm)	۶۵۰-۷۵۰	۶۰۰-۷۰۰	۵۰۰-۶۵۰
پایداری در مقابل جداشدگی	زمان لازم برای عبور از V-funnel (mm)	۱۰-۲۰	۷-۲۰	۷-۲۰
	زمان لازم برای رسیدن به قطر ۵۰۰ mm در آزمایش اسلامپ روانی (s)	۵-۲۵	۳-۱۵	۳-۱۵

۱,۵,۲,۱. مناسبه مقدار درشت دانه و ریز دانه

وقتی مصالح درشت دانه و ریز دانه با سطح خشک بصورت عادی روی هم انباشته می‌شوند، اصطکاک و فضای خالی مابین آنها بوجود می‌آید. روانسازی وقتی اتفاق می‌افتد که آب و مصالح چسبیده به آنها اضافه می‌شوند. بنابراین توده ای با فشردگی بیشتر ساخته می‌شود. معمولاً، درصد حجم مصالح بعد از روانسازی و فشرده سازی در SCC در حدود ۶۸٪-۵۹٪ می‌باشد. در این تحقیق، ضریب تراکم (PF) مصالح به صورت نسبت جرم واحد حجم مصالح دانه ای سخت شده (در SCC) به نسبت جرم واحد حجم مصالح دانه ای در حالت توده ای^۲ تعریف می‌شود. واضح است که ضریب تراکم بر روی حجم مصالح در SCC تأثیر گذار است. PF بالا مقدار مصالح دانه ای بیشتری را ایجاد می‌کند از اینرو مقدار مواد چسبیده کاهش می‌یابد. در نتیجه، روانی، توانایی خود تراکمی و مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، PF کم، افت حجمی بتن^۳ را افزایش می‌دهد. از طرفی اگر در PF خیلی کم در نظر گرفته شود، مقدار مصرف مواد پودری افزایش یافته در نتیجه میزان ارزش مادی کار بالا می‌رود که مناسب نیست. از طرفی دیگر افزایش پودر روی کارایی و دوام بتن تأثیر گذار است. از این رو، خیلی مهم است که مقدار PF بهینه ای انتخاب شود. مقدار مصالح دانه ای به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$W_g = PF \times W_{gl} (1 - S/a) \quad (1)$$

$$W_s = PF \times W_{sl} \times (S/a) \quad (2)$$

که در آن :

¹ Slump flow

² Loosely Packed

³ Dry Shrinkage

W_g : مقدار شن در SCC (kg/m^3)

W_s : مقدار ماسه در SCC (kg/m^3)

W_{gt}^1 : وزن واحد حجم توده ای شن در حالت SSD (kg/m^3)

W_{st}^1 : وزن واحد حجم توده ای ماسه در حالت SSD (kg/m^3)

PF : ضریب تراکم (قبلاً تعریف شد)

S/a : نسبت حجمی ماسه به مجموع مصالح دانه ای (شن بعلاوه ماسه) در این روش برای این مقدار حدود ۵۰-۵۲٪ در نظر گرفته شده است.

۲,۵,۲,۱. محاسبه مقدار سیمان

برای تأمین کردن روانی و پایداری از جداشدگی، مقدار پودر نباید زیاد پایین باشد. بر طبق «راهنمای ساخت بتن با روانی بالا»^۲ کمینه مقدار سیمانی که برای تولید یک بتن معمولی و پردوام استفاده شد به ترتیب برابر $270 \frac{kg}{m^3}$ و $290 \frac{kg}{m^3}$ بود. به هر حال مقدار سیمان زیاد، سبب افت حجمی در SCC خواهد شد. عموماً برای محاسبه سیمان جهت تولید SCC و یا HPC در این روش از معادله زیر استفاده می‌شود.

$$C = f'_c / 20 \quad (3)$$

که در آن :

C : مقدار سیمان (kg/m^3)

f'_c : مقدار مقاومت فشاری طراحی می‌باشد. (Psi)

۳,۵,۲,۱. مقدار آب مورد نیاز سیمان

رابطه بین مقاومت فشاری و نسبت آب به سیمان در SCC در مقایسه با بتنهای معمولی کمتر می‌باشد. نسبت آب به سیمان می‌تواند بر طبق ACI 318^۳ یا دیگر روشهای مطالعه شده قبلی تعیین شود. مقدار آب مورد نیاز سیمان در مخلوط با استفاده از معادله زیر تعیین می‌شود.

$$W_{wc} = \left(\frac{W}{C} \right) C \quad (4)$$

¹ Saturated surface-dry

² Guide to Construction of High Flowing Concrete

³ American Concrete Institute (ACI) 318 : Building code requirements for Structural Concrete and Commentary

که در آن:

W_{wc} : مقدار آب مورد نیاز سیمان در مخلوط (kg/m^3)

$\frac{W}{C}$: نسبت وزن آب به وزن سیمان

۱,۲,۳,۴. مناسبه مقدار فاکستر بادی (FA^۱) و فای فرد شده سربراره کوره ذوب آهن (GGBS^۲)

مقدار زیاد مواد پودری اضافه شده به SCC روانی و خودمتراکمی را تسهیل می‌بخشد. با این حال، فزونی سیمان اضافه شده، به طرز وسیعی قیمت مواد مصرفی و افت حجمی بتن را افزایش می‌دهد. بعلاوه، میزان اسلامپ در اثر این فزونی پایین می‌آید و مقاومت طراحی بیش از آنچه که مدنظر است، بدست آورده می‌شود. وقتی مقادیر روانی (ASTM C230^۳) خمیر FA و GGBS برابر مقدار مربوط به خمیر سیمان است از W/F و W/S که به ترتیب جایگزین نسبت وزنی آب به مقادیر پودر FA و GGBS می‌باشد، استفاده می‌شود. بنابراین مقدار حجم خمیر FA (V_{Pf}) و حجم خمیر GGBS (V_{PB}) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

(۵)

$$V_{Pf} + V_{PB} = 1 - \frac{W_E}{1000 \times G_E} - \frac{W_S}{1000 \times G_S} - \frac{C}{1000 \times G_C} - \frac{W_{wc}}{1000 \times G_W} - V_a$$

که در آن:

G_E : مقدار وزن مخصوص شن

G_S : مقدار وزن مخصوص ماسه

G_C : مقدار وزن مخصوص سیمان

G_W : مقدار وزن مخصوص آب

V_a : مقدار حجم هوای داخل SCC می‌باشد. (/.)

اگر مقدار مواد پوزولانی^۴ (FA و GGBS) در SCC، W_{pm} (kg/m^3) باشد و درصد FA، A% و همچنین درصد GGBS، B% وزنی باشد، نسبت مناسب این دو ماده می‌تواند بر طبق خواص

^۱ Fly ash

^۲ Ground Granulated Blast-furnace Slag

^۳ ASTM C230: Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement

^۴ Pozzolanic materials

محلی و آزمایشهای مهندسی از قبل تعیین شود.

$$V_{PF} + V_{PB} = \left(1 + \frac{W}{F}\right) \times A\% \times \frac{V_{pm}}{1000 \times G_f} + \left(1 + \frac{W}{S}\right) \times B\% \times \frac{V_{pm}}{1000 \times G_B} \quad (6)$$

مقدار W_{pm} با توجه به معادلات (5) و (6) تعیین می‌شود. در این صورت مقادیر W_B و W_f از معادلات زیر تعیین می‌شوند:

$$W_f = A\% \times W_{pm} \quad (7)$$

$$W_B = B\% \times W_{pm} \quad (8)$$

مقدار آب اختلاط مورد نیاز برای خمیر FA از معادله زیر بدست می‌آید:

$$(9)$$

$$W_{wf} = \left(\frac{W}{F}\right) W_f$$

مقدار آب اختلاط مورد نیاز برای خمیر GGBS از معادله زیر بدست می‌آید:

$$W_{wB} = \left(\frac{W}{S}\right) W_B \quad (10)$$

۵.۵.۲.۱. مقدار آب کلی مورد نیاز SCC

مقدار آب مورد نیاز SCC برابر مجموع مقادیر آب مورد نیاز سیمان، FA و GGBS می‌باشد. بنابراین به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$W_w = W_{wG} + W_{wf} + W_{wB} \quad (11)$$

بر طبق پیشنهاد انجمن معماری ژاپن: $W_w = 160 - 185 \text{ kg/m}^3$

۶.۵.۲.۱. مناسبه مقدار SP

اضافه کردن مقدار مناسب SP می‌تواند روانی، خودتراکمی و مقاومت در مقابل جداشدگی SCC در حالت تازه^۱ را برای رسیدن به طرح مورد نیاز تأمین کند. مقدار آب SP می‌تواند بخشی از آب موجود در طرح باشد. اگر مقدار SP استفاده شده برابر n% مقدار پودر باشد و حجم جامد SP برابر m%، آنگاه مقدار SP می‌تواند از معادله زیر بدست آید:

^۱ Fresh

$$W_{SP} = n\%(C + W_f + W_E) \quad (12)$$

$$W_{WSP} = (1 - m\%)W_{SP} \quad (13)$$

۷.۵.۲.۱. تنظیم مقدار آب مخلوط

بر طبق مقدار رطوبت مصالح مورد استفاده برای ساخت بتن SCC در کارخانه و یا در کارگاه ساخت مقدار واقعی آب استفاده شده در مخلوط باید تنظیم شده و این مقدار رطوبت از آن کسر گردد.

۸.۵.۲.۱. انجام افتلاط و انجام آزمایشات خواص SCC

مخلوط بدست آماده از محاسبات بالا انجام می‌شود، سپس آزمایشات کنترل کیفیت بر روی آنها صورت می‌پذیرد تا نیازمندیهای زیر سنجیده شود:

- ۱- نتایج مربوط به آزمایش اسلامپ روانی، U-Box، L-flow و V-funnel باید بر طبق مشخصات^۱ JAS باشد.
- ۲- پدیده جداشدگی مواد مخلوط باید رضایت بخش باشد.
- ۳- نسبت آب به پودر باید احتیاجات دوام و مقاومت را تأمین کند.
- ۴- مقدار هوا باید به میزان مورد نیاز طرح اختلاط برسد.

۹.۵.۲.۱. تنظیمات سهم مواد افتلاط

اگر نتایج کنترل کیفیت گفته شده در گام هشتم، در رسیدن به کارایی های مورد نیاز بتن تازه ناموفق باشد، تنظیمات باید طوری اصلاح شوند تا همه خواص SCC برای طراحی تأمین شود. برای مثال، وقتی SCC تازه روانی ضعیفی را داشته باشد، مقدار PF کاسته می‌شود تا حجم پودر افزایش یافته و کارایی اصلاح شود.

۶.۲.۱. آزمایشهای بتن تازه SCC

در حال حاضر معیار جهانی استاندارد برای پذیرش بتن SCC وجود ندارد. با این وجود

^۱ Japanese Architecture Society

روشهای متفاوتی برای تست SCC پیشنهاد شده است که متأسفانه هیچ یک نتوانسته است سه خاصیت کلیدی مواد به شرح زیر را به درستی اندازه‌گیری نماید با این وجود چند آزمایش که بارها در گزارشات تکرار شده‌اند به عنوان آزمایشات مورد قبول برای سنجش ویژگیهای بتن تازه خودمتراکم در نظر گرفته می‌شود. خواص اصلی بتن تازه به شرح زیر می‌باشد:

۱- توانایی جاری شدن در قالب

۲- توانایی گذشتن آزادانه از بین آرماتورها

۳- مقاومت در برابر جدا شدن از هم

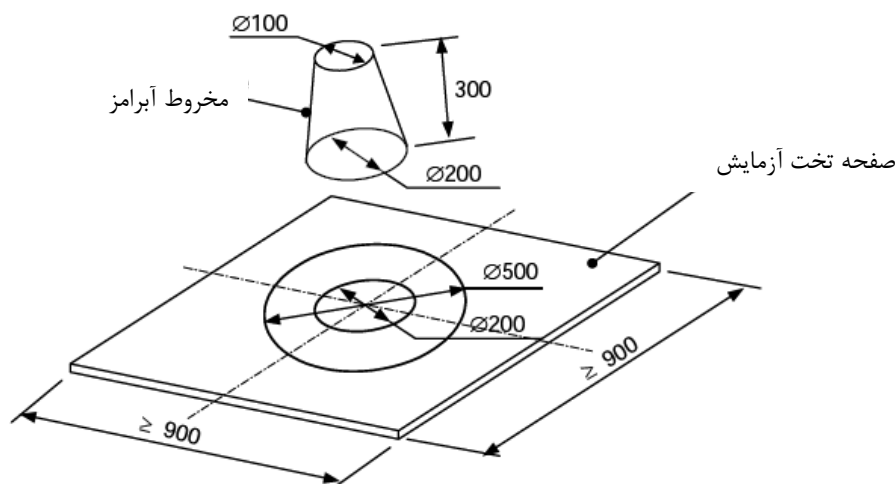
بعضی از روشهای جدید پیشنهادی برای آزمایش بدین صورت خلاصه شده است.

۱.۶.۲.۱. آزمایش اسلامپ روانی [6]

این آزمایش توسط JSCE، به منظور ارزیابی قابلیت تغییر شکل بتن تحت وزن خود بدون حضور هیچ قیدی بجز اصطکاک صفحه جریان بر اساس اصول آزمایش مخروط اسلامپ برای بتنهای معمولی تدوین شد. در این آزمایش قطر توده بتن پخش شده به عنوان معیار سنجش مدنظر می‌باشد. همچنین جداشدگی در صورت وقوع در اطراف لبه‌های توده پخش شده قابل مشاهده می‌باشد. آزمایش اسلامپ روانی قدرت پرکنندگی SCC را ارزیابی می‌کند. این آزمایش دو پارامتر را اندازه می‌گیرد: روانی پخش شده و زمان روانی T50. اولی آزادی و بی قیدی در روانی را نشان می‌دهد و دومی نرخ تغییر شکل را با تعریف یک فاصله روانی بررسی می‌کند.

تجهیزات مورد نیاز این آزمایش شامل یک صفحه تخت به ابعاد ۹۰۰×۹۰۰ میلیمتر می‌باشد که بر روی آن دو دایره به قطرهای ۲۰۰ و ۵۰۰ میلیمتر از مرکز علامت گذاری شده است. جنس این صفحه از یک ماده سخت و نفوذ ناپذیر باید باشد مثل تخته سه لا و یا فلز. همچنین در این آزمایش از مخروط آبرامز^۱ با قطرهای بالا و پایین به ترتیب ۱۰۰ و ۲۰۰ میلیمتر استفاده می‌شود [6]. در شکل ۱-۱، جزئیات به صورت شماتیک نشان داده شده است.

^۱ Abrams cone



شکل ۱-۱: صفحه و مخروط آزمایش اسلامپ روانی [6]

نحوه انجام این آزمایش بدین گونه است که صفحه آزمایش را کاملاً تمییز کرده، مخروط را بر روی آن و در مرکز صفحه جایی که قطر ۲۰۰ میلیمتر علامت گذاری شده است قرار داده می شود، سپس داخل مخروط را از SCC که قرار است مورد آزمایش قرار گیرد پر کرده سپس بعد از تمییز کردن اطراف مخروط، بصورت عمود بر صفحه و با یک حرکت بالا کشیده می شود. زمان رسیدن به قطر ۵۰۰ میلیمتر (برحسب ثانیه) را با توجه به علامت گذاری در داخل صفحه و همچنین میزان قطر پخش شدگی در دو جهت (D_2 و D_1) اندازه می شود. مقدار قطر اسلامپ در این آزمایش برابر است با:

$$D_{ave} = \frac{(D_2 + D_1)}{2} \quad (14)$$

محدوده مجاز مقدار قطر اسلامپ حاصل از این آزمایش در استانداردها و رتبه بندی های مختلف، متفاوت می باشد. محدوده کمینه و بیشینه آن با توجه به این استانداردهای مختلف ۵۵۰-۸۵۰ میلیمتر می باشد.

۱.۲.۶.۲.۱. آزمایش L-Box

وسیله ای که برای انجام این آزمایش مورد استفاده قرار می گیرد در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. با این آزمایش خواص متفاوتی از قبیل قابلیت روانی، قدرت عبور و پایداری در مقابل جداسدگی مورد سنجش قرار می گیرد. در این آزمایش ارتفاع SCC تازه را پس از عبور از میان فواصل مشخص شده بین آرماتورهای فلزی و جریان در یک مسیر در نظر گرفته شده، اندازه گیری کرده و با این مقدار قدرت عبور و انسداد را در SCC تخمین می زنند [6].

در این آزمایش قسمت قائم جعبه، که دارای ابعاد $100 \times 200 \times 600$ میلیمتر می باشد، از حدود ۱۲ لیتر SCC پر شده سپس دریچه تعبیه شده در پشت سفره آرماتورها بالا کشیده می شود. SCC از میان فواصل آرماتورها (مقدار این گپها^۱ در شکل ۱-۲ نشان داده شده است) عبور کرده و در قسمت افقی جعبه L-BOX جریان می یابد. پس از سکون SCC مقادیر H_1 و H_2 ، با توجه به آنچه که در شکل ۱-۳ نشان داده شده است، اندازه گیری می شود.

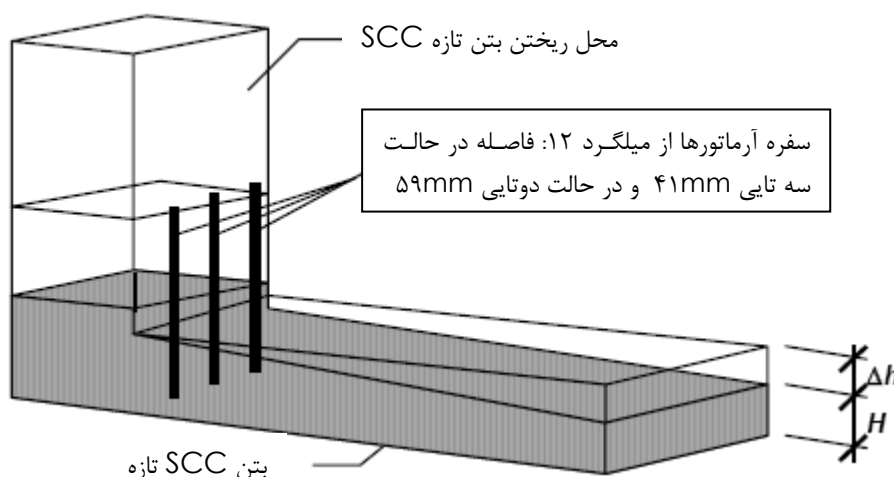
نسبت این دو مقدار بعنوان معیاری برای سنجش قابلیت عبور SCC مطرح می شود. این معیار با PA^2 نشان داده شده و با معادله زیر حساب میشود:

$$PA = \frac{H_1}{H_2} \quad (15)$$

حدود مجاز مقدار PA، با توجه به استانداردهای متفاوت، برابر است با: $PA \geq 0.75$

۳.۶.۲.۱. آزمایش V-Funnel

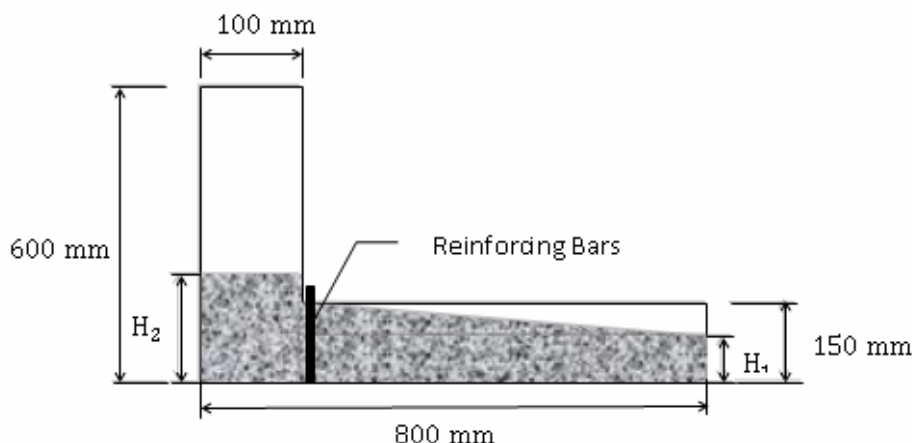
به منظور سنجش توانایی بتن برای تغییر جهت جریان و عبور از میان مقاطع مسلح و مقید بدون جداشدگی و وقوع انسداد در جریان انجام می گردد. در این آزمایش زمان خروج کامل بتن از قیف بعد از باز شدن دریچه به عنوان معیار سنجش در نظر گرفته می شود.



شکل ۱-۲: نمایی ساده از دستگاه L-BOX

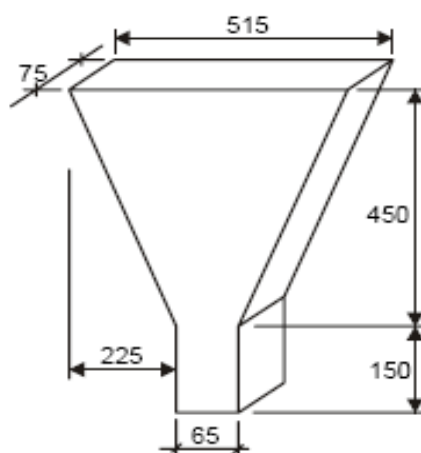
¹ Gap

² Passing Ability



شکل ۱-۳: نحوه اندازه گیری مقادیر H_1 و H_2

مدت روانی V-Funnel زمانی است که یک حجم مشخصی از SCC از دهانه باریکی عبور می کند و دلالت بر قدرت پرکنندگی بتن SCC آماده شده دارد بطوریکه انسداد و یا جداسدگی اتفاق نیافتد. زمان روانی V-Funnel تقریباً درج ویسکوزیته پلاستیک می باشد. ابعاد V-Funnel در شکل ۱-۴ نشان داده شده است. V-Funnel در هنگام آزمایش باید در یک مکان تخت و به صورت افقی قرار گیرد، سپس داخل آن در حدود ۱۲~۱۴ لیتر بتن ریخته می شود (بسته به ابعاد و دقت ساخت). بعد از پر شدن کامل سطح بتن پرداخت شده و با یک وقفه ۱۰ ثانیه ای در چجه تحتانی V-Funnel بیرون کشیده می شود. از همین لحظه زمان اندازه گیری می شود تا لحظه ای که کل بتن تخلیه شود [6]. این زمان با t_v نشان داده می شود و زمان آن در استانداردهای گزارش شده متفاوت می باشد. محدوده تغییرات آن در حالت مجاز در حدود ۶-۲۵ ثانیه می باشد.



شکل ۱-۴: ابعاد V-Funnel

۷.۲.۱. منافع تولید کنندگان SCC

مقررات طراحی SCC تفاوتی با مقررات بتنی معمولی (بتن استاندارد) ندارد. از مقررات و استانداردهای موجود بتن استاندارد می‌توان برای طراحی محصولات برای به کار بردن SCC استفاده کرد. هر چند بحث‌هایی دربارهٔ این که روانی مخلوط ممکن است باعث بالا بردن فشار آبی آن در حین کار شود، صورت گرفته است اما هیچ‌گونه جمع‌بندی در مورد بحرانی بودن نظریه یاد شده وجود ندارد. به علت ماهیت SCC، احتمالاً فشار واقعی در آن بیشتر از فشار در بتن‌های معمولی است. اما در هر حال کمتر از فشار هیدرواستاتیک که به وجود آورندهٔ فشار زیاد علیه دیوارهای جانبی است که به علت کم بودن اصطکاک در بتن، مولکول‌های آب به وجود می‌آید، می‌باشد. تولیدکنندگان بتن پیش‌ساخته با استفاده از SCC دارای منافع زیر می‌باشند:

۱- شرایط محیط کار صدای کمتر و ویبراتور و کاهش خطرات ناشی از به کار بردن ویبراتور

دستی Hand-arm vibration Syndrome

۲- سرعت جابجایی سبب افزایش تولید می‌گردد.

۳- راحتی جابجایی باعث کاهش تعداد کارگران در هنگام بتن‌ریزی می‌گردد.

۴- اعتماد بهتر در ترکیب و تحکیم مناسب

۵- کاهش فرسودگی و پارگی که توسط ویبره پدید می‌آید.

۶- کاهش فرسودگی میکسر که توسط عملیات برشی به وجود می‌آید.

۷- اصلاح و بهبود کیفیت سطح کار و کاهش سوراخ‌های ریز که در عملیات زیباسازی (نماسازی) تولید اشکال می‌نماید.

۸- درکارهای تمام شده اکسپوز (روباز) می‌تواند بکار برده شود.

۹- استحکام اولیه را افزایش می‌دهد.

۱۰- با نسبت آب سیمان W/C کمتر از ۰/۳۵ سازگار می‌باشد.

۱۱- کاهش انرژی مصرفی وسایل ویبره کردن و انرژی مورد نیاز برای مخلوط کردن

۱۲- نفوذپذیری کمتر

۱۳- قابلیت پمپاژ عالی

۸.۲.۱. محدودیتهای SCC

SCC دارای محدودیتهایی می‌باشد که باید مورد توجه قرار گیرد. یکی از مهم‌ترین

محدودیت‌ها به کمبود تست‌های استاندارد برای خواص فیزیکی، مربوط می‌شود. برای اینکه بتوان خواص SCC را به طور دقیق معین کرده و از کیفیت آن اطمینان حاصل شود، وجود استانداردهای که قابل قبول و قابل کاربرد توسط بخش صنعت باشد مورد نیاز است. همچنین که با توجه به اطلاعات کم (به جز تحقیقات انجام شده توسط سازندگان مواد افزودنی) و راه کوتاه پیموده شده، موانع در مصرف SCC در آینده نزدیک هم چنان موجود می‌باشد.

یکی دیگر از محدودیت‌های تولید SCC را قیمت بالای مصالح ساختمانی، به وجود می‌آورد. نه تنها قیمت بالای مواد افزودنی بلکه قیمت تست‌های کنترل کیفیت مورد نیاز بتن و ریزدانه‌ها نیز در بالا بردن قیمت مؤثرند. به هر حال، سودی در تقلیل نیروی کار نیز محتمل می‌باشد.

زمان اختلاط نیز مانند کار نهایی طولانی‌تر خواهد بود. جنبه‌های فیزیکی دیگر SCC که می‌تواند برای سازنده‌ها مشکل‌ساز باشد، باید مورد توجه قرار گیرد. نظر به اینکه SCC ذاتاً به خودی خود تراز می‌شود، پر کردن قابی که تراز نباشد می‌تواند مشکلات قابل توجهی را به وجود آورد. هم چنین به علت مایع بودن SCC، چکه کردن قطره، در قالب‌هایی که به طور کامل مهر و موم نشده باشند می‌تواند مشکل به وجود آورد. از طرف دیگر به خاطر طبیعت Thixotropic بسیاری از مخلوط‌های SCC، چکه کردن قطره ممکن است یک مشکل مهمی به حساب آورده نشود.

چشم‌انداز (آینده) SCC در صنعت بتن پیش‌ساخته^۱ چنین به نظر می‌رسد که SCC در بتن پیش‌ساخته همایش کاملاً قوی از خود نشان نداده و برای همه جاها مناسب نمی‌باشد. روش صنعتی و پیره کماکان بکار گرفته می‌شود. یک کاربر بتن پیش‌ساخته باید اطلاع دقیقی از ترکیب و پیچیدگی تعویض کاربرد بتن معمولی به بتن SCC داشته باشد تا بتواند در کاربرد آن موفق باشد. علیرغم وجود تست‌های استاندارد مطمئن، دوام طولانی مدت خوب بوده و هیچ دلیلی برای غیرقابل پیش‌بینی بودن آن وجود نخواهد داشت. رویهم رفته بعضی از مواد بکار برده شده SCC کنونی در گذشته به کار برده می‌شده و دارای سابقه می‌باشد. این تکنولوژی همچنان در حال تکمیل شدن است و هیچ کس دقیقاً نمی‌داند به کجا خواهد رفت.

^۱ Precast

۱.۳.۱. الیاف

۱.۳.۱.۱. مقدمه

هر چند که از بدو پیدایش بتن، تحول اندکی در آن بوجود آمده، لیکن طیف وسیع کاربرد بتن عملاً بیانگر این مطلب است که مزایای بیشماری که این مصالح از آن برخوردار است، سایر موارد آن را تحت الشعاع قرار می‌دهد.

در طراحی یک پروژه، بکارگیری مصالح مناسب، مقاوم و ارزان از مهمترین وظایف یک مهندس به حساب می‌آید. یکی از مهمترین و ارزان‌ترین مصالح موجود که در دنیا کاربرد وسیعی دارد، بتن است. مزایایی که بتن از آن برخوردار است باعث شده که مورد علاقه اکثر مهندسين، طراحان و کارفرمایان باشد از عمده‌ترین مزایای بتن، امکان بکارگیری آن در اغلب مناطق جغرافیایی، استفاده از مصالح طبیعی و ارزان، دارا بودن هزینه کم در مقایسه با حجم زیاد عملیات، شکل‌پذیری آن با توجه به اشکال هندسی طرح، امکان مکانیزه کردن عملیات، عدم نیاز به نگهداری پرخرج بنا در طول عمر بهره برداری و ... است.

بکارگیری بتن غیر مسلح بعلاوه تردی^۱ آن بجز از سازه‌های وزنی عملاً کاربرد چندانی ندارد. این عیب عمده بتن در عمل، با مسلح کردن آن بوسیله میله‌های فولادی یا آرماتور برطرف می‌گردد. اما از آنجائی که آرماتور منحصراً بخش کوچکی از مقطع را تشکیل می‌دهد، تصور اینکه مقطع بتن یک مقطع ایزوتروپ و هموزن است، چندان صحیح نخواهد بود.

به منظور ایجاد شرایط ایزوتروپی و نیز کاهش ضعف شکنندگی و تردی جسم بتن تا حد ممکن، در چند دهه اخیر از رشته‌های نازک و نسبتاً درازی که در تمام حجم بتن، بطور همگن و درهم پراکنده می‌گردد، استفاده می‌شود.

کاربرد اینگونه رشته‌ها یا الیاف^۲ در بتن و بطور کلی در ملاترها قدمت تاریخی دارد. انواع الیافی که در ربع قرن اخیر بطور وسیع در بتن و ملات‌های سیمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد الیاف شیشه‌ای^۳، پروپیلن^۴، فولادی^۵، آزبست^۱ و نایلونی^۲ می‌باشد که اثر هر یک از انواع الیاف بر خواص و

1 -Brittle

2 -Fiber

3 -Class fiber

4 -Propylen

5 -Steel Fiber

تکنولوژی بتن مبحث جداگانه و طولانی را به خود اختصاص می‌دهد.

کاربرد الیاف به منظور بهبود بخشیدن به خواص بتن، کاربرد وسیعی را در سازه‌های بتنی و بتن مسلح پیدا کرده‌است.

اثرات مثبت کاربرد الیاف در بتن، به شرح ذیل می‌باشد:

۱. افزایش مقاومت خمشی
۲. افزایش مقاومت برشی
۳. افزایش مقاومت کششی
۴. افزایش مقاومت در برابر بارهای دینامیکی بویژه بارهای ضربه‌ای
۵. افزایش در مقاومت مقطع در قبال ترک خوردگی
۶. افزایش در میزان جذب انرژی
۷. کاهش در میزان انقباض، خزش و سایش سطحی

۱،۳،۲. تاریخچه الیاف

در زمانهای گذشته، از الیاف جهت تقویت ملاتهای ترد و شکننده استفاده می‌شد که مشهورترین و پرتعدادترین آن که به علت ارزانی قابل دسترسی بوده و هست «کاه» می‌باشد که برای تقویت آجرهای خستی و ملات کاهگل در اندودها در قبال ترک خوردگی که بعد از خشک شدن بوجود می‌آید، بکار رفته و در حال حاضر نیز ارزانتترین نوع ملات در مناطق روستایی کشور است. از موی گوساله، بز و یا موی دم اسب نیز برای تقویت مقاومت کششی، خمشی و ترک خوردگی ملاتهای گچی و ساورج در قرون گذشته بطور وسیع استفاده می‌شده‌است و در حال حاضر از رشته‌های پنبه کوهی (ازبست) برای تقویت سیمان پرتلند استفاده می‌شود.

استفاده از کاه و مخصوصاً موی دم اسب و یا بز در بناهای قدیمی ایران بخصوص گنبدها سابقه طولانی و تاریخی دارد که بصیرت و اطلاع صاحبان فن را در مورد خواص الیاف نشان می‌دهد. کاربرد الیاف فولادی از اواسط قرن اخیر آغاز گردیده و تاریخ دقیقی در مورد استفاده از این روش در دسترس نیست و لیکن افراد مختلف با استفاده از روشهای متفاوتی در داخل بتن، امتیاز این نوع روش را به نام خود به ثبت رسانده‌اند.

1 -Asbest

2 -Nylon Fiber

کاربرد گسترده بتن با الیاف فولادی از اواسط سال ۱۹۶۰ برای روسازی جاده‌ها، کف سالن‌های صنعتی، جداره کوره‌ها و ... انجام گرفته‌است. [7]

تجربیات بدست‌آمده از بتن الیافی، با استفاده از الیاف فولادی با مصالح سنگی معمولی و سیمان پرتلند، عمدتاً در ایالات متحده بوده‌است. از کاربرد بتن الیافی در ایران اطلاعات دقیقی در دست نیست و تنها مورد کاربرد بتن الیافی در سرریز سد امیرکبیر است که آن هم توسط شرکت‌های خارجی در حد محدودی اجرا شده‌است.

مهمترین الیافی که بطور وسیع استفاده می‌شود شیشه‌ای است که تجارب کاربرد این نوع الیاف همزمان با شوروی و انگلستان در سال ۱۹۵۰ در آمریکا آغاز شد.

کاربرد این تکنیک عمدتاً با استفاده از عمل اسپری الیاف شیشه‌ای و خمیر پرمایه سیمان از دو مجرا که بطور همزمان بر روی یک سطح پاشیده انجام می‌گیرد. بعد از این عمل با استفاده از غلتک و یا ماله‌های لرزان هوای داخل جسم خارج شده و ترکیب خمیر سیمان و الیاف شیشه‌ای تحکیم می‌گردد.

۲.۳.۱. انواع الیاف

از انواع الیاف که در بتن مورد استفاده قرار می‌گردد می‌توان الیاف فولادی، پلاستیکی، شیشه‌ای، طبیعی را نام برد که در اشکال و اندازه‌های مختلف تولید می‌شود.

پارامتر مناسب که یک رشته از الیاف را تعریف می‌کند نسبت ظاهری^۱ می‌باشد که نسبت طول الیاف^۲ به قطر معادل الیاف است. مقدار نسبت‌های ظاهری (L/d) معمولاً ۳۰ تا ۱۵۰، به طولهای ۰.۶ تا ۷.۵ سانتی‌متر است. الیاف فولادی صنعتی معمولاً از نسبت L/d حداکثر ۱۲۵ برخوردار هستند. الیاف شیشه‌ای مخصوص (تارهای بریده‌شده) دارای قطرهایی بین ۰.۰۰۵ تا ۰.۱۵ میلی‌متر هستند که این نوع الیاف ممکن است در تولید عناصری با الیاف شیشه‌ای به یکدیگر اتصال یابند که در اینصورت قطر الیاف اتصال یافته به ۰.۱۳ تا ۰.۳ میلی‌متر می‌رسد.

از پلاستیک‌های مخصوصی نظیر نایلون، پلی‌پروپیلن^۳، پلی‌اتیلن^۴، پلی‌استر^۵ رینون^۶ نیز

الیافی به قطرهای ۰.۰۲ تا ۰.۳۸ میلی‌متر ساخته شده‌است. [7]

1 -Aspect Ratio

2 - قطر معادل الیاف، قطر دایره‌ای است که سطح آن برابر با مساحت سطح مقطع الیاف باشد.

3-Polypropylene

4 -Polyethylene

5 -Polyester

6 -Rayon

الیافی که از مواد طبیعی نظیر آریست و کتان ساخته می‌شود اندازه‌های مختلفی دارند.

جدول ۲-۱: خواص انواع مختلف الیاف

نوع الیاف	وزن مخصوص gr/cm^3	حداکثر تغییر طول (درصد)	مدول یانگ ۱۰-۳ Ksi	مقاومت کششی Ksi	نوع الیاف
Acrylic	۱.۱	۲۵-۴۵	۰.۳	۳۰-۶۰	آکریک
Asbestos	۳.۲	~۰.۶	۱۲-۲۰	۸۰-۱۴۰	آریست
Cotton	۱.۵	۳-۱۰	۰.۷	۶۰-۱۰۰	کتان
Glass	۲.۵	۱.۵-۳.۵	۱۰	۱۵۰-۵۵۰	شیشه
Nylon (high tenacity)	۱.۱	۱۶-۲۰	۰.۶	۱۱۰-۱۲۰	نایلون خیلی سفت
(high tenacity) Polyester	۱.۴	۱۱-۱۳	۱.۲	۱۰۵-۱۲۵	پلی استر خیلی سفت
Polypropylene	۰.۹۵	~۱۰	۰.۰۲-۰.۰۶	~۱۰۰	پلی اتیلن
Polypropylene	۰.۹۰	~۲۵	۰.۵	۸۰-۱۱۰	پلی پروپیلن
Rayon (high tenacity)	۱.۵	۱۰-۲۵	۱.۰	۶۰-۹۰	ریون خیلی سفت
Rock Wool (Scandinavian)	۲.۷	~۰.۶	۱۰-۱۷	۷۰-۱۱۰	پشم کوهی
Steel	۷.۸	۰.۵-۳۵	۲۹	۴۰-۴۰۰	فولاد

$$1ksi = 70.31kgf / cm^2$$

۱,۳,۳. افزودن الیاف به بتن

الیاف مختلف مزایا و معایب متفاوتی دارند، به عنوان مثال، الیاف ارگانیک^۱ (آلی) مانند نایلون و پروپیلن مقاومت چسبندگی کمی دارند و لذا حتی در درصدهای حجمی نسبتاً کم نیز موجب افزایش مقاومت ضربه‌ای بتن می‌گردد. طول این نوع الیاف‌ها نیز عامل مهمی در تعیین مقاومت ضربه‌ای است، اما این نوع الیاف بخاطر کاهش ضریب ارتجاعی بتن معمولاً مقاومت کششی آن چندان افزایش نمی‌دهند.

الیاف کربنی مقاومت بتن حاصل را در دوره‌های آب و هوایی مختلف سال و نیز در شرایط یخ‌زدگی و ذوب یخ محیط حفظ می‌کند، اما این نوع الیاف ضریب ارتجاعی محوری را ممکن است ۱۵٪ الی ۲۰٪ کاهش دهند.

امروزه مشخص شده‌است که وجود الیاف موجب افزایش کرنش ترک خوردگی کششی بتن می‌گردد این موضوع برای ملات سیمان مسلح شده با انواع الیاف در کشش مستقیم ثابت شده‌است. الیاف شیشه‌ای و کربنی نسبت به عوامل مخرب در سطح بتن بسیار حساس هستند، لذا بهتر است سطح بتن با ملات یا بتن خالص اندود گردد اما الیاف پلیمری این ویژگی را ندارند. شکل‌پذیری بتن مسلح شده با الیاف شیشه‌ای با گذشت زمان کاهش می‌یابد. که این مشکل با افزودن مقدار کمی الیاف با ضریب ارتجاعی کم مانند نایلون و پلی‌پروپیلن جبران می‌گردد. هر چند این کار ممکن است موجب کاهش مقاومت گردد.

عملکرد الیاف پلیمری مانند الیاف نایلونی و پروپیلنی و نیز الیاف کربنی در چسبندگی الیاف با بتن کاملاً مکانیکی است و مقاومت چسبندگی به عملکرد کلیدی^۲ بین بتن و رشته‌های الیاف دارد، اما عملکرد الیاف شیشه‌ای بدلیل حمله قلیایی سیمان و تغییر مشخصات سطح تماس الیاف با بتن، با گذشت زمان تغییر می‌کند. عملکرد الیاف فولادی ترکیبی از چسبندگی، اصطکاک و قفل‌شدگی^۳ مکانیکی الیاف با بتن است هر چند بدلیل عکس‌العمل‌های سطحی، بعضی اندر کنش‌های شیمیایی نیز می‌تواند رخ دهد.

چقرمگی^۴ (تحمل شکست، طاقت شکست) معرفت قابلیت جذب انرژی مصالح در مدت تغییر شکل است، که از مساحت زیر نمودارهای تنش - کرنش یا بار - تغییر شکل قابل تعیین

1-Organic
2-Keying action
3-Interlocking
4-Toughness

می‌باشد وجود ییاف موجب افزایش چقرمگی بتن می‌گردد. [8]

۱.۳.۴. مزایای بتن ییافی

بتن معمولی یک ماده نسبتاً ترد و شکننده است، در حالیکه بتن ییافی چون دارای مقاومت زیادتر و خاصیت جلوگیری از ترک خوردگی را داراست، لذا نسبت به بتن معمولی برتری دارد. مزایای بتن ییافی در مقایسه با بتن معمولی را، می‌توان بطور خلاصه به شرح ذیل بیان داشت:

۱) مقاومت در مقابل تورق، سایش و هوازگی^۱ سطح

۲) مقاومت زیاد در مقابل تنش‌های خستگی

۳) مقاومت بسیار عالی در مقابل ضربه

۴) قابلیت کشش عالی (ظرفیت زیاد تغییر شکل نسبی)

۵) قابلیت باربری زیاد بعد از ترک خوردگی

۶) مقاومت کششی، خمشی و برشی زیاد

۷) طاقت خیلی زیاد

یک مزیت بارز بتن ییافی، ظرفیت کاری^۲ زیاد آن است. [9] ظرفیت کاری در این متن به مفهوم ظرفیت یک جسم به منظور تبدیل کار خارجی به:

الف) انرژی کرنشی ذخیره‌شده قابل تغییر

ب) کار داخلی، با تشکیل ترک‌های جدید با رها شدن و تغییر شکل ییاف و یا تولید حرارت می‌باشد.

قابلیت انعطافی که بتن ییافی دارد، همانند خواص مواد پلاستیکی باعث می‌شود که بتن ییافی گسیختگی ناگهانی نداشته‌باشد. از آنجا که ییاف در جسم بتن بطور سه بعدی و به بیانی بهتر چند بعدی پراکنده می‌شود، در صورت تشکیل یک ترک که معمولاً انتظار تغییر شکل می‌رود، در جهات مختلف، ییاف اتصالاتی را بوجود آورده و از گسترش ترک جلوگیری می‌نماید. بنابراین رشته‌های ییاف بطور فعال در محدود کردن عرض ترکها وارد عمل شده و با تشکیل ریز ترکهای زیاد همکاری می‌نماید و در نتیجه قابلیت بهره‌برداری بتن افزایش می‌یابد.

1-Spalling

2-Working Capacity

۱,۳,۵. رفتار گسیختگی بتن الیافی

رفتار گسیختگی ترکیب های سیمانی ممکن است با استفاده از مفهوم منحنی مقاومت رشد ترک ۱ (R) بیان گردد، که این منحنی بیانگر انرژی لازمه ۲ در واحد طول ترک در یک جسم سیمانی است.

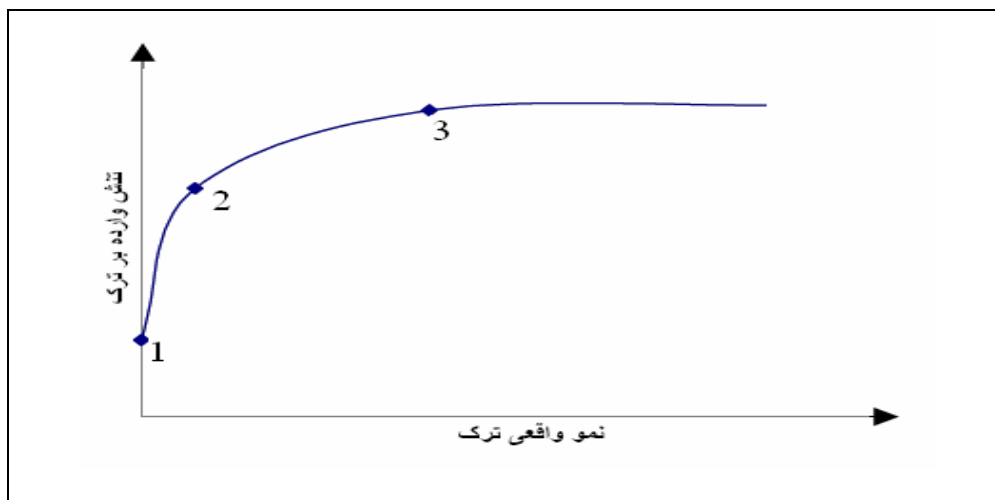
منحنی R به عنوان خاصیت یک جسم سیمانی بیان می شود. نمونه ای از منحنی R در شکل (۵-۱) نشان داده شده است که در آن سه حالت مختلف رشد ترک به صورت زیر تعریف می شود:

۱- شروع ترک ۳

۲- نمو آهسته و ثابت ترک ۴

۳- حالت یکنواخت و پیوسته گسترش ترک ۵

برای گسترش یک ترک در جسمی با ازدیاد طول ترک در مرحله رشد آهسته و ثابت ترک، انرژی لازمه افزایش یافته و حتی به یک مقدار ثابت که در اینجا بعنوان حالت یکنواخت و پیوسته یا انرژی بحرانی نامیده می شود، می رسد. [10]



شکل ۵-۱ یک نمونه منحنی مقاومت رشد ترک R

- 1-Crack Growth Resistance Curve Concept
- 2 -Energy Demand
- 3 -Crack Initiation
- 4 -Slow Stable Crack Growth
- 5 -Steady State Crack Propagation

فصل دوه

هروري پر مطالعات انجام

شده

فصل دوم

۱.۲. مقدمه

با وجود خصوصیات جذاب SCC، عامل اصلی که موجب متداول نشدن استفاده از این نوع بتن در اکثر کشورها گردیده، فقدان روابط و ضوابط لازم و کافی برای طراحی اجزاء سازه‌ای می‌باشد. بعد از اینکه برای اولین بار بتن SCC توسط اوکامورا از ژاپن تولید شد، تاکنون تحقیقات و مطالعات زیادی بر روی خواص این نوع بتن، به عنوان نسل جدیدی از صنعت بتن سازی، انجام گرفته است. اما می‌توان اظهار داشت که در زمینه خواص تکنولوژیکی و مخصوصاً در حیطه بررسی رفتار سازه‌ای تحقیقات خیلی کمی صورت گرفته‌است.

در این فصل مروری بر تحقیقات انجام گرفته بر روی بتنهای SCC، و همچنین بتنهای تقویت شده با الیاف^۱ به ویژه الیاف پلی پروپیلین از سال ۱۹۸۳ شده است.

در زمینه استفاده از الیافهای مختلف در بتن معمولی و ساخت بتنهای تقویت شده با الیاف (FRC)، با انواع مختلفی از آنها از جمله: الیافهای فولادی^۲، الیافهای پلیمری، الیافهای شیشه^۳ و ...، تحقیقات فراوان است. که در این فصل به بعضی از این مقالات در خصوص بتنهای تقویت شده با الیاف پلی پروپیلین (PFRC) که موضوع اصلی این پروژه می‌باشد، پرداخته می‌شود.

در مورد بتنهای خودمتراکم تقویت شده با الیاف (FRSCC) نیز مطالعات بسیار اندک می‌باشد و در مورد الیاف پلی پروپیلین نیز می‌توان گفت که تحقیقات بسیار ناچیزی صورت پذیرفته است. چراکه مهمترین خواص و تفاوتهای بتن خودمتراکم در مقایسه با بتن عادی، در کارایی بتن تازه آنهاست و همانگونه که می‌دانیم تقریباً تمامی الیافهای تقویتی موجود، اثر کاهشی مستقیمی را بر روی کارایی بتن دارند. از اینرو در مورد بتنهای با الیاف پلی پروپیلین از نوع خودمتراکم می‌توان اظهار داشت که مطالعات خاصی صورت نپذیرفته است.

در زیر مروری خواهیم داشت بر مقالات و تحقیقات علمی دنیا در مورد بتن خود متراکم، و بتنهای تقویت شده با الیاف پلی پروپیلین (PFRC) که از روشهای بکار رفته در این مقالات جهت طرح اختلاطها استفاده شده است.

¹ Fiber Reinforced Concrete (FRC)

² Steel Fiber

³ Glass Fiber

از طرف دیگر در این فصل به بررسی تحقیقاتی پرداخته می‌شود، که هدف اصلی این فعالیت، جمع‌آوری اطلاعات در مورد خواص بتن خود متراکم سخت شده‌ای که به سادگی به وسیله مصالح خام محلی در اسکاتلند تولید شده، می‌باشد. که برای نیل به هدف، خواص مهندسی SCC در نمونه‌های کوچک و همچنین در سازه‌های با ابعاد بزرگ و واقعی باید با خواص بتن معمولی مقایسه شود. به همین جهت دو مقوله اساسی برای بتن در این تحقیق در نظر گرفته شد:

یک مقوله ساختمانی و دیگری مقوله مهندسی با مقاومت مشخصه نمونه مکعبی به ترتیب ۳۵ مگاپاسکال و ۶۰ مگاپاسکال.

بتن مورد مصرف در این تحقیق، در یک کارگاه بتن صنعتی ساخته شد و خواص مکانیکی نمونه‌های تهیه شده از جنبه‌های مختلف مورد بررسی و آزمایش قرار گرفتند که بررسی مقاومت فشاری و خمشی و مقاومت پیوستگی بتن با آرماتور و فولادگذاری و مدول الاستیسیته از این جمله اند. آزمایش بتن تازه، جزئی از تحقیق و پژوهش نبود، اما برای کنترل طرح اختلاط و اهداف پذیرش لازم بود. همچنین عناصر با ابعاد بزرگ در دو مرحله آزمایش شدند. ابتدا یک تعداد آزمایش در جا انجام شد و بعد آزمایشهای بارگذاری برای شکست و گسیختگی بر روی آنها انجام شد.

۲.۲. مروری بر خواص مکانیکی بتن های سفت شده SCC [11]

اطلاعات مربوط به ۷۰ تحقیق مربوط به سالهای اخیر بر روی خواص مکانیکی بتنهای خودمتراکم برای مقایسه با خواص مکانیکی بتنهای عادی جمع آوری و مورد آنالیز قرار گرفته است. پراکندگی قابل توجهی از میان این مقادیر فراوان حاصل از محدوده وسیعی از مواد و طرحهای مختلف SCC بدست آمد، اما روابط تقریباً صریحی از ارتباط مقاومت فشاری مکعب^۱ و استوانه، مقاومت فشاری و کششی، مقاومت فشاری و مدول الاستیسته بدست آمد. همچنین واضح است که پودر سنگ، به عنوان یک افزودنی رایج در SCC، کمک قابل توجهی به خواص آن می کند.

قدرت پیوند SCC با تقویتها و پیش تنیدگی فولاد، مشابه و در بعضی موارد بالاتر از بتن معمولی نیازمند ویبره^۲ است. تغییرات خواص المانهای سازه ای ریخته شده با SCC به صورت درجا با بتنهای عادی مشابه است و کارایی المانهای سازه ای بطور وسیعی توسط خواص مواد اندازه گیری شده پیش بینی می شود.

بررسی انجام شده نشان می دهد که اطلاعات کافی برای اطمینان به رفتار کلی SCC بدست آمده است و تحقیقات آینده نیاز است تا فقط بر روی موارد کاربردی خاص، اطلاعات تأییدی و مخصوص فراهم شود.

از وقتی که SCC به صنعت ساخت و ساز در دهه ۹۰ معرفی شد، دستیابی و ارزیابی خواص تازگی، بخش اعظم کارهای انجام شده توسط بخش توسعه و تحقیق بوده است. با این حال، در مورد خواص بتن سخت شده SCC، که بخش قابل توجه طراحان و استفاده کنندگان است، اطلاعات مفیدی جمع آوری شده است.

