

بررسی آزمایشگاهی تأثیر مقدار و طول الیاف فولادی بر مشخصات مکانیکی و ضربه‌ای بتن توانمند

مجتبی عامری^{۱*}، ستار چناری^۲، محمد تاجی^۳

- ۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود
۲- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود
۳- استادیار، گروه مهندسی معدن، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود

*m49_ameri@yahoo.com

تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۳/۲۳ تاریخ پذیرش ۹۹/۰۲/۱۷

چکیده

استفاده از الیاف برای تسلیح بتن از جمله تلاش‌هایی است که توسط پژوهشگران به منظور بهبود رفتار مقاومتی و افزایش عمر سرویس‌دهی سازه‌های بتنی صورت گرفته است. بررسی‌ها نشان می‌دهد با بکارگیری انواع الیاف در بتن‌های مختلف می‌توان عملکرد مکانیکی آن در مقابل نیروهای ضربه‌ای و دینامیکی را بهبود داد. در همین راستا سعی شده تا با انجام تحقیق حاضر، تأثیر مقادیر مختلف الیاف فولادی دو سر قلاب موجدار بر مشخصه‌های مکانیکی بتن توانمند با مقاومت بالا بررسی شود. علاوه بر آن تأثیر طول الیاف بر رفتار بتن سخت شده نیز توجه شده است. بدین منظور از سه درصد حجمی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ الیاف فولادی با دو طول متفاوت ۳۰ و ۵۰ میلی‌متر در طرح اختلاط بتن استفاده شد. پس از طی دوره عمل‌آوری، نمونه‌ها در سنین ۷ و ۲۸ روزه تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی و ضربه‌ای قرار گرفتند. نتایج به‌دست‌آمده بیانگر آن است که استفاده از الیاف فولادی سبب افزایش قابل‌ملاحظه مقاومت کششی بتن شده، به طوری که با افزودن ۱/۵ درصد الیاف فولادی به طول ۵۰ میلی‌متر به بتن، این مشخصه افزایش ۴۰ درصدی نسبت به بتن بدون الیاف را نشان می‌دهد. همچنین بکارگیری الیاف فولادی با طول بلندتر تعداد ضربات تا اولین ترک و ضربات تا شکست نهایی در تست مقاومت ضربه را به میزان قابل‌توجهی افزایش داده بطوریکه تعداد ضربات مورد نیاز برای ایجاد اولین ترک تا شکست نهایی در درصدهای بالای الیاف، تا ۸۰ درصد بیشتر می‌شود. همچنین مشخص شد افزودن الیاف الگوی شکست بتن را به شکل مطلوبی تغییر می‌دهد.

واژگان کلیدی: بتن توانمند الیافی، الیاف فولادی، مقاومت ضربه‌ای، مقاومت کششی، مقاومت فشاری

۱. مقدمه

با گسترش تسلیحات نظامی و قدرت تخریب آنها، مقاوم سازی سازه‌ها در برابر نیروهای ضربه و انفجار، یکی از سیاست‌های مهم دفاعی است. این نیروها می‌توانند در اثر برخورد، انفجار، زلزله و غیره ایجاد شوند. [1-2]. بتن با دارا بودن خصوصیات متعددی همچون مقاومت فشاری بالا، قالب پذیری آسان، اقتصادی بودن از نظر هزینه ساخت و اجرا، مقاومت در برابر آتش و قابلیت جذب انرژی بالا، به‌عنوان یکی از مصالح مهم، کاربرد فراوانی در پروژه‌های عمرانی یافته است. از سویی دیگر دارای ضعف‌هایی از جمله مقاومت کششی پایین، وجود ریزترک‌ها به علت جمع‌شدگی ناشی از انقباض، انتشار ریزترک‌ها تحت اثر بارگذاری، ضعف در برابر ضربه و بارهای دینامیکی می‌باشد. در این میان کاستن ضعف‌های آن به‌عنوان یکی از مصالح پرکاربرد سازه‌ای، ضروری به نظر می‌رسد [3]. بتن بر اساس معیار مقاومت فشاری به سه گروه کم‌مقاومت (پایین‌تر از ۲۰ مگا پاسکال)، معمولی (تا ۴۵ مگا پاسکال) و توانمند (بالتر از ۴۵ مگا پاسکال) تقسیم می‌شود. البته با افزایش مقاومت، ترد و شکننده‌تر می‌گردد. به همین منظور محققان سعی نموده‌اند با افزودن الیاف از جمله الیاف فولادی به بتن، شکنندگی آنرا به نحو قابل توجهی کاهش داده و با ساخت بتن الیافی، رفتار شکل‌پذیری آن تحت اثر بارهای مختلف از جمله ضربه را بهبود دهند [4]. الیاف فولادی به دلیل مدول الاستیسیته و مقاومت کششی بالا، قابلیت شکل‌پذیری مطلوب، تنوع شکل‌ظاهری و تولید آسان از مناسب‌ترین و اقتصادی‌ترین نوع الیاف‌ها به حساب می‌آید [5]. تحقیقات گذشته از جمله نتایج مطالعات نتارجان و همکارانش نشان می‌دهد با کاربرد ۰/۵ درصد الیاف فولادی موجدار مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و مقاومت ضربه‌ای نهایی بتن معمولی به ترتیب ۱/۵ و ۱/۸ برابر می‌شود [6]. نتایج پژوهش سانگ و همکارانش نیز نشان داد با کاربرد ۱ درصد الیاف فولادی قلاب‌دار مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و مقاومت ضربه‌ای نهایی بتن مقاومت‌بالا به ترتیب ۳/۹ و ۴/۲ برابر می‌شود [7]. نیلی و همکارانش با بررسی اثر درصدهای مختلف الیاف فولادی به طول ۶ سانتی‌متر بر مقاومت ضربه و خواص مکانیکی بتن حاوی میکروسیلیس نشان دادند کاربرد الیاف فولادی منجر به بهبود مقاومت کششی و خمشی و افزایش قابل‌ملاحظه‌ای در مقاومت ضربه‌ای بتن الیافی می‌شود [8]. کیم و همکاران نیز میزان و طول الیاف فولادی در بتن توانمند الیافی به

صورت مجزا و ترکیبی را بررسی کردند. بررسی ویژگی‌های مکانیکی نشان داد افزایش درصد الیاف در سه طول مختلف سبب بهبود آن می‌شود [9]. بطور کلی مطالعات گذشته نشان می‌دهد اگرچه بررسی رفتار بتن توانمند حاوی الیاف فولادی مورد توجه پژوهشگران بوده است اما تأثیر طول و شکل الیاف بر مشخصه‌های مکانیکی به ویژه رفتار آن در برابر بارهای ضربه‌ای نیازمند مطالعات بیشتر است. به همین منظور سعی شد با انجام این پژوهش، تأثیر دو پارامتر درصد و طول الیاف فولادی دوسر قلاب موجدار بر سه مشخصه مکانیکی بتن شامل مقاومت فشاری، کششی و ضربه‌ای به صورت آزمایشگاهی بررسی بیشتر شود.

