

بررسی آزمایشگاهی خواص مکانیکی بتن با مقاومت معمولی حاوی الیاف فلزی موج‌دار با قلاب انتهایی و الیاف پلیمری اصلاح شده

شهرام مقصودیان^۱، فرشید جندقی علایی^{۲*}، مهدی نعمت‌زاده^۳

۱- دانشجوی دکتری سازه، پردیس دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- دانشیار دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- دانشیار دانشگاه مازندران

*Farshidja@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۹۸/۷/۳۰

تاریخ دریافت: ۹۸/۸/۲۵

چکیده

یکی از مودهای خرابی نامطلوب در گسیختگی تیرهای بتن آرمه، مود برشی است. مقاومت کششی پایین بتن معمولی و شکست ترد ناشی از خرابی برشی در تیرهای بتن آرمه می‌تواند با اضافه نمودن درصد مناسبی از الیاف فولادی بهبود یابد. همچنین الیاف ترکیبی می‌توانند بتن را در برابر کرنش‌های پایین و بالا مسلح نمایند. ترکیب الیاف با مدول الاستیسیته بالا و پایین قادرند از پیدایش ماکرو و میکرو ترک‌ها جلوگیری نمایند. در این مقاله ابتدا به منظور بررسی و شناخت دقیق رفتار بیرون کشیدگی الیاف فلزی موج‌دار با قلاب انتهایی و مقایسه آن با رفتار الیاف فلزی قلاب‌دار و الیاف فلزی موج‌دار به تنهایی، یک مطالعه تجربی روی رفتار بیرون کشیدگی الیاف فوق در حالتی که الیاف عمود بر عرض ترک قرار می‌گیرند صورت می‌پذیرد. در ادامه تأثیر الیاف پلیمری اصلاح شده به همراه مقادیر مختلف از الیاف فلزی موج‌دار با قلاب انتهایی بر خواص مکانیکی بتن مقاومت معمولی نظیر مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیر مستقیم (دونیم شدن) و مقاومت خمشی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت ضوابط مربوط به پذیرش بتن الیافی در تیرهای بدون خاموت به عنوان آرماتور برشی حداقل، بر اساس آیین‌نامه ACI 318- 2011 بررسی می‌شود. بدین منظور در بخش اول برای مشاهده پاسخ بیرون کشیدگی الیاف، شامل بیشینه نیروی بیرون کشیدگی و لغزش مربوط به نقطه بیشینه نیرو ۲۵ نمونه تهیه شد. در ادامه برای بررسی خواص مکانیکی بتن ۴۵ نمونه در ۵ گروه آزمایشی ساخته شد و درصد حجمی الیاف پلیمری اصلاح شده به میزان ۰/۲۵٪ حجم بتن ثابت و درصد حجمی الیاف فلزی در سه رده ۰/۵٪ و ۰/۷۵٪ و ۱/۰٪ حجم بتن انتخاب شد. نتایج مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که با افزودن الیاف پلیمری به میزان ۰/۲۵٪ و الیاف فلزی موج‌دار با قلاب انتهایی به میزان ۱/۰٪ افزایش

مقاومت فشاری و مقاومت کششی غیر مستقیم نسبت به بتن معمولی به ترتیب ۲۷/۵٪ و ۶۶/۷٪ است. همچنین در تمامی موارد با اضافه نمودن الیاف فلزی به همراه الیاف پلیمری با درصدهای مشخص شده فوق، الیاف می‌توانند عملکرد مناسبی در رفتار بعد از ترک‌خوردگی در جذب انرژی از خود نشان دهند علاوه بر آن شرایط پذیرش بتن‌های الیافی پیشنهادی بر اساس آیین‌نامه ACI 318-2011 برای الیاف فلزی با درصدهای ۰/۵٪ و ۰/۷۵٪ و ۱/۰٪ حجم به عنوان آرماتور حداقل برشی مورد تأیید است.

واژگان کلیدی: الیاف فولادی، مقاومت برشی بتن الیافی، الیاف ترکیبی، خواص مکانیکی، الیاف پلیمری.

۱- مقدمه

پیدایش ریزترک‌ها نیز در مقطع جلوگیری شود. در این مطالعه از الیاف مصنوعی نظیر الیاف پلی‌پروپیلن برای جلوگیری از پیدایش ریزترک‌ها و از الیاف فولادی برای کنترل پیدایش و توسعه ماکرو ترک‌ها استفاده شده است. مطابق شکل (۱) سازوکار عملکرد الیاف، در پیدایش و توسعه ماکرو و میکرو ترک‌ها نمایش داده شده است. الیاف مانند پلی‌پروپیلن وقتی به بتن اضافه می‌شوند گاهی باعث کاهش مقاومت فشاری می‌شوند ولی در همان نمونه‌ها مقاومت کششی و خمشی اضافه می‌شود [25]. با توجه به مطالعات قبلی ترکیب الیاف پلی‌پروپیلن و الیاف فلزی باعث بهبود خواص مکانیکی بتن می‌شود [26].

شکل ۱- الف. سازوکار عملکرد الیاف بلند در برابر ماکروترک‌ها

ب. سازوکار عملکرد الیاف کوتاه در برابر میکروترک‌ها

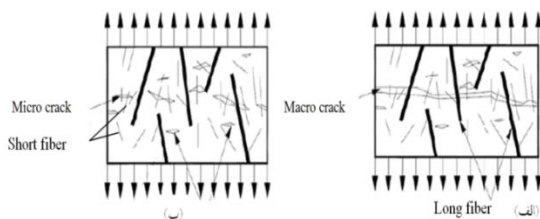


Fig. 1. The mechanism of fiber performance (a) long fiber (b) short fiber

هدف اصلی این پژوهش، در ابتدا بررسی رفتار بیرون‌کشیدگی الیاف فلزی موج‌دار با قلاب انتهایی و مقایسه آن با رفتار بیرون‌کشیدگی الیاف فلزی موج‌دار و الیاف فلزی موج‌دار بوده و در ادامه مطالعه روی خواص مکانیکی بتن مانند مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیرمستقیم، مقاومت خمشی ناشی از اثر الیاف ترکیبی فلزی موج‌دار با قلاب انتهایی و الیاف پلی‌پروپیلن اصلاح‌شده است. بدین منظور در بخش اول دو گروه آزمایشی نمونه‌ها با الیاف‌های موردنظر با طول

بتن معمولی در بیشتر موارد رفتار ترد، ظرفیت کرنشی کم و در نهایت شکل‌پذیری کم در مقاطع بتنی از خود نشان می‌دهد [1-4]. با اضافه نمودن درصد حجمی مشخصی از الیاف به بتن، خواصی همچون شکل‌پذیری، مقاومت کششی، چقرمگی و دوام بتن اضافه می‌شود [5-9]. الیاف می‌تواند از جنس فلز، کربن و پلیمر انتخاب شده و سبب بهبود مشخصات مکانیکی بتن شود [10-12]. با اضافه نمودن هر نوع الیاف به بتن خواص مختلفی در بتن بهبود می‌یابد. درصد زیادی از تأثیر الیاف بر روی بتن جلوگیری از پیدایش و توسعه ماکرو و میکرو ترک‌ها در بتن است [13]. الیاف بوسیله عمل پل زدن در محل ترک به دلیل مقاومت مکانیکی چسبندگی بین الیاف و ماتریس از توسعه ترک جلوگیری می‌نماید [14]. همچنین در مواردی الیاف به منظور کنترل ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی پلاستیک و جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن به بتن اضافه می‌شود [15]. پیدایش ترک در بتن سبب نفوذ رطوبت، یون‌های کلر و سولفات به بتن شده و در نهایت باعث ضعف بتن مسلح می‌شود [16-19]. استفاده از یک نمونه الیاف خاص، عملکرد بتن را در یک محدوده مشخص بهبود می‌بخشد. در صورتی که اگر دو یا چند نمونه الیاف استفاده شود پیش‌بینی می‌شود عملکرد بهتری در بتن حاصل شود. از آنجا که ترک‌های حاصل از بارگذاری در شرایط مختلف بارگذاری به صورت‌ها و اندازه‌های مختلف ظاهر می‌شوند، استفاده از الیاف مختلف یک روش مناسب برای جلوگیری و انتشار ترک‌ها در مراحل مختلف است [20-24]. در بتن‌های الیافی با اضافه نمودن الیاف فولادی به میزان مورد نیاز، مقاومت کششی بتن افزایش می‌یابد. به منظور فراهم نمودن خواص کششی یکسان در بتن باید از