مقاومت فشاری و دیگر اطلاعات مقاومتی به صورت عادی در پیشرفت تحقیقات اختلاط بدست آورده می شود. دیگر خواص مثل مدول الاستیسته، خزش، جمع شدگی، پیوند بین بتن و فولاد و همچنین دوام بتن^۳ اغلب نیاز به تحقیقات و بررسی های ویژه بیشتری با اهداف و ابعاد مختلف دارد. در بیشتر این بیشمار تجسس و تحقیق تقریباً به تعداد کمی از مخلوطها و رنج محدودی از خواص بسنده شده است. تا کنون برخی نشریات بصورت عمده خلاصه ای از مشخصات کلی و دستورالعملهایی بوسیله کمیته های ملیتی و بین المللی تولید شده است. این اسناد برای استفاده کنندگان شکل گرفته و همه جنبه های SCC را پوشش می دهد. بخش های مربوط به خواص سخت

¹ Cube compressive strenght

² Normal Vibration Concrete

³ Durability

شده تقریباً کوتاه و خلاصه است. کلاگ و همکارانش^۱ یک مجموعه اطلاعاتی را از تعداد منابع نامعینی در مورد مقاومتها و الاستیسیته و همچنین زمان تغییر شکل جمع آوری کردند و آن را در ارتباط با مقادیر و محدودیتهای بررسی کردند.

مقدار مواد استفاده شده در SCC بطور وسیعی شروع به رشد کرد. به علاوه بیشتر نوشته‌ها در مجلات علمی و کنفرانسها به جنبه‌های مختلف تکنولوژی بتن و عناصر آن علاقه مند شدند. همچنین SCC بطور ویژه ای در ۷ سال اخیر، شش کنفرانس بین المللی^۲ را به خود اختصاص داد و یک بررسی جامع تر و منتقدانه تر بر روی حجم قابل توجهی اطلاعات موجود در زمینه خواص سخت شده نسبت به آنچه تاکنون صورت گرفته، انجام شود.

۱.۲.۲. مقاومت فشاری

برخی مطالعات بطور ویژه ای روی مقاومت متمرکز است و برخی دیگر با هدف تحقیق بر روی دیگر خواص (نظیر خزش^۳، جمع شدگی^۴ و دوام و ...) مقاومت فشاری را هم شامل بودند. کمیتهای مناسب برای آنالیز موجود می‌باشد.

برای رسیدن به ترکیب SCC رضایتبخش با روانی و پایداری بالا نیاز است که حجم بالایی پودر در مقابل نسبت کمی آب به پودر با مقدار کافی SP (در بعضی موارد همراه با VMA) استفاده شود. بطور کلی پودر استفاده شده ترکیبی از سیمان و افزودنیهای از قبیل پودر سنگ، خاکستر بادی، خاکستر نرم شده مواد سوختی^۵، GGBS و یا میکروسیلیس^۶ (یا میکروسیلیس فشرده شده^۷) می‌باشد. بنابراین مقدار این مواد پودری و نسبت آب به پودر مقدار مقاومت را تابعی از خود می‌کند.

تأثیر این افزودنیها می‌تواند بوسیله ضریب تأثیر چسبندگی^۸ تعیین شود. این عامل با ضرب شدن در مقدار پودر اضافه شده، مقدار معادل سیمان آن را می‌دهد که این مقدار با مقدار سیمان واقعی جمع شده و برای محاسبه نسبت آب به سیمان معادل استفاده می‌شود. این روش برای تخمین مقاومت طرح اختلاط مفید است. در بیشتر تحقیقات که شامل مقایسه خواص SCC و NVC

¹ Klug et al.

² RILEM symposia 1-4: Stockholm (1999), Tokyo (2001), Reykjavik (2003), Chicago (Oct/Nov 2005); North American symposium 1 (2002), China symposium (2005).

³ Creep

⁴ Shrinkage

⁵ Pfa: pulverized fuel ash

⁶ Silica fume

⁷ Csf: condensed silica fume

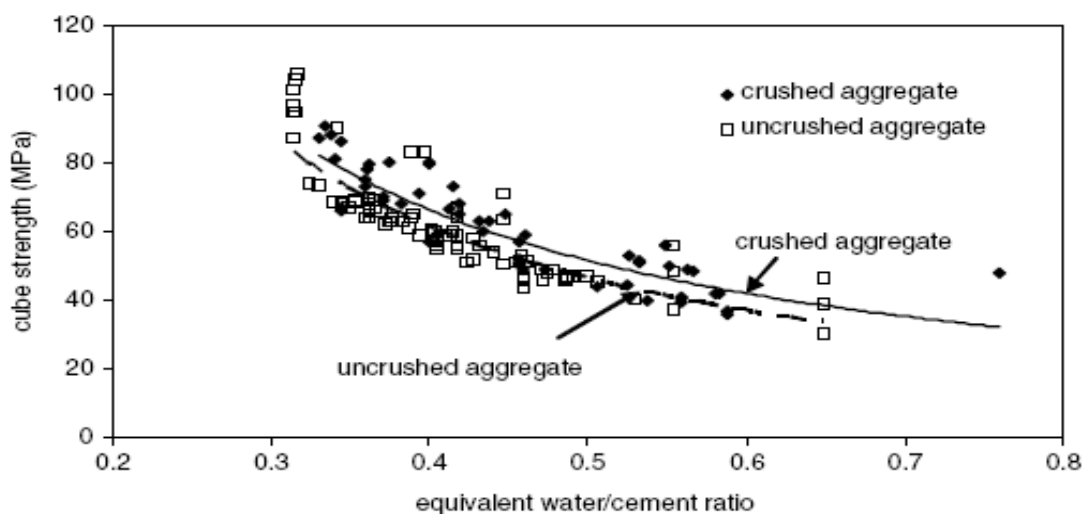
⁸ Cement efficiency factor

می‌باشد برای تخمین فاکتور k می‌توان مراحل زیر را طی کرد:

- کشیدن تغییرات نرمال مقاومت با نسبت آب به سیمان برای سیمان پرتلند تیپ I
- تعیین نسبت آب به سیمان معادل برای سیمان با ماده افزودنی
- بدست آوردن ضریب k با انجام یک محاسبه ساده

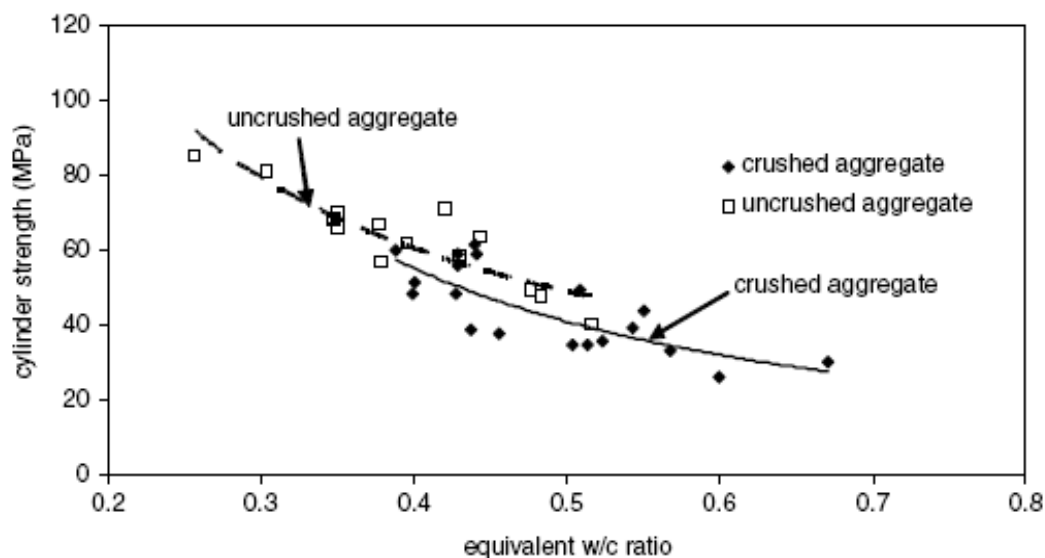
مقدار k بدست آمده در آنالیز مطرح شده زیر استفاده می‌شود. بعد از اینکه نتایج رابطه مقاومت و نسبت آب به سیمان معادل مشخص شد.

نوع آزمایش، مکعبی یا استوانه ای، نوع مصالح، شکسته یا غیر شکسته، بطور کاملاً مشخصی بر روی رابطه بین مقاومت و نسبت آب به سیمان معادل، موثر هستند و از اینرو داده‌های مورد سنجش قرار گرفته، تأثیر هر دو این پارامترها در نظر گرفته شده است. شکل ۱-۲ اطلاعات مربوط به رابطه مقاومت فشاری مکعبی و نسبت آب به سیمان معادل شده بر مخلوطهای SCC را برای هر دو نوع مصالح نشان می‌دهد. شکل ۲-۲ نیز همین رابطه مشابه را برای مقاومت فشاری استوانه ای نشان می‌دهد که این با توجه به تعداد منابع بحث شده، قابل پیش بینی بوده است. در حالت آزمایشات فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی (شکل ۱-۲) مصالح شکسته مقاومت بیشتری را در مقایسه با رفتار مشابه NVC نشان دادند. میزان حدود ۴ MPa به صورت میانگین بین دو منحنی عبوری برای داده‌ها در حالت مصالح شکسته و غیر شکسته اختلاف وجود دارد که کمتر از مقدار ۸ MPa فرض شده در مخلوطهای NVC است. در شکل ۲-۲ به نظر رفتار متفاوتی برای مقاومت استوانه نشان می‌دهد، که این هم از اطلاعات اندک با کمی پراکندگی و همپوشانی جزئی در مقادیر W/C برای SCC و NVC بدست آمده است.

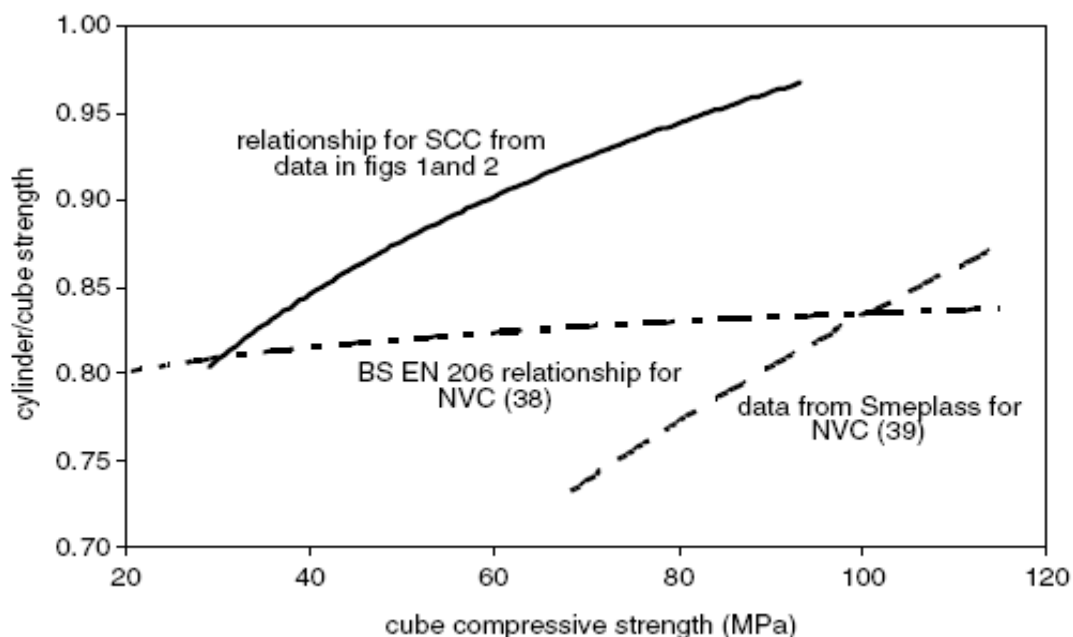


شکل ۱-۲: مقاومت فشاری مکعبی و نسبت آب به سیمان معادل [11]

با دسته بندی این اطلاعات برای مقاومت های فشاری و مکعبی و استوانه ای رابطه بین مقاومت فشاری مکعبی و نسبت مقاومت استوانه به مکعب در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. این نسبت با افزایش مقاومت، از ۰/۸-۱ متغیر است و محدوده وسیعی در رنج ۰/۹-۱ را شامل می شود و بطور مشخصی با نسبت محدوده ۰/۸-۰/۸۳ که برای کلاس مقاومتی در نظر گرفته شده در استاندارد BS EN 206-1، متفاوت است.



شکل ۲-۲: مقاومت فشاری استوانه و نسبت آب به سیمان معادل [11]



شکل ۲-۳: رابطه بین مقاومت فشاری مکعبی و استوانه ای [11]

۲.۲.۲. ضریب تأثیر چسبندگی (سیمانی)

با توجه به مطالب ذکر شده فوق، تنها نتایج حاصل از مخلوطهای دوتایی با سیمان پرتلند تیپ I برای محاسبه ضریب k استفاده شده است. برای بدست آوردن ضریب k برای پودر سنگ اطلاعات کافی برای بدست آوردن این ضریب در روزهای ۱ و ۷ و ۲۸ وجود داشت ولی برای دیگر مقادیر k فقط نتایج مربوط به روز ۲۸ در دسترس بود. این نتایج در جدول ۱-۲ نشان داده شده است.

۳.۲.۲. مقاومت فشاری و کششی

بواسطه آزمایشات مقاومت کششی شامل شده در بسیاری از تحقیقات شکل ۲-۴ و ۲-۵ رابطه بین مقاومت کششی دو نیم شدن استوانه^۱ و مدول گسیختگی را به ترتیب با مقاومت فشاری مکعبی برای هر دو بتن NVC و SCC نشان می دهد. بطوریکه مقاومت‌های فشاری استوانه ای با توجه به شکل ۲-۳ به مقاومت فشاری مکعبی تبدیل شده‌اند.

برای هر دو نوع مقاومت، مقدار پراکندگی قابل توجه است. اما تفاوت مشهودی بین SCC و NVC دیده نمی‌شود. شکل ۲-۴ نشان می دهد که تقریباً همه نتایج آزمایش کششی دو نیم شدن استوانه در محدوده ۵-۹۵٪ داده شده در EuroCode2 مطابقت دارد و اکثریت در نیمه بالایی این محدوده قرار دارند و تعداد کمی از داده‌ها در نیمه پایینی قرار می گیرند. نتایج مدول گسیختگی (شکل ۲-۵) پراکندگی بالایی را با مقدار داده شده توسط CEB-FIP در سال ۱۹۹۰، نشان می دهد.

جدول ۱-۲: ضریب تأثیر چسبندگی (سیمانی) با توجه به بررسی داده‌های مقاومت فشاری [11]

میانگین ضریب تأثیر k			محدوده تغییرات افزودنی (در صدی از کل پودر /)	افزودنی
۲۸ روزه	۷ روزه	۱ روزه		
(۱۲۳) ۰/۲۹	(۱۲) ۰/۳۶	(۱۴) ۰/۲۲	۱۵-۵۵	Limestone powder
(۲۱) ۰/۵۶	-	-	۲۰-۶۰	pfa
(۵) ۰/۱۸۶	-	-	۳۷-۴۴	ggbs
(۶) ۰/۲۳	-	-	۲۵-۵۵	Chalk powder

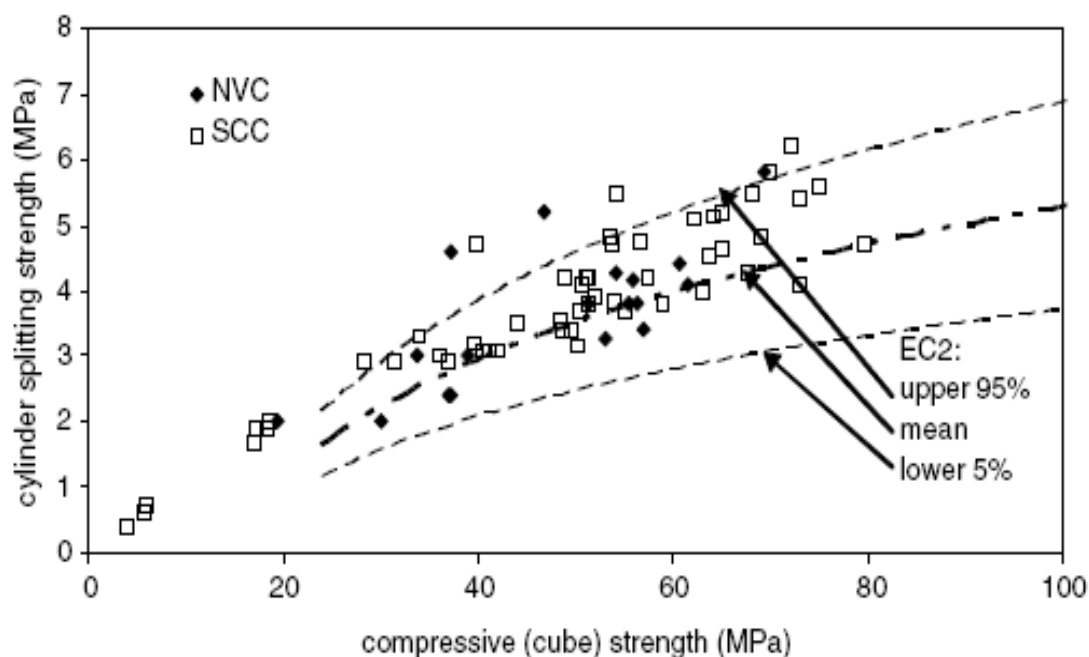
۴.۲.۲. مدول الاستیسیته

رابطه بین مقاومت فشاری مکعب و مقادیر مدول الاستیسیته برای NVC و SCC در شکل ۲-۶ نشان داده شده است. در اینجا نیز مقاومت های فشاری استوانه با توجه به شکل ۲-۳ به مقاومت

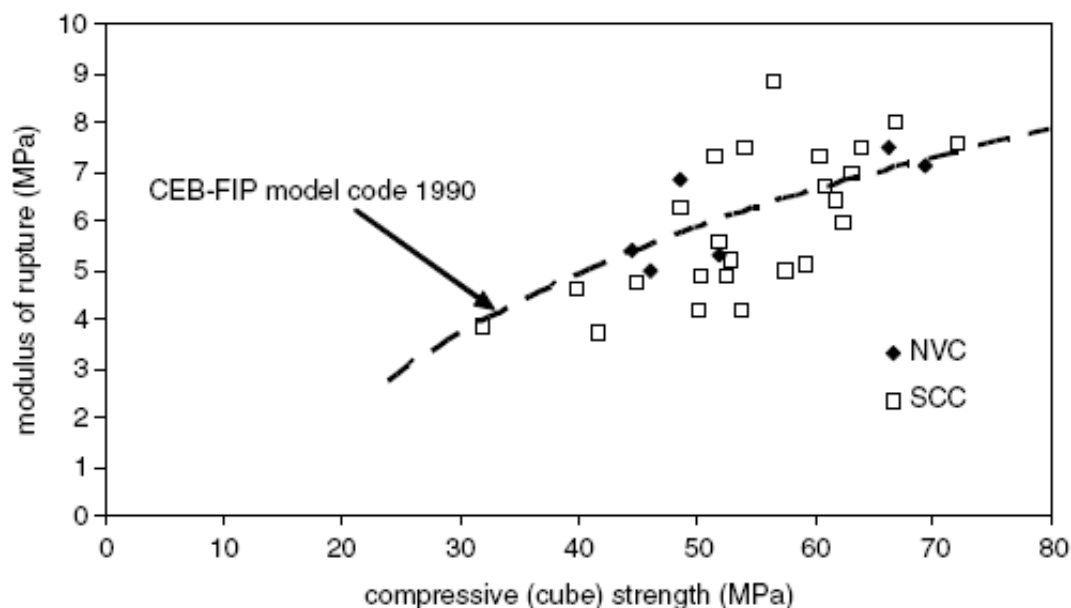
^۱ The cylinder splitting strength

فشاری مکعب تبدیل شده است.

اطلاعات هر دسته پراکندگی قابل توجهی را نشان می دهد. که این هم به سبب اختلاف در نوع مصالح و طرح اختلاط آنها می باشد. بهترین خط عبوری برای هر دسته کشیده شده است. در حالت NVC اطلاعات تقریباً به EC2 نزدیک است اما سختی در مخلوطهای SCC به طور متوسط ۴۰٪ برای مقاومت‌های پایین کمتر از NVC است و در مقاومت‌های بالاتر حدود ۵٪ است. که این رفتار به خاطر مقدار کم مصالح شنی و مقدار زیاد مواد پودری در SCC است.



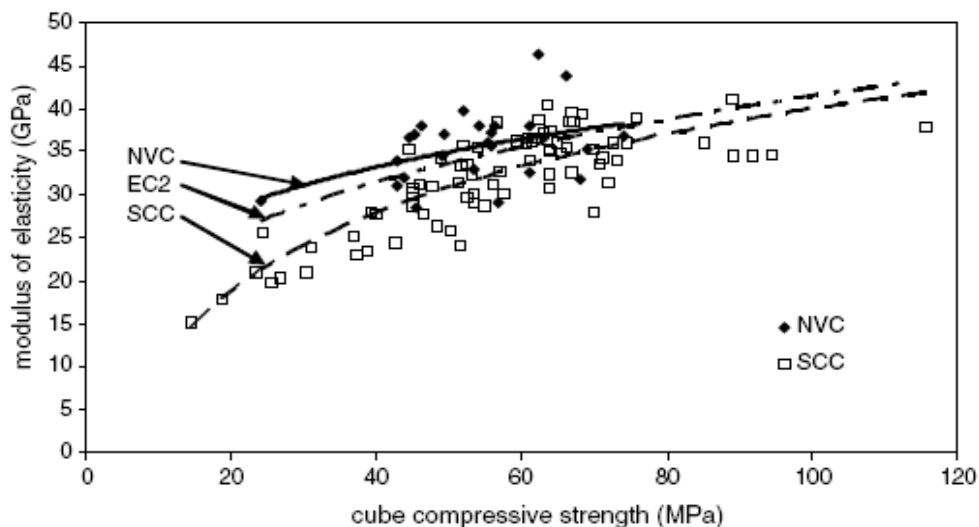
شکل ۲-۴: رابطه بین مقاومت دونیم شدن استوانه و مقاومت فشاری مکعبی [11]



شکل ۲-۵: رابطه بین مقاومت فشاری مکعبی با مدول گسیختگی [۱۱]

۵.۲.۲. نتایج

آنالیز و مقایسه اطلاعات بیش از ۷۰ تحقیق در مورد خواص مکانیکی بتنهای سخت شده SCC بطور قابل توجهی پراکندگی در اطلاعات هم در خود تحقیق و هم مابین تحقیقات مختلف نشان داده است که این هم با توجه به رنج مواد استفاده شده، طرح اختلاط های مختلف و روشهای مختلف آزمایش دور از ذهن نبوده است. با این حال تعدادی نتایج روشن در مورد رفتار بین SCC و NVC آورده شده است.



شکل ۲-۶: رابطه بین مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری مکعبی [۱۱]

۱- نتایج مقاومت فشاری نشان داده است که:

- اختلاف مقاومت بین اختلاط های مختلف با مصالح شنی شکسته و غیر شکسته در SCC کمتر است در مقایسه با NVC.
 - نسبت مقاومت فشاری استوانه به مکعب حدود ۰,۸ در مقاومت های ۳۰ MPA و نزدیک به ۰,۹ برای مقاومت های ۹۰ MPA می باشد که این همه مقاومتها بجز مقاومت های کم از مقدار معادل آن در NVC بیشتر است.
 - پودر سنگ به عنوان یک افزودنی مرسوم در SCC، بطور قابل توجهی در مقاومت تا سن ۲۸ روزگی همکاری می کند: ضریب تأثیر سیمانی آن بین ۰/۲-۰/۳ می باشد.
- ۲- مقدار نسبت بین مقاومت فشاری و کششی در SCC مشابه مقدار معادل آن در NVC است و بطوریکه برای هر دو نوع بتن این نسبت به صورت عمده در نیمه بالایی محدوده ارائه شده توسط EC2 می باشد.
- ۳- مدول الاستیسیته SCC در مقاومت های پایین (حدود ۲۰ MPA) می تواند تا ۴۰٪ کمتر از NVC باشد در حالی که برای مقاومت های بالا (۹۰-۱۰۰ MPA) اختلاف کاهشی این دو نوع بتن کمتر از ۵٪ می باشد.

۳,۲. تأثیر نسبت آب به سیمان بر روی خواص تازگی و سفت شدگی

بتن خودمتراکم [12]

استفاده از SCC با تکنیکهای اصلاحی در تولید آن هر روز در تولیدات بتن در حال افزایش است. با این حال روشهای طرح اختلاط و روشهای آزمایش هنوز در حال توسعه می باشد. ملاک طرح اختلاط اساساً بر روی نوع و سهم مخلوط هر یک از عناصر متمرکز می شود. تنظیم نسبت آب به سیمان و مقدار فوق روان کننده یکی از کلیدهای اصلی ویژگیهای تقسیم بندی عناصر مخلوط SCC است. در این تحقیق، ۵ مخلوط با ترکیبات متفاوت نسبت آب به سیمان و فوق روان کننده بررسی شده است. چندین آزمایش شامل اسلامپ روانی، V-Funnel، L-Box انجام شده است تا میزان پارامترهای بهینه در خودمتراکمی مخلوطها تعیین شود. مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی مخلوطها نیز همچنین بررسی شده است.

بتن خودمتراکم، نیاز به حذف کار متراکم سازی در کارگاهها و کارخانه های ساخت بتن، در ژاپن برای اصلاح قابلیت پایایی و غیر یکنواختی بتن در سال ۱۹۹۸ توسعه پیدا کرد. با این حال، طرح

یک مخلوط SCC مناسب یک امر ساده نبود. بررسی های مختلفی برای بدست آوردن روشهای طرح اختلاط منطقی برای SCC انجام شده است. بنای روشهایی برای ارزیابی درجه خودتراکمی یک کلیدی است که پی آمد آن در استقرار سیستم طرح اختلاط می باشد. اوکومورا و اوزاوا¹ یک سیستم ساده طرح اختلاط را پیشنهاد کردند. در این روش، میزان مصالح درشت دانه و ریزدانه ثابت نگهداشته می شوند تا اینکه خودتراکمی را به آسانی بتوان بوسیله تعدیل نسبت آب به سیمان و فوق روان کننده تعیین نمود.

نسبت آب به پودر ۰/۹-۱ حجمی پذیرفته می شود. با توجه به ویژگیهای پودر، در سوئد، پترسون و بیلبرگ روشهای مختلفی برای طرح اختلاط شامل ملاکهای انسداد، تخلخل و چسبندگی خمیر همچنین نتایج آزمایشات مشتق شده از تکنولوژی روانی خمیر چسبند ارائه داده اند. خیلی از محققین دیگر هم مشکلات نسبتهای اختلاط SCC را ارزیابی کرده اند. بعضی از طرحها، رهنمودهایی از قابل پذیرش بودن روشهای آزمایش تهیه می کند. در توزین اجزاء مخلوط در بتنهای سنتی، نسبت آب به سیمان با هدف رسیدن به مقاومت و دوام مورد نیاز ثابت نگهداشته می شود. در حالیکه در SCC، نسبت آب به پودر بسته به مقدار خود تراکمی، با توجه به اینکه خیلی به این نسبت وابسته می باشد، انتخاب می شود.

خیلی روشهای آزمایش مختلف در تلاش برای مشخص کردن SCC ایجاد شده اند. تا کنون روش یا ترکیب منحصر به فردی که به تصویب جهانی رسیده باشد ارائه نشده است و بیشتر آنها و طرفداران خود را دارند. همینطور یک روش منحصر به فردی پیدا نشده است که همه جنبه های کارایی مناسب را توصیف کند. بنابراین هر طرح اختلاطی باید بوسیله بیش از یک روش آزمایش با هدف رسیدن به پارامترهای کارایی مختلف، آزمایش شود.

برای کنترل کیفیت کارگاه، دو روش آزمایش کلاً برای بیان کیفیت تولید کافی است. نمونه ترکیبات اسلامپ روانی و V-Funnel و یا اسلامپ روانی و J-ring. با این حال، پرکنندگی و قابلیت عبور نمی تواند به خوبی توسط آزمایش اسلامپ به تنهایی ارزیابی می شود. یکی از دو آزمایش U-BOX و L-BOX می تواند به عنوان نماینده قابلیت عبورپذیری، انجام شود. دیگر پارامتر طرح اختلاط پایداری در مقابل جداسدگی در SCC است بطوریکه خیلی مشکل می باشد که در آزمایشگاه تعیین شود. با هدف پیدا کردن پایداری جداسدگی SCC، آزمایشات پایداری ته نشینی GTM، نفوذ، ته نشینی ستون و آزمایش درزگیری مونیخ ایجاد شده اند و با موفقیت انجام شدند. از دیدگاه علم تغییر شکل و

¹ Okamura and Ozawa

روانی مواد، یک SCC کامل بوسیله تنش تسلیم لزوماً پایین برای داشتن ظرفیت تغییر شکل بالا و ناروانی به تأخیر افتاده برای اطمینان حاصل کردن از آمیزش یکنواخت ذرات جامد در طول بتن ریزی، توصیف می‌شود. کم کردن مقدار آب و افزایش تراکم ذرات ریز دانه، می‌تواند پیوستگی و چسبندگی و در نتیجه پایداری SCC را بالا ببرد. آب مجاز^۱، مجموع آب کلی منهای آبی که به صورت فیزیکی و شیمیایی توسط مواد پودری و مصالح نگه داشته شده است و همچنین هر آبی که توسط مخلوط شیمیایی محدود شده است. در کل حرکت به سمت مینیموم کردن مقدار آب آزاد برای بالا بردن پایداری می‌تواند از مخلوطهای SCC با تنش تسلیم پایین و سطح ویسکوزیته متوسط و بالا نتیجه می‌شود. کم کردن حجم آب مخلوط مستلزم آن است که از مقدار نسبتاً بالایی از کاهنده‌های آب استفاده شده تا به تغییر شکل پذیری مطلوب دست یابیم و بویژه در رسیدن به این هدف از کمترین مقدار بیندر استفاده شود.

در این تحقیق، از ۵ مخلوط با یک میزان سیمان (377 kg/m^3) استفاده شده است. که در این مخلوطها میزان آب مجاز از ۲۲۷ به 140 kg/m^3 کاهش یافته است و متناظر با آن میزان فوق روان کننده از $3/7$ به 13 kg/m^3 افزایش یافته است تا میزان اسلامپ ۶۵-۸۰cm حاصل شود. محدوده وسیعی از SCC می‌تواند توسط کم و زیاد کردن مقدار آب و فوق روان کننده‌ها بدست آیند. هنوز رابطه واضح و صریحی بین مشخصات تعیین کننده در آزمایشات آزمایشگاهی (اسلامپ روانی و V-Funnel اگر از روش ژاپنی استفاده شود و یا تنش تسلیم و چسبندگی اگر از ویسکومتر استفاده شود) و شرایط مختلف در سایتهای ساختمانی (میزان تراکم تقویتها، میزان حجم بتن ریزی، دما و فاصله کارخانه سازنده تا محل و ...) وجود ندارد. هدف این تحقیق پیشنهاد کردن یک روش مناسب برای طرح اختلاط می‌باشد. خود تراکمی و ویژگیهای این مخلوطها توسط روشهای آزمایشی مختلفی تعیین می‌شود.

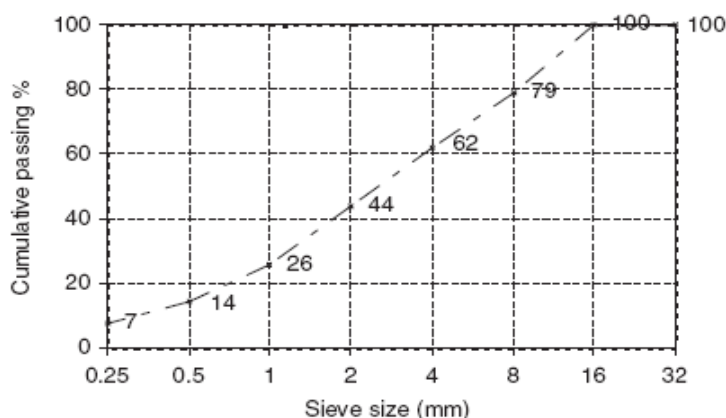
۱.۳.۲. تمقیقات آزمایشگاهی

۱.۱.۳.۲ مواد

سیمان پرتلند تیپ ۱ معمولی در همه ترکیبات بکار رفته است. وزن مخصوص و مقاومت ۲۸ روزه آن به ترتیب ۳/۱۲ و ۴۸/۵ MPa می‌باشد. از پودر سنگ برای بالابردن ویسکوزیته استفاده

^۱ Free water

شده است. با وزن مخصوص و سطح چسبندگی به ترتیب برابر $2/58$ و $4403 \text{ m}^2/\text{kg}$ استفاده شده است. فوق روان کننده استفاده شده پلی کربوکسیلیک با نام تجاری HS100 می باشد. این ماده یک کاهنده آب با محدوده بالا از نوع F می باشد (مطابق با ASTM C494). حجم جامد، PH و وزن مخصوص آن به ترتیب $35/7\%$ ، $6/5$ و $1/11$ می باشد. شن استفاده شده از مصالح شکسته سنگ معدن با ماکزیموم سایز دانه 15 mm می باشد. ماکزیموم اندازه مصالح با این هدف که از اثر انسداد در L-BOX جلوگیری شود انتخاب شده است. شکاف بین میلگردها در L-Box، 35 mm است. برای مصالح ریزدانه (ماسه) مخلوط سنگ خرد شده $5\text{mm}-0$ و ماسه رودخانه ای طبیعی استفاده شده است. منحنی دانه بندی مصالح مخلوط شده در شکل ۲-۷ نشان داده شده است.



شکل ۲-۷: منحنی دانه بندی شن و ماسه استفاده شده در طرحهای SCC [12]

۲.۱.۳.۲. نسبت‌های اختلاط

۵ طرح اختلاط SCC برای رسیدن به وضعیت‌های مختلف تازگی، با مقدار کاهش آب و به تناسب آن افزایش میزان فوق روان کننده و ثابت نگه داشتن میزان پودر و مصالح دانه ای ساخته شدند. که ترکیبات این پنج اختلاط در جدول ۲-۲ آورده شده است.

۲.۱.۳.۲. آزمایشات بتن تازه

۱۰۰ دسی مترمکعب برای همه مخلوطها تهیه شده است. ترتیب مخلوط کردن شامل همگن کردن شن و ماسه همراه با اضافه کردن سیمان و پودر سنگ و میزان آب مجاز می باشد. فوق روان کننده در نهایت به مخلوط تازه اضافه می شود. زمان بهینه مخلوط کردن، حدود ۵ دقیقه برای تثبیت خواص اسلامپ و V-Funnel کافی است.

جدول ۲-۲: منحنی دانه‌بندی شن و ماسه استفاده شده در طرح‌های SCC [12]

مواد	وزن (kg/m^3)				
	مخلوط ۱	مخلوط ۲	مخلوط ۳	مخلوط ۴	مخلوط ۵
سیمان پرتلند (C)	۳۷۷	۳۷۶	۳۷۷	۳۷۶	۳۷۷
پودر سنگ	۲۳۹	۲۴۶	۲۴۷	۲۴۳	۲۷۲
آب	۲۲۷	۲۰۳	۱۸۱	۱۵۸	۱۴۰
شن (SSD)	۵۶۲	۵۷۷	۵۹۳	۶۰۹	۶۳۰
ماسه (SSD)	۸۶۱	۸۸۶	۸۹۸	۹۳۲	۹۶۳
فوق روان کننده (HS100)	۳/۷	۶/۵	۷/۹	۹/۰	۱۳/۰
مجموع پودر (P)	۶۱۶	۶۲۲	۶۲۴	۶۳۹	۶۴۹
W/C (وزنی)	۰/۶	۰/۵۴	۰/۴۸	۰/۴۲	۰/۳۷
W/P (وزنی)	۰/۳۷	۰/۳۳	۰/۲۹	۰/۲۵	۰/۲۲
W/P (حجمی)	۱/۰۷	۰/۹۵	۰/۸۴	۰/۷۱	۰/۶۲
وزن مخصوص	۲۲۶۹	۲۲۹۳	۲۳۰۳	۲۳۴۶	۲۳۹۴

۳۰٪ از مقدار بتن ریخته شده در هر دفعه برای آزمایشات بتن تازه استفاده شده است. بقیه بتن باقیمانده برای نمونه‌های استوانه ای برای تعیین مشخصات مکانیکی بدون ویبره استفاده شده است. نمونه‌ها در آب آهکی و در دمای $20^{\circ}C$ نگهداری شده‌اند تا روز آزمایش. برای تعیین نمودن خواص خودتراکمی آزمایشات مختلفی انجام گرفته است و نتایج مربوط به این آزمایشات در ادامه ذکر خواهد شد. برای نشان دادن کاهش تأثیر عوامل تلف کننده کارایی با تغییرپذیری نتایج آزمایش، خواص تازگی مخلوطها در زمان ۳۰ دقیقه بعد از مخلوط کردن اندازه گیری می‌شود. قبل از انجام آزمایش SCC تازه دوباره به اندازه ۳۰ ثانیه مخلوط می‌شود. آزمایشات انجام شده به شرح زیر است:

- آزمایش روانی اسلامپ و اندازه گیری T50

- آزمایش V-flow

- آزمایش L-box

- اندازه گیری حجم هوای مخلوط

این آزمایشات بر اساس استاندارد EFNARC انجام شده است.

۴.۱.۳.۲. آزمایشات بتن سخت شده

برای مقاومت فشاری از نمونه‌های سیلندری به قطر ۱۰۰mm و ارتفاع ۲۰۰mm استفاده

شده است. نمونه‌ها بعد از ۱ روز از قالب بیرون آورده شده و در آب در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد تا روز آزمایش که ۱، ۷، ۲۸ روزه بوده است، نگهداری می‌شدند. شش نمونه در هر اختلاط استفاده شد و متوسط مقدار آنها گزارش شد. مقاومت کششی دو نیم شدن در ۲۸ روز بر روی نمونه‌های سیلندری به قطر ۱۵mm و ارتفاع ۳۰۰mm انجام شد و تا زمان آزمایش در آب نگهداری شدند. بر طبق استاندارد BS بخش ۱۱۷، سه نمونه در هر اختلاط برای این آزمایش در نظر گرفته شد.

مدول الاستیسیته بر طبق استاندارد BS بخش ۲، تعیین می‌شود. در این روش مدول الاستیسیته با توجه به فشار نمونه‌های سیلندری $150 \times 300 \text{ mm}$ که در آب نگهداری شدند انجام شد (در سنین ۱۴-۳ ماهگی).

در جدول ۲-۳ مقادیر متوسط، انحراف معیار و ضریب پراکندگی نتایج آزمایش آورده شده است. مقادیر پایین ضریب پراکندگی نتایج آزمایش، می‌توانند دلالت بر همگنی بالای مخلوط‌های SCC داشته باشند.

۲.۳.۲. نتایج آزمایشات

۱.۲.۳.۲. نتایج آزمایشات بتن تازه

مقدار اسلامپ روانی اختلاط‌های SCC بین دو مقدار ۶۵-۸۰ cm اندازه گیری شدند. مقدار مواد افزودنی می‌تواند به درستی مقدار اسلامپ روانی اولیه را بزرگتر از ۶۵cm تنظیم کند که این برای داشتن روانی مناسب لازم است. آزمایش اسلامپ روانی قابلیت بتن تحت تغییر شکل در اثر وزن خود در مقابل اصطکاک بوجود آمده در سطح بدون حضور قید خارجی را بررسی می‌کند. اسلامپ روانی تقریباً بعد از ۶۰ ثانیه بعد برداشتن قیف آزمایش اسلامپ اندازه گیری می‌شود. همچنین در آزمایش اسلامپ روانی زمان رسیدن اسلامپ به قطر ۵۰cm نیز به عنوان T₅₀ اندازه گیری می‌شود. بطور مشابه زمان آزمایش V-Funnel و آزمایش L-Box نیز مطابق استاندارد EFNARC نیز انجام می‌شود.

از نقطه نظر علم روانی و تغییر شکل ماده، بتن تازه می‌تواند به عنوان یک سیال با دو پارامتر تعریف شود که به ترتیب تنش تسلیم و چسبندگی پلاستیک می‌باشد. اسلامپ روانی، نمی‌تواند به خوبی مشخصات مربوط به رفتار تازگی بتن SCC را تعیین کند. یک مثال معمولی از این نارسایی در این تحقیق نشان داده شده است. اختلاط شماره ۱ (با نسبت آب به سیمان ۰/۶ و درصد روان کننده

۰/۶) و مخلوط شماره ۵ (با نسبت آب به سیمان ۰/۳۷ و درصد روان کننده ۱۳) دارای مقدار اسلامپ مشابهی هستند که به ترتیب برابر ۶۹cm و ۶۹,۵cm می باشد. در حالیکه رفتار آنها در آزمایش V-Funnel به ترتیب زمان ۳ و ۴۶ ثانیه می باشد. همچنین در آزمایش L-Box نیز دارای دو مقدار متفاوت ۰/۵ و ۰/۹۵ می باشد.

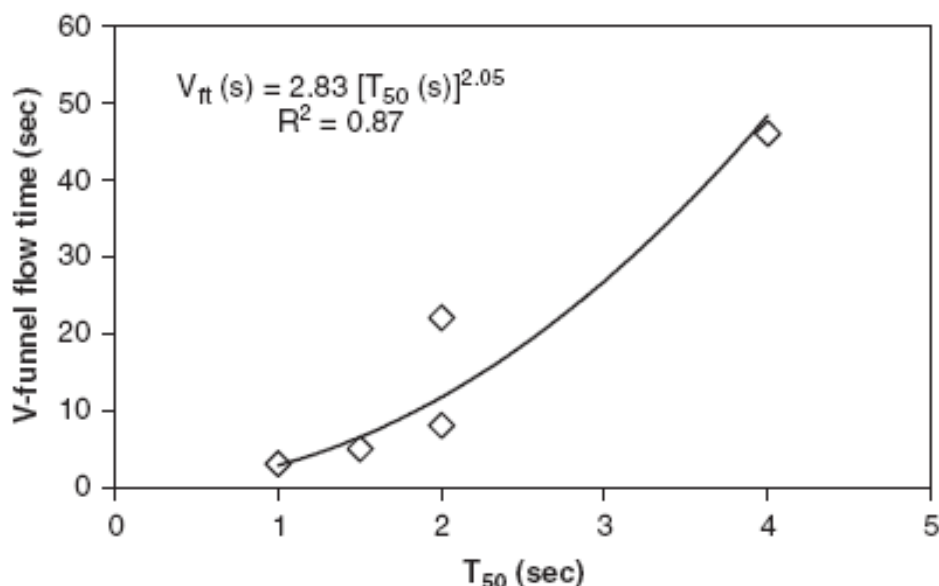
جدول ۲-۳: نتایج حاصل از آزمایشات بتن سخت شده [12]

انحراف معیار - میانگین (ضریب پراکندگی %)					تعداد نمونه های آزمایش شده در هر مخلوط	خواص بتن سخت شده
مخلوط ۵	مخلوط ۴	مخلوط ۳	مخلوط ۲	مخلوط ۱		
۱۲/۳۰-۰/۷۵ (۶/۰۶)	۱۶/۰۰-۱/۰۵ (۶/۵۵)	۱۵/۵۰-۰/۹۴ (۶/۰۷)	۲۰/۸۰-۱/۶۵ (۷/۹۵)	۲۲/۱۰-۱/۵۱ (۶/۸۱)	۵	مقاومت فشاری بتن ۱ روزه (MPa)
۱۹/۳۰-۰/۲۹ (۱/۵۱)	۳۰/۲۰-۰/۸۶ (۲/۸۵)	۳۰/۴۰-۱/۴۸ (۴/۸۶)	۴۰/۷۰-۱/۷۴ (۴/۲۸)	۴۶/۸۰-۲/۳۱ (۴/۹۴)	۵	مقاومت فشاری بتن ۷ روزه (MPa)
۳۶/۳۰-۱/۱۱ (۳/۰۵)	۴۲/۸۰-۱/۳۱ (۳/۰۶)	۴۶/۸۰-۲/۲۴ (۴/۷۸)	۴۹/۷۰-۳/۲۲ (۶/۴۹)	۵۶/۱۰-۲/۹۷ (۵/۲۹)	۵	مقاومت فشاری بتن ۲۸ روزه (MPa)
۳/۴۰-۰/۲۱ (۶/۱۸)	۳/۷۰-۰/۴۷ (۱۲/۶۶)	۳/۵۰-۰/۲۹۵ (۷/۱۲)	۳/۸۰-۰/۲۹ (۷/۶۶)	۴/۶۰-۰/۱۰ (۲/۱۷)	۳	مقاومت کششی دونیم شدن استوانه بتن ۲۸ روزه (MPa)
۲۵/۶۰-۲/۲۳ (۸/۶۹)	۳۵/۳۰-۰/۶۲ (۱/۷۷)	۳۳/۸۰-۱/۷۰ (۵/۰۲)	۳۴/۸۰-۰/۸۵ (۲/۴۵)	۳۷/۳۰-۰/۴۴ (۱/۱۷)	۳	مدول الاستیسیته بتن ۲۸ روزه (GPa)

تأثیر نسبت آب به سیمان و درصد روان کننده بر روی مقدار روانی اسلامپ و زمان V-Funnel در شکل ۲-۸ نشان داده شده است. با کاهش مقدار آب و افزایش همزمان مقدار درصد روان کننده نمی تواند زمان مشابهی از V-Funnel را برای محدوده مجاز اسلامپ روانی فراهم کند. در خیلی از تحقیقات نیز از دو پارامتر T_{50} و زمان V-Funnel برای بیان روانی و ویسکوزیته بتن SCC استفاده می شود. رابطه بین این نتایج در شکل ۲-۹ نشان داده شده است. این شکل نشان می دهد که رابطه قابل قبولی ($R^2=0/85$) بین T_{50} و زمان V-Funnel در این مخلوطهای SCC وجود دارد. ولی این نباید فراموش شود که زمانهای بالای V-Funnel مربوط به T_{50} میزان مقبولیت بتنهای SCC را کاهش می دهد.

اندازه گیری های آزمایشگاهی مربوط به نسبت L-Box میزان قدرت پر کنندگی و عبور هر

مخلوط را نشان می دهد. L-BOX در مقابل بلوکه شدن بتن بسیار حساس می باشد. خطر بلوکه شدن در اختلاطهایی که نسبت آن زیر ۰/۸ باشد بالا می رود. از روی مشاهدات انجام شده گزارش شده است که میزان مقدار کافی و خوبی است برای بیان قدرت پراکنندگی و عبور پذیری.



شکل ۲-۸: رابطه بین زمان V-Funnel و T₅₀ [12]

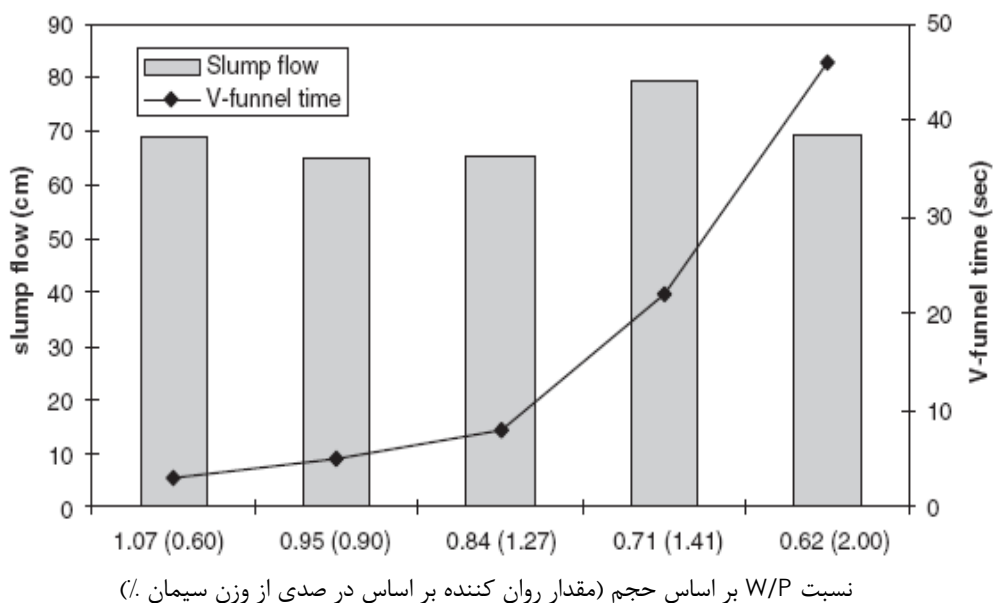
مقدار نسبت L-BOX پنج طرح اختلاط ریخته شده در شکل ۲-۱۰ نشان داده شده است. می توان گفت که مخلوطهایی که نسبت آب به سیمان بالای ۰/۴۸ را دارا باشند دارای نسبت L-BOX بالای ۰/۸ هستند. اما این بدین معنی نمی باشد که نسبت های کمتر از ۰/۴۸ نمی تواند در SCC استفاده شود. اگر اجزاء بتن مجدداً بر اساس ضوابط و معیار های SCC طراحی شوند می تواند با نسبتهای آب به سیمان کمتر تولید شود.

برای رسیدن به بتن SCC با روانی مطلوب و زمان قابل پذیرش می توان سه گام زیر را

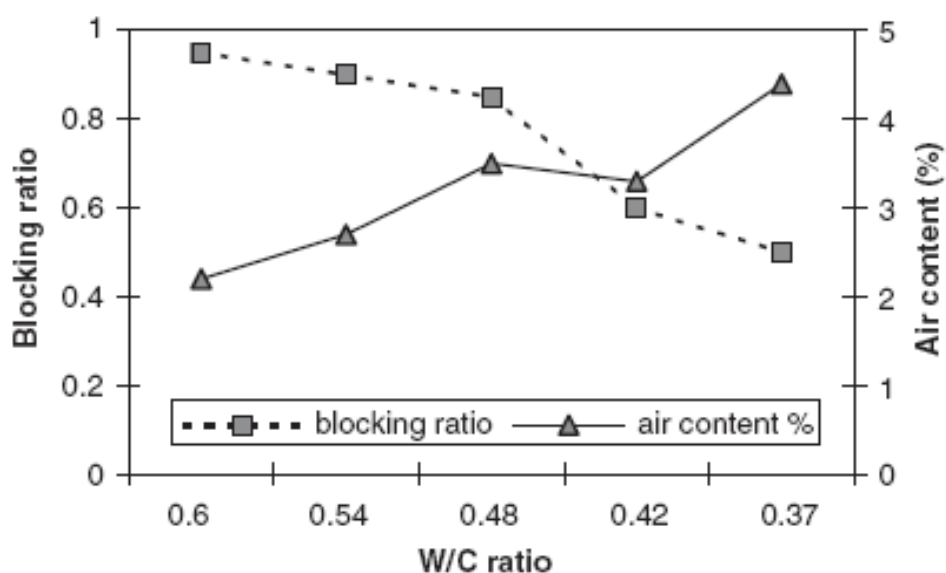
خلاصه کرد:

- اختلاط ها با اسلامپ روانی مطلوب و زمان قابل پذیرش هستند و بر این اساس هر پنج طرح قابل قبول هستند.
- اختلاط ها باید زمان کمتر از ۲۰ ثانیه در V-Funnel داشته باشند. بر طبق این ضابطه مخلوط شماره ۴ و ۵ مردود می باشند. مخلوطهایی که دارای زمان V-Funnel بالایی هستند (بیشتر از حد مجاز) تمایل به دام انداختن هوا به سبب ویسکوزیته بالا دارند. این بدان معنی است که خودتراکمی نمی تواند باقی بماند. به عبارت دیگر، زمانهای

- پایین تر از حد مجاز (بین ۸-۱۰ ثانیه) در بیشتر تحقیقات در نظر گرفته شده است.
- طرح اختلاطها با نسبت L-BOX زیر ۰/۶ رد هستند. مخلوطهای مشابه ۴ و ۵ نمی‌توانند این شرط را مرتفع سازند. مخلوط با نسبت L-BOX زیر ۰/۶ امکان تمایل به بلوکه شدن بین تقویتها بدلیل ویسکوزیته بالا را دارند.