۲. مواد و روش‌ها

در این پژوهش از ۶ طرح اختلاط برای بررسی تأثیر طول و مقدار الیاف فولادی بر مشخصات مکانیکی بتن توانمند استفاده شد. یک طرح هم شامل بتن توانمند بدون الیاف به منظور مقایسه بهتر نتایج به آن افزوده شد. بر همین اساس در مجموع ۳۶ نمونه بتن فراهم شد (هر نمونه شامل دو آزمون بود که متوسط مقاومت آن‌ها به عنوان نتیجه لحاظ شد). در این طراحی با مطالعه پژوهش‌های گذشته و بکارگیری روش تاگوچی مقرر شد از الیاف فولادی با مقادیر ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد حجمی و طول الیاف ۳۰ و ۵۰ میلی‌متر استفاده شود. جزئیات نمونه‌های ساخته شده به همراه طرح اختلاط آن‌ها در جدول (۱) نشان داده شده است. برای تمام طرح‌ها از آزمایش اسلامپ برای تعیین کارایی بتن استفاده شد.

۳. مصالح مورد استفاده

در ساخت نمونه‌ها از سیمان پرتلند تیپ ۲ کارخانه سیمان شاهرود استفاده شد که مشخصات شیمیایی آن در جدول (۲) نشان داده شده است. میکروسیلیس نیز از شرکت فروسیلیس سمنان تهیه شد که آنالیز ترکیبات آن در جدول (۳) ارائه شده است. برای ایجاد کارایی لازم، در ساخت بتن از فوق روان کننده به میزان ۰/۲ تا ۰/۸ درصد وزن سیمان استفاده شد. سنگ‌دانه‌های مصرفی نیز از معادن اطراف شاهرود به گونه‌ای انتخاب شدند که منحنی دانه‌بندی آنها در محدوده استاندارد ASTM C33 واقع گردد. با توجه به توصیه آیین‌نامه ACI بیشینه ابعاد ذرات شن نیز به ۱۹ میلی‌متر (الک نمره ۳/۴) محدود شد.

همچنین آزمایش دانه‌بندی مدول نرمی ماسه را حدود ۳ نشان داد. الیاف استفاده شده نیز از نوع دوسر قلاب موجدار تهیه شد که مشخصات آنها در جدول شماره (۴) ارائه شده است. همچنین شکل ظاهری آن در شکل های (۱ و ۲) مشاهده می‌شود.

جدول ۱. طرح اختلاط نمونه‌ها

Mix No.	Mix ID	W/(Ms+Cm)	W	Cm	Micro silica	Coarse Agg	Fine Agg	SP	Fiber	V _f
						Kg/m ³				
								(%)		
1	SF0*	0.325	157.5	450	36	850	940	3.6	0	0
2	SF0.5L3*	0.325	157.5	450	36	850	940	3.6	39.25	0.5
3	SF1.0L3*	0.325	157.5	450	36	850	940	3.6	78.5	1
4	SF1.5L3*	0.325	157.5	450	36	850	940	3.6	117.75	1.5
5	SF0.5L5*	0.325	157.5	450	36	850	940	3.6	39.25	0.5
6	SF1.0L5*	0.325	157.5	450	36	850	940	3.6	78.5	1
7	SF1.5L5*	0.325	157.5	450	36	850	940	3.6	117.75	1.5

Table. 1. Mix proportions of the concrete

SF0*: نمونه شاهد بدون الیاف

SF0.5L3*: نمونه ۰/۵ درصد الیاف فولادی ۳۰ میلی‌متر، SF1.0L3: ۱ درصد الیاف فولادی ۳۰ میلی‌متر، SF1.5L3: ۱/۵ درصد الیاف فولادی ۳۰ میلی‌متر
SF0.5L5*: نمونه ۰/۵ درصد الیاف فولادی ۵۰ میلی‌متر، SF1.0L5: ۱ درصد الیاف فولادی ۵۰ میلی‌متر، SF1.5L5: ۱/۵ درصد الیاف فولادی ۵۰ میلی‌متر

Table. 4. Properties of steel fiber used in the study

شکل ۱. شکل الیاف فولادی دوسر قلاب موجدار مصرفی



Fig. 1. Shape of the wavy hooked-end steel fibers used in the study

شکل ۲. تصویر شماتیک الیاف فولادی (L: طول الیاف d: قطر الیاف)

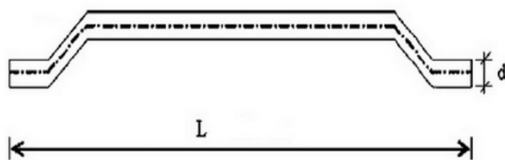


Fig. 2. (a) Schematics dimensions of the steel fibers (L: length, d: diameter)

۴. روش ساخت نمونه‌ها

معمولاً بتن مسلح به الیاف فولادی مانند بتن ساده ریخته و متراکم می‌شود. با وجود این باید برخی ملاحظات برای پخش یکنواخت

جدول ۲. مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی

Composition	Test (%) Result
SiO ₂	21.11
Al ₂ O ₃	4.42
Fe ₂ O ₃	3.96
CaO	63.36
MgO	1.51
SO ₃	2.61
Na ₂ O	0.38
K ₂ O	0.51
C ₃ S	54.7
C ₂ S	19.3
C ₃ A	5.0

Table. 2. Chemical composition of cement

جدول ۳. آنالیز ترکیبات میکروسیلیس

Composition	Max(%)	Composition	Max(%)
SiO ₂	85	MgO	1.5
Fe ₂ O ₃	2	C	3
CaO	1.5	L.O.I	3.5
Al ₂ O ₃	1	H ₂ O	1

Table. 3. Composition of Micro silica

جدول ۴. مشخصات الیاف فولادی مصرفی

Length l (mm)	Diameter d (mm)	Aspect ratio (mm/mm)	Density (kg/m ³)	Tensile st. (MPa)
30	0.65	46	7850	1100
50	0.67	75	7850	1100

۵-۲. آزمایش تعیین مقاومت ضربه

کمیته ACI544 آزمایش ضربه‌ای وزنه افتان (DWT) را برای بتن الیافی پیشنهاد کرده است [4]. شکل (۳) تصویر دستگاه تست ضربه مطابق با استاندارد ACI544 را نشان می‌دهد. به این منظور برای هر طرح اختلاط بتن، نمونه استوانه‌ای استاندارد به ابعاد 300×150 میلی‌متر تهیه و هر نمونه به وسیله دستگاه برش به چهار دیسک مساوی تقسیم می‌شود. سپس دیسک‌های بتنی بریده شده را درون دستگاه قرار داده، بعد یک وزنه (چکش) به وزن $4/45$ کیلوگرم به طور مکرر از ارتفاع 457 میلی‌متر روی یک توپ (گوی فولادی به قطر $63/5$ میلی‌متر رها می‌شود. تکرار ضربات تا رسیدن به سطوح مشخص از ترک‌خوردگی ادامه می‌یابد. تعداد ضرباتی که موجب رخ دادن اولین ترک قابل‌رؤیت و شکست نهایی دیسک بتنی شده، ثبت و تعداد ضرباتی که موجب رخ دادن اولین ترک قابل‌رؤیت شد به عنوان مقاومت اولین ترک و تعداد ضرباتی که موجب شکست نهایی نمونه می‌شود به عنوان مقاومت انهدام در نظر گرفته می‌شود. مراحل انجام این تست در کارگاه تکنولوژی بتن دانشگاه سمنان انجام شد.

