

بررسی مشخصات مکانیکی و سازه‌ای بتن فوق‌توانمند با مقادیر مختلف الیاف فولادی

امیر حاجی اسمعیلی^۱، محمد جواد محمدی^۲، محمد شکرچی زاده^۳

۱- دکتری مهندسی عمران گرایش سازه، دانشگاه EPFL سوئیس

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران

۳- استاد دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران، سرپرست انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران

mohammadi.mj@ut.ac.ir

چکیده

لزوم توجه ویژه به توسعه پایدار در رشته مهندسی عمران به منظور پیشرفت جوامع امروزی، بتن را به عنوان پرمصرف‌ترین ماده در این زمینه، مورد توجه محققین قرار داده است. در این راستا بتن فوق‌توانمند الیافی در جایگاه یکی از جدیدترین نوآوری‌ها در زمینه تکنولوژی بتن مورد توجه ویژه قرار گرفته است، از این رو باید اطلاعات مناسب و کافی از خواص مکانیکی و اطلاعات مورد نیاز طراحی سازه‌ای در دسترس باشد. در این پژوهش دستیابی به طرح اختلاط بتن فوق‌توانمند و ارزیابی خواص مکانیکی و اطلاعات مورد نیاز طراحی سازه‌ای این ماده مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور ابتدا ۱۴ طرح اختلاط با نسبت‌های مختلف پارامترهای تاثیرگذار از جمله نوع سنگدانه، نسبت آب به سیمان، مقدار سیمان، نسبت میکروسیلیس به سیمان و مقدار فوق روان کننده ساخته شده است و از بین آن‌ها طرح اختلاط بهینه با توجه به مقاومت فشاری میانگین حدود ۱۷۵ مگاپاسکال و روانی ۱۹/۷۵ میلی‌متر انتخاب گردید. سپس مشخصات مکانیکی بتن فوق‌توانمند با یک و دو درصد حجمی الیاف فولادی بوسیله آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت کششی برزیلی و مدول الاستیسیته مشخص شده است. بوسیله آزمایش تک محوری، سه محوری و کشش مستقیم، اطلاعات مورد نیاز طراحی سازه‌ای بتن فوق‌توانمند از جمله مدول برشی، ضریب پواسون و منحنی کامل تنش-کرنش فشاری و کششی بدست آمد.

نتایج نشان می‌دهد که افزودن الیاف به بهبود مقاومت فشاری، مقاومت خمشی کمک کرده است ولی تاثیری در افزایش مقاومت کششی ندارد، زیرا بتن فوق‌توانمند مقاومت کششی بالایی نسبت به بتن معمولی دارد و افزایش یک درصدی الیاف، اختلاف قابل توجهی ایجاد نمی‌کند. با افزایش میزان الیاف از یک به دو درصد حجمی، مدول الاستیسیته بتن فوق‌توانمند افزایش پیدا کرده و منحنی تنش-کرنش نشان می‌دهد که جذب انرژی بیشتری دارد. مقادیر ضریب پواسون و مدول برشی در آزمایش با فشار تک محوری (فشار جانبی صفر) به دست آمده‌اند و برای طراحی‌های سازه‌ای مفید می‌باشد. مطابق با آزمایش سه محوری، به جز در فشار جانبی ۵ مگاپاسکال، باعث افزایش در ظرفیت تنش نهایی بتن می‌شود و همچنین مدول الاستیسیته بتن در افزایش پیدا کرده و در فشارهای جانبی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ مگاپاسکال مشخص گردیده است. با استفاده از آزمایش کشش مستقیم بر نمونه‌های استخوانی شکل، منحنی کامل تنش-کرنش کششی در مقادیر مختلف الیاف بدست آمد. مساحت زیاد زیر منحنی نشان دهنده طاقت و جذب انرژی زیاد بتن الیافی فوق‌توانمند در بارگذاری کشش مستقیم می‌باشد. منحنی‌های کامل تنش-کرنش بتن فوق‌توانمند حاوی یک و دو درصد الیاف فولادی تحت آزمایش تک محوری و سه محوری بدست آمد.

کلمات کلیدی: بتن فوق‌توانمند، خواص مکانیکی، منحنی تنش-کرنش، آزمایش‌های تک محوری و سه محوری، کشش مستقیم

۱. مقدمه

امروزه با رشد فزاینده بشر و ایجاد تحول‌های ساختاری در نوع زندگی، پیشرفت یک جامعه بدون توجه به «توسعه پایدار» ناممکن خواهد بود. از طرفی دستیابی به چنین توسعه‌ای مستلزم گسترش مطلوب تکنولوژی و زیرساخت‌ها و همچنین شناخت مفهومی مولفه‌های آن‌ها می‌باشد. در این راستا مهندسی عمران نقش ویژه‌ای را ایفا کرده و از جایگاه و اهمیت خاصی برخوردار است.

با توجه به این مفهوم، یکی از گام‌های اولیه استفاده بهینه از مواد و مصالح محدود موجود در طبیعت است به نحوی که بتوان با مصرف حداقل مواد اولیه، حداکثر مقاومت و دوام را بدست آورد. با توجه به این امر که بتن پرمصرف‌ترین ماده در طرح‌های توسعه زیر ساخت‌های عمرانی می‌باشد، می‌توان بتن‌های فوق توانمند (UHPC) را بعنوان یکی از جدیدترین تکنولوژی‌های روز دنیا در زمینه بتن و ماده‌ای با مقاومت و دوام فوق‌العاده نسبت به بتن معمولی، در نظر گرفت.

بتن فوق توانمند یا به اختصار (UHPC)^۱ بر اساس توصیه انجمن مهندسين عمران فرانسه^۲ [۱] عمدتاً به ماده‌ای با بدنه سیمانی گفته می‌شود که بیش از ۱۵۰ مگاپاسکال مقاومت فشاری دارد، دارای کارپذیری بالایی است و همچنین برای دارا بودن رفتار شکل‌پذیر، حاوی مقدار کافی الیاف می‌باشد. این مقاومت فشاری بالا عمدتاً از یک دانه‌بندی بسیار ریز، به همراه یک ماتریس همگن و توپر از مواد سیمانی، استفاده از پوزولان‌های مناسب خصوصاً میکروسیلیس، کاهش نسبت آب به مواد سیمانی تا دامنه‌ی حدود ۰/۲۵-۰/۱۳ و استفاده از فوق‌روان‌کننده‌ها به منظور ایجاد کارایی مناسب و سایر افزودنی‌ها حاصل شده است. علاوه بر موارد فوق در کاربردهای عملی، عمدتاً الیاف به این مخلوط اضافه شده تا جذب انرژی بتن فوق توانمند را افزایش داده و همزمان خواص مکانیکی و مقاومت کششی قابل توجهی را در آن ایجاد نماید. [۵-۲]

بتن فوق توانمند کاربرد زیادی در پل‌ها از مزایای اقتصادی کاربرد بتن فوق توانمند نسبت به بتن معمولی شامل کاهش زمان ساخت و افزایش فضای قابل استفاده طبقات ساختمان می‌باشد. استفاده از دهانه‌های بلندتر با استفاده از بتن فوق توانمند می‌تواند تعداد ستون‌ها و حجم فونداسیون ستون‌ها را کاهش دهد. افزایش قابل انتظار عمر سرویس دهی و هزینه‌های کمتر نگهداری بتن فوق توانمند منجر به افزایش منافع اقتصادی می‌شود. [۶ و ۷]

رفتار بتن فوق توانمند مسلح شده با الیاف مشابه بتن مسلح شده با آرما تورهایی با قطر زیاد است. استفاده از الیاف با طول ۱۳ میلی‌متر و قطر ۰/۱۵ میلی‌متر و سنگدانه با میانگین اندازه ۰/۲۵ میلی‌متر مترادف با استفاده از آرما تور با طول ۰/۹۷ متر و قطر ۱۲ میلی‌متر در بتن با اندازه حداکثر دانه ۱۹ میلی‌متر می‌باشد. عملکرد مناسب این الیاف در بتن مستلزم آن است که الیاف دارای مقاومت کششی بالایی باشند.

