

بتن توانمند مسلح به الیاف تولید شده از تسمه

دکتر علیرضا خالو؛ عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی شریف-رئیس قطب سازه و زلزله

khaloo@sharif.edu-(21) 6616-4211

امین اسرافیلی^۱؛ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی شریف

Mr.esrafil@gmail.com-09192111047

سید روح الله موسوی؛ دانشجوی کارشناسی دانشگاه صنعتی شریف

Mosavi.22.9@gmail.com -09390595242

کد مقاله C؛ کد انجمن 9C-2

چکیده:

در این مقاله امکان استفاده مجدد از الیاف پلیمری مستخرج از تسمه‌های ضایعاتی اتومبیل در بتن‌های توانمند مورد بررسی قرار گرفته است. مقاومت فشاری نمونه‌ی شاخص برابر ۷۰ مگا پاسکال و قطر جریان اسلامپ آن ۷۰ مگا پاسکال می‌باشد. به منظور در نظر گرفتن تأثیر طول الیاف، الیاف در دو طول مختلف ۲ سانتی‌متر و ۴ سانتی‌متری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این تحقیق آزمایشات متنوعی همچون تست مقاومت فشاری، تست مقاومت خمشی تیر، تست طاق خمشی و تست فراصوت صورت پذیرفته است. بعلاوه به منظور بررسی کارایی بتن، تست قطر جریان اسلامپ بر روی بتن تازه انجام پذیرفته است. نتایج آزمایشگاهی نمایان ساخت که استفاده از درصدهای پایین الیاف (کمتر از ۰.۵٪ از حجم بتن) نه تنها موجب افزایش شکل‌پذیری بتن می‌گردد بلکه بعضی از خصوصیات مهم بتن همچون مقاومت خمشی و طاق خمشی را نیز بهبود می‌بخشد. از سوی دیگر، استفاده از درصدهای بالای الیاف با وجود تأثیر منفی بر مقاومت فشاری بتن، می‌تواند موجب افزایش طاق خمشی نمونه‌ها گردد.

کلمات کلیدی:

الیاف ضایعاتی، بتن توانمند، تسمه اتومبیل، مدول گسیختگی، طاق خمشی، مقاومت فشاری

مقدمه

اهمیت توسعه‌ی پایدار و حفاظت از منابع محیط‌زیست موجب توجه بیش از پیش به مواد ضایعاتی و روش‌های استفاده‌ی مجدد از آن‌ها گردیده است. یکی از روش‌های متداول در مهندسی عمران استفاده از مواد دور ریز و ضایعاتی در محصولات سیمانی می‌باشد. استفاده از مواد ضایعاتی علاوه بر اینکه در کاهش هزینه‌های پروژه مؤثر است نقش به‌سزایی در حفاظت از محیط‌زیست ایفا می‌نماید. مواد ضایعاتی ممکن است نقش‌های متفاوتی در بتن ایفا نمایند. گاهی مواد حاصل از ضایعات به عنوان سنگ‌دانه در بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱-۳] و گاهی از این دست مواد به‌عنوان ماده‌ی پرکننده^۲ استفاده می‌گردد [۴]. یکی دیگر از کاربردهای مواد ضایعاتی در بتن استفاده از آن به عنوان الیاف می‌باشد [۵-۷].

بر اساس آمار ارائه شده در سایت سازمان بین‌المللی تولیدکنندگان خودروهای موتوری^۳ [۸] تعداد خودروهای تولید شده در جهان در سال ۲۰۰۲ میلادی، افزون بر ۵۸ میلیون برآورد شده است و این تعداد برای سال ۲۰۱۲ به ۸۴ میلیون خودرو رسیده است. همان‌گونه که در این ده سال تعداد اتومبیل‌های تولید شده در جهان به میزان ۴۵ درصد افزایش یافته است، چنین گمان می‌رود که در سالیان آتی نیز این روند رو به افزایش ادامه یابد.

در اکثر اتومبیل‌های مدرن از تسمه^۴ استفاده شده است. معمولاً زمان تعویض تسمه‌ی اتومبیل بسته به مسافت پیموده شده و یا مدت زمان استفاده از آن، توسط کارخانه‌ی سازنده مشخص می‌شود. به طور معمول مسافت قابل قبول برای استفاده از تسمه‌ی اتومبیل بین ۶۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ مایل می‌باشد [۹]. با توجه به آمارهای ارائه شده می‌توان نتیجه گرفت که سالانه حجم قابل توجه‌ای تسمه‌ی فرسوده‌ی خودرو در جهان به صورت ماده‌ی ضایعاتی به دور انداخته می‌شود. تاکنون کاربرد خاصی برای این تسمه‌های فرسوده مطرح نگردیده است.

