

# بررسی تأثیر گام فنر بر عملکرد بتن حاوی فنر فولادی کم کربن بازیافتی

قاسم پاچیده<sup>۱</sup>، مجید قلهکی<sup>۲\*</sup>، امین مشتاق<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ghpachideh@semnan.ac.ir  
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، mgholhaki@semnan.ac.ir، ۰۹۱۲۲۸۷۴۸۶۹  
۲- مربی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه گرمسار، گرمسار، ایران، amin.moshtagh@ugsr.ir

## چکیده

یکی از مهمترین پارامترهای تعیین کننده در مقاومت فنر و مقاومت بتن حاوی فنر، طول گام آن می باشد. بنابراین در این مقاله با افزودن فنرهای فولادی کم کربن از جنس گالوانیزه با قطر، تعداد گام و درصدهای اختلاط مختلف به بتن خودتراکم، سعی در بهبود خواص مکانیکی آن شده است. بدین منظور فنرهایی با قطر ۸، ۱۲ و ۱۶ میلی متر و با ضخامت ۰/۸ میلی متر، با تعداد گام‌های دو، چهار و شش در درصدهای حجمی ۰/۲ و ۰/۴ به بتن خودتراکم افزوده شده و آزمایشات مقاومت فشاری (نمونه استوانه‌ای به ابعاد ۱۰\*۲۰ سانتی متر)، کششی (نمونه استوانه‌ای به ابعاد ۱۰\*۲۰ سانتی متر) و خمشی (تیر منشوری به ابعاد ۱۰\*۱۰\*۵۰ سانتی متر) بر روی آن‌ها انجام شد. نتایج حاکی از آن است که استفاده از فنر با قطر ۱۲ میلی متر مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن خودتراکم را به ترتیب تا ۲۹، ۵۲ و ۳۶ درصد افزایش داده اما استفاده از فنر با قطر ۱۶ میلی متر نه تنها خصوصیات مکانیکی بتن خودتراکم را افزایش نداده بلکه کاهش نیز می دهد. بعلاوه سختی بالا و قرار داشتن قطر فنر ۸ میلی متر در محدوده مابین سایز سنگدانه ها، استفاده از آن در جهت بهبود خواص مکانیکی بتن خودتراکم نیازمند تحقیقات و شناخت بیشتر می باشد. همچنین نقش اصلی در تعیین مقاومت بتن حاوی فنر را قطر فنرها ایفا کرده و تعداد گام فنر الزاماً نمی تواند ملاک تعیین افزایش یا کاهش مقاومت بتن باشد. بعنوان جمع بندی کلی می توان بیان نمود که استفاده از فنرهای با تعداد شش گام، عملکرد مناسبی ندارند اما استفاده از فنرهای با دو و چهار گام با توجه به درصد استفاده و همچنین قطر فنر مورد استفاده، می توانند مقاومت فشاری، کششی و خمشی را افزایش دهند.

**کلمات کلیدی:** بتن خودتراکم، فنر فولادی کم کربن بازیافتی، خصوصیات مکانیکی، گالوانیزه، گام.

## ۱- مقدمه

بتن به عنوان یک ماده ی ساختمانی عملکرد ضعیفی در کشش داشته و این مسأله باعث وقوع ترک و خزش می شود. با گذشت زمان و افزایش تنش ها، ترک ها زیاد شده و در عمق بتن نفوذ می کنند. به همین جهت می توان از الیاف فولادی جهت جلوگیری از رشد بیش از حد ترک ها استفاده کرد [۱-۲].

بعلاوه ترکیب شدن الیاف بصورت یکنواخت در بتن، در همه ی جهات در بتن قرار می گیرند. با سخت شدن بتن، بین الیاف و ذرات بتن پل زده شده که از رشد ریزترک ها جلوگیری می کند. البته علاوه بر الیاف فولادی، الیاف پلیمری، کربنی نیز در بتن بکار می رود. در میان الیاف پلیمری، الیاف پلی پروپیلن یکی از رایج ترین و محبوب ترین الیاف ها در میان محققان است [۳-۸].

مقاومت کششی بتن در حدود ۰/۱ مقاومت فشاری آن می باشد، بنابراین اکثر ترک ها در بتن تحت تنش های کششی ایجاد می شود [۹]. با وجود اینکه الیاف فولادی در کنترل ترک تحت تنش های وارده به بتن موثر هستند اما در تنش های بالا توانایی جلوگیری از رشد بیش از حد ترک ها را ندارند [۱۰].

یائو و همکاران در سال ۲۰۰۳ [۱۱]، بتن حاوی الیاف فولادی، کربنی و پلی پروپیلن با درصدهای مختلف را تحت آزمایش مقاومت خمشی قرار دادند. نتایج آزمایش ها نشان داد که در هر صورت اضافه کردن الیاف، بتن را نسبت به بتن معمولی مقاوم تر و شکل پذیرتر می سازد. بیشترین مقاومت خمشی مربوط به الیاف فولادی است که این مسئله نشان دهنده خواص مناسب این نوع الیاف است. در حالی که الیاف دیگر

مثل الیاف فولادی تغییر اساسی در مشخصات بتن ایجاد نکردند. نتایج نشان داد که ترکیب الیاف فولادی با الیاف کربنی منجر به بیشترین مقاومت شده است.

کورشی و همکاران [۱۲] خواص بتن با مقاومت بالا را با افزودن الیاف فولادی بررسی کردند. نتایج آزمایش آن‌ها نشان داد که با افزایش الیاف فولادی، مقاومت کششی به صورت خطی افزایش می‌یابد و سرعت افزایش در ۵ روز اول بیشتر می‌باشد.

ماتیاس و همکاران در سال ۲۰۰۶ [۱۳] در استرالیا در بررسی‌های خود نشان دادند که چگونه الیاف پلی پروپیلنی رفتار خردشدگی بتن درجا را بهبود می‌بخشند. نتایج به دست آمده دیدگاهی از نظر خردشدگی بتن با مقادیر مختلف الیاف پلی پروپیلنی را ارائه می‌دهد. بانتیا و شاه [۱۴-۱۵] بتن الیافی از دو دسته از الیاف با جنس یکسان و اندازه‌های مختلف را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که الیاف کوچکتر بین ترک‌های کوچک پل زده و رشد ریزترک‌ها را کنترل کرده و از به هم پیوستن آن‌ها جلوگیری نموده و به میزان قابل توجهی باعث بهبود مقاومت خمشی می‌شود.

پژوهش دیگری از بانتیا [۵] بر روی بتن الیافی از دو دسته الیاف با یک اندازه و دو جنس مختلف نشان داد که الیاف سخت تر و با مدول الاستیسیته ی بالاتر منجر به مقاومت در برابر اولین ترک و مقاومت نهایی شده و نوع دیگر که تقریباً انعطاف پذیر است، منجر به بهبود مقاومت خمشی بعد از اولین ترک می‌شود.

برای بهبود نقاط ضعف بتن، مطالعات متعدد بر روی بتن تقویت شده با الیاف انجام شده است. تحقیقات نشان دادند بتن تقویت شده با الیاف کوتاه پلاستیکی عملکرد بتن را به طور قابل توجهی بهبود بخشیده و ضعف‌های آن از قبیل قدرت کششی کم، انعطاف پذیری پایین و ظرفیت جذب انرژی کم را از بین می‌برد [۲۲-۱۶].

لیمباجیا و همکاران در سال ۲۰۰۰ [۲۳] با مطالعه بر روی بتن‌های بازیافتی، به این نتیجه رسیدند که مقاومت فشاری بتن بازیافتی بستگی به نوع سنگدانه‌ها و خصوصیات آن دارد. نسبت آب به سیمان، درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی بجای سنگدانه‌های طبیعی و میزان چسبندگی ملات از جمله مهمترین عوامل موثر بر مقاومت فشاری بتن بازیافتی هستند.

جداکیویچ و کلیژیویچ در سال ۲۰۰۲ [۲۴] به مطالعه ی تأثیر افزودن سنگدانه‌های بازیافتی به بتن‌های با مقاومت بالا پرداختند. بتن‌های بکار رفته با عمر ۲ الی ۷ سال با مقاومت متوسط و بالا بوده که خصوصیات مکانیکی آن‌ها با یکدیگر مقایسه گردید.

کارنیرو و همکاران در سال ۲۰۰۸ [۲۵] به بررسی جایگزینی مصالح بازیافتی با ترکیبی از ۵۵ درصد ملات، ۲۰ درصد بتن و ۲۵ درصد سنگدانه بازیافتی پرداختند. نتایج نشان داد که با جایگزینی ۲۵ درصد سنگدانه‌های بازیافتی بجای سنگدانه‌های طبیعی، مقاومت بتن افزایش می‌یابد. علت این افزایش مقاومت، چسبندگی بهتر سنگدانه‌های بازیافتی با خمیر سیمان می‌باشد.

خالو و همکاران در سال ۲۰۱۰ [۲۶] به بررسی عملکرد بتن‌های خودتراکم متشکل از درشت دانه‌های بازیافتی پرداختند. طبق این پژوهش، آن‌ها با بکارگیری سنگدانه‌های بازیافتی به عنوان درشت دانه با درصد‌های جایگزینی مختلف نسبت به درشت دانه ی طبیعی (۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد) به این نتیجه رسیدند که بکارگیری سنگدانه‌های بازیافتی موجب افت خواص رئولوژیک بتن‌های خودتراکم شده و دستیابی به خواص خودتراکمی را دشوار می‌سازد. همچنین جایگزینی ۲۵٪ درشت دانه ی بازیافتی با درشت دانه ی غیر بازیافتی (طبیعی) بهترین حالت ممکن برای ساخت بتن خودتراکم بازیافتی می‌باشد.

همچنین کیم و همکاران در سال ۲۰۱۰ [۲۷] به بررسی عملکرد بتن‌های مسلح شده با الیاف پلی استر (PET) بازیافتی پرداختند. بدین منظور با مقادیر ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد به بتن افزوده شده و با سایر الیاف‌ها از جمله الیاف پلی پروپیلن مقایسه شد. نتایج نشان داد که هرچه مقدار PET بازیافتی در بتن کمتر شود، مقاومت فشاری و مدول الاستیک بتن افزایش یافته که نسبت به وجود الیاف پلی پروپیلن در بتن، عملکرد بهتری دارد.

