بتن الیافی هیبریدی مسلح به الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن

علی اکبر رمضانیانپور [۱] و پانته آ رشیدداداش [۲] *

چکیده

امروزه کاربرد بتن الیافی به دلیل مزایای آن نسبت به بتن غیر مسلح گسترش یافته است.از جمله این مزایا می‌توان میزان جذب انرژی بالا، بهبود چشمگیر رفتار بتن در ناحیه بعد از ایجاد اولین ترک، بهبود مقاومت خمشی و مقاومت به ضربه و جلوگیری از ایجاد و گسترش ترک‌های جمع‌شدگی را نام برد. با توجه به اینکه کاربرد یک نوع الیاف خواص مطلوب گفته‌شده را در گستره محدود بهبود می‌بخشد، امروزه کاربرد بتن الیافی هیبریدی گسترش یافته است.

در این پژوهش اثر افزایش درصد الیاف پلی‌پروپیلن در بتن الیافی هیبریدی مورد بررسی قرار گرفته است. سه درصد مختلف الیاف پلی‌پروپیلن در ۱٪ حجمی الیاف فولادی جایگزین شده است. درپایان، خواص مکانیکی نمونه‌های بتن الیافی هیبریدی فولادی _ پلی‌پروپیلن شامل طاقت خمشی، مقاومت خمشی و مقاومت به ضربه با یکدیگر و بتن شاهد مقایسه شده است.

نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهنده آن است که الیاف پلی‌پروپیلن قابلیت پل‌زدن بر روی ریزترک‌ها را داشته و اثر ناچیزی بر بهبود رفتار بتن بعد از ایجاد اولین ترک را دارند. هرچه الیاف فولادی با درصد بیشتری از الیاف پلی‌پروپیلن جایگزین شود، میزان مقاومت خمشی، جذب انرژی و مقاومت به ضربه کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی

بتن الیافی هیبریدی، طاقت خمشی، مقاومت ضربه، الیاف فولادی، الیاف پلی‌پروپیلن

Polypropylene _ Steel Fiber Reinforced Concrete

Ali.A.Ramezanianpour and P.RashidDadash

ABSTRACT

Fiber reinforced concrete (FRC) has been used widely due to its advantages over plain concrete such as high energy absorption, post cracking behavior, flexural and impact strengths, arresting shrinkage crack.

This research discusses the effect of increasing the percentage of polypropylene fiber on flexural toughness and strength of FRC. Three percentages of polypropylene fiber were substituted in 1% steel fiber reinforced concrete (SFRC). Finally, the mechanical properties of three types of hybrid fiber reinforced concretes were compared with each other and with steel fiber reinforced concrete by measuring their flexural toughness and flexural strength. A four-point bending test was adopted to determine the effect of hybrid fibers on crack arresting and post crack behavior.

The research results show that the more the percentage of polypropylene fiber which is substituted in SFRC is, the less the amount of energy absorption and flexural toughness with FRC will be.

KEYWORDS

Hybrid fiber reinforced concrete, Flexural strength, Flexural toughness, steel fiber, polypropylene fibers

تاریخ دریافت مقاله:۱۳۹۰/۹/۱۶

تاریخ اصلاحات مقاله:۱۳۹۱/۷/۱

[۱] استاد دانشکده عمران دانشگاه صنعتی امیرکبیر، رئیس مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن؛ aaramce@aut.ac.ir.

[۲] * نویسنده مسئول و دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده عمران دانشگاه صنعتی امیرکبیر، مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن؛ pnt_rashidi@yahoo.com

۱- مقدمه

با توجه به اینکه بتن ماده‌ای ترد است، امروزه کاربرد بتن الیافی با نرمی بالاتر به گونه‌ای که بتواند تغییرشکل‌های زیاد را بدون شکست تحمل نماید، مورد توجه محققین و مهندسین است. تحقیقات درباره تأمین نرمی لازم در بتن با الیاف مختلف و حتی دربرخی موارد حذف آرماتور، در حال انجام است. هدف کلی از کاربرد الیاف در بتن افزایش میزان جذب انرژی بتن و کنترل گسترش ترک است تا قطعه بتنی بتواند در مقابل بارهای وارده در یک مقطع ترک‌خورده، تغییر شکل‌های بیشتری را پس از ایجاد اولین ترک تحمل نماید. بتن مسلح به الیاف متعدد در سال‌های اخیر در سازه‌های چون روسازی راه‌ها و فرودگاه‌ها، پی‌های عظیم با تغییرشکل های زیاد و به ویژه در پوشش بتنی تونل‌ها به کار رفته است. افزودن الیاف به بتن به میزان قابل توجهی خواص مکانیکی آن را از جمله طاقت و مقاومت خمشی، مقاومت کششی و مقاومت به ضربه را بهبود می‌بخشد[۱-۲].

افزودن یک نوع الیاف به بتن، خواص بتن‌الیافی اعم از بازشدگی ترک، تغییرشکل وغیره را در یک بازه محدود بهبود می‌بخشد.مزیت ترکیب الیاف آلی(پلی‌پروپیلن و نایلون) و معدنی (شیشه، آزبست، کربن و غیره) بدست‌آوردن مقاومت کششی بیشتر و طاقت خمشی بالاتر است که ۳۰ سال پیش توسط والتون و مجومدار مورد بررسی قرار گرفت[۳].