مدفون ۱۵ و ۲۵ میلی‌متر و در بخش دوم پنج گروه آزمایشی نمونه‌ها با نسبت‌های مختلف از الیاف فلزی موج‌دار با قلاب انتهایی و همچنین بدون الیاف ساخته و آزمایش شدند.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱ مصالح و نمونه‌ها

در این مطالعه از سیمان پرتلند نوع ۲ کارخانه فراز فیروزکوه استفاده شد که به دلیل کاهش مقدار درصد قلیایی باعث رشد بهتر مقاومت در شرایط عادی شد. نتایج آزمایش‌های شیمیایی بر اساس استاندارد ASTM C114 مطابق جدول (۱) ارائه شد [27]. همچنین مصالح سنگی ریزدانه با مدول نرمی ۲/۹، چگالی cm^3 / gr ۲/۶۳ و جذب آب ۱/۷۰٪ و بیشینه اندازه ۴/۷۵ میلی‌متر استفاده شد.

در ضمن ارزش ماسه‌ای مصالح ریزدانه استفاده شده مطابق با استاندارد ASTM D 2419 [28]، ۹۱٪ محاسبه شد.

جدول ۱. مشخصات شیمیایی سیمان تیپ ۲ فراز فیروزکوه

Chemical elements	percentage	Tolerance	National Iranian standard (389)
SiO ₂	20.67	0.3	20 min
Al ₂ O ₃	4.87	0.3	6 max
Fe ₂ O ₃	3.74	0.2	6 max
CaO	64.29	0.5	
MgO	1.6	0.2	
SO ₃	2.44	0.2	3 max
Cl	<0.014	0.002	
Loss	1.75	0.4	3 max
In- R	0.44	0.2	
Free Cao	0.9	0.5	

Table 1. Chemical properties of Faraz Firoozkooh type II cement

همچنین از مصالح سنگی درشت‌دانه با چگالی cm^3 / gr ۲/۶۹ و بیشینه اندازه اسمی ۱۲/۵ میلی‌متر استفاده شد. منحنی دانه‌بندی مصالح ریزدانه و درشت‌دانه به طور کامل با الزامات ASTM C33 [29] در شکل (۲) نمایش داده شده است و درصد رد شده مصالح از الک‌ها در جدول (۲) ارائه شده است.

شکل ۲. منحنی‌های دانه‌بندی مصالح سنگی مصرفی

Gradation curve of sand — Gradation curve of Gravel —
Regulation limit of sand — — Regulation limit of Gravel — —

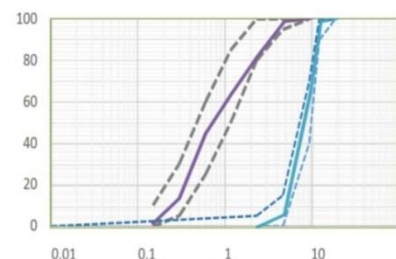


Fig. 2. Grading curves of aggregates

جدول ۲. درصد رد شده شن و ماسه مصرفی از الک

Sieve size	Passing percentage (%)	
	Coarse agg	Fine agg
4 mm (15 mm)	100	-
2 mm (7.5 mm)	99	-
8 mm (30 mm)	65.14	100
No.4 (4.75 mm)	6.48	98.4
No.8 (2.36 mm)	0.58	81.8
No.16 (1.18 mm)	-	63.82
No.30 (0.6 mm)	-	45.06
No.50 (0.3 mm)	-	14.06
No.100 (0.15 mm)	-	2.22

Table 2. Percentage of fine and coarse aggregates passing from the sieve

در این مطالعه آزمایشگاهی از الیاف موج‌دار قلاب‌دار که توسط شرکت مفتول عرفان تولید می‌شود، استفاده شد شکل (۳). علت استفاده از این نوع الیاف، وجود موج و قلاب (بطور توأم) شکل (۴) در الیاف بود که می‌توانست ظرفیت‌های کششی و شکل‌پذیری بتن الیافی را بهبود بخشد. برای بررسی تأثیر وجود موج و قلاب انتهایی به طور توأم روی رفتار بیرون‌کشیدگی الیاف و مقایسه آن با رفتار الیاف با قلاب یا موج به تنهایی، عملکرد الیاف‌های فوق توسط آزمایش بیرون‌کشیدگی بررسی شد. در ضمن برای جلوگیری از ایجاد ریزترک‌ها در اثر تغییرات درجه حرارت، رطوبت و بارهای سرویس از الیاف پلی پروپیلن اصلاح شده به صورت ترکیب با الیاف فلزی استفاده شد. شکل هندسی و خواص الیاف‌ها به ترتیب در شکل (۳) و جدول (۳) ارائه شده است. در این مطالعه از فوق روان‌کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلات اتر با نام تجاری Spc10 با وزن مخصوص cm^3 / gr ۱/۰۹ در مخلوط‌های بتن به عنوان درصد وزن کل مواد سیمانی استفاده شد. نسبت آب به سیمان استفاده شده در تمامی طرح‌های اختلاط ۰/۴۳۷ بوده است.

ارائه می‌نماید. مشخصات الیاف فولادی مطابق جدول (۵) و شکل (۵) است.

جدول ۴. طرح اختلاط نمونه‌های بیرون کشیدگی

Mix properties	Weight ratio
cement	1
Water	0.437
Coarse aggregate	1.33
Fine aggregate	2.00
SP*	0.2

*SP: Super Plasticizer

Table 4. Pull-out sample mix plan

جدول ۵. مشخصات ظاهری الیاف

Fibers	apparent qualities	diameter (mm)	length (mm)
Crimped	Fiber with longitudinal wave	0.8	50
Hooked	Fiber with hooked at the end	0.8	50
Crimped-end hooked	Fiber with longitudinal wave and hooked at the end	0.8	50

Table 5. apparent qualities of the fibers

شکل ۵. شکل ظاهری الیاف

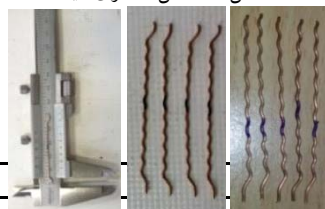


Fig. 5. appearance of the fiber

همانطور که پیشتر گفته شد یکی از اهداف این مطالعه، بررسی استفاده از ترکیب الیاف فلزی موج‌دار با قلاب انتهایی به همراه الیاف پلی‌پروپیلن اصلاح شده بر خواص مکانیکی بتن مانند مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیر مستقیم و مقاومت خمشی و همچنین بررسی پذیرش برای جایگزین نمودن الیاف فوق به عنوان آرماتور برشی حداقل بر اساس آیین‌نامه

