



بررسی خواص مکانیکی بتن سبک سازه‌ای با استفاده از الیاف ترکیبی

مهرداد حجازی^{*}، فرشید فتحی، حمیدرضا صدرارحامی

گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۰ بهمن ۱۳۹۲
بازنگری: ۲۳ فروردین ۱۳۹۴
پذیرش: ۲۳ آذر ۱۳۹۴
ارائه آنلاین: ۲۴ اسفند ۱۳۹۴

کلمات کلیدی:

سبک سازه‌ای
الیاف فولادی
الیاف شیشه
الیاف پلی پروپیلن
الیاف ترکیبی
خواص مکانیکی

چکیده: در این تحقیق خواص مکانیکی بتن سبک سازه‌ای، شامل مقاومت فشاری، کششی، خمشی و جذب انرژی با استفاده از ۵ نوع الیاف (فولاد صنعتی و ضایعاتی، شیشه، پلی پروپیلن و کاه) به صورت تک الیاف و ترکیبی (۲تایی و ۳تایی) مورد بررسی قرار گرفته است. روند تحقیق به این صورت بوده است که ابتدا ۲ طرح شاهد از بتن سبک سازه‌ای و بتن معمولی بدون الیاف تهیه شده است. سپس، نمونه‌های بتنی سبک الیافی، به صورت تک الیاف با درصدهای حجمی ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۴ و ۰/۵ تهیه شده‌اند. در مرحله سوم، نمونه‌های بتنی سبک الیافی، به صورت ترکیب دوتایی از الیاف با درصدهای حجمی (۰/۱ و ۰/۴)، (۰/۱ و ۰/۲۵) و (۰/۳ و ۰/۲۵) درست شده است. در پایان، نمونه‌های بتنی سبک الیافی، به صورت ترکیب سه تایی از الیاف با درصدهای حجمی (۰/۱، ۰/۱ و ۰/۳)، (۰/۱، ۰/۳ و ۰/۳)، (۰/۱ و ۰/۳) و (۰/۱ و ۰/۳) تهیه شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که در بین نمونه‌های ساخته شده، نمونه‌های دارای ترکیب دوگانه، عملکرد بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها داشته‌اند. از ترکیب الیاف فولاد صنعتی و پلی پروپیلن بیشترین مقاومت فشاری و از ترکیب الیاف شیشه و پلی پروپیلن بیشترین مقاومت کششی و خمشی حاصل شده است. بیشترین جذب انرژی نیز مربوط به ترکیب الیاف فولاد صنعتی و شیشه بوده است.

۱- مقدمه

بتن یکی از پرکاربردترین مصالح ساختمانی و سازه‌ای است. در دسترس بودن مصالح تشکیل دهنده، ساخت آسان، شکل پذیری (به شکل قالب در آمدن) و خمیری بودن، از مزایای مهم بتن به شمار می‌رود. از طرفی بتن به دلیل ساختار متفاوت آن نسبت به فولاد یک ماده غیرهمگن و غیرهمسان محسوب شده و یک ماده ترد به حساب می‌آید که رفتار مقاومتی متفاوت آن در فشار و کشش بیانگر این موضوع است. بطوریکه مقاومت بتن در کشش بسیار کمتر از مقاومت فشاری آن است. برای جبران این نقیصه استفاده از ماده‌ای که بتواند مقاومت کششی بتن را افزایش دهد امری ضروری است. راهکارهای مختلفی در این زمینه ارائه شده است که متداول‌ترین آن استفاده از آرماتورهای فولادی است. در سال‌های اخیر مشکلات استفاده از فولاد، مانند وزن نسبتاً زیاد، خوردگی و اجرای دشوار آن، محققین را بر آن داشته است که به دنبال جایگزین کردن ماده‌ای مناسب به جای فولاد باشند. استفاده از میله‌های FRP یکی از روش‌های جایگزین می‌باشد. این میله‌ها اولین بار در ژاپن ساخته و مورد استفاده قرار گرفت و روز به روز در حال

گسترش است. استفاده از الیاف نیز به عنوان یک روش جایگزین دیگر امروزه به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. البته الیاف در زمان‌های دور به شکل سنتی در ملات‌ها استفاده می‌شده است. نمونه بارز آن را می‌توان در ملات کاه گل مشاهده نمود که از کاه به عنوان یک ماده ضد ترک در ملات استفاده می‌شده است. امروزه با تولید انواع الیاف به شکل صنعتی عرصه جدیدی در استفاده از الیاف به وجود آمده است [۱].

همچنین به دلیل اعمال بارهای مختلف بخصوص بار زلزله به سازه و به دلیل ارتباط مستقیمی که نیروی زلزله با وزن سازه دارد، سعی می‌گردد تا حد امکان وزن سازه را کمتر نمود، تا اثر نیروهای مخرب بر سازه کمتر شود. یکی از راهکارهای کاهش وزن سازه استفاده از مصالح سبک وزن در ساخت بتن می‌باشد. که به تبع آن وزن مخصوص بتن کاسته شده و در نتیجه وزن سازه کم می‌گردد. امروزه راه‌کار تولید مصالح سبک وزن با مقاومت نسبتاً بالا رو به افزایش است. خوشبختانه در کشور ما معادن بسیاری از مصالح سبک طبیعی وجود دارد که با بهره‌برداری مناسب از این معادن می‌توان پتانسیل تولید مصالح سبک وزن را بالا برد. در خصوص مصالح سبک مصنوعی نیز کارخانه‌هایی وجود دارد که در حال تولید مصالح سبک وزن با

^{*}نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.hejazi@pci.iaun.ac.ir

داد که مقاومت کششی، فشاری و خمشی بتن الیافی با هردو الیاف در مقایسه با بتن بدون الیاف بهتر بوده است.

سورلی [۵] در تحقیقی که انجام داده است تأثیر الیاف فولادی را در بتن دال‌ها با مدل‌سازی آزمایشگاهی از یک دال مورد بررسی قراردادده است. نتیجه به وجود آمده حاکی از آن است که استفاده از ۰/۳۸٪ الیاف، باعث بهبود رفتاری دال خواهد شد. پولسن [۶] در تحقیق خود با استفاده از الیاف فولادی و پلیمری در بتن تیرها، نشان داده است که رفتار فیزیکی و مکانیکی تیر نسبت به بتن بدون الیاف بهبود یافته است. وی با ساخت نمونه‌های مختلف تیر با درصد‌های مختلف الیاف، آزمایش‌های کششی و خمشی را انجام داده است. نتایج نشان می‌دهند با استفاده از ۰/۵٪ الیاف فولادی و پلیمری کیفیت بتن بهبود می‌یابد. وسوک [۷] در تحقیق خود تأثیر الیاف بر مقاومت برشی بتن سبک را مورد بررسی قراردادده است. الیاف استفاده شده در این تحقیق، فولادی و درصد‌های استفاده شده ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱٪ بوده است. نتیجه تحقیق حاکی از آن است که با افزایش درصد الیاف فولاد، مقاومت برشی نیز افزایش می‌یابد که به تبع آن ترک‌های کمتری در بتن ایجاد خواهد شد. پری [۸] با ارائه تحقیقی، به مقایسه الیاف پلی‌پروپیلن با الیاف فولادی برای مسلح کردن کفسازی خارجی پرداخت. دلیل اصلی او برای انجام این تحقیق این بود که فرسایش سطح کفسازی‌ها (پایه‌روها و عبور وسایل نقلیه) موجب بیرون‌زدگی و در معرض دید قرار گرفتن الیاف فولادی می‌شود که این امر می‌تواند بسیار خطرناک باشد. او در انجام این تحقیق از یک دال کوچک مخصوص کفسازی خارجی حاوی الیاف پلی‌پروپیلن منفرد به طول ۵۰ mm و به مقدار $6/9 \text{ kg/m}^3$ و الیاف فولادی با انتهای قلابدار به طول ۶۰ mm و به مقدار 30 kg/m^3 استفاده نمود. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که مقاومت خمشی بتن مسلح به الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن به ترتیب ۵۳٪ و ۷۸٪ افزایش یافته است. همچنین مقاومت خارجی در برابر فرسایش در صورت استفاده از الیاف فولادی، ۲۰٪ و با استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن، ۴۱٪ افزایش یافته است. بنابراین او نتیجه گرفت که الیاف پلی‌پروپیلن برای مسلح نمودن کفسازی‌ها از لحاظ فرسایش و کنترل ترک به مراتب بهتر از الیاف فولادی عمل می‌کنند.