پژوهشگران بسیاری از جمله بانتیا و زو، درباره خواص بتن الیافی و بتن الیافی هیبریدی تحقیق نموده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که طرح اختلاط صحیح یک مخلوط هیبریدی منجر به برهم‌کنش مثبت الیاف شده و درنتیجه عملکرد بتن الیافی هیبریدی را نسبت به بتن‌الیافی حاوی یک نوع الیاف بهبود می‌بخشد[٤]. بانتیا و شاه بتن الیافی هیبریدی از دو دسته الیاف با جنس یکسان و اندازه‌های مختلف را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند؛ الیاف کوچکتر بین ترک‌های کوچک پل زده و رشد ریزترک‌ها را کنترل می‌نماید و از به‌هم‌پیوستن آنها جلوگیری می‌نماید و الیاف بزرگ‌تر از ایجاد و گسترش ترک‌های بزرگ جلوگیری می‌کند و به میزان چشمگیری سبب بهبود طاقت شکست می‌شود[٦و٥]. پژوهش دیگری از بانتیا بر روی بتن الیافی هیبریدی از دو دسته الیاف با یک اندازه و دو جنس مختلف نشان داد، الیاف سخت‌تر و با مدول الاستیسیته بالاتر منجر به مقاومت در برابر اولین ترک و مقاومت نهایی شده و نوع دیگر که تقریبا انعطاف پذیر است منجر به بهبود طاقت خمشی و ظرفیت کرنشی بعد از اولین ترک می‌شود[٥]. هم‌چنین تحقیقات کوان بر روی خواص بتن الیافی هیبریدی نشان داد که یک نوع الیاف، خواص بتن تازه مانند تولید آسانتر و کاهش جمع‌شدگی پلاستیک را بهبود می‌بخشد و نوع دیگر خواص مکانیکی بتن را بهبود می‌بخشد[۷].

بتن مسلح به الیاف فولادی امروزه توجه ویژه‌ای را در میان محققین به خود اختصاص داده است . الیاف فولادی طول بلند، نرمی زیاد و مدول الاستیسیته بالا دارد. بنابراین پس از ایجاد اولین ترک بر روی ترک‌های بزرگ پل زده و از گسترش آنها جلوگیری می‌نمایند بدین ترتیب سبب افزایش شکل‌پذیری بتن، طاقت خمشی، مقاومت خمشی و مقاومت به ضربه می‌شود. با این وجود از جمله مشکلات کاربرد این دسته الیاف، اثرپذیری از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، زنگ زدگی، قیمت بالا و هم‌چنین افزایش وزن سازه بتنی است. از طرفی بتن الیافی مسلح به الیاف پلی‌پروپیلن سبک بوده و هیچ یک از عیوب مذکور بتن الیافی فولادی را ندارد[۸].

با توجه به موارد فوق، هدف از این تحقیق، جایگزینی ۱٪ الیاف فولادی با سه درصد مختلف الیاف پلی‌پروپیلن و ارائه طرح اختلاط بهینه یک مخلوط بتن الیافی هیبریدی فولادی-پلی‌پروپیلن بر مبنای آزمایش‌های خمش و مقاومت به ضربه است.

۲- ساخت نمونه‌ها و آزمایش‌ها

۲-۱- مصالح

سنگدانه‌های بکاررفته در این تحقیق از معدن متوساک هستند. دانه‌بندی سنگدانه طبق جدول (۱) است. هم‌چنین وزن مخصوص درشتدانه‌ها و ریزدانه‌ها به ترتیب ۲۵۷۰ و۲۵۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. سیمان مصرفی، سیمان تیپ ۲ آبیک است. آنالیز شیمیایی ،درصد ترکیبات شیمیایی و خواص مکانیکی ملات سیمان به‌ترتیب در جداول (۲)، (۳) و (٤) آورده شده است.

جدول (۱): دانه بندی سنگدانه

اندازه الک	درصد وزنی عبوری
۳/٤in. (۱۹ mm)	-
۱/۲in. (۱۲mm)	۱۰۰
۳/۸in. (۱۰mm)	۹٦
٤/۷٥mm) نمره ٤)	۷٥
۲/٤mm) نمره ۸)	٥٥
(۱/۲ mm) نمره ۱٦	۳۷
(٦۰۰µm) نمره ۳۰)	۲٥
(۳۰۰µm) نمره ٥۰)	۱۱

جدول (۲): آنالیز شیمیایی سیمان

ترکیب شیمیایی	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	So_3	Na_2O	K_2O	TiO_2	MnO	P_2O_5	LOI
(٪)	۱۹/۹۰	۳/۵۸	۳/۹٤	۵۹/۹۰	۳/۰۸	۵/۰	۰/۰۵	۰/۸٤	۰/۳۵	---	۰/۰٦	۲/۵۱

جدول (۳): ترکیبات شیمیایی سیمان

C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
٤۸/٦۸	۲۰/۳۳	۲/۸۲	۱۱/۹۹

جدول (۴): خواص مکانیکی ملات سیمان

خواص مکانیکی	مگاپاسکال
مقاومت فشاری ۲۸ روزه	۳۱/۲۵
مقاومت خمشی۲۸ روزه	۲/٦

الیاف فولادی مصرفی تهیه‌شده از شرکت BASF ایرانیان، دارای انتهای قلابدار است.(شکل (۳)) خواص فیزیکی و مکانیکی الیاف فولادی در جدول (۵) آورده شده است.

