

## مطالعه و بررسی عملکرد بتن پودری واکنش پذیر حاوی فنر فلزی بازیافتی و مقایسه آن با بتن حاوی الیاف فولادی در محیط اسیدی

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

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه گرمسار، گرمسار، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۵-۱۰

بازنگری: ۱۳۹۷-۰۵-۳۰

پذیرش: ۱۳۹۷-۰۶-۱۱

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۶-۱۳

### کلمات کلیدی:

بتن پودری واکنش پذیر

سولفات منیزیم

فنر فلزی بازیافتی

الیاف فولادی

ترک

**خلاصه:** بتن پودری واکنش پذیر از مواد ترکیبی سیمانی تشکیل شده است که علاوه بر استفاده در صنعت، از مزایای اقتصادی و زیست محیطی مطلوبی نیز برخوردار است. در این مقاله به بررسی عملکرد بتن پودری واکنش پذیر حاوی فنر فلزی بازیافتی و مقایسه آن با بتن پودری واکنش پذیر حاوی الیاف فولادی تحت شرایط اسیدی پرداخته شد. بدین منظور جهت انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی طبق استاندارد ASTM C39، نمونه‌ها در قالب‌های استوان‌های فلزی استاندارد به ابعاد  $10 \times 10 \times 20$  سانتی مترمربع در دمای معمولی (حدود ۲۵ درجه سانتی‌گراد) با مقدار استفاده ۰/۳ و ۰/۶ درصد حجمی بتن از الیاف فولادی و فنر فلزی بازیافتی ساخته شدند. نمونه‌ها در محیط حاوی ۰/۵٪ و ۱/۰٪ سولفات منیزیم در مدت ۲۸ روز عمل‌آوری شدند. نتایج نشان داد که افزودن فنر فلزی بازیافتی و الیاف فولادی به بتن پودری واکنش پذیر باعث افزایش ۵۰ تا ۶۰ درصدی مقاومت فشاری و کششی شده است. همچنین نمونه‌های حاوی فنر فلزی بازیافتی در برابر محیط‌های اسیدی تحمل و مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های حاوی الیاف فولادی دارند. در مجموع با توجه به این که اختلاف افزایش مقاومت نمونه‌ها چندان زیاد نبوده، لذا استفاده از فنر فلزی بازیافتی در بتن پودری واکنش پذیر به لحاظ فنی و اقتصادی توجیه پذیر می‌باشد.

### ۱- مقدمه

و فوق روان کننده در حضور یا غیاب الیاف فولادی ساخته می‌شود. نتایج مطالعات اخیر نشان داده‌اند که به منظور ساخت بتنی با مقاومت مشابه، می‌توان به جای استفاده از الیاف فولادی، از الیاف پلی‌استر با مقداری کمتر بهره گرفت. لذا آناند<sup>۱</sup> و آبراهام<sup>۲</sup> به بررسی تأثیر افزودن الیاف پلی‌استر بر خصوصیات و دوام بتن پودری واکنش پذیر پرداختند. نتایج نشان داد که بتن پودری واکنش پذیر حاوی الیاف پلی‌استر با مقاومت فشاری ۹۰ مگاپاسکال باعث بهبود دوام این نوع از بتن شد. اما تأثیر الیاف پلی‌استر بر بتن پودری واکنش پذیر بر سایر خصوصیات مکانیکی روند کاهشی داشته است [۶].

طی آزمایش‌هایی که توسط هو<sup>۳</sup> و همکارانش انجام شد، سه نوع

بتن پودری واکنش پذیر (PRC) نوعی ماده ترکیبی سیمانی بوده که مقاومت فشاری آن می‌تواند تا حدود ۱۵۰ مگاپاسکال افزایش یابد که به همین دلیل می‌توان آن را در گروه بتن‌های فوق توانمند نیز در نظر گرفت [۱]. در مقایسه با بتن‌های با مقاومت معمولی (NSC)، در فرایند ساخت بتن‌های توانمند (HPC) و پر مقاومت (HSC) از نوآوری‌هایی نظیر حذف درشت دانه‌ها استفاده می‌گردد. مقاومت فشاری بالا (ظرفیت گسیختگی بالا) به انضمام دوام قابل توجه، از خصوصیات ویژه بتن پودری واکنش پذیر می‌باشد [۵-۲]. به طور کلی بتن پودری واکنش پذیر با استفاده از سیمان، پودرهای حاوی دانه‌های ریز نظیر ماسه کوارتز یا پودر کوارتز، میکروسیلیس