در توصیه‌های کنونی، هیچ حد بالایی برای میزان الیاف تعریف نشده است. هرچند، مقدار الیاف باید در حد پایین بماند تا خمیر در حالت تازه کارپذیر بوده و از پخش ناهمسان الیاف جلوگیری شود. استفاده از ۲ درصد حجمی الیاف، معمول‌ترین میزان استفاده از الیاف در بتن فوق توانمند بوده که مطابق با میزان بهینه اقتصادی مشخص شده توسط ریچارد^۴ و شقری^۵ (۱۹۹۵) می‌باشد. [۸]

در ادامه محققان به بررسی برخی از مهم‌ترین ویژگی‌های سازه‌ای این مصالح نوین که موجبات اصلی شاخص شدن آن را ایجاد نموده است و در طراحی سازه‌ها با استفاده از آن، بایستی مورد توجه قرار گیرند، پرداخته شده است.

بتن فوق توانمند تا ۷۰ یا ۸۰ درصد از مقاومت نهایی خود دارای رفتار خطی است. پس از آن اگر بتن فوق توانمند بدون استفاده از الیاف فولادی ساخته شده باشد، به صورت ناگهانی و معمولاً با تولید صدا منهدم می‌شود درحالی که اگر الیاف در تولید آن به کار رفته باشد، منحنی تنش-کرنش حالت نزولی پیدا کرده و با افزایش کرنش، انرژی قابل ملاحظه‌ای جذب می‌کند. [۹] به دلیل این مقاومت کششی نسبتاً زیاد، برخلاف بتن معمولی، صرف نظر نمودن از باربری کششی در محاسبات سازه‌ای منطقی به نظر نمی‌رسد. با انجام تعدادی آزمایش کشش مستقیم، در نمونه‌های بتن فوق توانمند، نمودار تنش-کرنش آن در چهار حالت رفتاری الاستیک، پدیده پل زدن، کرنش سخت شدگی و نرم شدگی کرنشی ارائه شد. [۱۰]

به دلیل تراکم بالا در ریزساختار، مدول الاستیسته بتن فوق توانمند از بتن‌های معمولی بالاتر بوده و بسته به طرح اختلاط و نحوه‌ی عمل‌آوری، در حالت استاتیکی در بازه‌ی حدود ۴۰ تا ۷۰ گیگاپاسکال قرار می‌گیرد. [۱۱] در برخی مطالعات انجام شده بر روی انواع بتن فوق توانمند، به عنوان یکی از

^۱ Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete

^۲ Ultra High Performance Concrete

^۳ Association française de génie civil (AFGC)

^۴ Richard

^۵ M. Cheyrez

نتایج ثانویه، حدود ۰/۲ برای نسبت پواسون گزارش شده است. بر همین اساس انجمن مهندسين عمران فرانسه نیز همین عدد را برای محاسبات سازه‌ای، در صورتی که اطلاعات دقیقی در دست نباشد، پیشنهاد می‌دهد. [۱]

در این تحقیق در ابتدا سعی شد با استفاده از تجربیات پیشین موجود در آزمایشگاه مصالح ساختمانی دانشکده فنی دانشگاه تهران در خصوص بتن‌های با مقاومت بالا، طرح اختلاطی بهینه و صنعتی با مصالح موجود در کشور برای بتن فوق‌توانمند تهیه شود. در این راستا ابتدا پارامترهای تاثیرگذار از جمله نوع سنگدانه، نسبت آب به سیمان، مقدار سیمان، نسبت میکروسلیس به سیمان و مقدار فوق‌روان‌کننده مشخص گردید و ترکیب این متغیرها در ۱۴ طرح اختلاط با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت. در نهایت طرح اختلاط بهینه با توجه به کارپذیری و مقاومت مخلوط انتخاب گردید. پس از آن به منظور ارزیابی مشخصات مکانیکی بتن فوق‌توانمند نمونه‌های مختلفی از جمله مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، کشش برزیلی، کشش مستقیم، مدول الاستیسته، مدول برشی، ضریب پواسون و آزمایش‌های تک محوری و سه محوری با طرح اختلاط بهینه تهیه شده و مورد آزمایش قرار گرفتند. از آنجایی که هزینه ساخت بتن فوق‌توانمند با توجه به اجزای تشکیل دهنده آن بویژه الیاف فولادی بسیار بالا می‌باشد، به منظور بهره‌وری از خصوصیات فوق‌العاده این ماده بطور اقتصادی، لازم است این مقدار بهینه شده و به بررسی مهم‌ترین ویژگی‌های سازه‌ای آن توسط آزمایش‌های مربوطه، پرداخته شود.

۲. مصالح مصرفی

- **سیمان:** سیمان استفاده شده در این مقاله، نوع ۵۲۵-۱ یعنی سیمان با مقاومت ۲۸ روزه معادل ۵۲٫۵ مگاپاسکال می‌باشد که از کارخانه شهرکرد تهیه شد. در جدول ۱ و ۲ مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان بررسی شده است.

جدول ۲- مشخصات فیزیکی سیمان		جدول ۱- آنالیز شیمیایی سیمان تیپ ۵۲۵-۱ شهرکرد	
مقدار	مشخصه فیزیکی	درصد وزنی	نام ترکیب
		۲۰٫۳	SiO _۲
		۵٫۶۵	Al _۲ O _۳
۳۲۰۰	نرمی (cm ^۲ /gr)	۳٫۳۰	Fe _۲ O _۳
۹۰	گیرش اولیه (دقیقه)	۶۵٫۷۰	CaO
		۱٫۶۰	MgO
۱۷۰	گیرش نهایی (دقیقه)	۱٫۸۰	SO _۳
		۱٫۱۰	L.O.I
۳۲	مقاومت فشاری ۳ روزه (مگاپاسکال)	۶۵٫۴	C+S
۴۶	مقاومت فشاری ۷ روزه (مگاپاسکال)	۸٫۹	C+S
		۹٫۴	C+A
۶۰	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (مگاپاسکال)	۵٫۴	C+AF

- **سنگدانه:** پس از انجام آزمایش‌های مختلف، سنگدانه بازالتی دلجان بهترین عملکرد را از خود نشان داده است. میزان چگالی این نوع سنگدانه ۲٫۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب و جذب آب آن ۱٫۸ درصد وزنی می‌باشد. دانه‌بندی سنگدانه مذکور در محدوده مشخص شده در نمودار دانه‌بندی توسط ASTM C۳۳ قرار می‌گیرد. [۱۲]

- **دوده سیلیس:** میزان مصرف دوده سیلیس در یک ترکیب معمول بتن فوق‌توانمند، حدود ۲۵ درصد کل مواد سیمانی است که در آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه مصالح ساختمانی دانشگاه تهران نیز این مقدار به عنوان درصد بهینه به دست آمد. دوده سیلیس تهیه شده از شرکت صنایع فروآلیاژ ایران دارای کیفیت مناسب‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها بود. رنگ این محصول نسبتاً روشن است که نشان‌دهنده کم بودن کربن در این محصول است. در جدول ۳ آنالیز شیمیایی دوده سیلیس مصرفی از این شرکت ارائه شده است.