شکل (۴): الیاف فولادی مصرفی

جدول (۵): خواص فیزیکی و مکانیکی الیاف فولادی

طول (mm)	قطر(mm)	L/ D	مقاومت‌کششی (MPa)	چگالی (kg/m^3)
۳٦	۰/۸	٤۵	>۱۲۰۰	۷۸۵۰

الیاف پلی‌پروپیلن مصرفی به طول ۱۲ میلی‌متر (شکل (۲)) دارای خواص فیزیکی و مکانیکی طبق جدول (٦) است.
فوق‌روان‌کننده از نوع پایه کربوکسیلیک است.

شکل (۲): الیاف پلی‌پروپیلن مصرفی

جدول (۶): خواص فیزیکی و مکانیکی الیاف پلی‌پروپیلن

مقطع	طول(mm)	مقاومت کششی (MPa)	افزایش طول	چگالی(kg/m^3)
دایره	۱۲	٤۰۰	٪۱۲	۹۱۰

۲-۲- روش اختلاط

روش مخلوط‌کردن مصالح به این صورت است که در ابتدا ریزدانه‌ها و درشتدانه‌ها به مدت ۳۰ ثانیه با هم مخلوط شدند. سپس یک سوم وزنی آب اختلاط به مخلوط اضافه شده و به مدت ۳۰ ثانیه با هم مخلوط شدند. در ادامه سیمان و یک سوم الیاف پلی‌پروپیلن به مخلوط اضافه شده و به مدت ۲ دقیقه مخلوط شدند. در پایان بقیه آب و الیاف پلی‌پروپیلن به مخلوط اضافه شده و به مدت ۱/۵ دقیقه مخلوط شدند. برای تامین کارایی (مدت زمان آزمایش V_B بین ۳ الی ۱۰ ثانیه)، فوق‌روان‌کننده به میزان لازم به مخلوط اضافه شد. بتن تازه در قالب‌های منشوری به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۵۰۰ میلی‌متر و قالب‌های استوانه‌ایی ۱۰۰×۲۰۰ میلی‌متر، به تعداد ۳ عدد برای هر طرح اختلاط پر می‌شود. تراکم بتن در قالب‌ها با استفاده از میز ویبره آزمایشگاه انجام شد. برای ایجاد تراکم، بتن در دو مرحله در قالب ریخته و متراکم شد. پس از قالب‌گیری بتن تازه، قالب‌های حاوی بتن تازه در آزمایشگاه قرار داده شده و روی آنها گونی تر و روی گونی تر نایلون کشیده شد تا عمل‌آوری نمونه‌ها بطور کامل انجام شود. قالب‌های نمونه‌های بتن پس از ۲٤ ساعت باز شده و پس از نامگذاری در محلول آب آهک اشباع تا ۲۸ روز نگه داشته شدند. در پایان نمونه‌های منشوری تحت آزمایش خمش ٤ نقطه‌ای و نمونه‌های استوانه‌ای پس از برش تحت آزمایش ضربه

قرار گرفته‌اند. طرح اختلاط و درصد جایگزینی الیاف طبق جداول (۷) و (۸) است.

با توجه به اینکه آزمایش اسلامپ روش صحیحی برای تعیین کارایی بتن الیافی نیست، آزمایش V-B بکارگرفته شد. بدین‌ترتیب فوق‌روان‌کننده به میزانی به مخلوط اضافه شد تا مدت زمان آزمایش V-B در بازه ۳ تا ۱۰ ثانیه باشد [۹].

جدول (۷): درصد حجمی الیاف در یک متر مکعب بتن

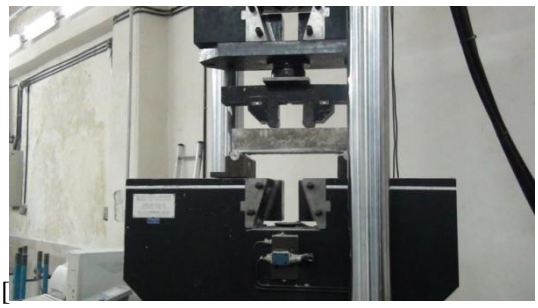
شماره مخلوط	نوع الیاف	درصدحجمی الیاف(%)
SP0	-	۰
SP1	الیاف فولادی	۰/۲۵
	الیاف پلی‌پروپیلن	۰/۷۵
SP2	الیاف فولادی	۰/۵۰
	الیاف پلی‌پروپیلن	۰/۵۰
SP3	الیاف فولادی	۰/۷۵
	الیاف پلی‌پروپیلن	۰/۲۵
SP4	الیاف فولادی	۱
	الیاف پلی‌پروپیلن	۰