شکل ۳. تصویر شماتیک دستگاه تست ضربه افتان



Fig. 3. Drop-Weight Impact test machine

الیاف و جلوگیری از جداشدگی یا پدیده گلوله‌ای شدن و ایجاد یک مخلوط کارا برای ریختن، تراکم و پرداخت بتن به عمل آید. برهمین اساس، ابتدا مصالح دانه‌ای، سیمان و میکروسیلیس به صورت خشک در میکسر ریخته شد و در حین اختلاط حدود ۹۰ درصد آب مورد نیاز به صورت تدریجی به آن اضافه شد. بعد از آن، ترکیب فوق روان کننده با ۱۰ درصد آب باقی‌مانده به بتن اضافه شد. در مرحله بعد با مشاهده همگن شدن نسبی مخلوط بتن، الیاف به تدریج به آن اضافه شد تا از گلوله‌ای شدن آن جلوگیری شود. در نهایت چرخش میکسر به مدت حدود یک دقیقه ادامه یافت تا از اختلاط کامل الیاف با بتن اطمینان حاصل شود [10]. پس از آماده شدن مخلوط بتن قالب‌های استوانه‌ای از پیش آماده شده به صورت استاندارد با بتن پر شد که برای انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی و ضربه استفاده می‌شود. پس از ۲۴ ساعت از بتن ریزی نمونه‌ها از داخل قالب باز و در یک مخزن آب با دمای مناسب به مدت ۲۸ روز غوطه‌ور شدند تا عمل آوری آن بطور کامل انجام گیرد. آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی بتن الیافی مطابق دستورالعمل ASTM و آزمایش مقاومت ضربه‌ای طبق استاندارد ACI544 با استفاده از نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد 150×300 میلی‌متری انجام شد.

۵. شرح آزمایش‌ها

۵-۱. آزمایش تعیین مقاومت فشاری و کششی

به منظور تعیین مقاومت فشاری نمونه‌ها از جک هیدرولیکی مدل ZWICK ساخت شرکت Toni Technic آلمان استفاده شد. در آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری مطابق با استاندارد ASTM C39 سرعت بارگذاری $0/25$ مگاپاسکال بر ثانیه در نظر گرفته شد [11]. برای مقاومت کششی نیز، نمونه‌های بتن الیاف فولادی با استفاده از آزمایش برزلی ارزیابی شدند. بارگذاری در این حالت نیز با سرعت یکنواخت در حدود $0/2$ مگاپاسکال بر ثانیه اعمال شد تا تنش کششی موجب گسیختگی نمونه شود [12]. کلیه مراحل ساخت و آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری و کششی بتن در آزمایشگاه بتن و مصالح دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شد.

۶. نتایج و بحث

۶-۱. نتایج آزمون مقاومت فشاری

در شکل (۴) دو نمونه با طرح اختلاط بتن فاقد الیاف (شاهد) و بتن الیافی پس از آزمون فشار تک محوری نشان داده شده است.



Fig. 4. Fracture pattern of concrete under compressive test
a) Plain concrete b) steel fiber-reinforced concrete

در شکل های (۵ و ۶) به ترتیب مقادیر مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه ها، در سه درصد حجمی الیاف برای دو طول ۳۰ و ۵۰ میلی متر با یکدیگر مقایسه شده است. در این شکل ها نوار خاکستری الیاف با طول ۳۰ میلی متر (L3) و نوار مشکی، الیاف با طول ۵۰ میلی متر (L5) را نشان می دهند. همان گونه که در شکل (۵) مشاهده می شود در درصدهای پایین الیاف یعنی ۰/۵ و ۱ درصد (SF0.5 و SF1) طول الیاف تأثیر مشخصی بر مقاومت فشاری بتن ۷ روزه ندارد اما در حجم ۱/۵ درصد استفاده از الیاف با طول بلندتر، مقاومت را به میزان محسوسی (حدود ۱۴ درصد) نسبت به نمونه های با الیاف ۳۰ میلی متری افزایش داده است.

شکل ۵. مقایسه مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه ها با درصدهای مختلف الیاف در دو طول ۳۰ و ۵۰ میلی متر

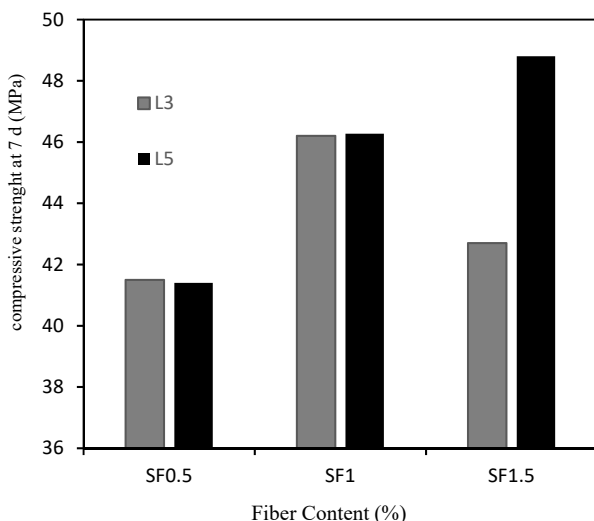


Fig. 5. Compressive strength of SF with different fiber content and two lengths of 30 and 50 mm at 7 days.