جدول ۳- آنالیز شیمیایی دوده سیلیس تهیه شده

درصد وزنی	نام ترکیب	درصد وزنی	نام ترکیب
۰/۵۲	MgO	۰/۰۴-۰/۰۵	Fe ₂ O ₃
۰/۰۶-۰/۰۸	S	۰/۰۳-۰/۰۴	Al ₂ O ₃
۰/۵۱-۰/۵۵	CuO	۰/۰۲-۰/۰۳	SiO ₂
۰/۰۲-۰/۰۳	MnO	۰/۰۱-۰/۰۲	CaO
۰/۰۳	P ₂ O ₅	۰/۰۱-۰/۰۲	Na ₂ O
۰/۰۴-۰/۰۵	Li ₂ O	۰/۰۱-۰/۰۲	K ₂ O
۰/۰۱-۰/۰۲	رطوبت	۰/۰۱-۰/۰۲	پهلو
۰/۰۲-۰/۰۳	PH		

- **مواد شیمیایی فوق روان ساز:** پس از انجام آزمایش، فوق روان ساز با پایه پلی کربوکسیلات محصول شرکت B.A.S.F که دارای اثر مطلوب بر روی بتن فوق توانمند بود برای ساخت نمونه‌ها تهیه شد.
- **الیاف:** از نظر ابعادی بزرگ‌ترین جزء مخلوط بتن فوق توانمند الیاف فولادی می‌باشند. مدول الاستیسیته الیاف فولادی در حدود ۲۰۰ گیگاپاسکال و تغییر شکل آن‌ها در هنگام گسیختگی ۳ تا ۴ درصد است. الیاف مورد استفاده از کشور آلمان و شرکت STRATEC می‌باشد (شکل ۱) که دارای طول ۱۳ میلی‌متر و قطر ۰/۱۷۵ میلی‌متر است (نسبت طول به قطر ۷۴) و همچنین مقاومت کششی آن بیش از ۲۰۰۰ مگاپاسکال است. در کشور ما نیز شرکت صنایع مفتولی زنجان الیاف فولادی با طول ۵۰ میلی‌متر و قطر ۰/۸ میلی‌متر تولید می‌کند و مقاومت کششی آن کمتر از ۱۰۰۰ مگاپاسکال است. در جدول ۴ میزان ترکیبات شیمیایی الیاف فولادی (غیر از فلز آهن) ارائه شده است.

جدول ۴- ترکیبات شیمیایی الیاف فلزی

درصد وزنی	نام ترکیب
۰/۷۳	C
۰/۷۰	Mn
۰/۳۰	Si
۰/۰۴	P
۰/۰۴	S
۰/۰۷	Cr
۰/۰۶	Ni
۰/۱۰	Cu



شکل ۱- الیاف طلایی رنگ تهیه شده برای ساخت بتن فوق توانمند

۳. ساخت نمونه‌ها

با ترکیب مواد تشکیل دهنده بتن فوق توانمند در میکسر ۱۰ لیتری و قالب گیری سه نمونه مکعبی ۱۰*۱۰*۱۰ سانتی‌متر، به مدت ۲۴ ساعت در شرایط آزمایشگاه نگهداری شدند. پس از باز شدن از قالب به داخل حوضچه آب گرم با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ روز قرار گرفتند. لازم به ذکر است فرآیند افزایش و کاهش دما به تدریج صورت گرفته است.

مجموعاً ۱۴ طرح اختلاط آزمایشی برای دستیابی به طرح بهینه بتن فوق توانمند مورد توجه قرار گرفت. در جدول ۵ نتایج آزمایش و خصوصیات هر طرح اختلاط ارائه شده است. پارامترهای متغیر شامل مقدار مواد سیمانی (سیمان و دوده سیلیس)، نسبت آب به مواد سیمانی و نسبت دوده سیلیس به کل مواد سیمانی بوده است. با بررسی کلیه نمونه‌ها، طرح Q۱۲ دارای بالاترین مقاومت و همچنین روانی مناسب می‌باشد که به عنوان طرح نهایی انتخاب گردید.

جدول ۵- خصوصیات طرح‌های اختلاط آزمایشی

کد نمونه	سیمان (kg/m ^۳)	دوده سیلیس (kg/m ^۳)	نسبت آب به مواد سیمانی	نسبت دوده سیلیس به مواد سیمانی (%)	روان‌ساز به مواد سیمانی (%)	نسبت فوق روان‌ساز به مواد سیمانی (%)	روانی (mm)	میانگین فشاری (MPa)	میانگین وزن مخصوص (kg/m ^۳)
Q۱	۷۷۰	۳۳۰	۰٫۲	۳۰	۱٫۵	۱۷/۳	۱۳۴/۸۷	۲۳۹۰	
Q۲	۷۷۰	۳۳۰	۰٫۲۲	۳۰	۱٫۵	۲۰	۱۳۸/۵۳	۲۳۷۰	
Q۳	۶۰۰	۳۰۰	۰٫۲	۳۳	۲	۱۸٫۵	۱۳۵/۵۰	۲۳۸۳/۳۳	
Q۴	۶۷۵	۲۲۵	۰٫۲	۲۵	۱٫۸	۱۱٫۸	۱۴۱/۳	۲۴۶۰	
Q۵	۷۷۰	۳۳۰	۰٫۱۸	۳۰	۱٫۵	۱۳٫۵	۱۵۳/۰۷	۲۴۴۳/۳۳	
Q۶	۸۴۰	۳۶۰	۰٫۲۲	۳۰	۱٫۵	۲۱	۱۳۸/۳۳	۲۳۶۰	
Q۷	۸۲۵	۲۷۵	۰٫۱۸	۲۵	۳	۱۵	۱۴۰/۴	۲۴۵۰	
Q۸	۸۲۵	۲۷۵	۰٫۱۷	۲۵	۳	۱۳	۱۵۰/۳	۲۴۴۶/۶۷	
Q۹	۷۷۰	۳۳۰	۰٫۱۸	۳۰	۳	۱۶/۱	۱۳۱/۷۷	۲۴۴۶/۶۷	
Q۱۰	۹۰۰	۲۷۵	۰٫۱۷	۲۵	۳	۱۶/۵	۱۵۷/۵۳	۲۵۰۳/۳۳	
Q۱۱	۹۰۰	۳۰۰	۰٫۱۷	۲۵	۳	۱۸	۱۷۰/۱۰	۲۴۱۶/۶۷	
Q۱۲	۱۰۵۰	۳۵۰	۰٫۱۶	۲۵	۳	۱۹/۷۵	۱۷۵/۵۳	۲۴۱۳/۳۳	
Q۱۳	۷۷۰	۳۳۰	۰٫۱۸	۳۰	۲٫۵	۱۷/۷۵	۱۵۴/۱۰	۲۴۹۶/۶۷	
Q۱۴	۱۰۵۰	۳۵۰	۰٫۱۴	۲۵	۳	۱۴	۱۷۱/۷۰	۲۴۰۶/۶۷	

طرح اختلاط‌های نهایی شامل بتن فوق توانمند با یک درصد الیاف (U۱)، بتن فوق توانمند با دو درصد الیاف (U۲) انتخاب شده و نمونه‌های مورد نیاز برای انجام آزمایش‌ها تهیه شد. در جدول ۶ مشخصات طرح اختلاط بتن فوق توانمند (U۱ و U۲) ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود تفاوت U۱ و U۲ در میزان الیاف است و سایر خواص به منظور مقایسه ثابت در نظر گرفته شده‌اند. در شکل ۲ تصاویر بتن فوق توانمند ساخته شده، نمایش داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود این نوع بتن دارای روانی و لزجت مناسب می‌باشد.

جدول ۶- طرح اختلاط بتن فوق توانمند و خصوصیات بتن تازه

کد نمونه		
U ₂	U ₁	
۱۰۵۰	۱۰۵۰	سیمان (kg/m ^۳)
۳۵۰	۳۵۰	دوده سیلیس (kg/m ^۳)
۲۲۴	۲۲۴	آب (kg/m ^۳)
۴۲	۴۲	فوق روان ساز (kg/m ^۳)
۱۵۶	۷۸	الیاف (kg/m ^۳)
۶۷۸	۶۷۸	سنگدانه (kg/m ^۳)
۰/۱۶	۰/۱۶	نسبت آب به سیمان
۲۴۱۵	۲۴۲۴	چگالی (kg/m ^۳)
۱۸۹/۴	۱۹۴/۳	قطر بازشدگی (mm)



شکل ۲- مخلوط بتن فوق توانمند

۴. نتایج آزمایش‌ها

در این بخش نتایج آزمایش‌های انجام گرفته بر روی بتن فوق توانمند ارائه خواهد گردید. همانگونه که پیش‌تر ذکر شد، طرح‌های اختلاط شامل بتن فوق توانمند با یک (U₁) و دو درصد الیاف (U₂) بوده است. آزمایش‌های انجام شده به منظور دستیابی به رفتار مکانیکی این مصالح بوده که شامل آزمایش تعیین مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت خمشی، کشش برزیلی و مدول برشی می‌باشد.