۲- مصالح مصرفی و طرح اختلاط نمونه‌ها

مصالح سنگی تهیه شده در این تحقیق شامل درشت‌دانه و ریزدانه بوده است. درشت‌دانه خود شامل سنگدانه شکسته طبیعی و سبکدانه مصنوعی لیکا و ریزدانه نیز شامل شکسته طبیعی است. مشخصات مصالح مصرفی در جدول ۱ آورده شده است.

مقاومت نسبتاً خوبی می‌باشند. از جمله این کارخانه‌ها می‌توان به کارخانه لیکا واقع در اتوبان تهران-ساوه اشاره نمود [۲].

بنابراین با توجه به لزوم استفاده از بتن سبک الیافی برای کاهش بارهای زلزله، در این تحقیق خصوصیات مکانیکی بتن سبک سازه‌ای با استفاده از ۵ نوع الیاف شامل: فولاد صنعتی، فولاد ضایعاتی، شیشه، پلی‌پروپیلن و کاه بصورت تکی و ترکیبی مورد بررسی قرار گرفته است. روند تحقیق به این صورت است که در مرحله اول ۲ طرح شاهد از بتن سبک سازه‌ای و بتن معمولی بدون الیاف تهیه شده است. در مرحله دوم، نمونه‌های بتنی سبک، با الیاف‌های گفته شده بصورت تکی با درصد‌های حجمی ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۴ و ۰/۵، جمعاً به تعداد ۲۰ طرح تهیه شده است. در مرحله سوم، نمونه‌های بتنی سبک با الیاف، بصورت ترکیب دوتایی شامل: فولاد صنعتی و شیشه، فولاد صنعتی و پلی‌پروپیلن، شیشه و پلی‌پروپیلن، فولاد ضایعاتی و کاه با درصد‌های حجمی ۰/۱ و ۰/۴، ۰/۴ و ۰/۱، ۰/۲۵ و ۰/۲۵، جمعاً به تعداد ۱۲ طرح تهیه شده است. در مرحله چهارم، نمونه‌های بتنی سبک با الیاف، بصورت ترکیب سه تایی شامل: فولاد صنعتی، شیشه و پلی‌پروپیلن با درصد‌های حجمی ۰/۱، ۰/۱ و ۰/۳، ۰/۱ و ۰/۳، ۰/۱ و ۰/۳، جمعاً به تعداد ۳ طرح تهیه شده است. در نهایت خصوصیات مکانیکی، شامل: مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی و جذب انرژی کلیه طرح‌ها مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی بر روی بتن الیافی انجام شده است. آزمایش‌های مختلف با استفاده از انواع الیاف در بتن‌های معمولی، خود تراکم، با مقاومت بالا و بعضاً سبک انجام شده و خصوصیات به دست آمده مورد بررسی قرار گرفته است. لیکن در اکثر این تحقیقات از یک نوع الیاف استفاده شده است. همچنین استفاده از بتن سبک، بخصوص بتن سبک سازه‌ای که با توجه به لرزه خیز بودن ایران می‌تواند جایگزین مناسبی به جای بتن معمولی گردد، کمتر مورد توجه واقع شده است. در ادامه به توضیح تعدادی از تحقیقات انجام شده در زمینه بتن الیافی پرداخته می‌شود:

پیدایش [۳] در تحقیق خود تأثیر افزایش درصد الیاف پلی‌پروپیلن در بتن الیافی ترکیبی را مورد بررسی قرار داده است. او ۳٪ مختلف الیاف پلی‌پروپیلن را در ۱٪ الیاف فولادی جایگزین کرده است. در نهایت خواص مکانیکی نمونه‌های بتن الیافی ترکیبی فولادی و پلی‌پروپیلن شامل طاق و مقاومت خمشی با یکدیگر و بتن شاهد مقایسه شده‌اند. نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهنده آن است که هر چه الیاف فولادی با درصد بیشتر از الیاف پلی‌پروپیلن جایگزین شود، میزان مقاومت خمشی و جذب انرژی کاهش می‌یابد. ربانی [۴] در تحقیقی که انجام داده است با استفاده از ترکیب دو نوع الیاف پلی‌پروپیلن، یکی ضخیم و دیگری نازک، به بررسی خواص مکانیکی بتن پرداخته است. در این تحقیق از الیاف ضخیم به میزان ۳، ۶ و 9 kg/m^3 و از الیاف نازک به میزان $0/6 \text{ kg/m}^3$ استفاده شده است. نتایج آزمایش نشان

جدول ۳: مشخصات شیمیایی سیمان

Table 3. Chemical properties of cement

مقدار (%)	اجزاء تشکیل دهنده
۵/۳۰	Al ₂ O ₃
۳/۲۰	Fe ₂ O ₃
۶۳/۶۰	CaO
۲/۲۰	MgO
۲/۰	SO ₃
۲۱/۴۰	SiO ₂
۱/۰	LOSS
۰/۴	IR
۱/۲۰	Free CaO
۰/۷	Total Alkalis

آب مصرفی در این پژوهش، از سیستم لوله کشی آب شرب دانشگاه آزاد خوراسگان استفاده شده است.

فوق روان کننده کربوکسیلاتی با نام اختصاری ۱۰۰ Plastit Spc می باشد. در جدول ۴ مشخصات فیزیکی و شیمیایی فوق روان کننده آمده است.

جدول ۴: مشخصات فوق روان کننده

Table 4. Characteristics of superplasticiser

حالت فیزیکی	مایع کهربایی رنگ
جرم حجمی	۱/۱۷ گرم بر سانتیمتر مکعب در ۲۰ درجه سانتیگراد
مقدار کلر	فاقد یون کلر
درصد هوا	در محدوده مصرف نرمال، کمتر از ۲ درصد
میزان مواد قلبایی	کمتر از ۵۵ گرم معادل Na _۲ O در هر لیتر افزودنی
میزان مصرف	حداکثر تا ۲ درصد وزن سیمان
دمای انجماد	حدود ۲- درجه سانتیگراد

در این تحقیق از ۵ نوع الیاف استفاده گردید که شامل: فولاد صنعتی، ضایعاتی، شیشه، پلی پروپیلن و گاه می باشد. در جدول ۵ مشخصات الیاف مصرفی آورده شده است.

جدول ۱: خواص فیزیکی مصالح سنگی مصرفی

Table 1. Physical properties of used stone materials

مشخصات فیزیکی مصالح	درشت دانه سبک	درشت دانه معمولی	ریزدانه معمولی
حداکثر اندازه اسمی سنگدانه (mm)	۱۲/۵	۱۲/۵	۴/۷۶
وزن مخصوص ظاهری (kg/m ³)	۴۶۶	۱۵۷۹	۱۸۴۳
وزن مخصوص حقیقی (kg/m ³)	۷۷۵	۲۶۴۰	۲۵۶۰
درصد رطوبت	۱/۲	۰/۶۵	۰/۸۱
درصد جذب آب	۱۱/۱	۱/۱۳	۱/۷
درصد فضای خالی بین سنگدانه ها	۳۶/۵۹	۴۰/۱۸	۲۸
مدول نرمی سنگدانه	۶/۷۳	۶/۶	۲/۹۷
نسبت چگالی توده ای به چگالی دانه ای	۰/۶۳	۰/۵۹	۰/۷۲
افت سایشی سنگدانه (%)	۲۳/۳	۱۶/۴۵	-----

سیمان مصرفی از نوع تیپ ۱ تهیه شده از کارخانه سیمان ساروج اصفهان می باشد. در جداول ۲ و ۳ مشخصات سیمان مصرفی آورده شده است.