طبق تحقیقات Lankard در سال ۱۹۷۲ [۲۸] اگر مقدار استفاده ی فنر در بتن از حدود ۱۰۰ کیلوگرم در مترمکعب بیشتر شود، کارایی و همگن بودن بتن زیر سوال می‌رود و باید تدابیر خاصی برای اختلاط آن در بتن فراهم نمود. با توجه به مطالعات چندین سال اخیر، محققان به این نکته دست یافتند که مقاومت، هندسه و شکل پذیری الیاف، عوامل کلیدی در بهبود مقاومت، شکل پذیری و ظرفیت جذب انرژی بتن الیافی هستند. Xu و همکاران [۲۹] آزمایشاتی را بر روی بتن‌های حاوی ۷ نوع الیاف انجام دادند. نتایج نشان داد که بتن حاوی الیاف فبری فولادی به مقدار ۱٪ حجمی، مقاومت و جذب انرژی بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد. استفاده از فنر در بتن به علت

عملکرد سه بعدی و محصور شدگی مناسب بین سنگدانه ها و خمیر سیمان، مقاومت و شکل پذیری بیشتری نسبت به سایر الیاف ها از خود نشان داد [۳۰].

صدرممتازی و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۳۱] با استفاده از روش های غیر مخرب به بررسی خصوصیات بتن الیافی حاوی سنگدانه های باز یافتی بتن پرداختند. در این پژوهش با بکار بردن الیاف پلی پروپیلن به طول ۶ میلی متر و با درصد های حجمی ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ در بتن که با جایگزینی ریزدانه و درشت دانه ی باز یافتی با درصد های ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ ساخته شده، به این نتیجه رسیدند که با افزایش درصد حجمی الیاف پلی پروپیلن در بتن های باز یافتی، سرعت امواج فراصوتی و درصد جذب آب بتن کاهش و مقاومت الکتریکی افزایش یافت.

احمدی و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۳۲] به بررسی تأثیر افزودن الیاف فلزی باز یافتی از لاستیک خودرو بر بتن حاوی سنگدانه های باز یافتی پرداختند. درصد جایگزینی این نوع سنگدانه ها با درشت دانه های طبیعی به میزان ۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد و میزان الیاف بکار رفته ۰/۵ درصد حجم بتن می باشد. نتایج نشان داد که با افزودن الیاف فلزی باز یافتی به بتن با سنگدانه های باز یافتی، کمبود مقاومت این نوع بتن ها جبران می گردد.

مستعلی و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۳۳] به بررسی خصوصیات مکانیکی و مقاومت ضربه ی بتن های حاوی الیاف CFRP باز یافتی پرداختند. الیاف CFRP با مقادیر ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد و با اندازه های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی متر به بتن اضافه شدند. طبق نتایج بدست آمده، با افزایش درصد و طول الیاف CFRP باز یافتی در بتن، مشخصات مکانیکی و مقاومت ضربه ای افزایش یافته اما کارایی بتن کاهش می یابد.

شیرازی بیدآبادی و اکبری در سال ۲۰۱۷ [۳۴] به بررسی بتن متشکل از سنگدانه های باز یافتی تقویت شده با الیاف پرداختند. ابتدا تأثیر ابعاد و میزان جایگزینی سنگدانه های باز یافتی و سپس تأثیر افزودن الیاف پلی پروپیلن و فولادی در بهبود خواص مکانیکی بتن باز یافتی بررسی شد. نتایج حاکی از آن است که افزودن الیاف فولادی به بتن با سنگدانه های باز یافتی تأثیر بیشتری در بهبود خواص مقاومتی نسبت به الیاف پلی پروپیلن دارد.

با مطالعه و بررسی تحقیقات اخیر می توان به این نتیجه پی برد که هر چند که تحقیقات محدودی توسط پاچیده و قلهکی و سایر محققان در رابطه به عملکرد فنر در بتن انجام شده بود، اما هیچ یک به بررسی عملکرد انواع فنر فلزی با گام های متفاوت نپرداختند. چراکه گام فنر نقش بسزایی در مقاومت فنر و میزان همگنی بتن و قرارگیری مصالح در درون حفره فنر دارد. بنابراین در این مقاله با توجه به مطالعات انجام شده و خلأهای تحقیقاتی موجود، به بررسی تأثیر افزودن انواع فنر فولادی کم کربن باز یافتی از جنس گالوانیزه با گام های مختلف و با مشخصات هندسی و مقادیر مختلف بر خصوصیات مکانیکی بتن خودتراکم پرداخته شده است. بدین منظور تعدادی نمونه ی استوانه ای به ابعاد ۱۰\*۲۰ سانتی متر و منشوری به ابعاد ۱۰\*۱۰\*۵۰ سانتی متر جهت انجام تست مقاومت فشاری، کششی و خمشی ساخته و با عملکرد الیاف فولادی در شرایط مشابه مقایسه شد. فنر با مقادیر ۰/۲ و ۰/۴ درصد حجمی و با گام های مختلف به بتن اضافه شد.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

در این مطالعه تعدادی نمونه ی استوانه ای و منشوری بتن حاوی انواع فنر فولادی کم کربن باز یافتی با قطر ۸، ۱۲ و ۱۶ میلی متر، با مقادیر ۰/۲ و ۰/۴ درصد حجمی و با دو، چهار و شش گام جهت تعیین مقاومت فشاری، کششی و خمشی ساخته شد. در جدول ۱ مشخصات مصالح مورد استفاده در ساخت بتن مورد آزمایش نشان داده شده است. مطابق جدول ۲، نسبت آب به سیمان مورد استفاده در این پژوهش برابر با ۰/۴۵ در نظر گرفته شد. همچنین از مجموع کل سنگدانه ها (شن و ماسه)، ۵۴٪ شن و ۴۶٪ ماسه استفاده و نحوه ی اختلاط فنر به نسبت حجمی کل بتن صورت گرفت. کلیه ی مراحل اختلاط، ساخت و عمل آوری نمونه های استوانه ای، در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه سمنان انجام شد. طبق جدول ۲، طرح A بعنوان نمونه ی شاهد (نمونه ی بدون فنر) بوده و در طرح های دیگر بعنوان نمونه طرح S12-4-0.2 به معنی استفاده از فنر (S = Spiral) با قطر ۱۲ میلی متر، با تعداد چهار گام و به مقدار ۰/۲ درصد حجمی بتن بوده و نامگذاری سایر طرح ها نیز به همین روال می باشد. بنابراین بطور کلی طرح ها شامل سه نوع فنر (S12-S8-S16) با گام های دو، چهار و شش و مقادیر استفاده ی ۰/۲ و ۰/۴ درصد حجمی بتن می باشند.

جدول ۱: مشخصات مصالح مصرفی در بتن

سیمان	شن ریزدانه (نخودی)	ماسه	آب	روان کننده
تیپ ۲ (شاهرود)	گوهر	طبیعی دوبارشور	آب شرب شهر تهران	ابر روان ساز کربوکسیلاتی (C20)

جدول ۲: طرح اختلاط مصالح مصرفی در بتن

شماره طرح	نام طرح	نسبت وزنی مصالح					فتر
		ماسه	شن ریزدانه	سیمان	آب	ابر روان کننده	
۱	A	۱	۱/۱۸	۰/۴۷	۰/۲۱	۰/۰۰۱	-
۲	S8-2-0.2	۱	۱/۱۸	۰/۴۷	۰/۲۱	۰/۰۰۱	۲
۳	S8-2-0.4	۱	۱/۱۸	۰/۴۷	۰/۲۱	۰/۰۰۱	۲
۴	S8-4-0.2	۱	۱/۱۸	۰/۴۷	۰/۲۱	۰/۰۰۱	۴
۵	S8-4-0.4	۱	۱/۱۸	۰/۴۷	۰/۲۱	۰/۰۰۱	۴
۶	S8-6-0.2	۱	۱/۱۸	۰/۴۷	۰/۲۱	۰/۰۰۱	۶
۷	S8-6-0.4	۱	۱/۱۸	۰/۴۷	۰/۲۱	۰/۰۰۱	۶
۸	S12-2-0.2	۱	۱/۱۸	۰/۴۷	۰/۲۱	۰/۰۰۱	۲
۹	S12-2-0.4	۱	۱/۱۸	۰/۴۷	۰/۲۱	۰/۰۰۱	۲
۱۰	S12-4-0.2	۱	۱/۱۸	۰/۴۷	۰/۲۱	۰/۰۰۱	۴
۱۱	S12-4-0.4	۱	۱/۱۸	۰/۴۷	۰/۲۱	۰/۰۰۱	۴
۱۲	S12-6-0.2	۱	۱/۱۸	۰/۴۷	۰/۲۱	۰/۰۰۱	۶
۱۳	S12-6-0.4	۱	۱/۱۸	۰/۴۷	۰/۲۱	۰/۰۰۱	۶
۱۴	S16-2-0.2	۱	۱/۱۸	۰/۴۷	۰/۲۱	۰/۰۰۱	۲
۱۵	S16-2-0.4	۱	۱/۱۸	۰/۴۷	۰/۲۱	۰/۰۰۱	۲
۱۶	S16-4-0.2	۱	۱/۱۸	۰/۴۷	۰/۲۱	۰/۰۰۱	۴
۱۷	S16-4-0.4	۱	۱/۱۸	۰/۴۷	۰/۲۱	۰/۰۰۱	۴
۱۸	S16-6-0.2	۱	۱/۱۸	۰/۴۷	۰/۲۱	۰/۰۰۱	۶
۱۹	S16-6-0.4	۱	۱/۱۸	۰/۴۷	۰/۲۱	۰/۰۰۱	۶

نحوه‌ی اختلاط مصالح برای ساخت بتن، طبق استاندارد ASTM C192 انجام شد. ابتدا شن ریزدانه (نخودی) به میکسر اضافه شده، سپس حدود یک سوم آب به آن افزوده و میکسر روشن شده و شروع به چرخیدن کرد. در نهایت به تدریج ماسه طبیعی، سیمان و مابقی آب به همراه ابر روان کننده به میکسر اضافه شد. فنرها به تدریج در حدود ۲ الی ۳ دقیقه به بتن اضافه و به مدت ۳ دقیقه نیز میکسر در این حالت چرخیده تا طرح مورد نظر آماده شود.

به منظور تأمین ویژگی‌های رئولوژیکی بتن خودتراکم، آزمایش‌های جریان اسلامپ، زمان جریان  $T_{50}$ ، زمان عبور بتن از قیف V، توانایی عبور (نسبت انسداد) در جعبه L و شاخص پایداری چشمی در فاز خمیری بتن خودتراکم انجام شد. در این مقاله، نتیجه به دست آمده از فاز خمیری، در محدوده مجاز EFNARC [۳۵] برای پذیرش بتن خودتراکم قرار داشته، در نتیجه تمامی نمونه‌های ساخته شده از لحاظ خواص خودتراکمی بتن، مناسب ارزیابی شدند.