شاید بتوان علت نتایج اخیر را این گونه تفسیر نمود: یکی از عوامل موثر در کسب مقاومت بتن های الیافی نسبت ظاهری الیاف است. این پارامتر اثر نسبت طول به قطر الیاف (l/d) را دربر می گیرد. بررسی ها نشان می دهد هر چه این نسبت افزایش پیدا کند تجمع الیاف در بتن و درگیری آنها با یکدیگر و سنگدانه ها بیشتر می شود. به همین دلیل در نمونه های با طول ۳۰ میلی متر اگرچه حجم الیاف بیشتر می شود اما به دلیل کمتر بودن نسبت ظاهری الیاف پیوستگی آنها با ذرات بتن کاهش

مقادیر مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روزه برای هفت طرح اختلاط مورد نظر در جدول (۵) گزارش شده است. نتایج ارائه شده در این جدول مطابق با طرح اختلاطها برای مقادیر ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد الیاف فولادی دو سر قلاب موجدار در دو طول مختلف ۳۰ و ۵۰ میلی متری است. مقادیر گزارش شده در جدول زیر نشان می دهد در تمامی طرح اختلاطها مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه ها بالاتر از ۴۵ مگا پاسکال بوده که توانمندی بتن از نظر مقاومت فشاری را تایید می نماید. مقایسه تمام حالات بتن توانمند الیافی نسبت به بتن بدون الیاف (SF0) در جدول فوق نشان می دهد که افزودن الیاف فولادی به بتن سبب افزایش مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روز می شود. همچنین با مقایسه طرح های اختلاط با درصدهای مختلف الیاف بیانگر آن است که افزایش درصد حجمی الیاف با طول ۳۰ میلی متر تا یک درصد حجم سبب بهبود مقاومت فشاری شده و با بیشتر با طول ۵۰ میلی متر، با بیشتر شدن الیاف تا ۱/۵ درصد، مقاومت فشاری افزایش نسبی دارد. بطوریکه مقایسه دو طرح SF0.5L5 و SF1.5L5 نشان می دهد با افزایش درصد حجم الیاف از ۰/۵ به ۱/۵ مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه ها به مقدار ۱۸ درصد افزایش می یابد. به عبارتی در نمونه های با طول های کمتر الگوی رفتاری ثابتی در کسب مقاومت فشاری مشاهده نمی شود که این یافته با نتایج سایر پژوهشگران همخوانی دارد.

ماتریس بتن افزایش می‌یابد. الیاف با طول بلندتر دارای سطح تماس بیشتر و در نتیجه نسبت طول به قطر بالاتر بوده که این می‌تواند بازده چسبندگی آن به ماتریس یا مخلوط بتن را افزایش دهد [8-9]. سانگ و همکاران و نیلی و همکاران نشان دادند استفاده از الیاف فولادی صاف در هر دو حالت ساده و قلاب‌دار سبب بهبود رفتار مقاومت فشاری بتن توانمند و معمولی می‌شود [7-8]. پژوهش‌های وسیم و همکاران نشان داد در حالت کلی افزایش طول الیاف در درصد‌های بالاتر الیاف می‌تواند سبب بهبود نتایج شود که با نتایج این پژوهش هماهنگ است [13].

از نتایج دیگر این پژوهش می‌توان به چگونگی شکست نمونه‌ها در زیر جک اشاره نمود. همان‌گونه که در شکل (۴) ملاحظه می‌شود بتن دارای الیاف پس از شکست متلاشی نشده و از ایجاد پاشش ممانعت نموده است که این ویژگی می‌تواند به پایداری بیشتر سازه پس از تخریب و جلوگیری از آسیب به افراد به دلیل گسیختگی ناگهانی کمک کند. به ویژه در بهبود رفتار سازه‌های بتنی در هنگام وقوع زلزله موثرتر خواهد بود.

۲-۶. نتایج آزمون مقاومت کششی

شکل (۷) تصویر دو نمونه بتن توانمند الیافی و توانمند فاقد الیاف (شاهد) پس از تست مقاومت کششی را نشان می‌دهد. از مقایسه نمونه‌ها تفاوت الگوی شکست کششی استنباط می‌شود به گونه‌ای که بتن الیافی در مقایسه با بتن معمولی دچار شکست کامل در آزمون کشش نمی‌شود. نتایج مقاومت کششی همه طرح‌های اختلاط در جدول (۶) گزارش شده است. مقایسه سه حالت SF0.5L3، SF1L3 و SF1.5L3 و سه حالت SF0.5L5، SF1L5 و SF1.5L5 در جدول (۶) نسبت به بتن شاهد SF0 نشان می‌دهد که افزایش حجم الیاف با طول ۳۰ میلی‌متر تا یک درصد سبب افزایش مقاومت کششی شده و با ازدیاد بیشتر الیاف تا ۱٫۵ درصد تغییر محسوسی ندارد. این نتیجه برای سنین ۷ و ۲۸ روزه یکسان است. بررسی مقادیر مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌ها با درصد‌های مختلف الیاف برای دو طول ۳۰ و ۵۰ میلی‌متر

یافته در نتیجه سبب کاهش مقاومت فشاری نسبت به حالت ۱ درصد الیاف می‌شود.

شکل ۶. مقایسه مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها با درصد‌های مختلف الیاف در دو طول ۳۰ و ۵۰ میلی‌متر

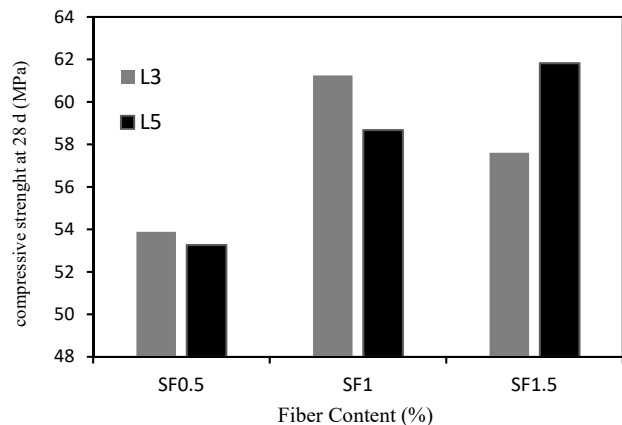


Fig. 6. Compressive strength of SF with different fiber content and two lengths of 30 and 50 mm at 28 days

از طرفی افزایش حجم الیاف سبب کاهش ذرات سنگدانه مصرفی بتن شده که خود این عامل کاهش وزن مخصوص و مقاومت فشاری را سبب می‌شود. اما در الیاف با طول ۵۰ میلی‌متر به دلیل نسبت ظاهری بالاتر پیوند بهتری را با ذرات بتن برقرار نموده و سبب افزایش مقاومت فشاری شده است. هرچند به احتمال زیاد با افزایش بیشتر حجم این الیاف هم کاهش مقاومت بتن را به دنبال خواهد داشت. در مجموع با بررسی سایر پژوهش‌ها انجام گرفته در این زمینه می‌توان نتیجه‌گیری نمود که با ازدیاد درصد الیاف، مقاومت فشاری بتن الیافی ممکن است با افزایش و یا کاهش مقاومت همراه باشد، پس نمی‌توان بطور یقین برای درصد به خصوصی از حجم الیاف اظهار نظر قطعی کرد که به ازاء چه درصدی از الیاف فولادی، افزایش و یا کاهش مقاومت بوجود خواهد آمد. شاید تنها تأثیر الیاف فولادی در نمونه‌های فشاری بتن الیافی افزایش نسبی در مقاومت ترک خوردگی آن باشد. همچنین بهبود مقاومت فشاری بتن با الیاف فولادی می‌تواند به دلیل ممانعت الیاف‌های توزیع شده از انبساط حجمی که به واسطه آن فشار محصورشدگی افزایش یافته باشد، به طوریکه افزایش فشار محصورشدگی باعث بهبود مقاومت و شکل‌پذیری شده است. همچنین استحکام نهایی بتن به دلیل مقاومت رشد ترک‌ها تحت تأثیر هر دو الیاف فولادی و