جدول ۲: مشخصات فیزیکی سیمان

Table 2. Physical properties of cement

مشخصات فیزیکی	مقدار	استاندارد
بلین (g/cm ²)	۳۰۰۰	ASTM-C۲۰۴ [۹]
گیرش اولیه (min)	۹۰	ASTM-C۱۹۱ [۱۰]
گیرش نهایی (min)	۲۴۰	ASTM-C۱۹۱ [۱۰]
مقاومت فشاری (kg/cm ²)	۱۷۰ ۲روزه ۳۴۰ ۷روزه ۴۸۰ ۲۸روزه	ASTM-C۱۰۹ [۱۱]
انقباض سیمان با اتوکلاو (%)	۰/۱۵	ASTM-C۱۵۱ [۱۲]

جدول ۷: مقادیر درصدهای الیاف مصرفی در هر طرح

Table 7. Percentage of fibers used in each mix design

درصد الیاف در بتن					طرح
کاه	الیاف ضایعاتی فولاد	الیاف پروپیلن پلی	شیشه	الیاف صنعتی فولاد	
۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	تکی
۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	تکی
۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	تکی
۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	تکی
			۰/۴	۰/۱	تایی ۲
			۰/۱	۰/۴	تایی ۲
			۰/۲۵	۰/۲۵	تایی ۲
		۰/۴		۰/۱	تایی ۲
		۰/۱		۰/۴	تایی ۲
درصد الیاف در بتن					طرح
کاه	الیاف ضایعاتی فولاد	الیاف پروپیلن پلی	شیشه	الیاف صنعتی فولاد	
		۰/۱	۰/۴		تایی ۲
		۰/۴	۰/۱		تایی ۲
		۰/۲۵	۰/۲۵		تایی ۲
۰/۱	۰/۴				تایی ۲
۰/۴	۰/۱				تایی ۲
۰/۲۵	۰/۲۵				تایی ۲
		۰/۳	۰/۱	۰/۱	تایی ۳
		۰/۱	۰/۳	۰/۱	تایی ۳
		۰/۱	۰/۱	۰/۳	تایی ۳

پس از ساخت بتن طبق طرح موردنظر، بتن الیافی در قالب‌هایی که از قبل آماده و روغن زده شده بود، ریخته شد. پس از ۲۴ ساعت از زمان نمونه‌گیری، قالب‌ها باز شده و نمونه‌ها تا زمان انجام آزمایش داخل حوضچه آب قرار داده شد. سعی گردید مقدار آب و همچنین دمای آب در طول عمل‌آوری کنترل شده و ثابت نگهداشته شود.

آزمایش مقاومت فشاری بر اساس استاندارد ASTM C^{۳۹} [۱۳] انجام شده است. در این آزمایش نمونه‌های معکبی به ابعاد ۱۵ cm تهیه شده و پس از عمل‌آوری، تحت بار یکنواخت که مقدار آن بین ۰/۱۵ تا ۰/۳۵ MPa/s است، قرار داده شد. آزمایش مقاومت کششی بر اساس استاندارد ASTM C^{۴۹۶} [۱۴] انجام شده است.

جدول ۵: مشخصات الیاف مصرفی [۱]

Table 5. Properties of used fibers [1]

مشخصات الیاف	فولاد صنعتی	فولاد ضایعاتی	شیشه	پلی پروپیلن	کاه
چگالی (g/cm ^۳)	۷/۸	۷/۱	۲/۶	۰/۹	۰/۲
قطر (mm)	۱	۱	۰/۰۱۸	۰/۰۱۸	۱/۲
طول (mm)	۵۰	۶۵	۱۲	۱۲	۶
ضریب ارتجاعی (GPa)	۲۰۰	---	۸۰	۵	---
مقاومت کششی (GPa)	۱/۷	---	۲/۸	۰/۵	---
کرنش گسیختگی (%)	۳/۲	---	۲/۵	۲۰	---

با توجه به اینکه در این تحقیق از درشت دانه سبک و ریزدانه طبیعی به طور همزمان استفاده گردیده است، همچنین به دلیل در اختیار بودن نمودار ظرفیت مقاومتی دانه‌های لیکا، در این تحقیق از طرح مخلوط بر مبنای ظرفیت مقاومتی به عنوان طرح بتن سبک استفاده گردید، بطوریکه تعداد سعی و خطا در بدست آوردن طرح موردنظر با این روش به حداقل رسید. در جدول ۶ مشخصات طرح برای ساخت نمونه شاهد آورده شده است.

جدول ۶: مشخصات طرح جهت ساخت نمونه‌های شاهد

Table 6. Characteristics of design mix for control mixes

مقادیر	بتن سبک	بتن معمولی
آب (kg/m ^۳)	۱۶۰	۱۶۰
سیمان (kg/m ^۳)	۴۰۰	۴۰۰
شن (kg/m ^۳)	---	۷۴۵
ماسه (kg/m ^۳)	۹۶۰	۹۶۰
لیکا (kg/m ^۳)	۲۲۰	---
روان کننده (%)	۱	۱
اسلامپ (mm)	۶۰	۹۰
وزن مخصوص بتن تازه (kg/m ^۳)	۱۷۸۰	۲۳۰۵

پس از ساخت نمونه‌های شاهد، نمونه‌های دارای الیاف طبق جدول ۷ ساخته شده است. گفتنی است که در تمامی طرح‌ها مقدار مصالح و نسبت آب به سیمان ثابت بوده و فقط مقدار الیاف، نوع الیاف و مقدار فوق روان‌کننده تغییر یافته است. (تعبیر یافتن مقدار فوق روان‌کننده به دلیل وجود الیاف در مخلوط می‌باشد که باعث کاهش کارایی بتن می‌گردد).

آن می‌توان انرژی جذب شده بتن را مورد ارزیابی قرارداد. در این آزمایش نمونه‌های منشوری به ابعاد $10 \times 10 \times 50$ cm تهیه و پس از عمل‌آوری، بصورت افقی داخل دستگاه گذاشته شد و بار در ۴ نقطه به تیر اعمال گردید. بارگذاری به صورت یکنواخت و بین 0.186 تا 1.211 MPa/min می‌باشد. در شکل ۱ دستگاه خمش نشان داده شده است.

در این آزمایش نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد 15×30 cm تهیه و پس از عمل‌آوری، ابتدا بصورت افقی داخل غلافی که برای همین منظور ساخته شده گذاشته شد، سپس تحت بار یکنواخت به میزان 0.7 تا 1.4 MPa/min قرار گرفت. آزمایش مقاومت خمشی بر اساس استاندارد ASTM C 1018 [۱۵] انجام گرفته است. مزیت این روش نسبت به استاندارد ASTM C 78 [۱۶] رسم گراف از مراحل شروع بارگذاری تا گسیختگی نهایی می‌باشد که به وسیله



شکل ۱: دستگاه آزمایش خمش

Fig.1. Bending test setup

نوع الیاف می‌باشد. حرف S_1 برای الیاف فولاد صنعتی، حرف P برای پلی‌پروپیلن، حرف G برای شیشه، حرف S_2 برای فولاد ضایعاتی و حرف S برای کاه در نظر گرفته شده است. گفتنی است در این قسمت اگر الیاف بصورت ترکیبی باشد از دو حرف استفاده می‌گردد. مثلاً G,P یعنی الیاف شیشه و پلی‌پروپیلن. در قسمت سوم درصد الیاف بکار رفته گفته شده است. بطور مثال $(C-S_1, G-0.4, 0.1)$ یعنی ترکیب الیاف فولاد صنعتی و شیشه به مقدار 0.4% فولاد و 0.1% شیشه. در جدول ۸ مقادیر مقاومت‌های فشاری و کششی و در جدول ۹ مقادیر مقاومت‌های خمشی و جذب انرژی حاصل از انجام آزمایش‌ها ارائه شده است.