جدول (۸): طرح اختلاط بتن

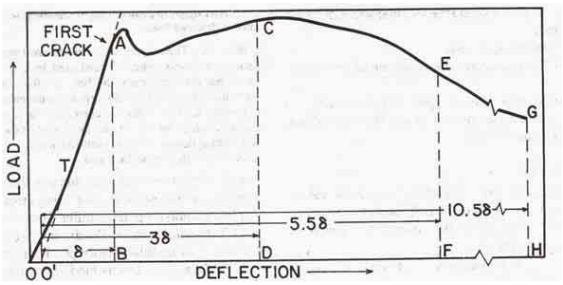
شن(kg/m^3)	ماسه(kg/m^3)	آب(kg/m^3)	سیمان(kg/m^3)	الیاف
٥٤٦	١٢٧٤	١٨٠	٤٥٠	متغیر

۲-۳- آزمایش خمش ٤ نقطه ایی

برای انجام آزمایش خمش ٤ نقطه‌ای، تیرهای بتن الیافی طبق شکل (۳) تحت بارگذاری ٤ نقطه ای قرار گرفته و بر مبنای نمودار بار_تغییر مکان تیرهای بتن الیافی، میزان طاقت خمشی و مدول شکست (تنش متناظر اولین ترک) محاسبه می‌شود. تا قبل از سال ۲۰۰٦ محققین، طاقت خمشی تیرهای بتنی تحت بارگذاری ٤ نقطه‌ای را برمبنای استاندارد ASTM C 1018 محاسبه می‌نمودند. لیکن به دلیل وجود مشکلاتی که در تعیین دقیق تغییر مکان متناظر اولین ترک وجود داشت، این استاندارد در سال ۲۰۰٦ منسوخ شد. در پژوهش های اخیر برای تعیین طاقت خمشی از استانداردهای ASTM C 1399 و ASTM C 1609 به عنوان جایگزین استفاده می‌شود. در این تحقیق برای تعیین طاقت خمشی از استانداردهای ASTM C 1018 و ASTM C 1609 استفاده شده است تا نتایج با استفاده از هر دو روش تحلیل شده و ارزیابی با دقت بالاتری انجام شود[۱۰].



شکل (۳): دستگاه بارگذاری ۴ نقطه‌ای



شکل (۴): نمودار بار-تغییر مکان برای تعیین طاقت خمشی، مدول شکست و اندیس‌های طاقت برمبنای ASTM C 1018

برای تعیین طاقت خمشی بر مبنای استاندارد ASTM C 1018 اندیس‌های طاقت برمبنای نقاط مشخصه تعیین‌شده در شکل (٤) و روابط زیر تعیین شدند:

$$I5=SOACD/SOAB \quad (۱)$$

$$I10=SOAEF/SOAB \quad (۲)$$

$$I20=SOAGH/SOAB \quad (۳)$$

$$I30=SOAMN/SOAB \quad (٤)$$

که در آن؛

SOAB= سطح زیر نمودار بار-تغییرمکان متناظر اولین ترک

SOACD= سطح زیر نمودار بار-تغییرمکان متناظر ۳ برابر اولین ترک

SOAE= سطح زیر نمودار بار-تغییرمکان متناظر ۵/۵ برابر اولین ترک

SOAGH= سطح زیر نمودار بار-تغییرمکان متناظر ۱۰/۵ برابر اولین ترک

SOAMN= سطح زیر نمودار بار-تغییرمکان متناظر ۱۵/۵ برابر اولین ترک

برای تعیین طاقت خمشی برمبنای استاندارد ASTM C 1609، میزان طاقت خمشی، از سطح زیر نمودار بار-تغییر مکان تا تغییر شکل به میزان L/۱۵۰ بدست آمده و برمبنای سطح زیر نمودار بار-تغییر مکان تا نقطه مشخصه مذکور، ضریب مقاومت خمشی طبق رابطه (۵) بدست می‌آید[۱۱]:

$$R^{D}_{T,150} = \frac{150T^{D}_{150}}{f_1\, bd^2} \times 100\% \qquad (۵)$$

$R^{D}_{T,150}$ = ضریب مقاومت خمشی

L (mm) = طول دهانه

T^{D}_{150} (J) = میزان طاقت خمشی تا نقطه متناظر L/۱۵۰

f_1 $(kN.m)$ = مدول گسیختگی

b (mm) = عرض نمونه

d (mm) = ارتفاع نمونه

۲-٤- آزمایش ضربه سقوط وزنه

برای انجام این آزمایش، تجهیزات مورد نیاز، براساس استاندارد ACI-544.2R شامل؛ چکش متراکم‌کننده استاندارد به وزن ٤/٥٤ کیلوگرم و قطر ٤٥٧ میلی‌متر، کره فولادی به قطر ٦٣/٥ میلی‌متر، یک صفحه فولادی مسطح، نمونه بتنی به قطر ١٥٢ میلی‌متر و ضخامت ٦٣/٥ میلی‌متر است. در این آزمایش ابتدا نمونه‌های دیسکی‌شکل‌بتنی به قطر ١٥٢ و ضخامت ٦٣/٥ میلی‌متر ساخته شده و یا از نمونه‌های استوانه‌ای ١٥٠ × ٣٠٠ استاندارد بریده می‌شود که حالت دوم ترجیح دارد. نمونه‌ها در سنین ٧، ٢٨ و ٩٠ روز مورد آزمایش قرار گرفتند. دیسک‌های بتن الیافی پس از آماده‌سازی سطوح باربر، در سطح زیرین به صفحه فولادی متصل شدند. از فوم برای ایجاد مانع بین کناره‌های دیسک و قاب فولادی کناری استفاده شد.