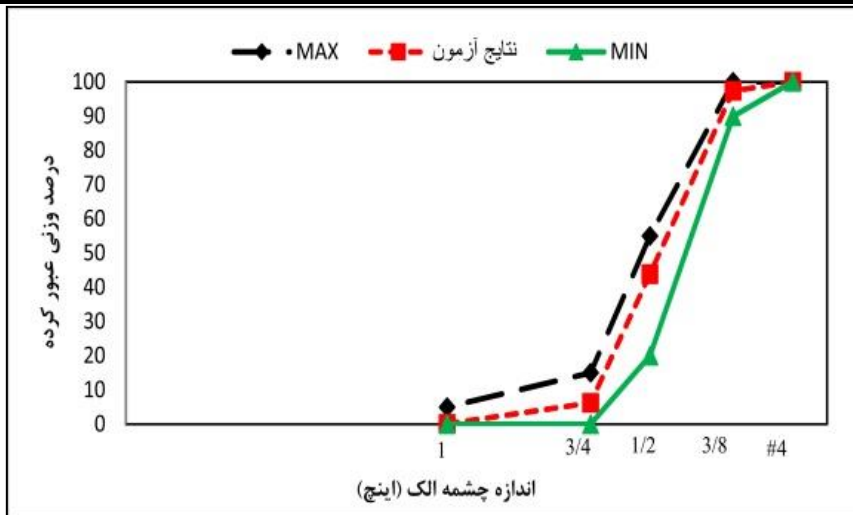
همچنین جداسدگی سنگدانه‌ها و آب‌انداختگی بتن خودتراکم از جمله عواملی هستند که باید در حین ساخت و انتقال بتن رخ ندهند. شاخص پایداری چشمی به عنوان ساده‌ترین روش برای ارزیابی پایداری بتن خودتراکم انجام می‌شود. در این مقاله، طرح اختلاط مورد نظر در محدوده‌ی شاخص معرفی شده از جانب موسسه EFNARC [۳۵] بوده که نشان از پایداری بالای مخلوط ساخته شده می‌باشد.

عمل آوری نمونه ها مطابق استاندارد ISIRI 581 [۳۶] و بر روی بتن با سن ۲۸ روزه انجام شد. ابتدا به میزان مورد نظر (طبق طرح اختلاط) مخلوط بتن به همراه فنرها ساخته، سپس نمونه گیری بتن ها در نمونه های استوانه ای و منشوری ( برای هر حالت، ۳ عدد نمونه ساخته شد) انجام شد. لازم به ذکر است که شرط پذیرش نتایج آزمایشات مقاومتی مطابق ویرایش سال ۱۳۹۲ مبحث نهم مقررات ملی ساختمان بوده است. پس از مدت ۲۴ ساعت قالب ها باز و تا سن ۲۸ روزه در داخل حوضچه ی آب در دمای  $21 \pm 2^{\circ}\text{C}$  قرار داشته و نمونه ها پس از مدت ۲۸ روز از داخل حوضچه ی آب خارج شدند. سپس کلیه نمونه ها در زیر جک هیدرولیک تمام اتوماتیک شرکت ToniTechnik با سرعت بارگذاری ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه بر طبق استاندارد EN-12390-13 [۳۷] تحت آزمایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی قرار گرفتند.

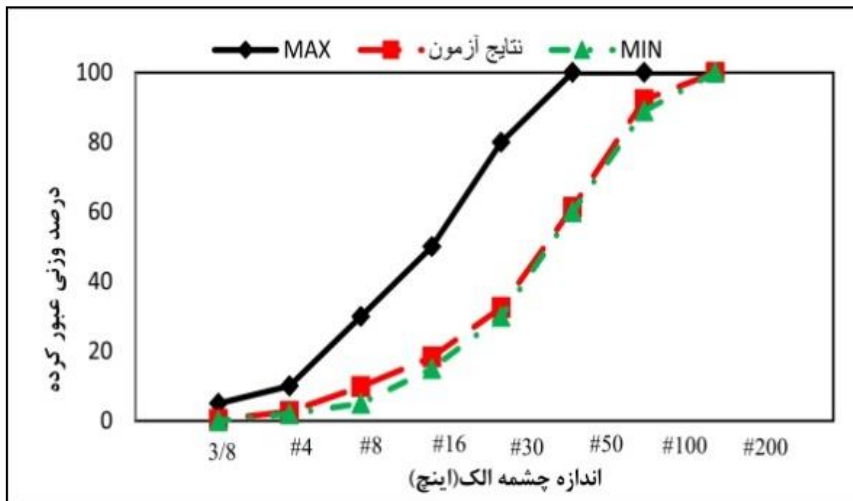
در جدول ۳ آنالیز فیزیکی سیمان مصرفی آورده شده است. همچنین در شکل ۱ منحنی دانه بندی شن و ماسه مصرفی نشان داده شده است.

جدول ۳: آنالیز فیزیکی سیمان مصرفی

ردیف	شرح تست	نتایج تست	استاندارد ۳۸۹ ایران	استاندارد کارخانه	روش تست
۱	سطح بلین (سانتی متر بر گرم)	۳۰۵۵	حداقل ۲۸۰۰	حداقل ۲۹۰۰	۳۹۰
۲	آزمایش اتوکلاو (درصد)	۰/۰۳۶	حداکثر ۰/۸	حداکثر ۰/۶	۳۹۱
۳	زمان سوزن ویکات				
۱-۳	شروع (دقیقه)	۱۴۵	حداقل ۴۵	حداقل ۷۰	۳۹۲
۲-۳	نهایی (سرعت)	۳:۴۵	حداکثر ۶	حداکثر ۵	۳۹۲
۴	مقاومت فشاری (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)				
۱-۴	۱ روز	-	-	-	۳۹۳
۲-۴	۲ روز	-	-	-	۳۹۳
۳-۴	۳ روز	۲۴۵	حداقل ۱۰۰	حداقل ۱۷۰	۳۹۳
۴-۴	۷ روز	۳۱۰	حداقل ۱۷۵	حداقل ۲۵۰	۳۹۳
۵-۴	۲۸ روز	۴۱۱	حداقل ۳۱۵	حداقل ۳۵۰	۳۹۳
۵	حرارت هیدراتاسیون (کالری بر گرم)				
۱-۵	۷ روز	-	-	-	۳۹۴
۲-۵	۲۸ روز	-	-	-	۳۹۴



الف: شن



ب: ماسه

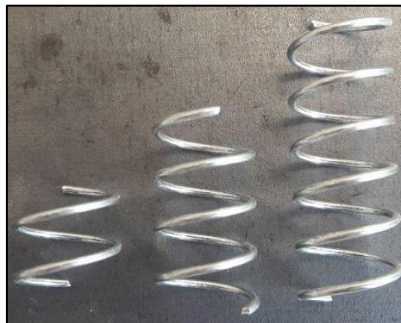
شکل ۱: منحنی دانه بندی سنگدانه ها

## ۱-۲- مشخصات مصالح طرح اختلاط

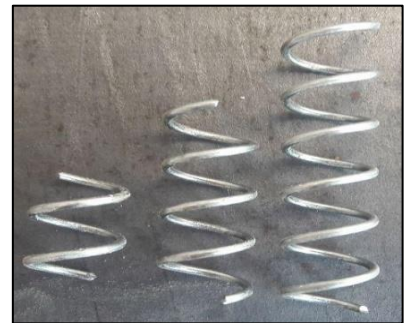
شکل ۲ تصاویر فنرهای فولادی کم کربن بازیافتی مصرفی در این مطالعه را نشان می دهد.



پ- فنر با قطر ۱۶ میلی متر



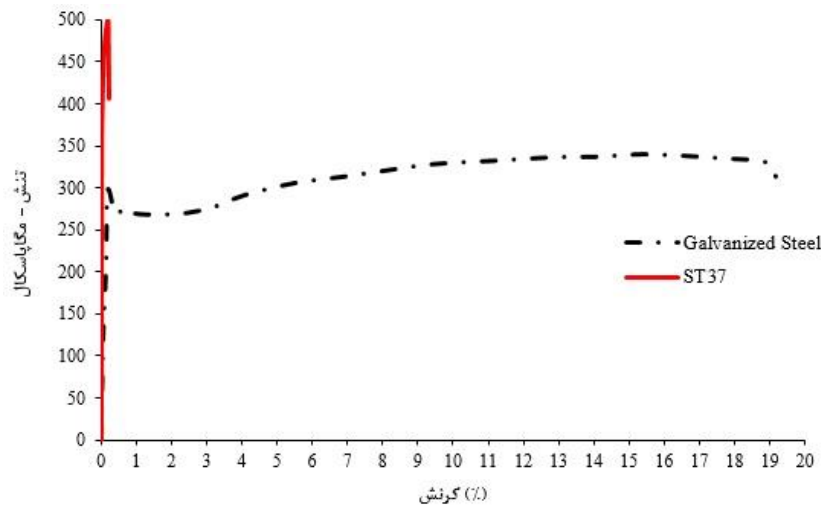
ب- فنر با قطر ۱۲ میلی متر



الف- فنر با قطر ۸ میلی متر

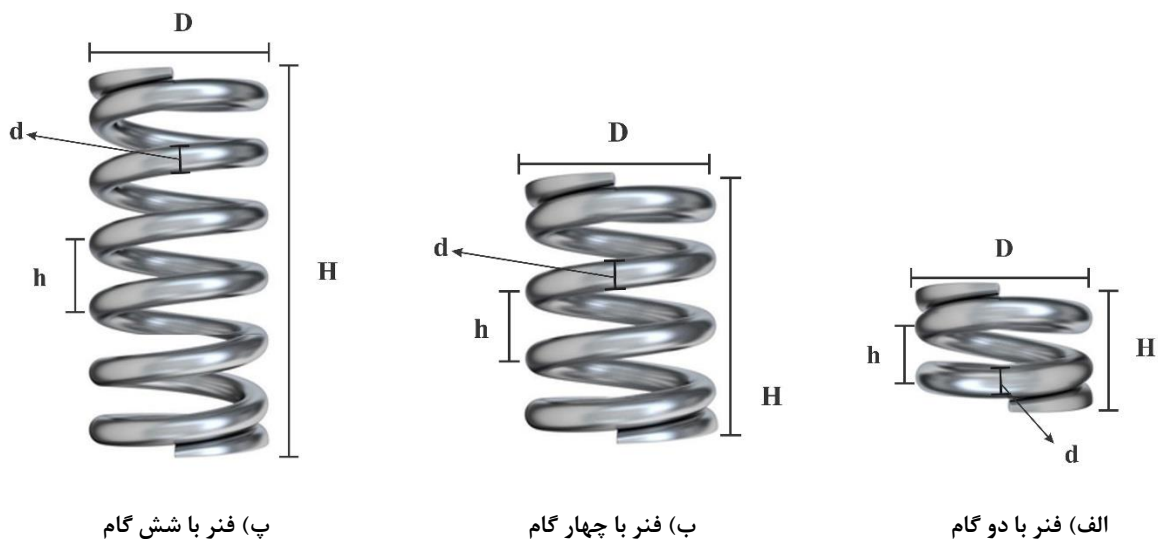
شکل ۲: تصویر فنرها با قطر و گام های مختلف