- 1 Anand
- 2 Abraham
- 3 Hou

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mgholhaki@semnan.ac.ir



الیاف فولادی (SFRPC) پیشنهاد دادند. ژائو<sup>۴</sup> و همکارانش [۱۱] رفتار سه نوع بتن پودری واکنش‌پذیر حاوی مقادیر مختلف الیاف فولادی (۳، ۴ و ۵ درصد) با قطر ۳۵ میلی‌متر در نرخ کرنش‌های ۳۰ تا ۹۵ را در برابر ضربه ارزیابی نمودند. بر اساس نتایج به‌دست آمده، مقدار آستانه حساسیت نرخ کرنش برابر ۵۰ می‌باشد. به‌علاوه، شاخص DIF مقاومت فشاری برای بتن پودری مسلح با الیاف فولادی کمتر از بتن بدون الیاف می‌باشد.

تحقیقات نشان داده‌اند که الیاف فولادی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای، مشخصات مکانیکی بتن پودری واکنش‌پذیر را بهبود می‌بخشند، ولی الیاف پلی‌پروپیلن و شیشه‌ای به‌دلیل مقاومت کم خود، مقاومت‌ها را افزایش نمی‌دهند [۱۲]. با افزایش مقدار الیاف فولادی از ۰ تا ۵ درصد، مقاومت کششی بتن پودری واکنش‌پذیر به‌صورت خطی افزایش یافت [۱۳]. جهت کاهش مقدار الیاف مصرفی و در عین حال دستیابی به عملکرد مطلوب، ترکیب دو یا سه نوع مختلف الیاف فولادی استفاده شد [۱۴ و ۱۵]. اثر ترکیب الیاف ریز و درشت بر روی عملکرد خمشی بتن پودری واکنش‌پذیر توسط کیم<sup>۵</sup> و همکارانش [۱۶] انجام شد و نتایج تحقیق نشان داد که با ترکیب ۱٪ الیاف فولادی ریز و ۱٪ الیاف فولادی درشت، ظرفیت جذب انرژی و ظرفیت تغییرشکل، ۷۵/۹٪ - ۴۵/۴٪ و ۶۷/۹٪ - ۴۸/۷٪ بیشتر از مقادیر آن با ۲٪ الیاف ریز بوده‌است.

طی سال‌های اخیر تحقیقات محدودی در کشور ایران در رابطه با بتن پودری واکنش‌پذیر انجام شده‌است. معراجی و همکارانش در سال ۲۰۱۶ به بررسی تأثیر افزودن سه نوع الیاف شامل الیاف کربن ریز و الیاف فولادی قلابدار بلند و مستقیم کوتاه بر خواص بتن پودری واکنش‌پذیر پرداختند. نتایج نشان داد که افزودن الیاف کربن سبب کاهش ناچیز مقاومت فشاری و بهبود اندک ظرفیت جذب انرژی کل شده و الیاف فولادی قلابدار و کوتاه به‌ترتیب تقریباً ۱۰٪ و ۹٪ مقاومت فشاری را بهبود بخشیدند [۱۷]. هم‌چنین معراجی و همکارانش در سال ۲۰۱۲ با تحقیق بر روی بتن پودری واکنش‌پذیر به این نتیجه دست یافتند که با استفاده از مصالح موجود کشور ایران و به‌کار بردن الیاف و با عمل‌آوری گرمایی می‌توان به مقاومت فشاری حدود ۱۶۰ مگاپاسکال و مقاومت خمشی ۲۵ مگاپاسکال در این نوع بتن دست‌یافت [۱۸]. طوفانی‌میلانی و همکارانش با

بتن پودری مسلح‌شده با استفاده از الیاف فولادی (SFRPC) به میزان ۲، ۳ و ۵ درصد حجمی بتن با استفاده از دستگاه تست هاپکینسون با قطر میله ۴۰ میلی‌متر تحت فشار دینامیکی مورد آزمایش قرار گرفتند. آزمایش‌های انجام‌شده به‌منظور بررسی اثر پارامترهای مؤثر بر رابطه تنش-کرنش دینامیکی SFRPC در نرخ کرنش‌های بالا مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان داد که الیاف فولادی تأثیر قابل‌توجهی بر رابطه میان تنش و کرنش و هم‌چنین جذب انرژی بتن پودری واکنش‌پذیر دارد [۷].