صفحه فولادی نیز باید به پایه یا فونداسیون صلب پیچ شود. سقوط وزنه از ارتفاع نیم‌متری آغاز شده و ضربات تکراری تا رسیدن به سطح مشخص از ترک‌خوردگی (اولین ترک و گسیختگی نهایی) ادامه می‌یابد. پس از دیدن اولین ترک، فوم محافظ برداشته شده و گسیختگی نهایی برای بازشدگی ترک تا حدی که قطعات بتن الیافی به سه یا چهار قاب فولادی کناری تماس یابند تعریف می‌شود. طبق دستورالعمل ACI 544 2R.89، نمونه‌های آزمایش ضربه به ضخامت ٦/٣٥ سانتی‌متر، باید از نمونه استوانه‌ای ١٥٠ × ٣٠٠ میلی‌متر بریده شود و آزمایش ضربه طبق روش گفته شده انجام شود[٩].

به علت مجهز نبودن آزمایشگاه بتن به دستگاه استاندارد سقوط وزنه، با کمی تغییر در ابعاد نمونه و ابعاد گوی، انجام آزمایش با استفاده از دستگاه مقاومت سنگدانه‌ها در برابر ضربه انجام شد. بدین‌ترتیب به‌جای گوی به قطر ٦/٣٥ سانتی‌متر از گوی‌های لس‌آنجلس به‌قطر حدود ٤/٧ سانتی‌متر استفاده شد. آزمایش بر روی نمونه هایی به ابعاد ١٠٠×٤٢ میلی متر که طبق استاندارد نسبت قطر به ارتفاع آنها برابر ٢/٤ است و از نمونه های استوانه ای ١٠٠×٢٠٠ میلی‌متر بریده شده اند، در سن ٢٨ روز انجام شد. هم‌چنین برای مشابه‌سازی نیروی ضربه در آزمایش استاندارد، وزنه ٤/٥ کیلوگرمی از ارتفاع ٤٥/٧٢ سانتی‌متر رها شد. به این منظور، از وزنه دستگاه مقاومت سنگدانه‌ها در برابر ضربه استفاده شد و وزنه ١٣/٦ کیلوگرمی از ارتفاع ١٥ سانتی‌متر روی نمونه‌ها رها شد.

ارتفاع سقوط × وزنه استاندارد = h × وزنه دستگاه مقاومت سنگدانه در برابر ضربه

٤/٥(kg) × ٤٥/٧٢ (cm) =١٣/٦ (kg) × h h =١٥ (cm)

برای انجام آزمایش با استفاده از دستگاه مقاومت سنگدانه‌ها در برابر ضربه، وزنه تا ارتفاع ١٥ سانتی‌متر بالا آورده شد و سپس روی گوی رها شد. تکیه‌گاه طبق شکل (٥)، شامل یک ورق فولادی تحتانی به ضخامت ٨ میلی متر که بر روی آن چهار عدد ورق به ضخامت ٨ میلی‌متر به فاصله داخلی ١٠/٤ سانتی‌متر جوش شده، است. برای تعیین مقاومت ضربه، تعداد ضربات گلوله تا ایجاد اولین ترک و تعداد ضربات لازم برای اینکه نمونه به سه قطعه از چهار قطعه تبدیل شود و نمونه آزمایش به سه ضلع از تکیه‌گاه مربعی برسد، شمارش شد. با توجه به اینکه ابعاد نمونه و شرایط آزمایش شبیه‌سازی شده و کاملا طبق استاندارد نیست، اعداد گزارش‌شده در بخش نتایج فقط برای مقایسه با یکدیگر بوده و به عنوان مقاومت به ضربه قابل استناد نیست. دستگاه شبیه‌سازی شده آزمایش ضربه در شکل (٥) نشان داده شده است.

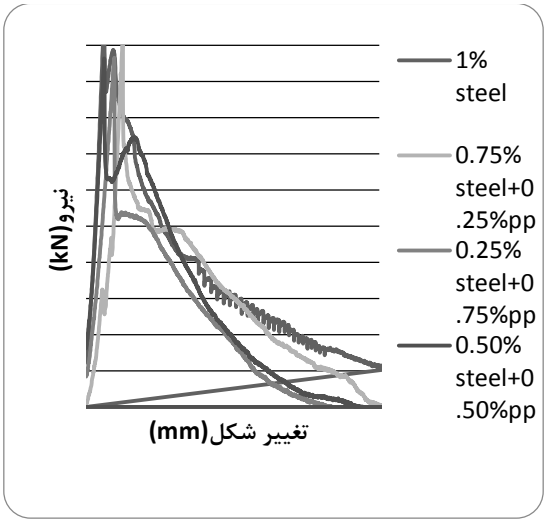
شکل (۵): نمایش دستگاه و تکیه‌گاه ساخته شده برای آزمایش ضربه

۳- بررسی نتایج

در این بخش نتایج آزمایش‌های خمش و ضربه تحلیل و بررسی شده‌اند.