فنر های بکار رفته در این پژوهش، از جنس فولادی کم کربن (گالوانیزه) بوده و از بازیافت فنرهای مورد استفاده در صنعت لوازم التحریر استفاده شده است. سطح مقطع فنرها بصورت دایره ای به قطر  $0/8$  میلی متر بوده و چگالی فنرها حدود  $7860$  کیلوگرم بر مترمکعب می باشد. قابل ذکر است که خصوصیات گالوانیزه از جمله مقاومت حرارتی، مدول الاستیسیته، چگالی تقریباً با خصوصیات فولاد ST37 برابر بوده و رفتار مشابهی دارند. در شکل ۳ منحنی تنش- کرنش فنر فولادی کم کربن که از جنس گالوانیزه بوده و در آزمایشگاه مهندسی مواد دانشگاه سمنان تست شده و منحنی فولاد ST37 با یکدیگر مقایسه شده اند. همانطور که ملاحظه گردید سختی اولیه (مدول الاستیسیته) فنر گالوانیزه و فولاد ST37 با یکدیگر برابر بوده، همچنین مقادیر تنش تسلیم و نهایی فنر برابر  $266$  و  $340$  مگاپاسکال و این مقادیر برای فولاد ST37 به ترتیب برابر  $240$  و  $370$  مگاپاسکال می باشد. بنابراین مقادیر تنش در این دو ماده تقریباً با یکدیگر برابر می باشند. همچنین درصد کرنش تسلیم و نهایی در فنر به ترتیب برابر با  $0/13$  و  $19$  و در فولاد ST37 به ترتیب برابر  $0/01$  و  $0/25$  می باشد. بنابراین کرنش فنر گالوانیزه بسیار بیشتر از فولاد ST37 بوده بدین معنا که رفتار نرم تری دارد.



شکل ۳: مقایسه منحنی تنش-کرنش فنر فولادی کم کربن (گالوانیزه) و فولاد ST37

جزئیات هندسی نمای فنرهای فولادی کم کربن در شکل ۴ نشان داده شده که در آن،  $D$  قطر فنر ( $8$ ،  $12$  و  $16$  میلی متر)،  $d$  ضخامت مفتول فنر که برابر  $0/8$  میلی متر،  $h$  طول هر گام فنر که برابر  $5/8$  میلی متر و  $H$  طول کل فنر می باشد.



(پ) فنر با شش گام

(ب) فنر با چهار گام

(الف) فنر با دو گام

#### شکل ۴: جزئیات هندسی نمای فنرهای فولادی کم کربن

همچنین بر روی مصالح سنگی مورد استفاده در ساخت بتن، در آزمایشگاه مکانیک خاک معدن شن و ماسه ی تیغاب ورامین آزمایش دانه‌بندی انجام شد. لازم به ذکر است، به ذرات کوچکتر از ۵ میلی متر ماسه، بین ۵ الی ۱۸ میلی متر شن ریزدانه (نخودی) و ۱۸ الی ۳۲ میلی متر شن درشت دانه (بادامی) اطلاق خواهد شد. بعلاوه اینکه قطر فنرهای استفاده شده کمتر از ۱۶ میلی متر بوده، لذا از مصالح شن درشت‌دانه (بادامی) که قطر سنگدانه‌های آن بسیار بزرگ تر از قطر فنرهای بکار رفته در این پژوهش بوده و به هیچ‌وجه در داخل فنر نفوذ نمی‌کند، استفاده نشده است. چراکه عدم نفوذ شن بادامی در فضای داخلی فنرها، همگنی بتن را برهم زده و نتایج صحیحی ارائه نمی‌دهد.

#### ۲-۲- طرح اختلاط مصالح و کنترل کیفیت بتن خودتراکم

#### ۳- انجام آزمایش و بررسی نمونه ها

پس از اتمام فرآیند عمل‌آوری نمونه ها و خشک شدن آب سطحی آن ها، کلیه ی نمونه ها در زیر جک قرار گرفته و مقاومت فشاری، کششی و خمشی هر یک اندازه گیری شد.

#### ۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها طبق آیین‌نامه ASTM C39 انجام شد نمای کلی نحوه ی انجام آزمایش مقاومت فشاری که توسط جک هیدرولیک با ظرفیت ۲۰۰ کیلو نیوتن و سرعت بارگذاری ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه انجام شده، در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵: آزمایش مقاومت فشاری نمونه ها

همانطور که از شکل ۵ مشخص است، برای انجام تست مقاومت فشاری، نمونه ها بین دو فک که به فاصله ی ۲۰ سانتی متر از یکدیگر قرار دارند، قرار داده شده و بارگذاری شدند. اشکال ۶ تا ۸ تغییرات مقاومت فشاری نمونه ها با گام های مختلف فنر را نشان می دهد. یکی از نکات مهم در استفاده از فنر در بتن، تعداد گام های فنر می باشد. چراکه اگر تعداد گام خیلی کم باشد، عملکرد ارتجاعی چندانی نداشته و همانند یک حلقه عمل می کند. حتی ممکن است با توجه به جداسدگی های احتمالی که بین سنگدانه و خمیر سیمان بوجود آورده، از



مقاومت بتن در حالتی که فنری در آن استفاده نشده کمتر شود. همچنین اگر گام های فنر استفاده شده بیش از حد مطلوب باشد نیز نتیجه ی مناسبی در بهبود مشخصات مکانیکی بتن خودتراکم ندارد. حال در این مقاله با توجه به اهمیت تعداد گام های فنری که در بتن استفاده شد، فنر با دو، چهار و شش گام بکار رفته است.

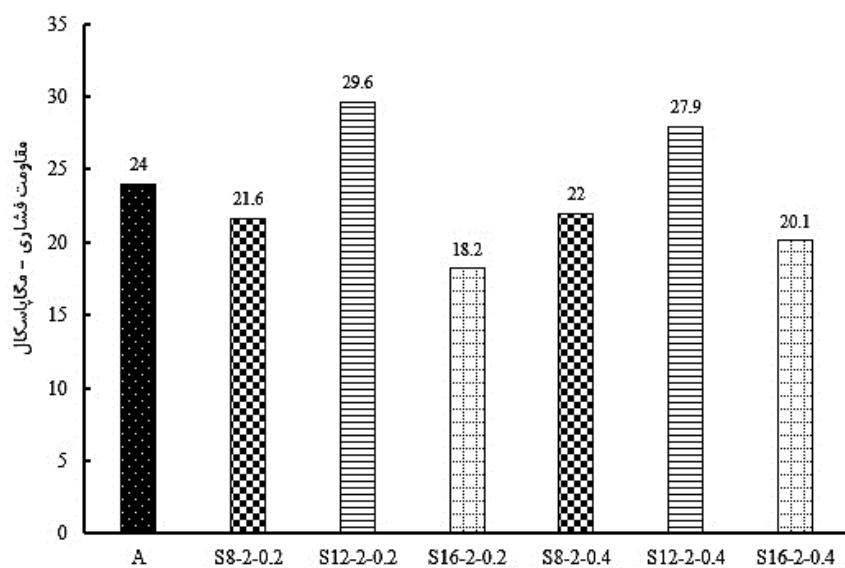
با توجه به شکل ۶ که مربوط به انواع فنر با تعداد دو گام بوده، همانطور که ملاحظه گردید استفاده از فنر S8 و S16 نه تنها مقاومت فشاری بتن را افزایش نداده بلکه به ترتیب تا حدود ۱۰ و ۳۳ درصد کاهش داده است. با بکار بردن فنر S12 در مقادیر ۰/۲ و ۰/۴ درصد در بتن، مقاومت فشاری را به ترتیب ۲۳ و ۱۶ درصد افزایش داده است. بنابراین با در نظر گرفتن تأثیر گام فنر، می توان استفاده از فنر S12 را جهت بهبود مقاومت فشاری بتن خودتراکم بکار رفته در این مقاله پیشنهاد نمود. بدیهی است که با ضخامت فنر یکسان (۰/۸ میلی متر) هرچه قطر فنر بیشتر شود، خاصیت جمع شدگی و یا ارتجاعی فنر نیز افزایش می یابد. با توجه به این موضوع و قرارگیری بتن در بین حفرات فنر، این مسأله نیز از اهمیت بخصوصی برخوردار است. طبق نتایج بدست آمده از شکل ۵ می توان دریافت که فنر S16 بعلاوه خاصیت ارتجاعی بیش از حد، عملاً کارکرد خود را از دست داده و نتوانسته به کمک این خاصیت باعث افزایش مقاومت فشاری بتن گردد. همچنین فنر S8 نیز به علت سختی زیاد و قرارگیری بتن در بین آن نیز روندی مشابه فنر S16 داشته با این تفاوت که بعلاوه سختی بالا، تا حدودی کاهش مقاومت کمتری نسبت به نمونه ی شاهد دارد. بنابراین فنر S12 با عملکرد بهتر نسبت به سایر فنرها، نه تنها مقاومت فشاری بتن را کاهش نداده بلکه باعث بهبود آن نیز شده است.

با توجه به نتایج شکل ۷ که مربوط به مقاومت فشاری نمونه های حاوی چهار گام فنر بوده، می توان دریافت که با افزایش تعداد گام فنر از دو (شکل ۶) به چهار، مقاومت فشاری نمونه ها روند افزایشی بهتری پیدا کرده است. بطوری که در تمامی نمونه ها بجز نمونه ی S16-4-0.4 بعلاوه قطر زیاد فنر و همچنین مقدار آن باعث درهم پیچیدگی در بتن شده و ترکیب غیر همگنی را تشکیل داده که باعث کاهش مقاومت فشاری تا ۱۷ درصد شده است. در مقدار استفاده ی ۰/۲ و ۰/۴ درصد به ترتیب نمونه ی حاوی فنر S8 و S12 بیشترین مقاومت فشاری را از خود نشان دادند. نمونه های حاوی فنر S16 به دلیل مشابه حالت قبل (شکل ۶) کمترین مقاومت فشاری را در بین تمامی نمونه ها دارند. نمونه های S12-4-0.4 و S8-4-0.2 به ترتیب ۱۷ و ۳۰ درصد مقاومت فشاری را افزایش دادند.