شکل ۳. شکل ظاهری الیاف فلزی موج‌دار با قلاب انتهایی و پلی پروپیلن اصلاح شده



Fig. 3. Shape of crimped- end hooked steel and modify polypropylene fibers

شکل ۴. شکل الیاف فولادی

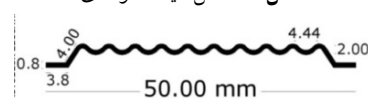


Fig. 4. steel fiber Shape

جدول ۳. مشخصات الیاف مصرفی (الف) الیاف فولادی (ب) الیاف پلیمری

Name	SFRC-ECR325
Tensile strength of the wire (Mpa)	> 1100
Elongation (%)	< 3
Length (mm)	50
Aspect Ratio (0.8mm)	62.5
Standard	According to ASTM A820

Table 3. Physical and mechanical properties of fibers. (a) Steel fiber (b) Polypropylene fiber

۲-۲ آزمایش بیرون کشیدگی الیاف

۲-۲-۱ نسبت اختلاط برای نمونه‌های بیرون کشیدگی الیاف

در این مقاله به منظور بررسی رفتار تجربی بیرون کشیدگی الیاف از نمونه‌های استوانه‌ای با قطر و ارتفاع یکسان ۵۰ میلی‌متر که در آن الیاف عمود بر سطح مقطع است استفاده شد. این نمونه‌ها در سه گروه الیاف فلزی موج‌دار با قلاب انتهایی و الیاف فلزی موج‌دار و الیاف فلزی با قلاب انتهایی تقسیم شدند. این نمونه‌ها مورد تست بیرون کشیدگی قرار گرفته و مقدار نیروی لازم برای بیرون کشیدگی الیاف، لغزش الیاف در هر لحظه و نمودارهای نیرو- لغزش در هر حالت بدست آمد. جدول (۴) نسبت‌های وزنی ماتریس را برای ساخت نمونه‌ها



Fig. 7. Stacking the fibers in the mold

۲-۲-۳ چگونگی انجام آزمایش بیرون کشیدگی الیاف

برای انجام آزمایش بیرون کشیدگی الیاف از ماتریس‌های بتنی از مدل چیدمان مطابق شکل (۸) استفاده شد. در این حالت تقریباً عملکرد الیاف در هنگام بازشدگی در سطوح عمود بر ترک شبیه‌سازی می‌شود.

شکل ۸. هندسه نمونه‌ها و چیدمان آزمایش بیرون کشیدگی الیاف مستقیم

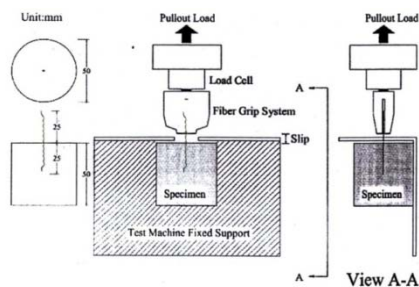


Fig. 8. The geometry of the samples and the drawing of the direct pulling out

برای انجام این آزمایش از دستگاه ساخته شده توسط پژوهشگران دانشگاه شاهرود استفاده شد. ظرفیت کشش این دستگاه ۱۰۰۰ نیوتن بوده که بارگذاری نمونه‌ها به صورت کنترل تغییر مکان و با سرعت ۰/۱۳ میلی‌متر بر دقیقه انجام می‌شود.

۲-۲-۴ بررسی رفتار بیرون کشیده شدن الیاف

در آزمایش فوق برای بررسی رفتار الیاف موج‌دار دو سری نمونه با طول مدفون ۱۵ و ۲۵ میلی‌متر و برای الیاف قلاب‌دار یک سری نمونه با طول مدفون ۲۵ میلی‌متر و برای الیاف موج‌دار با قلاب انتهایی دو سری نمونه با طول مدفون ۱۵ و ۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. نتایج مربوط به آزمایش بیرون کشیدگی الیاف قلاب‌دار مطابق با شکل (۹) و جدول (۶) نشان داده شده است.

جدول ۶. نتایج مربوط به ماکزیمم نیروی بیرون کشیدگی، لغزش نقطه ماکزیمم الیاف قلاب‌دار

ACI 318-2011 است. با مطالعه نتایج مقاله‌های متعدد مشاهده شد که تأثیر الیاف پلیمری فقط در مراحل اولیه بارگذاری و جلوگیری از ایجاد ریزترک‌ها است و تأثیر چندانی در ظرفیت نهایی مقطع نخواهد داشت [22]. به همین دلیل در این مطالعه مقدار الیاف پلیمری ۰/۲۵٪ حجم بتن ثابت و مقادیر الیاف فلزی به میزان ۱/۰٪ و ۰/۷۵٪ و ۰/۵٪ حجم بتن در نظر گرفته شد و همچنین یک طرح بدون الیاف برای مقایسه انتخاب شد.

۲-۲-۲ چگونگی اختلاط و ساخت نمونه‌های

بیرون کشیدگی الیاف

در طی فرآیند ساخت نمونه‌ها، قرارگیری الیاف در موقعیت مناسب و راستای مشخص از اهمیت زیادی برخوردار است. به همین دلیل از یک سیستم مناسب صلیبی برای نگهداشتن الیاف در وضعیت مطلوب استفاده شد. در شکل (۶) هندسه و اجزای قالب طراحی شده و همچنین در شکل (۷) مراحل و چگونگی جای‌گذاری الیاف در قالب نشان داده شده است.

شکل ۶. هندسه قالب و اجزای مربوط به آن



Fig. 6. geometry of the mold and its parts

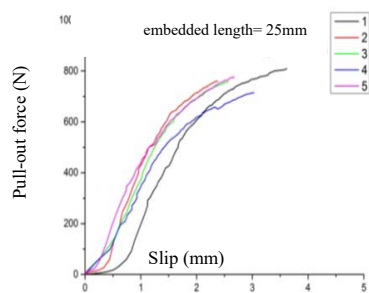
برای ساخت نمونه‌ها از مخلوط‌کن Hobart استفاده شد. پس از ریختن مخلوط در قالب، عملیات تراکم با استفاده از میز لرزان به مدت ۵ دقیقه صورت پذیرفت. قالب‌ها بعد از ۲۴ ساعت باز شده و نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در محفظه پلاستیکی سرپوشیده برای جلوگیری از تبخیر آب نگهداری شدند.

شکل ۷. چگونگی مراحل جای‌گذاری الیاف در درون قالب‌ها

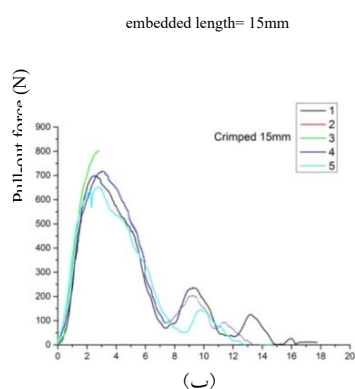
برای دو نمونه دیگر گسیختگی در الیاف مشاهده شده است. به همین دلیل برای الیاف موج دار و الیاف موج دار با قلاب انتهایی نمونه‌هایی با طول مدفون ۱۵mm در نظر گرفته شد. در حالت مدفون ۱۵mm برای هر دو نمونه از الیاف گفته شده بیرون کشیدگی الیاف، در حین آزمایش مشاهده شد.