۴.۱. آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش‌های مقاومت فشاری بتن مطابق استاندارد BS-1۸۸۱ و ASTM C۳۹ [۱۳] بر روی آزمون‌های مکعبی و استوانه‌ای صورت می‌گیرد. بر اساس تحقیقات کول مورگان^۶ (۲۰۰۴) و گریبیل^۷ (۲۰۰۵) تاثیر هندسه نمونه در مقاومت فشاری نمونه‌های بتن فوق توانمند بسیار ناچیز می‌باشد. بر همین اساس، برای آزمایش بتن فوق توانمند از مکعب‌هایی با ابعاد ۱۰ سانتی‌متر استفاده شده است. [۱۴ و ۱۵]

در جدول ۷ نتایج آزمایش تعیین مقاومت فشاری آزمون‌های بتنی ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود استفاده از میزان الیاف بیشتر در نمونه‌های U₂ (دو درصد حجمی) منجر به بهبود ۱۰ درصدی مقاومت فشاری بتن شده است.

^۶ Kollmorgen

^۷ Graybeal

جدول ۷- نتایج آزمایش تعیین مقاومت فشاری بتن

کد نمونه	میانگین مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	انحراف از معیار (مگاپاسکال)
U _۱	۱۴۹/۷	۱/۲
U _۲	۱۶۱/۳	۳/۲

لازم به ذکر است که افزودن الیاف به مخلوط‌های بتنی به منظور افزایش سایر خواص بتن از جمله شکل‌پذیری آن بوده است و افزایش مقاومت فشاری در درجه اول اهمیت ندارد.

۲.۴. آزمایش مقاومت خمشی

آزمایش تعیین مقاومت خمشی (اولین ترک) بتن مطابق استاندارد ASTM C۷۸ گرفته است. [۱۶] در جدول ۸ نتایج آزمایش مقاومت خمشی ارائه شده است. این نتایج تقریباً منطبق بر نتایج گریبیل (۲۰۰۵) می‌باشند. وی در رساله دکتری خود مقاومت خمشی نمونه‌های بتن فوق‌توانمند را بین ۱۴/۵ تا ۱۹/۵ مگاپاسکال گزارش کرده است. تفاوت مقاومت خمشی بتن فوق‌توانمند حاوی ۱ و ۲ درصد الیاف در حدود ۱۵ درصد می‌باشد. [۱۵]

جدول ۸- نتایج آزمایش تعیین مقاومت خمشی بتن

کد نمونه	میانگین مقاومت خمشی (مگاپاسکال)	انحراف از معیار (مگاپاسکال)
U _۱	۱۶/۴	۱/۱
U _۲	۱۹/۲	۳/۷

به نظر می‌رسد نمونه‌های بتنی فوق‌توانمند پس از گسیختگی اولیه (اولین ترک) نیز توانایی تحمل بار تا گسیختگی نهایی را دارا می‌باشد و این به معنی شکل‌پذیری زیاد این بتن نوع می‌باشد. بر اساس گزارش‌های گریبیل (۲۰۰۵)، بتن فوق‌توانمند دارای مقاومت نهایی خمشی (گسیختگی) تا ۳۵ مگاپاسکال می‌باشد. بنابراین انتظار می‌رود ظرفیت نهایی خمشی بتن فوق‌توانمند در حدود دو برابر مقاومت خمشی اولین ترک می‌باشد. [۱۵]

۳.۴. آزمایش مقاومت کششی به روش برزیلی

آزمایش تعیین مقاومت کششی به روش برزیلی (مقاومت کششی دو نیم شدن آزمون) با استفاده از رابطه ارائه شده در استاندارد ASTM C۴۹۶ محاسبه می‌شود. [۱۷] در جدول ۹ نتایج آزمایش تعیین مقاومت کششی به روش نصف کردن (برزیلی) ارائه شده است. با توجه به ضعف بتن در کشش، به نظر می‌رسد مقدار مقاومت کششی بتن فوق‌توانمند قابل توجه می‌باشد. عامل اصلی در بهبود این خاصیت، استفاده از الیاف فولادی پر مقاومت می‌باشد که باعث افزایش ظرفیت کششی بتن فوق‌توانمند شده است. بر اساس آزمایش‌های انجام شده توسط گریبیل در دانشگاه مریلند آمریکا، مقاومت کششی نمونه‌های بتن فوق‌توانمند (بر اساس روش نیم کردن) بین ۶/۵ تا ۱۲ مگاپاسکال بوده است. [۱۵]

جدول ۹- نتایج آزمایش تعیین مقاومت کششی بتن به روش نصف کردن (برزیلی)

کد نمونه	میانگین مقاومت کششی (مگاپاسکال)	انحراف از معیار (مگاپاسکال)
U _۱	۱۱/۶	۰/۳
U _۲	۱۳/۸	۱/۶

نکته جالب تفاوت نسبتاً کم بین مقاومت نمونه‌های U₁ و U₂ می‌باشد. با توجه به هزینه نسبتاً زیاد الیاف فولادی، امکان استفاده از الیاف با مقدار کمتر، اهمیت اقتصادی زیادی دارد. با این حال باید نتایج کلیه آزمایش‌ها در نظر گرفته شده و نهایتاً بر اساس نیاز موجود، بهترین طرح بتن مورد استفاده قرار گیرد. نتایج به دست آمده از این آزمایش، به علت تاثیر تنش دو محوره (تنش فشاری عمودی و تنش کششی جانبی) بر روی رفتار پس ترک خوردگی و اتصال ترک‌ها پیش از بیرون کشیده شدن الیاف از ماتریس بتن فوق توانمند، نمونه مورد آزمایش بار بیشتری تحمل کرده و دارای دقت کامل نمی‌باشند.

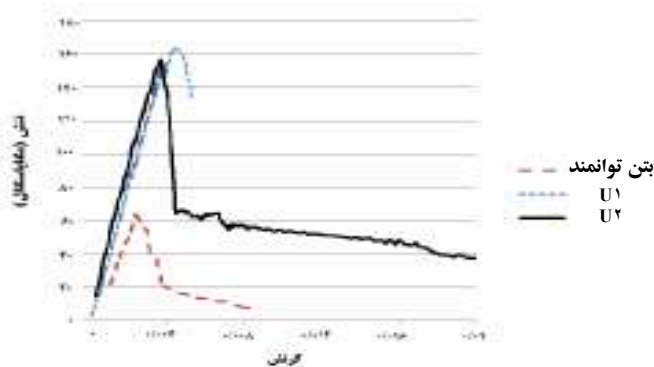
۴.۴. مدول الاستیسیته و منحنی تنش- کرنش

مدول الاستیسیته بتن طبق تعریف استاندارد ASTM C469، برابر با شیب قسمت الاستیک نمودار تنش- کرنش تا ۴۰ درصد مقاومت فشاری نهایی آن می‌باشد. [۱۸] برای رسم نمودار تنش-کرنش، سنسورهایی روی نمونه نصب شده و بارگذاری پس از گسیخته شدن نمونه نیز ادامه پیدا می‌کند و در نهایت نمودار تنش-کرنش با استفاده از داده‌های ثبت شده رسم می‌شود. به طور طبیعی فرض می‌شود که ریز ترک‌های داخلی بتن در تنش‌های بالا توسعه یافته و همچنین به همراه آن یک کاهش در سختی مشاهده خواهد شد.