۳- نتایج

در این قسمت نتایج حاصل از انجام آزمایش بر روی نمونه‌ها ارائه شده است. با توجه به تعداد زیاد نمونه‌ها و تنوع در مقدار الیاف، به منظور سهولت در شناسایی نمونه‌ها و استفاده از یک قاعده مشخص، از عبارت زیر استفاده شده است:

(درصد الیاف) نوع الیاف نحوه اختلاط الیاف
 قسمت سوم قسمت دوم قسمت اول

حرف اول قسمت اول، نشانه این است که الیاف بصورت تکی یا ترکیبی استفاده شده است. حرف S برای الیاف تکی و حرف C برای الیاف ترکیبی در نظر گرفته شده است. حرف دوم قسمت دوم، نشانه

جدول ۹: نتایج مقاومت خمشی و جذب انرژی

Table 9. Results of flexural strength and energy absorption

جذب انرژی (N.m)	مقاومت خمشی (MPa)	طرح
۶/۴	۶/۳	بتن معمولی
۳	۳/۲	بتن سبک
۹/۵	۳	(S-S ₁ -۰.۱)
۷۳/۴	۳/۴	(S-S ₁ -۰.۲۵)
۸۲/۵	۳/۵	(S-S ₁ -۰.۴)
۱۱۴/۳	۴/۴	(S-S ₁ -۰.۵)
۳	۲/۶	(S-G-۰.۱)
۳/۴	۳/۹	(S-G-۰.۲۵)
۳/۳	۳/۷	(S-G-۰.۴)
۳/۲	۳/۷	(S-G-۰.۵)
۳/۶	۲/۵	(S-P-۰.۱)
۳/۸	۳/۲	(S-P-۰.۲۵)
۴/۳	۴/۴	(S-P-۰.۴)
۴	۴/۳	(S-P-۰.۵)
۲/۱	۲/۸	(S-S ₂ -۰.۱)
۳/۷	۳	(S-S ₂ -۰.۲۵)
۴/۶	۳/۵	(S-S ₂ -۰.۴)
۷/۲	۴	(S-S ₂ -۰.۵)
۲/۶	۲/۷	(S-S-۰.۱)
۲/۸	۳/۳	(S-S-۰.۲۵)
۳/۴	۳/۶	(S-S-۰.۴)
۳/۳	۳/۴	(S-S-۰.۵)
۹/۵	۳	(C-S ₁ ,G-۰.۱,۰.۴)
۷۳/۴	۳/۴	(C-S ₁ ,G-۰.۴,۰.۱)
۸۲/۵	۳/۵	(C-S ₁ ,G-۰.۲۵,۰.۲۵)
۱۱۴/۳	۴/۴	(C-S ₁ ,P-۰.۱,۰.۴)
۳	۲/۶	(C-S ₁ ,P-۰.۴,۰.۱)
۳/۲	۳/۹	(C-S ₁ ,P-۰.۲۵,۰.۲۵)
۳/۳	۳/۷	(C-G,P-۰.۱,۰.۴)
۳/۴	۳/۷	(C-G,P-۰.۴,۰.۱)
۳/۶	۲/۵	(C-G,P-۰.۲۵,۰.۲۵)
۳	۳/۴	(C-S ₂ ,S-۰.۱,۰.۴)
۲۷/۸	۴	(C-S ₂ ,S-۰.۴,۰.۱)
۵/۳	۳/۷	(C-S ₂ ,S-۰.۲۵,۰.۲۵)
۶/۲	۳/۲	(C-S ₁ ,G,P-۰.۱,۰.۱,۰.۳)
۳	۴/۱	(C-S ₁ ,G,P-۰.۱,۰.۳,۰.۱)
۷۵	۴/۵	(C-S ₁ ,G,P-۰.۳,۰.۱,۰.۱)

جدول ۸: نتایج مقاومت فشاری و مقاومت کششی

Table 8. Results of compressive and tensile strengths

مقاومت کششی (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)	طرح
۲/۷۵	۳۵/۳	بتن معمولی
۲/۲	۲۴	بتن سبک
۲/۳	۲۴/۵	(S-S ₁ -۰.۱)
۲/۳	۲۵/۷	(S-S ₁ -۰.۲۵)
۲/۴	۲۶	(S-S ₁ -۰.۴)
۲/۴۵	۲۶/۴	(S-S ₁ -۰.۵)
۲/۳	۲۴	(S-G-۰.۱)
۲/۵	۲۶/۵	(S-G-۰.۲۵)
۲/۴	۲۵/۸	(S-G-۰.۴)
۲/۴	۲۵/۳	(S-G-۰.۵)
۲/۲	۲۴/۵	(S-P-۰.۱)
۲	۲۳	(S-P-۰.۲۵)
۲	۲۱/۸۵	(S-P-۰.۴)
۱/۹۵	۲۱/۵	(S-P-۰.۵)
۲/۱	۲۴/۳	(S-S ₂ -۰.۱)
۲/۲	۲۵	(S-S ₂ -۰.۲۵)
۲/۲	۲۵/۵	(S-S ₂ -۰.۴)
۲/۳	۲۵/۹	(S-S ₂ -۰.۵)
۲/۳	۲۴/۵	(S-S-۰.۱)
۲/۲	۲۳	(S-S-۰.۲۵)
۲	۲۲/۱۵	(S-S-۰.۴)
۲	۲۱/۳	(S-S-۰.۵)
۲/۳	۲۴/۵	(C-S ₁ ,G-۰.۱,۰.۴)
۲/۳	۲۵/۷	(C-S ₁ ,G-۰.۴,۰.۱)
۲/۴	۲۶	(C-S ₁ ,G-۰.۲۵,۰.۲۵)
۲/۴۵	۲۶/۴	(C-S ₁ ,P-۰.۱,۰.۴)
۲/۳	۲۴	(C-S ₁ ,P-۰.۴,۰.۱)
۲/۵	۲۶/۵	(C-S ₁ ,P-۰.۲۵,۰.۲۵)
۲/۴	۲۵/۸	(C-G,P-۰.۱,۰.۴)
۲/۴	۲۵/۳	(C-G,P-۰.۴,۰.۱)
۲/۲	۲۴/۵	(C-G,P-۰.۲۵,۰.۲۵)
۲/۲۵	۲۳/۳	(C-S ₂ ,S-۰.۱,۰.۴)
۲/۳	۲۴/۵	(C-S ₂ ,S-۰.۴,۰.۱)
۲/۱	۲۳/۷	(C-S ₂ ,S-۰.۲۵,۰.۲۵)
۲/۲	۲۴/۳	(C-S ₁ ,G,P-۰.۱,۰.۱,۰.۳)
۲/۴	۲۴/۸	(C-S ₁ ,G,P-۰.۱,۰.۳,۰.۱)
۲/۳	۲۴/۲	(C-S ₁ ,G,P-۰.۳,۰.۱,۰.۱)

۳-۱- تحلیل نتایج آزمایش مقاومت فشاری

مقاومت فشاری بتن معمولی (شاهد) از بتن سبک مشابه خود بطور قابل ملاحظه‌ای بیشتر است. اختلاف بین بتن معمولی و بتن سبک در فشار $47/1\%$ می‌باشد. علت آن را می‌توان مقاومت بالای سنگدانه‌های طبیعی در بتن معمولی عنوان کرد.

۲- ییاف فولاد صنعتی به تنهایی با افزایش درصد ییاف باعث افزایش مقاومت فشاری شده است. بیشترین افزایش نسبت به بتن سبک، 10% بوده است.

۳- ییاف شیشه به تنهایی در 25% حجمی، دارای بیشترین افزایش مقاومت فشاری بوده است. در درصدهای بالاتر مقاومت کاهش یافته است. بیشترین افزایش نسبت به بتن سبک، $10/4\%$ بوده است.