^۲ filler

^۳ The International Organization of Motor Vehicle Manufacturers

^۴ timing belt

اکثر تسمه‌های بکار رفته در اتومبیل به‌وسیله‌ی رشته‌های دارای مقاومت کششی بالا همچون کولار در سرتاسر طول خود مستحکم شده‌اند. این رشته‌ها تسمه را در برابر نیروهای کششی و بارهای متناوب وارد شده به آن مقاوم می‌سازند. در این تحقیق رشته‌های بکار رفته در تسمه‌های اتومبیل مجدداً استحصال شده و کاربرد آن به عنوان الیاف در بتن‌های توانمند^۵ مورد بررسی قرار گرفته است. بتن توانمند به دسته‌ای ویژه از بتن‌ها اطلاق می‌شود که دارای خصوصیات و ویژگی‌هایی فراتر از بتن‌های معمولی است. نسبت آب به سیمان پایین، مقاومت فشاری بالا، دوام بالا و کارایی مناسب از ویژگی‌های متداول در بتن‌های توانمند محسوب می‌شود [۱۰]. فوق روانسازها و افزودنی‌های معدنی همچون میکرو سیلیس جزو مطرح‌ترین افزودنی‌های بتن توانمند می‌باشند [۱۱]. حدود آب به مواد سیمانی که معمولاً در بتن‌های توانمند مورد استفاده قرار می‌گیرد در بازه‌ی ۰,۲ تا ۰,۴۵ می‌باشد [۱۰]. در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر میزان الیاف ضایعاتی بر خصوصیات بتن، الیاف در ۴ اندازه‌ی متفاوت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. انتخاب میزان الیاف به‌گونه‌ای بود که علاوه بر درصد‌های پایین الیاف (۰,۲ درصد حجم بتن)، درصد‌های نسبتاً بالای الیاف را نیز (۱,۵ درصد حجم بتن) شامل شود. همچنین به‌منظور در نظر گرفتن تأثیر طول الیاف، الیاف در دو طول مختلف ۲ سانتی‌متر و ۴ سانتی‌متری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. آزمایشات مختلفی از جمله مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، سرعت امواج فراصوت در بتن و قطر جریان اسلامپ بر روی نمونه‌ها انجام پذیرفت. تمامی این آزمایشات در دانشگاه صنعتی شریف صورت پذیرفته است.

مصالح بتن

در این تحقیق به منظور ساخت نمونه‌ها از سیمان تیپ دو تهران، میکرو سیلیس تولید شده در شرکت شیمی ساختمان استفاده گردیده است. فوق روان کننده‌ی مورد استفاده در این تحقیق از شرکت الجی کم^۶ تهیه گردید. این فوق روان کننده بر پایه‌ی پلی کربوکسیلات بوده و دارای نام تجاری WBM می‌باشد. درصد استفاده از فوق روان ساز بر اساس سعی و خطا، با هدف دستیابی به جریان اسلامپ بالاتر از ۴۰ سانتی‌متر مشخص گردید [۱۲].

^۵ High Performance Concrete (HPC)

^۶ LG Chem

الیاف ضایعاتی مورد استفاده در این پروژه، از استحصال رشته‌های پلیمری موجود در تسمه‌های اتومبیل بدست آمده‌اند. با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام پذیرفته قطر میانگین این الیاف برابر ۰.۶ میلی‌متر بوده و دارای سطح مقطع تقریباً دایروی می‌باشند. جنس این الیاف بر اساس آزمایشات شیمیایی صورت پذیرفته پلی‌استر تشخیص داده شده است.

در این پژوهش مجموعاً ۹ طرح اختلاط متفاوت مورد آزمایش قرار گرفته است که از میان آن‌ها یک طرح به عنوان طرح شاهد و بدون الیاف بوده و ۸ طرح مابقی مسلح به الیاف ضایعاتی می‌باشند. نحوه‌ی نام‌گذاری هریک از طرح اختلاط‌ها به فرم HL-V می‌باشد. در این نام‌گذاری حرف H مخفف بتن توانمند (High performance concrete) می‌باشد. همچنین L طول الیاف بکار رفته در بتن را مشخص می‌کند و V درصد حجمی الیاف موجود در بتن را نمایش می‌دهد. به عنوان مثال طول الیاف به کار رفته در نمونه‌ی H2-1.5 برابر ۲ سانتی‌متر و حجم الیاف بکار رفته در این نمونه برابر ۱.۵٪ از حجم بتن می‌باشد. علاوه بر این بتن شاخص که بدون استفاده از الیاف ساخته شده است به صورت H0 نمایش داده می‌شود. طرح اختلاط تمامی نمونه‌ها در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱ طرح اختلاط نمونه‌ها و نتایج آزمایش قطر جریان اسلامپ