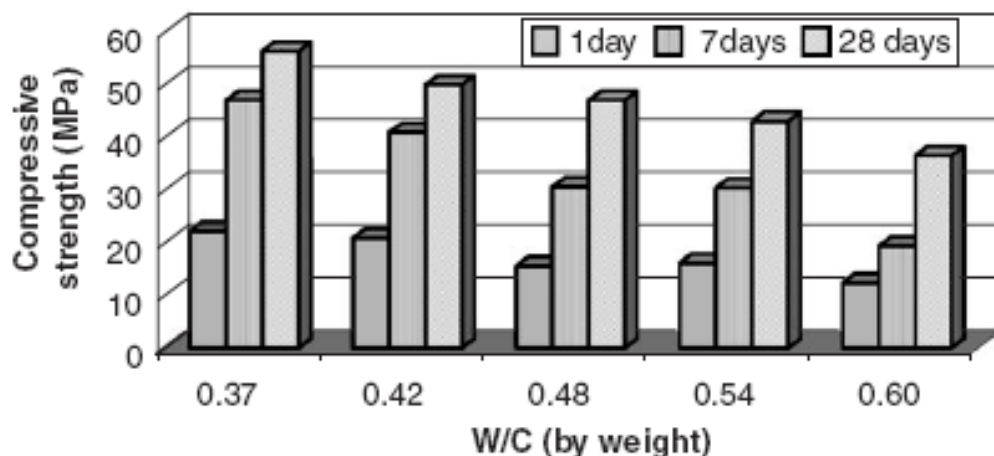
شکل ۲-۹: تأثیر نسبت W/P مقدار روان کننده بر روی اسلامپ روانی و زمان V-Funnel [12]



شکل ۲-۱۰: تأثیر نسبت W/C بر روی قابلیت پرکنندگی و حجم هوای بتن [12]

۲،۲،۳،۲. نتایج آزمایش بتن سخت شده

مقاومت فشاری در روزهای ۱ و ۷ و ۲۸ روز انجام شدند. مدول الاستیسیته و مقاومت کششی نمونه‌ها در ۲۸ روز تعیین می‌شدند. نمونه‌های اختلاط ۴ و ۵ اگرچه در آزمایش بتن تازه رد شدند، خصوصیات حالت سخت شده همه مخلوطها مورد تحقیق قرار گرفتند و تمام مخلوطها بدون هیچ گونه عمل تراکم سازی قالبگیری شدند. پیشرفت مقاومت فشاری تا ۲۸ روز در شکل ۲-۱۱ نشان داده است. واضح است که رشد سریع مقاومت می‌تواند با کم شدن مقدار آب مخلوط (نسبت آب به سیمان) فراهم شود. وقتی پیشرفت مقاومت مورد سوال باشد کاهش آب نسبت به عقب افتادگی تأثیر روان کننده در درصدهای بالا خیلی غالب است.



شکل ۲-۱۱: نحوه پیشرفت مقاومت فشاری مخلوطهای SCC [12]

مدول الاستیسیته بتن اساساً با مقاومت فشاری اش رابطه دارد. وزن معمول مصالح دانه ای دارای مدول الاستیسیته بالاتری نسبت به خمیر سیمان هیدراته شده دارد. یک میزان بیشتر از مصالح دانه ای داده شده مدول الاستیسیته بیشتری را نسبت به مقاومت فشاری داده شده، می‌دهد. مصالح زیادی برای بتنهای سنتی، مدول الاستیسیته را پیشگویی می‌کند که این هم اساساً وابسته به مقاومت فشاری و چگالی بتن است. بطوریکه SCC به عنوان یک ماده متفاوت امکان دارد که یک رفتار تنش-کرنش متفاوتی را نسبت به اینکه دارای مقدار کمتری مصالح دانه ای است از خود نشان می‌دهد. مطالعات مختلفی بر روی مدول الاستیسیته SCC نتیجه مخالفی را داشته است. بر طبق پرسون^۱ مدول الاستیسیته SCC بخوبی با خواص مشابه بتنهای سنتی منطبق است وقتی مقاومت

^۱ Persson

ثابت نگه داشته شود. اریک و پنتی^۱ نیز همین را تصدیق می کنند. از طرف دیگر مطالعات آزمایشگاهی دن و همکارانش^۲ نشان دادند که مدول الاستیسیته SCC کمتر از حالت عادی آن است. این شاید به سبب کمتر بودن ماکزیموم دانه موجود در SCC و بیشتر بودن مقدار خمیر سیمان باشد.

از این تحقیقات می توان نتیجه گرفت که مقایسه مدول الاستیسیته SCC با بتنهای سنتی کار آسانی نیست. این تضاد در نتایج شاید اینطور توضیح داده شود که ساختار رفتار روانی SCC بطور کامل با بتنهای سنتی متفاوت است.

رابطه بین مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته مخلوطهای SCC در شکل ۲-۱۲ نشان داده شده است. همچنین در این شکل نتایج مربوط به تحقیقات مختلف بر روی SCC با عناصر پودری متفاوت و شرایط مختلف در این شکل آورده شده است. همانگونه که در شکل نیز مشاهده می گردد مخلوطهای SCC دارای مدول الاستیسیته کمتری هستند وقتی با بتنهای سنتی مقایسه می شوند. این تمایل کلی مخلوطهای SCC می تواند وابسته به حجم کم مصالح شنی و حجم بالای مصالح پودری باشد. رابطه بین مدول الاستیسیته (E) و مقاومت فشاری f_c برای آزمایشات انجام شده می تواند با استفاده از رابطه زیر بیان شود:

$$E = 1.57 f_c^{0.8} [E(GPa), f_c(MPa)] \quad (1-2)$$

در شکل ۲-۱۳، نسبت $E/\sqrt{f_c}$ مقایسه شده است. نسبت بدست آمده از تحقیقات آزمایشگاهی با نظریه ACI318 مشابه بودند. تغییر پذیری این نسبت با SCC های مختلف می تواند وابسته به دو دلیل منطقی باشد:

- مقدار مقاومت آزمایش شده SCC مشابه نبودند.
- عناصر پودری استفاده شده SCC در تحقیقات مختلف گوناگون بودند.

رابطه بین مقاومت کششی و مقاومت خمشی برای مخلوطهای SCC آزمایش شده است و همچنین نتایج بدست آمده توسط دیگر تحقیقات و کمیته ها در شکل ۲-۱۴ نشان داده شده است. برای مخلوطهای آزمایش شده مقاومت کششی می تواند با استفاده از معادله زیر بدست آید:

$$f_t = 0.43 f_c^{0.6} \quad (2-2)$$

¹ Erik and Pentti

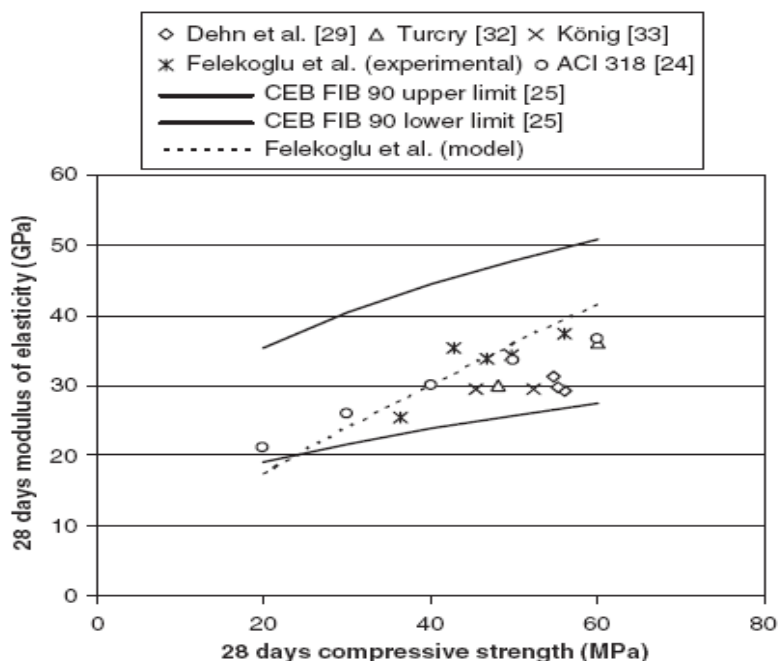
² Dehn et al.

سونبی و بارتوس^۱ به این نتیجه رسیدند که مقاومت کششی ۲۸ روزه SCC از بتنهای عادی بیشتر است. نتایج بدست آمده از شکل ۲-۱۴ نشان می دهد که مقاومت کششی بتنهای SCC معمولاً به خاطر همگنی بیشتر بتنهای عادی بالاتر است.

۳.۲.۳.۲. نتایج

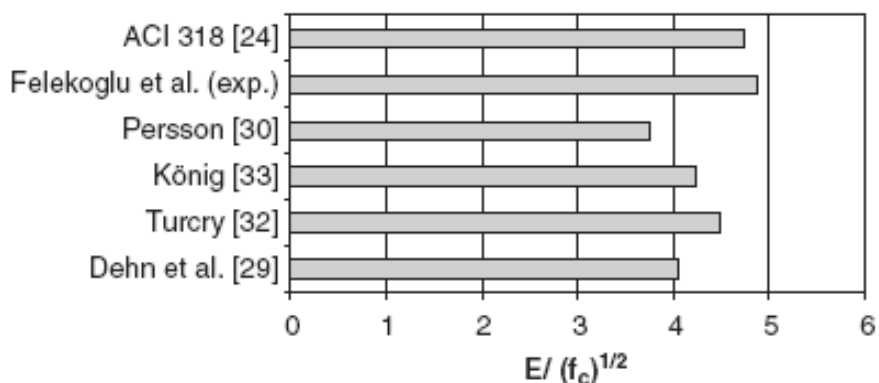
بر اساس نتایج بدست آمده در این تحقیق نتایج زیر بدست آمده است:

- ۱- مقدار بهینه نسبت آب به سیمان برای مخلوطهای SCC بین ۰/۸۴-۱/۰۷ (حجمی) می باشد. مقداری بیشتر یا کمتر از این نسبت باعث جداسدگی و بلوکه شدن می گردد.
- ۲- شرایط و روش آزمایش SCC بطور عمومی قوانین پذیرفته شده ای ندارد و درجه رواداری آن وابسته به قضاوت مهندسی، تنوع مواد و ... می باشد. مخلوط بتن مناسب شاید در بهترین حالت با توجه به آزمایش و خطا بدست آید. طراحی موفق و شرایط مناسب تولید ممکن است در حدودی که از سوی محققین و مجامع مختلف پیشنهاد شده بواسطه حقایق گفته شده نباشد.



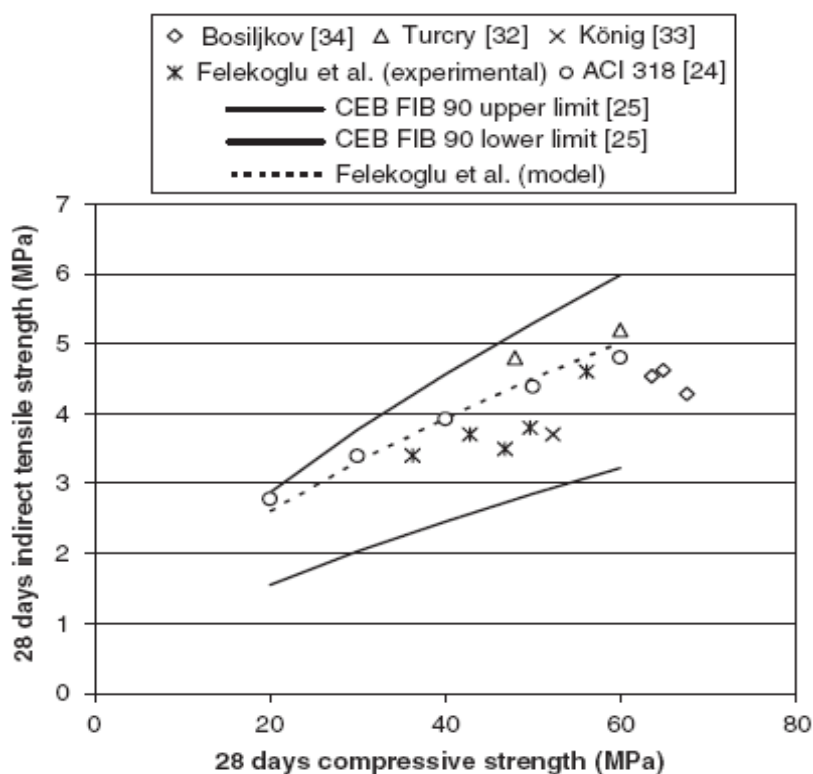
شکل ۲-۱۲: رابطه بین مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته برای بتنهای SCC و NVC [12]

¹ Sonebi and Bartos



شکل ۲-۱۳: نسبت‌های $E/\sqrt{f_c}$ برای تحقیقات مختلف و ACI318 [12]

۳- بر اساس این تحقیق، مقاومت کششی بالا و مدول الاستیسیته پایینی در مخلوط‌های SCC نسبت به بتن‌های عادی بدست آمد. تحقیقات بیشتری مورد نیاز است برای برقرار کردن رابطه ای بین خواص مکانیکی SCC با درجات مقاومتی مختلف و شامل انواع مختلفی از مواد.



شکل ۲-۱۴: رابطه بین مقاومت کششی دو نیم شدن و مقاومت فشاری برای SCC و NVC [12]

۱۴,۲. خواص بتن تقویت شده با الیاف بافته شده پلی پروپیلین تمت

اثر ضربه [13]

تیرهای بتنی شامل الیافهای بافته شده پلی پروپیلین تحت اثر بار ضربه مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. از وزنه سقوطی به عنوان ماشین ضربه استفاده شده است. سقوط ۳۴۵kg جرم از ارتفاع ۰,۵m بر روی نمونه‌هایی به ابعاد ۱۲۵×۱۰۰×۱۲۰ با دهانه ۹۶۰mm مورد آزمایش قرار گرفته است. از الیاف به طول ۱۹/۱mm با غلظت حجمی آز ۰/۵-۰/۱ درصد استفاده شده است. این الیاف بافته شده پلی پروپیلین هم انرژی ترک و هم مقاومت ضربه بتن را افزایش می‌دهند.

بتن معمولی^۱ شکننده و نسبت به تغییر شکل حساس می‌باشد. این محدودیتهایی را در استفاده از بتن در جاهایی که امکان بارهای ضربه است بوجود می‌آورد. بار ضربه به صورت یک مقدار بزرگی انرژی خارجی که بطور ناگهانی به سازه یا اعضای سازه ای وارد می‌شود، تعریف می‌شود. به دلیل خصوصیات موج پیچیده تنش وابسته به بار ضربه و انتقال انرژی و مکانیزم پیچیده پراکندگی این انرژی و طریقه بوجود آمدن ترکها در بتن که در مقابل ضربه قرار می‌گیرد به درستی شناخته نشده است. با این حال، این مسلم است که مقاومت در مقابل ضربه بتن نمی‌تواند بر اساس آزمایشات استاتیکی مرسوم تعیین شود، آزمایشهای ضربه باید به شکل صحیحی انجام شود.

برای اصلاح خواص بتن بار ضربه، اضافه کردن الیاف پلی پروپیلین پیشنهاد شده است از اینرو تغییر شکل پذیری الاستیک (یاسختی) بتنهای FRC تحت بار استاتیکی همچنین مقاومت بیشتری را در برابر ضربه نسبت به بتن ساده پیش بینی می‌کند. متأسفانه در حال حاضر روشهای آزمایش برای بار ضربه بتن موجود نمی‌باشد. در این تحقیق تأثیر الیاف بافته شده پلی پروپیلین بر عملکرد معمول بتن تحت بار ضربه با استفاده از ماشین سقوط وزنه برای اعمال ضربه تحقیق شده است.

۱,۴,۲. روش کار آزمایشگاه

۱,۱,۴,۲. ماشین ضربه

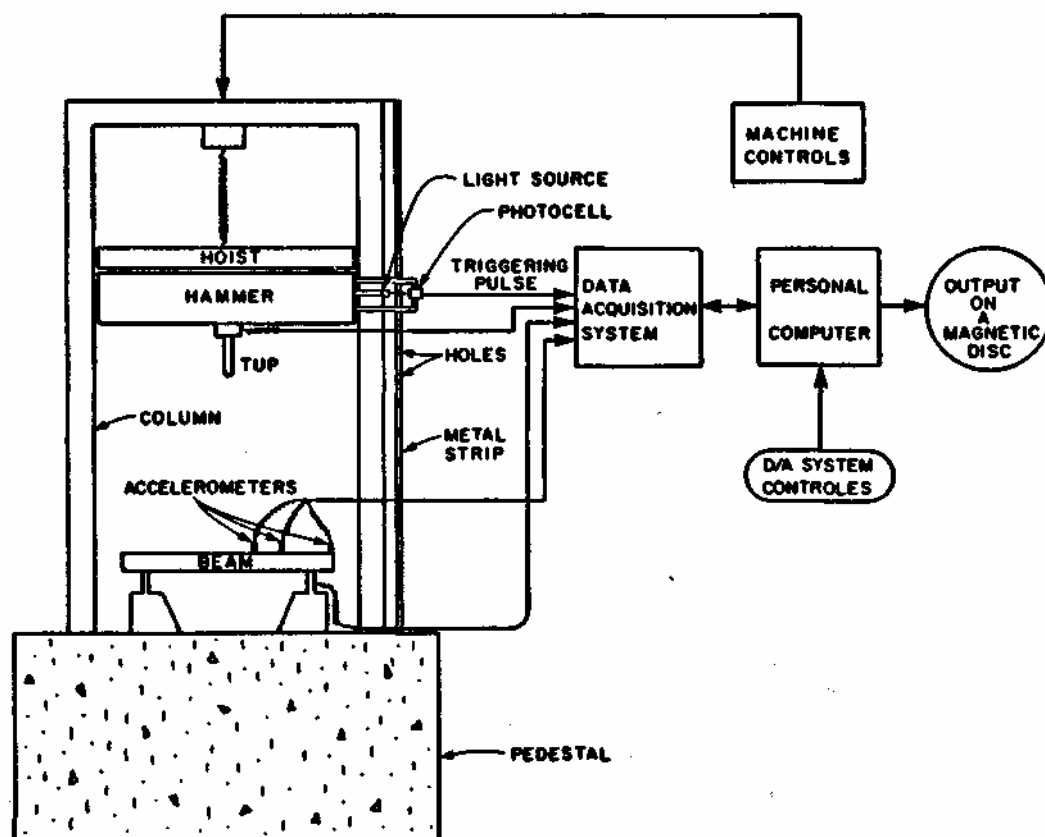
تجهیزات ماشین ضربه بطور خلاصه در شکل ۲-۱۵ نشان داده شده است. در جای دیگر بطور کامل شرح داده خواهد شد. بطور خلاصه، این ماشین قادر به انداختن ۳۴۵kg چکش از ارتفاع ۲/۳m را دارا می‌باشد. گنج کرنش نصب شده بر روی انتها برجسته چکش برای اندازه گیری نیروی بین محل

^۱ PC: Plain Concrete

تماس شاخ چکش و تیر استفاده می‌شود. گیج کرنش برای اندازه‌گیری نیروی بین محل تماس شاخ چکش و تیر استفاده می‌شود. گیج کرنش نصب شده بر روی یکی از ساپورت‌های سندان عکس‌العملها را اندازه می‌گیرد. سه شتاب سنج نصب شده در امتداد طول تیر پاسخ را نیز نمایش می‌دهد. یک سیستم پنج گانه اکتساب داده، مستقر شده بر روی IBM PC، برای جمع‌آوری داده استفاده شده است. پنج کانال می‌توانند با وقفه 0.2ms همزمان قرائت کنند. این اطلاعات بدین گونه بدست آمده و در یک دیسک مغناطیسی برای پردازش بعدی ذخیره می‌شود.

۲.۱.۴.۲. نمونه‌ها

تیر بتنی 1200mm طول، 100mm عرض و 125mm عمق دارد. از سیمان CSA نوع ۱۰ (بر طبق استاندارد ASTM تیپ I) استفاده شده است. شن استفاده شده دارای ماکزیموم سائز 20mm است. یک طرح اختلاط با میزان حجم 0.055 m^3 برای پر کردن سه تیر بتنی با مشخصات بالا کافی بود. در جدول ۲-۴ این طرح اختلاط آورده شده است. ۵ طرح اختلاط با حجمهای مختلف از الیاف پلی پروپیلین بافته شده با طول $19/1\text{mm}$ تهیه شده است. مخلوطها با 0.1% و 0.2% و 0.3% و 0.5% حجمی الیاف تهیه شده‌اند و از کاهنده‌های مرسوم آب استفاده شده است. در طرحهای با 0.3% و 0.5% از الیاف پلی پروپیلین از SP استفاده شده است. برای کنترل مقایسه طرح بدون الیاف نیز ریخته شده است.



شکل ۲-۱۵: جزئیات دستگاه ضربه استفاده شده. ارتفاع قاب حدود ۴/۵m بالای طبقه [13]

اختلاط در یک میکسر در آزمایشگاه انجام شده است. وقتی که اجزاء بتن در داخل میکسر مخلوط شد، الیاف پلی پروپیلین اضافه شده است. مدت زمان اختلاط به صورت زیر است:

- اختلاط : ۳ دقیقه
- استراحت : ۲ دقیقه
- اختلاط : ۲ دقیقه

بتن در قالبهای چوبی روغن زده ریخته می شود و بر روی میز لرزه میبره می شوند. تیرها در یک اتاق مرطوب تا روز آزمایش نگهداری شده اند. علاوه بر این برای هر طرح، دو سیلندر دو سیلندر ۱۰۱/۶mm × ۲۰۳/۱mm برای اندازه گیری مقاومت فشاری پر شده اند. مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن بدون الیاف در حدود ۲۰MPa و بتنهای با درصد حجمی ۰,۵ الیاف حدود ۲۵MPa بودند.

اختلاطها در جدول ۲-۴ با نسبت آب به سیمان شرح داده شده اند. این نسبت حدود ۰/۷۹ (با مصالح سنگی مرطوب) و حدود ۰/۶۴ (نسبت آب به مجموع سیمان و خاکستر بادی)، که البته این نسبت بالا برای حجم ۰/۵ الیاف مجاز می باشد تا کارایی حفظ شود. بطور چشمی عرق کردن اضافی

بتن به وضوح قابل رویت است بر روی نمونه‌هایی که روی میز لرزه قرار می‌گیرند. این بدان معنی است که W/C واقعی در این تیرها کمتر از W/C اسمی آنهاست. مشاهدات مشابهی تصدیق می‌کنند، با این وجود از SP در مخلوط‌های با ۰/۳ درصد حجمی آلیاف پلی پروپیلین استفاده شده است. این تأثیر به نظر می‌آید که به میزان و نوع SP بستگی دارد. به عبارت دیگر، تمام مخلوط‌هایی که فقط دارای کاهنده‌های مرسوم آب هستند و کارایی آسانی دارند عرق اضافی بر روی بتن دیده نمی‌شود.

جدول ۲-۴: نسبت‌های اختلاط برای حجم‌های مختلف الیاف ۱۹,۱mm [13]

دارای SP		دارای افزودنی کاهنده آب			حجم الیاف
۰/۵٪	۰/۳٪	۰/۵٪	۰/۳٪	۰/۱٪	
۱۲/۵۵ Kg ۳/۱۵ Kg ۴۸/۶۰ ۱۰/۴۵ ۴۸/۴۰ Kg ۸/۳۴ Kg					سیمان خاکستر بادی (Fly ash) ماسه* شن ۵-۱۰mm** شن ۱۰-۲۰mm** آب موردنیاز
۱۳۱/۴۹ Kg					مجموع
۲۴۷/۵ gms	۱۴۸/۵ gms	۲۴۷/۵ gms	۱۴۸/۵ gms	۴۹/۵ gms	الیاف ۱۹,۱mm
-	-	۴ ml	۴ ml	۴ ml	Air entrainment
-	-	۴۰ ml	۴۰ ml	۴۰ ml	کاهنده آب
۱۵۰ ml	۲۵ ml	-	-	-	Superplasticizer
۵	۶	۵	۱۳	۱۸	اسلامپ (cm)
-	-	۲۳۸۱	۲۳۴۵	۲۳۸۱	وزن واحد حجم (kg/m^3)
-	-	۴/۲	۵/۴	۲/۵	مقدار هوا %

* میزان رطوبت مصالح ماسه: ۲/۱۴٪

** میزان رطوبت مصالح شنی: ۱/۱۶٪

توجه: وزن داده شده برای حجم $0.055 m^3$ بتن ریزی می‌باشد.

۳,۱,۴,۲. آزمایش ضربه

در سن ۲۸ روزگی نمونه‌های تیر تحت آزمایش ضربه توسط چکش سقوطی از ارتفاع ۰/۵m

قرار می‌گیرند. سرعت سقوط این چکش در ضربه حدود $2/95 m/s$ می‌باشد.

۴.۱.۴.۲. آنالیز نتایج

شرح کاملی از روشهای بکار رفته در آنالیز اطلاعات، قبلاً شرح داده شده، بطور خلاصه، یک بار خمشی کلی بوسیله تفریق نیروی اینرسی (تعیین شده از شتاب سنجها) از نیروی چکش مشاهده شده، محاسبه می‌شود. تغییر شکل تیر بطور کامل یک تابع زمان از اجتماع سنسورهای اندازه گیر شتاب تیر تعیین می‌شوند. بنابراین نمودار بار خمشی و تغییرشکل تیر بدست می‌آید. انرژی ترک، از مجموع مساحت زیر منحنی بار-تغییرمکان محاسبه می‌شود. از اینرو هم ماکزیموم بار و هم انرژی ترک وابسته به ابعاد ویژه نمونه‌ها و پارامترهای آزمایش می‌باشد. داده‌ها به شکل بهبود یافته در این پارامترها به عنوان تابعی از حجم الیاف در شکل ۲-۱۶ نشان داده می‌شود.

یک دید تجربی از سطوح ترکها معلوم کرد که الیافها اصولاً با شکستگی پاره می‌شوند. خیلی کم بیرون زدگی الیاف^۱ مشاهده شد. برای اطلاعات حاضر در شکل ۲-۱۶ ضریب پراکندگی برای نقطه پیک بار خمشی و انرژی ترک در محدوده ۲۴-۱۲٪ وجود داشت. ضریب پراکندگی برای مقاومت خمشی در حدود ۹-۱۳٪ بود. این مقادیر نسبتاً بالا شاید بازتاب مقادیر مختلف عرق کردگی سطح سطح مصالح سیمان به سبب نسبت آب به سیمان بالا باشد.

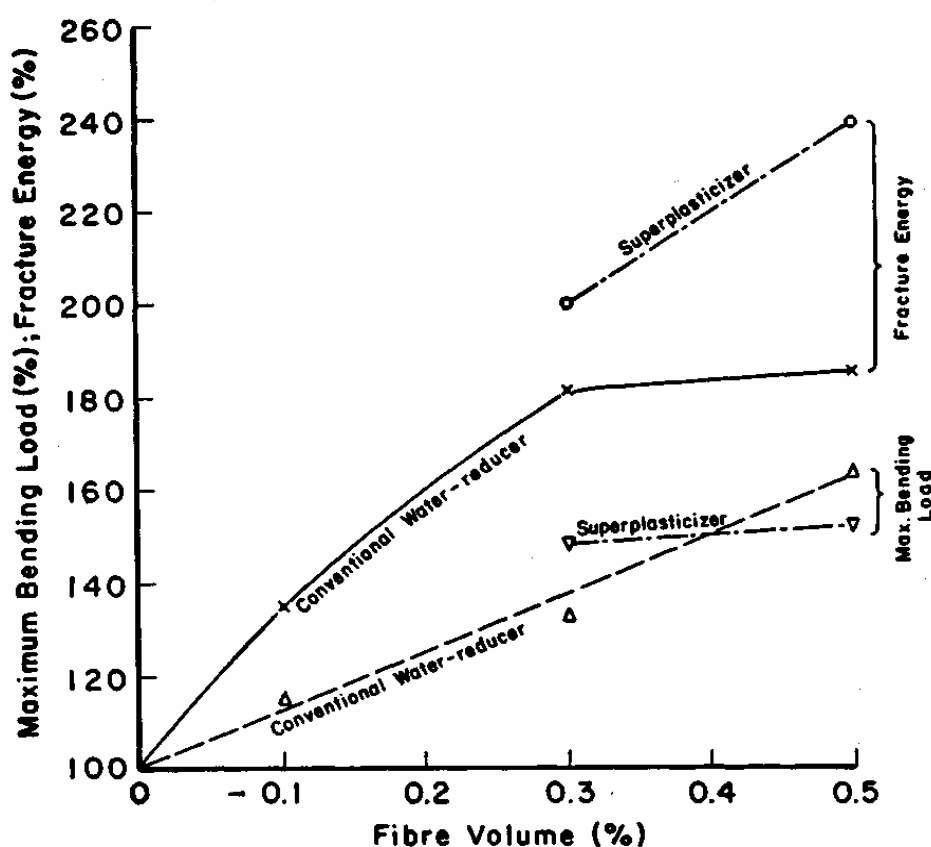
۵.۱.۴.۲. بحث در مورد نتایج

نتایج بدست آمده در شکل ۲-۱۶ نشان می‌دهد که وقتی حجم الیاف بطول ۱۹/۱mm تا ۵/۰٪ افزایش می‌یابد، ماکزیموم بار خمشی (که از مقاومت ضربه‌اندازه گیری شده) در حدود ۴۰٪ افزایش می‌یابد. انرژی ترک تقریباً دو برابر می‌شود. قدری عملکرد مخلوطهایی که شامل SP می‌باشند در مقایسه با مخلوطهای ساخته شده با مواد کاهنده آب مخصوصاً در مورد انرژی ترک بهبود مشاهده می‌شود. شاید این به سبب این حقیقت باشد که SP، بازدهی نشست بر روی میز لرزه را افزایش می‌دهد. عرق کردگی اضافی مشاهده شده در سطح همچنین در بعضی نسبتها حذف می‌شود. این امر که حتی در نسبتهای آب به سیمان بالا استفاده شده در این تحقیق، الیافها پاره می‌شوند تا اینکه بیرون زده شوند (Pull out) که این نشان می‌دهد که چسبندگی بین الیاف و ملات وجود دارد.

آشکار است که به منظور درک کامل پتانسیل الیاف پلی پروپیلین در بهبود مقاومت ضربه بتن لازم است که طرح اختلاط بهینه تعیین شود. این شامل یافتن تأثیر مواد کاهنده آب، تأثیر طول الیاف استفاده شده و غیره می‌باشد. بخصوص اگر از SP استفاده شده باشد، پیدا کردن نوع و مقدار

^۱ Pull out

بهینه آن لازم است. با این حال، بعد از آنکه مخلوطهای امتحان شدند در این تحقیق، بطور کاملاً تجربی استفاده از ترکیب Air entrainment و مواد کاهنده آب، شاید استفاده از SP اصلاً لزومی نداشته باشد. ممکن است اضافه شود که، در این تحقیق ماکزیموم درصد حجمی آلیاف استفاده شده بخاطر توانایی و گنجایش میکسر استفاده شده در این آزمایش محدود شده بود. یک میکسر بهتر و حرفه ای-تری شک استفاده از نسبتهای آب به سیمان کمتر و یا استفاده از الیاف بیشتر را شاید بهتر میسر می ساخت.



شکل ۲-۱۶: تأثیر حجم الیاف بر روی ماکزیموم بارخشی و انرژی ترک تیرها تحت اثر بار ضربه، به صورت درصدی از مقدار تیرها بدون الیاف شرح داده شده است. [13]

۴.۱.۴.۲. نتیجه گیری

از این تحقیق نتایج زیر قابل استنباط است:

- ۱- الیاف بافته شده پلی پروپیلین بطور محسوسی مقاومت ضربه و انرژی ترک بتن را افزایش می دهد.

- ۲- افزایش حجم الیاف تا ۰/۵٪ مقاومت ضربه را افزایش می دهد.
- ۳- برای همه حجم الیاف بکار رفته، چسبندگی بین الیاف و ملات برای جلوگیری از پدیده Pull out کافی است. الیافها اصولاً در اثر شکست پاره می شوند.

۵.۲. تأثیر الیاف پلی پروپیلین بر روی خواص بتن تازه و سفت شده

[14]

بررسی تأثیر الیاف پلی پروپیلین (۰/۲٪ حجمی در بتن) بر روی کارایی، افت بتن و مقاومت بتن بطور جزئی در این تحقیق مورد آزمایش قرار می گیرد. نمونه‌هایی از طرح اختلاطهای مختلف با و بدون الیاف پلی پروپیلین تهیه شده‌اند و در شرایط آزمایشگاهی و محیط با آب و هوای گرم خلیج فارس نگهداری شده‌اند. نتایج نشان داده‌اند که دخالت الیاف پلی پروپیلین ترکها ناشی از افت پلاستیک بتن را حذف می کند و تاحدی افت بتن را کاهش می دهد. همچنین تا حدی مقاومت کششی و خمشی بتن را اصلاح می کند.

در اوایل ترک خوردگی بتن تازه در محیط خلیج فارس جایی که تبخیر آب سطحی بتن تازه در اثر درجه حرارت بالای محیط و باد خشک خیلی بالا بود، رایج شده بود. شاید این ترکها از نظر سازه ای زیاد مضر نباشند اما باعث می شدند که به تدریج نفوذ رطوبت به داخل بتن سرعت بگیرد و باعث اکسیده شدن و زنگ زدن تقویت های فولادی شود. در شرایط آب و هوایی نرمال، این ترکها در اثر طرح درست اختلاط و بتن ریزی مناسب و نگهداری مناسب به کمترین حالت خود می رسند. به هر حال در محیط آب و هوایی خلیج فارس با اضافه کردن بعضی از مواد تمهیدات برای کنترل این ترکها اولیه جهت رسیدن به سطح پذیرش مناسب مورد نیاز می باشد که اضافه کردن الیاف پلی پروپیلین در بتن نمونه ای از این نوع مواد می باشد.

در چند سال اخیر، استفاده از الیاف پلی پروپیلین در بتن نشان داده شده است که چاره ای مفید برای کنترل جمع شدگی و ترکها ناشی از درجه حرارت در بتن می باشد. هر چند اگرچه بعضی از تحقیقات آزمایشگاهی و همچنین نمونه‌های اجرایی از تقویت های الیاف پلی پروپیلین دارای فقدان اطلاعات آزمایشگاهی قطعی است. اطلاعات بدست آمده بوسیله تحقیقات مختلف بر روی تأثیر الیاف پلی پروپیلین بر روی خواص مختلف بتن گهگاهی با هم مغایر هستند. اختلاف در نتایج شاید بدلیل

اختلاف در طرح اختلاط، سایز نمونه‌ها، شرایط مختلف محیطی و روشهای آزمایش باشد. علاوه بر این، بیشتر این نمونه‌ها بر روی تعداد نمونه‌های محدودی انجام گرفته است. در این تحقیق کنونی، با یک برنامه آزمایشی پرکار به تحقیق الیاف پلی پروپیلین بر روی خواص بتن تازه و سخت شده پرداخته شده است. کارایی، افت بتن و پارامترهای مقاومت بتنهای تقویت شده با پلی پروپیلین (PFRC) مورد ارزیابی قرار گرفته و با بتن معمولی (PC)، مقایسه شده است.

۱.۵.۲. برنامه آزمایشگاهی

۱.۱.۵.۲. مواد

الیاف پلی پروپیلین تجاری موجود به طول ۲۰mm ($0/8in$) بافته شده به صورت دسته ای در این تحقیق استفاده شده است. این الیاف را در بعضی از طرح اختلاطهای خاص در کنار بندرگاه از حالت بافته ای و دسته ای خارج کرده و بصورت یکنواخت در داخل طرح اختلاط بتن پراکنده شده‌اند. بعضی از خواص الیاف پلی پروپیلین در جدول ۲-۵ نمایش داده شده است. مواد دیگر استفاده شده: سیمان پرتلند تیپ ۱، شن، ماسه بادی، میلگرد ۱۲ و آب آشامیدنی.

۲.۱.۵.۲. آماده سازی نمونه‌های آزمایش

سه طرح اختلاط با نسبت های آب به سیمان ۰/۴۵ و ۰/۵۵ و ۰/۶۵ در این تحقیق آماده شده‌اند. میزان سیمان مصرفی $400 kg/m^3$ و مصالح سنگی درشت نسبت به کل مصالح سنگی ۰/۶ در همه مخلوطها استفاده شده‌اند. حجم الیاف پلی پروپیلین، ۰/۲٪ حجمی بتن می‌باشد که در طرحهای حاوی الیاف استفاده شده است. از هر طرح اختلاط با نسبت آب به سیمان مختلف نمونه‌هایی با الیاف و بدون الیاف ساخته شده است.

جدول ۲-۵: برخی خواص الیاف پلی پروپیلین [14]

نقطه ذوب	۱۶۰-۱۷۰ °C
نقطه اشتعال	۵۹۰ °C
مقاومت کششی	۵۵۰-۷۶۰ MPa
مدول یانگ	۳,۵ GPa
رسانندگی گرمایی	کم
رسانندگی الکتریکی	کم
مقاومت در مقابل اسید و نمک	بالا

نوع نمونه‌ها، شرایط نگهداری در آزمایشات استفاده شده برای تعیین خواص مختلف در زیر شرح داده شده و در جدول ۶-۲ بطور خلاصه آمده است.

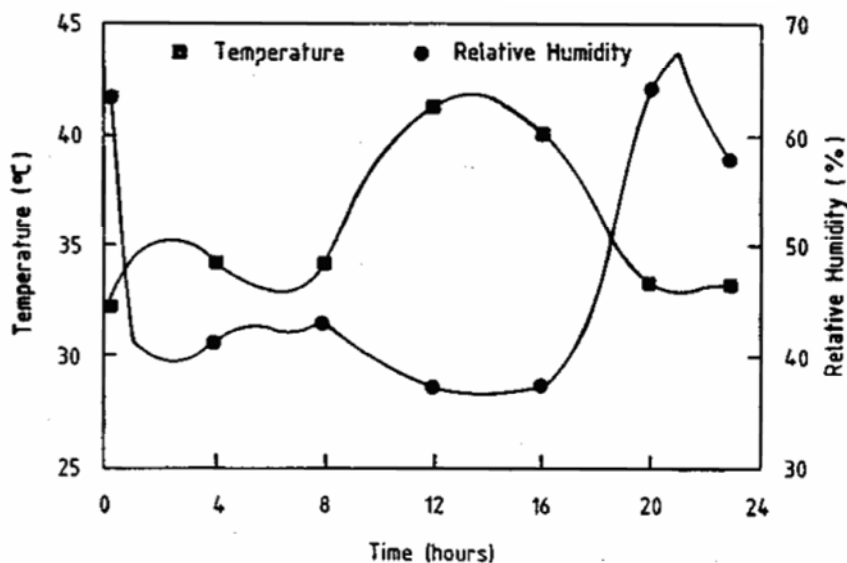
افت حجمی پلاستیک^۱: قالبها با ابعاد ۷۵۰×۳۷۵×۷۵mm (۳۰×۱۵×۳ in) برای نمایش ترکهای ناشی از افت حجمی پلاستیک تهیه شده‌اند. قالبهای هر دو طرح PC و PFRC در هر دو شرایط نگهداری شده‌اند (هم شرایط کارگاهی و هم در شرایط وزش باد خشک). در شرایط کارگاهی نمونه‌ها بلافاصله بعد از قالبگیری در شرایط سایت در آب و هوایی گرم قرار داده شدند. شکل ۲-۱۷ شرایط آب و هوایی یک روز تابستانی شهر دیحهران^۲ جایی که نمونه‌ها قرار گرفته‌اند را نشان می‌دهد. بطوریکه در شرایط مراقبت تحت وزش باد، نمونه‌ها در معرض باد یکنواختی با محدوده سرعت ۱۶-۲۴km/hr قرار گرفته‌اند. این باد با فن مدل شده است. این نمونه‌ها نیز بلافاصله بعد از قالبگیری در آزمایشگاه در این شرایط قرار گرفته‌اند.

جدول ۶-۲: خلاصه ای از برنامه آزمایشگاهی [14]

آزمایشات	نوع نمونه	شرایط نگهداری	سن آزمایش (روز)	تعداد نمونه	
				PFR C	P C
افت حجمی پلاستیک	دال ۷۵۰×۳۷۵×۷۵mm	کارگاهی، وزش باد شدید	روز اول	۱۸	۱۸
افت حجمی	منشور ۲۵۰×۵۰×۵۰ mm	کنترل شده	۷،۱۴،۲۱،۲۸،۴۲،۵ ۶،۷۰،۸۴	۷۲	۷۲
مقاومت فشاری	استوانه ۱۵۰×۷۵mm	کنترل شده و کارگاهی	۲۸،۶۰،۱۲۰،۲۴۰	۷۲	۷۲
مقاومت کششی	استوانه ۱۵۰×۷۵mm	کنترل شده و کارگاهی	۲۸،۶۰،۱۲۰،۲۴۰	۷۲	۷۲
مقاومت خمشی	منشور ۲۵۰×۵۰×۵۰ mm	کنترل شده و کارگاهی	۲۸،۶۰،۱۲۰،۲۴۰	۷۲	۷۲

¹ Plastic shrinkage

² Dhahran



شکل ۲-۱۷: شرایط آب و هوایی در یک روز تابستانی

افت حجمی بتن^۱: میزان افت بتن بر روی نمونه‌های منشوری به ابعاد $50 \times 50 \times 250$ mm (in) روز بطور کامل در شرایط غوطه وری در آب نگهداری شدند و بعد از این مدت در شرایط رطوبتی در اون^۲ در دمای 23°C و رطوبت $60 \pm 5\%$ تا روز آزمایش نگهداری شدند.

مقاومت فشاری، خمشی و کششی: برای مقاومت کششی و خمشی از استوانه‌های 75×150 mm (۳×۶ in) مطابق با استاندارد ASTM C39 و ASTM C496 استفاده شده است. در صورتیکه برای مقاومت خمشی از نمونه‌های منشوری $50 \times 50 \times 250$ mm (۲×۲×۱۰ in) مطابق با استاندارد ASTM C78 استفاده شده است. این نمونه‌ها (FPRC, PC) در شرایط عادی در آزمایشگاه نگهداری شده‌اند. در این شرایط، نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت بعد از بتن ریزی از قالب بیرون آورده می‌شوند و بطور کامل در آب نگهداری می‌شوند تا سن ۲۸ روزگی. سپس بیرون آورده می‌شوند و در شرایط آزمایشگاهی نگهداری می‌شوند تا روز آزمایش. مقاومت در سنین ۲۸، ۶۰، ۱۲۰ و ۲۴۰ اندازه گیری شده‌اند.

در تمام آزمایشات حداقل از ۳ نمونه برای انجام آزمایش استفاده شده است.

¹ shrinkage

² Oven

۲.۵.۲. نتایج آزمایش

۱.۲.۵.۲. تأثیر الیاف پلی پروپیلین بر روی کارایی

شکل ۱۸-۲ نتایج اسلامپ با نسبت‌های مختلف آب به سیمان برای هر دو بتن PC و PFRC نشان می‌دهد. اسلامپ تمام اختلاط‌های PFRC کمتر از اختلاط‌های مشابه در PC می‌باشد. با این حال، در طول اختلاط و بتن ریزی قابل توجه است که کاهش روانی و قابلیت حرکت اختلاط‌های FPRC به مقدار گفته شده در کاهش اسلامپ نیست. کاهش جزئی روانی و قابلیت حرکت بتن FPRC در مقایسه با بتن معمولی PC نشان داده شده است. این نتایج که از آزمایش مرسوم اسلامپ بدست آمده‌اند برای بیان کارایی PFRC بطور کامل کافی نیستند. نتایج مشابهی بار و لیو^۱ گزارش شده‌اند.

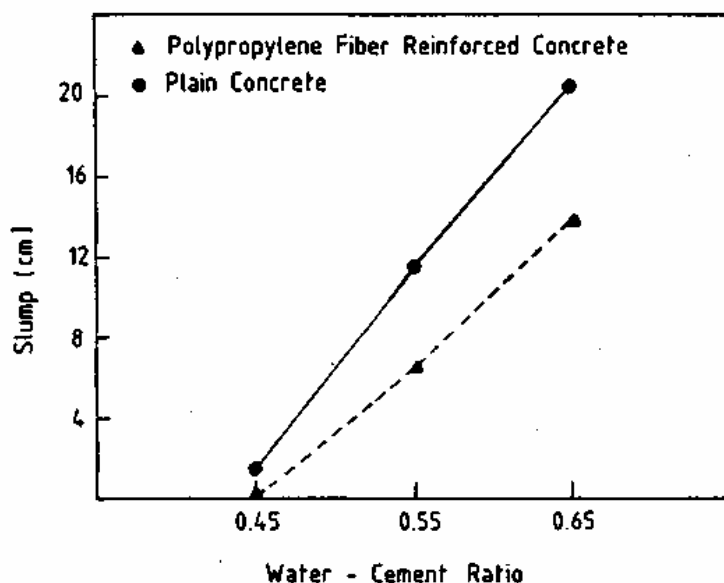
بطوریکه نشان داده شده است استفاده از ۰/۵٪ حجمی الیاف پلی پروپیلین، اسلامپ را برای طراحی با نسبت آب به سیمان ۰/۵ از ۸۸mm به ۱۲mm کاهش داده است. اگرچه روانی اختلاط بطور رضایت بخشی و با ویبره جواب مثبتی داده است. کمیته ACI ۵۴۴، در حال حاضر نظر دارد که آزمایش اسلامپ وارونه جایگزین آزمایش معمول اسلامپ در بتن‌های تقویت شده با الیاف پلی پروپیلین شود. این آزمایش اصولاً میزان قابلیت حرکت مخلوط اندازه می‌گیرد و تأثیر اندازه و شکستگی دانه‌ها و همچنین دانه‌بندی آنها و میزان هوا در اختلاط و سطح سایش الیاف را بررسی می‌کند.

۲.۲.۵.۲. تأثیر الیاف پلی پروپیلین بر روی افت حجمی پلاستیک

در قالب‌های PFRC ترک‌های ناشی از افت حجمی پلاستیک دیده نشد. در حالیکه ترک‌ها در قالب‌های PC قابل توجه بودند. عرض ترک‌ها در در قالب‌های PC از ۰/۱ تا ۱ میلیمتر متغیر بودند (جدول ۲-۷). ترک‌های قالب‌های PC در ۶ تا ۸ ساعت ابتدایی رخ داده داده‌اند و بعد از این زمان تغییر قابل توجهی در تعداد و یا عرض ترک‌ها در ۲۴ ساعت بعد از بتن ریزی رخ نداده‌اند. این نتایج نشان می‌دهند که الیاف‌های پلی پروپیلین، پتانسیل کنترل پدیده افت حجمی پلاستیک را در بتن وقتی در معرض شرایط شدید جوی مثل شرایط موجود در کشورهای اطراف خلیج فارس قرار می‌گیرند بالا می‌برند. در این دو آزمایش شرایط استفاده شده در این تحقیق، قالب‌ها در برابر دمای ۴۰-۴۶°C و

^۱ Barr and Liu

بادی با سرعت بین ۱۶-۲۴km/hr قرار داشتند. نتایج بدست آمده توسط دال و کرائی^۱ از نتایج بدست آمده در این تحقیق پشتیبانی می کند اگرچه شرایط قرارگیری نمونه‌ها متفاوت می باشد.



شکل ۲-۱۸: اسلامپ بتنهای تقویت شده با پلی پروپیلین (PFRC) و بتن معمولی (PC) [14]

۳.۲.۵.۲. تأثیر الیاف پلی پروپیلین بر روی افت حجمی بتن

شکل ۲-۱۹ نتایج مختلف افت بتن را با زمان در مخلوطهای PC و PFRC با نسبتهای

مختلف

آب به سیمان نشان می دهد. افت بتن در مخلوطهای PFRC با نسبتهای آب به سیمان ۰/۴۵، ۰/۵۵ و ۰/۶۵ به ترتیب ۲٪، ۵٪ و ۱۱٪ می باشد که کمتر از مخلوطهای متشابه PC در سن ۷۰ روزگی می باشد. بررسی نتایج بدست آمده توسط محققین مختلف نشان می دهد که افت بتن PFRC به فاکتورهای مختلفی وابسته می باشد و مهمترین این فاکتورها نسبت آب به سیمان بتن، سن بتن، میزان الیاف مصرفی و نسبت طول الیاف به ماکزیموم سائز مصالح. با مدنظر قراردادن این فاکتورها، نتایج بدست آمده در این تحقیق با کشفیات بعضی از تحقیقات مثل زولو^۲ مغایرت دارد که این نشان می دهد که کاهش موثر در افت حجمی بتن به سبب افزایش الیاف پلی پروپیلین می باشد. در گزارشات زولو ۷۵٪ کاهش در افت بتنهای PFRC در مقایسه با PC آورده شده است.

¹ Dahl and Kraai

² Zollo

جدول ۷-۲: نتایج مربوط به ترک خوردگی در اثر افت حجمی پلاستیک [14]

کد طرح اختلاط*	عرض ترک (mm)	
	در شرایط کارگاهی	در شرایط وزش باد شدید
PC-0.45	بدون ترک	بدون ترک
PFRC-0.45	بدون ترک	بدون ترک
PC-0.55	۰/۱-۰/۴	۰/۱
PFRC-0.55	بدون ترک	بدون ترک
PC-0.65	۰/۲-۱/۰	۰/۱-۰/۲
PFRC-0.65	بدون ترک	بدون ترک

*PC-0.45: بتن معمولی با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵

PFRC-0.45: بتن تقویت شده با پلی پروپیلین با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵

این نتایج در تحقیق حاضر، کاهش افت بتن FPRC در مقایسه با PC را نشان می دهد. اما این کافی نیست. لیتوین^۱ همچنین بیان کرده است که افت حجمی بتنهایی PFRC با مقاومت فشاری ۲۰-۳۱ MPa حدود ۵٪ تا ۷٪ کمتر از بتنهایی PC است.

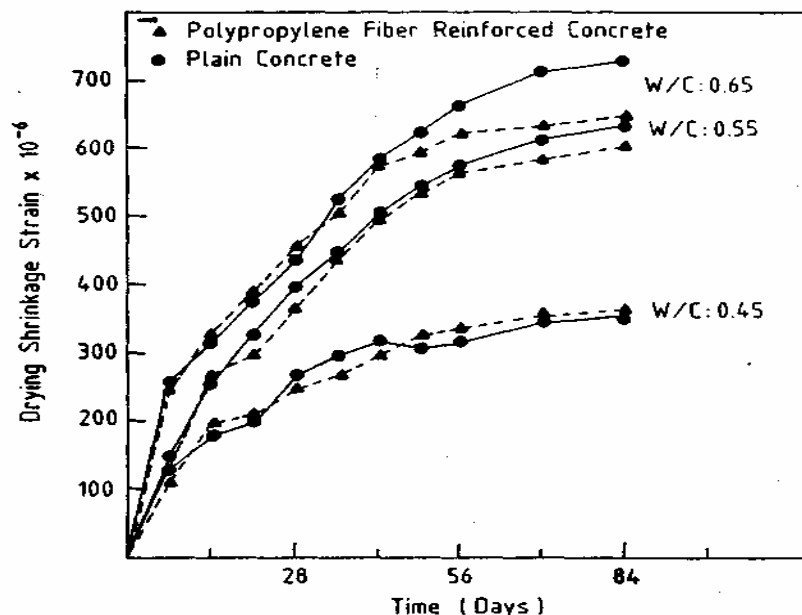
۴،۲،۵،۲. تأثیر الیاف پلی پروپیلین بر روی مقاومت

مقاومت فشاری، کششی و خمشی مخلوطه‌های PC و PFRC با نسبت‌های مختلف آب به سیمان و شرایط نگهداری در جدول ۸-۲، ۹-۲ و ۱۰-۲ نشان داده شده است. قابل ذکر است که تصحیح قابل

ذکری در مقاومت فشاری بتن تحت اثر افزودن الیاف پلی پروپیلین اتفاق نمی افتد (جدول ۸-۲). حتی بعضی از مخلوطه‌های PFRC افت ناچیزی در مقاومت فشاری داشته‌اند. کاهش یا افزایش در مقاومت فشاری مخلوطه‌های PFRC در مقایسه با PC در محدوده ۱٪ تا ۶٪ می باشد. اصلاح خیلی کمی در مقاومت کششی و خمشی مخلوطه‌های PFRC دیده می شود. مقاومت کششی PFRC حدود ۲٪ تا ۸٪ بالاتر از مخلوطه‌های PC می باشد (جدول ۹-۲). بهبود مقاومت خمشی نیز حدود ۱٪ تا ۴٪ می باشد (جدول ۱۰-۲). بطور کلی نتایج بدست آمده منطبق بر نتایج بدست آمده توسط دال و زولا و لیتوین می باشد. تأثیر نگهداری بتن در هوای گرم بر روی مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن بطور آشکار قابل ذکر نمی باشد. اضافه کردن الیاف پلی پروپیلین فقدان مقاومت در بتن را در شرایط نگهداری کارگاهی کاهش نمی دهد. کاهش مقاومت فشاری، کششی و خمشی به سبب نگهداری در شرایط

^۱ Litvin

کارگاهی به ترتیب ۱۰-۳۵٪، ۲۰-۵۰٪ و ۲۰-۴۰٪ برای PFRC و بعلاوه PC می‌باشد.