در جدول ۱۰ خلاصه نتایج آزمایش تعیین مدول الاستیسیته و مقدار کرنش در فشار حداکثر ارائه گردیده است. بارگذاری با سرعت ۶۰۰ میکروکرنش در ثانیه صورت پذیرفته است. نمونه‌ها استوانه‌ای شکل با قطر ۱۰۰ و طول ۲۰۰ میلی‌متر بوده‌اند. با مقایسه نتایج آزمایش مدول الاستیسیته در نمونه‌های U₁ و U₂ می‌توان اظهار داشت که مقدار بیشتر الیاف موجب افزایش مدول الاستیسیته می‌شود. علت این پدیده را می‌توان به بیشتر بودن الیاف فلزی نسبت داد. زیرا به طور طبیعی فولاد دارای مدول الاستیسیته بیشتری نسبت به بتن است. الیاف فولادی باعث افزایش شکل پذیری بتن فوق توانمند شده‌اند.

جدول ۱۰- نتایج آزمایش‌های مدول الاستیسیته و کرنش در بار حداکثر در بتن

کد نمونه	میانگین مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	میانگین کرنش در بار حداکثر فشاری (میلیمتر / میلیمتر)
U ₁	۴۲/۳	۰/۰۰۴۳
U ₂	۴۷/۶	۰/۰۰۴۴



شکل ۳- منحنی تنش-کرنش در نمونه‌های بتن توانمند و فوق توانمند

در شکل ۳ نیز منحنی تنش-کرنش برای مقایسه رفتار بتن تحت فشار رسم شده است. این نمودار شامل میانگین نمودارهای حاصل از آزمایش بر روی سه نمونه بتن فوق توانمند با دو درصد متفاوت الیاف به همراه یک نمونه بتن توانمند می‌باشد. منحنی نشان می‌دهد که بتن فوق توانمند دارای جذب انرژی بیشتری نسبت به بتن توانمند است.

الیاف فولادی مانعی در برابر گسترش ترک‌ها در حین بارگذاری می‌باشند (پدیده پل زدن^۸)، همچنین باعث پایداری بتن پس از رسیدن به مقاومت حداکثر می‌شوند و با افزایش میزان الیاف فولادی در بتن، این خاصیت بتن بیشتر بهبود یافته و دارای رفتار شکل‌پذیرتری است.

^۸ Bridging

انتظار می‌رود نمونه‌های U1 پس از شکست، همچنان دارای مقاومت پس‌ماند باشند. پس از شکست نمونه‌ها، مقاومت آن به صورت لحظه‌ای به شدت افت پیدا کرده و پس از درگیر شدن دوباره الیاف نمونه از خود مقاومت نشان می‌دهد. اما در مورد این نمونه‌ها، با توجه به سرعت بارگذاری، درصد کمتر الیاف نسبت به نمونه U2 و مقاومت زیاد بتن، در هنگام گسیختگی انرژی زیادی آزاد شده و سنسورها را از حالت عادی خارج نموده و بنابراین امکان ثبت منحنی تنش- کرنش بعد از گسیختگی فراهم نگردیده است.

در شکل ۴ و ۵، شکل ظاهری نمونه‌های بتن فوق‌توانمند پس از گسیختگی نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، وجود الیاف فولادی در بتن فوق‌توانمند، مانع پاشیده شدن این نوع بتن پس از گسیختگی شده است.



شکل ۴- شکل ظاهری یک نمونه بتن فوق‌توانمند (U2) بعد از گسیختگی شکل ۵- شکل ظاهری نمونه‌های بتن فوق‌توانمند و توانمند بعد از گسیختگی

۵.۴. آزمایش سه محوری، تعیین ضریب پواسون و مدول برشی

در این بخش نتایج آزمایش‌های فشاری تک محوری (فشار همه جانبه صفر) و سه محوری انجام گرفته بر روی فوق‌توانمند ارائه خواهد گردید. نمونه‌ها استوانه‌ای شکل با قطر ۷۵ و طول ۱۵۰ میلی‌متر می‌باشد. مقادیر ضریب پواسون و مدول برشی در آزمایش با فشار تک محوری (فشار صفر) به دست آمده‌اند. سرعت بارگذاری در کلیه آزمایش‌های این بخش برابر با ۵ میکرو کرنش بر ثانیه می‌باشد.

به منظور انجام آزمایش‌های مکانیکی این نمونه‌ها از دستگاه MTS استفاده شده است. این دستگاه قابلیت بارگذاری فشاری و کششی را با هم دارا بوده و شامل یک پردازشگر پنج کاناله، کرنش سنج محوری که در یک سوم میانی نمونه نصب می‌شود، کرنش سنج محیطی برای اندازه‌گیری ضریب پواسون و تجهیزات آزمایش سه محوری شامل سلول فشار، دستگاه کنترل و اعمال فشار همه جانبه، رایانه مرکزی، دستگاه کنترل سرعت بارگذاری و ثبت تغییر مکان دو فک بالایی و تحتانی می‌باشد. شکل ۶ نمونه‌های فشاری و شکل ۷ نمونه‌های سه محوری را تحت بارگذاری در دستگاه MTS نشان می‌دهد.



شکل ۷- نمونه‌ها تحت بارگذاری فشاری سه محوری دستگاه MTS



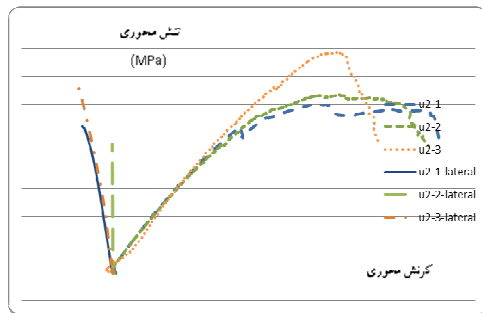
شکل ۶- نمونه فشاری تحت بارگذاری دستگاه MTS

این آزمایش برای به دست آوردن نمودار کامل تنش-کرنش (که شامل شاخه‌های صعودی و نزولی منحنی است) در حالت فشار استاتیکی و به دست آوردن مدول الاستیسیته، ضریب پواسون، مقاومت فشاری نهایی و مقاومت حد تسلیم نمونه‌های بتن‌های فوق‌توانمند (UHPFRC) تهیه شده در آزمایشگاه انجام شده است تا در طراحی‌های سازه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

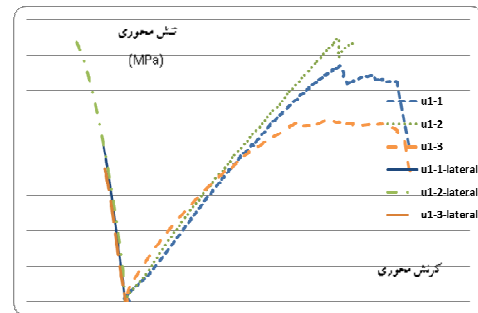
برای انجام آزمایش مقاومت فشاری، از روش کنترل تغییر مکان^۹ معادل آهنگ تغییرات کرنش ۰/۰۰۰۷ در ثانیه استفاده شده است.

۵.۴. ۱. نتایج آزمایش تک محوری

آزمایش فشاری بتن فوق توانمند حاوی یک و دو درصد الیاف که در این تحقیق طراحی شده بر روی سه نمونه انجام شد و منحنی‌های تنش-کرنش محوری و جانبی مربوطه در شکل ۸ و ۹ ارائه شده است. تنش نهایی در کرنشی تقریباً معادل ۰/۰۰۴ برای بتن فوق توانمند با یک درصد الیاف (U۱) و حدود ۰/۰۰۵ برای بتن فوق توانمند با دو درصد الیاف (U۲) اتفاق می‌افتد و این موضوع نشان دهنده آن است که نمونه‌های با دو درصد الیاف میزان جذب انرژی بیشتری نسبت به نمونه‌های با یک درصد الیاف از خود نشان داده‌اند. خلاصه مشخصات به دست آمده از آزمایش‌ها بر روی بتن فوق توانمند با یک و دو درصد الیاف (U۱ و U۲) فلزی شامل مدول الاستیسیته، مقاومت فشاری نهایی، ضریب پواسون و مدول برشی در جدول ۱۱ و ۱۲ آورده شده است.