Mixture	Fiber (%)	W/B Ratio	Cement ($\frac{kg}{m^3}$)	Silica fume ($\frac{kg}{m^3}$)	Water ($\frac{kg}{m^3}$)	Gravel ($\frac{kg}{m^3}$)	Sand ($\frac{kg}{m^3}$)	Super plasticizer ($\frac{kg}{m^3}$)	Slump flow diameter (mm)
H 0	0	0.35	450	50	175	777	933	3.75	514
H 2-0.2	0.2	0.35	450	50	175	777	933	5	532
H 2-0.5	0.5	0.35	450	50	175	777	933	5	440
H 2-1.0	1	0.35	450	50	175	777	933	6.5	435
H2-1.5	1.5	0.35	450	50	175	777	933	9	416
H4-0.2	0.2	0.35	450	50	175	777	933	5	579
H4-0.5	0.5	0.35	450	50	175	777	933	5	445
H 4-1.0	1	0.35	450	50	175	777	933	6.5	451
H 4-1.5	1.5	0.35	450	50	175	777	933	9	407

برنامه‌ی آزمایشگاهی

از هر طرح اختلاط ۹ نمونه‌های مکعبی به ابعاد $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متر و به منظور انجام آزمایشات خمشی ۳ نمونه‌های منشوری

شکل به ابعاد $500 \times 100 \times 100$ میلی‌متر تهیه گردید [۱۳، ۱۴].

نمونه‌های منشوری بر اساس استاندارد ASTM C 293 [۱۵] در سن ۲۸ روز تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای قرار گرفتند. این آزمایش به صورت تغییر مکان کنترل و با سرعت ثابت 0.01 میلی‌متر بر ثانیه صورت پذیرفت. در این آزمایش فاصله بین دو تکیه‌گاه برابر 40 سانتی‌متر در نظر گرفته شد. آزمایش اندازه‌گیری امواج فراصوت نیز در سنین 28.7 و 91 روز بر اساس استاندارد ASTM C597 [۱۶] بر روی نمونه‌های مکعبی صورت پذیرفت.

نتایج آزمایشگاهی و تحلیل نتایج

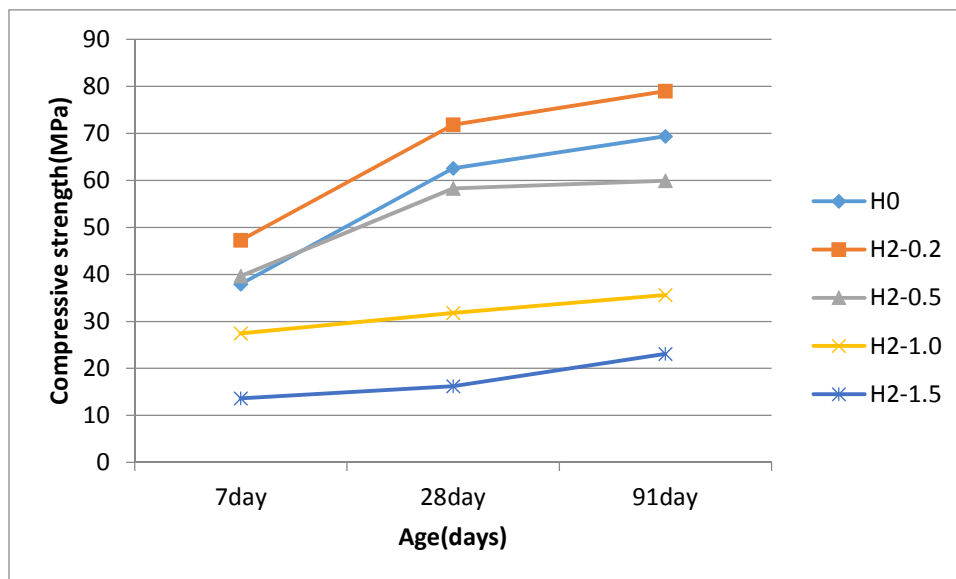
مقاومت فشاری

مداح^۷ و بنجیح^۸ [۱۷] در تحقیقات خود به این نتیجه رسیده‌اند که افزودن الیاف به ترکیب بتن باعث افزایش میزان خلل و فرج در بتن می‌شود. این افزایش خلل و فرج می‌تواند موجب کاهش مقاومت فشاری بتن مسلح گردد. علاوه بر این موضوع اتصال ضعیف بین ماتریس بتن و سطح خارجی الیاف نیز می‌تواند موجب کاهش در میزان مقاومت نمونه‌های بتن مسلح به الیاف نسبت به بتن ساده گردد.