می‌دهد که در دو حالت SF0.5 و SF1.5 استفاده از الیاف با طول بلندتر سبب افزایش مقاومت کششی ۷ روزه نمونه‌ها می‌شود. همچنین افزایش طول الیاف به همراه ازدیاد درصد حجمی آن، تاثیر بیشتری بر کسب مقاومت کششی دارد. از طرفی مقایسه تاثیر طول الیاف بر مقاومت کششی ۲۸ روزه نمونه‌ها در درصد حجمی‌های مختلف الیاف شکل (۹) نیز نشان

در شکل (۸) بیانگر آن است که استفاده از الیاف با طول بلندتر سبب افزایش مقاومت کششی ۷ روزه نمونه‌ها می‌شود. همچنین افزایش طول الیاف به همراه ازدیاد درصد حجمی آن، تاثیر بیشتری بر کسب مقاومت کششی دارد. از طرفی مقایسه تاثیر طول الیاف بر مقاومت کششی ۲۸ روزه نمونه‌ها در درصد حجمی‌های مختلف الیاف شکل (۹) نیز نشان

جدول ۵. مقادیر مقاومت فشاری ۷ طرح اختلاط در سنین عمل‌آوری ۷ و ۲۸

Fiber length (mm)	V _f (%)	Mix Designation	Compressive st. (MPa)		Percentage increase w.r.t. SF0 (%)	
			7 days	28 days	7 days	28 days
30	0	SF0	40.33	49.63	-----	-----
	0.5	SF0.5L3	41.5	53.88	2.9	8.6
	1.0	SF1.0L3	46.2	61.24	14.55	23
	1.5	SF1.5L3	42.7	57.6	5.88	16
50	0.5	SF0.5L5	41.4	53.26	2.65	7.3
	1.0	SF1.0L5	46.27	56.67	14.73	14.18
	1.5	SF1.5L5	48.8	61.82	21	25

Table 5. Compressive strength of seven mix proportions at 7 and 28 days

جدول ۶. مقادیر مقاومت کششی ۷ طرح اختلاط و تغییرات آن‌ها

Fiber length (mm)	V _f (%)	Mix Designation	Tensile st. (MPa)		Percentage increase w.r.t. SF0 (%)	
			7 days	28 days	7 days	28 days
30	0	SF0	3.71	4.85	-----	-----
	0.5	SF0.5L3	3.86	5.31	4	9.5
	1.0	SF1.0L3	3.98	5.89	7.3	21
	1.5	SF1.5L3	3.9	5.82	5	20
50	0.5	SF0.5L5	3.91	5.63	5.4	16
	1.0	SF1.0L5	4.26	5.72	15	18
	1.5	SF1.5L5	4.62	6.85	25	41

Table 6. Tensile strength of seven mix proportions at 7 and 28 days

جدول ۷. نتایج تست ضربه

Mix Designation	Impact resistance No. of blows		N2-N1	Percentage increase N2 w.r.t. N1 (%)	N1 – N1 _{SF0}	N2-N2 _{SF0}
	First Crack (N1)	Failure (N2)				
SF0	50	52	2	4	-----	-----
SF0.5L3	72	94	22	31	22	42
SF1L3	83	108	35	30	33	56
SF1.5L3	358	506	148	41	308	454
SF0.5L5	67	100	33	49	17	48
SF1L5	105	163	58	55	55	111
SF1.5L5	780	1020	240	30	730	968

Table 7. Impact test results

سنگ‌دانه‌ها تنش کششی تحمل نمی‌کند و الیاف نقش اصلی در تحمل تنش کششی را ایفا می‌کنند. تنش‌ها به وسیله برش محیطی و در صورتی که رویه الیاف آجدار باشند، به وسیله مقاومت چسبندگی از

دلیل این امر را می‌توان به چگونگی سازوکار تاثیر الیاف بر شکست بتن قلمداد نمود. به عبارتی بعد از رخ دادن اولین ترک، بازهم تحمل بار بیشتر را دارد، چون بعد از ترک خوردن، خمیر سیمان و

ارائه شده در جدول میانگین تعداد ضربات چهار دیسک در هر طرح بوده و مقاومت ضربه‌ای در عمر ۲۸ روز اندازه‌گیری شده است.

نتایج جدول (۷) نشان می‌دهد که در شش طرح اختلاط بتن توانمند الیافی، مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و مقاومت ضربه‌ای نهایی با ازدیاد حجم الیاف مصرفی افزایش می‌یابد. بر همین اساس بیشترین مقادیر مقاومت ضربه‌ای در دو طرح SF1.5L3 و SF1.5L5 مشاهده می‌شود. همچنین بررسی نتایج ارائه شده در جدول فوق نشان می‌دهد که افزودن الیاف سبب افزایش تعداد ضربه مورد نیاز برای شکست کامل بعد از اولین ترک می‌شود. به عبارتی با افزودن الیاف قابلیت جذب ضربه یا قابلیت جذب انرژی بتن توانمند به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. مقایسه افزایش تعداد ضربه اولین ترک نسبت به بتن بدون الیاف و افزایش تعداد ضربه گسیختگی نهایی یا شکست نهایی نسبت به بتن بدون الیاف برای طرح اختلاط‌های مختلف جدول (۷) نیز این ادعا را تایید می‌نماید. تأثیر طول الیاف بر مقاومت ضربه‌ای بتن در طرح اختلاط‌های مختلف در شکل‌های (۱۰ و ۱۱) نشان داده شده است.

مقایسه دو طول مختلف ۳۰ و ۵۰ میلی‌متر در سه طرح اختلاط با مقادیر حجمی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد الیاف فولادی بیانگر آن است که استفاده از الیاف با طول بلندتر مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و مقاومت ضربه‌ای نهایی را به میزان قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد و این نتیجه در درصد‌های بالاتر الیاف بسیار ملموس خواهد بود. شکل (۱۲) الگوی شکست در دیسک‌های مورد آزمایش ضربه‌ای را برای چند طرح اختلاط مختلف در این پژوهش را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود استفاده از بتن تحت بار ضربه را تغییر داده به گونه‌ای که انهدام کامل اتفاق نمی‌افتد و همچنین شکل شکست می‌تواند از یک یا دو ترک عمقی به پخش و توسعه ترک‌های متعدد در کل سطح دیسک تغییر نماید. مقایسه حالت (الف) نسبت به حالت (د) شکل (۱۲) به خوبی مویید این موضوع است.