شکل ۲-۱۹: افت حجمی بتن‌های PC و PFRC [14]

۴,۵,۶. نتیجه گیری

بر طبق اطلاعات بدست آمده در این تحقیق، نتایج زیر قابل بیان می‌باشد:

- ۱- اضافه کردن الیاف پلی پروپیلین کارایی بتن را کمی کاهش می‌دهد.
- ۲- اضافه کردن الیاف پلی پروپیلین ترک‌های افت حجمی پلاستیک در قالب‌هایی که در مقابل حرارت $40-46^{\circ}\text{C}$ و بادی به سرعت ۱۶-۲۴ قرار دارند محو می‌کند. به عبارت دیگر قالب‌های PC با طرح اختلاط مشابه دارای ترک‌های پلاستیک به عرض ۰/۱ تا ۱ میلی‌متر می‌باشند.
- ۳- تأثیر الیاف پلی پروپیلین بر روی افت حجمی بتن قابل توجه نمی‌باشد. افت حجمی بتن در طرح اختلاط‌های PFRC حدود ۲٪ تا ۱۱٪ کمتر از مخلوط‌های مشابه PC در سن ۷۰ روزگی می‌باشد.
- ۴- اضافه کردن الیاف پلی پروپیلین مقاومت فشاری بتن را بهبود نمی‌بخشد.
- ۵- مقاومت کششی و خمشی بتن مقدار ناچیزی با اضافه کردن الیاف پلی پروپیلین بیشتر می‌شود. مقاومت کششی طرح‌های PFRC حدود ۲-۸٪ و مقاومت خمشی حدود ۱-۴٪ بیشتر از مخلوط‌های مشابه PC می‌باشد.

۶- الیاف پلی پروپیلین میزان فقدان مقاومت بتن را که در شرایط آب و هوایی گرم اتفاق می‌افتد، نمی‌تواند کاهش دهد.

جدول ۲-۸: نتایج مقاومت فشاری برای بتنهای PC و PFRC [14]

کد طرح اختلاط	مقاومت فشاری (MPa)			
	۲۸ روزه	۶۰ روزه	۱۲۰ روزه	۲۴۰ روزه
PC-0.45-Control	۴۲/۴۷	۴۳/۱۳	۴۵/۰۳	۴۶/۲۴
PC-0.45-Field	۳۷/۹۴	۳۸/۸۹	۳۹/۷۷	۳۹/۴۳
PFRC-0.45-Control	۴۲/۰۳	۴۲/۸۴	۴۴/۱۹	۴۵/۶۱
PFRC-0.45-Field	۳۷/۵۷	۳۷/۵۷	۳۶/۹۵	۳۷/۷۲
PC-0.55-Control	۳۵/۳۸	۳۷/۳۹	۳۸/۰۱	۳۸/۱۶
PC-0.55-Field	۳۲/۶۰	۳۲/۷۱	۳۲/۴۹	۳۲/۲۷
PFRC-0.55-Control	۳۵/۲۷	۳۷/۸۳	۳۸/۱۶	۳۸/۴۱
PFRC-0.55-Field	۳۲/۷۵	۳۲/۷۱	۳۱/۹۸	۳۱/۱۶
PC-0.65-Control	۲۸/۴۰	۲۷/۰۳	۳۰/۳۷	۳۱/۴۷
PC-0.65-Field	۲۲/۱۱	۲۲/۵۹	۲۲/۳۰	۲۲/۷۰
PFRC-0.65-Control	۲۸/۲۲	۲۸/۹۸	۳۰/۸۸	۳۰/۴۸
PFRC-0.65-Field	۲۱/۴۵	۲۳/۲۱	۲۲/۳۳	۲۳/۰۶

۶.۲. خواص مکانیکی بتنهای تقویت شده با الیاف پلی پروپیلین و

تأثیر مواد پوزولانی [15]

الیافها به صورت کلی و الیافهای پلی پروپیلین بطور خاص شهرت زیادی در استفاده در بتن در سالهای اخیر پیدا کرده است. اساساً تا برای آزمایش مقاومت در مقابل ترک خوردگی و سختی بتن معمولی. الیافهای پلی پروپیلین با توجه به درصد نسبی پایین از نظر اقتصادی برای کنترل ترکهای پلاستیک بتن به صرفه هستند. از الیافهای پلی پروپیلین انتظار نمی رود که مقاومت بتن افزایش دهند اما قابلیت کششی و سختی و مقاومت در مقابل ضربه را افزایش می دهند. در درصد حجمی پایین، تأثیر الیاف بر روی خواص مقاومت بتن و مقاومت ضربه نسبتاً کم می‌باشد و آنالیز دقیق آماری نیاز است تا تأثیرات دقیق الیاف و تغییرات تصادفی نتایج آزمایشات تمییز داده شود.

در این پژوهش اطلاعات جامع آزمایشگاهی و آنالیزهای قدرتمند آماری که نتایج را می‌سازد، در بالاترین درجه اطمینان با موضوع تأثیر درصد حجمی پایین الیافهای پلی پروپیلین رشته

ای بر روی مقاومت فشاری و سختی و مقاومت ضربه مواد بتنی تقویت شده با این الیاف ارائه شده است.

جدول ۲-۹: نتایج مقاومت کششی PC و PFRC [14]

کد طرح اختلاط	مقاومت کششی (MPa)			
	۲۸ روزه	۶۰ روزه	۱۲۰ روزه	۲۴۰ روزه
PC-0.45-Control	۵/۴۳	۶/۲۹	۶/۰۲	۶/۳۳
PC-0.45-Field	۴/۴۲	۴/۴۰	۴/۴۷	۴/۳۵
PFRC-0.45-Control	۵/۵۲	۶/۳۰	۶/۴۰	۶/۶۳
PFRC-0.45-Field	۴/۶۳	۴/۶۵	۴/۶۶	۴/۴۵
PC-0.55-Control	۴/۳۹	۴/۶۲	۴/۷۴	۴/۹۵
PC-0.55-Field	۳/۶۱	۳/۵۰	۳/۶۴	۳/۷۶
PFRC-0.55-Control	۴/۵۷	۴/۷۱	۴/۸۶	۵/۲۷
PFRC-0.55-Field	۳/۷۷	۳/۸۳	۳/۸۲	۳/۹۰
PC-0.65-Control	۳/۴۷	۳/۶۴	۴/۰۸	۴/۳۷
PC-0.65-Field	۲/۷۰	۲/۷۲	۲/۷۷	۳/۰۸
PFRC-0.65-Control	۳/۶۳	۳/۹۸	۴/۲۴	۴/۲۹
PFRC-0.65-Field	۲/۸۳	۲/۸۵	۲/۸۱	۲/۹۹

جدول ۲-۱۰: نتایج مقاومت خمشی PC و PFRC [14]

کد طرح اختلاط	مقاومت خمشی (MPa)			
	۲۸ روزه	۶۰ روزه	۱۲۰ روزه	۲۴۰ روزه
PC-0.45-Control	۶/۶۳	۷/۰۵	۷/۱۱	۷/۴۱
PC-0.45-Field	۶/۳۰	۵/۸۹	۵/۸۶	۵/۸۳
PFRC-0.45-Control	۶/۶۷	۷/۰۹	۷/۱۵	۷/۵۴
PFRC-0.45-Field	۶/۳۶	۶/۰۰	۵/۹۴	۵/۹۷
PC-0.55-Control	۵/۶۲	۵/۸۹	۶/۰۸	۶/۲۰
PC-0.55-Field	۴/۶۵	۴/۵۷	۴/۳۹	۴/۸۶
PFRC-0.55-Control	۵/۷۰	۵/۹۹	۶/۱۶	۶/۱۴
PFRC-0.55-Field	۴/۷۱	۴/۴۲	۴/۴۳	۵/۰۰
PC-0.65-Control	۴/۹۰	۵/۱۹	۵/۳۷	۵/۴۳
PC-0.65-Field	۳/۸۲	۳/۶۶	۳/۷۹	۳/۸۳
PFRC-0.65-Control	۵/۰۰	۵/۲۷	۵/۵۴	۵/۴۶
PFRC-0.65-Field	۴/۰۰	۳/۸۴	۳/۹۲	۳/۸۱

۱.۶.۲. پیش زمینه

تعداد قابل ذکری تحقیق بررسی خواص مکانیکی بتنهای تقویت شده با الیاف پلی پروپیلین انجام شده است.

مقاومت فشاری و خمشی و سختی: نتایج آزمایشی مقاومت فشرددگی، خمشی و سختی متناقضی بوسیله تحقیقات مختلف با موضوع تأثیر الیاف پروپیلین بر روی خواص فشاری و خمشی انجام شده بر روی مواد بتنی گزارش شده است. تفاوت در نتایج شاید به خاطر تفاوت در ترکیبات مختلف، انواع الیافهای پلی پروپیلین و درصد های حجمی مختلف و شرایط مختلف تولید باشد. زولو و همکاران (۱۹۸۴) آزمایشاتی انجام دادند برای تعیین مقاومت فشاری (ASTM C39)، مقاومت کششی (ASTM C496) و مقاومت خمشی (ASTM C78) برای هم بتن معمولی و هم بتن تقویت شده با الیاف پلی پروپیلین. الیاف در این آزمایشات رنج حجمی مابین ۰/۳-۰ داشتند. این نتایج نشان می دهند که وجود الیاف ها تأثیر منفی بر روی مقاومت فشاری دارند در صورتیکه مقاومت کششی و مقاومت خمشی با افزایش حجم الیاف اندکی افزایش می یابد. این نتایجی که بوسیله دیگر تحقیقات بدست آمده اند، اساساً با گزارشات اخیر بدست آمده تطابق دارند. بعضی تحقیقات همچنین شواهدی را هرچند کوچک ارائه داده اند به استثناء تأثیر مطلوب اضافه کردن الیافها بر روی سختی. میندس و وندران^۱ (۱۹۸۸) گزارش دادند که مقاومت فشاری نیز حدود ۲۵ درصد در ۰/۵ حجمی الیاف پلی پروپیلین افزایش پیدا می کند. نتایج آزمایشات گزارش شده بوسیله فتوحی^۲ (۱۹۷۶) تصدیق می کنند که مقاومت فشاری کاهش پیدا می کند اما خواص خمشی با افزایش حجم الیاف پلی پروپیلین اصلاح می شود.

مقاومت مقابل ضربه: مواد بتنی در معرض بارهای فشاری در کارگاههای مختلف اجرائی قرار می گیرند شامل شمع کوبی و سازه های هیدرولیکی، کف پوش فرودگاهها، نواحی حفاظتی و جایگذاری سقفهای صنعتی. مقاومت ضربه قدرت ایستادگی بتن را در مقابل جذب انرژی و آزاد کردن مکرر انرژی نشان می دهد. از آنجایی که بتن معمولی یک ماده ترد شکننده است، جذب انرژی نسبتاً کمی در زیر بارهای ضربه ای مکرر دارند. روشهای آزمایشی مختلفی برای اندازه گیری مقاومت ضربه بتن توسعه یافته است. به دلیل تنوع ساختار چنین آزمایشاتی و نیاز به اجرای تکنیکهای آنالیزی ویژه

¹ Mindess and Vondran

² Fattuhi

در هر تست، تطبیق و مقایسه بین آنها غیر ممکن می‌باشد. بعضی از گزارشها افزایش مقاومت ضربه وقتی الیاف پلی پروپیلین استفاده می‌شود بیان می‌کند. در حالی که بعضی دیگر اصلاحی را نشان نمی‌دهند. آزمایشات که توسط کمیته ACI ۵۴۴ پیشنهاد شد، نشان داده‌اند که تعداد ضربه‌هایی که نیاز می‌باشد تا اولین ترک و سرانجام شکست در بتن اتفاق بیافتد با افزایش الیاف پلی پروپیلین افزایش می‌یابد.

۲.۶.۲. برنامه آزمایشگاهی

در این تحقیق خواص مکانیکی بتنهای تقویت شده با الیاف پلی پروپیلین به صورت آزمایشگاهی بررسی می‌شود. در ابتدا تأثیر مجموعه الیاف پلی پروپیلین رشته ای بر روی مقاومت فشاری و خمشی و سختی بررسی می‌شود و سپس مقاومت در مقابل ضربه برای بتن تقویت شده با پلی پروپیلین در طی یک طرح تجربی با پنج درصد حجمی مختلف (۰ و ۰/۰۵ و ۰/۱ و ۰/۲ و ۰/۳) بررسی می‌شود. طرح آزمایشی دوم تأثیر مواد پزولانی بر روی PPFRC^۱ ارزیابی می‌شود. (به جدول ۲-۱۱ مراجعه شود).

جدول ۲-۱۱: برنامه آزمایشگاهی: فاز دوم [15]

نوع بیندر	مقدار حجم الیاف (%)	
	۰/۰	۰/۱
سیمان پرتلند	*	*
۷۵٪ سیمان پرتلند + ۲۵٪ خاکستر بادی	*	*
۹۰٪ سیمان + ۱۰٪ میکروسیلیس	*	*
۷۵٪ سیمان + ۲۵٪ سرباره	*	*

* ۲-فشاری، ۳-خمشی و ۱۰ نمونه ضربه

۲.۶.۲.۱. مواد

عناصر اصلی مخلوط PPFRC شامل: سیمان پرتلند تیپ ۱، مصالح درشت دانه، مصالح ریزدانه، آب، رشته‌های دسته ای از الیاف پلی پروپیلین^۲. عامل هواده نیز برای فراهم کردن مقاومت یخ زدگی و آب شدگی اضافه شده است. فوق روان کننده نیز برای حفظ محدودیت‌های نسبت آب به سیمان و اسلامپ به مخلوطهای غیر کارا اضافه می‌شود.

¹ Poly propylene fiber reinforced concrete

² Collated fibrillated polypropylene fibers

ترکیب مخلوطها در بعضی از موارد با جانمایی درصدی از مواد پوزولانی (خاکستر بادی، میکروسیلیس و سرباره) بجای سیمان تعدیل یافته است. ترکیبات شیمیایی این مواد در جدول ۲-۱۲ آورده شده است.

در این تحقیق از دسته‌های مرتب شده الیاف پلی پروپیلین استفاده شده است. بعضی از خواص فیزیکی این الیافها عبارتست از: مقاومت کششی: ۶۲۸-۷۶۰ MPa، مدول یانگ: ۳/۵ GPa، وزن مخصوص: ۰/۹، نقطه ذوب: ۱۷۰-۱۶۰ °C و نقطه اشتعال: ۵۹۰ °C.

شن استفاده شده شامل سنگ آهک خرد شده با ماکزیموم سایز ۱۹mm و وزن مخصوص ۲/۵۵. مصلح ریزدانه شامل ماسه طبیعی با مدول نرمی ۳ و وزن مخصوص ۲/۵ می‌باشد. دانه‌بندی شن و ماسه با توجه به ASTM C33 می‌باشد.

جدول ۲-۱۲: ترکیبات شیمیایی بیندرها [15]

نوع بیندر	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	C	Na ₂ O
سیمان	۶۳/۲۴	۲۱/۱۴	۵/۷۶	۲/۹۳	۲/۴۶	۲/۰۶	۰/۷۹	-	-
خاکستر بادی	۲/۶	۴۷/۰۰	۲۲/۱۰	۲۳/۴۰	-	۰/۷۶	۲/۰۰	۴/۳۰	-
میکروسیلیس	-	۹۶/۵۰	۰/۱۵	۰/۱۵	-	۰/۲۰	۰/۰۴	۱/۴۰	۰/۲۰
سرباره ^۱	-	۳۵/۴۰	۱۱/۴۰	۰/۶۰	۱/۰۲	۱۳/۰۰	۰/۳۴	-	۰/۱

۲،۲،۶،۲. نسبت‌های افتلاط

برای راحتی جابه جایی ریختن و ویبره کردن تصمیم گرفته شد که مخلوط بتن با اسلامپ ۸۹±۱۳mm فراهم شود. تناسب اولیه استفاده شده در این تحقیق (عامل هواده هم اضافه شده نیاز به مقدار مشخصی دارد تا به حجم هوای مطلوب برسیم) به صورت زیر است:

- نسبت مصالح سنگی به مصالح چسبنده: ۴/۵
- نسبت درشت دانه به ریزدانه: ۱/۲۵
- آب به سیمان: ≤ ۰/۴۵

^۱ Slag

جدول ۲-۱۳: تناسب اختلاط: فاز ۱ (lb/yd^3) [15]

SP	AEA	آب	ماسه	شن	سیمان	L_f (in.)	V_f (%)
-	۰/۵۴۱	۲۷۱	۱۳۵۳	۱۶۹۱	۶۷۶	-	۰/۰۰
-	۰/۳۳۵	۲۸۲	۱۳۴۱	۱۶۷۶	۶۷۱	۰/۷۵	۰/۰۵
-	۰/۳۳۴	۳۰۱	۱۳۳۶	۱۶۷۱	۶۶۸	۰/۷۵	۰/۱۰
۰/۹۹۳	۰/۳۳۱	۲۹۸	۱۳۲۳	۱۶۵۴	۶۶۲	۰/۷۵	۰/۲۰
۱/۶۵۳	۰/۳۹۷	۲۹۷/۵	۱۳۲۲	۱۶۵۳	۶۶۱	۰/۷۵	۰/۳۰

$$kg/m^3 = 0.594 lb/yd^3$$

فوق روان کننده اضافه شده وقتی لازم است که بخواهیم به اسلامپ خاصی برسیم بدون اینکه از نسبت آب به سیمان تجاوز کنیم. در بعضی از حالتها که از پوزولان استفاده شده، کسری از سیمان با پوزولان جایگزین شده است بطوریکه میزان جرم اولیه ثابت بماند. این ترکیب پوزولان و سیمان استفاده شده در جدول ۲-۱۱ آورده شده است. ترکیبهای نهایی ساخت بتن در این تحقیق در جدول ۲-۱۳ و ۲-۱۴ آورده شده است.

جدول ۲-۱۴: تناسب اختلاط: فاز ۲ (lb/yd^3) [15]

SP	AEA	پوزولان	آب	ماسه	شن	سیمان	V_f (%)	ترکیب ملات
-	۰/۵۴۱	-	۲۷۱	۱۳۵۳	۱۶۹۱	۶۷۶	۰/۰۰	سیمان
-	۰/۳۳۴	-	۳۰۱	۱۳۳۶	۱۶۷۱	۶۶۸	۰/۱۰	سیمان
۰/۳۴۵	۱/۰۸۴	۱۶۴/۱	۲۹۶	۹۸۵	۱۲۳۲	۴۹۳	۰/۰۰	سیمان + ۲۵٪ خاکستر بادی
۰/۳۹۴	۰/۹۸۴	۱۶۳/۹	۲۹۵	۹۸۴	۱۲۳۰	۴۹۲	۰/۱۰	سیمان + ۲۵٪ خاکستر بادی
-	۰/۶۵۸	۱۶۸/۴	۲۷۰	۱۰۱۲	۱۲۶۵	۵۰۶	۰/۰۰	سیمان + ۲۵٪ سرباره
-	۰/۵۰۴	۱۶۷/۸	۲۷۶	۱۰۰۸	۱۲۶۰	۱۲۶۰	۰/۱۰	سیمان + ۲۵٪ سرباره
۱/۷۸۶	۰/۸۹۳	۶۶/۱	۲۹۸	۱۱۹۱	۱۴۸۸	۵۹۵	۰/۰۰	سیمان + ۱۰٪ میکروسیلیس
۰/۹۵۲	۰/۸۹۱	۶۶/۰	۲۹۷	۱۱۹۰	۱۴۸۷	۵۹۵	۰/۱۰	سیمان + ۱۰٪ میکروسیلیس

$$kg/m^3 = 0.594 lb/yd^3$$

۳.۲.۴.۲. ساختار

همه ترکیبها در میکسری با حجم $0.4 m^3$ مخلوط می‌شوند. روش مخلوط بر اساس ASTM C192 می‌باشد. مخلوط کن در ابتدا با درشت دانه پر می‌شود و یک بخش از آب به آن اضافه می‌شود. بعد از شروع به چرخش میکسر ریزدانه، سیمان و آب باقیمانده به آن اضافه می‌شود و برای ۳ دقیقه مخلوط می‌شوند. پس از ۳ دقیقه سکون سپس ۲ دقیقه مجدداً مخلوط میکس می‌شود. الیافها،

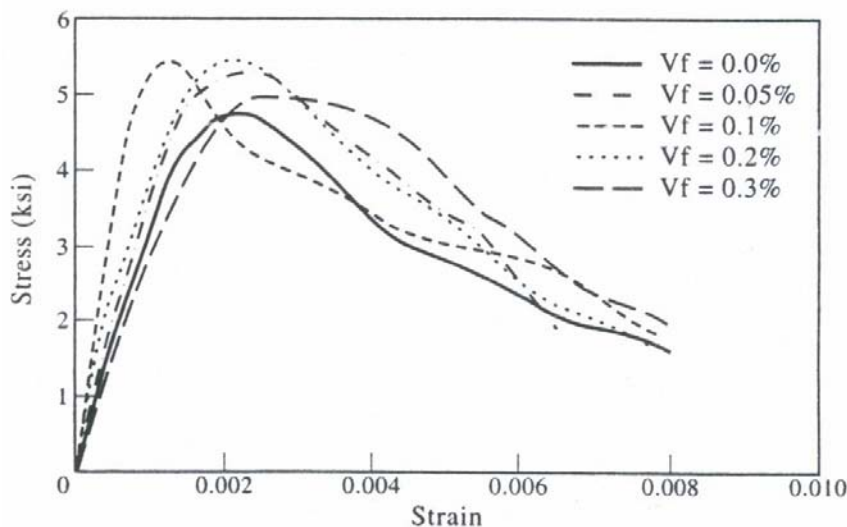
در حالت مخلوطی از دسته‌های این الیاف به همراه دیگر اضافات مخلوط، اضافه می‌شوند. مخلوط عامل هواده و فوق روان کننده نیز با آب اضافه می‌شود.

تمام نمونه‌ها بعد از قالبگیری با پارچه خیس و نمناک ۳۰ الی ۴۰ دقیقه بعد از قالبگیری پوشانده می‌شوند و بعد از ۲۴ ساعت از قالب بیرون آورده شده و سپس با رطوبت $97 \pm 3\%$ و در دمای $23 \pm 1/7$ درجه سانتیگراد به مدت ۳ روز عمل آوری می‌شوند. بعد از این مدت آنها را در شرایط آزمایشگاهی در دمای $23 \pm 1/7^{\circ}\text{C}$ و در رطوبت $40 \pm 5\%$ تا روز (سن ۲۸ روزگی) آزمایش نگهداری می‌شوند.

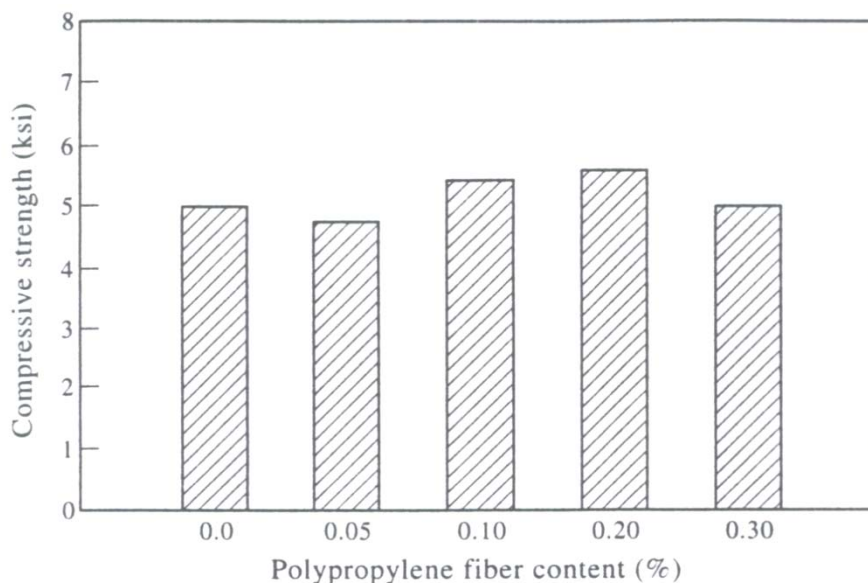
۳.۴.۲. روش و نتایج آزمایش

۱.۳.۴.۲. نتایج مقاومت فشاری

این آزمایش بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد $305 \times 152 \text{ mm}$ بر طبق روش ASTM C39 انجام شده است. در این آزمایش با توجه به سیستم کامپیوتری استفاده شده منحنی تنش-کرنش نمایش داده می‌شود. سختی فشاری با توجه به استاندارد JCI-SF. و با اندازه گیری مساحت زیر منحنی تنش-کرنش تا کرنش 0.075 بدست می‌آید. منحنی های نرمال تنش-کرنش فشاری برای درصد حجم های مختلف در شکل ۲-۲۰ نشان داده شده است. میانگین نتایج آزمایشات مقاومت و سختی فشاری به ترتیب برای درصدهای مختلف حجمی الیاف در شکل ۲-۲۱ و ۲-۲۲ نشان داده شده است.

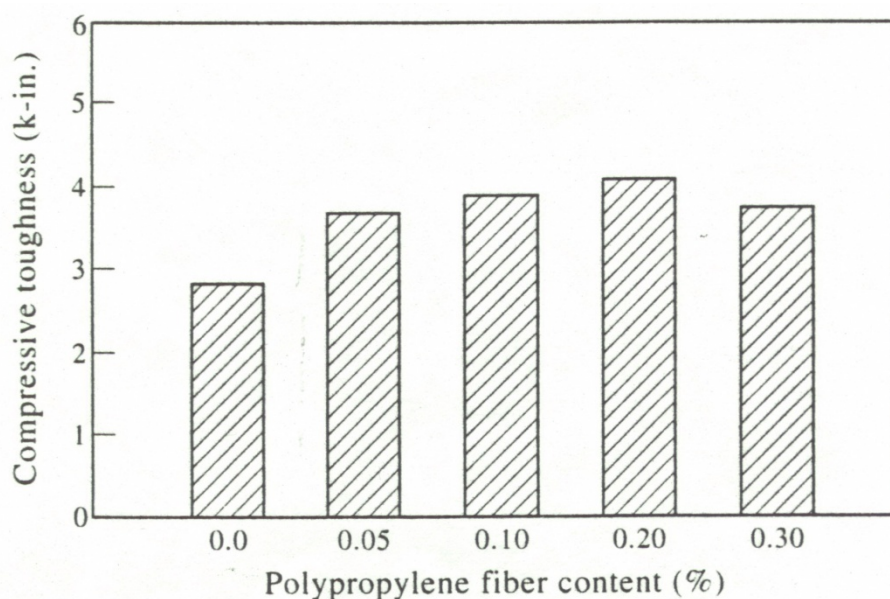


شکل ۲-۲۰: نمودار تنش-کرنش فشاری در درصدهای مختلف الیاف [15]



شکل ۲-۲۱: نتایج آزمایش مقاومت فشاری در درصد‌های مختلف الیاف [15]

در یک طریق آنالیز داده‌های مختلف این آزمایش معلوم شد که تأثیرات درصد حجمی الیاف پلی پروپیلین بر روی مقاومت و سختی فشاری بتن به لحاظ آماری در فاصله اطمینان ۹۵٪ قرار ندارند. میانگین داده‌های آزمایش مقاومت و سختی فشاری برای موادی که با مخلوط پوزولانی آمیخته شده‌اند در شکل‌های ۲-۲۳ و ۲-۲۴ نمایش داده شده است. این نتایج با تکنیک ضریب پراکندگی آنالیز شده‌اند. دو فاکتور در آنالیز درصد حجمی الیاف (۰٪ و ۱٪) و چهار ترکیب مختلف چسبنده (سیمان، سرباره، میکروسیلیس و خاکستر بادی) بودند.

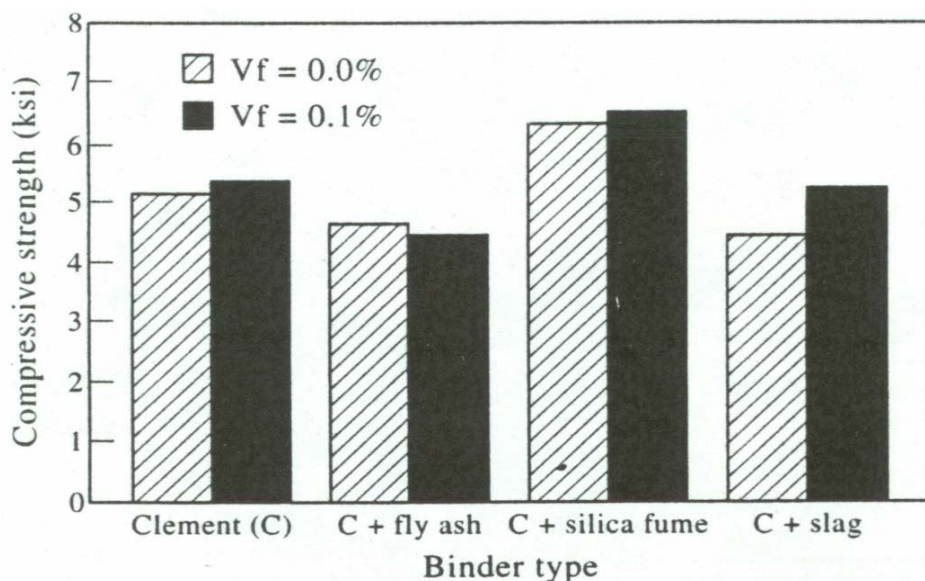


شکل ۲-۲۲: نتایج آزمایش سختی فشاری در درصد‌های مختلف الیاف [15]

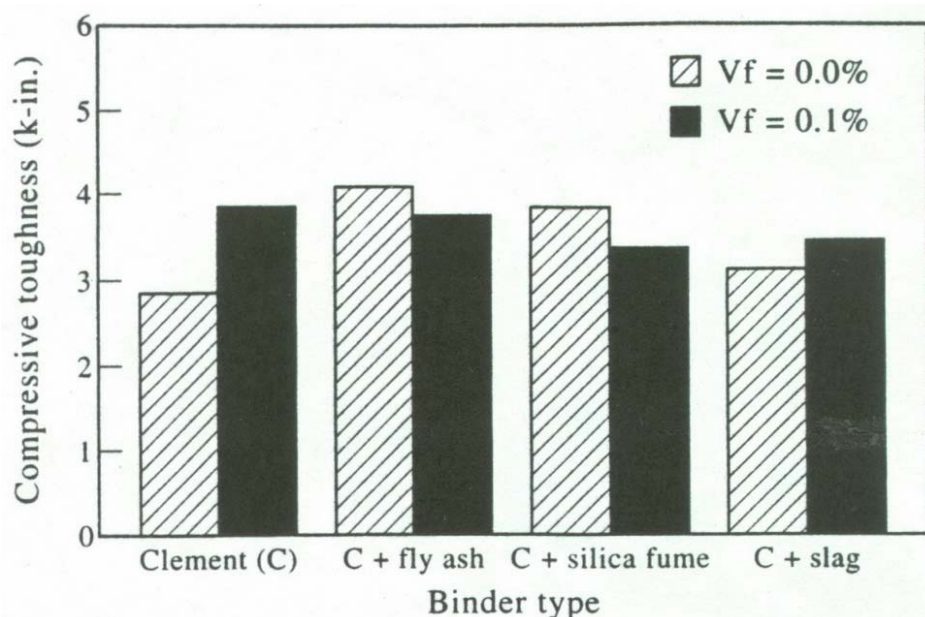
۲،۳،۴،۵. نتایج مقاومت و سختی خمشی

این آزمایش با نمونه‌های منشوری به ابعاد $102 \times 102 \times 356$ mm بر طبق روش ASTM C78 با سه نقطه بارگذاری انجام شده است. آزمایش توسط دستگاه اندازه‌گیری تغییر مکان کنترل می‌شود و مطابق با مشخصات JCI-SF تغییر مکان در وسط نمونه اندازه‌گیری می‌شود. منحنی تنش-کرنش در آزمایشهای خمش توسط یک سیستم کامپیوتری نمایش داده می‌شود. سختی خمشی PPFRC با استفاده از روش JCI-SF محاسبه می‌شود. (ناحیه زیر منحنی بار خمشی-تغییر مکان وسط دهانه که برابر طول دهانه تقسیم بر ۱۵۰ می‌باشد).

منحنی نرمال بار-تغییر مکان برای درصد حجمهای مختلف استفاده شده در این تحقیق در شکل‌های ۲-۲۵ نشان داده شده است. مقادیر متوسط برای نتایج آزمایش مقاومت خمشی و سختی در فاز یک این تحقیق به ترتیب در شکل‌های ۲-۲۶ و ۲-۲۷ نشان داده شده است. یک روش آنالیز داده‌های آزمایش معلوم کرد که درصد حجمی الیاف پلی پروپیلین با سطوح اطمینان ۹۵٪ تأثیری در مقاومت خمشی مواد بتنی ندارد. در صورتیکه از نظر آماری تأثیر این الیاف بر روی سختی خمشی در سطح اطمینان ۹۹٪ قرار داشت. افزایش سختی خمشی به سبب این افزایش به ترتیب ۴۴٪، ۲۷۱٪ و ۳۸۶٪ درصد برای حجمهای ۰/۱٪، ۰/۲٪ و ۰/۳٪ بوده است. تعداد مقایسه‌های انجام شده بر روی نتایج نشان داده است که افزایش سختی خمشی بازای ۰/۰۵٪ حجمی از الیاف از نظر آماری قابل ملاحظه نیست.

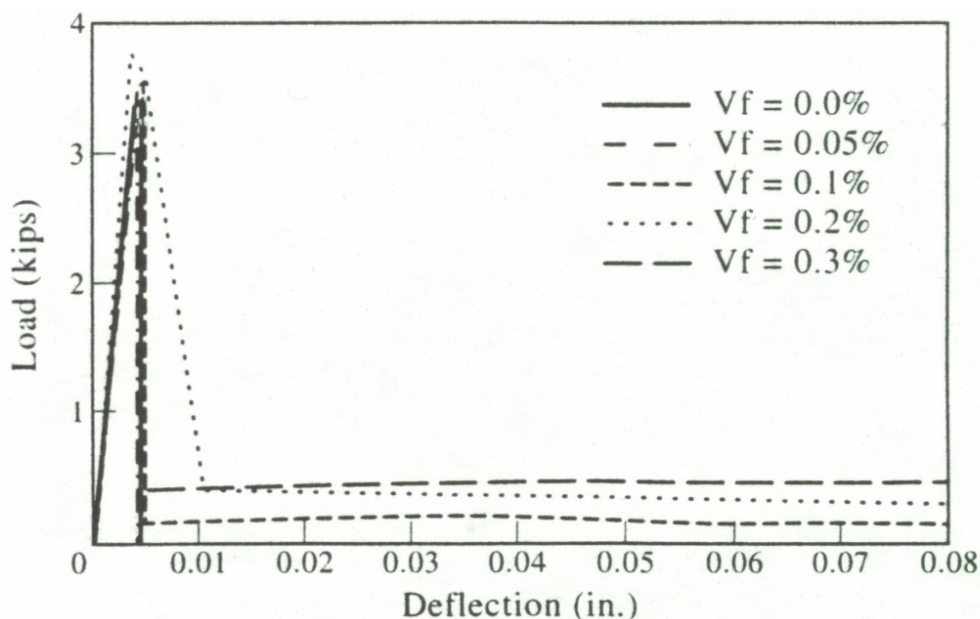


شکل ۲-۲۳: نتایج آزمایش سختی فشاری در درصد‌های مختلف الیاف [15]



شکل ۲-۲۴: نتایج آزمایشات سختی فشاری برای بتن الیافی با مواد پوزولانی مختلف [15]

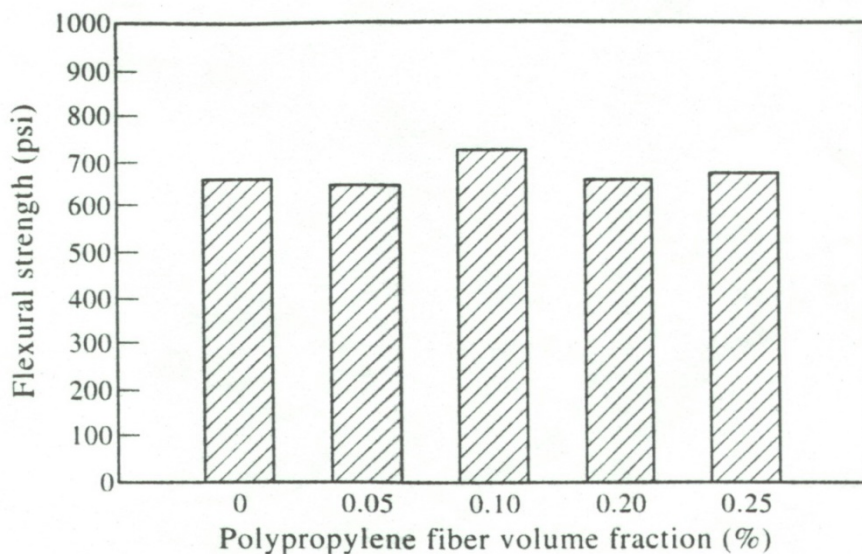
میانگین اطلاعات مربوط به سختی خمشی و مقاومت خمشی برای دیگر ترکیبات پوزولانی چسبنده در شکل‌های ۲-۲۸ و ۲-۲۹ نشان داده شده است. آنالیز این داده‌ها با دو عامل مواد پوزولانی و تقویت الیافی نشان داد که ۰/۱٪ حجمی آلیاف تأثیری بر روی مقاومت خمشی ندارد ولی ترکیب سیمان با مواد پوزولانی بر روی مقاومت خمشی تا سطح اطمینان ۹۹٪ درصد تأثیر گذار است. بررسی نتایج آزمایش سختی خمشی نشان داد که برای هم درصد حجمی آلیافها و هم ترکیبات پوزولانی تأثیر قابل توجهی در فاصله اطمینان ۹۹٪ وجود دارد. همچنین اندرکنش مهمی بین الیافها و ترکیبات پوزولانی وجود دارد تا حدی که سختی خمشی برای مثال در حالت میکروسیلیس و خاکستر بادی به ترتیب ۷۹ و ۲۸ درصد بیشتر از بتن الیافی معمولی (بدون این دو ماده پوزولانی) است.



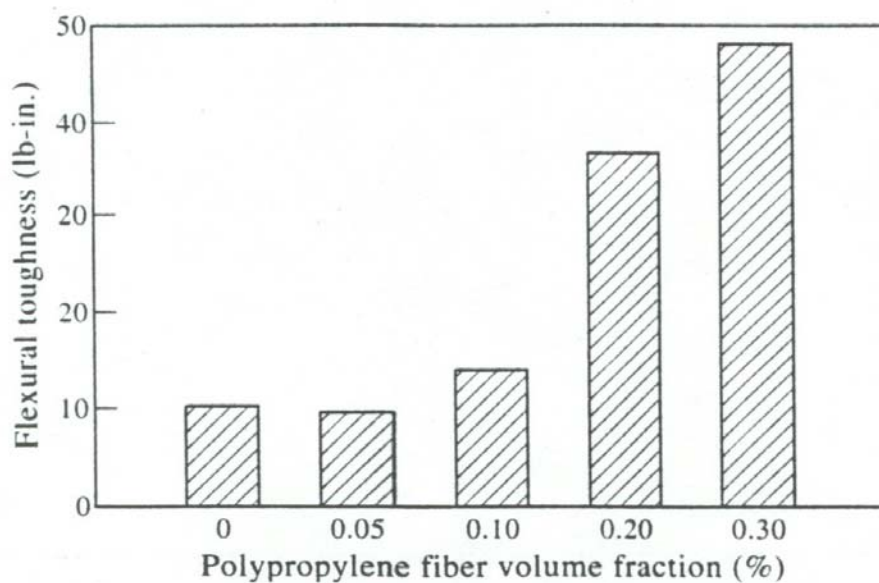
شکل ۲-۲۵: منحنی بار-تغییرمکان خمشی برای درصدهای مختلف الیاف [15]

۳.۳.۶.۲. نتایج مقاومت ضربه

این آزمایش که توسط کمیته ACI ۵۴۴ شرح داده شده است با نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۵۲mm و ارتفاع ۶۴mm انجام شد. این آزمایش شامل تکرار سقوط چکشی از ارتفاع ۴۵۷mm روی ساچمه تعبیه شده بر روی نمونه‌ها بود تا وقتی که تغییر شکلهای ترکی و شکست در نمونه مشاهده شود. تعداد ضربه‌هایی که لازم بود تا اولین ترک و شکست را در بالای نمونه‌ها ایجاد کند هر دو ثبت شد. میانگین نتایج آزمایش برای اولین ترک و شکست در اثر ضربه در شکل ۲-۳۰ نشان داده شده است. بررسی داده‌ها معلوم ساخت که تأثیر الیاف پلی پروپیلین بر روی انرژی اولین ترک و شکست نهایی در اثر ضربه به ترتیب در سطوح اطمینان ۹۵٪ و ۹۹٪ قرار دارند. مقایسه‌های مختلف اطلاعات نشان داده است که فقط در درصد حجمی ۰/۲ از الیاف ایجاد اولین ترک در اثر ضربه با بتن معمولی متفاوت است و در سطح اطمینان ۹۵٪ قرار دارد (برای الیافهای بطول ۱۹mm). در حالت شکست ناشی از ضربه هم فقط در ۰/۱ و ۰/۲ (و نه در ۰/۳ و ۰/۵) در فاصله اطمینان ۹۵٪ قرار دارد. میانگین داده‌ها برای اولین ترک و شکست ناشی از ضربه برای مخلوطهای پوزولانی (فاز ۲ برنامه آزمایشگاهی) به ترتیب در شکل ۲-۳۱ و ۲-۳۲ نشان داده شده است.



شکل ۲-۲۶: نتایج آزمایش خمشی برای درصدهای مختلف الیاف [15]

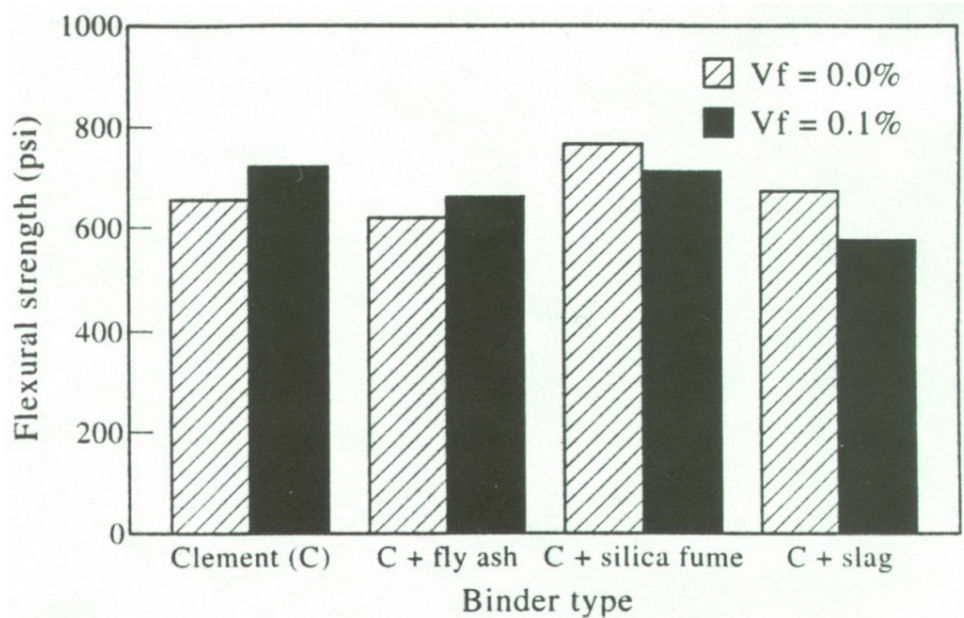


شکل ۲-۲۷: نتایج آزمایش سختی خمشی برای درصدهای مختلف الیاف [15]

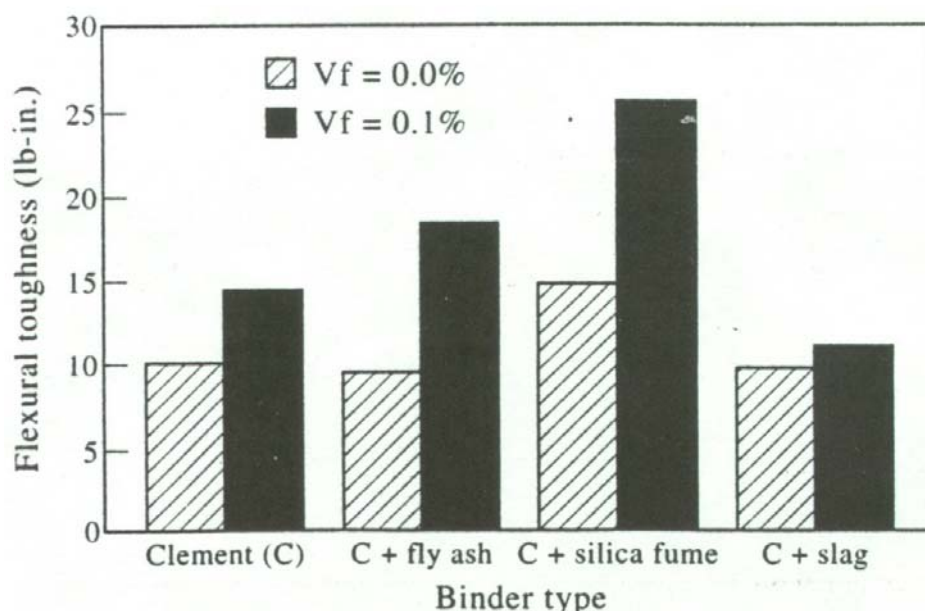
۴,۶,۲. نتیجه گیری

تأثیر الیاف بافته شده پلی پروپیلین در درصد های حجمی بین ۰/۰۵٪ تا ۰/۳٪ بر روی مقاومت فشاری، خمشی، سختی خمشی و مقاومت ضربه برای بتنهای حاوی مواد معمول و حاوی مواد پوزولانی در این تحقیق بصورت آزمایشگاهی، مورد بررسی قرار گرفت. تعداد داده های آزمایش کافی برای رسیدن به نتایجی در فاصله اطمینان ۹۵٪ تهیه شده است. نتایج این تحقیق به صورت خلاصه بشرح زیر می باشد:

۱- الیاف پلی پروپیلین از نظر آماری تأثیر قابل توجهی بر روی مقاومت فشاری بتن معمولی و بتن ندارد. در عوض وجود میکروسلیس در بتن در حدود ۱۷٪ تا ۲۳٪ مقاومت فشاری بتنهای معمولی و الیافی را افزایش می دهد.



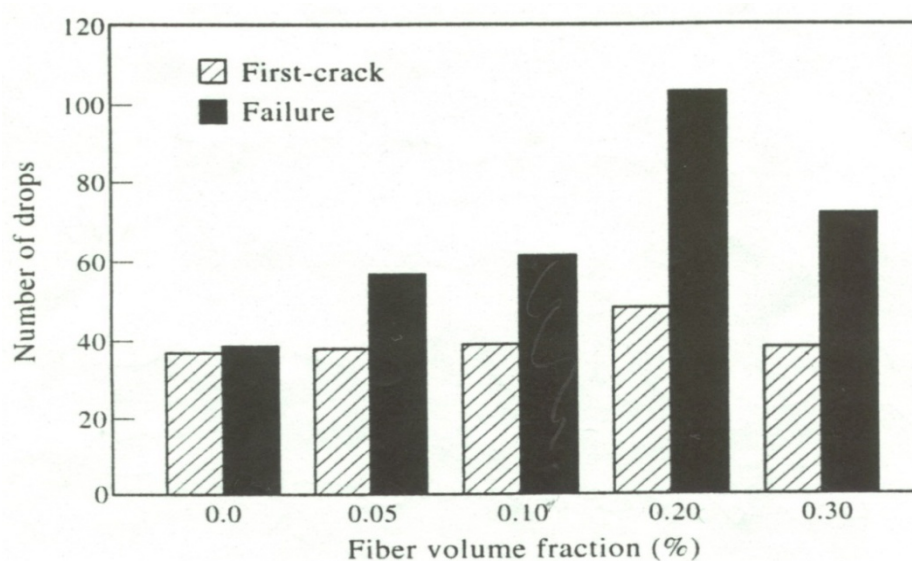
شکل ۲-۲۸: تأثیر مواد پوزولانی و درصد حجمی آلیاف بر روی مقاومت خمشی [15]



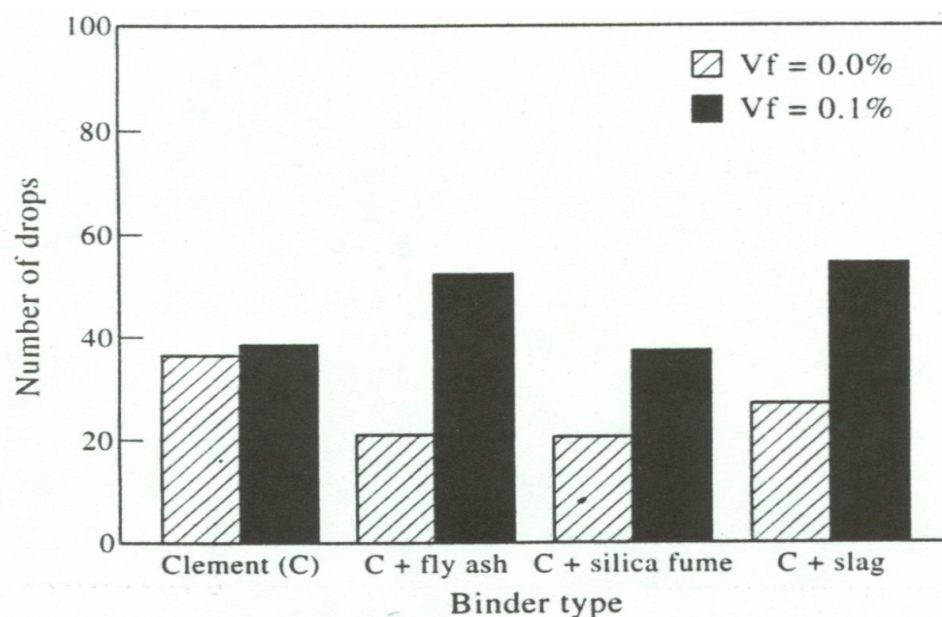
شکل ۲-۲۹: تأثیر مواد پوزولانی و درصد حجمی آلیاف بر روی سختی خمشی [15]

۲- الیاف پلی پروپیلین در درصدهای حجمی استفاده شده در این تحقیق، تأثیری را بر روی مقاومت خمشی بتن نشان ندادند.

۳- الیاف پلی پروپیلین بر روی سختی خمشی بطور قابل ملاحظه ای در سطح اطمینان ۹۵٪ تأثیر گذار هستند. بطوریکه استفاده از این الیاف در درصدهای حجمی ۰/۱٪، ۰/۲٪ و ۰/۳٪ به ترتیب سختی خمشی بتن را ۴۴٪، ۲۷۱٪، و ۲۸۷٪ افزایش می دهد. میکروسلیس نیز سختی خمشی بتنهای معمولی و الیافی را در حدود ۴۸٪ تا ۷۹٪ افزایش می دهد.