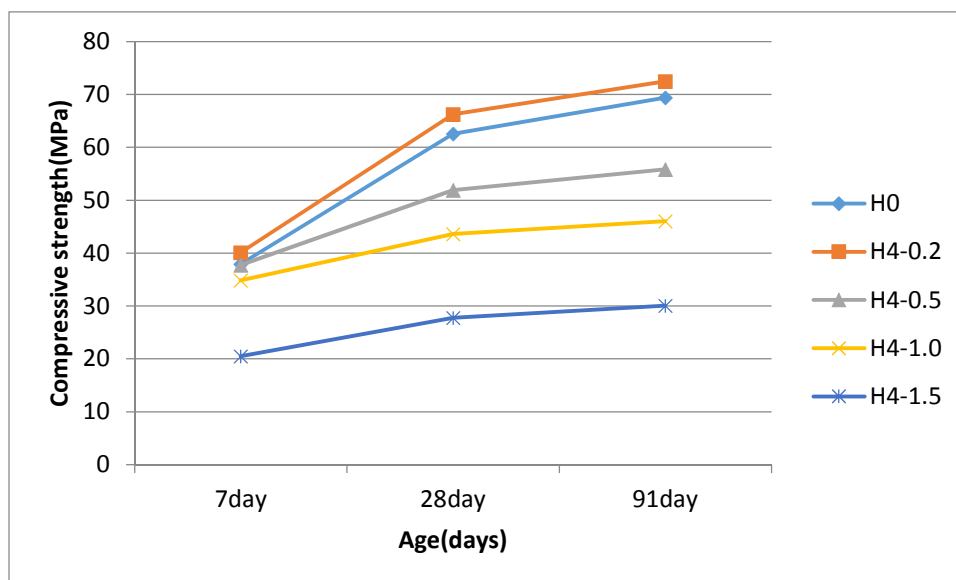
شکل ۱ و شکل ۲ به ترتیب میزان مقاومت فشاری نمونه‌های بتن مسلح به الیاف ۲ و ۴ سانتی‌متری را در سنین 28.7 و 91 نمایش می‌دهند. طبق نتایج بدست آمده نمونه‌های دارای 0.2% الیاف (H2-0.2 و H4-0.2) مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه‌ی شاخص دارا می‌باشند. این افزایش مقاومت ممکن است به دلیل روانی بالاتر این دو نمونه نسبت به بتن شاخص پدید آمده باشد (خصوصیات مربوط به بتن تازه در جدول ۱ آمده است). از سوی دیگر اضافه نمودن الیاف به میزان 0.5% تا 1.5% از حجم بتن موجب کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌ی شاخص گردیده است. علت این کاهش مقاومت افزایش خلل و فرج موجود در بتن می‌باشد.

^۷ Meddah

^۸ Bencheikh



شکل ۱ مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌های دارای الیاف ۲ سانتی‌متری و بتن شاخص



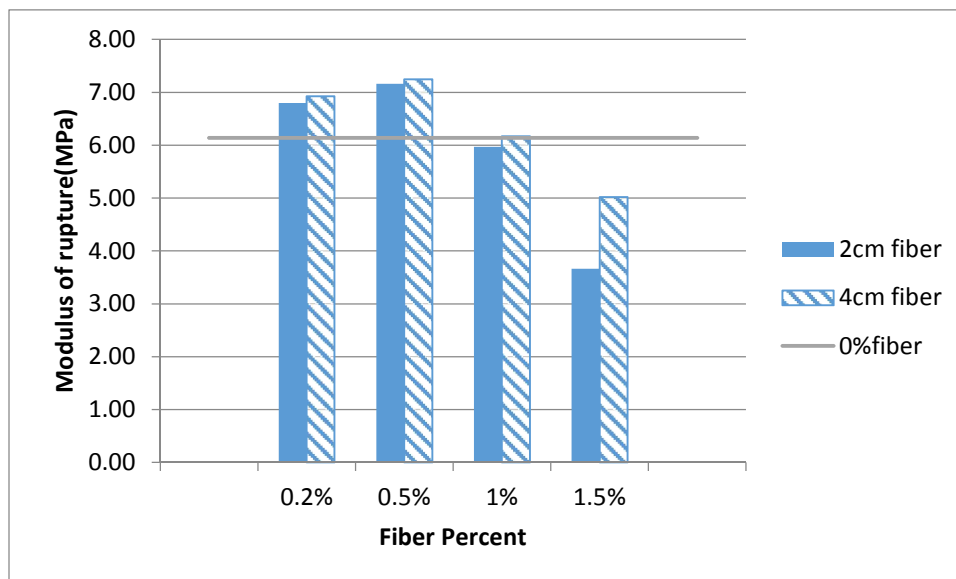
شکل ۲ مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌های دارای الیاف ۴ سانتی‌متری و بتن شاخص

مدول گسیختگی

با استفاده از نتایج بدست آمده در آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای که بر روی نمونه‌های تیر انجام شد، مدول گسیختگی نمونه‌های ۲۸ روزه

محاسبه گردیده است. این نتایج بر اساس استاندارد ASTM C293 [15] محاسبه و در شکل ۳ نمایش داده شده است. در این شکل

خط افقی مدول گسیختگی مربوط به نمونه‌ی شاخص را نمایش می‌دهد.