۴- ییاف پلی‌پروپیلن به تنهایی در 1% حجمی، دارای بیشترین افزایش مقاومت فشاری بوده است. در درصدهای بالاتر، مقاومت کاهش یافته است. بیشترین افزایش نسبت به بتن سبک، $2/1\%$ بوده است.

۵- ییاف فولاد ضایعاتی به تنهایی با افزایش درصد ییاف باعث افزایش مقاومت فشاری شده است. بیشترین افزایش نسبت به بتن سبک، $7/9\%$ بوده است.

۶- ییاف کاه به تنهایی در 1% حجمی، دارای بیشترین افزایش مقاومت فشاری بوده است. در درصدهای بالاتر، مقاومت کاهش یافته است. بیشترین افزایش نسبت به بتن سبک، $2/1\%$ بوده است.

۷- در مجموع استفاده از ییاف بصورت تکی چندان در بالا بردن مقاومت فشاری تأثیر گذار نیست، دلیل آن را می‌توان در پایین بودن مقاومت ییاف‌ها عنوان نمود.

۸- در بخش ترکیب دوگانه ییاف‌ها، در ترکیباتی که از ییاف فولادی با درصد بالاتر استفاده شده است مقاومت فشاری افزایش یافته است. بطوریکه بیشترین افزایش مقاومت فشاری مربوط به ترکیب فولاد صنعتی و پلی‌پروپیلن با $4/0\%$ و $1/0\%$ می‌باشد. بیشترین افزایش مقاومت نسبت به بتن سبک، $12/5\%$ بدست آمده است.

۹- همانگونه که مشاهده می‌گردد مقدار بدست آمده در ترکیب دوگانه ییاف‌ها، از حالت‌های تکی ییاف‌ها بیشتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با ترکیب مناسب ییاف می‌توان به مقاومت بالاتری رسید که دلیل آن را می‌توان اینگونه عنوان نمود که با کاهش درصد ییاف در ترکیب‌های دوگانه، احتمال گلوله شدن و کاهش کارایی ییاف کم شده و ییاف عملکرد بهتری از خود نشان میدهد.

۱۰- در بخش ترکیب سه گانه ییاف‌ها، بیشترین مقاومت فشاری مربوط به ترکیب فولاد صنعتی، شیشه و پلی‌پروپیلن با $1/0\%$ و $3/0\%$ بوده است. حداکثر افزایش مقاومت نسبت به بتن سبک، $33/3\%$ بوده است. پایین بودن مقاومت فشاری در ترکیب‌های سه‌گانه را می‌توان اینگونه عنوان نمود که با توجه به کاهش درصد ییاف از حد مجاز، کارایی ییاف کاهش یافته و هر کدام از ییاف به تنهایی نمی‌تواند عملکرد مناسبی از خود نشان دهد.

۳-۲- تحلیل نتایج آزمایش مقاومت کششی

۱- مقاومت کششی بتن معمولی (شاهد) از بتن سبک مشابه خود بطور قابل ملاحظه‌ای بیشتر است. اختلاف بین بتن معمولی و بتن سبک در کشش 25% می‌باشد. علت آن را می‌توان مقاومت بالای سنگدانه‌های طبیعی در بتن معمولی عنوان کرد.

۲- ییاف فولاد صنعتی به تنهایی با افزایش درصد ییاف باعث افزایش مقاومت کششی شده است. بیشترین افزایش نسبت به بتن سبک، $11/4\%$ بوده است.

۳- ییاف شیشه به تنهایی در 25% حجمی، دارای بیشترین افزایش مقاومت کششی بوده است. در درصدهای بالاتر مقاومت کاهش یافته است. بیشترین افزایش نسبت به بتن سبک، $13/6\%$ بوده است.

۴- ییاف پلی‌پروپیلن به تنهایی در 1% حجمی، دارای بیشترین افزایش مقاومت کششی بوده است. در درصدهای بالاتر، مقاومت کاهش یافته است. بیشترین افزایش نسبت به بتن سبک، 0% بوده است.

۵- ییاف فولاد ضایعاتی به تنهایی با افزایش درصد ییاف باعث افزایش مقاومت کششی شده است. بیشترین افزایش نسبت به بتن سبک، $4/5\%$ بوده است.

۶- ییاف کاه به تنهایی در 1% حجمی، دارای بیشترین افزایش مقاومت کششی بوده است. در درصدهای بالاتر، مقاومت کاهش یافته است. بیشترین افزایش نسبت به بتن سبک، $4/5\%$ بوده است.

۷- در مجموع استفاده از ییاف بصورت تکی چندان در بالا بردن مقاومت کششی تأثیر گذار نیست، دلیل آن را می‌توان در پایین بودن مقاومت کششی ییاف‌ها عنوان نمود.

۸- در بخش ترکیب دوگانه ییاف‌ها، در ترکیباتی که از ییاف فولادی با درصد بالاتر استفاده شده است مقاومت کششی افزایش یافته است. لیکن بیشترین مقاومت کششی در ترکیب شیشه، پلی‌پروپیلن با $25/0\%$ بدست آمده است. بیشترین افزایش مقاومت کششی نسبت به بتن سبک، $18/2\%$ بدست آمده است.

۹- همانگونه که مشاهده می‌گردد مقدار بدست آمده در ترکیب دوگانه ییاف‌ها، از حالت‌های تکی ییاف‌ها بیشتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با ترکیب مناسب ییاف می‌توان به مقاومت بالاتری رسید که دلیل آن را می‌توان اینگونه عنوان نمود که با کاهش درصد ییاف در ترکیب‌های دوگانه، احتمال گلوله شدن و کاهش کارایی ییاف کم شده و ییاف عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند.

۱۰- در بخش ترکیب سه گانه ییاف‌ها، بیشترین مقاومت کششی مربوط به ترکیب فولاد صنعتی، شیشه و پلی‌پروپیلن با $1/0\%$ و $3/0\%$ بوده است. حداکثر افزایش مقاومت نسبت به بتن سبک، $9/1\%$ بوده است. پایین بودن مقاومت کششی در ترکیب‌های سه‌گانه را می‌توان اینگونه عنوان نمود که با توجه به کاهش درصد ییاف از حد مجاز، کارایی ییاف کاهش یافته و هر کدام از ییاف‌ها به تنهایی نمی‌توانند عملکرد مناسبی از خود نشان دهند.

۳-۳- تحلیل نتایج آزمایش مقاومت خمشی

۱- مقاومت خمشی بتن معمولی (شاهد) از بتن سبک مشابه خود بطور قابل ملاحظه‌ای بیشتر است. اختلاف بین بتن معمولی و بتن سبک در خمش $9/96\%$ می‌باشد که علت آن را می‌توان مقاومت بالای سنگدانه‌های طبیعی در بتن معمولی عنوان کرد.

۲- الیاف فولاد صنعتی به تنهایی با افزایش درصد الیاف باعث افزایش مقاومت خمشی شده است. بیشترین افزایش نسبت به بتن سبک، $5/37\%$ بوده است.

۳- الیاف شیشه به تنهایی در $25/0\%$ حجمی، دارای بیشترین افزایش مقاومت خمشی بوده است. در درصد‌های بالاتر مقاومت کاهش یافته است. بیشترین افزایش نسبت به بتن سبک، $9/21\%$ بوده است.

۴- الیاف پلی‌پروپیلن به تنهایی در $4/0\%$ حجمی، دارای بیشترین افزایش مقاومت خمشی بوده است. در درصد‌های بالاتر، مقاومت کاهش یافته است. بیشترین افزایش نسبت به بتن سبک، $5/37\%$ بوده است.

۵- الیاف فولاد ضایعاتی به تنهایی با افزایش درصد الیاف باعث افزایش مقاومت خمشی شده است. بیشترین افزایش نسبت به بتن سبک، $25/0\%$ بوده است.