ماتریس به الیاف منتقل می‌شود. بنابراین مادامی‌که ماتریس بتن ترک نخورده است تنش کششی بین الیاف و ماتریس تقسیم می‌شود و پس از ایجاد ترک، همه تنش به الیاف انتقال می‌یابد [14].

شکل ۷. الگوی شکست نمونه‌ها پس از تست مقاومت کششی (الف) بتن توانمند بدون الیاف (ب) بتن توانمند الیاف



Fig. 7. Fracture pattern of concrete under tensile test a) plain concrete b) steel fiber-reinforced concrete

شکل ۸. مقایسه مقاومت کششی ۷ روزه نمونه‌ها با درصد‌های مختلف الیاف در دو طول ۳۰ و ۵۰ میلی‌متر

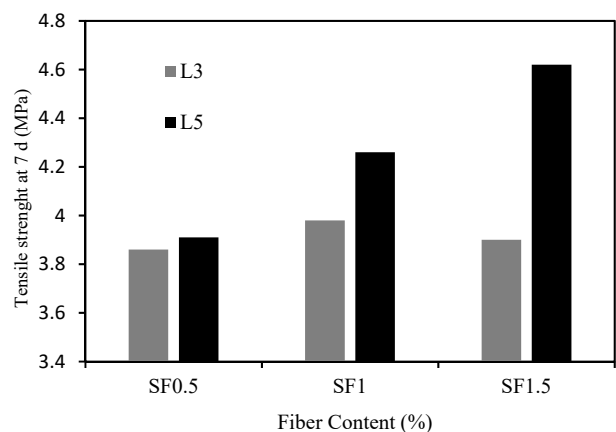


Fig. 8. Tensile strength of SF with different fiber content and two lengths of 30 and 50 mm at 7 days.

جامران، کیم و همکاران همچون نتایج این پژوهش نشان دادند که استفاده از الیاف فولادی صاف قلاب‌دار و همچنین الیاف ترکیبی می‌تواند سبب بهبود رفتار مقاومت کششی بتن توانمند شود [9, 15].

۳-۶. نتایج آزمون مقاومت ضربه‌ای بتن

نتایج آزمایش وزنه افتان روی ۲۸ دیسک بتنی با سن ۲۸ روز برای ۷ طرح اختلاط در جدول (۷) گزارش شده است. تعداد ضربات تا ایجاد اولین ترک روی سطح نمونه، مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و تعداد ضربات مورد نیاز برای ایجاد و پخش ترک تا گسیختگی نهایی مقاومت ضربه‌ای نهایی نامیده می‌شوند. مقادیر

۴-۶. محاسبه مقدار انرژی جذب شده در هر آزمون

با توجه به اینکه برای تست ضربه روش‌های مختلفی وجود دارد با محاسبه انرژی ضربه می‌توان نتایج را به سایر مطالعات بسط داده و نتایج را با دقت بیشتری با یکدیگر مقایسه نمود. بر این اساس با شمارش تعداد ضربه‌های وارد شده به بتن تا گسیختگی نهایی و یا اولین ترک، مقدار انرژی وارد شده به هر نمونه از رابطه (۱) محاسبه می‌شود که در این رابطه m جرم وزنه و v سرعت سقوط وزنه بوده که از روابط حرکت سقوط آزاد قابل محاسبه است [8, 17].

$$U = x \frac{mv^2}{2} \quad (1)$$

شکل ۱۲. الگوی شکست پس از بار ضربه در چند طرح اختلاط مختلف

الف) SF0 ب) SF0.5L5 ج) SF1L5 د) SF1.5L5

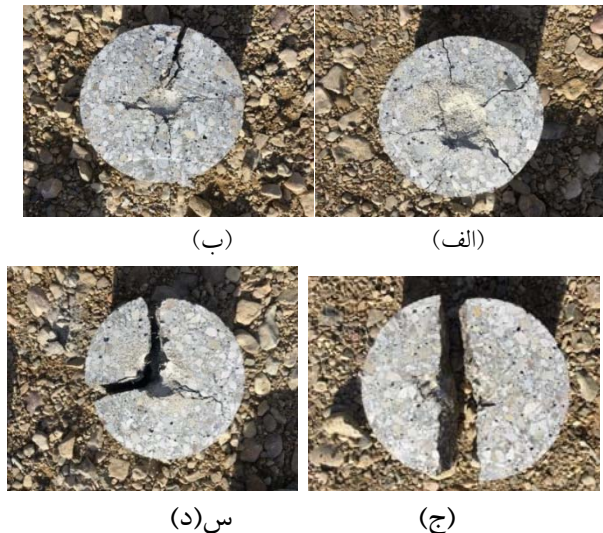


Fig. 12. Fracture pattern of concrete with different fiber volume fractions under the drop-weight test:
(a) SF0, (b) SF0.5L5, and (c) SF1 L5 (d) SF1.5L5.

در جدول (۸) مقادیر انرژی جذب شده ناشی از ضربه برای هفت طرح اختلاط موردنظر در این مطالعه گزارش شده است. مطابق با نتایج بخش قبل بر اساس شمارش تعداد ضربه، بیشینه انرژی ضربه در بین هفت طرح اختلاط موجود متعلق به حالت SF1.5L5 و برابر ۱۵۸۶۹ کیلوژول برای اولین ترک و ۲۰۷۵۰ کیلوژول برای شکست نهایی نمونه است، در حالیکه مقادیر معادل برای بتن توانمند بدون الیاف (SF0) به ترتیب برابر ۱۰۱۷ و ۱۰۵۷ کیلوژول است. داده‌های این جدول نیز نشان می‌دهد با افزایش مقاومت فشاری و درصد حجمی و طول الیاف انرژی جذب شده توسط بتن بیشتر شده است. البته نیاز است درآینده

شکل ۱۰. مقایسه مقاومت ضربه‌ای اولین ترک بتن توانمند با درصد‌های مختلف الیاف در دو طول ۳۰ و ۵۰ میلی‌متری

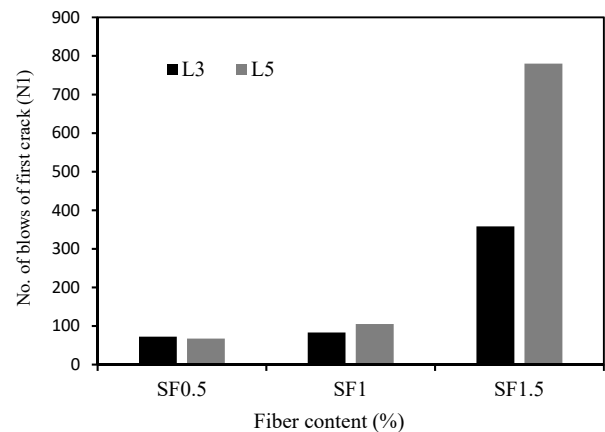


Fig. 10. Impact resistance of first crack of SF with different fiber content and two lengths of 30 and 50 mm.