شکل ۹- منحنی تنش-کرنش بتن فوق توانمند حاوی دو درصد الیاف فلزی در بارگذاری تک محوری



شکل ۸- منحنی تنش-کرنش بتن فوق توانمند حاوی یک درصد الیاف فلزی در بارگذاری تک محوری

جدول ۱۲- مشخصات بتن فوق توانمند با ۲ درصد الیاف (U۲) در بارگذاری فشاری

نام نمونه	σ_u (MPa)	E (GPa)	ν	G (GPa)
U۲-۱	۱۱۶/۷	۴۰/۹	۰/۲۰۷	۱۶/۹
U۲-۲	۱۲۷/۰	۴۱/۰	-	-
U۲-۳	۱۵۷/۳	۳۹/۵	۰/۱۷۳	۱۶/۸
میانگین	۱۴۲/۱	۴۰/۴	۰/۱۹	۱۶/۹

جدول ۱۱- مشخصات بتن فوق توانمند با ۱ درصد الیاف (U۱) در بارگذاری فشاری

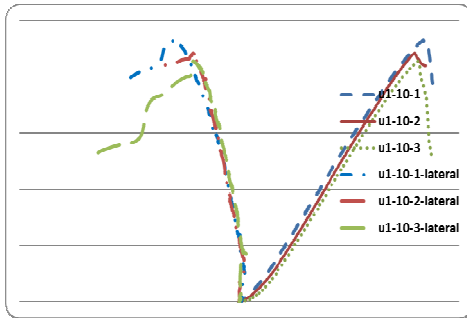
نام نمونه	σ_u (MPa)	E (GPa)	ν	G (GPa)
U۱-۱	۱۲۸/۶	۳۴	۰/۱۷	۱۴/۵
U۱-۲	۱۴۹/۶	۳۶	۰/۱۸۵	۱۵/۲
U۱-۳	۱۰۳/۷	۳۷	۰/۱۸۸	۱۵/۶
میانگین	۱۲۷/۳	۳۵/۲	۰/۱۸۱	۱۵/۱

همانطور که ملاحظه می‌شود، افزودن الیاف به مخلوط‌های بتنی به افزایش مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و برشی بتن کمک کرده است. ترک‌های ایجاد شده در نمونه‌های بتن فوق توانمند بیشتر به صورت ریز ترک‌هایی است که به علت وجود الیاف عمدتاً به صورت پوسته‌شدگی‌هایی در سطح نمونه ظاهر شده‌اند.

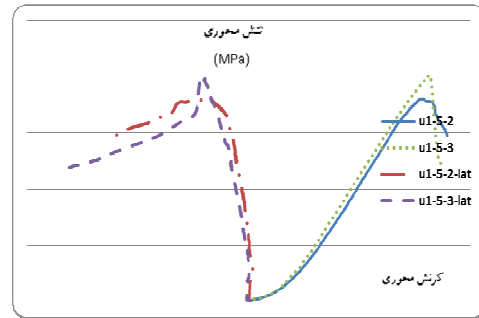
^۹ Displacement control

۴.۵.۲. نتایج آزمایش سه محوری

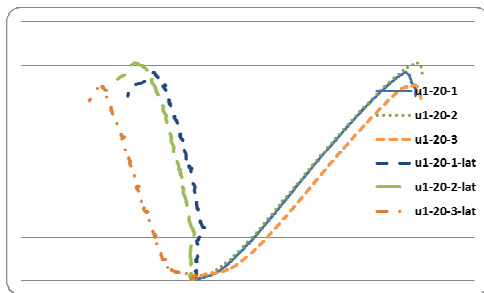
آزمایش سه محوری بتن یابفی توانمند مطابق با استاندارد ASTM C8۰۱ صورت گرفته است. [۱۹] نمونه‌های استوانه‌ای شکل تحت فشار همه جانبه ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ مگاپاسکال قرار گرفتند. منحنی‌های تنش-کرنش بتن فوق توانمند حاوی یک درصد الیاف (U1) در شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ ارائه شده‌اند.



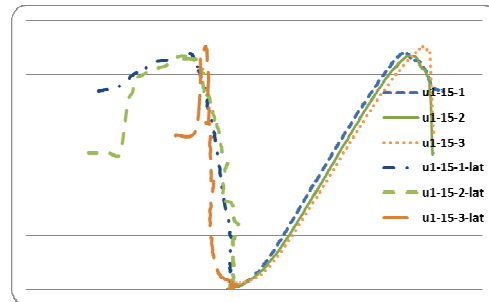
شکل ۱۱- منحنی‌های تنش-کرنش محوری و جانبی برای بتن فوق-توانمند حاوی یک درصد الیاف (U1) در فشار جانبی ۱۰ مگاپاسکال



شکل ۱۰- منحنی‌های تنش-کرنش محوری و جانبی برای بتن فوق-توانمند حاوی یک درصد الیاف (U1) در فشار جانبی ۵ مگاپاسکال



شکل ۱۳- منحنی‌های تنش-کرنش محوری و جانبی برای بتن فوق-توانمند حاوی یک درصد الیاف (U1) در فشار جانبی ۲۰ مگاپاسکال



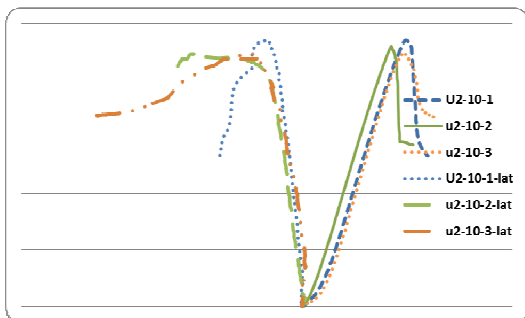
شکل ۱۲- منحنی‌های تنش-کرنش محوری و جانبی برای بتن فوق-توانمند حاوی یک درصد الیاف (U1) در فشار جانبی ۱۵ مگاپاسکال

همچنین خلاصه نتایج آزمایش‌ها بر روی بتن فوق توانمند حاوی یک درصد الیاف در جدول ۱۳ ارائه شده است.

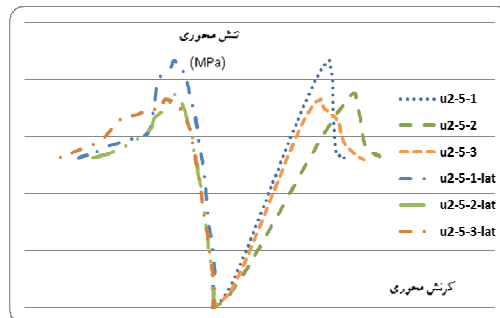
جدول ۱۳- مشخصات بتن فوق توانمند با یک درصد الیاف (U1) در بارگذاری سه محوری

شماره نمونه	فشار جانبی (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	نسبت تنش-کرنش (MPa)	نسبت تنش-کرنش (MPa)	نسبت تنش-کرنش (MPa)
U1-5-1	5	37.4	1.1	11.5	11.5	11.5
U1-5-2	5	37.6	1.1	11.5	11.5	11.5
U1-5-3	5	37.7	1.1	11.5	11.5	11.5
میانگین						
U1-10-1	10	47.8	1.2	14.3	14.3	14.3
U1-10-2	10	47.9	1.2	14.3	14.3	14.3
U1-10-3	10	48.0	1.2	14.3	14.3	14.3
میانگین						
U1-15-1	15	58.1	1.3	17.2	17.2	17.2
U1-15-2	15	58.2	1.3	17.2	17.2	17.2
U1-15-3	15	58.3	1.3	17.2	17.2	17.2
میانگین						
U1-20-1	20	68.4	1.4	20.1	20.1	20.1
U1-20-2	20	68.5	1.4	20.1	20.1	20.1
U1-20-3	20	68.6	1.4	20.1	20.1	20.1
میانگین						

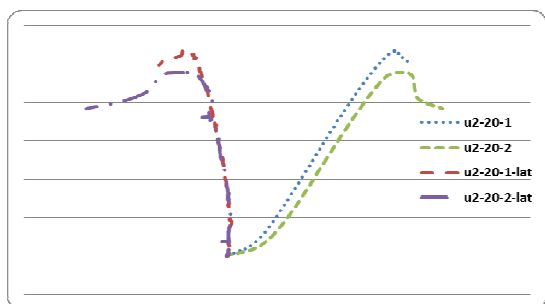
در شکل ۱۴ تا ۱۷ نمودارهای تنش- کرنش بتن فوق توانمند با دو درصد الیاف (U۲) در فشارهای مختلف نشان داده شده است.