شکل ۳ نمودار مدول گسیختگی بر حسب درصد الیاف

همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، استفاده از الیاف در درصدهای ۰٫۲ و ۰٫۵ باعث افزایش مدول گسیختگی در نمونه‌ها گردیده است؛ اما در نمونه‌هایی که دارای درصدهای بالاتری از الیاف می‌باشند میزان مدول گسیختگی نسبت به نمونه‌ی شاخص کاهش یافته است. مدول گسیختگی نمونه‌ی H4-1.0 تقریباً برابر نمونه‌ی شاخص بوده و تنها به میزان ۰٫۵٪ از آن بالاتر می‌باشد.

وجود الیاف در بتن مانع گسترش و پخش ترک در بتن می‌شود. این موضوع دلیل اصلی افزایش مدول گسیختگی در نمونه‌های H2-

0.2، H2-0.5، H4-0.2 و H4-0.5 نسبت به نمونه‌ی شاخص می‌باشد. از سوی دیگر افزایش میزان الیاف موجب افزایش میزان خلل

و فرج داخل نمونه‌ی بتن نیز می‌گردد. در نمونه‌هایی که دارای درصدهای بالاتری از الیاف می‌باشند، این افزایش خلل و فرج بر دیگر

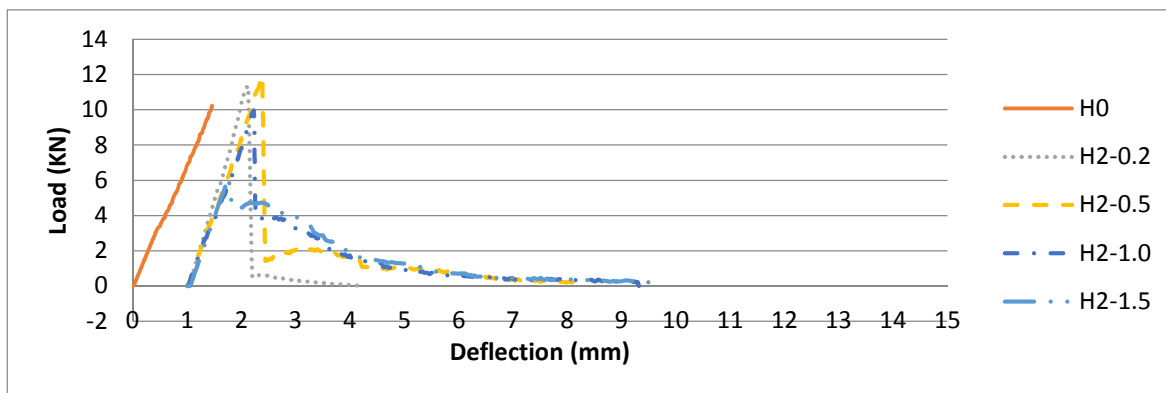
فواید الیاف چیره گردیده و در مجموع موجب کاهش مدول گسیختگی نمونه گشته است.

نمودار بار تغییر-مکان

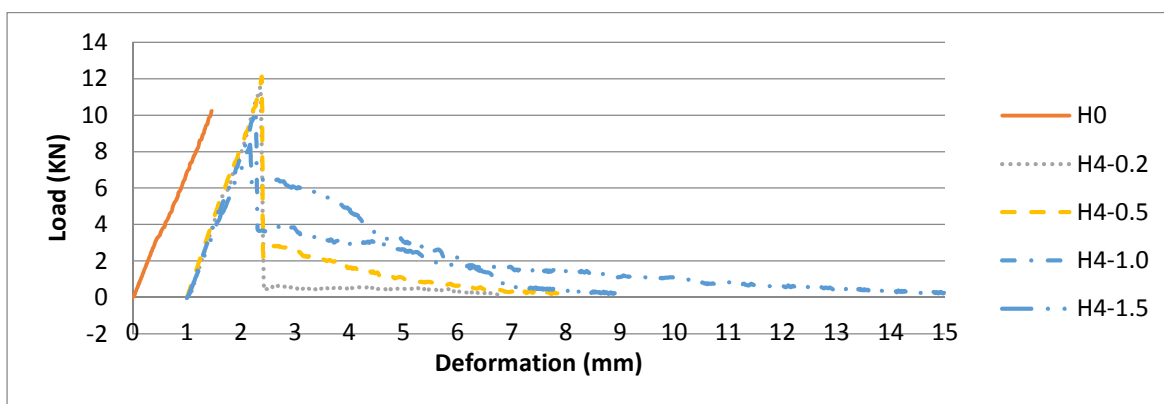
نمودارهای بار تغییر-مکان مربوط به نمونه‌های مسلح به الیاف ۲ و ۴ سانتی‌متری به ترتیب در شکل ۴ و شکل ۵ آمده است. همانطور

که از قبل انتظار می‌رفت افزایش درصد الیاف موجب بهبود رفتار بعد از ترک‌خوردگی نمونه‌ها گردیده است. علت این موضوع نقش

مؤثر الیاف در محدود ساختن روند گسترش و پخش ترک‌ها می‌باشد.