در این شکل مشاهده می‌شود در حالت (د) حداقل چهار ترک با عرض کم روی سطح دیسک ایجاد شده و شکست کامل یا پاشش مشاهده نمی‌شود زیرا با قابلیت انعطافی که بتن الیافی دارد در صورت تشکیل اولین ترک، اتصالاتی را در جهت‌های مختلف ایجاد نموده و با پل زدن بین ترک‌ها، تنش و کرنش ایجاد شده را انتقال می‌نماید. پس افزایش الیاف در بتن باعث می‌شود که قسمت‌های ترک‌خورده نیز در مقابل بار از خود مقاومت نشان داده و قابلیت جذب نیروی بیشتری در برابر ضربه را داشته باشند [16]. از طرفی بررسی‌ها نشان می‌دهد ایجاد اولین ترک و گسیختگی نهایی بتن رابطه مستقیمی با مقاومت فشاری آن دارد بطوریکه با افزایش مقاومت فشاری تعداد ضربه بیشتری برای ایجاد ترک و انهدام کامل آن مورد نیاز است که با افزودن الیاف به بتن تشدید می‌شود.

شکل ۱۱. مقایسه مقاومت ضربه‌ای نهایی بتن توانمند با درصد‌های مختلف الیاف در دو طول ۳۰ و ۵۰ میلی‌متری

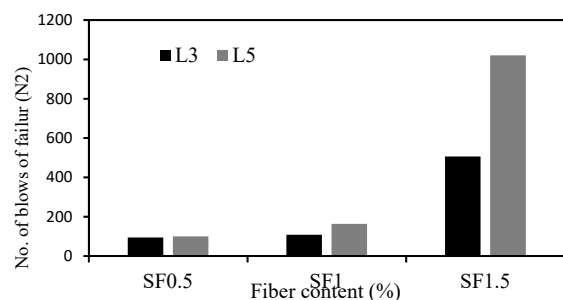


Fig. 11. Impact resistance of failure of SF with different fiber content and two lengths of 30 and 50 mm.

۰/۵ تا ۱/۵ درصد حجمی الیاف فولادی مورد مطالعه، در محدوده ۴۱-۹ درصد تغییر نمود.

۳- الیاف فولادی در محدوده ۱/۵-۰/۵ درصد حجمی، مقاومت ضربه‌ای بتن توانمند تا ظهور اولین ترک و رسیدن به مقاومت نهایی را به طور قابل ملاحظه‌ای (تا ۹۶٪ ضربه) افزایش داد.

۴- تأثیر الیاف بر مقاومت ضربه‌ای بتن توانمند تا بروز اولین ترک و رسیدن بتن به مرحله گسیختگی با استفاده از الیاف‌های با طول بلندتر به مراتب بیشتر است و در درصدهای حجمی بالای الیاف تا ۱۰۰ درصد افزایش می‌یابد.

۵- محاسبه انرژی منتقل شده به نمونه‌ها با استفاده از انرژی جنبشی وزنه و در نظر گرفتن شرایط سقوط آزاد نشان داد که قابلیت جذب انرژی تا محدوده ۲۰۰۰۰ کیلوژول افزایش می‌یابد.

۶- بررسی الگوی شکست نمونه‌ها پس از اعمال نیروهای فشاری، کششی و ضربه نشان می‌دهد در آزمون‌های کشش، گسیختگی نهایی به صورت دو نیم شدن اتفاق نخواهد افتاد و در آزمون ضربه نیز شکست نهایی به صورت افزایش تعداد ترک‌ها در نقاط مختلف رخ داده و شکست نهایی نیز در درصدهای بالای الیاف، در تعداد ضربات بسیار بالاتر اتفاق می‌افتد.

۷- بررسی نتایج نشان می‌دهد به کارگیری الیاف تأثیر قابل ملاحظه‌تری بر عملکرد بتن در برابر بارهای ضربه‌ای نسبت به نیروهای فشاری و کششی دارد به ویژه آنکه وجود الیاف مانع از هم‌پاشیدگی بتن و انهدام آنی آن می‌شود. این قابلیت در الیاف ۵۰ میلی‌متری با درصد حجمی ۱/۵ محسوس‌تر است.

منابع

- [1] Kazemi S. 2013 Advance Concrete Technology, Amirkabir University of Technology press, Tehran. (In Persian)
- [2] National Building Standards, Subject twenty-one, 2015, Road, Housing and Urban Development Research Center press, Tehran. (In Persian)
- [3] Mostophnezhad D. 2010 Concrete technology and mix design, Arkan Danesh press, Tehran. (In Persian)

با انجام آزمایش‌های تکمیلی روی بتن‌های حاوی الیاف با طول‌های بزرگتر از ۵۰ میلی‌متر و همچنین درصدهای بیشتر از ۱/۵ درصد الیاف بررسی جامع‌تری نسبت به تعیین حد رشد مقاومت ضربه‌ای بتن انجام گیرد.

جدول ۸ مقادیر انرژی ضربه در اولین ترک و شکست نهایی برای هفت طرح اختلاط

Mix Designation	No. of blows		Impact energy (KN m)	
	First Crack	Failure	First Crack	Failure
SF0	50	52	1017.25	1057.94
SF0.5L3	72	94	1464.84	1912.43
SF1L3	83	108	1688.64	2197.26
SF1.5L3	358	506	7283.51	10294.57
SF0.5L5	67	100	1363.12	2034.50
SF1L5	105	163	2136.23	3316.26
SF1.5L5	780	1020	15869.10	20751.9

Table. 8. Result of impact energy at first crack and failure for seven mix proportions

۷. نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر مقادیر مختلف (۱/۵، ۰/۵، ۱ درصد) الیاف فولادی با طول‌های مختلف (۳۰ و ۵۰ میلی‌متر) بر مشخصات مکانیکی بتن توانمند از جمله مقاومت فشاری، کششی و ضربه‌ای بررسی شد که نتایج آن به شرح زیر است:

۱- با افزودن الیاف فولادی به بتن، مقاومت فشاری آن نسبت به بتن فاقد الیاف افزایش می‌یابد. هر چند میزان رشد این مقاومت در بتن‌های حاوی الیاف با طول‌های مختلف یکسان نیست. به عبارتی دیگر با ازدیاد درصد حجم الیاف مصرفی، مقاومت فشاری با افزایش و یا کاهش همراه است. این موضوع نشان می‌دهد مقدار مصرف الیاف برای بهبود مقاومت فشاری به سایر پارامترها از جمله طول و نسبت ظاهری الیاف نیز بستگی دارد. در این پژوهش رشد مقاومت فشاری بتن با استفاده از مقادیر ۰/۵ تا ۱/۵ درصد حجمی الیاف فولادی در محدوده ۲۵-۸۰ درصد تغییر نمود.