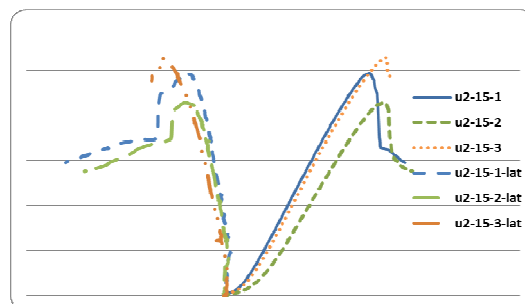
شکل ۱۵- منحنی‌های تنش-کرنش محوری و جانبی برای بتن فوق-توانمند حاوی دو درصد الیاف (U۲) در فشار جانبی ۱۰ مگاپاسکال



شکل ۱۴- منحنی‌های تنش-کرنش محوری و جانبی برای بتن فوق-توانمند حاوی دو درصد الیاف (U۲) در فشار جانبی ۵ مگاپاسکال



شکل ۱۷- منحنی‌های تنش-کرنش محوری و جانبی برای بتن فوق-توانمند حاوی دو درصد الیاف (U۲) در فشار جانبی ۲۰ مگاپاسکال



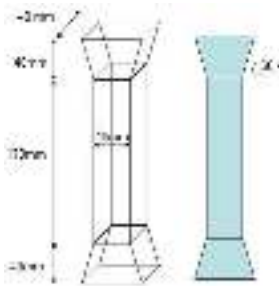
شکل ۱۶- منحنی‌های تنش-کرنش محوری و جانبی برای بتن فوق-توانمند حاوی دو درصد الیاف (U۲) در فشار جانبی ۱۵ مگاپاسکال

جدول ۱۴- مشخصات بتن فوق توانمند با دو درصد الیاف در بارگذاری سه محوری

ردیف	نوع الیاف (٪)	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	نسبت تنش به تنش تسلیم
۱	۰	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۲	۵	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۳	۱۰	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۴	۱۵	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۵	۲۰	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۶	۲۵	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۷	۳۰	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۸	۳۵	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۹	۴۰	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۱۰	۴۵	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۱۱	۵۰	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۱۲	۵۵	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۱۳	۶۰	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۱۴	۶۵	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۱۵	۷۰	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۱۶	۷۵	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۱۷	۸۰	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۱۸	۸۵	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۱۹	۹۰	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۲۰	۹۵	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۲۱	۱۰۰	۳۹.۲۶	۱.۱۳	

ردیف	نوع الیاف (٪)	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	نسبت تنش به تنش تسلیم
۱	۰	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۲	۵	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۳	۱۰	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۴	۱۵	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۵	۲۰	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۶	۲۵	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۷	۳۰	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۸	۳۵	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۹	۴۰	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۱۰	۴۵	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۱۱	۵۰	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۱۲	۵۵	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۱۳	۶۰	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۱۴	۶۵	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۱۵	۷۰	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۱۶	۷۵	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۱۷	۸۰	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۱۸	۸۵	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۱۹	۹۰	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۲۰	۹۵	۳۹.۲۶	۱.۱۳	
۲۱	۱۰۰	۳۹.۲۶	۱.۱۳	

۴.۶. آزمایش کشش مستقیم



استاندارد ASTM C1404 به نحوه انجام آزمایش کشش مستقیم بتن می پردازد، [۲۰] اما این استاندارد دارای اشکال‌هایی است و در مورد بتن‌های الیافی با توجه به مقاومت قابل توجه آن‌ها جوابگو نمی‌باشد. به منظور اندازه‌گیری مقاومت کششی مستقیم از تحقیقات نعمان^{۱۰} و هومریخ^{۱۱} بر روی بتن الیافی ویژه (نمونه‌های استخوانی شکل) استفاده شده است. [۲۱] برای این تحقیق فک‌ها و قالب‌ها طراحی شدند و جزئیات آن‌ها در شکل ۱۸ نشان داده شده است.

در شکل ۱۹ تصویر نمونه استخوانی شکل تحت بارگذاری کشش مستقیم نمایش داده شده است.

شکل ۱۸- جزئیات نمونه کششی استخوانی شکل



شکل ۱۹- نمونه استخوانی شکل تحت بارگذاری کشش مستقیم توسط دستگاه MTS

در جدول ۱۵ مقادیر مقاومت کششی و میزان کرنش در تنش حداکثر ارائه شده است.

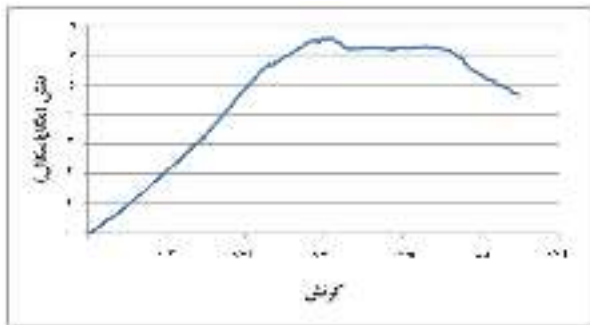
جدول ۱۵- نتایج آزمایش‌های کشش مستقیم و کرنش در بار حداکثر

کد نمونه	میانگین مقاومت کششی (MPa)	میانگین کرنش در بار حداکثر فشاری (mm/mm)
U _۱	۴/۹۵	۰/۰۰۵۲
U _۲	۶/۳۶	۰/۰۰۶۳

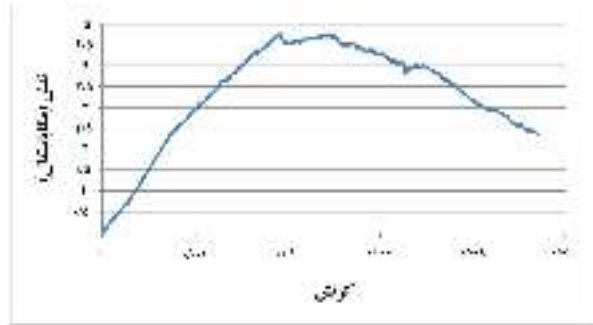
به منظور بررسی دقیق‌تر رفتار نمونه‌ها، منحنی تنش-کرنش کششی نمونه‌ها در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ نمایش داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود رفتار بتن الیافی فوق‌توانمند در کشش رفتار الاستو-پلاستیک و شکل‌پذیر را نشان می‌دهد که از ویژگی‌های منحصر به فرد این نوع بتن می‌باشد. سپس بعد از بخش الاستیک (قسمت خطی منحنی) به علت شروع ترک‌ها، کاهش در باربری کششی مشاهده می‌شود که با افزایش کرنش با توجه به عملکرد مناسب الیاف فلزی نمونه دوباره به باربری افزایشی (سخت‌شدگی) ادامه می‌دهد. مساحت زیاد زیر منحنی نشان دهنده طاقت و جذب انرژی زیاد بتن الیافی فوق-توانمند در بارگذاری کشش مستقیم می‌باشد.