۳-۱- مدول شکست و طاقت خمشی

نتایج آزمایش خمش ٤ نقطه‌ای شامل طاقت خمشی و مدول شکست در این بخش تحلیل شد. نمودار نیرو- تغییرمکان نمونه‌های بتن الیافی فولادی و بتن الیافی فولاد- پلی‌پروپیلن طبق شکل (٦) است.



شکل (۶): نمودار نیرو- تغییر شکل

جدول (۹): مدول شکست و اندیس‌های طاقت، بر مبنای استاندارد ASTM C 1018

نام مخلوط	I_5	I_{10}	I_{15}	I_{20}	مدول شکست (MPa)
SP0	–	–	–	–	٤/٥٣
SP1	٣/٧٢	٥/٩٧	٨/٠٢	١٠/٣٢	٤/٧٣
SP2	٣/٨٨	٦/٦٧	٩/٢٥	١٠/٠٢	٤/٧٧
SP3	٤/٧٩	٧/٦٨	١٠/١١	١٢/٥٢	٥/٠٣
SP4	٤/٨٥	٨/٣٧	١٣/٥٦	١٦/٧٩	٥/٠٥

جدول (۱۰): طاقت خمشی و ضریب طاقت بر مبنای استاندارد ASTM C 1609

نام مخلوط	طاقت‌خمشی (J)	مدول‌گسیختگی (MPa)	ضریب مقاومت خمشی
SP1	١٣/٧٠	٤/٧٣	٠/٤٢
SP2	١٦/٨٣	٤/٧٧	٠/٥١
SP3	١٧/٤٣	٥/٠٣	٠/٥٣
SP4	١٩/٣١	٥/٠٥	٠/٥٧

در جدول (۹) مدول شکست و اندیس‌های طاقت نمونه‌های بتن الیافی هیبریدی طبق استاندارد ASTM C 1018 ارائه شده است. همان‌طور که در جدول (۹) دیده می شود، با افزایش درصد جایگزینی الیاف فولادی با الیاف پلی‌پروپیلن میزان مدول شکست کاهش می‌یابد. هم‌چنین ضریب مقاومت خمشی در نمونه‌های الیافی هیبریدی و نمونه مسلح به ۱٪ الیاف فولادی، تقریبا نزدیک به ۰/۵ است. با توجه به طول کوتاه الیاف پلی‌پروپیلن، انتظار می‌رود که با پل‌زدن روی ریزترک‌ها مانع از رشد و گسترش آنها شوند. اما عملکرد اینگونه نبوده و دیده می‌شود الیاف فولادی به علت مدول الاستیسیته و تنش کششی بالاتر (تنش کششی الیاف فولادی بیش از سه برابر الیاف پلی‌پروپیلن است) نقش موثرتری را در بهبود مدول شکست ایفا نموده‌اند. بنابراین اینگونه استنباط می‌شود که عوامل اصلی در افزایش مدول شکست بتن های الیافی علاوه بر طول الیاف، تنش کششی و مدول الاستیسته بالا است.

در جدول (۹) اندیس‌های طاقت نمونه‌های بتن الیافی هیبریدی طبق استاندارد ASTM C 1018 و در جدول (۱۰)، طاقت خمشی نمونه های بتن الیافی هیبریدی، طبق استاندارد ASTM C 1609 ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش درصد الیاف فولادی در نمونه های بتن الیافی هیبریدی، میزان طاقت خمشی بدست‌آمده از هر دو روش فوق، افزایش می‌یابد. علت این امر آن است که الیاف فولادی به دلیل طول بلند پس از ایجاد اولین ترک و با رشد ترک، بر روی ترک‌های بزرگ پل زده و به دلیل مقاومت کششی بالا، مانع از رشد و گسترش ترک‌ها شده و بدین‌ترتیب سبب افزایش طاقت خمشی و شکل‌پذیری بتن شده است. از طرف دیگر، الیاف پلی‌پروپیلن به دلیل طول کوتاه قابلیت پل‌زدن بر روی ترک‌های بزرگ را نداشته و به دلیل مقاومت کششی پایین قابلیت جلوگیری از رشد ترک را نداشته و بنابراین در بهبود رفتار بتن در ناحیه پس از ایجاد اولین ترک اثر بسیار ناچیزی دارند. هم‌چنین الیاف فولادی به دلیل شکل خاص خود (انتهای قلابدار) پیوستگی بهتری با خمیر داشته که منجر به عملکرد بهتر در ناحیه بعد از ایجاد اولین ترک شده است. در حقیقت شکل ناصاف و قلابدار انتهای الیاف سبب شده است که تنش بیرون‌کشیدگی

الیاف فولادی بیشتر شود. از جمله عوامل موثر بر تنش بیرون‌کشیدگی الیاف، طول و شکل الیاف است. به‌طورکلی عوامل موثر بر میزان جذب انرژی و طاقت خمشی بتن‌های الیافی، نوع الیاف (میزان مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و انعطاف‌پذیری و غیره)، درصد الیاف، طول و نسبت ظاهر الیاف و شکل الیاف است.