۶- الیاف کاه به تنهایی در $4/0\%$ حجمی، دارای بیشترین افزایش مقاومت خمشی بوده است. در درصد‌های بالاتر، مقاومت کاهش یافته است. بیشترین افزایش نسبت به بتن سبک، $5/12\%$ بوده است.

۷- همانگونه که ملاحظه می‌شود استفاده از الیاف در بتن، عملکرد بسیار بهتری در افزایش مقاومت خمشی نسبت به مقاومت فشاری و کششی دارد که علت آن را می‌توان در شکل پذیری خوب الیاف بخصوص الیاف فولادی جستجو نمود.

۸- در بخش ترکیب دوگانه الیاف‌ها، بیشترین مقاومت خمشی در ترکیب شیشه، پلی‌پروپیلن با $25/0\%$ بدست آمده است. بیشترین افزایش مقاومت نسبت به بتن سبک، $6/40\%$ بدست آمده است.

۹- همانگونه که مشاهده می‌گردد مقدار بدست آمده در ترکیب دوگانه الیاف‌ها، از حالت‌های تکی الیاف‌ها بیشتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با ترکیب مناسب الیاف می‌توان به مقاومت بالاتری رسید که دلیل آن را می‌توان اینگونه عنوان نمود که با کاهش درصد الیاف در ترکیب‌های دوگانه، احتمال گلوله شدن و کاهش کارایی الیاف کم شده و الیاف عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد.

۱۰- در بخش ترکیب سه‌گانه الیاف‌ها، بیشترین مقاومت خمشی مربوط به ترکیب فولاد صنعتی، شیشه و پلی‌پروپیلن با $3/0\%$ و $1/0\%$ بوده است. حداکثر افزایش مقاومت نسبت به بتن سبک، $6/40\%$ بوده است. همانطور که ملاحظه می‌شود به دلیل کارایی خوب الیاف، حتی در درصد‌های پایین نیز مقاومت خمشی زیاد است و با ترکیب‌های دوگانه برابری می‌کند. لیکن به دلیل اجرایی استفاده از سه نوع الیاف نسبت به دو نوع الیاف مشکلتر است.

۳-۴- تحلیل نتایج آزمایش جذب انرژی

۱- جذب انرژی بتن معمولی (شاهد) از بتن سبک مشابه خود بطور قابل ملاحظه‌ای بیشتر است. اختلاف بین بتن معمولی و بتن سبک $3/113\%$ می‌باشد که علت آن را می‌توان مقاومت بالای سنگدانه‌های طبیعی در بتن معمولی عنوان کرد.

۲- الیاف فولاد صنعتی به تنهایی با افزایش درصد الیاف باعث افزایش جذب انرژی، شده است. بیشترین افزایش نسبت به بتن سبک، $10/37\%$ بوده است.

۳- الیاف شیشه به تنهایی در $25/0\%$ حجمی، دارای بیشترین افزایش جذب انرژی بوده است. در درصد‌های بالاتر جذب انرژی کاهش یافته است. بیشترین افزایش نسبت به بتن سبک، $3/13\%$ بوده است.

۴- الیاف پلی‌پروپیلن به تنهایی در $4/0\%$ حجمی، دارای بیشترین افزایش جذب انرژی بوده است. در درصد‌های بالاتر، جذب انرژی کاهش یافته است. بیشترین افزایش نسبت به بتن سبک، $3/43\%$ بوده است.

۵- الیاف فولاد ضایعاتی به تنهایی با افزایش درصد الیاف باعث افزایش جذب انرژی شده است. بیشترین افزایش نسبت به بتن سبک، $40/1\%$ بوده است.

۶- الیاف کاه به تنهایی در $4/0\%$ حجمی، دارای بیشترین افزایش جذب انرژی بوده است. در درصد‌های بالاتر، جذب انرژی کاهش یافته است. بیشترین افزایش نسبت به بتن سبک، $3/13\%$ بوده است.

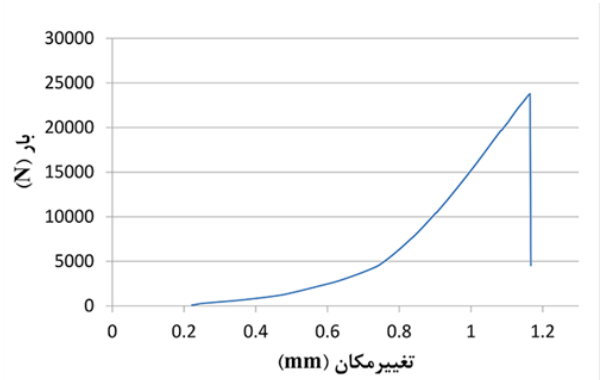
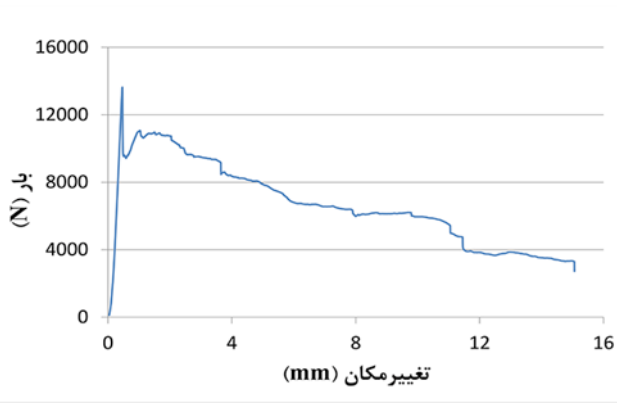
۷- همانگونه که ملاحظه می‌شود استفاده از الیاف در بتن، عملکرد بسیار بهتری در افزایش جذب انرژی نسبت به مقاومت فشاری و کششی دارد که علت آن را می‌توان در شکل پذیری خوب الیاف بخصوص الیاف فولادی جستجو نمود.

۸- در بخش ترکیب دوگانه الیاف‌ها، بیشترین جذب انرژی در ترکیب فولاد صنعتی، شیشه، با $4/0\%$ و $1/0\%$ بدست آمده است. بیشترین افزایش جذب انرژی نسبت به بتن سبک، $7/3166\%$ بدست آمده است.

۹- همانگونه که مشاهده می‌گردد مقدار بدست آمده در ترکیب دوگانه الیاف‌ها، از حالت‌های تکی الیاف‌ها بیشتر است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که با ترکیب مناسب الیاف می‌توان به مقاومت بالاتری رسید که دلیل آن را می‌توان اینگونه عنوان نمود که با کاهش درصد الیاف در ترکیب‌های دوگانه، احتمال گلوله شدن و کاهش کارایی الیاف کم شده و الیاف عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد.

۱۰- در بخش ترکیب سه‌گانه الیاف‌ها، بیشترین جذب انرژی مربوط به ترکیب فولاد صنعتی، شیشه و پلی‌پروپیلن با $3/0\%$ و $1/0\%$ بوده است. حداکثر افزایش جذب انرژی نسبت به بتن سبک، $240/2\%$ بوده است. همانطور که ملاحظه می‌شود به دلیل کارایی خوب الیاف، حتی در درصد‌های پایین نیز جذب انرژی زیاد است و با ترکیب‌های دوگانه برابری می‌کند. لیکن به دلیل اجرایی استفاده از سه نوع الیاف نسبت به دو نوع الیاف مشکلتر است.

در اشکال ۲ الی ۱۲ نمودار بار-تغییر مکان تعدادی از نمونه‌ها آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، در نمونه‌هایی که از الیاف فولاد صنعتی استفاده شده است سطح زیر نمودار بزرگتری نسبت به سایر نمونه‌ها داشته است. و این نشان‌دهنده عملکرد بسیار خوب الیاف فولادی در افزایش شکل پذیری بتن است.