^{۱۰} Naaman

^{۱۱} Homrich



شکل ۲۱- منحنی تنش- کرنش نمونه U2 تحت کشش مستقیم



شکل ۲۰- منحنی تنش- کرنش نمونه U1 تحت کشش مستقیم



شکل ۲۲- تصویر نمونه‌ی بتن فوق‌توانمند بعد از گسیختگی در آزمایش کشش مستقیم

۵. نتیجه‌گیری

- برای دستیابی به طرح اختلاط بهینه بتن فوق‌توانمند، ۱۴ طرح اختلاط آزمایشی اجرا شد که طرح بهینه با مقدار سیمان ۱۰۵۰ و نسبت آب به سیمان ۰/۱۶، مقاومت فشاری حدود ۱۷۵ مگاپاسکال با روانی مناسب ۱۹/۷۵ میلی‌متر حاصل شد.
- افزایش میزان الیاف در بتن فوق‌توانمند از یک به دو درصد حجمی:
 - ✓ باعث بهبود ۱۰ درصدی مقاومت فشاری شده است، اگرچه که معیار مورد توجه در این نوع بتن نمی‌باشد.
 - ✓ باعث بهبود ۱۵ درصدی مقاومت خمشی شده است به طوری که مقاومت خمشی بتن فوق‌توانمند حاوی دو درصد الیاف فولادی حدود ۱۹ مگاپاسکال می‌باشد. نمونه‌ها بعد از ایجاد اولین ترک، توانایی تحمل بار تا گسیختگی نهایی را دارند که نشان دهنده شکل‌پذیری زیاد این نوع بتن می‌باشد.
 - ✓ تاثیر قابل توجهی در مقاومت کششی ندارد و تفاوت نسبتاً کمی بین مقاومت دو نمونه ایجاد کرده است. مقاومت کششی بتن‌های فوق‌توانمند قابل توجه می‌باشد که به علت عملکرد مناسب الیاف فولادی می‌باشد.
 - ✓ باعث افزایش مدول الاستیسیته می‌شود زیرا الیاف فولادی مدول الاستیسیته بیشتری نسبت به بتن دارند. کرنش بتن فوق‌توانمند در بار حداکثر فشاری با الیاف یک و دو درصدی به ترتیب ۰/۰۰۴۳ و ۰/۰۰۴۴ می‌باشد که نشان دهنده افزایش جذب انرژی بتن می‌باشد.
 - ✓ طبق آزمایش تک محوری باعث افزایش ضریب پواسون از ۰/۱۸ به ۰/۱۹ و افزایش مدول برشی بتن از ۱۵/۱ به ۱۶/۹ مگاپاسکال می‌شود.
 - ✓ طبق آزمایش سه محوری، به جز در فشار جانبی ۵ مگاپاسکال، باعث افزایش در ظرفیت تنش نهایی بتن می‌شود و همچنین مدول الاستیسیته بتن افزایش پیدا کرده و در فشارهای جانبی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ مگاپاسکال مشخص گردیده است.
- با استفاده از آزمایش کشش مستقیم بر نمونه‌های استخوانی شکل، منحنی کامل تنش-کرنش کششی در مقادیر مختلف الیاف بدست آمد. مساحت زیاد زیر منحنی نشان دهنده طاقت و جذب انرژی زیاد بتن الیافی فوق‌توانمند در بارگذاری کشش مستقیم می‌باشد.
- منحنی‌های کامل تنش-کرنش بتن فوق‌توانمند حاوی یک و دو درصد الیاف فولادی تحت آزمایش تک محوری و سه محوری بدست آمد.

- [١] AFGC Scientific and Technical Documents. (٢٠٠٢). "Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes – Interim Recommendations (Documents scientifiques et techniques". BJtons fibrJs B ultra hautes performances – Recommandations provisoires), French Association of Civil Engineering. (Association FranHaise de GJnie Civil).
- [٢] Arora, A., Almujaiddi, A., Kianmofrad, F., Mobasher, B., and Neithalath, N. (٢٠١٩). "Material design of economical ultra-high performance concrete (UHPC) and evaluation of their properties". Cement and Concrete Composites.
- [٣] Alsalman, A., Dang, C. N., and Hale, V. M. (٢٠١٧). "Development of ultra-high performance concrete with locally available materials". Construction and Building Materials. vol. ١٣٣, pp. ١٣5–145.
- [٤] Shi, C. J., Wu, Z. M., Xiao, J. F., Wang, D. H., Huang, Z. Y., and Fang, Z. (٢٠١٥). "A review on ultra high performance concrete. Part I: Raw materials and mixture design." Constr. Build. Mater. 101: 741–751.
- [٥] Park, S. H., Dong, J. K., Ryu, G. S. and Koh, K. T. (٢٠١٢). "Tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete." Cem. Concr. Compos. ٣٤ (٢): ١٧٢–١84.
- [٦] Azmee, N., and Shafiq, N. (٢٠١٨). "Ultra-High Performance Concrete: From Fundamental to Applications." Case Studies in Construction Materials.
- [٧] Racky. (٢٠٠٤). "P. Cost-effectiveness and Sustainability of UHPC. Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete". Kassel, Germany, Sept. ١٣-15: 797 805.
- [٨] Richard, P., and M. Cheyrezy. (١٩٩٥). "Composition of Reactive Powder Concretes. Cement and Concrete Research". Vol. ٢٥, No. ٧: ١٥٠١-١٥١١.
- [٩] Fehling, E., Leutbecher, T., and Bunje, K. (٢٠٠٤). "Design relevant properties of hardened ultra-high performance concrete". In Int. Symp. On Ultra High Performance Concrete, Vol. ١, pp. ٣٢٧-338.
- [١٠] Graybeal, B. A., and Baby, F. (٢٠١٣). "Development of Direct Tension Test Method for Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete". ACI Materials Journal, ١١٠(٢).
- [١١] GU, C., Ye, G., and Sun, W. (٢٠١٥). "Ultra high performance concrete-properties, applications and perspectives". Science China Technological Sciences, ٥٨(٤), ٥٨٧-٥99.
- [١٢] ASTM C٣٣-٠٣, (٢٠٠٣). "Standard Specification for Concrete Aggregates". ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [١٣] ASTM C٣٩, (١٩٩٤). "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens". American Society for Testing and Materials Standard Practice C٣٩, Philadelphia, Pennsylvania.
- [١٤] Kollmorgen, G.A. (٢٠٠٤). "Impact of Age and Size on the Mechanical Behavior of and Ultra-High Performance Concrete". MS Thesis in Civil Engineering, Michigan Technological University, Houghton, Michigan.
- [١٥] Graybeal, B.A. (٢٠٠٥). "Characterization of the behavior of ultra-high performance concrete". PhD thesis, University Maryland.

- [١٤] ASTM C٧٨, (١٩٩٤). “Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)”. American Society for Testing and Materials Standard Practice C٧٨, Philadelphia, Pennsylvania.
- [١٧] ASTM C٤٩٤, (١٩٩٤). “Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens”. American Society for Testing and Materials Standard Practice C٤٩٤, Philadelphia, Pennsylvania.
- [١٨] ASTM C٤٤٩, (٢٠٠٢). “Standard test method for static modulus of elasticity and poisson’s ratio of concrete in compression”. American Society for Testing Materials. West Conshohocken: Annual book of ASTM Standards.
- [١٩] ASTM C٨٠١, (٢٠٠٤). “Standard test method for determining the mechanical properties of hardened concrete under triaxial loads”. American Society for Testing Materials. West Conshohocken: Annual book of ASTM Standards.
- [٢٠] ASTM C١٤٠٤ / C١٤٠٤M-٩8(2003), Standard Test Method for Bond Strength of Adhesive Systems Used with Concrete as Measured by Direct Tension (Withdrawn ٢٠١٠), ASTM International, West Conshohocken, PA, ١٩٩٨
- [٢١] Naaman, A.E., and Hormich, J. R. (١٩٨٩). “Tensile Stress-Strain Properties of SIFCON”. ACI Materials Journal, vol. ٨٤, No. ٣, May-June ١٩٨٩, pp. ٢٤٤-٢٥١.