شکل ۲-۳۰: نتایج آزمایشات مقاومت در مقابل ضربه برای درصدهای مختلف الیاف [15]

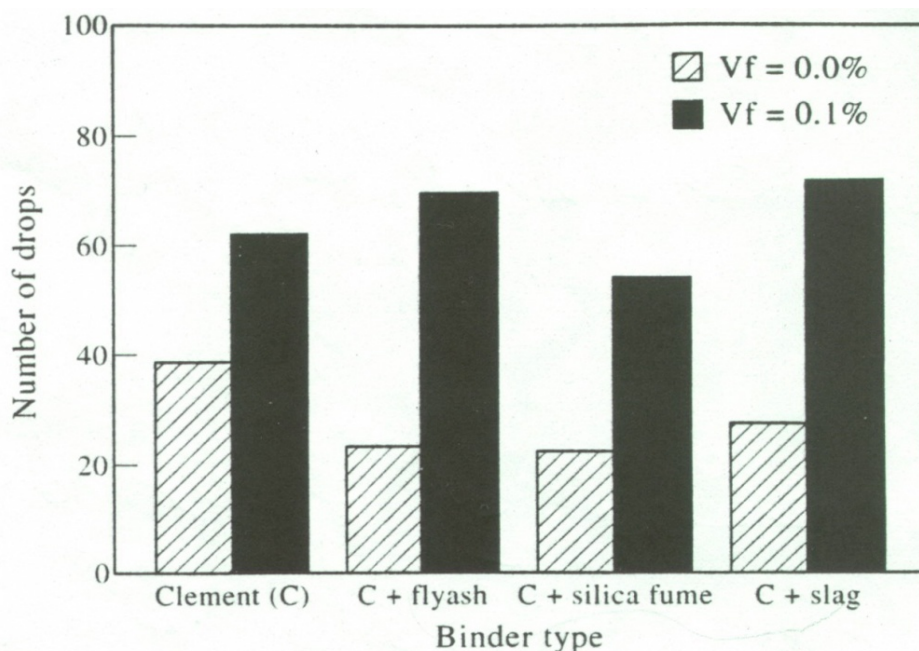


شکل ۲-۳۱: تأثیر مواد پوزولانی و درصد حجمی الیاف بر روی مقاومت اولین ترک در ضربه [15]

۴- الیاف پلی پروپیلین انرژی ایجاد اولین ترک و همچنین شکست نهایی بتن را افزایش می

دهند. مقاومت شکست در مقابل ضربه در آزمایشات این تحقیق ۴۸٪، ۶۲٪، ۱۷۱٪ و ۹۰٪ به ترتیب در درصدهای حجمی ۰/۱٪، ۰/۲٪ و ۰/۳٪ برای الیاف بطول ۱۹mm افزایش داشته است.

۵- در حالیکه مواد پوزولانی بطور کلی مقاومت ضربه بتن را کاهش می دهند، عملکرد مثبت بین الیاف پلی پروپیلین و پوزولان (الیاف تأثیر پوزولان را بیشتر می کند) مقاومت ضربه بتنهای الیافی توسط پوزولانها افزایش می یابد. مقاومت ضربه در شکست نهایی بتنهای الیافی ۸۲٪، ۴۲٪ و ۹۰٪ به ترتیب در اثر اضافه کردن خاکسترآبی، میکروسیلیس و سرباره افزایش می یابد.



شکل ۲-۳۲: تأثیر مواد پوزولانی و درصد حجمی آلیاف بر روی مقاومت در مقابل شکست در ضربه

[15]

۷.۲. خواص مقاومتی بتنهای تقویت شده با الیاف نایلون و پلی

پروپیلین [16]

خواص مقاومتی بتنهای تقویت شده با الیاف نایلون در مقایسه با بتنهای تقویت شده با پلی پروپیلین تحقیق شده است. در حجم الیافی برابر 0.06 kg/m^3 مقاومت فشاری و مقاومت کششی دونیم شدن و مدول گسیختگی (MOR) بتنهای تقویت شده با الیاف نایلون به ترتیب حدود ۶/۳٪،

۶/۷٪ و ۴/۳٪ بیشتر از بتنهای تقویت شده با الیاف پلی پروپیلین می‌باشند. بر روی مقاومت ضربه، مقاومت اولین ترک و گسیختگی و درصد افزایش ایجاد اولین ترک در اثر ضربه، اصلاح بیشتری در بتنهای تقویت شده با الیاف نایلون نسبت به نمونه‌های مشابه آن با الیاف پلی پروپیلین دیده می‌شود. به علاوه ترکهای ناشی از جمع شدگی در ملات شامل الیاف نایلون اصلاح بیشتری یافته و کاهش ترکها را شاهد هستیم.

بتن یک ماده ساختمانی با مقاومت کششی ضعیف است که اغلب در مقابل حالات پلاستیک و سخت، افت حجمی و موارد مشابه دچار ترک می‌شود. ترکها عموماً با زمان و تنش در داخل بتن گسترده می‌شوند از اینرو به خواص آب بندی و بی حفاظ گذشتن که از خواص ذاتی بتن است در حالات مخربی همچوی رطوبت و محیط سولفاتی و ... آسیب می‌رساند. این عمل مخرب تر خواهد بود وقتی فولاد تقویتی در داخل بتن دچار پوسیدگی شود. برای بی اثر کردن و حذف کردن اینگونه ترکها یک فن برای استفاده احتیاج می‌باشد که آن استفاده از الیافها در طرح اختلاطهای بتن است. چراکه در هنگام عمل اختلاط الیافها بطور یکنواختی در سرتاسر بتن در تمام جهتها توزیع می‌شود. در بتن تازه الیافهای تقویت شده بصورت یکنواخت در مقابل تغییرشکلهای پلاستیک ناشی از افت حجمی مقابله می‌کند. الیافهای تقویتی بصورت یکنواخت در بتن سخت شده از گسترش و تبدیل شدن ریزترکها به ترکهای درشت در داخل بتن جلوگیری می‌کند. بعلاوه الیافها پلی ایجاد می‌کنند و از اینرو ماکروتترکها بوجود آمده را با هم نگه می‌دارند، بنابراین بتن در مقابل از هم پاشیدگی مسلح می‌شود. الیافهای تقویت بتن شامل: فلز، پلیمر و دیگر انواع مختلف است. در میان الیافهای پلیمر، الیاف پلی پروپیلین در حوزه بتن دارای شهرت هستند و عملکرد و مقبولیت رو به افزایشی را دارند.

الیافهای پلی پروپیلین ادعای جلوگیری از ضرر و زیان بتن را در مواجه شدن با ترک خوردگی و افت حجمی را دارند. از این گذشته الیافها نه تنها عملکرد را در فشار، خمش و کشش تقویت می‌کنند بلکه تحت تخریب در مقابل ضربه و ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی پلاستیک نیز موثر می‌باشند. در این مقاله، خصوصیات مقاومتی و کنترل ترکها ناشی از جمع شدگی برای الیافهای نایلون مورد تحقیق قرار گرفته و با الیاف پلی پروپیلین مورد مقایسه قرار گرفته است.

۱،۷،۲ برنامه آزمایشگاهی

۱،۱،۷،۲ مواد

سیمان استفاده شده، پرتلند تیپ ۱، شن با ماکزیموم سایز ۲،۵۴CM استفاده شد. از ماسه

رودخانه ای با مدول نرمی ۲,۹ استفاده شد. غلظت الیاف استفاده شده نیز هم برای نایلون در حدود 0.6 kg/m^3 می باشد. برخی خواص در نوع الیاف پلیمری در جدول ۲-۱۵ آورده شده است.

جدول ۲-۱۵: خواص فیزیکی الیاف نایلون و پلی پروپیلین [16]

نوع الیاف	طول الیاف (mm)	وزن مخصوص	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی (MPa)	نقطه ذوب (°C)
نایلون	۱۹	۱/۱۴	۵/۱۷	۸۹۶	۲۲۵
پلی پروپیلین	۱۹	۰/۹۱	۴/۱۱	۴۱۳	۱۶۰

۲,۱,۷,۲. نمونه اختلاط و شرایط نگهداری

روشهای اختلاط برای بتنهای تقویت شده با الیاف شامل مراحل زیر است:

در ابتدا شن و ماسه در داخل میکسر ریخته می شوند و بصورت خشک به مدت ۱ دقیقه مخلوط می شوند. در مرحله دوم سیمان اضافه شده و دوباره به مدت ۱ دقیقه بصورت خشک مخلوط می شوند. در مرحله سوم آب مخلوط به آرامی اضافه شده و به مدت ۳ دقیقه اختلاط ادامه پیدا می کند. در انتها نیز بتن ساخته شده در قالبهای $15 \times 30 \text{ cm}$ برای انجام آزمایش های مقاومت فشاری و کششی و همچنین قالبهای $15 \times 15 \times 53 \text{ cm}$ برای آزمایش خمشی پر می شوند. بعد از عملیات قالبگیری، نمونه ها بعد از زمان ۲۴ ساعت از قالبها در آورده می شوند و در آب آهک در دمای 23°C برای مدت ۲۸ روز نگهداری می شوند و بعد از آن از آب در آورده شده و در دمای اتاق تا زمان آزمایش نگهداری می شوند. بدنبال این انتقال، بعضی از نمونه ها $15 \times 30 \text{ cm}$ برای تعیین مقاومت ضربه استفاده می شوند. هر نمونه 15×30 به چهار سیلندر $15 \times 6/4 \text{ cm}$ برای کنترل ضربه تقسیم می شود.

۳,۱,۷,۲. آزمایش سقوط وزنه

ارزیابی مقاومت ضربه از توصیه کمیته ACI ۵۴۴ پیروی می کند که در آن نمونه ها با تعداد ضربه های مساوی و تکرار شونده مواجه می شدند. تعداد ضربه ای را که اولین ترک آشکار را در نمونه نمایان می ساخت به عنوان مقاومت اولین ترک و تعداد ضربه ای را که باعث تخریب نمونه می شد به عنوان مقاومت شکست در نظر گرفته می شد. مرحله شکست بطور واضحی از روی قطعه شکسته شده نسبت به براده های صفحه اصلی نمایان است.

۲،۷،۱،۴. آزمایش کاهش پتانسیل ترکهای جمع شدگی

پتانسیل کاهش ترک جمع شدگی الیافهای نایلون و پلی پروپیلین در بتن بوسیله اندازه گیری پتانسیل این دو نوع الیاف در بتنی شامل سیمان و ماسه با نسبت ۱:۱/۵ بدون حضور شن ارزیابی می شود. ملات الیافی در قالبهای فلزی ۶۰×۶۰×۶ cm ریخته و آزمایش می شوند. سطح این قالب برای از بین رفتن اصطکاک بین آن و ملات بتن روغنکاری می شود. بلافاصله بعد از عملیات قالبگیری نمونه ها در معرض جریان بادی با سرعت ۱۶ km/hr تا ۱۲ hr قرار می گیرند. این عمل تا ۲۴ hr طول می کشد و بدنبال آن طول و عرض ترکهای ناشی از جمع شدگی پلاستیک بر روی سطح دال اندازه گیری می شود. بر طبق عرض ترکها در چهار دسته قرار می گیرند: بزرگ، متوسط، کوچک و مویی. ترکها حدود ۳ mm یک ترک بزرگ بودند. در حدود ۱، ۲ و ۵/۰ به ترتیب متوسط، کوچک و مویی محسوب می شدند. مقدار وزنی ترکهای بزرگ، متوسط، کوچک و مویی به ترتیب برابر ۳، ۲، ۱ و ۵/۰ بود. برای هر ترک ضرب طول ترک در مقدار وزنی آن، مقدار متوسط وزنی ترک محسوب می شد. مجموع این مقادیر متوسط وزنی ترکها در یک دال، مجموع مقدار وزنی بود. مقایسه بین این مقادیر وزنی مجموع برای دالهای الیافی و غیر الیافی کاهش ترکها را در دال در اثر جمع شدگی پلاستیک می سنجید.

۲،۷،۲. نتایج آزمایشات

۱،۲،۷،۲. مقاومت فشاری

نتایج آزمایشگاهی بر روی دو نوع از بتن تقویتی با الیافهای نایلون و پلی پروپیلین و بتن کنترلی (بدون الیاف) در جدول ۲-۱۶ نشان داده شده است که شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی (دونیم شدن استوانه) و مدول گسیختگی^۱ است. هر کدام از نتایج مقدار متوسط ۱۸ نمونه آزمایشی است. بر طبق این جدول، مقاومت فشاری بتنهای تقویت شده بوسیله الیافهای نایلون ۱۲/۴٪ بیشتر از نمونه های بتن کنترلی است که این مقدار برای الیافهای پلی پروپیلین حدود ۵/۸٪ می باشد. هر دو بهبود اساساً اثر متقابلی است که از جلوگیری از پیشرفت ترکها توسط الیاف بدست آمده است. موقعی که بتن در مقابل افزایش بار فشاری مقاومت می کند، نمونه های سیلندری الیافی امکان گسترش تنش عرضی بوجود می آید، از اینرو ترکها آغاز شده و گسترش می یابند. هنگامیکه ترکها پیشرفت کرده به الیاف نزدیک شدند جداشدگی در سطح مشترک بین الیاف و ملات آغاز می شود که

^۱ MOR

به سبب تنش کششی عمودی در مسیر مورد انتظار ترکهای پیش رونده است. وقتی که ترک به سطح مشترک می رسد، نوک ترک به دلیل مواجه شدن با یک ترک متقاطع قبلی از بین می رود. پدیده بی سر شدن ترک تمرکز تنش را در نوک ترک کاهش می دهد بنابراین جلوی انتشار ترک گرفته شده و حتی منحرف می شود. این بی سرشدگی، بلوکه شدن و انحراف، مقاومت نمونه سیلندری بتنی الیافی را در مقابل بار فشاری افزایش می دهد. بنابراین مقاومت فشاری در مقایسه با مقاومت فشاری بتن بدون الیاف افزایش می یابد.

مقاومت فشاری بتن با الیاف نایلون ۶/۳٪ بیشتر از مقاومت فشاری نمونه های با الیاف پلی پروپیلین است. این افزایش ریشه در مقاومت کششی این الیاف دارد که می تواند تنش کششی بزرگتری را در هنگام ترک نسبت به الیاف پلی پروپیلین منتقل کند، در نتیجه بر طبق آنچه گفته شد مقاومت فشاری را افزایش می دهد. البته پراکندگی بهتر الیاف نایلون نیز بی تأثیر نیست. در جدول ۲-۱۶ ضریب پراکندگی^۱ V را بین یکنواختی داده های مقاومتی در بتنهای تقویت شده با الیاف و بتن معمولی مقایسه می کند. دو مقدار V برای مقاومت فشاری بتن تقویت شده با الیاف در حدود مقادیر بتن معمولی است.

جدول ۲-۱۶: نتایج مقاومتی بتنهای تقویت شده با نایلون و پلی پروپیلین در مقایسه با بتن معمولی

[16]

اسلامپ (cm)	مدول گسیختگی (GPa)	مقاومت کششی (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)	آمار توصیفی	نوع بتن
۱۲/۵	۶/۲۴	۲/۵۴	۲۵/۸۸	مقدار متوسط*	بتن تقویت شده با الیاف نایلون
	۰/۳۸	۰/۱۸	۱/۸۶	انحراف معیار	
	۶/۱	۷/۱	۷/۲	ضریب پراکندگی (V)	
۱۲	۵/۹۸	۲/۳۸	۲۴/۳۵	مقدار متوسط*	بتن تقویت شده با الیاف پلی پروپیلین
	۰/۳۶	۰/۱۶	۱/۸۳	انحراف معیار	
	۶/۰	۶/۷	۷/۵	ضریب پراکندگی (V)	
۱۶	۵/۸۹	۲/۱۷	۲۳/۰۲	مقدار متوسط*	بتن معمولی (برای کنترل)
	۰/۳۶	۰/۱۵	۱/۷۷	انحراف معیار	
	۶/۱	۶/۹	۷/۷	ضریب پراکندگی (V)	

* هر مقدار مقاومت حاصل میانگین ۱۸ نمونه است

^۱ Coefficient of variation

۲,۲,۷,۲. مقاومت کششی

به دنبال نتایج جدول ۲-۱۶ مقاومت کششی دو نیم شدن بتنهای تقویت شده با نایلون و پلی پروپیلین به ترتیب ۱۷/۱٪ و ۹/۷٪ بیشتر از بتن غیر تقویتی است. وقتی که شکافی در نمونه رخ داد و ادامه پیدا کرد، الیافها پلی ایجاد می کنند که نیرو را از ملات به الیاف منتقل می کند و بنابراین کل نیرو را تحمل می کند. تنش منتقل شده ظرفیت تغییر شکل کششی را بهبود بخشیده و بنابراین تنش کششی دونیم شدن را در بتنهای الیافی در مقایسه با بتن غیر الیافی افزایش می دهد. بخاطر مقدار کمی افزایش پراکندگی الیاف نایلون نسبت به پلی پروپیلین در آب مخلوط، در مقطع دونیم شدن مقدار بیشتری از این الیاف وجود دارند و واضح است که به همین علت ۶/۷٪ مقاومت کششی بالاتری از مقاومت کششی الیاف پلی پروپیلین دارد.

نظر به اینکه مقاومت فشاری الیافهای نایلون اظهار شد که به یک اندازه از مقاومت کششی آن بیشتر است، در جدول ۲-۱۶ مقدار ۷ برای مقاومت کششی به یکدیگر نزدیک می باشد.

۳,۲,۷,۲. مدول گسیختگی

مدول گسیختگی بتنهای با الیاف نایلون ۵/۹٪ بیشتر از بتنهای بدون الیاف هستند. برای الیاف پلی پروپیلین ۱/۵٪ ثبت شده است. این افزایش اصولاً از الیافهای متقاطع گذرنده از ترکها نیمه کششی تیرهای تقویت شده است. این الیافها جداشدگی سطح ترکها را اصلاح می کند با کش آمدن خودشان. بنابراین انرژی بیشتری را جذب می کنند و ریز ترکها نواحی همسایگی نوک کمتر می شود. صرف نظر از این عملکرد بین ترک و الیاف مقاومت کششی و پراکندگی الیاف نایلون نسبت به پلی پروپیلین بیشتر است. از اینرو مدول گسیختگی بتنهای تقویت شده با الیاف مقاومت کششی و پراکندگی الیاف نایلون ۴/۳٪ بیشتر از بتنهای با الیاف پلی پروپیلین است.

۴,۲,۷,۲. مقاومت ضربه

نتایج آماری ۴۸ دیسک مورد آزمایش در جدول ۲-۱۷ نشان داده شده است. بر طبق این ارزیابی مقاومت اولین ترک و مقاومت شکست کامل بتن با الیاف نایلون به ترتیب ۱۹٪ و ۳۰/۵٪ بیشتر از بتن بدون الیاف است که این برای بتن با الیاف پلی پروپیلین به ترتیب ۱۱/۹٪ و ۱۷٪ می باشد. همه این شکلها مزیت اسفاده از الیاف نایلون و پلی پروپیلین را در بتن بیان می کنند و همچنین نشان می دهند که اضافه کردن الیاف نایلون نسبت به الیاف پلی پروپیلین هم در مقاومت

اولین ترک و هم در شکست نهایی نمونه بهتر عمل می کنند. در جدول ۲-۱۷ ستون آخر در قسمت PINPB (درصد افزایش تعداد ضربه‌ها بعد از ترک اول) پتانسیل دیسک را در به تأخیر انداختن شکست نهایی قطعه بتنی را در زیر بار ضربه بعد از پیدایش اولین ترک نشان می دهد. مقدار متوسط PINPB برای الیاف نایلون ۱/۶ برابر بزرگتر از مقدار معادل آن برای الیاف پلی پروپیلین می باشد که نشان می دهد وجود الیاف نایلون قدرت بیشتری را در به تأخیر انداختن شکست نهایی بعد از ایجاد اولین ترک را دارا می باشد. مقدار ضریب پراکندگی (V) نیز برای دو مقاومت ضربه و PINPB به ترتیب برای بتن عادی بیشتر از بتن حاوی الیاف پلی پروپیلین و برای بتنهای حاوی الیافهای پلی پروپیلین بیشتر از بتنهای شامل الیاف نایلون می باشد.

۵.۲.۷.۲. کنترل ترکهای جمع شدگی

بتن معمولی کنترل کننده (بدون الیاف) مقدار وزنی مجموعی، برابر ۳۸۰۰ را دارا بود که در مقایسه با آن، ملات شامل الیاف پلی پروپیلین ۱۱۲۰ و ملات شامل الیاف نایلون ۸۳۰ و پراکندگی بهتر این الیاف در ملات بتن میزان کاهش ترک های ناشی از جمع شدگی در بتنهای تقویت شده با الیاف نایلون کمتر از الیاف پلی پروپیلین می باشد.

۳.۷.۲. نتیجه گیری

بتنهای تقویت شده با الیاف نایلون عملکرد بهتری را نسبت به بتنهای تقویت شده با الیاف پلی پروپیلین در بالا بردن مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول گسیختگی از خود نشان داده است. این عملکرد بهتر ناشی از مقاومت کششی بالاتر و شاید بهتر پخش شدگی این الیاف در بتن باشد.

جدول ۲-۱۷: بررسی آماری نتایج آزمایش ضربه برای بتنهای تقویت شده با الیاف نایلون و پلی پروپیلین و بتن معمولی [16]

نوع بتن	آمار توصیفی	مقاومت اولین ترک (تعداد ضربه)	مقاومت شکست (تعداد ضربه)	*PINPB (%)
بتن تقویت شده با الیاف نایلون	مقدار متوسط	۲۰۰	۲۳۱	۱۶
	انحراف معیار	۶۲	۶۳	۲
	ضریب پراکندگی (V)	۳۱	۲۷	۱۳
بتن تقویت شده با الیاف پلی پروپیلین	مقدار متوسط*	۱۸۸	۲۰۷	۱۰
	انحراف معیار	۶۵	۶۷	۳
	ضریب پراکندگی (V)	۳۵	۳۲	۳۰
بتن معمولی (برای کنترل)	مقدار متوسط*	۱۶۸	۱۷۷	۵
	انحراف معیار	۶۰	۶۱	۲
	ضریب پراکندگی (V)	۳۶	۳۴	۴۰

* درصد افزایش تعداد ضربه‌ها برای شکست نهایی بعد از وقوع اولین ترک.

تغییرات مقاومت فشاری برای دو نوع بتن الیافی تمایل به نزدیک شدن به تغییرات بتن معمول را دارد و همچنین همین گرایش در مقاومت کششی و MOR نیز دیده می‌شود. برای مقاومت ضربه این تمایل در اولین ترک و مقاومت گسیختگی بتنهای الیافی باقی می‌ماند بطوریکه تغییرات PINPB در بتنهای تقویت شده با پلی پروپیلین کمتر است و در الیاف نایلون از پلی پروپیلین نیز کمتر نشان داده است.

مقاومت کششی (دونیم شدن استوانه) برای الیافهای نایلون تمایل به بهبود بیشتری دارد و به دنبال آن برای مقاومت کششی و مدول گسیختگی. همین تمایل نیز برای الیاف پلی پروپیلین نیز وجود دارد. ترکهای ناشی از جمع شدگی در ملاتهای حاوی الیاف نایلون نسبت به بتن معمولی و بتنهای حاوی الیاف پلی پروپیلین کمتر است.

۸.۲. بررسی عملکرد سازه‌ای و تکنولوژیک بتن SCC ساخته شده از مصالح

مملی واقع در اسکاتلند [17]

۱.۸.۲. انتخاب و خواص مواد خام اساسی

۱.۱.۸.۲. سنگدانه‌ها

از یک مصالح سنگی میکرو گرانیته خرد شده و بطور پیوسته دانه‌بندی شده، با اندازه ذرات سمی 5-20 میلی‌متر و از یک ماسه کوارتز خوب دانه‌بندی شده با یک مدول نرمی 2.74 استفاده شد. (جدول (۱۸-۲))

چالی نسبی نمونه سنگدانه درشت (شن) ماسه به ترتیب 2.65 و 2.56 بود و میزان جذب آب نمونه‌ها به ترتیب 0.8% و 1% بود.

جدول ۱۸-۲ دانه بندی سنگدانه‌ها [17]

	Sieve size (mm)											
	28	20	14	10	6.3	5.0	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
20 – 5 mm	100	95.6	56.6	28.1	7.8	2.2	0.3	--	--	--	--	--
10 – 5 mm	100	100	100	100	43.6	9.6	0.2	--	--	--	--	--
Sand	100	100	100	100	100	99.9	85.6	68.1	50.7	21.0	0.7	0.1

۲.۱.۸.۲. سیمان و فیلرها

مخلوطهای SCC ساخته شده در این بررسی، با سیمان پرتلند و پودر سنگ آهک (LSP) یا سربراره آهن‌گذاری (GGBS) بعنوان پرکننده تهیه می‌شوند. در مخلوطهای مرجع (بتن معمولی و بیره‌شده) تنها از سیمان پرتلند استفاده شد. سیمان و سربراره آهن‌گذاری استفاده شده مطابق با BS12 در سال 1996 و BS6699 در سال 1992 بود.

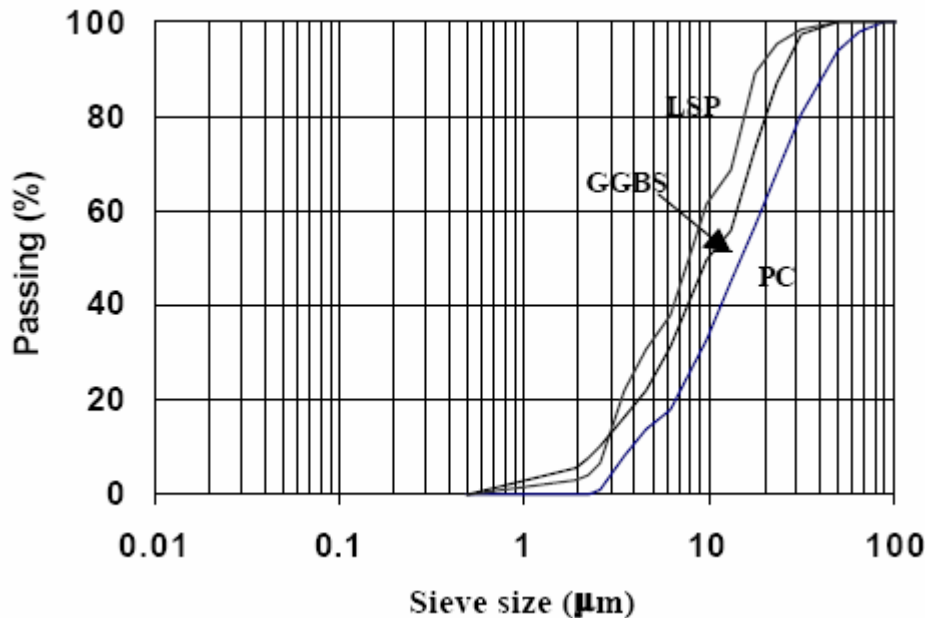
خواص فیزیکی و شیمیایی سیمان، سربراره آهن‌گذاری و پودر سنگ آهک در جدول ۱۹-۲ نشان داده شده است.

جدول ۱۹-۲ خواص فیزیکی و شیمیایی سیمان - LSP-GGBS [17]

	Limestone powder	GGBS	Cement	Cement	
SiO ₂	--	33.5	20.8	Vicat set times(min)	
Al ₂ O ₃	--	13.6	5.0		
Fe ₂ O ₃	--	0.62	3.2		
CaO	--	42.7	63.7	Initial	119
MgO	0.2	6.5	2.6	Final	164
Na ₂ O eq.	--	--	0.39		
Free CaO	--	--	1.6		
LOI	--	0.67	0.65		
CaCO ₃	99.0				
Relative Density	2.65	2.90	--		
Bulk Density (loose)	0.90	1.00	--		
Bulk Density (compacted)	--	1.24	--		
Specific Surface area (m ² /kg)		460	385		
Compressive Strength (MPa) (Mortar Prisms)					
Age		30% C + 70% GGBS	100% C		
7 d	--	28	41.5		
28 d	--	51	57.8		

تمام مخلوطهای معرفی شده به منظور افزایش کارایی و مقاومت در مقابل جداسدن سنگدانه‌ها، با یکی از افزودنیهای معدنی ترکیب می‌شوند. دانه‌بندی‌های سیمان و پودر سنگ آهک در شکل ۳۳-۲ به نمایش گذاشته شده‌است. پودر سنگ آهک کربن‌دار با یک میزان درجه خلوص بالا تهیه شده و از سیمان ریزتر بود.

شکل ۳۳-۲ دانه‌بندی سیمان پرتلند - LSP-GGBS [17]



۳.۱.۸.۲. مواد افزودنی

یکی از فرآورده‌های جدید، فوق روان‌کننده با نام (ویسکوکریت 2) که بر پایه کاپلیمر طراحی شده، برای این تحقیق استفاده شده است. این ماده وزن مخصوصی برابر 1.11 داشت. ویسکوکریت ۲ در یک محدوده متغیر ۰ تا ۱ درصد بر اساس جرم فیلرها (پرکننده‌ها) استفاده شد.

۴.۱.۸.۲. الیافها

الیاف های فولادی استفاده شده در مخلوط FSCC (SCC الیاف دار) Dramix با مقاومت کششی معمولی با انتهای چنگکی از نوع Bekaert بلژیک بود. طول الیاف و قطر آنها به ترتیب ۳۵ و ۰.۵۵ میلیمتر بود. نسبت افزودن الیاف های فولادی به مخلوطها ۳۰ کیلوگرم در متر مکعب (۳۸.۰ درصد حجمی) بود.

۲.۸.۲. طرح اختلاط

خلاصه نسبت‌های اختلاط مخلوط‌های SCC و مخلوط‌های مرجع در جدول ۲-۲۰ آمده است. با این توضیح که نمونه‌ها، بر اساس هر کدام از طرح اختلاط‌های استفاده شده در جدول ۲-۲۰ و محدوده کاربرد ساختمانی و یا مهندسی با نام‌های RC، SCCH, RH و SCCC نامگذاری شده‌اند.

جدول ۲-۲۰ طرح اختلاط استفاده شده [17]

	Housing		Civil		FSCC
	RH	SCCH	RC	SCCC	
Free water	200	190	220	192	160
Portland Cement 42.5	295	280	515	330	285
Limestone Powder	---	245	---	---	270
GGBS	---	---	---	200	--
Fibre (RC 65/35BN)					30
Total powder content	295	525	515	530	555
Sand (0-5 mm)	840	865	655	870	940
20 mm agg. (*10 mm)	970	750	930*	750*	715
Viscocrete 2, kg	---	4.2	---	5.3	4.4
Normal superplasticiser			6.4		
Water/cement ratio	0.68	0.68	0.43	0.58	0.56
Water/powder ratio	0.68	0.36	0.43	0.36	0.29

مخلوط SCC حجم بالایی، از افزودنیهای مانند پودر سنگ آهک یا سرباره آهن گذاری را در بر می گیرد که این مواد روانی و چسبندگی و محدودیت تولید گرما را افزایش می دهند. چنین موادی واکنش دهندگی نسبت به سیمان دارند و می توانند مشکلات حاصله از افت روانی بتن پر سیمان را کاهش دهند.

اضافه کردن یک یا چند ماده با ساختار مختلف و توزیع دانه ها با اندازه مختلف می تواند چگالی فشردگی ذره را بهبود بخشد و اصطکاک و ویسکوزیته بین ذره ای را کاهش دهد و بنابراین شکل پذیری و خود فشردگی را افزایش می دهد.

۳.۸.۲. خواص بتن تازه

۱.۳.۸.۲. نتایج آزمایشها روی بتن تازه مخلوطهای بتن SCC و مرجع

نتایج آزمایشات خواص تازه مخلوط‌های SCC و مرجع در جدول ۲-۲۱ نشان داده شده است. آزمایش‌های SCC، برای مخلوط‌های مرجع که بوسیله آزمایش اسلامپ معمولی بر اساس استاندارد ۱۸۸۱ انگلستان مورد سنجش قرار گرفته‌اند نمی‌باشد و همچنین خواص تازه آنها قابل مقایسه با همان خواص در SCC نمی‌باشد. بطوریکه تفاوت اساسی خواص مخلوط‌های SCC آنها را مجاب می‌سازد که قابلیت روانی و کارایی بالایی داشته‌باشند. نسبت حجم درشت دانه در مخلوط‌های مرجع به طور قابل توجهی بالاتر از مخلوط‌های SCC می‌باشد، مخلوط‌های SCC طوری طراحی شدند که فیلر بیشتری داشته‌باشند و احجام پودر در SCCH و SCCC به ترتیب ۴۶ درصد و ۳۸ درصد بیشتر از همان احجام در مخلوط‌های مرجع می‌باشد. مخلوط‌های SCC همچنین شامل ملات بیشتر و درشت دانه کمتر می‌باشند که این در افزایش کارایی موثر می‌باشد، با این حال افزایش در قابلیت روانی بشدت تحت اثر فوق روان‌کننده ویسکو کریت ۲ می‌باشد.

جدول ۲-۲۱ خواص بتن تازه [17]

	Housing		Civil		FSCC
	RH	SCCH	RC	SCCC	
Slump Flow at 5 min (mm)	65 slump	650	70 slump	690	665
S. Flow at 60 min (mm)	50 slump	600	70 slump	640	640
T ₅₀ at 5 min (s)		1.02		1.95	3.0
T ₅₀ at 60 min (s)		1.66		1.84	3.0
L-box					
- T ₂₀ and T ₄₀ at 10 min (s)		1 - 2		0.6 - 1.2	
- h ₂ /h ₁ at 10 min		0.81		0.99	0.90
Orimet (orifice 80 mm)					
- Flow time at 10 min (s)		2.3		4.0	3.3
- Flow time at 70 min (s)		3.0		3.2	4.1
Orimet + JRing spread					
- 15 min (mm)		670		635	650
- 75 min (mm)		605		635	615
Air content (%)	1.8	1.5		1.1	--

۱۴،۸،۲. خواص بتن سفت‌شده، تعیین شده بوسیله BS1881، بخش 116 و دیگر

نمونه‌های تهیه‌شده

۱،۱۴،۸،۲. مقاومت فشاری

نمونه های مکعبی استاندارد با اندازه ۱۵۰ میلی‌متر پس از گذشت یک روز از بتن‌ریزی قالب‌برداری شدند و با کف مرطوب (گونی مرطوب) و ورقه‌های پلاستیکی پوشیده شدند. نمونه‌ها سپس در آب یا در هوای ۲۰ درجه سانتیگراد بوسیله بعمل آوردن با ماده محافظ بعمل آورده شدند، تا آزمایش در سنین ۱، ۷، ۲۸ و ۱۸۰ روز انجام بشود. نتایج مقاومت فشاری استاندارد ۲۸ روزه درج دول ۲۲-۲ نشان داده شده است. مقاومت مشخصه نمونه مکعبی ۳۵ مگا پاسکال برای مخلوطهای ساختمانی و ۶۰ مگاپاسکال برای مخلوطهای مهندسی ثبت شده است.

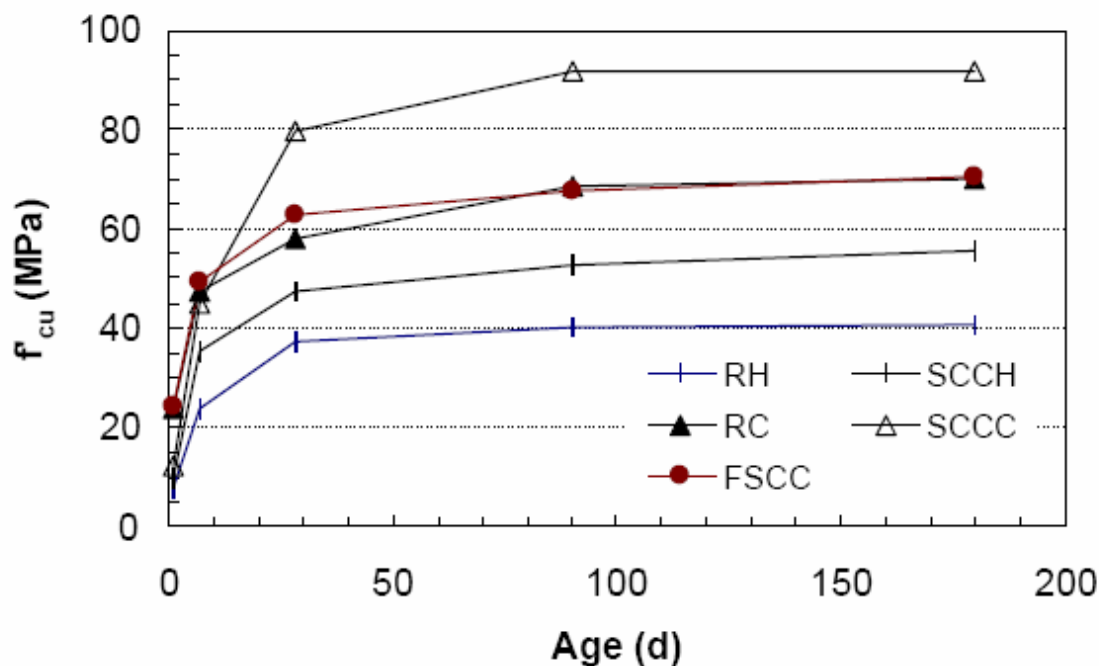
جدول ۲۲-۲ نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های استاندارد [17]

Concrete Mixes		Average of compressive Strength at 28 days, MPa
Housing Mixes	SCCH	47.0
	RH	37.0
Civil Engineering Mixes	SCCC	79.5
	RC	61.5
Fibre SCC Mix	FSCC	63.0

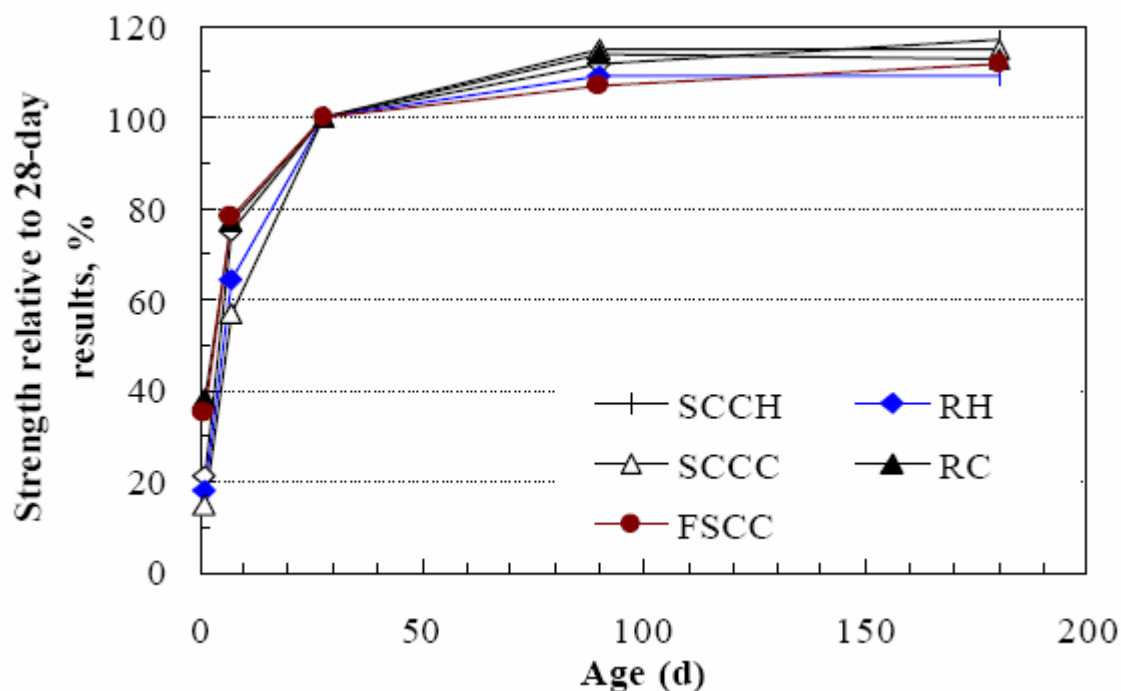
نتایج جدول ۲۲-۲ نشان می‌دهد که مقاومت‌های واقعی مخلوطهای SCC در حد بالاتر از محدوده نرمال مقاومت‌های طراحی می‌باشند، ولی مخلوطهای مرجع در حد پایین‌تر این محدوده قرار داشتند. چنین اختلافاتی در مقاومت مخلوط SCC و مخلوطهای مرجع مقایسه مستقیم این مخلوطها را مشکل می‌سازد. شکل ۳۴-۲ افزایش مقاومت تا ۶ ماه را نشان می‌دهد. افزایش نسبی مقاومت، نسبت به مقاومت‌های ۲۸ روزه در شکل ۳۵-۲ قابل مشاهده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت مقاومت‌های فشاری بشدت بوسیله نسبت آب به سیمان و نوع فیلرها (مواد افزودنی) تحت تأثیر بودند. نتایج وابسته به داده‌های طرح اختلاط موجود در جدول ۳۵-۲، در شکل های ۳۴-۲ و ۳۵-۲ نشان

می‌دهد که در نسبت‌های آب به سیمان مشابه، مقاومت مخلوط‌های SCC که از پودر سنگ آهک بعنوان ماده افزودنی استفاده کرده‌اند بطور قابل توجهی بالاتر از مقاومت مخلوط‌های مرجع متناظر بودند، این امر باید مورد توجه قرار گیرد. با این حال هر دو نتیجه در محدوده نرمال بودند. افزایش مقاومت نسبتاً سریعتر مخلوط‌های SCCH و FSCC به ویژه در مراحل اولیه، به نظر می‌رسد که عمدتاً بعلت دارا بودن پودر سنگ آهک است که ممکن است اثر یک تسریع‌کننده را بر روی هیدراتاسیون C3S و مقاومت اولیه داشته‌باشد.

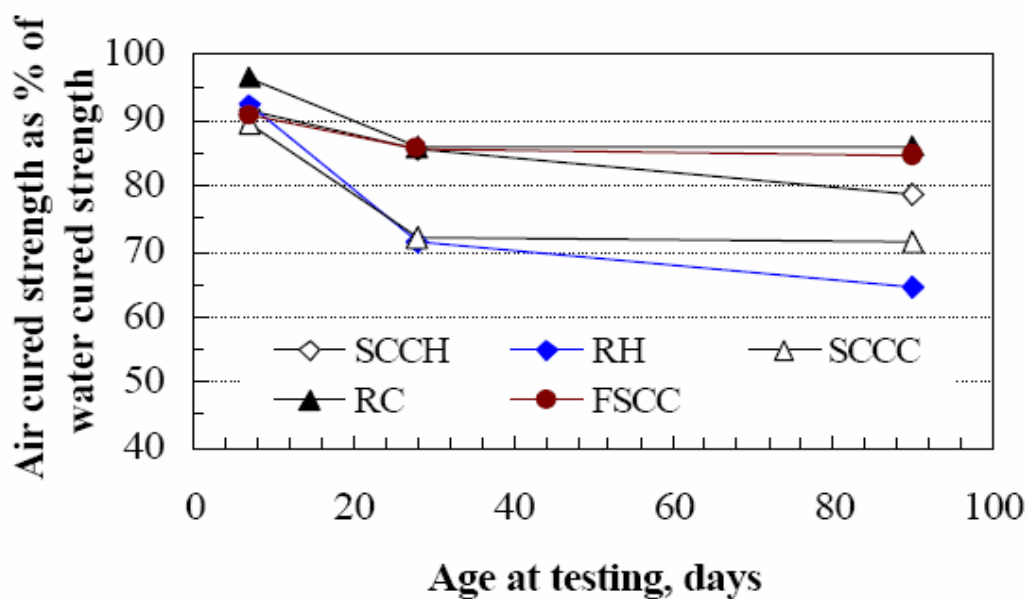
مخلوط SCC که حاوی GGBS به جای پودر سنگ آهک بود، مقاومت پایین‌تری در روزهای اول و هفتم نسبت به مخلوط مرجع متناظر، از خود نشان می‌دهد. (RC نمونه مرجع مهندسی) اما به طور قابل توجهی مقاومت بالاتری را در ۲۸ روز و بعد از آن از خود نشان داد. این موضوع به سبب واکنش آهسته، اما طولانی (هیدرولیکی و پوزولانی) بین محصولات ناشی از هیدراتاسیون سیمان و GGBS می‌باشد که بطور قابل توجهی بر مقاومت موثر است. نتایج بدست‌آمده در شکل (۲-۳۵) نشان می‌دهد که اختلاف قابل توجهی در نمودار افزایش رشد مقاومت در هیچ یک از مخلوط‌های مورد مطالعه وجود ندارد.



شکل ۲-۳۴ گسترش مقاومت فشاری [17]



شکل ۳۵-۲ مقاومت فشاری در دوره‌های مختلف نسبت به مقاومت ۲۸ روزه استاندارد [17] اثر شرایط بعمل‌آوری بر روی گسترش مقاومت مخلوطهای SCC و مرجع مورد آزمایش قرار گرفت و نسبت مقاومت‌های نمونه‌های بعمل‌آمده با هوا به مقاومت بعمل‌آمده با آب در شکل ۳۶-۲ آمده است.



شکل ۳۶-۲ اثر شرایط عمل‌آوری روی مقاومت فشاری [17]

همانطور که انتظار می‌رفت مقاومت فشاری نمونه‌های بعمل‌آمده با هوا پایین‌تر از مقاومت نمونه‌های بعمل‌آمده با آب می‌باشد. با این حال میزان کاهش مقاومت بعلت بعمل‌آوردن نامناسب در هوا تا حداکثر ۹۰ روز بسته به تراز مقاومت و نوع ماده افزودنی مورد استفاده در مخلوطها می‌باشد. به نظر می‌رسد که مخلوطهای SCC با ماده افزودنی سنگ آهک (بعنوان مثال SCCH و FSCC) کمتر تحت تأثیر عمل‌آوری با هوا قرار می‌گیرند و مقاومت نمونه‌های بعمل‌آورده شده با هوا کمتر نسبت به بتن‌های مرجع بعمل‌آورده شده و با هوا کاهش می‌یابد. برای مثال بطوریکه در شکل ۲-۳۶ دیده می‌شود، نسبتهای مقاومت نسبی برای SCCH در ۲۸ روز برابر ۸۵ درصد در ۹۰ روز برابر ۷۹ درصد، در مقابل همین نسبتها برای مخلوط مرجع متناظر آن، (RH) در ۲۸ روز برابر ۷۱ درصد در ۹۰ روز برابر ۶۵ درصد می‌باشد. این اختلاف می‌تواند به اثر تسریع‌کننده پودرسنگ آهک و نیز امکان جلوگیری از افزایش آب مخلوطهای SCC نسبت داده‌شود. برای مخلوط SCCC که به آن GGBS اضافه می‌شود مقاومت تا حداکثر ۹۰ روز بیشتر تحت تأثیر عمل‌آوری با هوا قرار می‌گیرد و کاهش مقاومت بعلت عمل‌آوری با هوا، بیشتر از مخلوطهای مرجع متناظر (RC) می‌باشد. چنین اختلافاتی در تأثیرپذیری از شرایط بعمل‌آوری برای مخلوطهای حاوی GGBS نیز معمول می‌باشد، بطوریکه حضور ممتد آب برای انجام واکنش هیدراتهای سیمان با GGBS لازم می‌باشد.

۲،۴،۸،۱۲. مقاومت کشش غیر مستقیم

مقاومت کششی شکاف خوردگی نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد 150×300 میلی‌متر شدر ۲۸ روز و ۶ ماه مورد آزمایش قرار گرفت و نمونه‌ها تا زمان انجام آزمایش مطابق بخش ۱۱۷، BS1881 در آب بعمل‌آورده شدند. مقاومت‌های کشش غیر مستقیم (مانند مقاومت کششی شکاف خوردگی) که در ۲۸ روز و ۶ ماه بوسیله نمونه‌های استوانه‌ای 150×300 میلی‌متر آزمایش شد. در جدول ۲-۲۳ نشان داده شده‌است. بعنوان یک مقایسه ساده، نسبت مقاومت کششی / فشاری نیز در جدول ۲-۲۳ آمده است.

لازم به توجه است که هر یک از نتایج بدست‌آمده در جدول ۲-۲۳ میانگین تنها دو نمونه بوده‌است، و در بعضی موارد میزان تغییر نتایج به بزرگی ۳۰ درصد بود. با این وجود نتایج موجود در جدول ۲-۲۳ نشان می‌دهد که ارتباط مقاومت کششی با مقاومت فشاری در تمام مخلوطهای مورد مطالعه مشابه می‌باشد.

جدول ۲-۲۳ مقاومت کششی غیر مستقیم (شکاف خوردگی) [17]

Results	SCCH	RH	SCCC	RC	FSCC
Age of 28-d	3.4	2.4	4.7	4.1	4.0
Age of 180-d	3.3	3.1	5.7	3.9	4.5
28-d Tensile / Compressive Strength Ratio, %	7.1	6.5	5.9	6.6	6.4
180-d Tensile / Compressive Strength Ratio, %	6.0	7.7	6.2	5.5	6.4

۲،۸،۴،۳. مقاومت پیوستگی

مقاومت پیوستگی بین آرماتورها و بتن بوسیله آزمایش بیرون کشیدن آرماتور در سنین مختلف تعیین می‌شود. آرماتورهایی با قطر موثر ۱۲ و ۲۰ میلیمتر سنجش پیوستگی، مطابق با پیشنهاد C51-ALC,78MCA,Rilem setup مورد استفاده قرار گرفت.

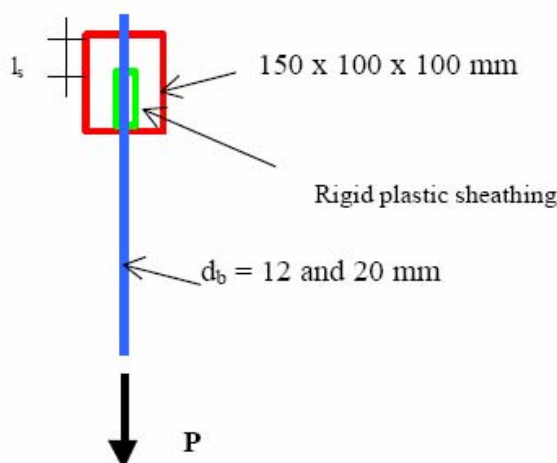
نمونه مورد آزمایش، یک منشور با یک مقطع عرضی ۱۰۰×۱۰۰ میلیمتر و طول ۱۵۰ میلیمتر می‌باشد. سه نمونه برای هر مخلوط قالبگیری شد، هر نمونه، دارای آرماتورهای افقی با قطرهای ۱۲ یا ۲۰ میلیمتر و به طول یک متر بود. یک غلاف صلب و پلاستیکی بطور محکم در سمت بارگذاری شده هر آرماتور، برای محدود کردن اتصال بین بتن و میلگرد گذاشته شد. طول مهارهای برای تمام آرماتورها ۱۲۰ میلیمتر بود. طول پیوسته شده هر یک از میلگردها برای پیوستگی مناسب با بتن کاملاً تمیز شد.

تنش‌های متوسط پیوستگی بوسیله آزمایش بیرون کشیدن توسط یک دستگاه هیدرولیکی ۲۰۰۰ کیلو نیوتنی و بارسنج ۲۰۰ کیلو نیوتن مورد سنجش قرار گرفت. بار بیرون کشیدن به طور تدریجی تا گسیختگی پیوستگی انجام می‌شود و تغییر شکل میلگرد بوسیله دو کرنش سنج متصل شده در سمت بارگذاری نشده اندازه گیری می‌شود.