شکل ۱۰. نتایج مربوط به آزمایش بیرون کشیدگی الیاف موج دار

الف) با طول مدفون ۲۵mm ب) با طول مدفون ۱۵mm



(الف)



(ب)

Fig. 10. Results pull-out force for crimped fiber with (a) 25mm embedded length (b) 15mm embedded length

جدول ۸ نتایج مربوط به ماکزیمم نیروی بیرون کشیدگی، لغزش نقطه

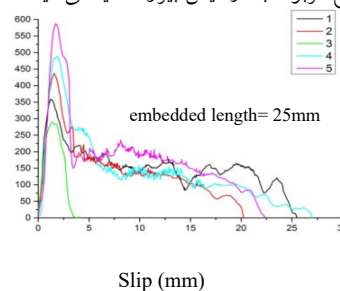
ماکزیمم الیاف موج دار با قلاب انتهایی

Embedded Length (mm)	Failure mode	Peak Load (N)	Avg. Peak load (N)	Peak slip (mm)	Avg. Peak Slip (mm)
25	Fracture	773	N.C	2.6	N.C
	Fracture	736		2.86	
	Fracture	801		3.2	
	Fracture	788		2.5	
	Fracture	794		2.34	
15	Pull out	723	719.75	3.14	2.77
	Pull out	605		2.7	
	Pull out	653		2.4	

Embedd d Length (mm)	Failure mode	Peak Load (N)	Avg. Peak load (N)	Peak slip (mm)	Avg. Peak Slip (mm)
25	Pull out	358	431	1.23	1.54
	Pull out	436		1.5	
	Pull out	288		1.5	
	Pull out	487		1.74	
	Pull out	586		1.74	

Table.6. Results for maximum pull-out force, Maximum force point slip hooked fiber

شکل ۹. نتایج مربوط به آزمایش بیرون کشیدگی الیاف قلابدار



Slip (mm)

Fig. 9. Results of pull-out force for hooked fiber

همچنین نتایج مربوط به آزمایش بیرون کشیدگی الیاف موج دار نیز مطابق با شکل (۱۰) و جدول (۷) و نتایج مربوط به آزمایش بیرون کشیدگی الیاف موج دار با قلاب انتهایی مطابق با شکل (۱۱) و جدول (۸) ارائه شده است.

جدول ۷. نتایج مربوط به ماکزیمم نیروی بیرون کشیدگی، لغزش نقطه

ماکزیمم الیاف موج دار

Embed ded Length (mm)	Failure mode	Peak Load (N)	Avg. Peak load (N)	Peak slip (mm)	Avg. Peak Slip (mm)
25	Fracture	806	N.C	3.62	N.C
	Fracture	764		2.3	
	Fracture	753		2.56	
	Fracture	717		3.05	
	Fracture	777		3.7	
15	Pull out	704	719.75	2.55	2.77
	Fracture	802		2.88	
	Pull out	721		3	
	Pull out	652		2.7	

Table.7. Results for maximum pull-out force, Maximum force point slip crimped fiber

مطابق با نتایج آزمایش بیرون کشیده شدن الیاف در حالت مدفون ۲۵mm برای سه نمونه از الیاف فوق در الیاف قلابدار با توجه به شکل و فرم هندسی آن، Pullout اتفاق افتاده ولی

خواص مکانیکی از الیاف‌های فلزی موج‌دار با قلاب انتهایی استفاده شد.

۲-۳ آزمایش‌های مشخصات مکانیکی

۲-۳-۱ نسبت اختلاط برای نمونه‌های مقاومت

فشاری، کششی غیرمستقیم و خمشی

همان‌گونه که پیشتر گفته شد یکی از اهداف این مطالعه، بررسی استفاده از ترکیب الیاف فلزی موج‌دار با قلاب انتهایی به همراه الیاف پلی‌پروپیلن اصلاح‌شده بر خواص مکانیکی بتن مانند مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیرمستقیم و مقاومت خمشی و همچنین بررسی پذیرش برای جایگزین نمودن الیاف فوق به عنوان آرماتور برشی حداقل بر اساس آیین‌نامه ACI 318-2011 است. با مطالعه نتایج مقاله‌های متعدد مشاهده شد که تأثیر الیاف پلیمری فقط در مراحل اولیه بارگذاری و جلوگیری از ایجاد ریزترک‌ها است و تأثیر چندانی در ظرفیت نهایی مقطع نخواهد داشت [22]. به همین دلیل در این مطالعه مقدار الیاف پلیمری ۰/۲۵٪، حجم بتن ثابت و مقادیر الیاف فلزی به میزان ۱/۰٪ و ۰/۷۵٪ و ۰/۵٪ حجم بتن در نظر گرفته شد و همچنین یک طرح بدون الیاف برای مقایسه انتخاب شد. نسبت‌های اختلاط بتن برای یک متر مکعب با توجه به مشخصات ACI 211.4R [30] در جدول (۹) ارائه شده است. آزمایش اسلامپ مطابق با استاندارد ASTM C143 [31] برای تعیین کارایی بتن تازه انجام شد. در کل ۴۵ نمونه بتنی در ۵ گروه آزمایشی ساخته شد تا تأثیر الیاف پلیمری و مقادیر مختلف الیاف فلزی موج‌دار با قلاب انتهایی بر مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی نمونه‌ها مشاهده شود. به منظور دقت مناسب در بدست آوردن نتایج از هر طرح اختلاط ۳ نمونه مقاومت فشاری، ۳ نمونه مقاومت کششی و ۳ نمونه مقاومت خمشی ساخته شد. ابعاد نمونه‌های مقاومت فشاری و کششی به قطر ۱۵۰mm و ارتفاع

Pull out	693	681.4	2.8	2.648
Fracture	733		2.2	

Table.8. Results for maximum pull-out force, maximum force point slip Crimped- Hooked fiber

شکل ۱۱. نتایج مربوط به آزمایش بیرون‌کشیدگی الیاف موج‌دار با قلاب انتهایی

الف) با طول مدفون ۲۵mm ب) با طول مدفون ۱۵mm

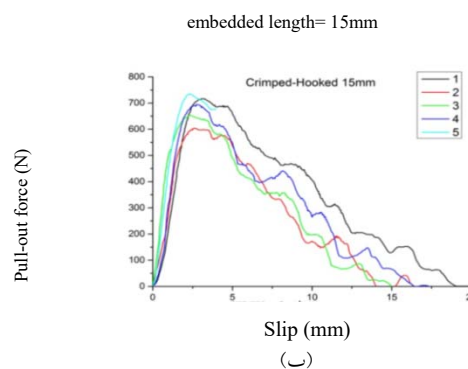
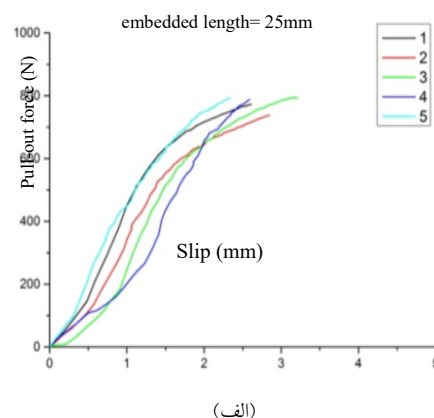


Fig. 11. Results for pull-out force Crimped- Hooked fiber with (a) 25mm embedded length (b) 15mm embedded length

با مشاهده رفتار الیاف موج‌دار با قلاب انتهایی در مقایسه با الیاف فقط دارای قلاب انتهایی بر اساس نتایج آزمایش بیرون‌کشیدگی الیاف می‌توان مشاهده نمود که الیاف پیشنهادی بعد از نقطه ماکزیمم نیرو، با شیب کمتری دچار افت نیرو می‌شوند که در نتیجه عملکرد مناسب قسمت موج‌دار الیاف فوق است که باعث افزایش شکل‌پذیری و مستهلک نمودن انرژی در محل ترک می‌شود. به همین علت در ادامه برای انجام آزمایش

میکسر با هم مخلوط شدند. سپس فوق روان کننده طرح با ۷۰ درصد آب مورد نیاز طرح اختلاط، مخلوط شده و به آرامی در داخل میکسر ریخته شد و بعد از آن حدود ۳ دقیقه مخلوط کن مصالح

۳۰۰mm و ابعاد نمونه های مقاومت خمشی ۱۵۰×۱۵۰×۵۰۰mm باتوجه به طول الیاف مصرفی انتخاب شد.