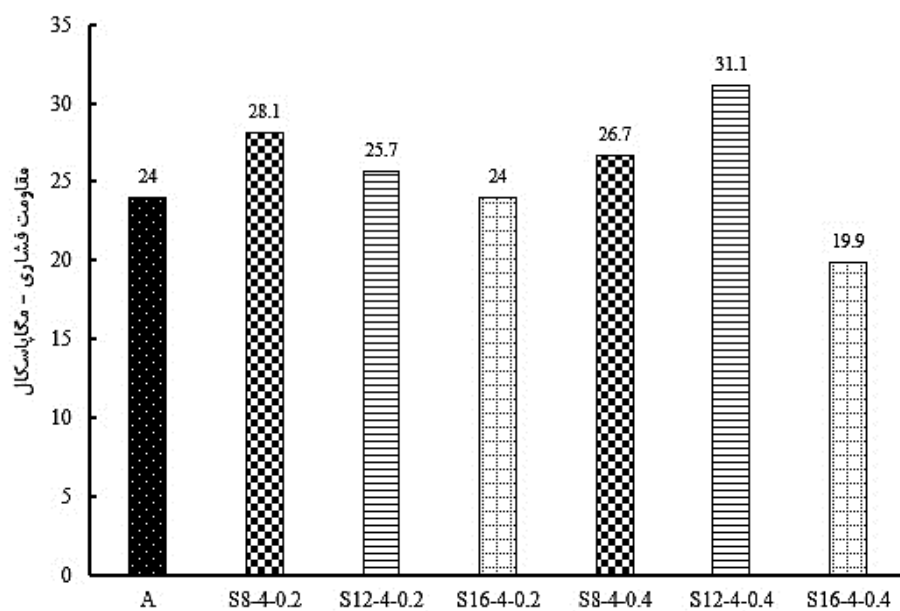
طبق نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت فشاری نمونه های حاوی فنرهای با شش گام (شکل ۸)، استفاده از تمامی فنرها بجز نمونه ی S8-6-0.4 در مقادیر مختلف باعث افزایش مقاومت فشاری تا ۲۱ درصد (که مربوط به فنر S12 است) شده است. بطور کلی استفاده از فنر S16 در بتن در حالت دو و چهار گام باعث بهبود مقاومت فشاری نشده است، اما در حالت استفاده از شش گام مقاومت فشاری بتن را هرچند به مقدار اندک افزایش داده است.

هرچند فنرهای استفاده شده در این مقاله از نوع بازیافتی هستند اما باید بتوانند تا حدی باعث ارتقاء خواص مکانیکی بتن از جمله مقاومت فشاری شوند. بنابراین با جمع بندی کلی از نتایج آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه ها می توان بیان نمود بطور کلی استفاده از فنر با قطر ۱۶ میلی متر (S16) در بتن خودتراکم (طبق طرح اختلاط این مقاله) توجیه فنی ندارد. همچنین استفاده از فنر S8 نیازمند شناخت دقیق مشخصات هندسی و مقدار استفاده ی بهینه در بتن بوده و باید با احتیاط بیشتری بکار رود. اما بعلاوه عملکرد مطلوب فنر S12 در همه ی گام ها و با مقادیر مختلف، استفاده از آن در کارهای پژوهشی آتی و همچنین پروژه های عمرانی توصیه خواهد شد. در بین نتایج اشکال ۶ الی ۸ نمونه ی S12-4-0.4 بیشترین (۳۰٪) و نمونه ی S16-2-0.2 کمترین (۲۷٪) مقاومت را دارا می باشند.

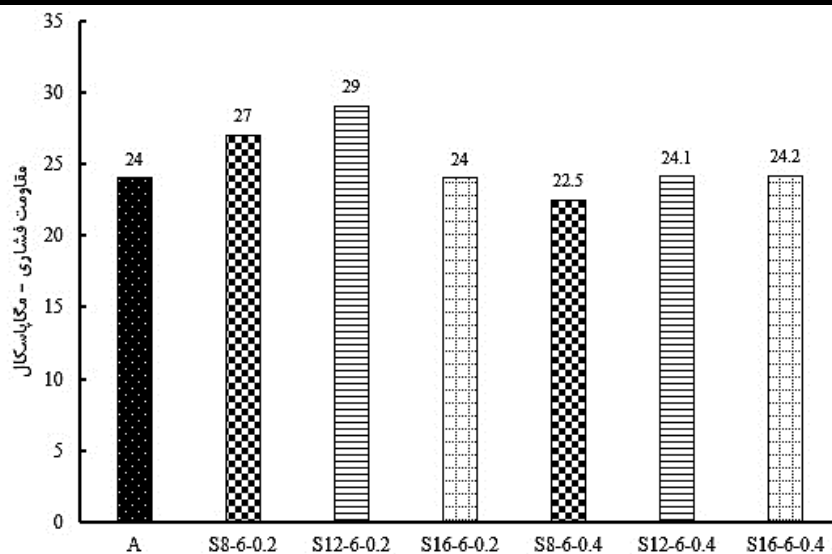
قلهکی و پاچیده در سال ۱۳۹۶ [۳۸] عملکرد پس از حرارت بتن (با همین طرح اختلاط) مسلح شده به کمک الیاف پلی پروپیلن، فولادی و فنر (با مشخصات مشابه فنرهای بکار رفته در این مقاله) را بررسی نمودند. بدین جهت که نقش عمده ی الیاف پلی پروپیلن در بتن کنترل عرض ترک بوده لذا در این قسمت به مقایسه ای با نتایج مقاومت فشاری نمونه های حاوی الیاف فولادی (طول ۵۰ میلی متر، قطر ۰/۸ میلی متر، انتها قلابدار، فولاد ST37) بکار رفته در پژوهش قلهکی و پاچیده پرداخته خواهد شد. افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه ی شاهد در دمای ۲۵ درجه ی سانتی گراد در نمونه های حاوی الیاف فولادی با مقدار ۰/۲ درصد حجمی بتن برابر ۱۴ درصد بوده اما این مقدار (۰/۲ درصد) در این مقاله در نمونه های S12-2-0.2 و S12-6-0.2 به ترتیب به ۲۳ و ۲۱ درصد می رسد. بنابراین استفاده از فنر فولادی کم کربن در مقادیر کم، می تواند افزایش مقاومتی تا حدود ۱/۶۵ برابر الیاف فولادی ارائه دهد. لازم به ذکر است که برخی از نمونه های دیگر نیز مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نتایج تحقیقات قلهکی و پاچیده دارند. البته با بکار بردن درصدهای بیشتری از الیاف فولادی در بتن، می توان به مقادیر بالاتری نیز دست یافت که به لحاظ اقتصادی و فنی باید با فنر مقایسه شود.



شکل ۶: مقاومت فشاری بر حسب دو گام فنر



شکل ۷: مقاومت فشاری بر حسب چهار گام فنر



شکل ۸: مقاومت فشاری بر حسب شش گام فنر

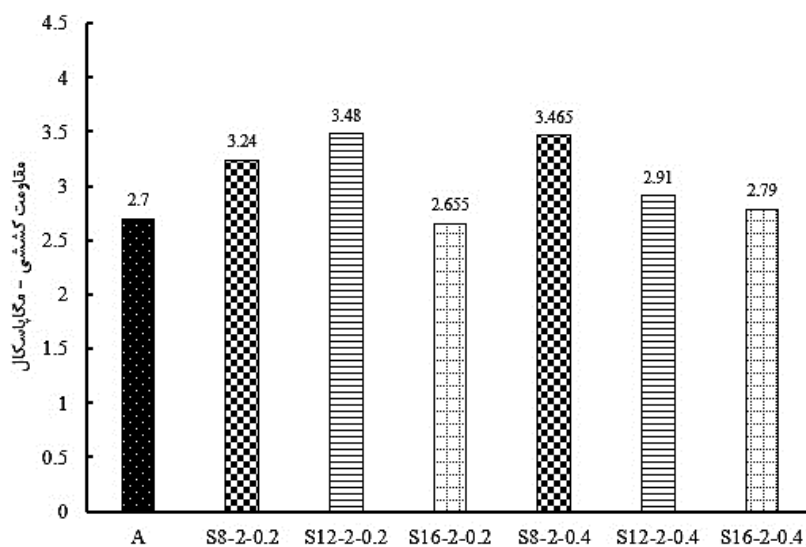
### ۳-۲- آزمایش مقاومت کششی

برای انجام آزمایش مقاومت کششی نمونه ها، از روش کشش غیر مستقیم یا روش برزلی استفاده شد. روش انجام آزمایش بدین صورت است که نمونه بصورت افقی یا خوابیده در زیر جک قرار گرفته بطوری که هیچگونه انحرافی در راستای خود ندارد. سپس جک هیدرولیک مورد نظر با اعمال نیرو، منجر به شکست نمونه خواهد شد. جک هیدرولیک مورد استفاده، دارای ظرفیت ۲۰۰ کیلونیوتن بوده و با سرعت ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه بار را اعمال می کند.

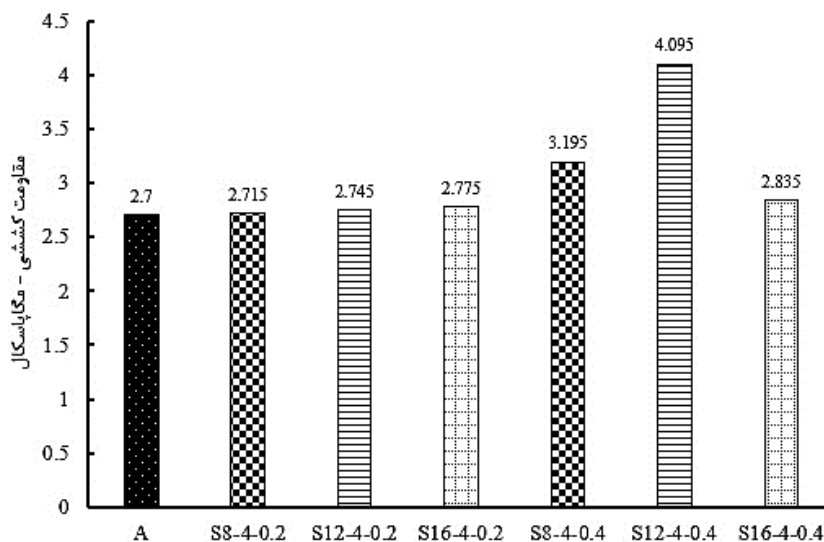
یکی از مسائل قابل توجه در تست کشش، عرض ترک رخ داده در سطح مقطع نمونه ی استوانه ای پس از انجام تست می باشد. طبق آزمایشات انجام شده بطور کلی عرض ترک نمونه های حاوی فنرهای با چهار گام بعلاوه درگیری بهتر با سنگدانه و خمیر سیمان کمتر از سایر نمونه ها می باشد. همچنین به بیان دیگر، نمونه هایی که با گام مطلوب تر (نه گام کم و نه گام زیاد) و فنر با قطر ۱۲ میلی متر بکار رفتند، در مقایسه با سایر نمونه ها از عرض ترک کمتری برخوردار می باشند.