آزمایش در زمانیکه گسیختگی انجام شد، و یا میلگردها به حد تسلیم رسیدند، یا پوشش بتنی اطراف میلگردها در اثر شکاف از هم گسیخت، متوقف می‌شود. مقاومت پیوستگی متوسط به شرح زیر محاسبه می‌شود.

$$\tau = \frac{P}{hd_b L_s}$$

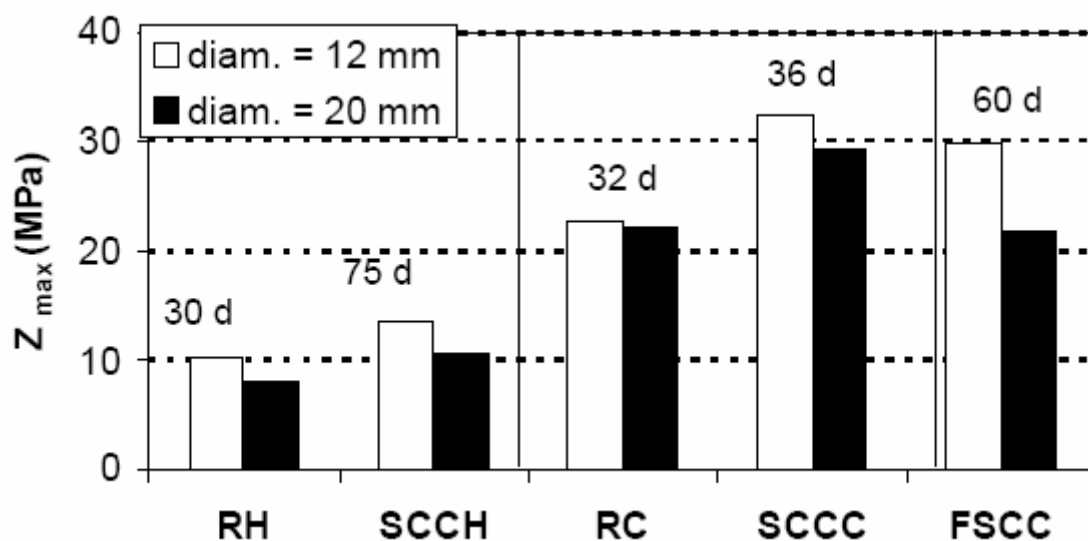
که p ، d_b و L_s به ترتیب بار وارده، قطر میلگرد و طول پیوستگی (اتصال) می‌باشند. جابجایی یا لغزش خالص، بوسیله تفاضل تغییر شکل الاستیک در فولاد و بتن از کل تغییر شکل اندازه‌گیری شده بدست می‌آید.



شکل ۲-۳۷ آزمایش بیرون کشیدن برای تعیین مقاومت پیوستگی [۱۷]

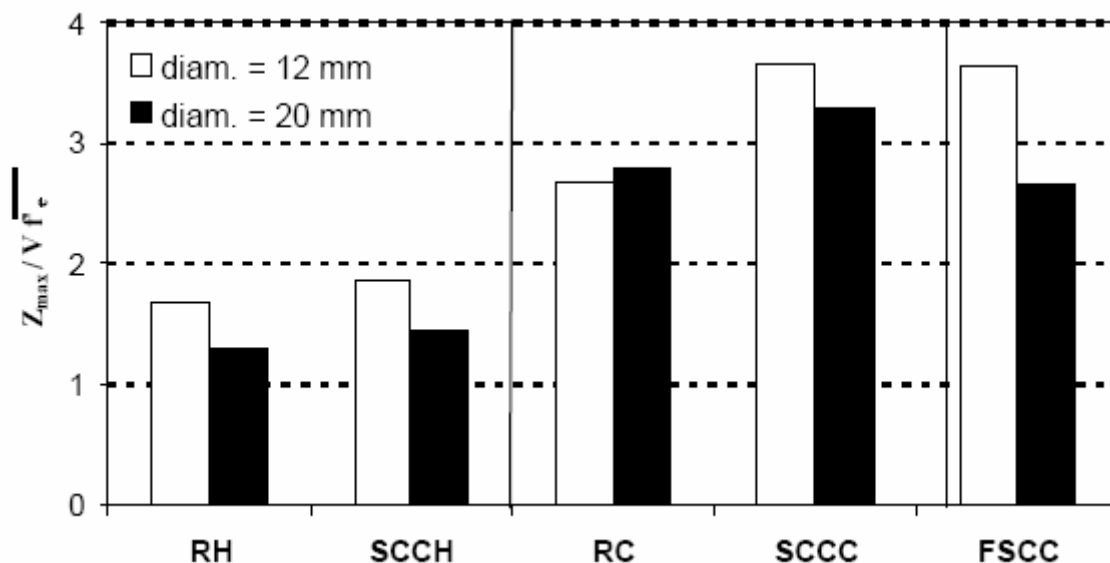
به این نکته باید توجه شود که در اعضاء بتنی مسلح، هر دو عضو میلگرد فولادی و بتن توأمأً در نواحی لنگر مثبت، تحت کشش هستند. با توجه به این مورد، در آزمایشهای بعمل آمده در این بررسی، میلگردهای فولادی بیرون کشیده شده تحت کشش قرار گرفتند، در حالیکه بتن اطراف تحت فشار بود. تنش‌های فشاری محصور در اطراف آرماتورها با قرار دادن ناحیه مهارشده میلگرد، دور از سمت بارگذاری شده نمونه کاهش می‌یابد. شکل ۲-۳۸ حداکثر تغییرات مقاومت پیوستگی، تمام مخلوطها را نشان می‌دهد.

همانطور که انتظار می‌رفت کاهش مقاومت اتصال، زمانیکه قطر میلگردها افزایش یافت، مشاهده شد. τ_{max} بین میلگردها و بتن به همان اندازه که به خواص مکانیکی بتن بستگی دارد به قطر میلگرد نیز وابسته است. در روزهای ۳۲ تا ۳۶، τ_{max} برای SCC در حدود ۳۲ تا ۴۵ درصد بیشتر از τ_{max} مخلوط مرجع متناظر آن (RC) بود.



شکل ۲-۳۸- تغییرات حداکثر مقاومت پیوستگی تمام مخلوطها [17]

نسبتهای استاندارد τ_{max} درمخلوطهای SCCH و SCCC و FSCC در شکل ۲-۳۹ رسم شده است. چنین نسبتهایی برای مخلوطهای مرجع ساختمانی و مهندسی قابل مقایسه می باشند. برای مخلوطهای ساختمانی SCCH نسبتهای استاندارد $(\tau_{max} / \sqrt{f'_{cx}})$ با میلگردهایی به قطر ۱۲ و ۲۰ میلیمتر بیشتر از نمونه های مرجع است. نسبت نرمالیزه شده SCCH ده درصد بیشتر از مخلوط مرجع بود. برای مخلوطهای مهندسی نسبتهای استاندارد SCCC نیز بزرگتر از همان نسبتهای درمخلوطهای RC می باشد (۱۸ تا ۳۸ درصد) FSCC نیز بالاترین مقادیر نسبتهای استاندارد را نشان داد (۳۰.۶۳ برای میلگرد به قطر ۱۲ میلیمتر و ۲۰.۶۵ برای میلگرد به قطر ۲۰ میلیمتر). بنابراین مخلوطهای SCCH و SCCC مقاومت های پیوستگی بالا را نشان می دهند و هر دو آنها مقادیر نسبت استاندارد بالاتری از مخلوطهای مرجع مشابه (RH , RC) برای هر دو قطر میلگرد در نظر گرفته شده در این پروژه (۱۲mm و ۲۰mm) از خود نشان می دهند.



شکل ۲-۳۹- تغییرات نسبت $(T_{max} / \sqrt{f_{cu}'})$ مخلوط‌های آزمایش شده [17]

۲، ۸، ۱۴، ۱۴، ۱۴ مدول الاستیسیته

مطابق استاندارد 1881 برتینا، بخش 121، نمونه‌های استوانه‌های 150*300 در آب بعمل آورده شدند و در دوره‌های 4 تا 13 ماهه، برای مخلوط‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج متوسط بدست آمده از دو نمونه مستقل، برای هر مخلوط بتنی در جدول ۲-۲۴ نشان داده شده است. بعنوان یک مقایسه ساده‌تر، نسبت‌های مدول الاستیسیته به جذر مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای برای تمام مخلوط‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفت، بطوریکه یک رابطه به شکل $E / \sqrt{f_c}$ به طور گسترده گزارش شده است. نتایج در جدول ۲-۲۴ نشان می‌دهد که در مخلوط‌های SCC ارتباطی مشابه بین مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری، همانند مخلوط‌های مرجع وجود دارد. نسبت $E / \sqrt{f_c}$ نیز نزدیک به مقدار 4.73 می‌باشد که برای بتن با وزن معمولی، توسط AC1318-89 (تجدید نظر شده در سال 1992) برای محاسبات سازه‌ای کاربردی توصیه شده است.

جدول ۲-۲۴- مدول الاستیسیته استاتیکی [17]

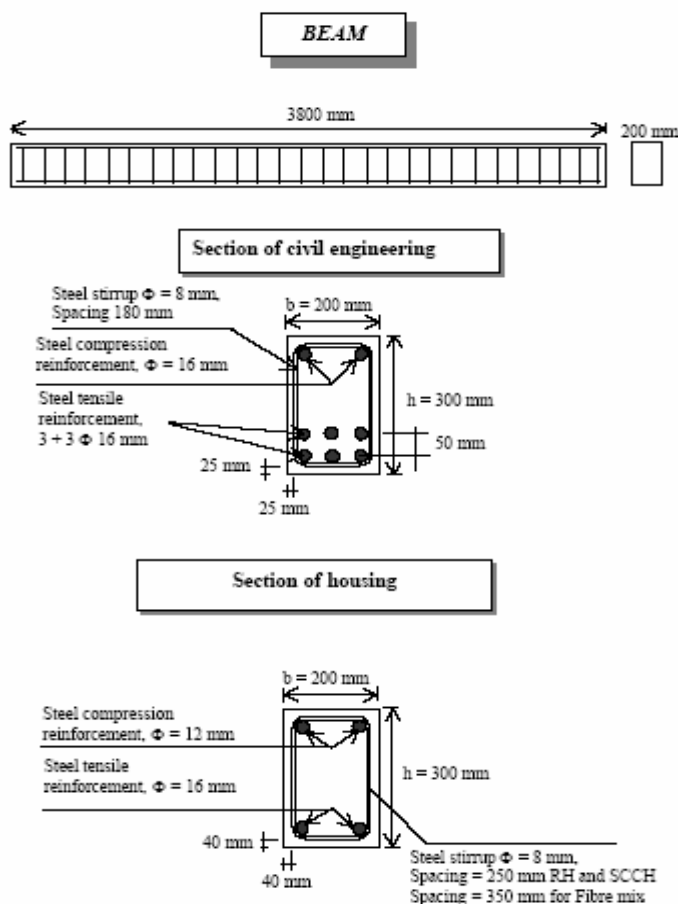
Test results	Concrete mix				
	RH	SCCH	RC	SCC	FSCC
Age at testing, months	13	4	8	11	7
Modulus E, GPa		34.1	34.4	41.9	37.7
$E/(f_c)^{0.5}$ ratio		4.92	4.98	4.43	5.43

۵.۸.۲. عملکرد سازه‌ای اعضا در ابعاد دقیق

۱.۵.۸.۲. طراحی تیرها

دو شکل آرماتورگذاری ساختمانی و مهندسی برای تحقیق استفاده شد. تیرهای ساختمانی (housing) با دو میلگرد 16 برای ناحیه کششی و 2 میلگرد 12 برای ناحیه فشاری مسلح شدند و خاموت‌ها در هر 250 میلیمتر گذاشته شده است. تیرهای مهندسی با 6 میلگرد 16 برای ناحیه کششی و 2 میلگرد 16 در ناحیه فشاری مسلح شدند و خاموت‌ها در هر 180 میلیمتر گذاشته شده‌اند. جزئیات تسلیح در شکل ۲-۴۰ نشان داده شده. [17]

آرماتورگذاری برای مخلوط با الیاف فولادی مشابه نمونه ساختمانی انجام شد، با این تفاوت که در نمونه با الیاف فولادی فاصله خاموت‌ها 350 میلیمتر در نظر گرفته شده است.



شکل ۲-۴۰ جزئیات آرماتورگذاری و ابعاد تیرها [17]

۲.۵.۸.۲ روشهای بتن ریزی تیرها

تیر مرجع مهندسی پس از بتن ریزی توسط ویبراتور خرطومی متراکم گردید. در مورد تیرهای SCC بتن مستقیماً از داخل شوت تخلیه تراک میکسر به داخل قالب ریخته می شود و اجازه داده می شود که در امتداد طول تیر حرکت نماید (شکل ۲-۴۱).



شکل ۲-۴۱ بتن ریزی تیرهای SCC [17]

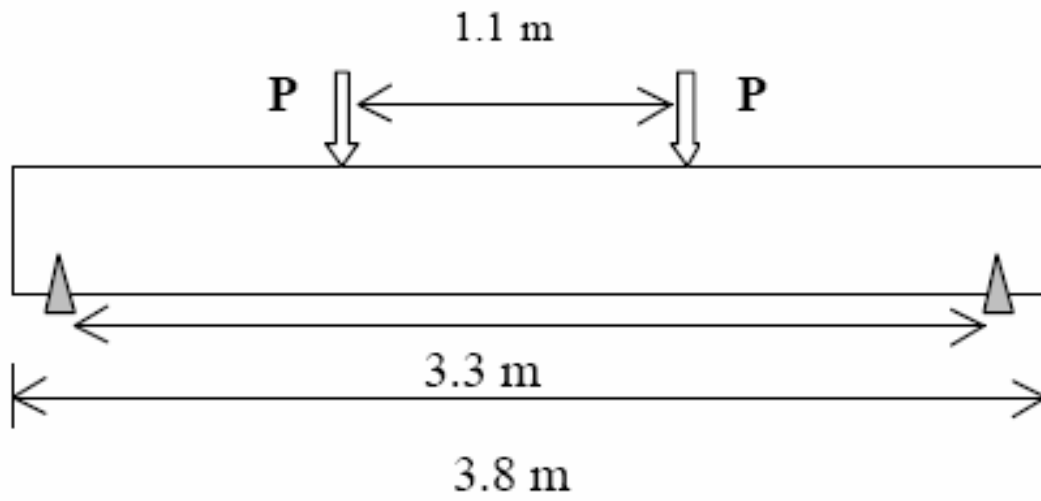
۲.۵.۸.۳ روش آزمایش تیرها

تیرها مجهز به خیز سنج در وسط دهانه برای بررسی خیز (انحنا) شدند. تیر به طول دهانه 3800mm تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای بطوریکه در شکل ۲-۴۲ نشان داده شده قرار می گیرد.

یک سیستم کسب اتوماتیک داده‌ها توسط کامپیوتر، برای بررسی (کنترل و تنظیم کردن) بارگذاری و خیز وسط دهانه مورداستفاده قرار گرفت. بار مرحله به مرحله، با سرعت 5 کیلو نیوتن بوسیله دو جک هیدرولیکی 220 کیلو نیوتنی به تیر وارد شد و بوسیله یک نیروسنج اندازه گیری شد. (شکل ۲-۱۱)

در پایان هر مرحله، ترک‌ها مشخص شدند و عرض ترک بوسیله یک میکروسکوپ اندازه گیری

شد (شکل ۲-۱۲)



شکل ۲-۴۲ آزمایش ۴ نقطه خمشی روی تیرها [17]



شکل ۲-۴۳ دستگاهی برای آزمایش واقعی تیرها [17]



شکل ۲-۴۴ اندازه‌گیری عرض ترک [17]

۲,۸,۵,۴. آزمایش تیرها

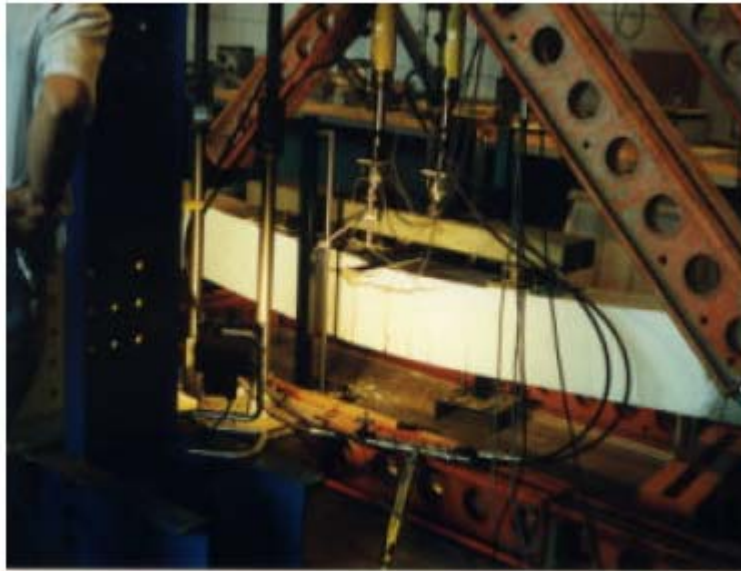
رفتار خمشی تیرهای SCC و تیرهای متراکم شده، از نظر رفتار ترک خوردگی، ظرفیت تحمل بار و مدگسیختگی و واکنش بار - خیز بررسی می‌شود (شکل ۲-۴۵).

۱- نمونه‌های ترک و فاصله ترک‌خوردگی:

نمونه‌های معمول ترک‌خوردگی تیرها تحت اثر بار نهایی بررسی شد. ترک‌خوردگی در دهانه خمشی تحت بار سرویس، عمدتاً از ترک‌های قائم ناشی از خمش خالص، عمود بر جهت تنش اصلی حداکثر تشکیل می‌شود. ترک‌خوردگی خارج از ناحیه خمش خالص بطور مشابه با ترک خمشی آغاز می‌شود اما با افزایش بار، دیگر ترک‌ها نیز تشکیل می‌شوند و هنگامیکه تنش‌های برشی فعال می‌شوند، ترک‌ها بیشتر قطری نمایان می‌شوند. جدول ۲-۲۵ توسط فاصله ترک‌خوردگی را در ۹۰ درصد بار نهایی نشان می‌دهد. متوسط فاصله ترک‌خوردگی SCC مهندسی و RC در حدود ۸۰ و ۱۶۰ میلیمتر است. فاصله ترک‌خوردگی FSCC بالاتر می‌باشد، به علت اینکه فاصله خاموت‌های تیرهای FSCC، ۳۵۰ میلیمتر ولی در تیرهای دیگر فاصله خاموت‌ها ۲۵۰ میلیمتر است.

جدول ۲-۲۵ متوسط فواصل ترک خوردگی - میلیمتر [17]

Beam	Average crack spacing at 90% $M_{ultimate}$
RH	138
RC	160
SCCC	82
FSCC	270



شکل ۲-۴۵ مد نوع گسیختگی تیر SCC [17]

۲- لنگر ترک خوردگی:

نتایج تجربی و تئوریک لنگرها در ابتدای ترک خوردگی، در جدول ۲-۲۶ نشان داده شده است. لنگر ترک خوردگی تئوریک، M_{cr} به دو روش به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$M_{cr} = (f_r I) / y_t$$

که در آن:

f_r : مدول گسیختگی بتن می‌باشد.

I : ممان اینرسی مقطع تیر می‌باشد.

y_t : فاصله تارهای خارجی تا محور خنثی می‌باشد.

مقادیر موجود در جدول ۲-۲۶ تحت عنوان $M_{cr} - th1$ بوسیله بکار بردن ممان اینرسی تمام میلگردها (میلگردهای فشاری و کششی) محاسبه می‌شود. ولی مقادیر $M_{cr} - th2$ ، بدون در نظر گرفتن تأثیر میلگردهای کششی در تعیین ممان اینرسی مقطع، محاسبه شده‌اند. مقایسه بین $M_{cr} - th1$ و $M_{cr} - th2$ نشان می‌دهد که زمانی که اثر آرماتورها در محاسبه ممان اینرسی نادیده گرفته شود، اختلاف فاحشی در نتایج رخ می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود که مقدار متوسط $M_{cr} - th2$ نزدیک به $M_{cr} - exp$ (آزمایشگاهی) می‌باشد.

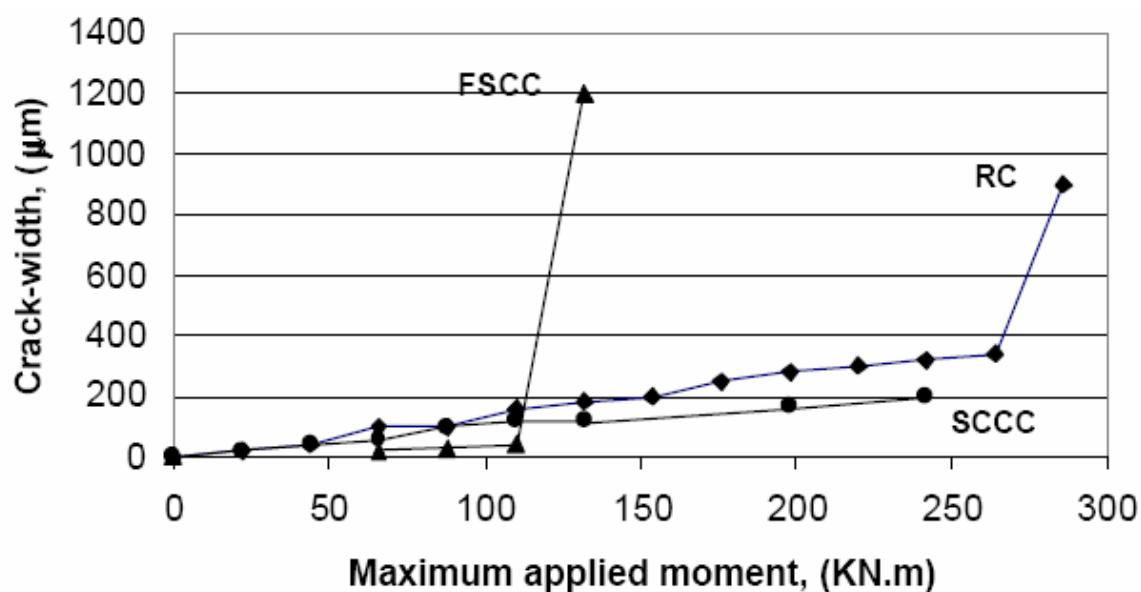
جدول ۲-۲۶ لنگر تجربی و تئوریک در ابتدای ترک خوردگی [17]

Beam	M_{cr-exp}	M_{cr-th1}	M_{cr-th2}
RH	6.6	10.6	9.6
RC	23.1	26.2	20.3
SCCC	22.0	31.4	24.4
FSCC	15.4	22.1	19.9

۳- عرض ترک:

شکل ۲-۴۶ نمودار حداکثر عرض ترک در مقابل بار وارده را نشان می‌دهد. در مقایسه تیرها در نمونه مهندسی می‌توان مشاهده کرد که ترک‌ها در تیر مرجع عریض‌تر از ترک‌های تیر SCCC می‌باشند.

جدول ۲-۲۷ عرض متوسط ترک را در میزان لنگرهای مختلف نشان می‌دهد. در لنگرهای کمتر از ۱۱۰ کیلو نیوتن متر عرض ترک در تیر FSCC کمتر از تیرهای SCCC و RC می‌باشد. این اختلاف در عرض‌های ترک به استفاده از الیاف در بتن نسبت داده می‌شود که بر مکانیسم گسترش ترک‌ها اثر می‌گذارد.



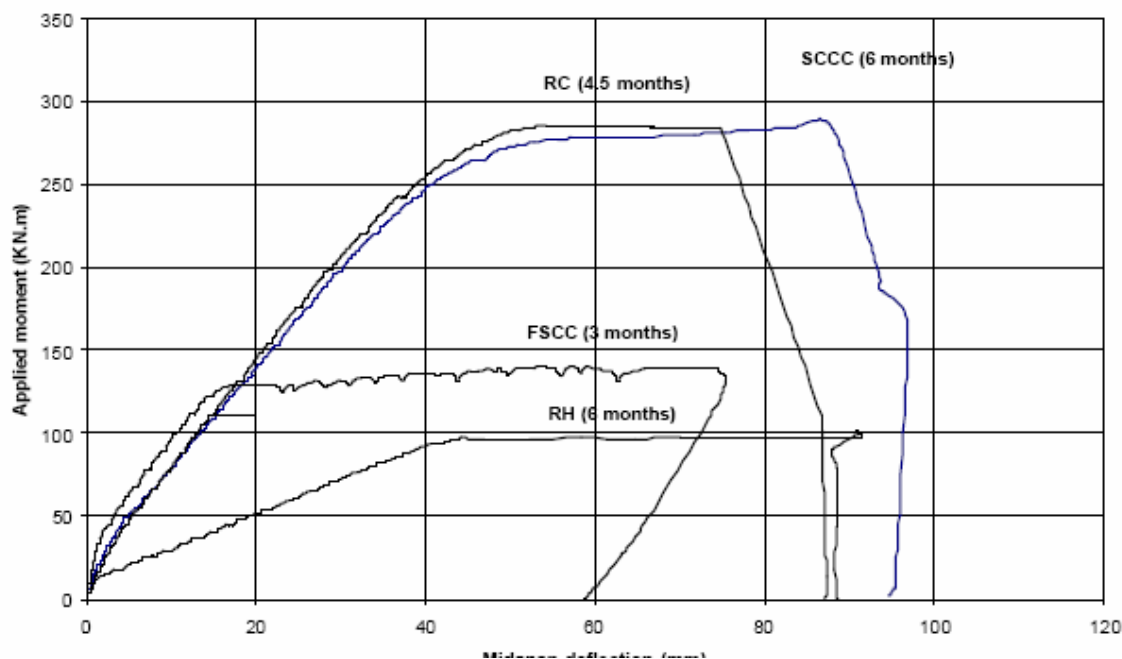
شکل ۲-۴۶ نمودار عرض ترک - حداکثر لنگر اعمال شده [17]

جدول ۲-۲۷ عرض متوسط ترک [17]

Beam	Moment			
	66 kN.m	88 kN.m	110 kN.m	132 kN.m
RC	100	100	160	180
SCCC	55	100	120	120
FSCC	20	28	40	1200

۴- رابطه بار - فیر:

شکل ۲-۴۷ نمودار لنگر-خیز نمونه آزمایشی را برای RC, SCCC, RH و FSCC ترسیم می‌کند. در ابتدا ترک نخورده و سالم می‌باشند. با بارگذاری بیشتر، ترک در وسط دهانه اتفاق می‌افتد و وقتی که لنگر وارده از لنگر ترک خوردگی M_{cr} تجاوز می‌کند، ترک‌ها اضافه می‌شود.



شکل ۲-۴۷ نمودار لنگر اعمال شده - خیز [17]

۸.۸.۲. نتیجه‌گیری

- ۱- در نسبت‌های آب به سیمان مشابه، مقاومت مخلوط‌های (SCCH) ک از پودر سنگ آهک بعنوان ماده افزودنی استفاده شده است، بطور قابل توجهی بالاتر از مقاومت مخلوط مرجع (RH) بوده که افزایش مقاومت نسبتاً سریع مخلوط SCCH باعث دارابودن پودر سنگ آهک است که اثر یک تسریع‌کننده را بر روی هیدراتاسیون C_3S دارد و باعث افزایش مقاومت اولیه می‌گردد.
- ۲- مخلوط SCCC که حاوی GGBS (سر باره کوره آهن‌گدازی) به جای پودر سنگ آهک می‌باشد، مقاومت پایین‌تری در روزهای اول و هفتم نسبت به مخلوط مرجع متناظر (RC)، از خود نشان داد. این موضوع به سبب واکنش آهسته اما طولانی (هیدرولیکی و پوزولانی) بین محصولات ناشی از هیدراتاسیون سیمان و GGBS می‌باشد که بطور قابل توجهی بر مقاومت مؤثر است.
- ۳- مدل‌های معمول ترک تیرهای SCC و مرجع، تحت حداکثر بار خیلی مشابهند. با آزمایش چهار نقطه‌ای خمشی تیر تحت بار سرویس، ترک در دهانه خمشی اکثراً از ترک‌های قائم عمود بر جهت تنش اصلی حداکثر ایجاد شده که بوسیله خمش خالص تشکیل می‌شود. ترک خارج از منطقه خمش خالص بطور مشابه با ترک خمشی اتفاق می‌افتد. اما هنگامی که بار افزایش می‌یابد،

ترک‌های دیگر تشکیل می‌شوند و در جایی که تنش‌های با اهمیت می‌شوند ترک‌های مورب نمایان می‌شود. با مقایسه تیرهای SCC و تیرهای مرجع مهندسی می‌توان مشاهده کرد که تعداد ترک‌ها در تیر مرجع بیشتر از تیر SCC مهندسی می‌باشد.

۴- تیرهای دارای SCC مهندسی رابطه بار - خیز نسبتاً مشابهی با تیرهای مرجع دارد ولی تیرهای SCC مهندسی مساحت زیر نمودار بار - خیز بیشتری نسبت به تیرهای مرجع دارند که نشان‌دهنده جذب انرژی و شکل‌پذیری بیشتر می‌باشد.

۵- هیچ اختلاف قابل‌وجهی در یکنواختی خواص بتن در جا بین مخلوط‌های SCC و مخلوط‌های مرجع متناظر وجود ندارد، خواص مخلوط‌های SCC اندکی یکنواخت‌تر بودند.

فصل سوم

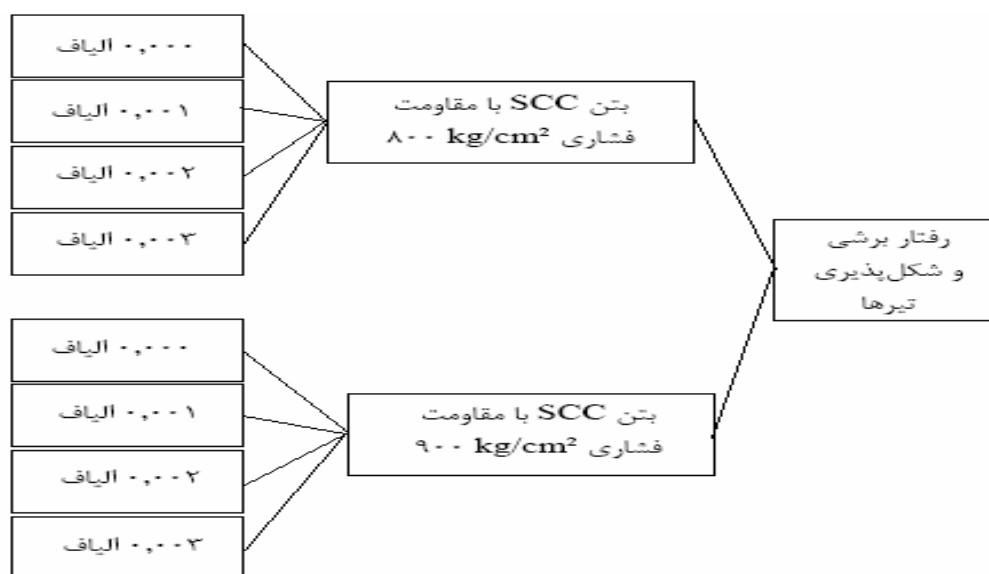
روش اجرای آزمایش

۱.۳. مقدمه

در فصول گذشته به بیان عملکرد بتن خود تحکیم در حالت سخت شده و تازه و مزایای استفاده از آن و بررسی تحقیقات صورت گرفته بر روی این موضوع پرداخته شد و همچنین به بیان مزایای استفاده از الیاف پلی پروپیلن پرداختیم. در این فصل نیز به معرفی جزئیات انتخاب شده برای انجام این تحقیق و نحوه اجرای آن می پردازیم. برخلاف پژوهشهای قبلی که از مقادیر ثابت الیاف و میلگرد کششی و همچنین شرایط خاموت گذاری یکسان استفاده شده بود. در این پژوهش از الیاف با مقادیر متغیر استفاده گردید. به این منظور از دو نوع بتن مقاومت بالای خود تحکیم استفاده شد تا تأثیر این نوع الیاف بر روی هر دو نوع بتن مقایسه گردد. همچنین سعی شد تا الیاف مصرفی، مقاومتی پایین تر از میلگردها داشته باشند که این امر نیز، بر رفتار تیرها تأثیرگذار خواهد بود.

۱.۳.۲. هدف از آزمایش و تشریح متغیرهای مورد استفاده

هدف از این آزمایش بررسی تأثیر استفاده از الیاف پلی پروپیلن در بهبود مقاومت نهایی و نیز شکل پذیری تیرها بود، به این منظور در ابتدا بر دو نوع طرح اختلاط بتن مقاومت بالا خود متراکم کار شد، سپس بتن SCC بدست آمده با مقدار متفاوتی از الیاف بررسی شد و در نهایت، ۸ تیر در نظر گرفته شد. برای هر کدام از اختلاطها، وزن الیاف نسبت به بیندر از ۰ تا ۰،۰۳ (۰،۰۰۰ و ۰،۰۰۱ و ۰،۰۰۲ و ۰،۰۰۳) تغییر داده شد. اما مقاومت کلیه میلگردها و سایر پارامترهای آزمایش یکسان انتخاب گردید. خلاصه روند آزمایش به صورت فلوجارت در شکل ۱-۳ نشان داده شده است



شکل ۱-۳ خلاصه روند آزمایش

۳.۱.۲. طرح سازه‌ای تیرها

در این تحقیقات ۱۶ تیر بتنی مسلح با ابعاد یکسان به طول $L = 160 \text{ cm}$ ، عرض $b = 15 \text{ cm}$ ، ارتفاع $h = 20 \text{ cm}$ ، طول دهانه $L = 140 \text{ cm}$ ، عمق $d = 16 \text{ cm}$ ، فاصله تا مرکز سطح میلگردهای فشاری $d = 4 \text{ cm}$ و نسبت طول دهانه برشی به عمق موثر $\frac{a}{d} = 2.8$ انتخاب گردید. مشخص است هندسی یکسان تیرها نسبت به بارهای وارده و نیز نحوه آرایش میلگردها در شکل ۳-۲ نشان داده شده است.

از ۱۶ تیر بتن مسلح، ۸ تیر در ۴ تیپ (از هر تیپ دو نمونه) با بتن 800 kg/cm^2 (گروه ۱) و ۸ تیر دیگر نیز در ۴ تیپ (از هر تیپ دو نمونه) با بتن 900 kg/cm^2 (گروه ۲) می‌باشند. خاموتها در فواصل 90 mm (کمی بیشتر از نصف عمق موثر) در طول دهانه برشی قرار گرفتند. قابل ذکر است کلیه خاموتهای مصرفی در این تحقیق از میلگرد به قطر 6 mm می‌باشد. به منظور بررسی مناسبتر ترکهای برشی و جلوگیری از گسیختگی خمشی، در طراحی میلگردهای طولی، ظرفیت خمشی تیرها (در مقایسه با ظرفیت برشی) افزایش داده شد. به این ترتیب، کلیه تیرها از $3\Phi 18$ ، به عنوان میلگرد کششی استفاده گردید. همچنین برای نگهداری خاموتها $2\Phi 10$ به عنوان میلگرد فشاری قرار داده شد.

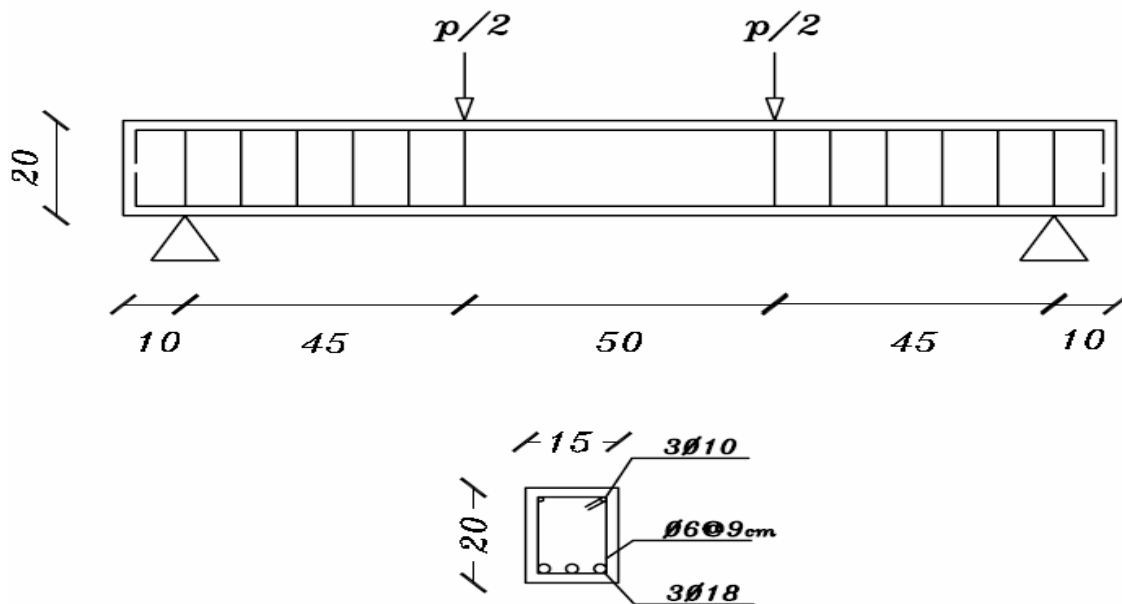
لازم به ذکر است که از چند نمونه از میلگردهای مورد نظر آزمایش مقاومت کششی گرفته شد که جدول ۳-۱ مشخصات تسلیحات فولادی به کار رفته در تیرها را نشان می‌دهد. این مشخصات شامل تنش تسلیم، تنش نهایی، و ضریب ارتجاعی میلگردهای مزبور می‌باشد نحوه دستهبندی تیرها و آرایش میلگردها همراه با علامت آنها برای انواع تیرها در جدول ۳-۲ خلاصه است.

ضریب ارتجاعی (Mpa). $\times 10^5$	مقاومت نهایی (Mpa)	مقاومت تسلیم (Mpa)	قطر (mm)	فولاد
۲	۶۰۰	۴۵۰	۱۸	میلگردهای کششی
۲	۴۳۵	۲۶۰	۱۰	میلگردهای فشاری
۲	۴۳۵	۲۶۰	۶	خاموتها

جدول ۳-۱ مشخصات فولاد مصرفی در تیرها

درصد وزنی بیندر/ الیاف	خاموت	میله‌گرد کششی	میله‌گرد فشاری	مقاومت بتن kg/cm ²	علامت اختصاری
۰,۰	$\Phi 6 @900\text{mm}$	3 $\Phi 18$	2 $\Phi 10$	800	Fc800F0.0%
۰,۱	$\Phi 6 @900\text{mm}$	3 $\Phi 18$	2 $\Phi 10$	800	Fc800F0.1%
۰,۲	$\Phi 6 @900\text{mm}$	3 $\Phi 18$	2 $\Phi 10$	800	Fc800F0.2%
۰,۳	$\Phi 6 @900\text{mm}$	3 $\Phi 18$	2 $\Phi 10$	800	Fc800F0.3%
۰,۰	$\Phi 6 @900\text{mm}$	3 $\Phi 18$	2 $\Phi 10$	900	Fc900F0.0%
۰,۱	$\Phi 6 @900\text{mm}$	3 $\Phi 18$	2 $\Phi 10$	900	Fc900F0.1%
۰,۲	$\Phi 6 @900\text{mm}$	3 $\Phi 18$	2 $\Phi 10$	900	Fc900F0.2%
۰,۳	$\Phi 6 @900\text{mm}$	3 $\Phi 18$	2 $\Phi 10$	900	Fc900F0.3%

جدول ۲-۳ دسته‌بندی تیرهای مورد آزمایش



شکل ۲-۳ مشخصات هندسی تیرها نسبت به بار وارده و نحوه آرایش میله‌گردها

۳.۳. برنامه و روش کار آزمایشگاه

۳.۳.۱. مصالح مصرفی

۳.۳.۱.۱. شن و ماسه

شن مصرفی برای این تحقیق از مصالح دانه ای معادن آمل می باشد. پس از الک کردن، ماکزیمم سایز مصالح شنی استفاده شده ۱۴ میلیمتر و مینیمم سایز مصالح ۸ میلیمتر بدست آمد. ماسه مصرفی نیز ماسه دوبارشور معدن خطیرکوه سوادکوه می باشد که دارای مدول نرمی بالا و ارزش ماسه ای حدوداً ۹۸٪ است. در جدول ۳-۳ نتایج مربوط به محاسبه مدول نرمی این مصالح آورده شده است.

جدول ۳-۳: مشخصات دانه بندی و مدول نرمی ماسه استفاده شده

شماره الک	سایز الک (mm)	وزن مانده (gr)		درصد مانده (%)
		یک الک	همه الکها	
۴	۴/۷۵	۱۷۵	۱۷۵	۱۷/۵
۸	۲/۳۶	۲۳۶	۴۱۱	۴۱/۱
۱۶	۱/۱۸	۲۷۲	۶۸۳	۶۸/۳
۳۰	۰/۶	۱۳۱	۸۱۴	۸۱/۴
۵۰	۰/۳	۱۰۷	۹۲۱	۹۲/۱
۱۰۰	۰/۱۵	۵۹	۹۸۰	۹۸/۰
سینی	-	۲۰۰	۱۰۰۰	-
وزن کل		۱۰۰۰		۳۹۸/۴

۳/۹۸ ~ مدول نرمی

در این پروژه از مصالح شن و ماسه در حالت خشک استفاده شده است. وزن مخصوص توده ای و وزن مخصوص شن و ماسه در جدول ۳-۴ نشان داده شده است. این مقادیر بر طبق استاندارد ASTM C29^۱ محاسبه شده است.

^۱ ASTM C29: Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate

جدول ۳-۴: وزن مخصوص مصالح دانه ای

وزن مخصوص توده ای	وزن مخصوص حقیقی	مصالح
Kg/m ³		
۱۴۴۰	۲/۶۹	شن
۱۴۰۰	۲/۵۹	ماسه

۲.۱.۳.۳. سیمان

سیمان استفاده شده در این تحقیق، سیمان تیپ ۲ تولید کارخانه نکاء می باشد. وزن مخصوص این سیمان ۳/۱۵ می باشد و مشخصات مربوط به ترکیب شیمیایی این سیمان در جدول ۳-۵ آورده شده است.

جدول ۳-۵: ترکیبات شیمیایی سیمان نکاء تیپ ۲

ترکیب شیمیایی	Cao	Sio ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Mgo	K ₂ O	Na ₂ O	So ₃	CL	C ₄ Af	C ₃ A	C ₃ S	C ₂ S
مقدار استاندارد	۶۳/۵	۲۱	۵	۴	۲	۰/۶	۰/۵	۲	۰/۰۴	۹	۶/۵	۵۵	۱۷/۵
مقدار موجود در نمونه (گرم)	۶۴	۲۱/۵	۵	۳/۵	۱/۲	۰/۶	۰/۴	۲/۵	۰/۰۰۱	۹	۷	۵۶	۱۵

۳.۱.۳.۳. میکروسیلیس

میکروسیلیس یا دوده سیلیس (Silica Fume) هنگام تولید آلیاژ فروسیلیسیم و فلز سیلیسیم، از کوره الکتریکی توسط جمع کننده های دوده باز یافت می شود. بنابراین از محصولات جنبی صنعت آلیاژ فروسیلیسیم و فلزسیلیسیم محسوب می گردد. به طور کلی، فلز سیلیسیم با احیای کوارتز توسط زغال سنگ در دمای ۲۰۰۰°C به دست می آید. در هنگام احیا مقداری گاز Sio حاصل می شود، قسمتی از این گاز با هوا ترکیب و Sio₂ تشکیل می گردد. این ماده عمدتاً از ذرات سیلیس بی شکل تشکیل شده که فوق العاده ریز هستند.

رنگ میکروسیلیس خاکستری است اما در رنگ های سفید تا سیاه نیز یافت می شود که بستگی به مقدار کربن دارد. چگالی واقعی آن ۲/۱ تا ۲/۲ است. مهمترین خصوصیات فیزیکی میکروسیلیس اندازه فوق العاده ریز ذرات است که حدود یک صدم اندازه ذرات سیمان پرتلند (۰/۰۵ در مقابل ۰/۲μm) می باشد.

از آنجایی که میکروسیلیس فوق‌العاده ریزدانه است، وقتی که با بتن مخلوط می‌گردد ویسکوزیته بتن افزایش یافته و از کارایی آن کاسته می‌شود، در نتیجه اسلامپ بتن کاهش می‌یابد. بنابراین بر مقدار آب مورد نیاز برای کسب کارایی معین افزوده می‌گردد، برای جلوگیری از این پدیده می‌توان از ماده افزودنی فوق‌روان‌کننده استفاده نمود به عبارت دیگر استفاده از میکروسیلیس امکان‌پذیر نیست مگر آن که فوق‌روان‌کننده به کار برده شود. دلایل بهبود و دوام بتن حاوی میکروسیلیس در زیر گفته شده است:

۱- افزودن میکروسیلیس به بتن باعث می‌شود که به علت واکنش پوزولانی، منافذ بزرگ به کوچک تبدیل شوند و در نتیجه از نفوذپذیری بتن کاسته گردد. این فرایند به دلیل تبدیل هیدروکسید کلسیم $[Ca(OH)_2]$ به ژل سیمان (C-S-H) می‌باشد، یادآوری می‌شود که هیدروکسید کلسیم و ژل سیمان از فرآورده‌های مهم سیمان هیدراته شده محسوب می‌شود. ساختار فیزیکی ژل سیمان نسبت به هیدروکسید کلسیم از تراکم و انسجام بیشتری برخوردار است.

۲- فعالیت پوزولانی میکروسیلیس سبب می‌شود که هیدروکسید کلسیم آزاد شده یا تولید شده در بتن، مصرف گردد و همچنین به دلیل جایگزینی سیمان با میکروسیلیس مقدار کمتری هیدروکسید کلسیم تولید می‌شود و در نتیجه مقدار هیدروکسید کلسیم که عامل مهمی در آسیب‌دیدگی ناشی از تهاجم سولفات محسوب می‌شود، کاهش می‌یابد. میکروسیلیس مصرفی در این تحقیق از میکروسیلیس به شکل پودر تولید شرکت وند شیمی، استفاده شد. سطح ویژه ذرات آن $20 \text{ m}^2/\text{gr}$ می‌باشد. آنالیز شیمیایی آن به شرح جدول ۳-۶ می‌باشد. در همه طرح‌های محتوی میکروسیلیس، به مقدار درصدی از وزن سیمان به پودر اضافه شده است.

جدول ۳-۶: آنالیز شیمیایی میکروسیلیس

ترکیب شیمیایی	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	C	CaO	SiC	Cl	P_2O_3
درصد تشکیل دهنده	۹۳/۸۶	۱/۳۲	۰/۸۷	۰/۹۷	۱/۰۱	۰/۳۱	۰/۱	۰/۳۴	۰/۴۹	۰/۵۳	۰/۰۴	۰/۱۶

۳,۳,۱,۴. پودر سنگ

یکی از افزودنیهای مرسوم در بتنهای خودمتراکم (SCC)، پودر سنگ می‌باشد. از این ماده به منظور تنظیم ویسکوزیته بتن تازه استفاده می‌شود و تأثیر آن بر روی مقاومت ۲۸ روزه بتن قابل توجه نیست. در این تحقیق از این پودر نیز در اختلاطهای آزمایشی و اصلی استفاده شده است. وزن مخصوص این ماده پودری در حدود 2700 kg/m^3 می‌باشد و سطح ویژه ذرات آن حدود $500-550 \text{ m}^2/\text{kg}$ می‌باشد. ترکیبات شیمیایی پودر سنگ در جدول ۳-۷ نشان داده شده است.

جدول ۳-۷: ترکیبات شیمیایی پودر سنگ

ترکیب شیمیایی	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	Cl^-	CaCO_3
درصد تشکیل دهنده	۰/۸	۰/۱۷	۰/۱	۰/۵	۰/۰۰۲	۹۸/۰۰

۳,۳,۵. فوق روان کننده

در این تحقیق از روان کننده P10 استفاده شده است که تولید کارخانه شیمی ساختمان می‌باشد.

این نوع فوق روان کننده نسل جدید این ماده است که در ساخت بتن خودمتراکم بدون نیاز به ویبره یا انرژی اضافی جهت تراکم و فاقد هرگونه جداسدگی می‌باشد. امروزه با استفاده از فوق روان کننده‌های موجود به راحتی می‌توان بتن‌های روانی تا قوام و اسلامپ ۲۲ سانتیمتر تولید کرد اما این بتن‌ها همچنان برای کسب تراکم مطلوب و جایگیری در تمام ابعاد قالب و پیرامون آرماتورها نیز به عملیات ویبره دارند. فوق روان کننده نسل جدید مانند P10 جهت برطرف نمودن این نقیصه تولید و به بازار عرضه شده‌اند.

موارد مصرف: P10 موجب ابداع تکنولوژی جدیدی در صنعت ساختمان گردید تا به کمک

آن بسیاری از مشکلات موجود در اجرا و استقرار بتن برطرف گردد. این تکنولوژی جدید، ساخت بتن خودمتراکم می‌باشد با موارد کاربرد:

- مقاطع باریک و با تراکم آرماتور بالا
- دالها و پی‌های با تراکم آرماتور بالا
- لاینینگ تونل‌ها
- سرریز سدها

- قطعات پیش ساخته

- سازه‌های پیش تنیده و پس تنیده

خواص ویژه: P10، بدون نیاز به مصرف آب اضافی کارایی بتن را به میزان قابل توجهی

بهبود بخشیده و ساخت بتن خودمتراکم را ممکن می‌سازد. خواص ویژه این بتن عبارتند از:

- به هیچ گونه ویبره و یا انرژی جهت تراکم نیاز ندارد

- قوام و چسبندگی مطلوبی دارد

- فاقد جداسدگی می‌باشد^۱

- فاقد آب انداختگی می‌باشد^۲

- چسبندگی بین بتن و آرماتور بسیار عالی است.

روش مصرف: برای ساختن بتن خودمتراکم با استفاده از P10 از همان مصالح معمولی

ساخت بتن های متداول استفاده می‌شود اما جهت کسب ویژگیهای مختص بتن خودمتراکم به روند و

نحوه طرح اختلاط توجه ویژه نمایید. میزان مواد سیمانی و پرکننده‌ها درون بتن های خودمتراکم

معمولاً بیشتر از بتن های معمول است. دانه بندی به گونه ای اصلاح می‌شود که میزان شن تا حدی

کاهش یافته ضریب نرمی مصالح افزایش یابد. نسبت آب به سیمان در بتن خودمتراکم همواره پایین

بوده و معمولاً کمتر از ۰/۴ می‌باشد. در غالب موارد جهت افزایش قوام و جلوگیری از جداسدگی

استفاده از یک ماده قوام دهنده (VMA) مانند Vand Nano-Cembinder 30 هم توصیه می

گردد.

روش کنترل: آزمایش های بتن خودمتراکم به علت مشخصات ویژه آن نسبت به بتن

معمولی متفاوت بوده و از تنوع و تعداد بیشتری برخوردار است. شرح این آزمایشات در استاندارد

ASTM C09³ آورده شده است. از مهمترین تست های بتن خودتراکم که جهت تعیین میزان سیالیت

و پرکنندگی آن انجام می‌شود آزمایش جریان اسلامپ است که در آن قطر توده بتن پخش شده مورد

سنجش قرار می‌گیرد. معمولاً حداقل قطر مورد قبول ۶۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود.

۳,۳,۱,۶. الیاف پلیمری (پلی پروپیلین)

هدف نهایی از این تحقیق بررسی تأثیر الیاف پلی پروپیلین بر روی رفتار برشی و شکل پذیری

بتن مقاومت بالا از نوع خود متراکم است. برای این منظور از الیاف پلی پروپیلین ساخت شرکت وند

¹ No Segregation

² No Bleeding

³ ASTM C09: Concrete and Concrete Aggregates

شیمی به طول ۱۲ میلیمتر استفاده شده است.

الیاف پلیمری به عنوان مسلح کننده ثانویه بتن یا ملات جهت کاهش جمع شدگی و کنترل ترک خوردگی (که در شکل پذیری موثر است) و افزایش دهنده دوام در دراز مدت کاربرد دارد. این الیاف در شکل ۳-۲ نشان داده شده است.



شکل ۳-۳: الیاف پلی پروپیلین

موارد مصرف: الیاف پلی پروپیلین (Vand Fiber P.P.)، جهت کاهش ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی در کلیه بتن ریزیها می تواند مصرف گردد. همچنین موارد زیر را می توان اشاره کرد:

- بتن های کف سالن های صنعتی، اتوبان ها و فرودگاهها
- شاتکریت سازه های پوسته ای، تثبیت خاک و لاینینگ
- پلاستر کاری، سیمانکاری و نماسازی بتنی و سیمانی
- ترمیم کلیه سازه های نظامی و هسته ای

خواص ویژه: الیاف پلی پروپیلین، از لحاظ شیمیایی دارای مواد بی اثر بوده و بدون هیچ مشکلی در محیط قلیایی بتن باقی می ماند و دارای خواص ویژه زیر می باشد:

- باعث افزایش مقاومت ضربه ای و سایشی بتن می گردد.
- نفوذپذیری را کاهش داده و موجب افزایش دوام می گردد.