شکل ۴ نمودار بار تغییر مکان برای نمونه‌های مسلح به الیاف ۲ سانتی‌متری و بتن شاخص



شکل ۵ نمودار بار تغییر مکان برای نمونه‌های مسلح به الیاف ۲ سانتی‌متری و بتن شاخص

طاقة خمشی

طاقة خمشی معیاری است که توانایی بتن در جذب انرژی را نمایش می‌دهد و از جمله خصوصیات مهم بتن‌های مسلح به الیاف به

شمار می‌آید [۱۷، ۱۸]. به منظور محاسبه‌ی طاقة خمشی می‌بایست مساحت زیر نمودار بار تغییر مکان در نمونه‌های تیر تا نقطه‌ی

تغییر مکان متناظر با $1/150$ طول دهانه محاسبه شود [۱۸، ۱۹]. از آنجایی که طول دهانه در آزمایش خمشی تیر در این تحقیق برابر

۴۰۰ میلی‌متر می‌باشد، به منظور محاسبه‌ی طاقة خمشی مساحت زیر نمودار تا تغییر مکان متناظر با ۲٫۷ میلی‌متر محاسبه گردیده

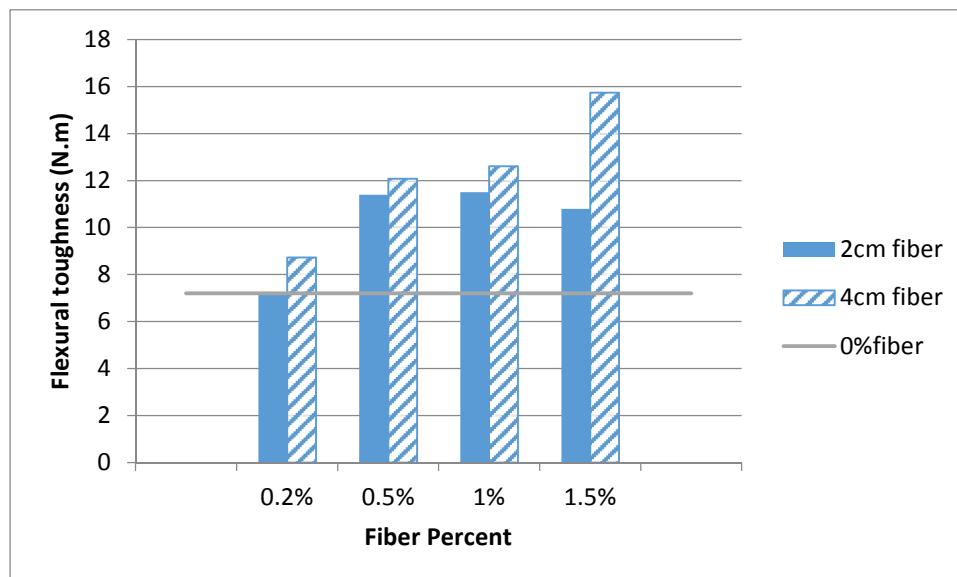
است.

شکل ۶ نمودار میله‌ای مربوط به طاقة خمشی نمونه‌های تیر آزمایش گردیده در این تحقیق را نمایش می‌دهد. در این شکل خط افقی

بیانگر میزان طاقة خمشی برای نمونه‌ی شاخص بدون الیاف می‌باشد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، با افزایش درصد الیاف،

طی افزایش خمشی می‌یابد. این افزایش طاقتمندی برای نمونه‌های دارای الیاف ۴ سانتی‌متری محسوس‌تر می‌باشد. تنها استثنا در روند افزایش طاقتمندی در نمونه‌ی H2-1.5 رخ داده است. با وجود اینکه میزان الیاف در نمونه‌ی H2-1.5 بیشتر از نمونه‌های H2-1.0 و H-0.5 می‌باشد اما طاقتمندی آن کمتر از این دو نمونه است. علت این موضوع وجود درصد بالایی از الیاف در نمونه‌ی H2-1.5 می‌باشد که موجب افزایش خلل و فرج در داخل نمونه‌ها می‌گردد. ذکر این نکته ضروری می‌باشد که طاقتمندی تمامی نمونه‌های مسلح به الیاف از نمونه‌ی شاخص بیشتر است. این افزایش طاقتمندی در نمونه‌های مسلح به الیاف منطبق با نتایج حاصل از تحقیقات پیشین می‌باشد [۷, ۱۸, ۲۰].