۳-۲- مقاومت به ضربه

نمونه‌های استوانه‌ای ساخته‌شده برای انجام آزمایش ضربه در سن ۲۸ روز توسط دستگاه برش به استوانه‌های به ارتفاع ٤۲ سانتی‌متر بریده می‌شود. نتایج آزمایش ضربه در جدول (۱۱) آورده شده است.

جدول (۱۱): مقاومت به ضربه نمونه های آزمایش

نام مخلوط	تعداد ضربات لازم برای شکست نهایی	تعداد ضربات لازم برای ایجاد اولین ترک
SP0	۸	٦
SP2	۳٥	۸
SP3	۳۹	۹
SP4	٤٤	۱۱

همان‌طور که در جدول (۱۱) دیده می‌شود بین تعداد ضربات لازم برای ایجاد اولین ترک در نمونه‌های شاهد و نمونه‌های بتن الیافی، تفاوت زیادی وجود ندارد. در واقع الیاف، بعد از ایجاد اولین ترک نقش موثرتری ایفا نموده و تعداد ضربات لازم برای شکست نهایی نمونه‌های بتن الیافی حدود ٤ الی ٥/٥ برابر نمونه شاهد است. درحقیقت بعد از ایجاد اولین ترک، الیاف با پل‌زدن روی ترک‌ها مانع از گسترش ترک شده و سبب افزایش مقاومت به ضربه می‌شود. شیوه شکست نهایی نمونه‌های بتن الیافی با بتن، متفاوت است. نمونه‌های شاهد در شکست نهایی به سه قطعه مجزا تبدیل شدند در حالی که در نمونه‌های بتن الیافی، الیاف پیوستگی نمونه را حفظ کرده است.

در نمونه‌های شاهد، بین تعداد ضربات لازم برای ایجاد اولین ترک و شکست نهایی تفاوت کمی دیده می شود که به علت تردی بتن است و حال آنکه در نمونه‌های بتن الیافی، تعداد ضربات لازم برای شکست حدود ٤/٥ برابر تعداد ضربات لازم برای ایجاد اولین ترک است که علت آن پل‌زدن الیاف بر روی ترک‌ها و جلوگیری آنها از گسترش ترک است. در مقایسه نمونه‌های بتن الیافی هیبریدی و نمونه بتن الیافی فولادی دیده می‌شود که با افزایش درصد الیاف فولادی، تعداد ضربات لازم برای شکست نهایی افزایش می‌یابد، درواقع الیاف پلی‌پروپیلن به دلیل طول کوتاه و مقاومت کششی و مدول الاستیسیته پایین، در افزایش مقاومت به ضربه تقریبا بی‌اثر هستند. در حالی که الیاف فولادی به دلیل طول بلند، قابلیت پل‌زدن بر روی ترک‌های بزرگ (حدود ۳ سانتی‌متر) را داشته و به دلیل مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بالا سبب افزایش مقاومت به ضربه می‌شوند. از طرف دیگر شکل خاص الیاف فولادی (انتهای قلابدار)، سبب پیوستگی بیشتر با بتن شده و از عوامل مهم اثرگذار بر مقاومت به ضربه است. در میان مخلوط‌های بتن الیافی هیبریدی مخلوط حاوی ۰/۷۵٪ الیاف فولادی–۰/۲۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن بیشترین مقاومت به ضربه را دارد.

۳-۳- مقایسه نتایج با سایر پژوهش‌ها

همان‌طور که در بخش ۲-٤ بیان شد، اعداد گزارش‌شده در بخش نتایج آزمایش ضربه قابل مقایسه با نتایج سایر پژوهش‌های مربوطه نیست. نتایج بدست‌آمده از نتایج آزمایش خمش ٤ نقطه‌ای در جدول (۱۲) با نتایج سایر تحقیق‌ها مقایسه شده است.

همان‌طور که در جدول (۱۲) دیده می‌شود، با افزایش درصد حجمی، نسبت ظاهر و مقاومت کششی الیاف، میزان اثر آنها بر طاقت خمشی بیشتر می‌شود. بدین‌ترتیب جایگزینی الیاف فولادی با الیاف پلی‌پروپیلن در یک درصد حجمی ثابت الیاف، منجر به کاهش طاقت خمشی شده و بنابراین بتن الیافی هیبری مسلح به درصد بیشتر الیاف فولادی (۰/۷۵ الیاف فولادی و ۰/۲۵ الیاف پلی‌پروپیلن) نسبت به سایر نمونه‌های بتن الیافی هیبریدی طاقت خمشی بیشتری دارد.