- در کنترل ترکها موثر است
- چسبندگی را افزایش داده و در شاتکریت میزان مواد برگشتی را کاهش می دهد.
- دچار خوردگی و فرسودگی نمی شود.
- از نظر اقتصادی مقرون به صرفه می باشد.

مقدار مصرف: بسته به نوع بتن و عملکرد مورد انتظار، مقدار بهینه بین ۰/۵ تا ۲ کیلوگرم در

هر متر مکعب متغیر می باشد.

روش مصرف: معمولاً الیاف در زمان ساخت و اختلاط بتن به همراه دیگر مصالح به مخلوط

خشک یا تازه اختلاط اضافه می گردد. توصیه می گردد جهت جلوگیری از آسیب دیدگی الیاف ها بر اثر سایش سنگدانهها، زمان اختلاط پس از اضافه نمودن الیاف به حداقل برسد. روش دیگر مخلوط نمودن الیاف در آب مصرفی قبل از اضافه کردن آن به مخلوط خشک می باشد که در این تحقیق از روش اخیر استفاده شده است.

تذکر مهم: بتن الیافی خودمتراکم به مراتب حساس تر از بتن معمولی الیافیست. از طرفی

کم کردن آب موجب از بین رفتن خاصیت خودتراکمی می شود و از طرف دیگر اضافه کردن آب یا الیاف نیز باعث جدایی دانهها و خروج شیرابه بتن می شود. از این رو بدست آوردن میزان بهینه آب و الیاف اهمیتی دوچندان دارد.



شکل ۳-۴ جدایی دانهها در اثر افزودن آب اضافی به بتن الیافی خودمتراکم

مشخصات فنی: برخی مشخصات این الیافها در جدول ۳-۸ آورده شده است.

جدول ۳-۸: مشخصات فیزیکی الیاف پلی پروپیلین

شکل ظاهری	نقطه ذوب	وزن مخصوص	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی (MPa)	طول الیاف (mm)	خصوصیت
الیاف سفید رنگ	۱۶۰ °C	۹۰۰ Kg/m ³	۴۰۰	۳۵۰	۱۲	پلی پروپیلین

۲.۳.۳. طرح اختلاط بتن فودمتراکم مقاومت بالا حاوی الیاف

با توجه به منابع مطالعاتی (من جمله مقالاتی که به برخی از آنها در فصل یک اشاره شد) جهت ساخت بتن خود متراکم، پس از حدس های اولیه در خصوص طرح اختلاط به ساخت این نوع بتن پرداختیم و با فیت بک کردنهای اختلاطهای بعدی به جوابهای مطلوب خود که همان بتن با مقاومت فشاری بالای (۷۰۰ kg/cm²) رسیدیم و در مرحله بعدی میزان درصد الیافی، تا حدی که خواص این نوع بتن را برآورده کند، بررسی کردیم.

با توجه به این که الیاف پروپیلین بعد از جذب آب حجیم می شود و کلا وجود الیاف تاثیر بسزایی بر کارایی بتن SCC می گذارد، برای تامین کردن خواص بتن SCC نمی توان مقادیر بالایی از این الیاف را بکار برد.

بر اساس آزمایشات صورت گرفته توانستیم میزان الیاف را به ۰/۰۰۳ وزن بیندر برسانیم و الیاف بیشتر از ۰/۰۰۴ وزن بیندر شدیداً خواص بتن SCC را تحت تاثیر قرار میدهد در نهایت طرح اختلاط زیر جهت ساخت تیرها مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۳-۹: نسبت‌های اختلاط بتن‌های SCC حاوی الیاف پلی پروپیلین

کد اختلاط	مصالح		سیمان	میکروسیلیس	پودر سنگ	آب	روان کننده	پلی پروپیلین
	طبیعی							
	شن	ماسه						
Fc800F0.0%	۷۱۷	۷۱۷	۴۷۰	۴۷	۲۶۲	۱۹۲	۷/۱۳۵	۰/۰۰۰
Fc800F0.1%	۷۱۷	۷۱۷	۴۷۰	۴۷	۲۶۲	۱۹۲	۷/۱۳۵	۰/۵۱۷
Fc800F0.2%	۷۱۷	۷۱۷	۴۷۰	۴۷	۲۶۲	۱۹۲	۷/۱۳۵	۱/۰۳۴
Fc800F0.3%	۷۱۷	۷۱۷	۴۷۰	۴۷	۲۶۲	۱۹۲	۷/۱۳۵	۱/۵۵۱
Fc900F0.0%	۶۹۳	۵۷۰	۵۷۰	۵۷	۳۰۰	۱۹۶	۹/۹۴۵	۰/۰۰۰
Fc900F0.1%	۶۹۳	۵۷۰	۵۷۰	۵۷	۳۰۰	۱۹۶	۹/۹۴۵	۰/۶۲۷
Fc900F0.2%	۶۹۳	۵۷۰	۵۷۰	۵۷	۳۰۰	۱۹۶	۹/۹۴۵	۱/۲۵۴
Fc900F0.3%	۶۹۳	۵۷۰	۵۷۰	۵۷	۳۰۰	۱۹۶	۹/۹۴۵	۱/۸۸۱

* واحد اعداد فوق kg/m^3 می باشد.



شکل ۳-۵: دستگاه مخلوط کن با ظرفیت ۲۰ کیلوگرم بتن برای اختلاط های اولیه

۳,۳,۳. نمونه مخلوط کردن

بعد از اینکه نسبت‌های اختلاط^۱ با توجه به آنچه در قسمت قبل گفته شد، محاسبه شدند تقریباً تمامی این اختلاطها به شیوه زیر در میکسر مخلوط می‌شدند:

در ابتدا مصالح سنگی درشت (شن) در داخل میکسر ریخته می‌شدند. سپس مصالح ریز دانه شامل ماسه در داخل میکسر ریخته و به مدت ۱ الی ۱/۵ دقیقه با هم مخلوط می‌شدند. بعد از این زمان سیمان، میکروسیلیس و پودر سنگ به همراه یک سوم از آب اختلاط در داخل میکسر ریخته شده و حدود ۲ دقیقه مخلوط می‌شدند. بعد از این زمان بقیه آب همراه با میزان روان کننده در نظر گرفته شده (در حالتی که آب و روان کننده با هم مخلوط شده‌اند) به آرامی در حالی که میکسر در حال گردش است به آن اضافه می‌شدند. بعد از اتمام آب، میکسر به مدت حدود ۱ دقیقه به عنوان اتمام عملیات اختلاط به گردش خود ادامه می‌داد و بعد از این مدت SCC تازه آماده انجام آزمایشات کارایی بود. در مخلوطهایی که از الیاف پلی پروپیلین استفاده شده است، این الیاف در انتهای مرحله مخلوط کردن در حالی که با کمی از آب اختلاط مخلوط شده است در داخل میکسر ریخته می‌شود. لازم به توضیح است که با توجه به جنس الیاف پلی پروپیلین و همچنین توصیه کارخانه سازنده این الیاف برای جلوگیری از ساییدگی با مصالح، در انتهای کار اضافه می‌شوند. در شکل ۳-۱۱ دستگاه مخلوط کن ۲۰ کیلویی که در آن آزمایشات اولیه انجام گرفته است نشان می‌دهد.

برای اختلاطهای اصلی از بتن‌یر استفاده می‌شود که نحوه مخلوط کردن در آن کمی متفاوت است، یعنی برخلاف آنچه در بالا گفته شد مخلوط کردن با حدود ۳/۴ شن و ماسه آغاز می‌شود و سایر موارد همانند آنچه در بالا ذکر شد ادامه می‌یابد. مابقی شن و ماسه قبل از اضافه کردن الیاف به مخلوط اضافه می‌شود. این امر، بعلا آنکه مخلوط در ابتدا بیشتر از حد نیاز آب می‌گیرد، از چسبیدن ریز دانه آن (میکروسیلیس، سیمان و...) به بتن‌یر جلوگیری می‌کند.

^۱ Mixture proportion



شکل ۳-۶ ب) مواد اختلاط ۱. میکروسیلیس
۲. پودر سنگ ۳. شن ۴. ماسه ۵. سیمان



شکل ۳-۶ الف) افزودن الیاف به مخلوط

۱۴.۳.۳. آزمایشات بتن تازه

یکی از مهمترین پارامترهای SCC کارایی و نتایج مطلوب این بتن در حالت تازه آن است. از همان ابتدا که این بتن تولید شد سازندگان و محققین اولیه آن در پی ابداع آزمایشاتی برای بررسی کنترل کیفیت تازگی این نوع خاص از بتن برآمدند. همانطور که از قبل نیز گفته شد خواصی که این بتن در حالت تازه باید داشته باشد عبارتند از: مقاومت در برابر جداسدگی، قابلیت روانی، قابلیت خودتراکمی، قابلیت عبور و قابلیت پرکنندگی. برای ایجاد معیاری برای این خواص و انجام آزمایشاتی که بتواند به قضاوت در مورد این خواص SCC بپردازد، موضوعی بود که برای ادامه روند تحقیقاتی SCC مورد توجه بوده است.

آزمایشات معروف و شناخته شده SCC عبارتند از آزمایش اسلامپ روانی، آزمایش V-Funnel، آزمایش U-Box، آزمایش L-Box، آزمایش J-ring و ... در این تحقیق از آزمایشات اسلامپ روانی و V-Funnel و L-box که در بین آزمایشات فوق از شهرت بیشتری برخوردار بوده، استفاده شده است. در مورد این آزمایشات و نحوه انجام آن در فصل اول به تفصیل توضیحات آورده شده است.

مقادیر بدست آمده از آزمایشات اسلامپ روانی، زمان T₅₀، V-Funnel و L-Box در جدول

۱-۴ آورده شده است

جدول ۳-۱۰: نتایج آزمایشات بتن تازه طرح اختلاطها				
کد طرح	اسلامپ روانی (mm)	زمان T ₅₀ (s)	زمان V-funnel	آزمایش L-Box
Fc800F0.0%	۶۳۵	۴	۹	٪۹۳
Fc800F0.1%	۵۷۰	۵	۱۱	٪۹۲
Fc800F0.2%	۵۵۰	۶	۱۶	٪۸۵
Fc800F0.3%	۵۲۰	۸	۱۸	٪۸۱
Fc900F0.0%	۶۶۰	۵	۸	۰/۹۴
Fc900F0.1%	۶۴۰	۵	۱۰	۰/۹۱
Fc900F0.2%	۵۹۰	۶	۱۵	٪۸۶
Fc900F0.3%	۵۳۰	۷	۱۷	٪۸۳

شکل ۳-۷، ۳-۸ و ۳-۹ سه دستگاه آزمایش بتن تازه SCC را نشان می دهد.



شکل ۳-۷: نحوه انجام آزمایش اسلامپ روانی با کمک مخروط آبرامز



شکل ۳-۸: دستگاه L-Box



شکل ۳-۹: دستگاه V-funnel

۳,۳,۵. آزمایشات بتن سخت شده

همانطور که گفته شد در این تحقیق آزمایشات بتن سخت شده شامل مقاومت فشاری مکعبی، مقاومت کششی دونیم شدن استوانه، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته می‌باشد و برای بتنهای SCC ساخته شده با الیاف پلی پروپیلین این خواص مکانیکی با نمونه بدون الیاف مقایسه شده است.

۳,۳,۵.۱. آزمایش مقاومت فشاری

بطور کلی دو نوع نمونه آزمایش فشاری که عبارت است از: مکعب و استوانه بکار برده می‌شود. در انگلیس و آلمان و بسیاری از کشورهای اروپایی نمونه‌های مکعبی مورد استفاده قرار می‌گیرد، در استاندارد های آمریکا، فرانسه و استرالیا نمونه‌های استوانه ای شکل توصیه شده‌اند. در این تحقیق از نمونه‌های مکعبی $10 \times 10 \times 10$ سانتیمتر برای مقاومت فشاری استفاده گردیده است. برای انجام این آزمایش نمونه‌ها را در قالب های فولادی و یا چدنی مکعبی می ریزند. مکعب بودن شکل قالبها، اندازه ضلع ها و صافی سطوح داخل قالب باید با مشخصات توصیه شده مطابقت نماید. پس از عمل آوری، نمونه‌ها از قالب خارج شده و تا قبل از آزمایش داخل حوضچه آب نگهداری می‌شوند. نمونه‌ها قبل از آزمایش از حوضچه خارج شده و سطح آنها خشک می‌شود. سپس نمونه‌های مکعبی مورد آزمایش از جهتی که سطح نمونه در تماس با قالب مکعبی می‌باشد، بین دو صفحه دستگاه بارگذاری قرار داده می‌شوند (شکل ۳-۱۰).

در این تحقیق تعدادی نیز استوانه 20×10 سانتیمتر برای تعیین مقاومت فشاری در نظر گرفته شده است. نحوه انجام آزمایش فشاری بر روی این نمونه‌های استوانه ای نیز به همان شیوه مکعب است. در اینجا در محل تماس سطح نمونه (سطح روی بتن) از تخته نرم سه لا برای ایجاد سطحی صاف استفاده شده است. در شکل ۳-۱۷ یک نمونه از نمونه مکعبی بعد از قرار گرفتن در زیر دستگاه فشار و شکسته شده را نشان می‌دهد.

۳,۳,۵.۲. آزمایش مقاومت کششی

این روش آزمایش شامل اعمال بار فشاری قطری در امتداد طول نمونه استوانه ای است تا زمانیکه شکست (دونیم شدن) در نمونه رخ دهد. این بار، که نحوه اعمال آن در شکل ۳-۱۸ بصورت شماتیک نشان داده شده است، تنش کششی را در سطح بارگذاری و نیروی فشاری نسبتاً بالایی را در اطراف محل اعمال بار ایجاد می‌کند. در این حالت بارگذاری شکست کششی در نمونه اتفاق می‌افتد

نه شکست فشاری چراکه سطح اطراف بار در حالت فشار سه محوری بوده و به همین علت ایستادگی بیشتری را در مقابل تنش فشاری بالاتر از حالت تک محوری از خود نشان می دهد. در سطح تماسی نیرو نیز مانند قبل از تخته نازک و سه لا برای توزیع یکنواخت نیرو استفاده شده است.



شکل ۳-۱۰: دستگاه آزمایش مقاومت فشاری

در این آزمایش نمونه استوانه‌ای تحت فشار از ناحیه سطح جانبی قرار می‌گیرد به گونه‌ای که نمونه استوانه‌ای حین گسیختگی به دو نیم شود. در این آزمایش نیز همان دستگاه اعمال فشار که در آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی استفاده شد، بکار برده می‌شود. برای این منظور نمونه استوانه‌ای 15×30 سانتیمتر در داخل گیره نگهدارنده مخصوصی مهار شده (مطابق شکل ۳-۱۹-الف) و در زیر فک دستگاه اعمال فشار قرار داده می‌شود (شکل ۳-۱۹-ب). نمونه بتنی استوانه‌ای شکل به طور افقی توسط گیره نگهدارنده داخل دستگاه آزمایش قرار می‌گیرد. پس از روشن شدن دستگاه نیرو به نوار تکیه‌گاهی وارد می‌شود و باعث گسیختگی نمونه در جهت قطر می‌شود. در این تحقیق برای هر طرح اختلاط، ۳ نمونه استوانه‌ای 15×30 جهت تعیین مقاومت کششی ۲۸ روزه آزمایش شد. لازم به یادآوری است از نمونه‌های استوانه‌ای 15×30 پس از تعیین مدول الاستیسیته جهت تعیین مقاومت کششی ۲۸ روزه استفاده گردیده است. از آنجائی که تنش مورد استفاده در تعیین مدول الاستیسیته در محدوده خطی قرار دارد لذا هیچگونه ترکی در بین نمونه‌های استوانه‌ای ایجاد نخواهد شد در نتیجه قابل استفاده جهت تعیین مقاومت کششی در سن ۲۸ روزه می‌باشد. نحوه محاسبه مقاومت

کششی با استفاده از تئوری پلاستیسیته بصورت زیر می باشد:

$$T = 2P/\pi ld \quad (20)$$

که در آن:

T : مقاومت کششی دو نیم شدن (kPa)

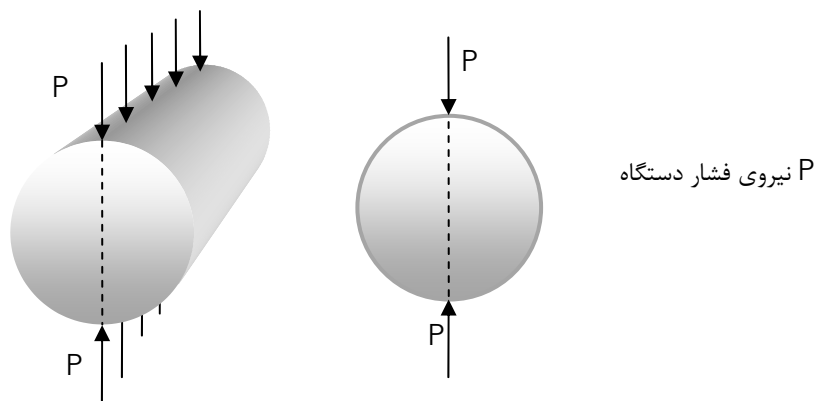
P : ماکزیموم بار وارده توسط دستگاه (kN)

l : طول نمونه (m)

d : قطر نمونه (m)



شکل ۳-۱۱: نمونه مکعبی شکسته شده فاقد الیاف تحت بار محوری فشاری



شکل ۳-۱۲: نمونه بتنی تحت کشش در آزمایش کششی دو نیم شدن (آزمایش برزیلی)



ب

الف

شکل ۳-۱۳: (الف) نحوه مهيار نمونه آزمون (ب) نمونه در زير فك براي اعمال فشار

۳,۳,۴. آرماتوربندی، قالببندی و بتن‌ریزی تیرها

مطابق طرح نشان داده شده در شکل ۳-۲ میلگردهای مورد نیاز تهیه شده، قالبها و خمهای مورد نیاز بر روی میلگردها ایجاد شده، خاموتها نیز تهیه شده و آرماتوربندی کلی انجام گردید. پس از آن قالبها در اندازه‌های مورد نظر تنظیم شده و جداره‌های آن به روغن آغشته گردید تا از چسبیدن بتن به دیواره‌های قالب جلوگیری شود و میلگردهای بسته شده در داخل قالب قرار گرفت. پس از آن بتن‌ریزی با این روش که بتن از یک سر قالب ریخته شده و اجازه داده شد که بتن تا سر دیگر قالب جریان پیدا کند، انجام گرفت و تا زمانی که تیر به طور کامل پر شود بتن‌ریزی به این شیوه ادامه پیدا کرد



شکل ۳-۱۴ آرماتور بندی تیرها



شکل ۳-۱۵ قالببندی تیرها



شکل ۳-۱۶ بتن ریزی تیرها

۷.۳.۳. عمل آوری تیرها

قالبها پس از گذشت ۲۴ ساعت باز شده و تیرها در مکان مناسبی در آزمایشگاه قرار گرفتند. به منظور عمل آوری مناسب، این تیرها با گونی‌های مرطوب پوشانده شده و تا ۲۸ روز، در این شرایط نگهداری شدند.

۸.۳.۳. آزمایش تیرها

آزمایش کلیه تیرها پس از گذشت ۴۴ روز از تاریخ بتن‌ریزی انجام گرفت. قبل از اعمال بار بر

روی تیرها، برای مشخص شدن مسیر ترکها که بر اثر اعمال بار به وجود می‌آیند، سطح تیر با رنگ سفید پوشانده شد و پس از آن محل دقیق اعمال بار، محل تکیه‌گاهها، محل قرارگیری خیزسنج در مرکز تیر، و نقاط مربوط به سنجش کرنشها به طور دقیق تعیین و علامت‌گذاری شدند. لازم بذکر است برای سنجش هر یک از کرنشها، تغییرات فاصله بین دو نقطه مد نظر قرار می‌گیرد که با کرنش‌سنج اندازه‌گیری می‌شوند. نحوه کار بدینگونه است که ابتدا دو دکمه با فاصله تقریبی ۲۰cm (به ابعاد کرنش‌سنج بستگی دارد) با چسب سنگ به تیر چسبانده می‌شود، پس از کالیبره شدن مورد استفاده دستگاه کرنش‌سنج قرار می‌گیرد. شکل ۳-۱۸ دستگاه مورد استفاده برای سنجش کرنشها را نشان می‌دهد.

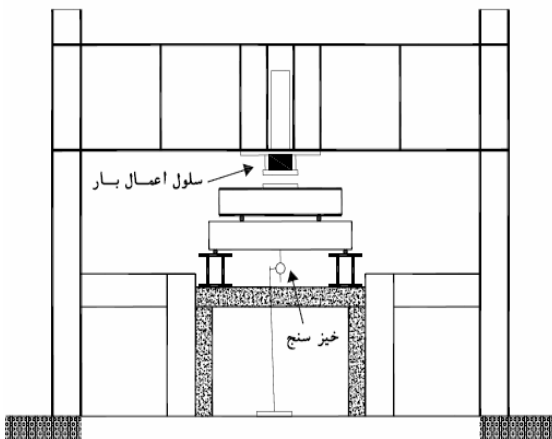


شکل ۳-۱۷ سفیدکاری تیرها



شکل ۳-۱۸ دستگاه کرنش سنج

پس از قرار دادن تیر بر روی تکیه گاهها از موقعیت صحیح تکیه گاهها و محل اعمال بار و تراز بودن تیر و تکیه گاهها اطمینان حاصل می شود. شکل ۳-۱۹ طرح کل این دستگاه بارگذاری، و نحوه بارگذاری و چگونگی ایجاد تکیه گاهها بر روی تیر را نشان می دهد.

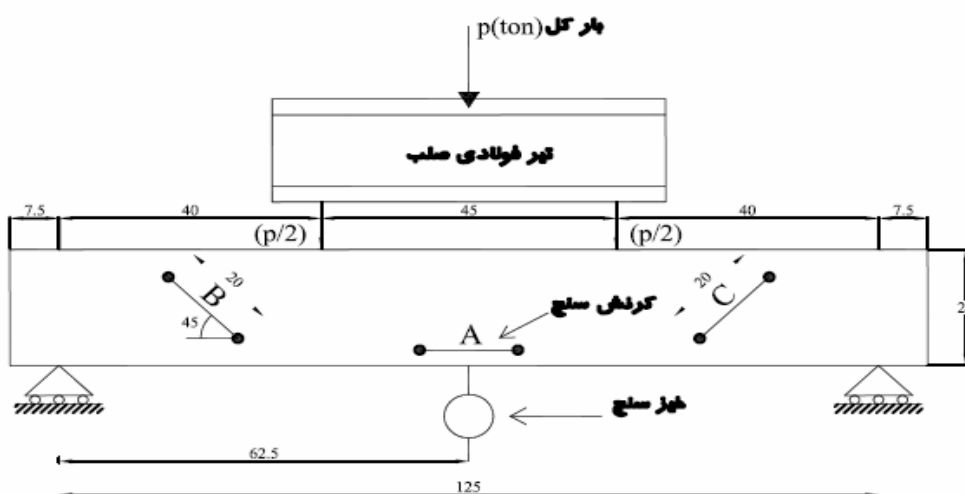


شکل ۳-۱۹ دستگاه بارگذاری

همانطور که مشاهده می گردد بار کل به وسیله یک تیر فولادی صلب به صورت دوبار متمرکز به تیر مزبور وارد می گردد و سلول بار کالیبره شده بین جک و تیر فولادی قرار دارد. بار با نمو ۲ton

و با سرعت متوسط ۳۰ ثانیه در هر گام تا بار نهایی وارد می‌گردد و در هر مرحله علاوه بر ثبت مقادیر بار، کرنشها و خیر مرکز تیر، ترکهای ایجاد شده همراه با مقدار بار اعمالی مربوط به آن ترک با مازیک علامت‌گذاری می‌شوند.

شکل ۲۰-۳ مدل سازی شده تیر را همراه با موقعیت اعمال بار، موقعیت خیزسنج و دکمه‌های سنجش کرنش را نشان می‌دهد.



شکل ۲۰-۳ مدل سازی شده تیر

. همچنین مقادیر به دست آمده از خیزسنج و کرنش سنج در راستاهای A, B, C و مقاومت

نهائی برشی تیرهای بتن مقاومت بالا خود متراکم در جدول‌های ۱۰-۳ الی ۱۷-۳ موجود می‌باشد.

جدول ۳-۱۱ داده های آزمایش تیر Fc800 f0.0%

بار کل ton	خیز مرکز تیر mm	کرنش A		کرنش B		کرنش C	
		عدد قرائت شده	کرنش نظیر	عدد قرائت شده	کرنش نظیر	عدد قرائت شده	کرنش نظیر
0	0	822	0.0000	834	0.0000	834	0.0000
2.2	0.44	843	0.0255	836	0.0024	838	0.0048
4.2	1	864	0.0511	841	0.0084	842	0.0096
6.28	1.66	884	0.0754	850	0.0192	864	0.0360
8.3	2.26	905	0.1010	886	0.0624	906	0.0863
9.87	2.76	921	0.1204	936	0.1223	938	0.1247
12.0	3.49	941	0.1448	997	0.1954	988	0.1847
14.1	4.27	962	0.1703	1034	0.2398	1046	0.2542
17.5	5.37	996	0.2117	1078	0.2926	1123	0.3465
20.2	6.32	1027	0.2494	1114	0.3357	1193	0.4305
22.0	7.43	1050	0.2774	1147	0.3753	1242	0.4892
24.0	8.66	1073	0.3054	1186	0.4221	1284	0.5396
24.63	9.78	1090	0.3260	1263	0.5144	1305	0.5647

جدول ۳-۱۲ داده های آزمایش تیر Fc800 f0.1%

بار کل ton	خیز مرکز تیر mm	کرنش A		کرنش B		کرنش C	
		عدد قرائت شده	کرنش نظیر	عدد قرائت شده	کرنش نظیر	عدد قرائت شده	کرنش نظیر
0	0	881	0.0000	834	0.0000	832	0.0000
3.1	0.65	910	0.0329	836	0.0024	836	0.0048
5.1	1.32	936	0.0624	841	0.0084	847	0.0180
7.1	1.94	956	0.0851	850	0.0192	859	0.0325
9.2	2.54	970	0.1010	886	0.0624	914	0.0986
12.1	3.42	1002	0.1373	936	0.1223	973	0.1695
14.5	4.28	1025	0.1635	997	0.1954	1043	0.2536
16.3	5.01	1048	0.1896	1034	0.2398	1078	0.2957
18.7	5.74	1072	0.2168	1078	0.2926	1135	0.3642
20.28	6.23	1096	0.2440	1114	0.3357	1175	0.4123
22.0	7.12	1114	0.2645	1147	0.3753	1223	0.4700
23.71	8.22	1132	0.2849	1186	0.4221	1262	0.5168
25.6	10.31	1170	0.3280	1263	0.5144	1306	0.5697

جدول ۳-۱۳ داده های آزمایش تیر Fc800 f0.2%

بار کل	خیز مرکز تیر mm	کرنش A		کرنش B		کرنش C	
		عدد قرائت شده	کرنش نظیر	عدد قرائت شده	کرنش نظیر	عدد قرائت شده	کرنش نظیر
0	0	819	0.0000	810	0.0000	807	0.0000
2.0	0.42	834	0.0183	812	0.0025	809	0.0025
4.0	0.99	852	0.0403	814	0.0049	812	0.0062
6.2	1.62	873	0.0659	823	0.0160	830	0.0285
8.3	2.15	891	0.0879	834	0.0296	843	0.0446
10.3	2.67	907	0.1074	857	0.0580	885	0.0967
12.2	3.31	923	0.1270	886	0.0938	924	0.1450
14.5	4.13	945	0.1538	924	0.1407	966	0.1970
16.3	4.93	962	0.1746	958	0.1827	1018	0.2615
18.2	5.59	981	0.1978	996	0.2296	1063	0.3172
20.4	6.33	1005	0.2271	1046	0.2914	1115	0.3817
22.0	6.97	1025	0.2515	1074	0.3259	1155	0.4312
24.0	8.1	1045	0.2759	1112	0.3728	1196	0.4820
25.87	10.57	1095	0.3370	1237	0.5272	1279	0.5849

جدول ۳-۱۴ داده های آزمایش تیر Fc800 f0.3%

بار کل	خیز مرکز تیر mm	کرنش A		کرنش B		کرنش C	
		عدد قرائت شده	کرنش نظیر	عدد قرائت شده	کرنش نظیر	عدد قرائت شده	کرنش نظیر
0	0	821	0.0000	832	0.0000	830	0.0000
2.1	0.42	835	0.0171	834	0.0024	833	0.0036
4.2	0.99	854	0.0402	839	0.0084	842	0.0145
6.4	1.61	874	0.0646	846	0.0168	852	0.0265
8.5	2.14	888	0.0816	858	0.0313	872	0.0506
10.4	2.61	903	0.0999	878	0.0553	897	0.0807
12.3	3.2	918	0.1181	898	0.0793	932	0.1229
15.0	4.42	943	0.1486	937	0.1262	987	0.1892
18.4	5.59	975	0.1876	1002	0.2043	1070	0.2892
20.4	6.09	1000	0.2180	1042	0.2524	1114	0.3422
22.3	6.87	1019	0.2412	1078	0.2957	1157	0.3940
24.2	7.78	1043	0.2704	1121	0.3474	1209	0.4566
26.1	8.53	1070	0.3033	1156	0.3894	1257	0.5145
27.3	10.96	1100	0.3398	1278	0.5361	1321	0.5916

جدول ۳-۱۵ داده های آزمایش تیر Fc900 f0.0%

بار کل ton	خیز مرکز تیر mm	کرنش A		کرنش B		کرنش C	
		عدد قرائت شده	کرنش نظیر	عدد قرائت شده	کرنش نظیر	عدد قرائت شده	کرنش نظیر
0	0	857	0.0000	827	0.0000	823	0.0000
2.1	0.42	879	0.0257	829	0.0024	828	0.0061
4.3	0.92	898	0.0478	832	0.0060	831	0.0097
6.2	1.53	917	0.0700	839	0.0145	842	0.0231
8.3	2.13	938	0.0945	863	0.0435	869	0.0559
10.1	2.63	955	0.1144	892	0.0786	899	0.0923
12.2	3.32	977	0.1400	931	0.1258	942	0.1446
14.0	3.9	994	0.1599	962	0.1632	979	0.1896
16.6	4.74	1020	0.1902	1014	0.2261	1035	0.2576
18.2	5.23	1036	0.2089	1045	0.2636	1064	0.2928
20.8	6.33	1067	0.2450	1102	0.3325	1105	0.3426
23.42	7.88	1098	0.2812	1153	0.3942	1148	0.3949
24.33	8.45	1109	0.2940	1174	0.4196	1164	0.4143
25.3	10.3	1121	0.3081	1195	0.4450	1178	0.4313

جدول ۳-۱۶ داده های آزمایش تیر Fc900 f0.1%

بار کل ton	خیز مرکز تیر mm	کرنش A		کرنش B		کرنش C	
		عدد قرائت شده	کرنش نظیر	عدد قرائت شده	کرنش نظیر	عدد قرائت شده	کرنش نظیر
0	0	819	0.0000	818	0.0000	815	0.0000
2.1	0.46	838	0.0232	820	0.0024	820	0.0061
4.2	0.93	855	0.0440	822	0.0049	825	0.0123
6.1	1.56	870	0.0623	828	0.0122	832	0.0209
8.0	2.02	888	0.0842	846	0.0342	848	0.0405
12.55	3.39	928	0.1331	915	0.1186	925	0.1350
15.0	4.16	950	0.1600	957	0.1699	975	0.1963
17.32	4.85	970	0.1844	1002	0.2249	1015	0.2454
21.12	6.11	1005	0.2271	1078	0.3178	1076	0.3202
22.81	7.05	1025	0.2515	1111	0.3582	1106	0.3571
23.95	7.69	1038	0.2674	1131	0.3826	1120	0.3742
25.26	8.6	1050	0.2821	1157	0.4144	1145	0.4049
26.85	11.11	1078	0.3162	1191	0.4560	1175	0.4417

جدول ۳-۱۷ داده های آزمایش تیر Fc900 f0.2%

بار کل ton	خیز مرکز تیر mm	کرنش A		کرنش B		کرنش C	
		عدد قرائت شده	کرنش نظیر	عدد قرائت شده	کرنش نظیر	عدد قرائت شده	کرنش نظیر
0	0	866	0.0000	840	0.0000	838	0.0000
2.3	0.51	885	0.0219	841	0.0012	842	0.0048
4.67	1.11	907	0.0473	844	0.0048	843	0.0060
7.0	1.74	926	0.0693	856	0.0190	861	0.0274
8.4	2	940	0.0855	863	0.0274	869	0.0370
10.2	2.41	955	0.1028	876	0.0429	892	0.0644
12.5	3.15	977	0.1282	906	0.0786	928	0.1074
17.45	4.68	1021	0.1790	994	0.1833	1020	0.2172
21.0	5.92	1054	0.2171	1072	0.2762	1082	0.2912
21.81	6.4	1062	0.2263	1087	0.2940	1094	0.3055
23.27	6.88	1075	0.2413	1112	0.3238	1123	0.3401
24.26	7.52	1086	0.2540	1128	0.3429	1138	0.3580
25.09	7.79	1092	0.2610	1146	0.3643	1151	0.3735
28.31	12.07	1156	0.3349	1243	0.4798	1231	0.4690

جدول ۳-۱۸ داده های آزمایش تیر Fc900 f0.3%

بار کل ton	خیز مرکز تیر mm	کرنش A		کرنش B		کرنش C	
		عدد قرائت شده	کرنش نظیر	عدد قرائت شده	کرنش نظیر	عدد قرائت شده	کرنش نظیر
0	0	835	0.0000	821	0.0000	820	0.0000
2.2	0.56	855	0.0240	823	0.0024	823	0.0037
5.36	1.13	881	0.0551	828	0.0085	836	0.0195
7.5	1.7	896	0.0731	834	0.0158	845	0.0305
10.36	2.42	916	0.0970	856	0.0426	872	0.0634
12.41	3.01	932	0.1162	875	0.0658	896	0.0927
14.73	3.75	951	0.1389	901	0.0974	928	0.1317
17.41	4.53	974	0.1665	942	0.1474	967	0.1793
19.82	5.36	992	0.1880	987	0.2022	1006	0.2268
22.14	6.23	1012	0.2120	1034	0.2594	1048	0.2780
23.13	6.56	1021	0.2228	1057	0.2875	1071	0.3061
24.38	7.15	1032	0.2359	1079	0.3143	1097	0.3378
25.8	7.75	1046	0.2527	1108	0.3496	1121	0.3671
27.32	8.56	1058	0.2671	1136	0.3837	1152	0.4049
30.71	13.98	1125	0.3473	1234	0.5030	1219	0.4866

فصل چهارم

بررسی نتایج حاصل از آزمایش

فصل چهارم

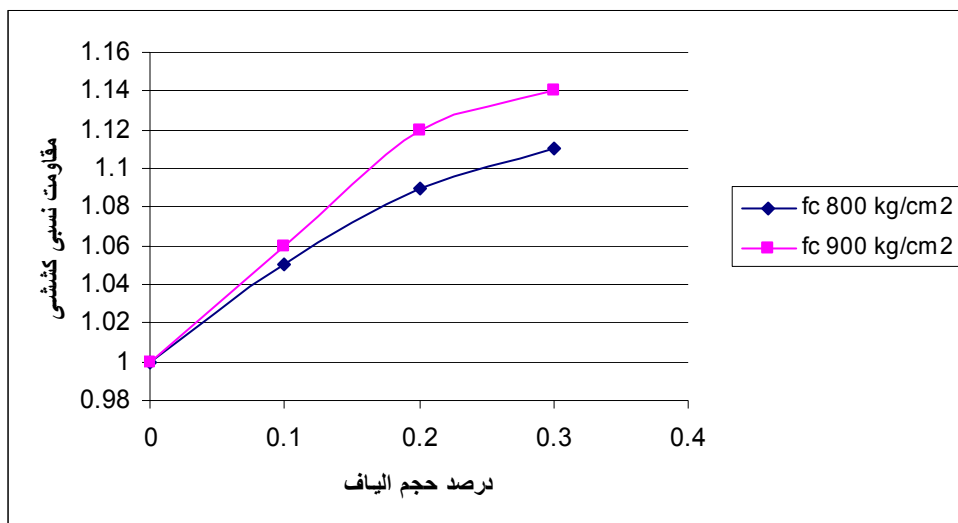
۱.۴. مقدمه

در فصل گذشته نحوه اجرا و متغیرهای اصلی آزمایش را بیان کردیم. در این فصل به بررسی و مقایسه داده‌های به دست آمده از آزمایشات و تشریح آن می‌پردازیم. به همین منظور ابتدا به بررسی مقاومت کشش غیر مستقیم و سپس به بررسی رفتار بار-خیز، شکل‌پذیری، بار-کرنشهای A, B, C و مقاومت نهائی برشی تیرها می‌پردازیم و بحث و مقایسه صورت می‌گیرد. در پایان در مورد الگوها و نحوه ترک خوردگی این تیرها صحبت و نتیجه‌گیری خواهد شد.

۲.۴. بررسی رفتار کشش غیر مستقیم (splitting)

این آزمایش که بر روی نمونه‌های استوانه ای 30×15 سانتیمتر انجام گرفته است، صرفاً برای اختلاطهای حاوی الیاف پلی پروپیلین و طرح اختلاط صفر درصد الیاف انجام گرفته است (شرح این آزمایش در فصل سوم به صورت کامل آورده شده است) تعداد نمونه‌ها برای هر اختلاط سه عدد می‌باشد که در ۴۲ روزگی (همزمان با آزمایش تیرها) مورد آزمایش قرار گرفته است. در این آزمایش نمونه استوانه ای بعد از قرار گرفتن در یک گیره خاص زیر فک اعمال فشار (همان فک اعمال نیروی فشاری در آزمایش مقاومت فشاری) قرار گرفته و به آن بار اعمال می‌شود و این اعمال بار تا زمانی که استوانه به دو نیم تقسیم شود ادامه پیدا می‌کند چراکه در این حالت است که استوانه دیگر نمی‌تواند نیرو را منتقل کند. بعد از دونیم شدن استوانه مقدار نیروی ماکزیموم اعمال شده قرائتی گردد.

در شکل ۴-۱ نیز اثر افزودن الیاف بر مقاومت نسبی کشش غیرمستقیم نمونه‌های استوانه‌ای نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد نقش الیاف در افزودن مقاومت نسبی بتن خودمتراکم با مقاومت 900 kg/cm^2 کمی بیشتر بوده است. برای بتن خودمتراکم با مقاومت 900 kg/cm^2 و بتن خودمتراکم با مقاومت 800 kg/cm^2 افزایش مشاهده می‌گردد.



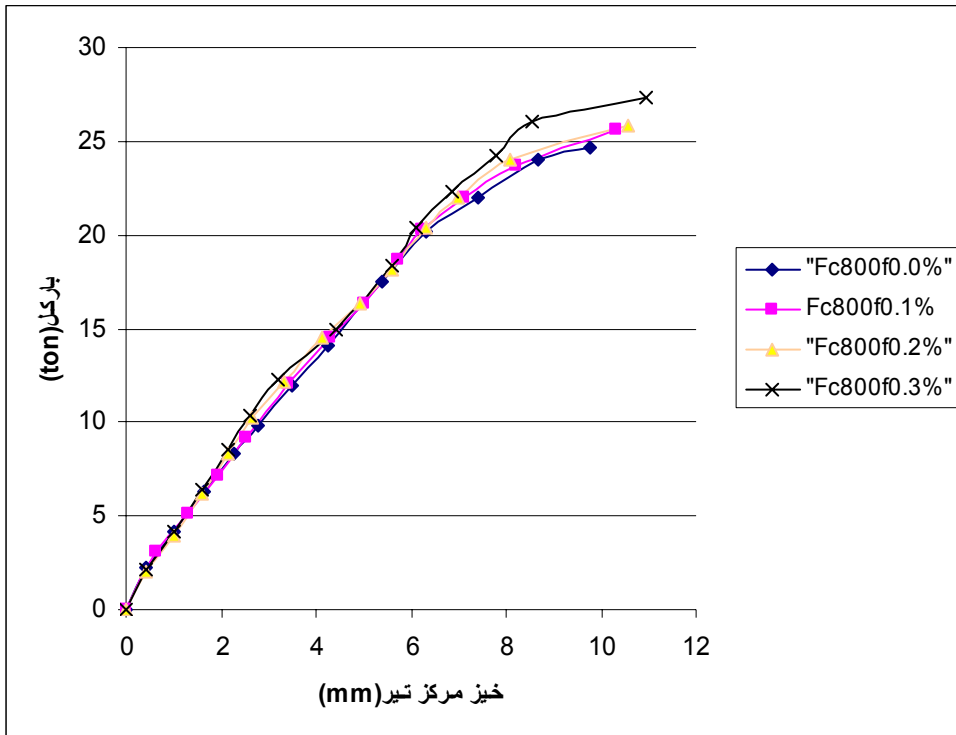
شکل ۴-۱ روند افزایش مقاومت کشش غیر مستقیم با افزودن الیاف

در این بخش دو نکته قابل توجه است:

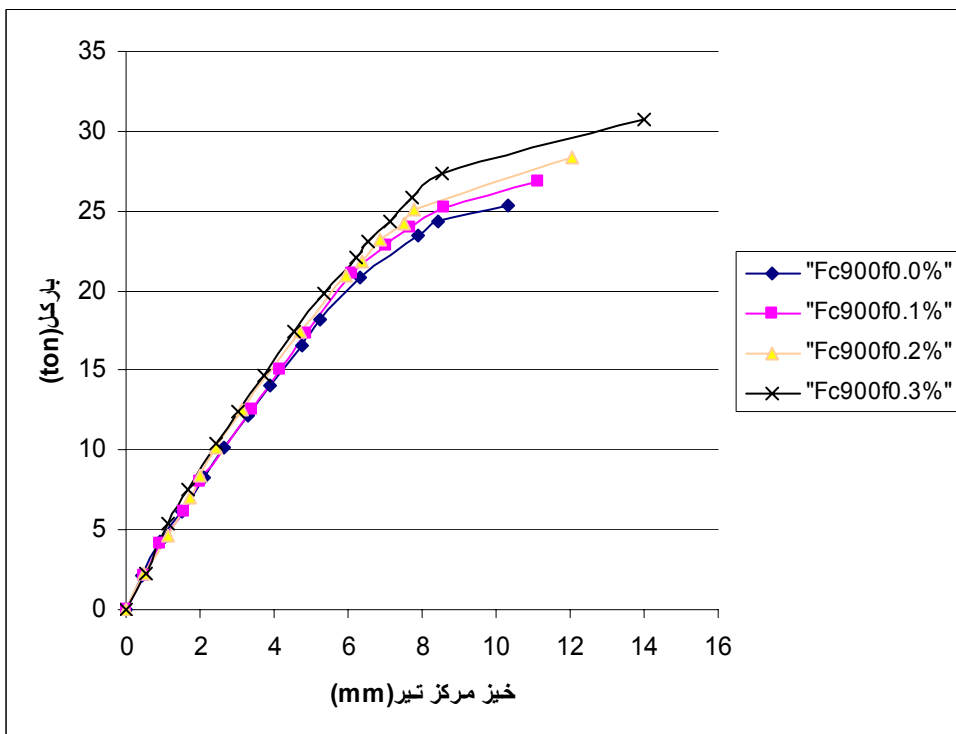
- ۱- در نمونه‌های الیافی کشش غیر مستقیم حتی پس از گسیختگی (به خاطر آنکه الیاف، اجزاء بتن را بخوبی به هم می‌دوزند) شکل کلی نمونه حفظ می‌شود.
- ۲- در کلیه نمونه‌های بتن مقاومت بالا به دلیل استفاده از سنگدانه‌های معمولی و وجود ملات قوی سیمان و میکرو سیلیس، شکست نهائی همراه با شکست سنگدانه‌ها همراه بود.

۳.۴. بررسی رفتار بار-فیز تیرها

منحنی‌های بار - خیز تیرهای بتن خودمتراکم، گروه Fc800 و Fc900 به ترتیب در شکل‌های ۲-۴ و ۳-۴ ترسیم شده است.



شکل ۲-۴ منحنی بار-خیز تیرهای بتن خودمتراکم با مقاومت 800 kg/cm^2

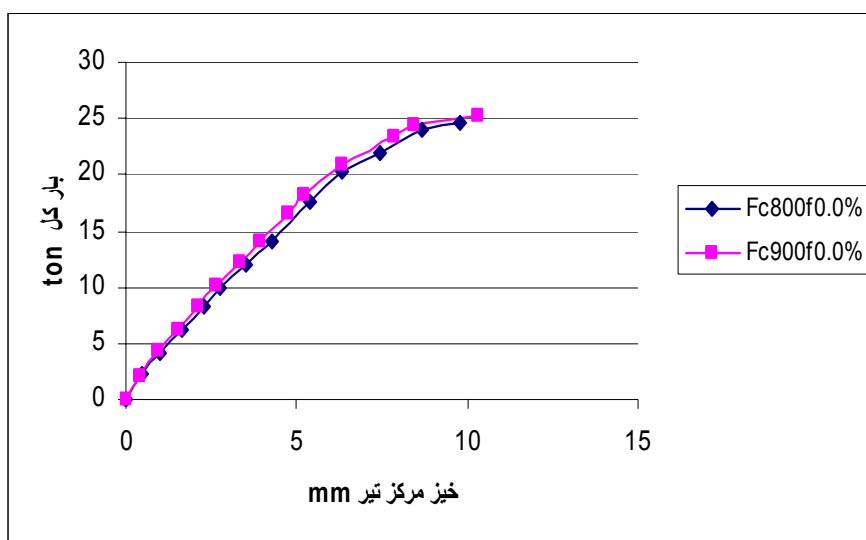


شکل ۳-۴ منحنی بار-خیز تیرهای بتن خودمتراکم با مقاومت 900 kg/cm^2

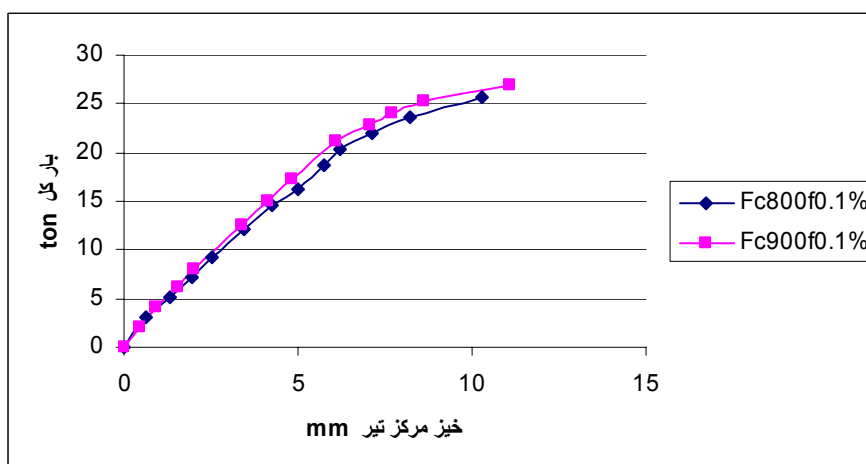
همانطور که ملاحظه می‌گردد تا نزدیکی حد خطی تیر و حصول اولین ترکها (حدود بار 8ton) تفاوت چندانی ناشی از افزودن الیاف در نمودار بار - خیز به وجود نمی‌آید.

در نزدیکی حالت نهائی با افزودن الیاف، علاوه بر افزایش مقاومت نهائی، خیز نهائی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد و با توجه به اینکه سطح زیر نمودار از جنس انرژی می‌باشد، این امر مبین نقش مؤثر الیاف در افزایش قابلیت جذب انرژی است.

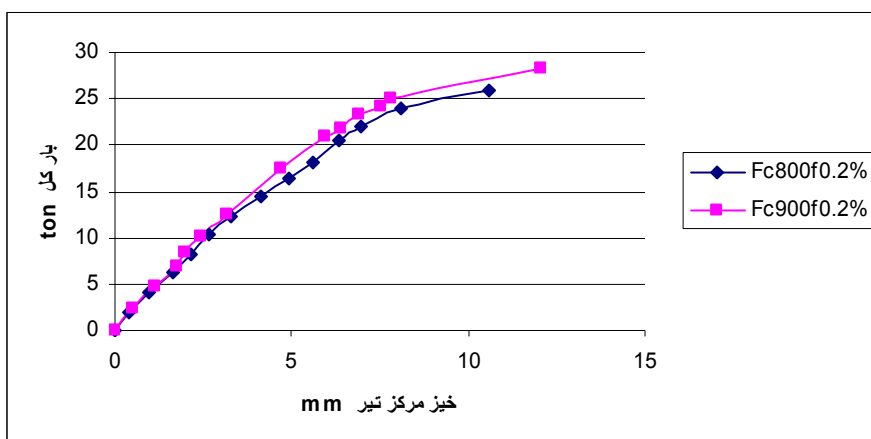
شکل‌های ۴-۴ و ۷-۴ به ترتیب منحنی‌های بار - خیز تیرهای بتن خودمترکم با درصد الیاف یکسان و مقاومت متفاوت نشان داده شده است



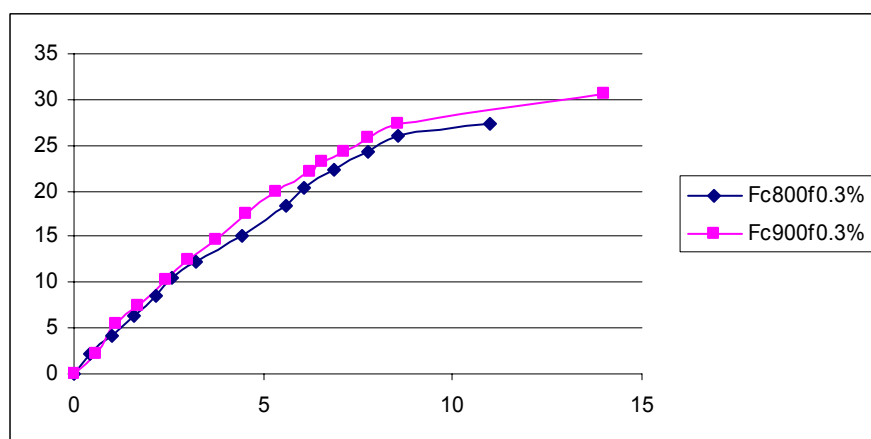
شکل ۴-۴ منحنی بار - خیز تیرهای بتن خودمترکم با مقاومت‌های 900 و 800 kg/cm^2 با $0,0$ درصد لیاف



شکل ۵-۴ منحنی بار - خیز تیرهای بتن خودمترکم با مقاومت‌های 900 و 800 kg/cm^2 با $0,1$ درصد الیاف



شکل ۴-۶ منحنی بار-خیز تیرهای بتن خودمتراکم با مقاومت‌های 900 و 800 با 0.2% درصد الیاف



شکل ۴-۷ منحنی بار-خیز تیرهای بتن خودمتراکم با مقاومت‌های 900 و 800 با 0.3% درصد الیاف

همانطور که مشاهده می‌شود شیب منحنی بار - خیز تیرهای بتن مقاومت خود متراکم با مقاومت بالاتر، در مقام مقایسه، بیشتر است. که این امر نشان دهنده افزایش سختی و کاهش تغییر مکانها در تیر دارای بتن مقاومت بالاتر می‌باشد.

۴.۴. بررسی شکل‌پذیری تیرها

به منظور مقایسه شکل‌پذیری تیرها ، نسبت $\frac{D_{yield}}{D_{max}}$ (خیز مرکز دهانه) بررسی می‌شود که در آن D_{yield} تغییر مکان متناظر با بار حد تسلیم میلگردهای کششی بر اساس آیین‌نامه آبا می‌باشد. D_{max} نیز ماکزیمم تغییر مکان قرائت شده ، در وسط دهانه هر تیر است.