۲-۳-۲ چگونگی اختلاط و ساخت نمونه های

مقاومت فشاری، کششی غیرمستقیم و خمشی

برای ساخت بتن الیافی ابتدا مصالح سنگی شامل شن و ماسه در یک مخلوط کن (میکسر) در حدود ۲ دقیقه با یکدیگر مخلوط شدند. بعد از اختلاط کامل سنگدانه ها، سیمان به آن اضافه شد و در حدود ۲ دقیقه مصالح داخل

جدول ۹. طرح اختلاط بر اساس ACI 211.4R

Mi x. No	Mixture ID	$\bar{c}$	water	Cemen t	Coarse Aggregat e	Fine Aggregat e	Fiber type	Fiber volume	SP*	Slump
			mm	mm	mm	mm		(%)	(%)	(mm)
1	Plain	0.43 7	219	501	671	1007	-	-	0.2	120
2	PP 0.25	0.43 7	219	501	671	1007	Polypropylene	0.25	0.2	110
3	PP 0.25+ST0.5	0.43 7	219	501	671	1007	Polypropylene+Steel 1	0.25+0.5	0.2 5	100
4	PP 0.25+ST 0.75	0.43 7	219	501	671	1007	Polypropylene+Steel 1	0.25+0.7 5	0.5 5	120
5	PP 0.25+ST 1.0	0.43 7	219	501	671	1007	Polypropylene+Steel 1	0.25+1 1	0.6 2	130

*SP: Super Plasticizer

Table.9. Mix plan based on ACI 211.4R

آزمایش مقاومت فشاری نمونه های بتنی پس از ۲۸ روز بر اساس استاندارد ASTM C39 انجام شد [32]. سرعت بارگذاری استاندارد در محدوده ۰/۲ تا ۰/۳ مگاپاسکال بر ثانیه می باشد. سرعت بارگذاری در آزمایش فشاری نمونه های بتن استوانه ای ۱۵۰×۳۰۰ میلی متر برابر با $\frac{4}{4} \text{KN/S} = 150 \times \frac{1}{25} \times \frac{0.2}{4}$ انتخاب شد.

۲-۴-۲ آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم (دو نیم شدن)

آزمایش مقاومت کششی نمونه های بتن پس از حداقل ۲۸ روز بر اساس استاندارد ASTM C496 انجام شد [33]. در این آزمایش از نمونه های استوانه ای ۱۵۰×۳۰۰ میلی متر استفاده شد و سرعت بارگذاری استاندارد ۰/۷ تا ۱/۴ مگاپاسکال بر دقیقه می باشد. سرعت بارگذاری در این آزمایش $\frac{1}{2} \text{KN/S}$ انتخاب شد و نمونه

فوق را مخلوط نمود. سپس مقدار ۳۰ درصد باقی مانده آب به مخلوط در حدود ۲ دقیقه اضافه شد. نهایتاً الیاف طرح به آن اضافه شد و بعد از آن حدود ۲ دقیقه مصالح با هم مخلوط شدند. پس از ساخت بتن، اسلامپ مخلوط های بتنی اندازه گیری شد و در انتها بتن تازه در ۳ لایه در قالب استوانه ۱۵۰×۳۰۰ میلی متر ریخته شد و هر لایه ۲۵ بار توسط کوبه متراکم شد. پس از ریختن در قالب به منظور کاهش حباب های هوا از میز لرزش استفاده شد. پس از ۲۴ ساعت نمونه های بتنی از قالب بیرون آورده شدند و در حوضچه عمل آوری در دمای استاندارد ۲۰ درجه سانتی گراد طی ۲۸ روز نگهداری شدند.

۲-۴-۱ انجام آزمایشات

۲-۴-۱-۱ آزمایش مقاومت فشاری

به صورتی در دستگاه قرار گرفت که محور طولی آن عمود بر جهت بارگذاری باشد.

۳-۴-۲ آزمایش مقاومت خمشی

آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌های بتن پس از حداقل ۲۸ روز بر اساس استاندارد ASTM C1609 انجام شد. در این آزمایش از نمونه‌های مستطیلی به ابعاد $150 \times 150 \times 500$ mm استفاده شد و افزایش بار تا تغییر مکان وسط دهانه به میزان ۱۵۰ طول دهانه صورت پذیرفت. برای اندازه‌گیری تغییر مکان وسط دهانه، توسط دو تغییر مکان‌سنج که در طرفین تیر مطابق اشکال (۱۲ و ۱۳) نصب شده بود، خروجی به دستگاه مرکزی ثبت داده‌ها منتقل شد و سپس با ثبت آن مدول گسیختگی محاسبه شد. بار از طریق تغییر مکان با نرخ ثابت ۰/۱ میلی‌متر بر دقیقه به نمونه وارد شد. مطابق استاندارد ASTM به منظور کاهش آثار راستای بتن‌ریزی، نمونه حول محور طولی ۹۰ درجه چرخانده شده و سپس روی تکیه‌گاه قرار داده شد.

شکل ۱۲. نمونه تیر آزمایشگاهی برای آزمایش مقاومت خمشی

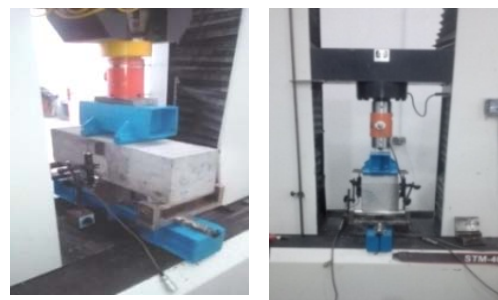
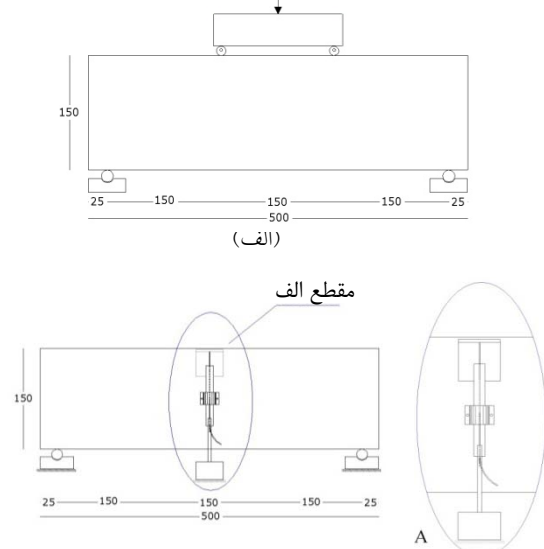


Fig. 12. Laboratory beam sample for flexural strength

شکل ۱۳. (الف) جزئیات بارگذاری تیر خمشی - (ب) جزئیات نصب تغییر مکان‌سنج

(ب) مقطع الف - (ت) پلان تیر خمشی - (ث) مقطع تیر خمشی



مقطع الف

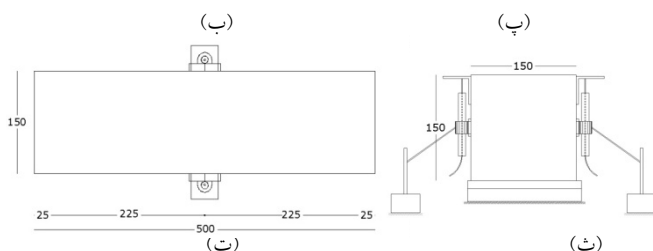


Fig.13. (a) Details of bending beam loading (b) Installation of L.V.D.T (c) details of section (A) (d) bending beam plan (e) Section of bending beam

۳- نتایج و بحث

۳-۱ مقاومت فشاری (Compressive Strength)

مقاومت فشاری بتن یکی از پارامترهای اصلی طراحی سازه و به عنوان مهمترین معیار برای تعیین کیفیت بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه‌های بتنی مطابق شکل (۱۴) در جدول (۱۰) ارائه شد که بر این اساس نتایج مربوط به مقاومت فشاری مطابق شکل (۱۵) ترسیم شده است.