جدول (۱۲): مقایسه طاقت خمشی و مدول شکست سایر پژوهش ها با نتایج این تحقیق

ردیف	نوع الیاف	نسبت ظاهر	مقاومت کششی (MPa)	درصد حجمی	اندیس‌های طاقت			محقق
					I5	I10	I20	
۱	فولادی	۱۲۰	۱۰۰۰	۱	۵/۵	۱۰/٤	۲۱/۳	Sukontasukkul[۱۲]
۲	فولادی	۸۱/۲۵	۲۵۰۰	۲/۵	٦/٦	۱۵	٤۳/۵	shaikhfaiz,..[۱۳]
۳	فولادی	٦۰	۱۵۰۰	۰/۲	۳/٤	٦	۱۸	Wu Yao[۱۴]
	پلی‌پروپیلن	۱۵۰	۸۰۰	۰/۳				
٤	فولادی	۱۵۰	۸۰۰	۰/۵	٤/۱	۷/۹	۲۲/۸	Wu Yao[۱۴]
۵	فولادی	٤۵	۱۲۰۰	۰/۵	۳/۸	٦/٦	۱۰	Ramezanianpuor, rashiddadash
	پلی‌پروپیلن	-	٤۰۰	۰/۵				
٦	فولادی	٤۵	۱۲۰۰	۱	٤/۸	۸/۳	۱٦/۷	Ramezanianpuor, rashiddadash

٤- نتیجه گیری

براساس تحقیقات صورت‌گرفته و با درنظرگرفتن این مطلب که این نتایج منحصرا مربوط به مواد و روش‌های به‌کاررفته در این پروژه آزمایشگاهی بوده و در بسیاری موارد جهت اظهار نظر قطعی نیاز به برنامه آزمایشگاهی گسترده‌تری وجود دارد، موارد زیر قابل نتیجه‌گیری است:

۱.در بررسی خواص بتن تازه دیده شد که الیاف پلی‌پروپیلن در مقایسه با الیاف فولادی در کاهش کارایی موثرتر واقع شده اند.

۲. با افزایش درصد الیاف فولادی در نمونه‌های بتن الیافی هیبریدی میزان طاقت خمشی افزایش یافت. به‌طورکلی عوامل موثر بر میزان جذب انرژی و طاقت خمشی بتن‌های الیافی نوع الیاف (میزان مدول الاستیسیته، مقاومت کششی و غیره)، درصد الیاف ، طول و نسبت ظاهر الیاف و شکل الیاف است.

۳.عوامل مهم در افزایش مدول شکست بتن های الیافی، تنش کششی، طول و مدول الاستیسیته الیاف است.

٤. در بهبود مقاومت ضربه، الیاف بعد از ایجاد اولین ترک نقش موثرتری ایفا می‌نمایند. در نمونه‌های شاهد بین تعداد ضربات لازم برای ایجاد اولین ترک و شکست نهایی تفاوت کمی دیده می‌شود. درحالی‌که در نمونه‌های بتن الیافی تعداد ضربات لازم برای شکست نهایی حدود ٤/۵ برابر تعداد ضربات لازم برای ایجاد اولین ترک می‌باشد.

۵- مراجع

[۱] N.Banthia, N. Nadakumar; "Crack growth resistance of hybrid fiber cement composite", cement and concrete composite, p.p. 3-9, 2003

[۲] N.Banthia , M .Sappakittipakom; "Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization", Cement and Concrete Research, p.p. 1366-1372, 2007

[۳] P.L. Walton, A.J. Majumdar; "Cement-based composites with mixtures of different types of fiber", Cement and Concrete Composites, p.p. 209–216, 1975

[٤] G. Xu, S. Magnani, D.J. Hannant; "Durability of hybrid polypropylene–glass fiber cement corrugated sheets", Cement and Concrete Composites, p.p. 79–84, 1978

[۵] N. Banthia, A. Moncef, K. Chokri, J. Sheng ; " Uniaxial tensile response of microfiber reinforced cement composites ", Journal of Materials and Structures, RILEM 28 (183), p.p. 507–517, 1995

[٦] S.P. Shah ; "Do fibers increase the tensile strength of cement-based matrices ", ACI Materials Journal, RILEM 88 (6), p.p. 595–602, 1991.

[۷] Qian. CX, Stroeven.P; "Development of hybrid polypropylene–steel fiber reinforced concrete ", Cement and Concrete Research, p.p. 63-90, 2000..

[۸] M. Glavind, T. Aarre; "High-strength concrete with increased fracture toughness ", Materials Research Society Symposia Proceedings, vol. 211, p.p39–46, 1990.

[۹] ACI Committee 544; " State_Of_The art report on fiber reinforced concrete", American Concrete Institute, 2002.

[۱۰] ASTM C 1018; " Standard Test Method for Flexural Toughness and First Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete (Uing Beam With Third-Point Loading)", American Society for Testing and Materials, 1990.

[۱۱] ASTM C 1609; " Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)", American Society for Testing and Materials, 2010

[۱۲] Piti Sukontasukkul; " Toughness Evaluation of Steel and Polypropylene Fibre Reinforced Concrete Beams under Bending ", ThammasaItnt, J.Sc.Tech, Vol. 9, No. 3, 2005.

[۱۳] Shaikh Faiz Uddin Ahmed, Mohamed Maalej, P. Paramasivam ; " Mechanical properties of hybrid fiber-

[١٤] Wu Yao, Jie Lib, Keru Wu; " Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction", Cement and Concrete Research, 33, p.p27–30, 2003

reinforced concrete at low fiber volume fraction", Construction and Building Materials, 21, p.p1088–1097, 2007.