بتن به خودی خود از مقاومت فشاری مناسبی برخوردار بوده اما مقاومت کششی بسیار کمی (حدود یک دهم مقاومت فشاری) دارد، لذا یکی از دلایل مهم استفاده از آرماتور، الیاف و یا فنر در بتن، بهبود مقاومت کششی آن می باشد. شکل ۹ روند تغییرات مقاومت کششی نمونه ها با توجه به استفاده از فنرهای با دو گام را نشان می دهد. بطور کلی استفاده از فنرهای با قطر ۸ و ۱۲ میلی متر (S12 و S8) در بتن مقاومت کششی را به ترتیب تا ۲۸ و ۲۹ درصد افزایش می دهند. مشابه روند طی شده در مقاومت فشاری نمونه های با دو گام فنر، نمونه های S16 دارای کمترین مقاومت کششی می باشند. با توجه به شکل ۱۰ در نمونه های حاوی چهار گام فنر، مقاومت کششی در همه ی نمونه ها نسبت به نمونه ی شاهد افزایش داشته بطوری که بجز S8-4-0.4 و S12-4-0.4 که به ترتیب ۱۸ و ۵۲ مقاومت کششی را افزایش دادند، در مابقی نمونه ها افزایش مقاومت بسیار اندک می باشد. در شکل ۱۱ بجز نمونه ی S12-6-0.2 و S12-6-0.4 در مابقی نمونه ها افزایش مقاومت کششی مشاهده شده بطوری که نسبت به نمونه های با چهارم گام فنر، مقاومت بیشتری دارند. بنابراین با جمع بندی نتایج حاصل از اشکال ۹ الی ۱۱، در نمونه های حاوی دو، چهار و شش گام فنر بیشترین مقاومت کششی به ترتیب مربوط به نمونه های S12-2-0.2، S12-4-0.4، S8-6-0.2 می باشد. با توجه به اهمیت مسائل اقتصادی و فنی در هر پروژه ای، بنابراین استفاده از فنر S16 در جهت بهبود خواص مکانیکی از جمله مقاومت کششی بتن توصیه نخواهد شد. با مقایسه ی نتایج می توان به این نتیجه دست یافت که استفاده از فنر S12 باعث افزایش مطلوب مقاومت کششی بتن گردید. نکته ی قابل توجه دیگر اینست که در تعیین مقاومت کششی نمونه های حاوی فنر، مقادیر ۰/۲ و ۰/۴ درصد استفاده از فنر تأثیر بسزایی در افزایش مقاومت نداشته و بیشترین توجه مربوط به قطر و تعداد گام فنر بکار رفته می باشد.

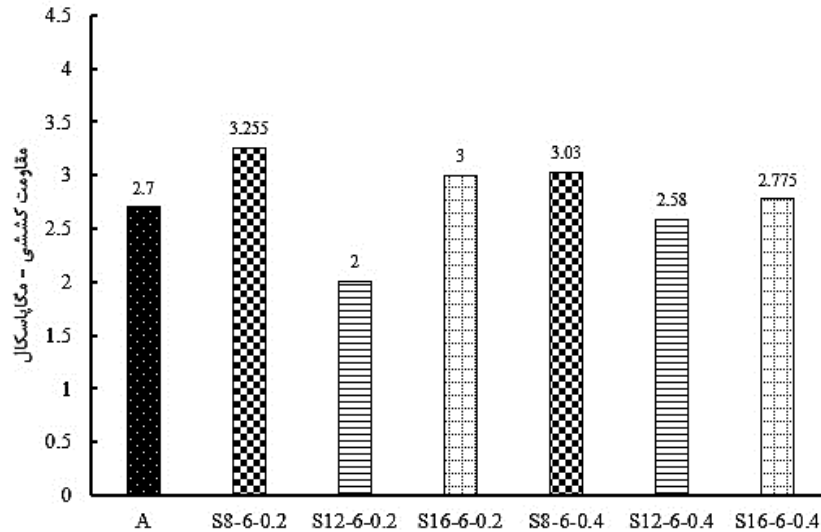
در مقاله ی قلهکی و پاچیده در سال ۱۳۹۶ [۳۸]، افزایش مقاومت کششی نسبت به نمونه ی شاهد در دمای ۲۵ درجه ی سانتی گراد در نمونه های حاوی الیاف فولادی با مقدار ۰/۲ درصد حجمی بتن برابر ۸ درصد بوده اما این مقدار (۰/۲ درصد) در این مقاله در نمونه های S8-6-0.2 و S12-2-0.2 به ترتیب به ۲۹ و ۲۱ درصد می رسد. بنابراین استفاده از فنر فولادی کم کربن در مقادیر کم، می تواند افزایش مقاومتی تا حدود ۳/۵ برابر الیاف فولادی ارائه دهد. لازم به ذکر است که برخی از نمونه های دیگر نیز مقاومت کششی بیشتری نسبت به تحقیقات قلهکی و پاچیده دارند. البته با بکار بردن درصدهای بیشتری از الیاف فولادی در بتن، می توان به مقادیر بالاتری نیز دست یافت که به لحاظ اقتصادی و فنی باید با فنر مقایسه شود.



شکل ۹: مقاومت کششی بر حسب درصد دو گام فنر



شکل ۱۰: مقاومت کششی بر حسب درصد چهار گام فنر



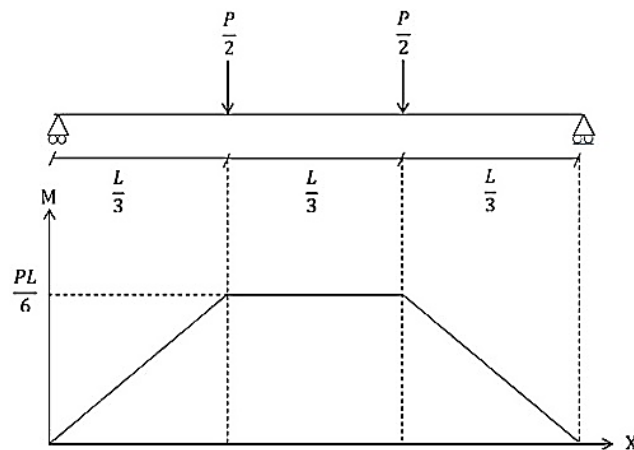
شکل ۱۱: مقاومت کششی بر حسب درصد شش گام فنر

### ۳-۳- آزمایش مقاومت خمشی (مدول گسیختگی)

برای انجام آزمایش مقاومت خمشی (مدول گسیختگی)، از تست خمش چهار نقطه ای استفاده شد. نحوه ی انجام آزمایش در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همانطور که از شکل ۱۲-الف مشاهده گردید، بارگذاری در یک سوم میانی تیر انجام شده و باعث ایجاد خمش کامل در تیرها خواهد شد. همچنین با توجه به اینکه خمش کامل در یک سوم میانی تیر رخ می دهد، لذا شکست تیر در این ناحیه اتفاق می افتد.



(ب) نمای کلی تیر بتنی در زیر جک بارگذاری

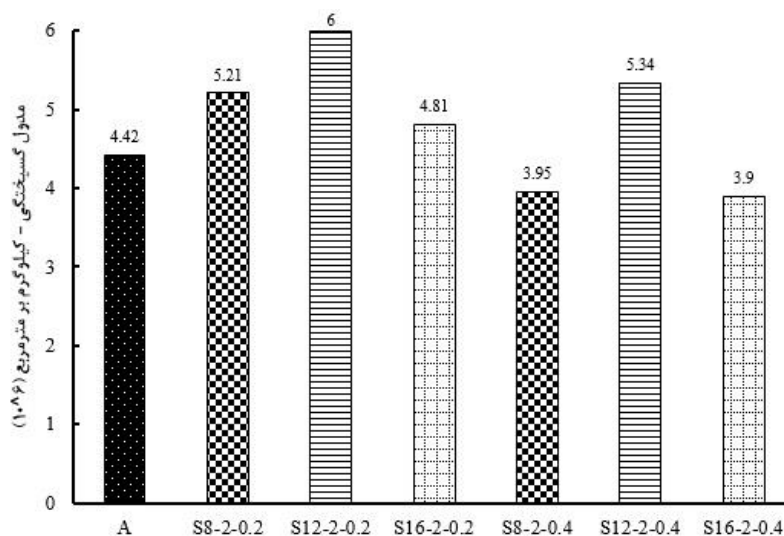


(الف) بارگذاری در یک سوم میانی تیر

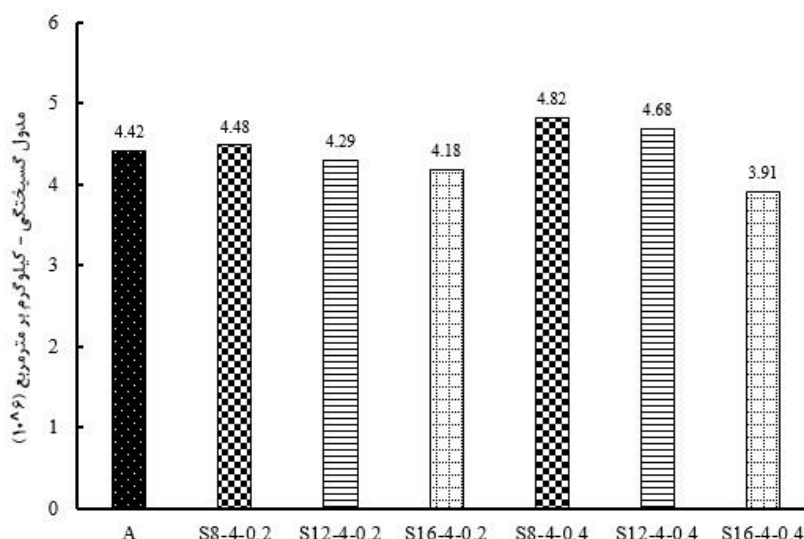
شکل ۱۲: نحوه ی انجام آزمایش مقاومت خمشی بر روی نمونه ها