شکل ۱۴. نمونه آزمایش مقاومت فشاری



Fig. 14. Compressive strength test sample

جدول ۱۰. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

Sample name	Number of sample	Fiber type	Compressive strength	
			Average f_c (N/mm ²)	Standard deviation
C ₁	3	Plain	34.93	0.36
C ₂	3	PP 0.25	36.06	0.65
C ₃	3	PP 0.25 +ST 0.5	42.06	0.15
C ₄	3	PP 0.25 +ST .75	42.36	0.239
C ₅	3	PP 0.25 +ST 1.0	44.56	1.88

Table.10. Compressive strength test result

مقاومت فشاری در حالت استفاده از ۰/۲۵٪ حجم الیاف پلی‌پروپیلن و ۱/۰٪ حجم الیاف فلزی نسبت به بتن معمولی ۲۷٪ مشاهده شد.

۳-۲ مقاومت کششی غیر مستقیم

نتایج مقاومت کششی شکافت نمونه‌های بتنی مطابق شکل (۱۶) که شامل الیاف پلیمری و فلزی است در جدول (۱۱) و شکل (۱۷) ارائه شده است.

شکل ۱۶. چیدمان آزمایش مقاومت کششی



Fig. 16. Tensile strength test layout

جدول ۱۱. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم

Table 11. Results of indirect tensile strength test

شکل ۱۷. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم

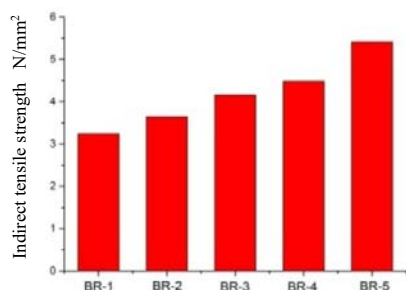


Fig. 17. Indirect tensile strength test result

نتایج حاصل از نمونه‌های بتن الیافی نشان می‌دهد که استفاده از الیاف سبب افزایش مقاومت کششی نمونه‌ها شد. مقاومت کششی نمونه‌های BR-۲ و BR-۳ و BR-۴ و BR-۵ و BR (نمونه‌های بتن ترکیب الیاف پلیمری و فلزی) نسبت به بتن معمولی به ترتیب ۱۲٪ و ۲۸٪ و ۳۸٪ و ۶۶٪ افزایش یافت.

نتایج فوق نشان می‌دهد که استفاده از الیاف فلزی در مقایسه با الیاف پلیمری، مقاومت کششی بتن را به طور قابل

شکل ۱۵. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

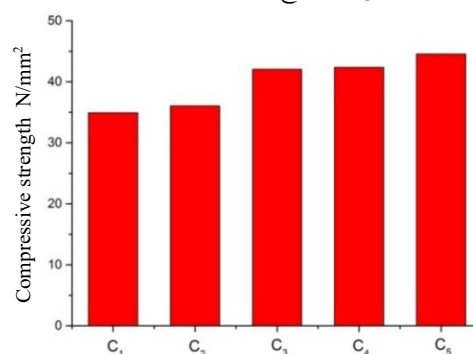


Fig. 15. Compressive strength test result

نتایج حاصل از نمونه‌های آزمایشی بیان داشت که استفاده از الیاف فلزی و پلیمری باعث افزایش مقاومت فشاری نسبت به

Sample name	Number of sample	Fiber type	Indirect tensile strength	
			Average	Standard deviation
BR-1	3	Plain	3.24	0.066
BR-2	3	PP 0.25	3.64	0.068
BR-3	3	PP 0.25 +ST 0.5	4.16	0.0178
BR-4	3	PP 0.25 +ST 0.75	4.48	0.013
BR-5	3	PP 0.25 +ST 1.0	5.41	0.179

بتن بدون الیاف می‌شود و همچنین با افزایش درصد حجمی الیاف مصرفی مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. این افزایش مقاومت فشاری می‌تواند به وسیله تأثیر الیاف بر جلوگیری از باز شدن ترک بیان شود. بر اساس نتایج آزمایش (مطابق جدول (۱۰)) تأثیر الیاف پلیمری به تنهایی در افزایش مقاومت فشاری بتن چندان قابل توجه نیست (کمتر از ۳٪). ولی در مقاطع اجرایی به دلیل پیدایش ریز ترک‌های متعدد در طی مراحل اولیه بارگذاری و جمع‌شدگی پلاستیک قبل از سخت شدن بتن، مانند جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن بتن، الیاف فوق به دلیل میکرو بودن در مقایسه با الیاف فلزی بهتر عمل می‌نماید. همچنین الیاف فلزی به دلیل مقاومت و مدول الاستیسیته بالا پس از پیدایش ماکرو ترک در بتن توسط سازوکار پل زدن در محل ترک با توجه به درصد حجم الیاف مصرفی و سایر ویژگی‌های بتن و الیاف باعث افزایش شکل‌پذیری و ظرفیت فشاری مقطع می‌شود. مطابق با نتایج جدول (۱۰) میزان افزایش

- ۱
۲) نیروی متناسب با تغییر مکان وسط دهانه برابر با ۳۰۰ طول دهانه بزرگتر از $0.9P_{peak}$ باشد.
- ۱
۳) نیروی متناسب با تغییر مکان وسط دهانه برابر با ۱۵۰ طول دهانه بزرگتر از $0.75P_{peak}$ باشد.

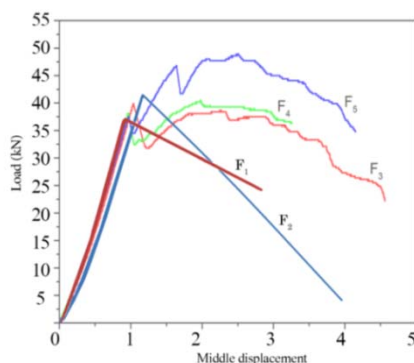
شکل ۱۸. نمونه آزمایش مقاومت خمشی



Fig. 18. bending strength test sample

نتایج مربوط به بارگذاری و کنترل شرایط پذیرش مطابق جدول (۱۲) ارائه شده است. همچنین نمودار بار- تغییر مکان وسط نمونه‌ها مطابق شکل (۱۹) ترسیم شده است. با توجه به شکل (۱۹) همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در نمونه تیر با بتن معمولی و در نمونه تیر با الیاف پلیمری تنها بعد از ایجاد اولین ترک در تیر، مقطع دچار شکست شد و علت آن به خاطر عدم وجود مکانیزمی برای کنترل بازشدگی ترک بعد از ایجاد اولین ترک در بتن معمولی و تأثیر بسیار اندک الیاف پلیمری در تیرهای بتنی با الیاف پلیمری تنها، در افزایش ظرفیت و شکل‌پذیری مقطع می‌باشد. تأثیر الیاف پلیمری به مقدار مناسب و کافی فقط برای کنترل ریز ترک‌ها در مراحل اولیه بارگذاری است.