مطالعات متعددی در خصوص بتن پودری واکنش‌پذیر حاوی الیاف فولادی، الیاف پلی‌پروپیلن و میکروسیلیس به جای سیمان، خاکستربرادی، سرباره کوره آهن‌گدازی تاکنون انجام پذیرفته‌اند. به‌علاوه، استفاده از این نوع بتن به‌عنوان مصالحی با رویکرد مرمت نیز مورد تحقیق واقع شده‌است. بر مبنای نتایج مطالعات انجام‌شده، نمونه‌های بتن پودری واکنش‌پذیر مقاومت چندان مناسبی در برابر ترک‌خوردگی ندارند [۸].

التکریت<sup>۱</sup> و هادی<sup>۲</sup> [۹] در سال ۲۰۱۷ به بررسی آزمایشگاهی تأثیر نوع، مقدار و هندسه الیاف فولادی (صنعتی و ضایعاتی) بر مشخصات مکانیکی بتن پودری واکنش‌پذیر شامل مقاومت فشاری و کششی، مدول الاستیسیته و رفتار تنش-کرنش پرداختند. بدین منظور آن‌ها سه نوع الیاف فولادی به میزان ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد حجمی بتن استفاده کردند: میکرو الیاف فولادی صنعتی، الیاف فولادی تغییرشکل‌یافته صنعتی و الیاف فولادی ضایعاتی که از لاستیک‌های مستعمل برداشت گردیدند. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که الیاف فولادی ضایعاتی می‌تواند به‌عنوان ماده کارآمد، در کاربردهای سازه‌ای مورد استفاده قرار گیرد و این قابلیت را دارد که به‌طور کامل یا نسبی جایگزین الیاف فولادی صنعتی در بتن پودری واکنش‌پذیر گردد.

ژو<sup>۳</sup> و همکارانش [۱۰] مشخصات دینامیکی بتن پودری واکنش‌پذیر حاوی ۱، ۱/۵، ۲ و ۳ درصد الیاف فولادی با قطر ۵۶ میلی‌متر و ضخامت ۲۶ میلی‌متر در نرخ کرنش‌های بین ۲۰ تا ۱۰۵ ثانیه را مورد مطالعه قرار دادند. بدین ترتیب، آن‌ها چهار شکل عمومی متفاوت برای منحنی‌های تنش-کرنش بتن پودری مسلح‌شده با استفاده از

- 
- 1 Al-Takrit
  - 2 Hadi
  - 3 Ju

- 
- 4 Jiao
  - 5 Kim

جدول ۱. مشخصات مصالح مصرفی در بتن

Table 1. Specifications of consumable materials in concrete

سیمان	ماسه سیلیسی	پودر سیلیس	میکروسیلیس	آب	روان کننده	فنر فلزی	الیاف فولادی
تیپ ۲ (شاهرود)	معدن تاوان سیلیس (گرمسار)	معدن تاوان سیلیس (گرمسار)	کارخانه فروسیلیس (سمنان)	آب شرب شهر تهران	ابر روان ساز کربوکسیلاتی	بازیافت صنعت لوازم التحریر	شرکت صنایع مفتولی زنجان

جدول ۲. مشخصات مکانیکی ماسه سیلیسی

Table 2. Mechanical properties of silica sand

مقدار	مشخصه مکانیکی
۲/۶۲	چگالی نسبی در حالت SSD
۱/۹۹	درصد جذب آب
۱/۴۱	مدول نرمی
۰/۶	حداکثر اندازه دانه (میلی متر)

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

در این مطالعه تعداد مجموعاً ۱۲۶ عدد نمونه‌ی استوانه‌ای بتن حاوی فنر فلزی بازیافتی و الیاف فولادی (۰/۳ و ۰/۶ درصد حجمی) در محیط‌های اسیدی (سولفات منیزیم) مختلف جهت انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی بر طبق استاندارد ASTM C39 که توسط جک هیدرولیک با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلونیوتن و سرعت بارگذاری ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه انجام شد، ساخته شد.