اشکال ۱۳ الی ۱۵ تغییرات مدول گسیختگی تیرها با توجه به تعداد گام های فنر را نشان می دهند. با توجه به شکل ۱۳ که مربوط به تیرهای حاوی فنر با تعداد دو گام بوده، با افزایش درصد استفاده از فنر (از ۰/۲ به ۰/۴ درصد) به علت تجمع احتمالی فنرها در یک ناحیه و برهم زدن همگنی بتن، از مدول گسیختگی کاسته شد. بیشترین مدول گسیختگی برای تیرهای حاوی فنر S12 بوده (۳۶٪) و کمترین آن مربوط به تیرهای حاوی فنر S16 (۱۲٪-) می باشد. در نتیجه مشابه نتایج مقاومت فشاری و کششی، استفاده از فنر S16 در بتن نتنها

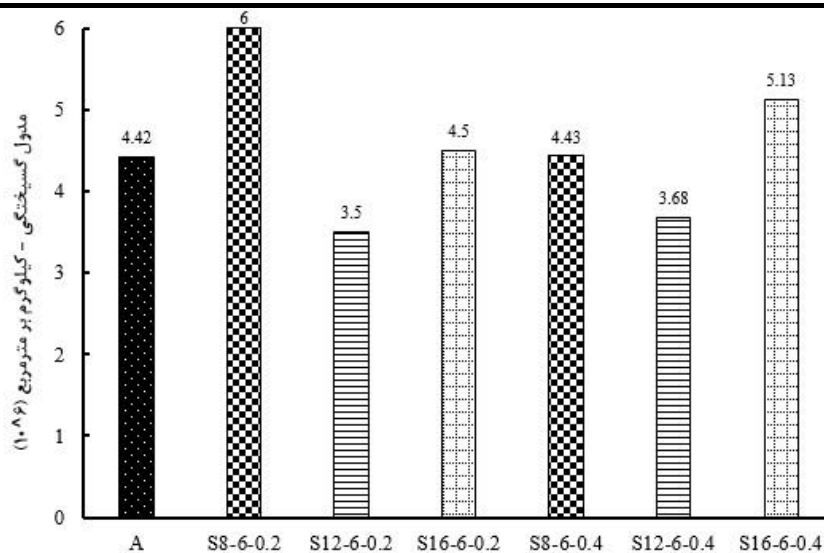
مدول گسیختگی را افزایش نداده بلکه باعث کاهش آن نیز شده، بنابراین استفاده از آن توصیه نخواهد شد. اما فنر S12 به علت عملکرد بهتر در خمش و پیوستگی با سنگدانه ها و خمیر سیمان، از عملکرد مناسبی برخوردار است. با توجه به شکل ۱۴ که مربوط به مدول گسیختگی تیرهای حاوی چهار گام فنر بوده، در تمامی نمونه ها کاهش یا افزایش مدول گسیختگی نسبت به نمونه ی شاهد اندک بوده بطوری که بیشترین و کمترین تغییرات مدول گسیختگی به ترتیب برابر ۱۰+ درصد (-S8-4) و ۰.۴) و ۱۱- درصد (S16-4-0.4) می باشد. همچنین در شکل ۱۵ که مربوط به تیرهای حاوی با شش گام فنر بوده، استفاده از ۰/۲ درصد از فنر S8 باعث افزایش مدول گسیختگی تا حدود ۳۶ درصد خواهد شد. نکته ی قابل توجه اینست که با افزایش تعداد گام فنر S12 از دو به چهار و سپس به شش، بطور پیوسته از مدول گسیختگی تیرها کاسته شده تا سرانجام کمتر از مقدار نمونه ی شاهد نیز شده است. بنابراین با تقریب مناسبی می توان گفت که فنر S8 به علت سختی بسیار بالا نسبت به سایر فنرها، عملکرد بهتری در برابر خمش از خود نشان داده است.



شکل ۱۳: مدول گسیختگی بر حسب درصد دو گام فنر



شکل ۱۴: مدول گسیختگی بر حسب درصد چهار گام فنر



شکل ۱۵: مدول گسیختگی بر حسب درصد شش گام فنر

#### ۴- مقایسه نتایج آزمایشات

با توجه به انجام آزمایش های مقاومت فشاری، کششی و خمشی بر روی نمونه ها، خلاصه ی نتایج بدست آمده بصورت جدول ۴ مقایسه شدند. طبق نتایج، استفاده از فنر در بتن خودتراکم، مقاومت فشاری، کششی و خمشی را به ترتیب ۲۹، ۵۲ و ۳۶ درصد بهبود می بخشد.

همانطور که ملاحظه می شود، بیشترین مقاومت فشاری و کششی مربوط به نمونه های حاوی فنر S12 با چهار گام فنر و در مقدار ۰/۴ درصد حجمی بوده که به ترتیب ۲۹٪ و ۵۲٪ مقاومت را نسبت به نمونه شاهد افزایش داده اند. بیشترین مقاومت خمشی نیز مربوط به نمونه های S12-2-0.2 و S8-6-0.2 بوده که نشان می دهد جهت ارتقاء مقاومت خمشی (مدول گسیختگی) نمونه های بتنی حاوی فنر، الزاماً درصد فنر بکار رفته در بتن نقش اساسی نداشته و مسأله حیاتی در این خصوص، توزیع همگون تر و مناسب تر فنر در بتن می باشد. فنر S12 با طول قطر زیاد اما تعداد گام کمتر و فنر S8 با طول قطر کمتر اما تعداد گام بیشتر، توازنی جهت توزیع مناسب تر در بتن ایجاد نموده که باعث بهبود مقاومت خمشی تا ۳۶٪ شده است.

نمونه S16-2-0.2 بعلت اینکه قطر فنر استفاده شده بیش از حد زیاد بوده، بنابراین هنگامی که سنگدانه ها و خمیر سیمان در داخل فنر قرار می گیرند، خاصیت فنری مناسبی ایجاد نشده و عملاً نقش مثبتی در بهبود مقاومت فشاری نداشته و ۲۴ درصد مقاومت را کاهش داده است. همچنین مقدار کم ۰/۲ درصد و تعداد کم دو گام نیز مزید بر علت شده است. کمترین مقاومت کششی و خمشی نیز مربوط به نمونه های حاوی S12-6-0.2 بوده که طول گام فنر در کنار اندازه قطر فنر، تعادل مناسبی نداشته و سبب کاهش مقاومت به ترتیب ۲۶٪ و ۲۱٪ شده است.

بنابراین بعنوان جمع بندی کلی می توان بیان نمود که استفاده از فنرهای با تعداد شش گام، عملکرد مناسبی ندارند اما استفاده از فنرهای با دو و چهار گام با توجه به درصد استفاده و همچنین قطر فنر مورد استفاده، می توانند مقاومت فشاری، کششی و خمشی را افزایش دهند.

جدول ۴: مقایسه نتایج آزمایشات مقاومت فشاری، کششی و خمشی

	دو گام فنر	درصد تغییرات	چهار گام فنر	درصد تغییرات	شش گام فنر	درصد تغییرات	بیشترین/کمترین مقاومت
	S12-2-0.2	+۲۳	S12-4-0.4	+۲۹	S12-6-0.2	+۲۱	بیشترین مقاومت فشاری
	S16-2-0.2	-۲۴	S16-4-0.4	-۱۷	S8-6-0.4	-۶	کمترین مقاومت فشاری
	S12-2-0.2	+۲۹	S12-4-0.4	+۵۲	S8-6-0.2	+۲۱	بیشترین مقاومت کششی
	S16-2-0.2	-۲	S8-4-0.2	-۰/۵	S12-6-0.2	-۲۶	کمترین مقاومت کششی

S8-6-0.2 و S12-2-0.2	+۳۶	S8-6-0.2	+۹	S8-4-0.4	+۳۶	S12-2-0.2	بیشترین مدول گسیختگی
S12-6-0.2	-۲۱	S12-6-0.2	-۱۱	S16-4-0.4	-۱۱	S16-2-0.4	کمترین مدول گسیختگی

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، با توجه به عدم وجود تحقیقات جدی درباره ی کاربرد استفاده از فنرهای فولادی کم کربن (گالوانیزه) در بتن خودتراکم و همچنین نوآورانه بودن موضوع، به بررسی تأثیر افزودن فنرهایی با قطر ۸، ۱۲ و ۱۶ میلی متر، ضخامت مفتول ۰/۸ میلی متر، تعداد گام های دو، چهار و شش و با مقادیر حجمی ۰/۲ و ۰/۴ درصد به بتن خودتراکم، پراخته شده که نتایج زیر حاصل شد:

- در استفاده از دو گام از فنرهای با قطر ۸، ۱۲ و ۱۶ میلی متر، فنر با قطر ۱۲ میلی متر در مقادیر حجمی ۰/۲ و ۰/۴ درصد به ترتیب ۲۳ و ۱۶ درصد (۲۹/۶ و ۲۷/۹ مگاپاسکال) مقاومت فشاری را نسبت به نمونه ی شاهد (۲۴ مگاپاسکال) افزایش می دهد. همچنین فنر با قطر ۱۶ میلی متر در همه ی مقادیر مقاومت فشاری را کاهش داده بنابراین مناسب نمی باشد.

- از میان فنرهای بکار رفته با چهار گام در بتن خودتراکم، مقاومت نمونه ها نسبت به حالت دو گام فنر افزایش پیدا کرد. بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه های با فنر به قطر ۸ و ۱۲ میلی متر بوده که به ترتیب ۱۷ و ۳۰ درصد می باشد.

- استفاده از فنر با قطر ۱۶ میلی متر در حالت شش گام، اندکی مقاومت فشاری بتن را افزایش داده و نمونه ی حاوی فنر با مقدار ۰/۴ درصد حجمی ۲۱ درصد (۲۴/۲ مگاپاسکال) مقاومت فشاری را بهبود بخشید.

- استفاده از فنر با قطر ۱۲ میلی متر در حالت دو و شش گام با مقدار استفاده ی ۰/۲ درصد، تا حدود ۱/۶۵ برابر حالتی که از الیاف فولادی در بتن استفاده شده باشد، مقاومت فشاری را افزایش می دهد.