به منظور بدست آوردن D_{yield} ، با توجه به اینکه در طراحی مقاطع از فولاد کششی کمتر از حد بالانس استفاده شد ، در ابتدا ماکزیمم لنگری را که مقاطع می‌توانند تحمل کنند (صرف‌نظر از تاثیر مقاومت کششی بتن الیافی) برابر آیین‌نامه بتن ایران بدست آوردیم سپس با توجه به مشخصات و ابعاد تیر ، نیروی متناظر با لنگرهای مذکور مشخص شدند. با اعمال نیروهای فوق در نمودار شکل-های ۲-۴ و ۳-۴ مقادیر خیز متناظر با نیروها که همان D_{yield} می‌باشد تعیین شدند.

گام اول : بدست آوردن لنگر متناظر با تسلیم فولاد کششی

$$M = 0.85 \cdot A_s \cdot F_y (d - a/2) \quad [14]$$

a : طول بلوک فشاری

d : فاصله مرکز میلگردهای کششی تا آخرین تار فشاری بتن

F_y : تنش تسلیم فولاد کششی

A_s : سطح مقطع فولاد کششی

M : لنگر متناظر با تسلیم فولاد کششی

گام دوم : با توجه به رابطه $M = (P/2) \times 0.45$ مقدار نیرو بدست می‌آید

گام سوم : در نمودارهای بار-خیز وسط دهانه ، با توجه به نیروی بدست آمده D_{yield} تعیین می‌گردد.

پس از انجام محاسبات فوق ، بار تسلیم تیرهای گروه FC800 برابر ۱۷,۶۷ ton ، و برای گروه FC900 برابر ۱۸ ton بدست آمد.

جداول ۱-۴ و ۲-۴ به ترتیب تغییرات شکل‌پذیری تیرهای بتن خودمترکم با درصد الیاف متفاوت را در هر دو گروه نشان می‌دهد.

بررسی شکل‌پذیری تیرهای گروه FC800

حجم الیاف %	D _{yield} (mm)	D _{max} (mm)	D _{max} /D _{yield}
۰,۰	۵,۰۸۸	۱۰,۳	۲,۰۲
۰,۱	۵,۰۰۲	۱۱,۱۱	۲,۲۲
۰,۲	۴,۷۹۴	۱۲,۰۷	۲,۵۲
۰,۳	۴,۶۵۶	۱۳,۹۸	۳,۰۰

جدول ۱-۴

بررسی شکل‌پذیری تیرهای گروه FC900

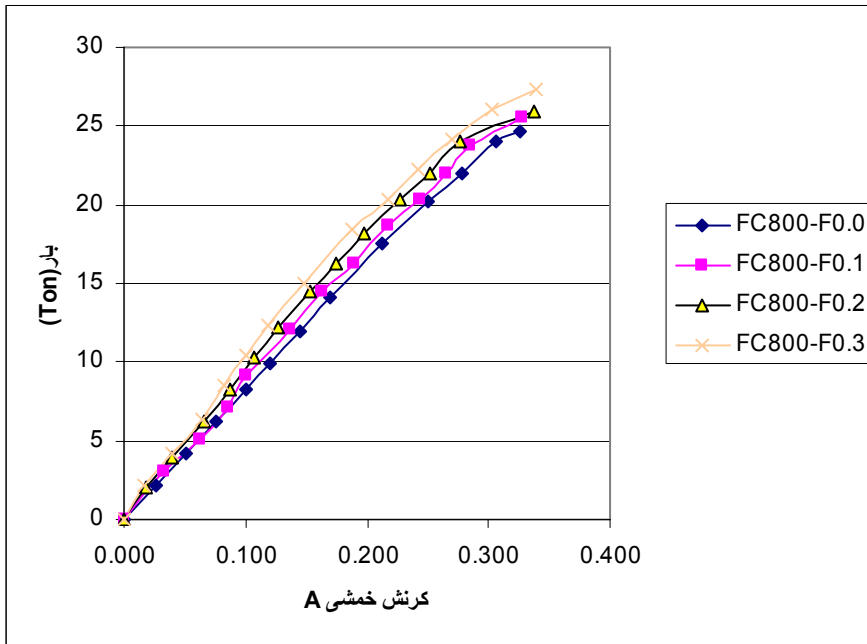
حجم الیاف %	D _{yield} (mm)	D _{max} (mm)	D _{max} /D _{yield}
۰,۰	۵,۴۳۶	۹,۷۸	۱,۸
۰,۱	۵,۴۲۶	۱۰,۳۱	۱,۹۰
۰,۲	۵,۴۱۲	۱۰,۵۷	۱,۹۵
۰,۳	۵,۳۵۸	۱۰,۹۶	۲,۰۵

جدول ۲-۴

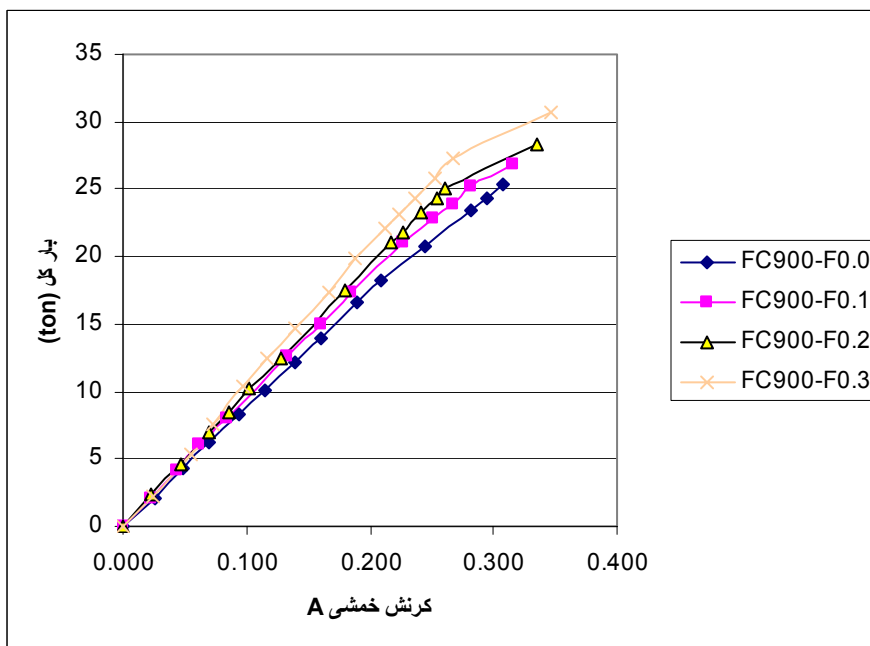
همانطور که مشاهده می‌شود افزایش حجم الیاف باعث رشد شکل‌پذیری در تیرها می‌شود. در این تحقیق این تاثیر در بتن خود متراکم با مقاومت 800 kg/cm^2 بیشتر از بتن خود متراکم با مقاومت 900 kg/cm^2 می‌باشد.

۵.۴. بررسی رفتار بار-کرنش خمشی A

منحنی بار - کرنش خمشی A برای کلیه تیرها در شکل ۴-۸ ترسیم شده است. کلیه تیرها تا قبل از اولین ترک، رفتار خطی و بعد از شکل‌گیری ترکها رفتار غیرخطی داشتند.



شکل ۴-۸ نمودار بار-گرنش خمشی مربوط به تیرهای گروه FC800

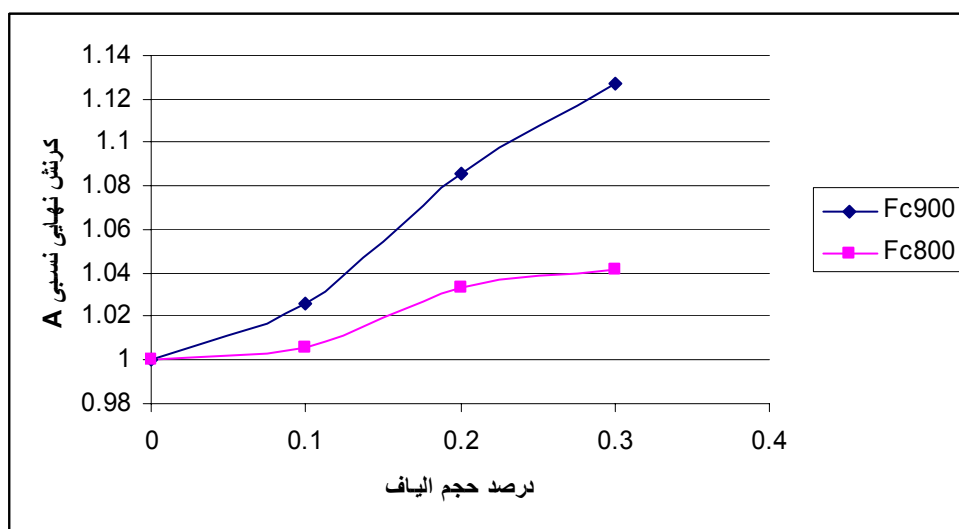


شکل ۴-۹ نمودار بار-گرنش خمشی مربوط به تیرهای گروه FC900

همانطور که ملاحظه می‌شود کلیه منحنی‌ها انطباق نزدیکی به هم دارند (تأثیر چندانی ناشی

از افزودن الیاف تا نزدیکی حالت نهائی تیر مشاهده نمی‌گردد، در حدود بار ۵ ton تا ۸ ton انحناء قابل توجهی در منحنی‌ها به وجود می‌آید که این امر نشان دهنده تشکیل اولین ترک خمشی در وسط تیر می‌باشد.

تأثیر افزودن الیاف بر افزایش نسبی کرنش نهائی A برای هر دو گروه تیرهای بتنی خودمتراکم در شکل ۴-۱۰ ترسیم شده است. در این تحقیق تأثیر الیاف بر افزایش نسبی کرنش نهائی A در بتن با مقاومت بالاتر بیشتر می‌باشد.

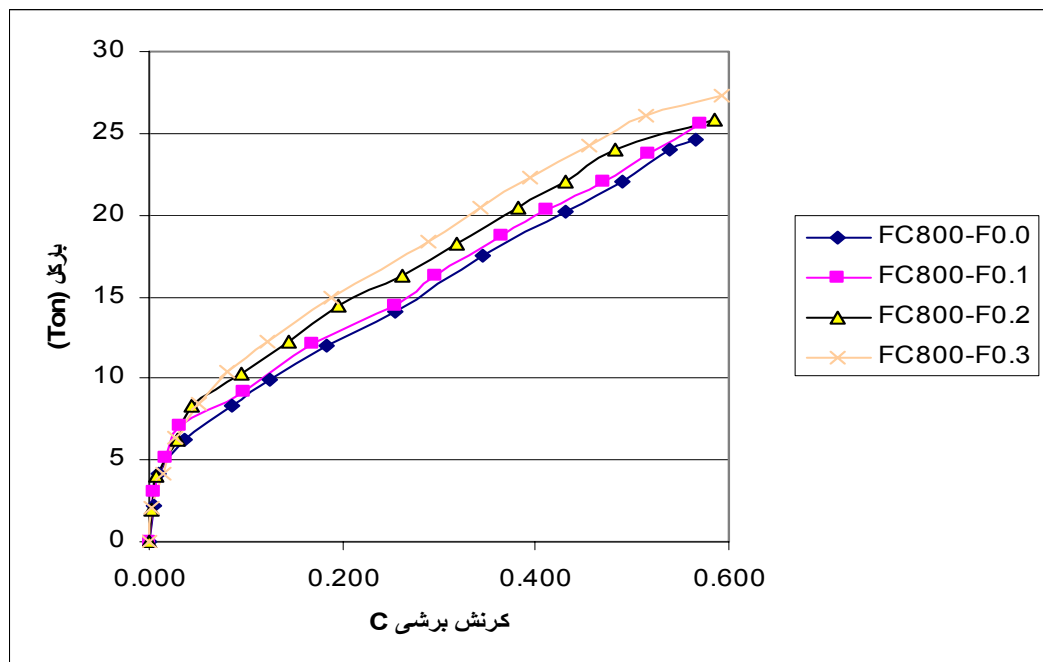
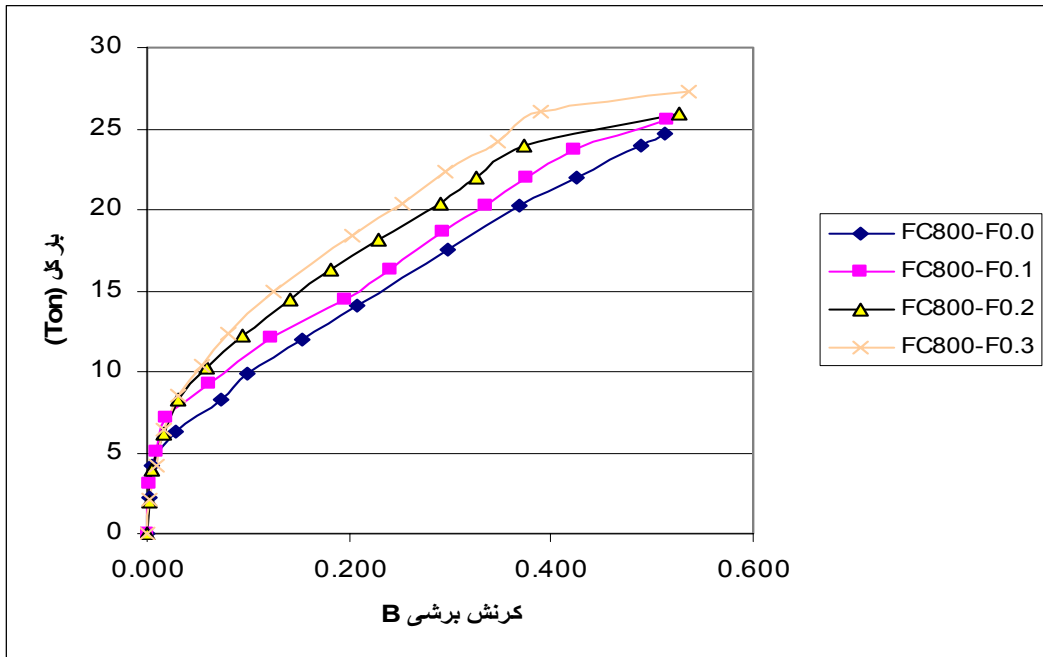


شکل ۴-۱۰ تأثیر افزودن الیاف بر افزایش نسبی کرنش نهایی A

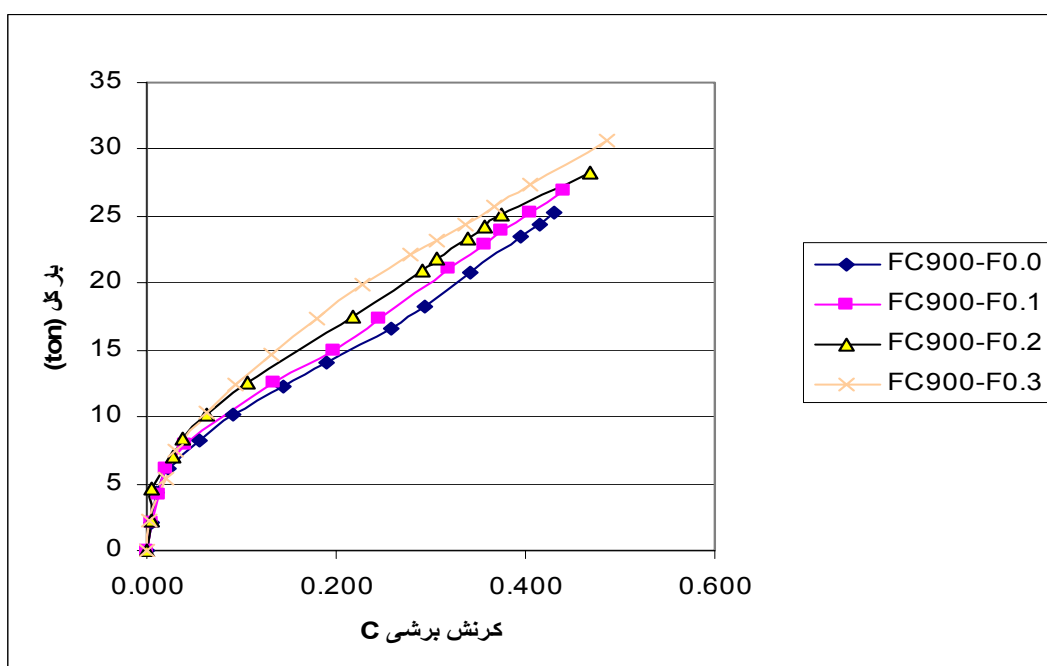
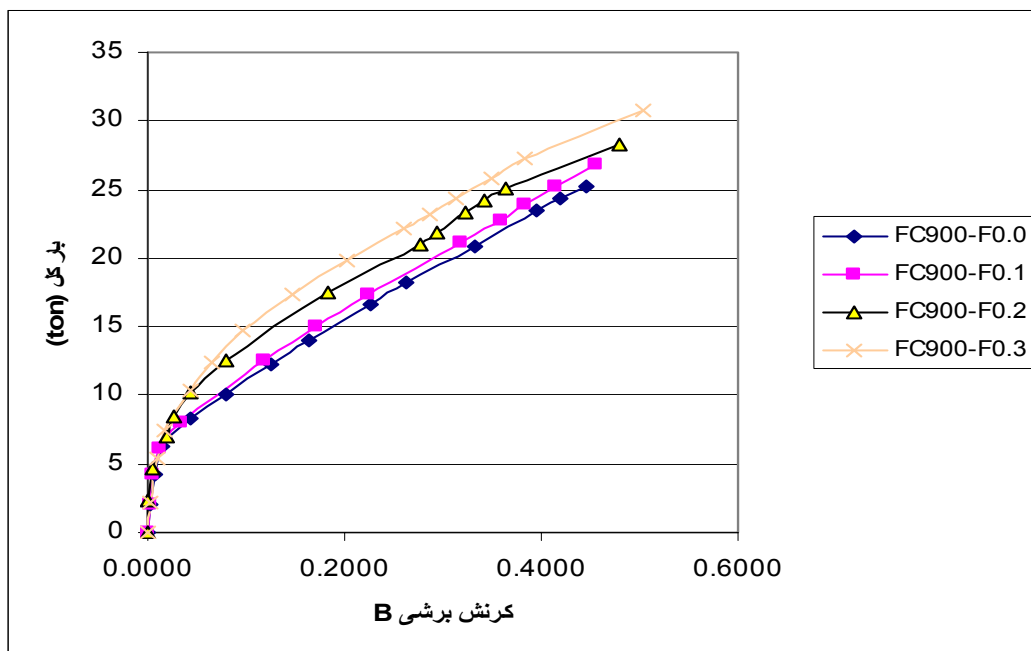
۴.۱۴. بررسی رفتار بار-کرنش C, B

همانطور که در شکل ۳-۲۰ ملاحظه گردید، کرنشهای B, C به منظور بررسی تأثیر افزودن الیاف بر بازشدگی ترکهای قطری، با زاویه ۴۵ درجه نسبت به امتداد افق در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه کرنش سنجهای مزبور کاملاً در نواحی برشی قرار داشتند، تأثیر افزودن الیاف بر مقادیر ثبت شده از آنها نسبتاً قابل توجه می‌باشد.

تأثیر افزودن الیاف بر منحنی بار - کرنش B, C برای تیرهای گروه Fc800 و تیرهای گروه Fc900 در شکل‌های ۴-۱۱ و ۴-۱۲ نشان داده شده است. در کلیه شکلها منحنی تیرهای حاوی الیاف، مقدار بسیار اندکی سختی برشی تیر افزایش یافته است و از سویی بدون آنکه مقاومت نهائی تیر تغییر چندانی کند، شکل پذیری آن افزایش یافته است.

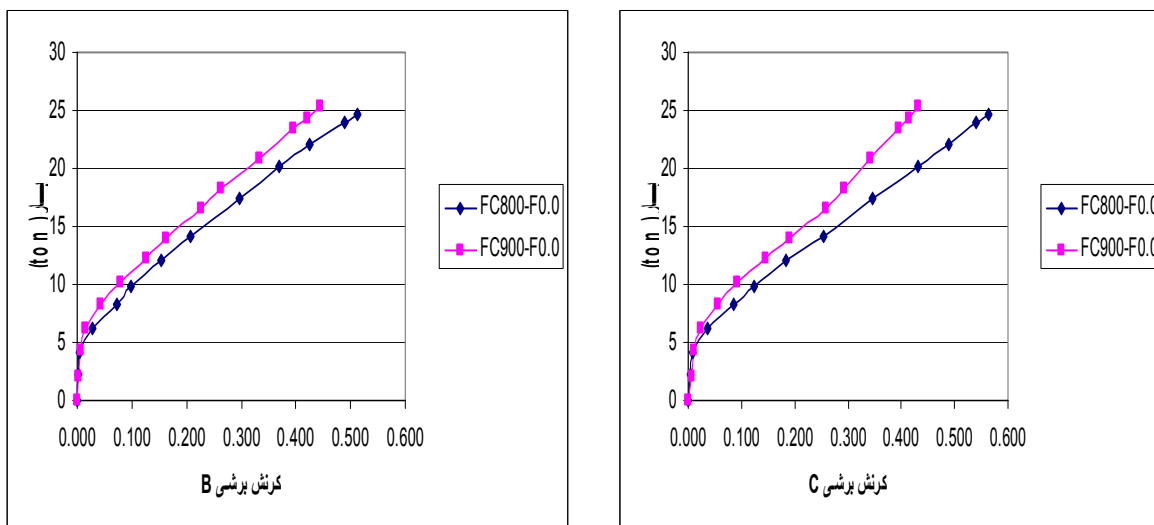


شکل ۴-۱۱ نمودار بار-کرنش برشی B و C مربوط به تیرهای گروه FC800

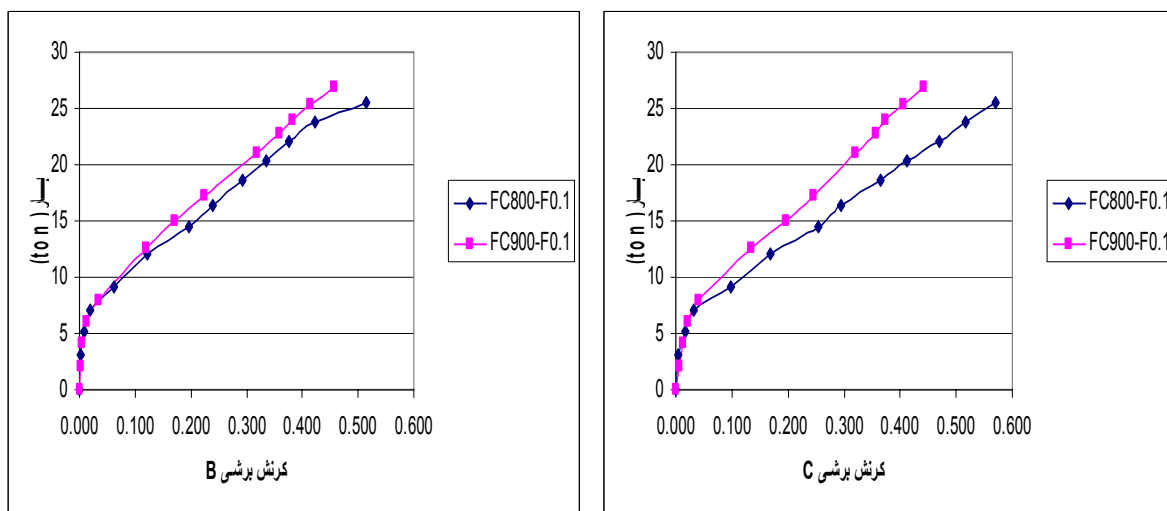


شکل ۴-۱۲ نمودار بار-کرنش برشی B و C مربوط به تیرهای گروه Fc900

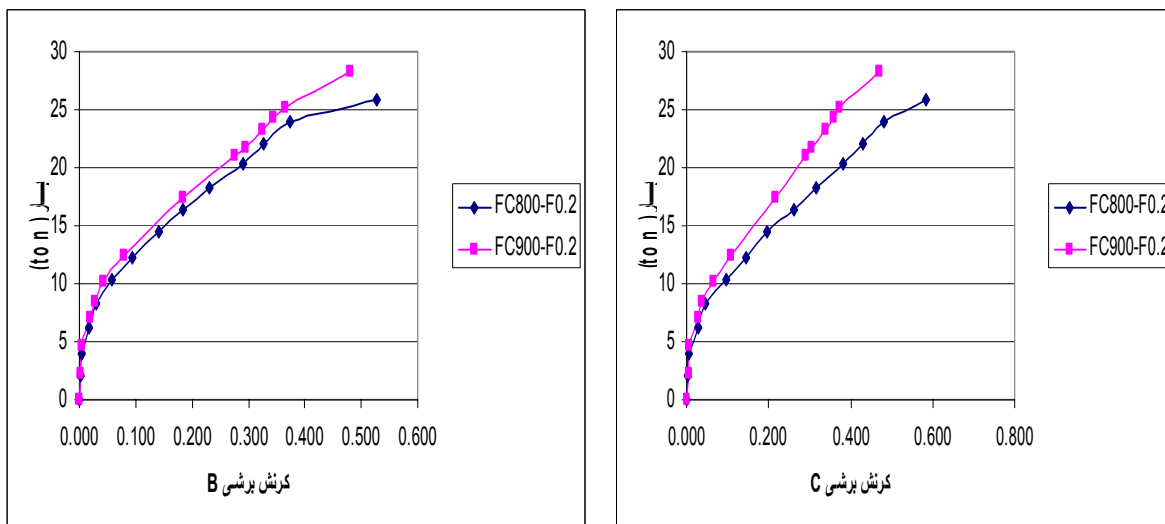
تأثیر افزودن الیاف بر منحنی بار - کرنش B , C برای تیرهای گروه Fc800 و Fc900 و با درصد الیاف برابر در شکلهای ۴-۱۳ و ۴-۱۴ و ۴-۱۵ مقایسه شده است .



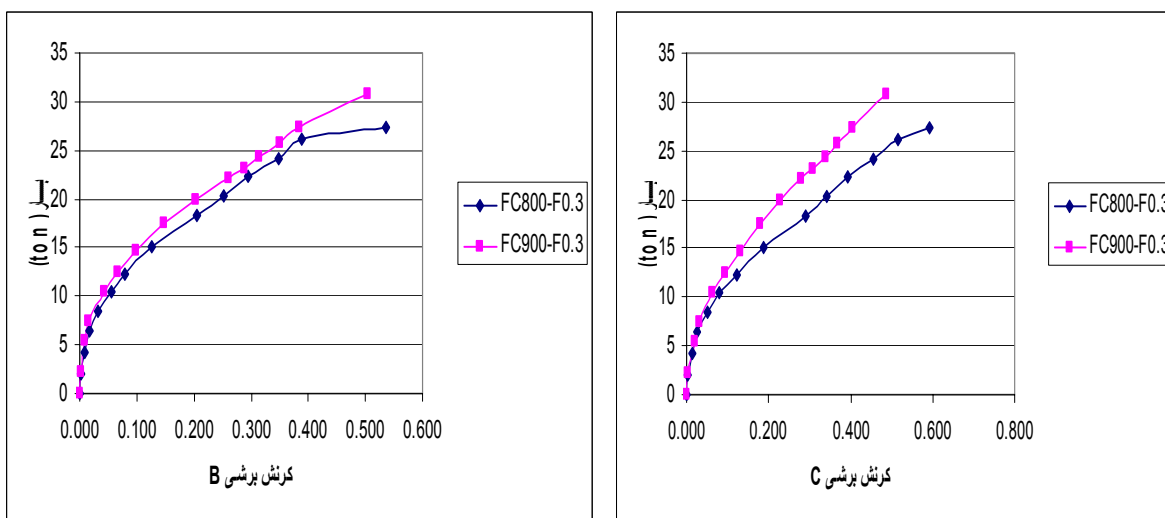
شکل ۴-۱۳ نمودار بار-کرنش برشی در راستای B و C مربوط به هر دو گروه FC800 و FC900 بدون الیاف



شکل ۴-۱۴ نمودار بار-کرنش برشی در راستای B و C مربوط به هر دو گروه FC800 و FC900 حاوی ۰٫۱٪ الیاف



شکل ۴-۱۵ نمودار بار-گرنش برشی در راستای B و C مربوط به هردو گروه FC800 و FC900 حاوی ۰,۲٪ الیاف

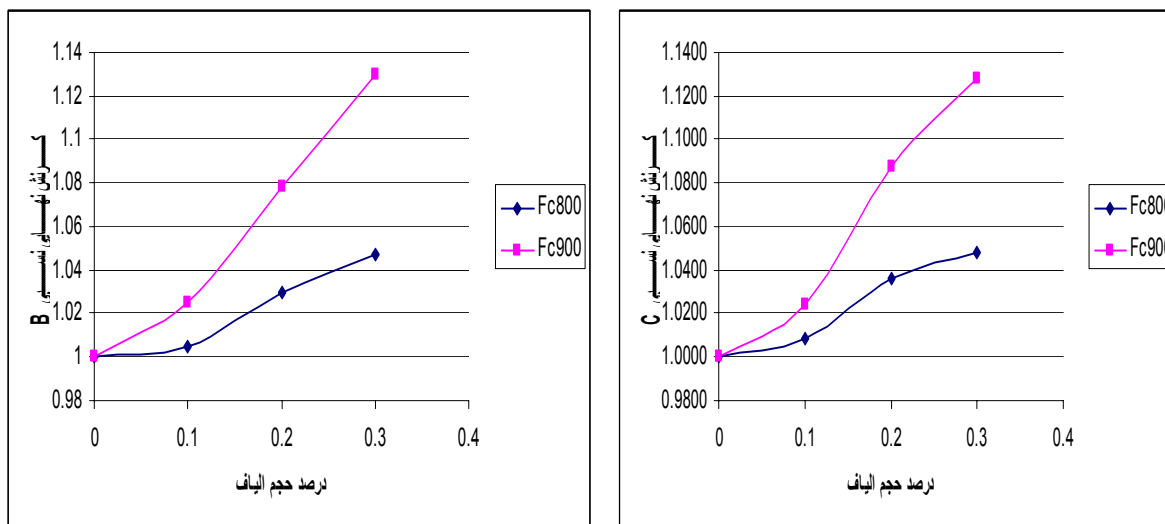


شکل ۴-۱۶ نمودار بار-گرنش برشی در راستای B و C مربوط به هردو گروه FC800 و FC900 حاوی ۰,۳٪ الیاف

در مقایسه کلی تیرهای بتنی سری Fc800 با Fc900 ملاحظه می‌شود که به دلیل سختی بیشتر تیرهای بتن مقاومت بالاتر، شیب بیشتری در منحنی بار - کرنش دارند.

در مقایسه کلی تر منحنی‌های بار - کرنش تیرهای فاقد الیاف و حاوی الیاف، مشاهده می‌گردد که منحنی تیرهای فاقد الیاف، بخصوص در تیرهای بتن مقاومت بالاتر، چندین انحناء قابل توجه دارند، اما در تیرهای حاوی الیاف پلی‌پروپیلن به دلیل ایجاد ترکهای تدریجی و باز توزیع مناسب انرژی (تغییر انحناء تدریجی می‌باشد).

*در شکل ۴-۱۷ تأثیر افزودن الیاف بر افزایش نسبی کرنش نهایی B، C برای تیرهای بتنی سری Fc800 با Fc900 ملاحظه می‌شود که این تأثیر برای بتن مقاومت بالاتر بیشتر ملاحظه شد.



شکل ۴-۱۷ تأثیر افزودن الیاف بر افزایش نسبی کرنش نهایی B و C

همانطور که ملاحظه می‌گردد با افزودن الیاف، افزایش کرنش نهایی در تیرهای Fc800 به حدود ۵ درصد و برای تیرهای Fc900 بتن معمولی خود تحکیم به ۱۲ درصد می‌رسد. این امر نشان می‌دهد که با وجود باز شدن ترکها، انتقال تنش در محل ترک خوردگی، از طریق الیاف صورت گرفته است به طوری که بتن، کرنش بزرگتری را نسبت به قبل تحمل کرده است. به عبارت دیگر با وجود استفاده از الیاف چفرمگی و قابلیت جذب انرژی بتن افزوده شده است.

۷,۴. بررسی رفتار مقاومت برشی نهایی

برش نهایی کلیه تیرها در جدول ۳-۴ خلاصه شده است.

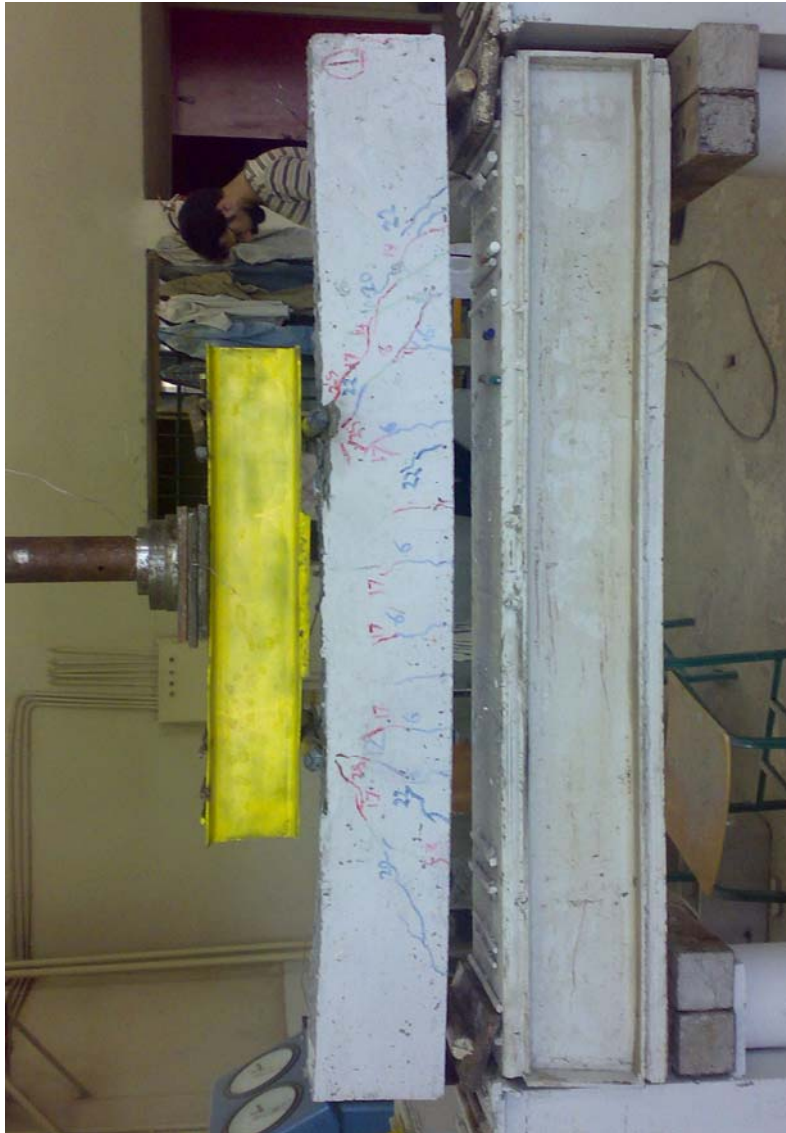
برش نهایی ton	علامت اختصاری
12.31	Fc800F0.0%
12.80	Fc800F0.1%
12.93	Fc800F0.2%
13.65	Fc800F0.3%
12.65	Fc900F0.0%
13.42	Fc900F0.1%
14.15	Fc900F0.2%
15.35	Fc900F0.3%

جدول ۳-۴ برش نهایی

همانگونه که از جدول فوق ملاحظه می‌شود افزودن الیاف باعث افزایش مقاومت نهایی برشی می‌شود و این مطلب با توجه به نقش الیاف در جلوگیری از گسترش ترک قابل توجیه می‌باشد

۸.۴. بررسی الگوهای ترک

در شکل ۱۸-۴ تا ۲۵-۴ نحوه آزمایش، همراه با الگوهای ترک تیرها (در حالت نهائی) نشان داده شده است.



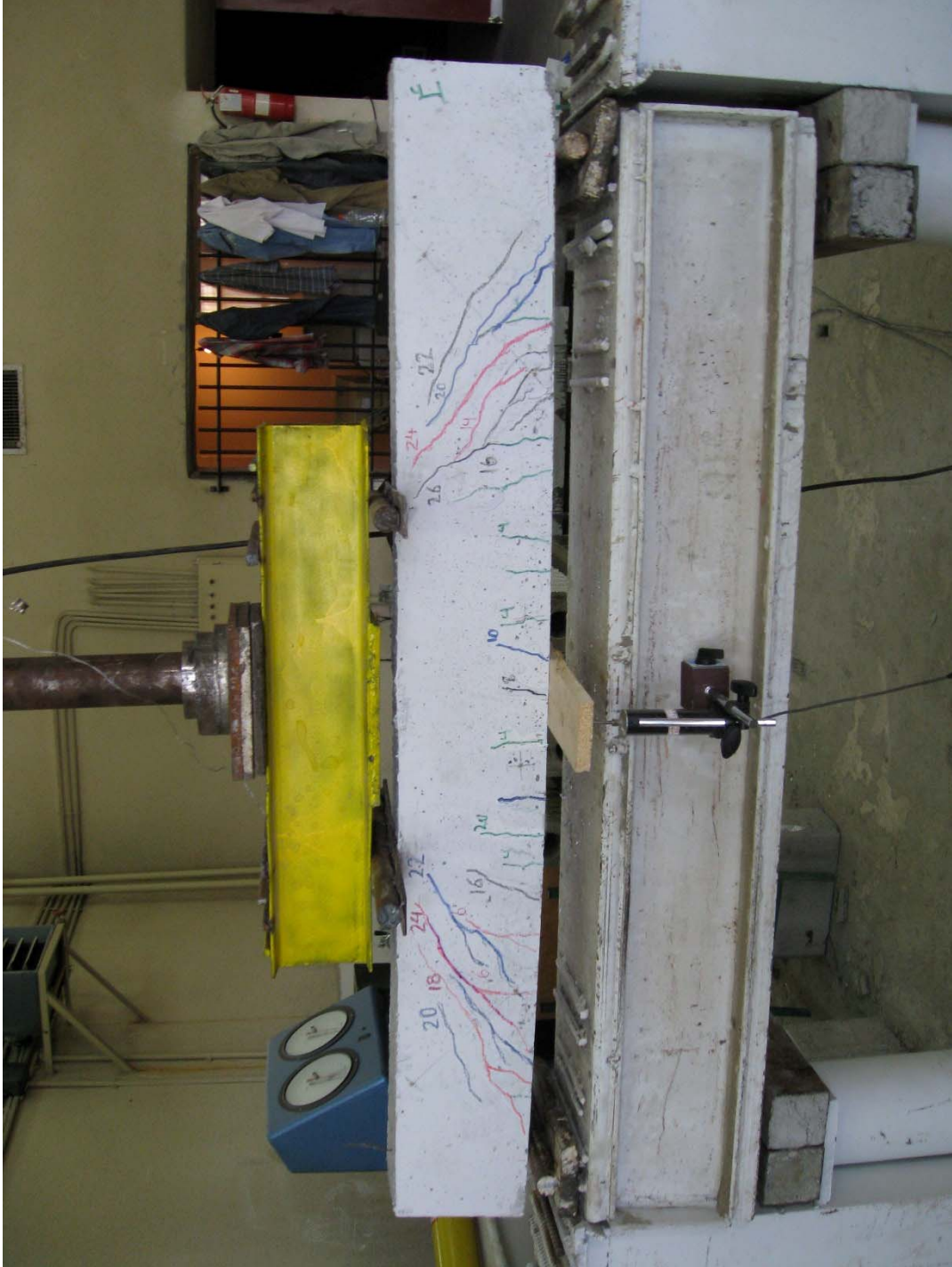
شکل ۱۸-۴ نحوه ترک خوردگی و آزمایش تیر $F_c 800 F_0 0.0\%$



شکل ۴-۱۹ نحوه ترک خوردگی و آزمایش تیر %0.1 Fc800



شکل ۴-۲۰ نحوه ترک خوردگی و آزمایش تیر $F_c 800 F_0.2\%$



شکل ۴-۲۱ نحوه ترک خوردگی و آزمایش تیر $F_c 800 F_0.3\%$



شکل ۴-۲۲ نحوه ترک خوردگی و آزمایش تیر %0.0Fc900



شکل ۴-۲۳ نحوه ترک خوردگی و آزمایش تیر $F_c 900 F_0.1\%$



شکل ۴-۲۴ نحوه ترک خوردگی و آزمایش تیر $F_c 900 F_0.2\%$



شکل ۴-۲۵ نحوه ترک خوردگی و آزمایش تیر $F_c 900 F_0.3\%$

کلیه تیرها با توجه به بالاتر بودن ظرفیت خمشی تحت برش و رفتار تقریباً متقارن گسیخته شدند. در تیرهای حاوی الیاف پلی پروپیلن گسیختگی با چندین ترک گسسته برشی به وجود می‌آید. این امر مبین عملکرد مناسب الیاف پلی پروپیلن در رفتار برشی می‌باشد.

با مشاهده ترکها می‌توان دریافت تیرهایی که دارای الیاف بیشتر هستند، دارای تعداد بیشتری ترکهای خمشی در حالت نهایی هستند. این پدیده به خاطر مقاومت برشی بیشتر و در نتیجه ایجاد کرنشهای بیشتر خمشی در حالت نهایی این تیرها می‌باشد.

با مشاهده ترکها می‌توان دریافت که با افزودن الیاف پلی پروپیلن به هر کدام از تیرها شیب ترکها را تا حدودی نسبت به افق کمتر می‌کند. این تغییر زاویه که با طولانی‌تر شدن مسیر ترک و شکست همراه است، موجب افزایش مقاومت نهایی تیر می‌شود

۹.۴. بررسی نمونه ترک خوردگی

در تیرهای فاقد الیاف، تعداد ترکها کمتر و سرعت رشد آنها بیشتر از تیرهای حاوی الیاف بود و گاهی ترکهایی ناگهانی اتفاق می‌افتاد و نفوذ بیشتری وجود داشت. این مطلب در تیرهای بتنی خودمتراکم با مقاومت بالاتر بیشتر مشهود بود.

ترک خوردگی ناگهانی تیرهای فاقد الیاف، در محدوده رفتار غیرخطی بعضاً با صداهای مهیب همراه بود، اما در تیرهای حاوی الیاف پلی پروپیلن حتی در بتن مقاومت 900 kg/cm^2 ، ترکهای تدریجی تر و با صدای ملایمتر بودند.

در تیرهایی که دارای الیاف پلی پروپیلن بودند، گستره ترک خوردگی تحت بارگذاری یکسان افزایش یافت و این افزایش با میزان الیاف مصرفی رابطه‌ای مستقیم داشت.

افزودن الیاف موجب باز توزیع بهتر تنشهای کششی شد (وبه تبع آن، در بار برابر، ترکهایی با عرض و فاصله کمتر ایجاد شد).

۹.۴. نتایج فصل

۱- با ثابت نگه داشتن مقاومت، افزودن الیاف پلی پروپیلن در دهانه‌های برشی، مقاومت ترک خوردگی و مقاومت نهایی برشی تیرها را افزایش می‌دهد. این امر مبین آن است که الیاف پلی پروپیلن

قبل و پس از ترک خوردگی، در مقاومت جان تیر، نقش مهمی ایفا می‌کنند.

۲- با افزودن الیاف پلی‌پروپیلن در دهانه‌های برشی، کرنشها و خیزهای تیر (تحت بارگذاری یکسان) کاهش می‌یابد. در حوزه بارهای خدمت چنین تاثیراتی موثرتر و مفیدتر است. زیرا علاوه بر کاهش ترکها، تغییر شکلها کمتر می‌شود و سختی برشی افزایش می‌یابد. تیرهای مسلح حاوی الیاف پلی‌پروپیلن (در دهانه برشی)، در مقایسه با تیرهای مسلح مرسوم، رفتار سخت‌تری دارند.

۳- تاثیر الیاف پلی‌پروپیلن در افزایش مقاومت کششی بر خلاف مقاومت فشاری، قابل توجه بوده است. (توضیح اینکه الیاف، در رنج مقاومتی مورد بررسی این پایان‌نامه، منجر به افزایش مقاومت فشاری قابل‌ذکری نگردید.)

۴- افزودن الیاف پلی‌پروپیلن باعث افزایش نسبتا خوبی در شکل‌پذیری، چقرمگی یا جذب انرژی شده و از ایجاد ترکهای ناگهانی در تیرها جلوگیری می‌کند. این پدیده عامل مهم و سودمندی در رفتار سازه‌ها در مقابل زلزله می‌باشد.

۵- همانطور که مشاهده شد در تیرهای فاقد الیاف، ترکها دارای سرعت رشد بیشتری از تیرهای حاوی الیاف پلی‌پروپیلن می‌باشند و نفوذ بیشتری می‌یابند. هنگامیکه تیرها دارای الیاف بودند، گستره ترک خوردگی، تحت بارگذاری یکسان تا حدودی کاهش یافت. در این تیرها ترکهایی با عرض و فاصله کمتر در بارگذاری یکسان ایجاد شد الیاف پلی‌پروپیلن موجب باز توزیع بهتر تنشهای کششی (و تا حدودی کاهش ترکهای کششی) شدند.

۶- تاثیر الیاف پلی‌پروپیلن در افزایش شکل‌پذیری در هر دو گروه قابل توجه می‌باشد، و با توجه به رفتار بسیار ترد بتن خود متراکم مقاومت بالا، استفاده از الیاف برای این نوع بتن ضروری تر به نظر می‌رسد.

فصل پنجم

نتایج و پیشنهادات

فصل پنجم

۱.۵. مقدمه

یکی از موضوعات اصلی در رابطه با بتن اجرای آن می‌باشد که یکی از دستاوردهای صنعت بتن در ارتباط با این مسئله ابداع بتن‌های خودمترکم و بدون ویبره می‌باشد.

همانگونه که در بخش‌های گذشته اشاره شد، تا کنون تحقیقات نسبتاً خوبی در خصوص خواص مکانیکی نمونه‌های تهیه شده از بتن SCC از جمله مقاومت فشاری، کشش غیر مستقیم، جمع شدگی، مقاومت پیوستگی با آرماتور، مدول الاستیسیته و... انجام گرفته است، لیکن در مورد عملکرد سازه‌ای این نوع بتن تحقیقات خاصی انجام نشده است. لذا آزمایشات انجام شده در تحقیق حاضر در این خصوص می‌باشد که یک حالت خاص بارگاری و تکیه‌گاهی، با نمونه‌های و متغیرهای محدود است و این موضوع (در برخی موارد) نتیجه‌گیری کلی از آزمایش را دشوار می‌سازد.

به منظور تهیه شرایط و ضوابط لازم و کافی آیین‌نامه‌ای نیاز به کار آزمایشگاهی و تئوریک فراوانی است. با توجه به اینکه در مورد عملکرد سازه‌ای بتن مقاومت بالای خودمترکم تحقیقات خاصی انجام نشده است، از این رو تنوع و گستره وسیعی برای تحقیق وجود دارد.

۲.۵. پیشنهاد برای تمقیقات آینده

- ۱- تاثیر مقاومت بتن و مقدار میلگردهای مسلح کننده بر مقاومت و شکل پذیری FSCC.
- ۲- تاثیر مقاومت و سایر الیاف بر مقاومت و شکل پذیری FSCC.
- ۳- تاثیر نسبت طول دهانه برشی به ارتفاع موثر مقطع در بارگذاری متقارن بر رفتار برشی و خمشی FSCC.
- ۴- تاثیر مقاومت بتن، مقاومت و مقدار میلگردهای مسلح کننده بر خزش و جمع شدگی FSCC.

۵- بررسی رفتار برشی و خمشی تیرهای FSCC تحت اعمال بار گسترده.

۶- بررسی تاثیر الیاف بر رفتار خمشی و برشی تیرهای بتنی خود تحکیم با استفاده از نرم افزارهای و مدل‌های کامپیوتری و بکارگیری روش تحلیل اجزای محدود برای تحلیل و بررسی تنش‌های بوجود آمده.

۷- بررسی موارد (۱) و (۲) در رفتار پیچشی انواع تیرهای بتنی خود متراکم.

۸- بررسی موارد (۱) و (۲) در رفتار خمشی و برشی تیرهای عمیق، T شکل و جعبه‌ای.

۹- بررسی موارد فوق برای سایر اعضای سازه‌ای از قبیل دالها، دیافراگمها، ستون‌ها و ...

۱۰- بررسی موارد فوق تحت اثر بارهای ارتعاشی و رفت و برگشتی.

۱۳- بررسی تاثیر الیاف بر رفتار برشی و خمشی تیرهای بتنی با در نظر گرفتن توام مسائل

تئوریک و آزمایشگاهی و ارائه فرمولهای جدید و کاربردی تر

منابع

- [۱] حسینعلی بیگی، مرتضی و سهراب، محمدزاده. بررسی تجربی میزان الیاف فولادی، مقاومت بتن و نسبت آرماتور طولی بر رفتار برشی تیرهای بتن آرمه ساخته شده از بتن مقاومت بالا: دانشگاه مازندران، ۱۳۸۲
- [۲] حسینیان، سیدباقر، حسینعلی بیگی، مرتضی، اسکندری، مرتضی و ابراهیمی، حمیدرضا. ارزیابی تجربی رفتار بتن مسلح ساخته شده با SCC مقاومت بالا و مقایسه آن با بتن معمولی. بابل: دانشگاه مازندران، ۱۳۸۴.
- [۳] طاحونی، شاپور. طراحی ساختمانهای بتن مسلح. تهران: دانشگاه تهران، ۱۳۷۹.
- [4] *Self-compacting concrete (SCC) time development of the material properties and bond behaviour.* Frank Dehn .2000
- [5] *A simple mix design method for self-compacting concrete.* Nan Su, K.C Hsu, H.W Chai. 2001, CEMENT AND CONCRETE RESEARCH, Vol. 31, pp. 1799-1807.
- [6] *GUIDLINES FOR TESTING FRESH SELF-COMPACTING CONCRETE.* SCHUTTER, G. DE. 2005.
- [7] State-of-the-ART report on fiber reinforced concrete . reported by ACI committee 544, ACI journal/November 1973-copyright by concrete international/May 1982.
- [8] ACI committee 544 (1988) "design consideration for steel fiber reinforced concrete". ACI struct. J. Oct pp.563-588.
- [9] HAREX-stahlfasertechnik information GmbH & Co.KG 1986
- [10] Fracture model for fiber reinforced concrete , Visalvanich, Kitisak and Naaman, Antoine E. ACI journal/March-April 1983 pp 128-139.
- [11] *A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete.* Domone, P.L. London : s.n., 2006, Cement & Concrete Composites.
- [12] *Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete.* Burak Felekoglu, Selcuk Turkel, Bulent Baradan. Izmir : s.n., 2006, BUILDING AND ENVIROMENT.

[13] *PROPERTIES OF CONCRETE REINFORCED WITH FIBRILLATED POLYPROPYLENE FIBERS UNDER IMPACT LOADING.* **Sidney mindess, Gary Vondran.** Vancouver : s.n., 1988, CEMENT and CONCRETE RESEARCH, Vol. 18, pp. 109-115.

[14] *EFFECT OF POLYPROPYLENE FIBER REINFORCEMENT ON THE PROPERTIES OF FRESH AND HARDENED CONCRETE IN THE ARABIAN GULF ENVIROMENT.* **A.J. Al-tayyib, M.M. Al-Zaharani, Rasheeduzzafar and G.J Al-Sulaimani.** Dhahran : s.n., 1988, CEMENT and CONCRETE RESEARCH, Vol. 18, pp. 561-570.

[15] *Mechanical Properties of Polypropylene Finer Reinforced Concrete and Effects of Pozzolanic Materials.* **A.M. Alhozaimy, P.Soroushian and F.Mirza.** Riyadh : s.n., 1995, Cement & Concrete Composites, Vol. 18, pp. 85-92.

[16] *Strength properties of nylon- and polypropylene-fiber-reinforced concretes.* **P.S. Song, S. Hwang, B.C. Sheu.** Taiwan : s.n., 2005, Cement and Concrete Research, Vol. 35, pp. 1546-1550.

[17] Uniformity of in situ properties of self-compacting concrete in full-scale structural elements . **wenzhong zhu,peter J.M.Bartos .** 2000 .