با توجه به شکل ۶، افزودن الیاف با طول ۲ سانتی‌متر به میزان ۰٫۲٪، ۰٫۵٪، ۱٫۰٪ و ۱٫۵٪ از حجم بتن به ترتیب موجب افزایش در طاقتمندی به میزان ۰٫۳٪، ۰٫۶۳٪، ۰٫۶۴٪ و ۰٫۵۴٪ گردیده است. افزایش طاقتمندی در نمونه‌های دارای الیاف ۴ سانتی‌متری بیشتر از نمونه‌های دارای الیاف ۲ سانتی‌متری می‌باشد. افزودن الیاف با طول ۴ سانتی‌متر به میزان ۰٫۲٪، ۰٫۵٪، ۱٫۰٪ و ۱٫۵٪ به ترتیب موجب افزایش در طاقتمندی به میزان ۰٫۲۵٪، ۰٫۷۲٪، ۰٫۸۰٪ و ۱٫۲۵٪ گردیده است. عملکرد بهتر الیاف بلندتر در طاقتمندی با نتایج تحقیقات پیشین تطابق دارد [۱۷].

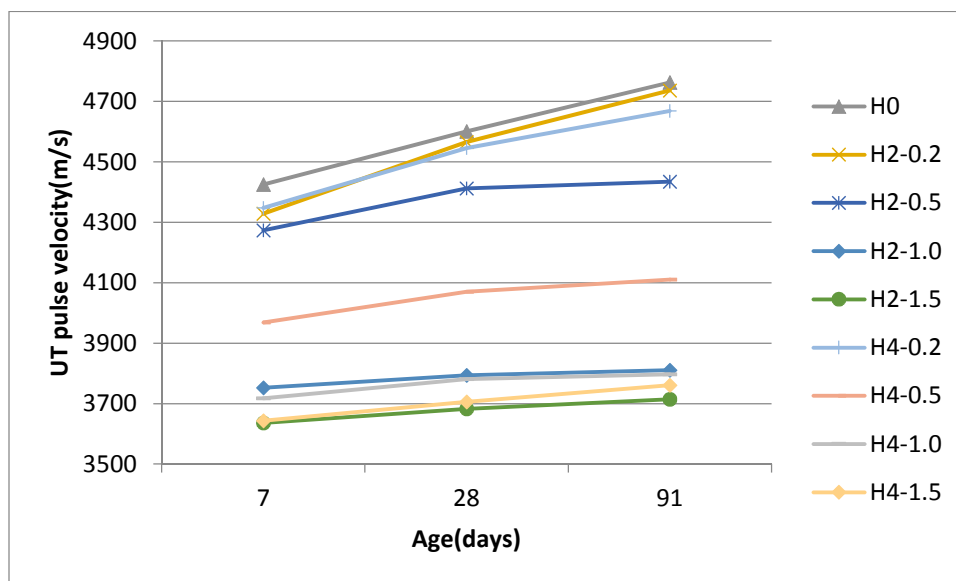


شکل ۶ نمودار میله‌ای مربوط به طاقتمندی

سرعت امواج فراصوت در بتن

در چند دهه‌ی گذشته آزمایش اندازه‌گیری سرعت امواج فراصوت به‌عنوان یکی از پرکاربردترین آزمایشات غیر مخرب، بر روی انواع مختلف بتن صورت می‌پذیرد [۲۱]. به طور کلی افزایش خلل و فرج در داخل نمونه‌های بتن و همچنین وجود آب در داخل بتن موجب کاهش سرعت امواج فراصوت می‌گردد [۲۲].

نمودار مربوط به سرعت امواج فراصوت در سنین مختلف در شکل ۷ نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود با گذشت زمان و افزایش مقاومت نمونه‌های بتن، سرعت امواج فراصوت در نمونه‌ها افزایش یافته است. علاوه بر این، افزایش درصد الیاف موجب کاهش سرعت امواج فراصوت در داخل نمونه‌ها گردیده است. دلیل این کاهش، افزایش خلل و فرج موجود در داخل بتن بر اثر افزودن الیاف به آن می‌باشد. این نتایج کاهش مقاومت فشاری به وجود آمده بر اثر افزوده شدن الیاف را تأیید می‌کند.



شکل ۷ نمودار سرعت امواج فراصوت در نمونه‌های دارای الیاف به طول ۲ سانتی‌متر

نتیجه‌گیری

- استفاده از الیاف ضایعاتی مورد بحث در این تحقیق موجب افزایش چشم‌گیر طاقتمندی نمونه‌های بتن گردیده است. طاقتمندی در نمونه‌های دارای الیاف ۲ سانتی‌متری نسبت به بتن شاخص بین ۳٪ تا ۶۴٪ رشد داشته است. این افزایش طاقتمندی در نمونه‌های دارای الیاف ۴ سانتی‌متری محسوس‌تر می‌باشد. طاقتمندی در نمونه‌های مسلح به الیاف ۴ سانتی‌متری بین ۲۵٪ تا ۱۲۵٪ رشد داشته است.