- نمونه های حاوی فنر با قطر ۸ و ۱۲ میلی متر و دو گام به ترتیب تا ۲۸ و ۲۹ درصد مقاومت کششی بتن خودتراکم را افزایش داده و نمونه های حاوی فنر با قطر ۱۶ میلی متر مقاومت کششی را بهبود ندادند.

- در نمونه های حاوی چهار گام فنر با قطر ۸ و ۱۲ میلی متر در مقدار ۰/۴ درصد به ترتیب ۱۸ و ۵۲ درصد مقاومت کششی (۳/۴۶۵ و ۳/۸۰ مگاپاسکال) را افزایش داده، اما در سایر نمونه ها مقاومت کششی به مقدار اندکی نسبت به نمونه ی شاهد (۲/۷ مگاپاسکال) افزایش یافت.

- برخلاف نمونه های حاوی دو و چهار گام فنر، استفاده از فنر با قطر ۱۲ میلی متر و با شش گام مقاومت کششی (۲ و ۲/۵۸ مگاپاسکال) را کاهش داده اما در مابقی نمونه ها تا ۲۱ درصد افزایش مقاومت مشاهده شد.

- استفاده از فنر با قطر ۸ و ۱۲ میلی متر در مقدار ۰/۲ درصد حجمی تا حدود ۳/۵ برابر نسبت به حالتی که از الیاف فولادی در بتن خودتراکم استفاده شود، مقاومت کششی را افزایش می دهد.

- در تیرهای بتنی حاوی دو گام فنر، با افزایش درصد استفاده از فنر از ۰/۲ به ۰/۴ درصد مدول گسیختگی کاهش یافت. بیشترین و کمترین تغییرات مدول گسیختگی به ترتیب برای تیرهای حاوی فنر با قطر ۱۲ و ۱۶ میلی متر بوده که ۳۶ درصد افزایش و ۱۲ درصد کاهش مشاهده شد.

- در تیرهای حاوی چهار گام فنر، بیشترین و کمترین مدول گسیختگی به ترتیب برای تیرهای حاوی فنر با قطر ۸ و ۱۶ میلی متر بوده که برابر ۱۰ درصد افزایش (۴/۸۲ kg/m<sup>2</sup>.e6) و ۱۱ درصد کاهش (۳/۹۱ kg/m<sup>2</sup>.e6) نسبت به نمونه شاهد (۴/۴۲ kg/m<sup>2</sup>.e6) می باشد.

- استفاده از فنر با قطر ۸ میلی متر در شش گام ۳۶ درصد مدول گسیختگی تیر بتنی را افزایش داده اما این مقدار در تیر حاوی فنر با قطر ۱۲ میلی متر کمتر از نمونه ی شاهد می باشد.

- بطور کلی استفاده از فنر با قطر ۱۲ میلی متر به لحاظ فنی، اقتصادی و اجرایی بهتر از سایر فنرها بوده و فنر با قطر ۱۶ میلی متر نه تنها باعث بهبود خواص مکانیکی بتن خودتراکم نشده بلکه آن را کاهش می دهد، بنابراین استفاده از آن در بتن خودتراکم توصیه نمی شود.

## مراجع

- [1] M. Grzybowski, S.P. Shah. (1990). "Shrinkage cracking of fiber reinforced concrete", ACI Materials. 87 (2) 138–148.
- [2] I. Padron, R.F. Zollo. (1990). "Effect of synthetic fibers on volume stability and cracking of portland cement concrete and mortar", ACI Materials. 87 (4) 327–332.



- 
- [3] Z. Bayasi, J. Zeng. (1993). "Properties of polypropylene fiber reinforced concrete", *ACI Materials*. 90 (6) 605– 610.
- [4] P. Soroushian, H. Elyamany, A. Tlili, K. Ostowari. (1998). "Mixed-mode fracture properties of concrete reinforced with low volume fractions of steel and polypropylene fibers, *Cement and Concrete Composite*. 20, 67– 78.
- [5] K. Wang, S.P. Shah, P. Phuaksuk. (2001). "Plastic shrinkage cracking in concrete materials—Influence of fly ash and fibers", *ACI Materials*. 98 (6) 458– 464.
- [6] Z. Bayasi, M.A. Dhaheri. (2002). "Effect of exposure to elevated temperature on polypropylene fiber-reinforced concrete", *ACI Materials*. 99 (1) 22– 26.
- [7] R.F. Zollo, C.D. Hays. (1998). "Engineering material properties of a fiber reinforced cellular concrete", *ACI Materials*. 95 (5) 631– 635.
- [8] B. Mu, C. Meyer, S. Shimanovich. (2002). "Improving the interface bond between fiber mesh and cementitious matrix", *Cement and Concrete Research*. 32 (5) 783– 787.
- [9] Sanjuan MA, Moragues A. (1997). "Polypropylene-x mortar mixes: optimization to control plastic shrinkage". *Composite Science and Technology*, 57:655–60.
- [10] Qian CX, Stroeven P. (2000). "Development of hybrid polypropylene–steel fibereinforced concrete". *Cement and Concrete Research*. 30:63–9.
- [11] Wu Yao, Jie Li, Keru Wu. (2003). "Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction". *J. Cement and Concrete Research* 33. 27-30.
- [12] Quresh L A et. Al. (2008). "Effect of mixing steel fibers and silica fume on properties of high strength concrete", *Proceedings. International Conference Concrete: Constructions sustainable option, Dundee.UK*, pp 173-185.
- [13] Zeiml, Matthias.,Leithner, David., Lackner, Roman. AndMang, A. (2006). "How Do Polypropylene Fibers Improve The Spalling Behavior of In-Situ Concrete?". *Cement and Concrete Research*, 36, 929–942.
- [14] N. Banthia, A. Moncef, K. Chokri, J. Sheng. (1995). "Uniaxial tensile response of microfiber reinforced cement composites ", *Journal of Materials and Structures, RILEM* 28 (183), p.p. 507–517.
- [15] S.P. Shah. (1991). "Do fibers increase the tensile strength of cement-based matrices ", *ACI Materials, RILEM* 88 (6), p.p. 595–602.
- [16] Banthia N, Sheng J. (1996). "Fracture toughness of micro-fiber reinforced cement composites". *Cem Concr Comp*. 18(4):251–69.
- [17] Bayasi MZ, Zeng J. (1997). "Composite slab construction utilizing carbon fiber reinforced mortar". *ACI Structural*. 94(4):442–6.
- [18] Dwarakanath HV, Nagaraj TS. (1992). "Deformational behavior of fiber-reinforced concrete beams in bending". *Structural Engineering. ASCE*;118(10):2691–8.
- [19] Mu B, Li Z, Peng J. (2000). "Short fiber-reinforced cementitious extruded plates with high percentage of slag and different fibers. *Cement and Concrete Research*. 30(8):1277–82.
- [20] Li VC, Kanda T. (1998). "Engineered cementitious composites for structural applications". *Material of Civil Engineering, ASCE* 10(2):66–9.
- [21] Kanda T, Li VC. (1998). "Interface property and apparent strength of a high-strength hydrophilic fiber in cement matrix". *J Material of Civil Engineering, ASCE*;10(1):5–13.
- [22] Li VC, Horii H, Kabele P, Kanda T, Lim YM. (2000). "Repair and retrofit with engineered cementitious composites". *Engineering Fracture Mechanic*. 65(2–3):317–34.
- [23] Limbachiya, M. C., Leelawat, T., & Dhir, R. K. (2000). "Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete". *Materials and Structures*, 33, 574–580.
- [24] Ajdukiewicz, A. Kliszczewicz, A. (2002). "Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HP/HPC", *Cement and Concrete Composite*. 24(2): 269-279.
- [25] C.A. Carneiro, P.R.L. Lima, M.B. Leite, R.D.T. Filho. (2008). "Compressive stress–strain behavior of steel fiber reinforced-recycled aggregate concrete", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 46, pp. 886-893.
- [26] Khaloo, A. Khodavirdi, M.M. Hoseini, P. (2010). "Analysis the Building of Self-Compacting Concrete Using Coarse Recycled Grains". *Journals of Concrete Research*. Year Three, No.1, pp. 9-20.
- [27] Sung Bae Kim, Na Hyun Yi, Hyun Young Kim, Jang-Ho Jay Kim, Young-Chul Song. (2010). "Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete", *Cement & Concrete Composites*. 32, 232-240.
- [28] Lankard DR. (1972). "Prediction of the flexural strength properties of steel fibrous concrete". In: *Proceedings of the CERL conference on fibrous concrete, construction engineering research laboratory, Champaign*. p. 101–23.
- [29] Xu Z, Hao H, Li HN. (2012). "Experimental study of dynamic compressive properties of fibre reinforced concrete material with different fibres". *Material and Design*. 33:42–55.
- [30] Xu Z, Hao H, Li HN. (2012). "Dynamic tensile behaviour of fibre reinforced concrete with spiral fibres". *Material and Design* 42:72–88.
- [31] Sadrmomtazi, A. Tahmooresi, M.H. Nosrati, H. (2014). "Evaluation of Fiber Reinforced Containing Recyvlcd Concrete Aggregates with Non-Destructive Methods". *Journal of Concrete Thechnology*. (6), Vol. 1, pp. 73-86.
- [32] Ahmadi, M. Hassani, A. Soleymani, M. (2015). "Role of Recycled Steel Fibers from Tires on Concrete Containing Recycled Aggregate from Building Waste". *Journal of Concrete Thechnology*. (7), Vol. 2, pp. 57-68.

- 
- [33] Mastali, M. Dalvand, A. Sattarifard, A. (2016). "The impact resistance and mechanical properties of the reinforced self compacting concrete incorporating recycled CFRP fiber with different lengths and dosages". *Composites*. DOI: 10.1016/j.compositesb.
- [34] Shirazi Bidabadi, M. Akbari, M. (2017). "Evaluation of Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Recycled Concrete: The Effect of Dimensions and Amount of Recycled Aggregate, Type and Amount of Fibers". *Journal of Structural engineering and construction*. Fourth Year, No.1, pp. 138-150.
- [35] "The European guidelines for self-compacting concrete; specification production and use", (2005), EFNARC.
- [36] INSO581. (2015). concrete-making curing concrete test specimens in the laboratory- code of practice, 2<sup>nd</sup>.revision.
- [37] NF EN 12390-13 AFNOR. (2013). Testing hardened concrete, in: Determination of Secant Modulus of Elasticity in Compression, pages 18–455.
- [38] Gholhaki, M. Pachideh, GH. (2018). "Assessing Effect of Temperature Rise on the Concrete Containing Recycled Metal Spring and Its Comparison with Ordinary Fibres". *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, DOI: 10.22065/jsce.2018.93911.1278.