شکل ۱۹. نمودار بار- تغییر مکان وسط دهانه نمونه‌های خمشی



توجهی افزایش می‌دهد. به دلیل شکل موج به همراه قلاب انتهایی در الیاف فلزی، گیرداری خوبی در بتن تحت تنش‌های کششی بوجود می‌آید. همچنین به دلیل شکل ظاهری و مقاومت کششی مناسب الیاف فلزی از گسترش ترک‌های بزرگ پس از ترک‌خورگی اولیه در محل ترک اولیه جلوگیری نموده و باعث افزایش مقاومت کششی نمونه مورد نظر می‌شود. الیاف پلیمری نسبت به الیاف فلزی طول کمتر و مقاومت کششی کمتری دارند و در نتیجه مانع انتشار ترک‌های کوچک در ابتدای بارگذاری شده و عملاً پس از ترک خوردگی نمونه بتن، الیاف پلیمری تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت کششی ندارد. مطابق با پژوهش‌های پیشین افزایش درصد حجمی الیاف پلیمری تا ۰/۳٪ در برابر ریزترک‌ها خوب عمل نموده و مقاومت کششی را افزایش می‌دهد و با افزایش آن به دلیل حفره‌های ناشی از تجمع الیاف، مقاومت کششی کاهش می‌یابد [22].

۳-۳- مقاومت خمشی

برای بررسی مقاومت خمشی نمونه‌ها مطابق با توضیحات ارائه شده در بخش قبل از هر طرح سه نمونه ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. مدول گسیختگی نمونه‌ها از رابطه ذیل محاسبه شد.

$$f_t = \frac{PL}{bd^2}$$

لازم به توضیح است رابطه فوق در صورتی قابل استفاده است که شکست نمونه‌ها در دهانه میانی اتفاق بیفتد. مقدار P برابر با نیروی ترک‌خوردگی مقطع و همچنین L طول دهانه و b عرض مقطع و d ارتفاع تیر است. P_{300}^D برابر با مقدار بار وارد بر مقطع متناسب با تغییر مکان برابر با ۳۰۰ طول دهانه و P_{150}^D برابر با مقدار بار وارد بر مقطع متناسب با تغییر مکان وسط دهانه برابر با ۱۵۰ طول دهانه است. چیدمان تست مطابق شکل (۱۸) ارائه شده است. شرایط پذیرش الیاف فلزی به عنوان جایگزین خاموت برشی حداقل بر اساس آیین نامه ACI 318-2011 به صورت ذیل است.

۱) درصد الیاف فلزی بیشتر از ۰/۷۵٪ حجم بتن باشد.

بعد از وقوع اولین ترک به دلیل عملکرد مناسب شکل موج به

Fig. 19. results of force- bending samples middle deflection

Sample name	Sample type (rectangle) mm	Mix ID	First peak load (KN)	P_{300}^P (KN)	P_{150}^P (KN)	f_{11}^{bd2} (N/mm ²)	F_{peak}	F_{peak}	Acceptance of the fiber
F ₁	150×150×500	Plain	36.1	-	-	4.813	-	-	-
F ₂	150×150×500	PP 0.25	36	-	-	4.8	-	-	-
F ₃	150×150×500	PP 0.25 +ST 0.5	38	34.1	35	5.186	34.2	28.5	OK
F ₄	150×150×500	PP 0.25 +ST 0.75	41.7	39.8	41.5	5.56	37.53	31.275	OK
F ₅	150×150×500	PP 0.2 +ST 1.0	39.2	46	47.4	5.7	35.68	29.4	OK

همراه قلاب انتهایی شد. با توجه به نتایج آزمایشات مطابق جدول (۱۲)، الیاف فلزی فوق را می توان بر اساس آیین نامه ACI 318-2011 جایگزین آرماتور برشی حداقل در مقاطع تیر بتن آرمه نمود.

شکل ۲۰- نمونه تیر آزمایش خمشی بعد از خرابی



Fig.20. bending beam Sample after failure

ولی در نمونه های تیر با الیاف فلزی به همراه الیاف پلیمری مشاهده شد که تأثیر الیاف فلزی بعد از به وجود آمدن ترک اولیه و پیدایش اولین نقطه ماکزیمم بار می باشد که باعث افزایش ظرفیت باربری و شکل پذیری مقطع گردید. میزان افزایش مقاومت خمشی مشاهده شده نمونه های F_3 و F_4 و F_5 (نمونه های بتنی ترکیب الیاف پلیمری و فلزی) نسبت به بتن معمولی به ترتیب بدون تغییر و ۷٪ و ۱۵٪ و ۱۸٪ بوده است. مطابق با شکل (۲۰) که یک نمونه از تیر را بعد از بارگذاری تا خرابی نشان می دهد، تعدادی از الیاف فلزی کاملاً صاف شده و تعدادی نیز بعد از صاف شدن از مقطع خرابی خارج شدند. به عبارت دیگر اتفاق چنین پدیده ای در داخل مقطع تیر باعث افزایش ظرفیت باربری و شکل پذیری مقطع

جدول ۱۲. نتایج تست مقاومت خمشی نمونه

Fig. 20. bending beam Sample after failure

انتقال نیرو از خود نشان داده که باعث شکل پذیری بیشتر مقطع در محل ترک خواهد شد.
- میزان افزایش مقاومت فشاری بتن الیافی شامل الیاف فولادی
- با اضافه نمودن حداقل ۰/۵٪ الیاف فلزی با توجه به مشخصات ارائه شده و ۰/۲۵٪ الیاف پلیمری و انجام آزمایش بر اساس دستورالعمل ASTM C1609 و بررسی شرایط پذیرش الیاف ترکیبی به عنوان آرماتور برشی حداقل بر اساس استاندارد ACI 318-2011 الیاف فوق مورد پذیرش واقع شدند.

مراجع

[1] Uygunoğlu, T. (2008). Investigation of

نتیجه گیری

- با اضافه نمودن الیاف ترکیبی فلزی موج دار با قلاب انتهایی و پلیمری خواص مکانیکی بتن به دلیل گیرداری الیاف در محل ترک و عملکرد مناسب الیاف بهبود می یابد.
- به دلیل مقاومت کششی بالای الیاف فلزی و مدول الاستیسیته زیاد، نقش اساسی در الیاف ترکیبی پلیمر و فلز بر عهده الیاف فلزی است.
- بر اساس آزمایش بیرون کشیدگی، الیاف فلزی موج دار با قلاب انتهایی در مقایسه با الیاف فلزی قلاب دار یا الیاف موج دار به تنهایی بعد از نقطه ماکزیمم نیرو عملکرد بهتری را برای