۲- با افزودن الیاف به بتن مقاومت کششی آن افزایش می‌یابد. مقدار رشد مقاومت کششی بتن به مقاومت الیاف در برابر بیرون کشیده شدن از مخلوط بتن بستگی دارد و هرچه چسبندگی بین الیاف و ماتریس بتن بیشتر باشد عملکرد آن مطلوبتر است. برای الیاف با مقطع ثابت این مقاومت با افزایش طول بیشتر می‌شود. این افزایش در درصدهای حجمی ۱/۵ و طول ۵۰ میلی‌متر الیاف قابل ملاحظه‌تر است. در این پژوهش رشد مقاومت کششی بتن با استفاده از مقادیر

- [14] Luo X., Sun W., Chan S.Y.N. 2001 Steel fiber reinforced high-performance concrete: a study on the mechanical properties and resistance against impact, *material and structure*, 34, 144-149.
- [15] Jameran A., Ibrahim I.S., Yazan SH.S., Rahim S.A. 2015 Mechanical Properties of Steel-polypropylene Fibre Reinforced Concrete Under Elevated Temperature. *Procedia Engineering*, 125, 818-824.
- [16] Nataraja M.C., Nagaraj T.S., Basavaraja S.B. 2005 Reproportioning of steel fibre reinforced concrete mixes and their impact resistance, *Cement and Concrete Research*, 35, 2350-2359.
- [17] Amani A., Ghasemzadeh H. & Ghasemi M. 2016 Investigation on the effect of composite fiber on the energy absorption of concrete, the 8th annual national conference of concrete in Iran, Tehran. (In Persian)
- [4] ACI Committee 544, State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, ACI 544.2R-89, Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1996.
- [5] ASTM A820 / A820M-16, Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- [6] Nataraja M.C., Dhang, N. & Gupta A.P. 1999 Statistical variations in impact resistance of steel fiber reinforced concrete subjected to drop weight test. *Cement and Concrete Research*, 29, 989-995.
- [7] Song P. S., and Hwang S. 2004 Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 18(9), 669-673.
- [8] Nili M., Afrouhsabet, V. 2010 Combined effect of silica fume and steel fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete, *International Journal of Impact Engineering*, 37, 879-886.
- [9] Kim K.CH., Yang, I.H. 2018 Effects of Single and Hybrid Steel Fiber Lengths and Fiber Contents on the Mechanical Properties of High-Strength Fiber-Reinforced Concrete_files, *Advances in Civil Engineering*, 2, 1-14.
- [10] American concrete institute-committee 440, guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP rebars, ACI 440.1R-03, ACI, Farmington Hills, MI, USA, 2003.
- [11] ASTM C39 / C39M-03, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003.
- [12] ASTM C496/C496M-04, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.
- [13] Wasim A. W., Iqbal Khan M., Mourad, SH. 2018 Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete, *Construction and Building Materials*, 168, 556-569.

Experimental investigation of effect of content and length of steel fiber on mechanical properties and impact resistance of high-strength concert

Mojtaba Ameri^{1*}, Sattar Chenari², Mohammad Taji³

1. Assistant professor, Department of Civil Engineering, Shahroud Branch, Islamic Azad University, Shahroud, Iran
2. M.Sc., Department of Civil Engineering, Shahroud Branch, Islamic Azad University, Shahroud, Iran
3. Assistant professor, Department of Mining Engineering, Shahroud Branch, Islamic Azad University, Shahroud, Iran

*m49_ameri@yahoo.com

Abstract:

Fiber Reinforced Concrete can be defined as a composite material consisting of mixtures of cement, mortar or concrete and discontinuous, discrete, uniformly dispersed suitable fibers. Fiber reinforced concrete are of different types and properties with many advantages. Fibers are usually used in concrete to control plastic shrinkage cracking and drying shrinkage cracking. They also lower the permeability of concrete and thus reduce bleeding of water. Some types of fibers produce greater impact, abrasion and shatter resistance in concrete. Generally fibers do not increase the flexural strength of concrete. Some fibers reduce the strength of concrete. Various fibers have been used by researchers to reinforce concrete and *extend the service life of structures*, also researchers are using different fibers to improve behavior of different concretes, especially high-strength concrete, against impact and dynamic loads. This study investigate the effect of different contents and lengths of steel fiber on the mechanical properties of high-strength concrete. In this study, wavy hooked-ended fibers of two length (30, 50 mm) with three volume fraction 0.5%, 1% and 1.5% were added to concrete mixes and 150×300 mm cylindrical specimens were made. Mixing of fiber reinforced concrete needs careful conditions to avoid balling of fibers, segregation and in general the difficulty of mixing the materials uniformly. Increase in the aspect ratio, volume percentage and size and quantity of coarse aggregate intensify the difficulties and balling tendency. Then different tests were performed for determination of compressive strength, splitting tensile strength and impact resistance at 7 and 28 days, in accordance with standards and procedure proposed. The impact resistance (strength) test was s carried out by using drop weight method recommended by ACI Committee. The drop-weight test equipment was fabricated according to A SASTM standards. The number of blows to the first visible cracks on the top surface of the disc is defined as the first-crack strength. The results indicated that the addition of different contents and lengths of steel fiber caused significant change in the mechanical properties of high-strength concrete. In the best case, using 1.5% of 50 mm long steel fibers, increased compressive strength and splitting tensile strength by 25% and 40%, respectively, compared to non-fibrous high-strength concrete. A remarkable improvement was observed in impact resistance of the fibrous concretes, as compared with the reference materials. By incorporating steel fibers into the mixtures, specially longer fibers, a conclusive increase in the number of blows required for first and final cracking (as compared to reference values) was observed, as well as the number of blows from the first cracks to the final failure in the high percentage of the fiber increased up to 80%. Moreover, it can be concluded that, by adding fiber, the failure crack pattern was changed from a single crack to a group of narrow crack, which demonstrate the beneficial effect of fiber reinforced concrete when subjected to impact loading. Addition of steel fibers to concrete significantly enhances modulus of rupture and toughness, and resists cracking in high-strength concrete, and restrains damage during the process of impact by complementally mechanisms.

Keywords: Fiber-Reinforced High-Strength Concrete, Steel Fiber, Compressive Strength, splitting Tensile Strength, Impact Strength