۲. بیشترین مدول گسیختگی در نمونه‌هایی دارای ۰,۵٪ الیاف (نمونه‌های H2-0.5 و H4-0.5) مشاهده گردید. مدول گسیختگی این نمونه‌ها نزدیک به ۱۷٪ از بتن شاخص بالاتر می‌باشد. همچنین نتایج آزمایش حاکی از آن بود که استفاده از درصد‌های بالایی از الیاف می‌تواند موجب کاهش مدول گسیختگی بتن شود.
۳. استفاده از درصد‌های پایین الیاف (۰,۲٪ از حجم بتن) موجب افزایش مقاومت فشاری گردیده است. استفاده از دیگر درصد‌های الیاف (بین ۰,۵٪ تا ۱,۵٪ از حجم بتن) موجب کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های مسلح به الیاف نسبت به نمونه‌ی شاخص گردید.
۴. افزایش میزان الیاف موجب کاهش کارایی بتن تازه گردید. به همین سبب به منظور حفظ روانی بتن در یک محدوده‌ی مطلوب می‌بایست با افزایش درصد الیاف میزان استفاده از فوق روان‌سازها نیز افزایش یابد.
۵. نتایج آزمایش اندازه‌گیری سرعت امواج فراصوت در بتن نشان داد که افزایش میزان الیاف موجب افزایش خلل و فرج نمونه‌ها می‌گردد.

منابع

- [۱] Silva RV, de Brito J, Dhir RK. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*. 2014;65(0):201-17.
- [۲] Duan ZH, Poon CS. Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars. *Materials & Design*. 2014;58(0):19-29.
- [۳] Khaloo AR, Dehestani M, Rahmatabadi P. Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles. *Waste Management*. 2008;28(12):2472-82.
- [۴] Topçu İB, Bilir T, Uygunoğlu T. Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 2009;23(5):1947-53.
- [۵] Li G, Garrick G, Eggers J, Abadie C, Stubblefield MA, Pang S-S. Waste tire fiber modified concrete. *Composites Part B: Engineering*. 2004;35(4):305-12.
- [۶] Centonze G, Leone M, Aiello MA. Steel fibers from waste tires as reinforcement in concrete: A mechanical characterization. *Construction and Building Materials*. 2012;36(0):46-57.
- [۷] Ochi T, Okubo S, Fukui K. Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. *Cement and Concrete Composites*. 2007;29(6):448-55.
- [۸] <http://oica.net/category/production-statistics/>. last access 5/27/2014.
- [۹] <http://www.aalcar.com/library/ar594.htm>. Last access 5/27/2014.
- [۱۰] Kosmatka SH, Kerkhoff B, Panarese WC. *Design and Control of Concrete Mixtures*. 14th ed: Portland Cement Association (PCA); 2002.
- [۱۱] Cheng M-Y, Chou J-S, Roy AFV, Wu Y-W. High-performance Concrete Compressive Strength Prediction using Time-Weighted Evolutionary Fuzzy Support Vector Machines Inference Model. *Automation in Construction*. 2012;28(0):106-15.
- [۱۲] Saje D, Bandelj B, Šušteršič J, Lopatič J, Saje F. Shrinkage of Polypropylene Fiber-Reinforced High-Performance Concrete. *American Society of Civil Engineers*. 2011.
- [۱۳] Rahmani E, Dehestani M, Beygi MHA, Allahyari H, Nikbin IM. On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. *Construction and Building Materials*. 2013;47(0):1302-8.

- [۱۴] Rashiddadash P, Ramezaniapour AA, Mahdikhani M. Experimental investigation on flexural toughness of hybrid fiber reinforced concrete (HFRC) containing metakaolin and pumice. *Construction and Building Materials*. 2014;51(0):313-20.
- [۱۵] ASTM C293. Standard test method for flexural strength of concrete (Using simple beam with center-point loading). American Standards for Testing and Materials; 2004.
- [۱۶] ASTM C 597 . Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. American Standards for Testing and Materials; 2009.
- [۱۷] Meddah MS, Bencheikh M. Properties of concrete reinforced with different kinds of industrial waste fibre materials. *Construction and Building Materials*. ۲۰۰۵-۳۱۹۶:(۱۰)۲۳;۲۰۰۹ .
- [۱۸] Khaloo A, Molaie Raisi E, Hosseini P, Tahsiri H. Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers. *Construction and Building Materials*. 2014;51(0):179-86.
- [۱۹] JSCE-SF4. Standard for flexural strength and flexural toughness, method of tests for steel fiber reinforced concrete. Concrete library of JSCE, Japan Concrete Institute (JCI). 1984:58-66.
- [۲۰] Kim SB, Yi NH, Kim HY, Kim J-HJ, Song Y-C. Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2010;32(3):232-40.
- [۲۱] Hassan AMT, Jones SW. Non-destructive testing of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPRC): A feasibility study for using ultrasonic and resonant frequency testing techniques. *Construction and Building Materials*. 2012;35(0):361-7.
- [۲۲] Yung WH, Yung LC, Hua LH. A study of the durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 2013;41(0.۷۲-۶۶۵:(