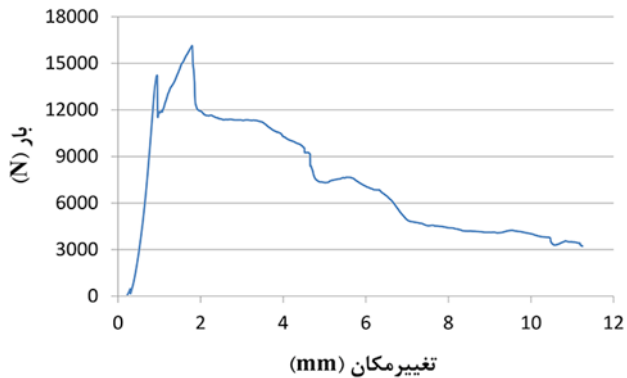


شکل ۲: نمودار بار-تغییر مکان بتن معمولی (شاهد)

Fig.2. Load-displacement diagram of normal (control) concrete

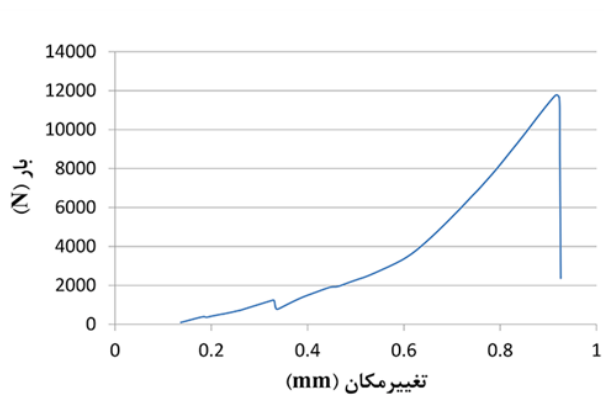
شکل ۵: نمودار بار-تغییر مکان بتن سبک با ترکیب ۰/۴٪ الیاف فولاد صنعتی و ۰/۱٪ شیشه

Fig.5. Load-displacement diagram of lightweight concrete with %0.4 of industrial steel fibers and %0.1 glass fibers



شکل ۳: نمودار بار-تغییر مکان بتن سبک (شاهد)

Fig.3. Load-displacement diagram of lightweight (control) concrete

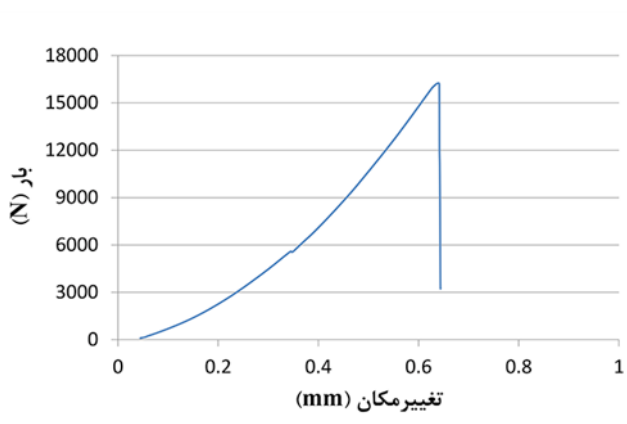


شکل ۶: نمودار بار-تغییر مکان بتن سبک با ترکیب ۰/۴٪ الیاف فولاد صنعتی و ۰/۱٪ پلی پروپیلین

Fig.6. Load-displacement diagram of lightweight concrete with %0.4 industrial steel fibers and %0.1 polypropylene fibers

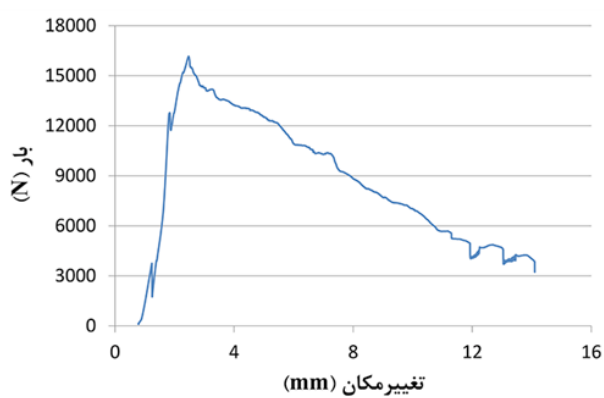
شکل ۳: نمودار بار-تغییر مکان بتن سبک (شاهد)

Fig.3. Load-displacement diagram of lightweight (control) concrete



شکل ۷: نمودار بار-تغییر مکان بتن سبک با ترکیب ۰/۴٪ الیاف شیشه و ۰/۱٪ پلی پروپیلین

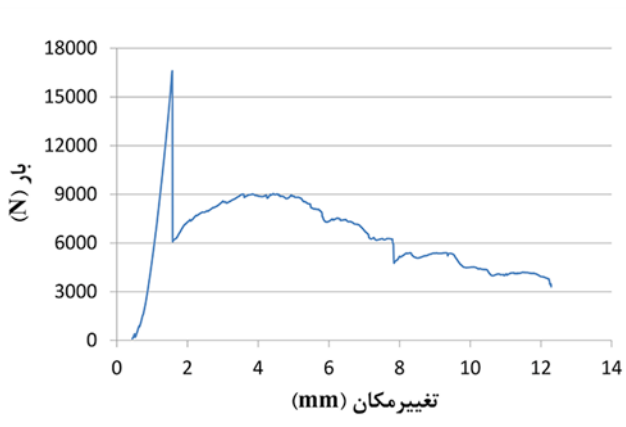
Load-displacement diagram of Fig.7. lightweight concrete with %0.4 glass



شکل ۴: نمودار بار-تغییر مکان بتن سبک با ۰/۵٪ الیاف فولاد صنعتی

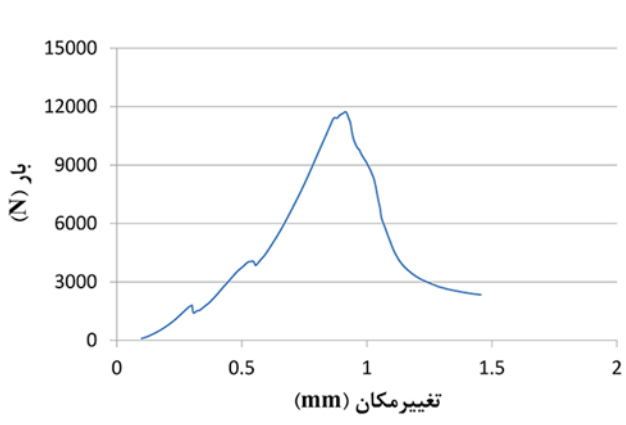
Load-displacement diagram of lightweight concrete with %0.5 of industrial steel fibers

glass fibers and %0.1 of polypropylene fibers



شکل ۱۱: نمودار بار-تغییر مکان بتن سبک با ترکیب ۰/۳٪ الیاف فولاد صنعتی و ۰/۱٪ شیشه و ۰/۱٪ پلی پروپیلن

Fig.11. Load-displacement diagram of lightweight concrete with %0.3 of industrial steel fibers, %0.1 of glass fibers and %0.1 of polypropylene fibers



شکل ۱۲: نمودار بار-تغییر مکان بتن سبک با ترکیب ۰/۱٪ الیاف فولاد صنعتی و ۰/۱٪ شیشه و ۰/۳٪ پلی پروپیلن

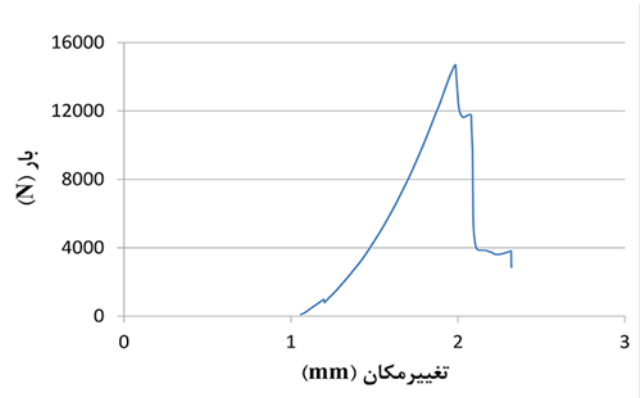
Fig.12. Load-displacement diagram of lightweight concrete with %0.1 of industrial steel fibers, %0.1 of glass fibers and %0.3 of polypropylene fibers