- shrinkage cracking in concrete". *Cement and Concrete Research*. 367 1236-1267. doi: 10.1016/j.cemconres. 2006.01.010.
- [16] Köksal, F., Altun, F., Yiğit, İ., & Şahin, Y. (2008). Combined effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of high strength concretes. *Construction and Building Materials*, 22(8), 1874-1880.
- [17] Song, P. S., Hwang, S., & Sheu, B. C. (2005). Strength properties of nylon-and polypropylene-fiber-reinforced concretes. *Cement and Concrete Research*, 35(8), 1546-1550.
- [18] Sivakumar, A., & Santhanam, M. (2007). A quantitative study on the plastic shrinkage cracking in high strength hybrid fibre reinforced concrete. *Cement and concrete composites*, 29(7), 575-581.
- [19] Toutanji, H. A. (1999). Properties of polypropylene fiber reinforced silica fume expansive-cement concrete. *Construction and Building Materials*, 13(4), 171-177.
- [20] Yang, K. H. (2011). Tests on Concrete Reinforced with Hybrid or Monolithic Steel and Polyvinyl Alcohol Fibers. *ACI Materials Journal*, 108(6).
- [21] Dawood, E.T., & Ramli, M. (2010). Development of high strength flowable mortar with hybrid fiber. *Constr. Build. Mater.* 24 (6), 1043-1050.
- [22] Afroughsabet, V., & Ozbakkaloglu, T. (2015). Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers. *Construction and building materials*, 94, 73-82.
- [23] Yazıcı, Ş., İnan, G., & Tabak, V. (2007). Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. *Construction and Building Materials*, 21(6), 1250-1253.
- [24] Banthia, N., Majdzadeh, F., Wu, J., & Bindiganavile, V. (2014). Fiber synergy in Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HyFRC) in flexure and direct shear. *Cement and Concrete Composites*, 48, 91-97.
- [25] Ramezaniapour, A. A., Esmaili, M., Ghahari, S. A., & Najafi, M. H. (2013). Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers. *Construction and Building Materials*, 44, 411-418.
- [26] Qian C.X., and Stroeven, P., (2000). "Development of Hybrid Polypropylene-Steel Fiber Reinforced Concrete". *Cement and Concrete Research*. 301 63-69.
- microstructure and flexural behavior of steel-fiber reinforced concrete. *Materials and structures*, 41(8), 1441-1449.
- [2] Shaikh, F. U. A. (2013). Review of mechanical properties of short fibre reinforced geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 43, 37-49.
- [3] Mohammadi, Y., Singh, S. P., & Kaushik, S. K. (2008). Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibres in fresh and hardened state. *Construction and Building Materials*, 22(5), 956-965.
- [4] Yazıcı, Ş., İnan, G., & Tabak, V. (2007). Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. *Construction and Building Materials*, 21(6), 1250-1253.
- [5] Kuder, K. G., & Shah, S. P. (2010). Processing of high-performance fiber-reinforced cement-based composites. *Construction and Building Materials*, 24(2), 181-186.
- [6] Balaguru, P. N., & Shah, S. P. (1992). Fiber-reinforced cement composites.
- [7] Lau, A., & Anson, M. (2006). Effect of high temperatures on high performance steel fiber reinforced concrete. 36(9), 1698-1707.
- [8] Vogel, H. M., & Svecova, D. (2012). Evaluation of Elastic Modulus for High-Strength Concrete. *ACI Materials Journal*, 109(3).
- [9] Ezeldin, A., & Balaguru, P. (1989). Bond behavior of normal and high-strength fiber reinforced concrete. *Materials Journal*, 86(5), 515-524.
- [10] Hassanpour, M., Shafigh, P., & Mahmud, H. B. (2012). Lightweight aggregate concrete fiber reinforcement-a review. *Construction and Building Materials*, 37, 452-461.
- [11] Barros, J. A., & Sena-Cruz, J. (2001). Fracture energy of steel fibre reinforced concrete. *Journal of Mechanics of Composite Materials*, 8(1), 29-45.
- [12] Ghavami, K. (2005). Bamboo as reinforcement in structural concrete elements. *Cement and concrete composites*, 27(6), 637-649.
- [13] Bentur, A., & Mindess, S. (1990). *Fiber Reinforced Cementitious Composites*, Elsevier Applied Science. London and New York.
- [14] Patel, P.A., Desai, A.K., Desai, A.J. (2012) . "Evaluation of Engineering Properties for Polypropylene Fiber Reinforced Concrete". *International Journal of Advanced Engineering Technology*, 31 42-45.
- [15] Banthia, N. and Gupta, R., (2006) . "Influence of Polypropylene fiber geometry on plastic

- [31] ASTM C 143/C 143M-98, (1998). *Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete*.
- [32] ASTM C39. *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. Annual Book of ASTM Standards; 2004.
- [33] ASTM C496. *Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens*. Annual Book of ASTM Standards; 2004.
- [27] ASTM C114. *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia, PA: ASTM; 2012.
- [28] ASTM D2419, *Standard test method for sand equivalent value of soils and fine aggregate*, Annual Book of ASTM Standards, 2002.
- [29] ASTM C33. *Standard specification for concrete aggregates*. Annual Book of ASTM Standards; 2004.
- [30] 211.4R-08. *Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete Using Portland Cement and Other Cementations Materials*. ACI 211 on high strength concrete; 2008.

Experimental investigation on mechanical properties of normal strength concrete containing crimped-end hooked steel and modified polymer fibers

Shahram Maghsoodian¹, Farshid Jandaghi Alaei^{2*}, Mahdi Nematzadeh³

1. PhD student of Shahrood University of Technology
2. Associate professor of Shahrood University of Technology
3. Associate professor of University of Mazandaran

* Farshidja@yahoo.com

Abstract

An undesirable failure mode of a reinforced concrete beam is shear mode. Low tensile strength of conventional concrete and brittle crushing due to shear failure in reinforced concrete beams can be improved by adding adequate percentage of steel fibers. The combination of high and low elasticity fibers is capable of arresting macro- and micro-cracks. In fact, the bridging action of fibers on crack faces causes a strong limitation on opening of the crack. This phenomenon improves the aggregate interlock on the crack faces which results in increasing the shear strength of the cracked section. In order to accurately study the pull-out characteristics of crimped-steel fibers with end hook and to compare the results with the behavior of hooked steel fibers and crimped steel fibers alone, an experimental study was conducted. Pull-out load versus slip was thoroughly investigated in 25 specimens and parameters such as maximum pull-out force and its associated slip were taken into account for comparison purposes. The results indicated that the crimped-steel fibers with end hook have better performance in pull out test. In fact, the post-peak behavior of this type of fiber shows a slight drop in carried load. This increases the area under the load-displacement curve in comparison with the others. It can be predicted that cementitious composites reinforced with crimped-steel fibers with end hook would be more ductile than those reinforced with other fibers. In addition, the effect of modified polymer fibers along with different amounts of crimped end hook steel fibers on the mechanical properties of conventional concrete such as compressive strength and indirect tensile strength was studied. The modified polymer fibers were added into the mixes for arresting micro-cracks. 45 specimens were made in 5 groups and the volume fraction of polypropylene fiber was kept constant (0.25%). The volume fraction of steel fibers were selected in three ranges of 0.5%, 0.75%, 1.0%. Also a mix was cast without any fibers to be used for comparison purposes. The results of this study showed that by adding 0.25% polypropylene fibers and 1.00% crimped end hook steel fibers, 27.5% and 66.7% increase in compressive strength and indirect tensile strength are observed compared to conventional concrete. In all cases, by adding steel fibers with polypropylene fiber in the mentioned percentages, the fibers can show desirable performance in post-cracking behavior. Finally, the criteria of ACI 318-2011 for using this fiber reinforced concrete (without shear reinforcement) as the minimum shear reinforcement was investigated. The test is based on ASTM C1609 and it is applicable to the sections of a beam when the applied shear is less than the concrete strength from one hand but, on the other hand, it is greater than the half of that. It was found that this requirement is met in all proposed fiber reinforced concretes. It can be concluded that in such sections the cementitious composites studied in this paper can be utilized without accompanying any stirrups. In fact, the ductility required by ACI 318-2011 in this area can be provided with steel fibers, rather than stirrups.

Keywords: Steel fiber, fiber reinforced concrete, shear strength, hybrid fiber, mechanical properties, polymer fiber