۴- نتیجه گیری

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی، خمشی و جذب انرژی حاصل از ۳۷ طرح ساخته شده از ۵ نوع الیاف بصورت تکی و ترکیبی، نتایج زیر قابل ارائه می‌باشد:

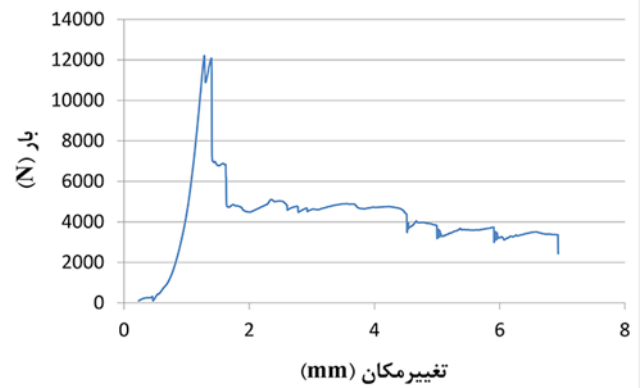
- ۱- خواص مکانیکی بتن معمولی از بتن سبک مشابه خود بطور قابل ملاحظه بیشتر است، بطوریکه مقاومت‌های حاصل از بتن معمولی در فشار ۱/۵ برابر، در کشش ۱/۲ برابر و در خمش و جذب انرژی ۲ برابر بتن سبک می‌باشد. علت آن مقاومت بالای سنگدانه‌های طبیعی در بتن معمولی نسبت به سنگدانه‌های سبک در بتن سبک است.

polypropylene fibers %0.1 fibers and



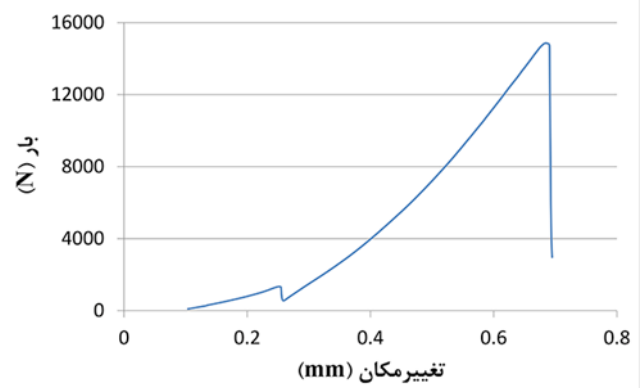
شکل ۸: نمودار بار-تغییر مکان بتن سبک با ۰/۵٪ الیاف فولاد ضایعاتی

Fig.8. Load-displacement diagram of lightweight concrete with %0.5 of waste steel fibers



شکل ۹: نمودار بار-تغییر مکان بتن سبک با ترکیب ۰/۴٪ الیاف فولاد ضایعاتی و ۰/۱٪ کاه

Fig.9. Load-displacement diagram of lightweight concrete with %0.4 of waste steel fibers and %0.1 straw fibers



شکل ۱۰: نمودار بار-تغییر مکان بتن سبک با ترکیب ۰/۱٪ الیاف فولاد صنعتی و ۰/۳٪ شیشه و ۰/۱٪ پلی پروپیلن

Fig.10. Load-displacement diagram of lightweight concrete with %0.1 of industrial steel fibers, %0.3 of

- Fibers in Concrete, *Proceedings of the 3rd National Concrete Conference of Iran*, Tehran, (2011). (In Persian)
- [5] Sorelli, L.G., "Steel Fiber Concrete Slabs on Ground", *ACI Structural Journal*, 103 (2006) pp. 551-558.
- [6] Poulsen, K., "Shear Capacity of Steel and Polymer Fiber Reinforced Concrete Beams", *Materials and Structures*, 44 (2011) pp. 1079-1091.
- [7] Kim, W., "Shear Testing of Steel Fiber-Reinforced Lightweight Concrete Beams Without Web Reinforcement", *ACI Structural Journal*, 108 (2011) pp. 553-561.
- [8] Perry, B., "Reinforcing External Pavements with both Large and Small Synthetic Fibers", *Concrete*, (2003) pp. 46-47
- [9] ASTM C-204, "Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus", *ASTM International*, 2008
- [10] ASTM C-191, "Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle", *ASTM International*, 2008.
- [11] ASTM C-109, "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)", *ASTM International*, 2012
- [12] ASTM C-151, "Standard Test Method for Autoclave Expansion of Hydraulic Cement", *ASTM International*, 2009.
- [13] ASTM C-39, "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens", *ASTM International*, 2003.
- [14] ASTM C-496, "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens", *ASTM International*, 1992.
- [15] ASTM C-1018, "Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading)", *ASTM International*, 1997.
- [16] ASTM C-78, "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)", *ASTM International*, 2002.

۲- افزایش قابل ملاحظه شکل پذیری با استفاده از الیاف. بطوریکه با استفاده از ۰/۵٪ الیاف فولاد صنعتی، ۴۰ برابر جذب انرژی نسبت به بتن سبک افزایش یافته است. علت آن را می توان شکل پذیری بسیار خوب الیاف فولادی عنوان نمود.

۳- عملکرد الیاف شیشه در فشار و کشش نسبت به سایر الیافها بهتر بوده است. بطوریکه با ۰/۲۵٪ مقدار الیاف، بیشترین مقاومت فشاری و کششی به دست آمده است. همانطور که در جدول ۵ نیز مشاهده می شود مقاومت کششی الیاف شیشه نسبت به سایر الیافها بالاتر است.

۴- در مجموع استفاده از الیاف چندان در بالا بردن مقاومت های فشاری و کششی مؤثر نبوده است. بطور میانگین در نمونه های با یک نوع الیاف، ۶/۸ درصد و در نمونه های ترکیبی ۹ درصد افزایش مشاهده شده است که رقم به نسبت پایینی است. علت آن را می توان پایین بودن مقاومت های فشاری و کششی الیاف دانست.

۵- با مقایسه مقاومت های بدست آمده مشاهده می شود که عملکرد الیاف فولاد ضایعاتی و گاه شبیه الیاف فولاد صنعتی و پلی پروپیلن است. بنابراین می توان از این الیاف نیز بنحوی استفاده نمود.

۶- استفاده مناسب از ترکیب دوگانه الیاف می تواند:

الف) مقاومت را نسبت به بتن با یک الیاف افزایش دهد.

ب) از پدیده گلوله شدگی الیاف که در درصد های بالای استفاده رخ می دهد جلوگیری نمود.

ج) به دلیل استفاده همزمان از دو نوع الیاف با خواص متفاوت، بتن ساخته شده می تواند دارای خواص مطلوبتری نسبت به بتن با یک نوع الیاف باشد.

مراجع

- [1] A. A. Ramezani pour, *Concrete Technology*, Parham Publications, Tehran, (2011). (In Persian)
- [2] M. Shekarchizadeh, N. Aliliber, M. Jalili, *Practical Guideline for Structural Lightweight Concrete*, Elm-o-Adab Publication, Tehran, (2011). (In Persian)
- [3] M. Peydayesh, *Study of the Amount of Energy Absorption and Flexural Strength of Concrete with Hybrid Steel-Polypropylene Fibers*, *Proceedings of the 3rd National Concrete Conference of Iran*, Tehran, (2011). (In Persian)
- [4] S. Rabbani, *Study of Characteristics of Types of Hybrid*

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Hejazi, F. Fathi, H.R. Sadrarhami, "Study of Mechanical Properties of Structural Lightweight Concrete Reinforced with Hybrid Fibers". *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(2) (2017) 335-345.

DOI:10.22060/ceej.2015.555