در جدول‌های ۱ و ۲ مشخصات مصالح مورد استفاده در ساخت بتن‌های مورد آزمایش و مشخصات مکانیکی ماسه سیلیسی آورده شده‌است. در جدول‌های ۳ الی ۵ مشخصات شیمیایی سیمان، میکروسیلیس، پودر سیلیس و ماسه سیلیسی آورده شده‌است. همچنین مشخصات فیزیکی و مکانیکی فنر فلزی و الیاف فولادی استفاده شده که توسط دستگاه کشش آزمایشگاه مهندسی مواد دانشگاه سمنان انجام شد، در جدول ۶ آورده شده‌است. شکل ۱ تصویر فنر فلزی بازیافتی و الیاف فولادی مصرفی در این مطالعه را نشان می‌دهد.

فنرهای به کار رفته در این پژوهش، از جنس فولادی کم کربن (گالوانیزه) بوده و از بازیافت فنرهای مورد استفاده در صنعت لوازم التحریر استفاده شده‌است. سطح مقطع فنرها به صورت دایره‌ای به قطر ۰/۸ میلی‌متر بوده و چگالی فنرها حدود ۷۸۶۰ کیلوگرم بر

مطالعه بر روی بتن پودری واکنش‌پذیر به این نتیجه دست یافتند که خصوصیات برشی بتن معمولی و بتن پودری واکنش‌پذیر حدود ۳ الی ۴ درصد با یکدیگر اختلاف دارند [۱۹]. شروانی تبار و چاخارلو در سال ۲۰۱۷ به بررسی تأثیر جایگزینی ماسه معمولی بجای ماسه سیلیسی با درصدهای صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ بر مقاومت فشاری بتن پودری واکنش‌پذیر پرداختند. نتایج حاصل از آزمایشات تجربی نشان داد که ماسه معمولی می‌تواند به‌عنوان جایگزین ماسه سیلیسی در ساخت بتن پودری واکنش‌پذیر مورد استفاده قرار گیرد [۲۰]. خالو و همکارانش در سال ۲۰۱۲ به این نتیجه دست یافتند که با استفاده از ۱۵ درصد دوده سیلیس در ترکیب بتن پودر واکنش‌پذیر، می‌توان به مقاومت فشاری و خمشی بهینه دست یافت [۲۱].

به علت این که بتن پودری واکنش‌پذیر از سنگدانه‌های بزرگ از جمله شن و ماسه تشکیل نشده‌است و مقاومت در برابر فشار و نیرو توسط سیلیس و ماسه سیلیسی تحمل می‌شود، لذا هنگام شکست و انهدام بتن دچار گسیختگی شدید شده و ترک عرض زیادی خواهد داشت. لذا در این مقاله با استفاده از مواد بازیافتی از جمله فنر فلزی بازیافتی و همچنین الیاف فولادی سعی شده‌است که علاوه بر بهبود مقاومت فشاری و کششی این نوع از بتن، عرض ترک کاهش یافته و انهدام کمتری ایجاد شود. بنابراین با مطالعه تحقیقات اخیر و عدم وجود تحقیقات جدی بر روی بررسی عملکرد استفاده از فنرهای بازیافتی در بتن پودری واکنش‌پذیر و همچنین بررسی عملکرد آن در محیط‌های اسیدی، در این مقاله به بررسی عملکرد بتن پودری واکنش‌پذیر به کمک انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی و همچنین بررسی عرض ترک در بتن پودری واکنش‌پذیر حاوی الیاف فولادی و فنر فلزی بازیافتی از جنس گالوانیزه در محیط اسیدی پرداخته شد. در نهایت روابطی جهت تخمین مقاومت فشاری و کششی این نوع از بتن ارائه شد.

جدول ۳. آنالیز شیمیایی سیمان  
Table 3. Chemical analysis of cement

شرح تست	نتایج تست	استاندارد ۳۸۹ ایران	استاندارد کارخانه	روش تست
(%) SiO <sub>2</sub>	۲۱/۱۱	حداقل ۲۰	حداقل ۲۰/۵	۱۶۹۲
(%) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۴/۴۲	حداکثر ۶	حداکثر ۵	۱۶۹۲
(%) Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳/۹۶	حداکثر ۶	حداکثر ۵	۱۶۹۲
(%) CaO	۶۳/۳۶	-	-	۱۶۹۲
(%) MgO	۱/۵۱	حداکثر ۵	حداکثر ۲۵	۱۶۹۲
(%) SO <sub>3</sub>	۲/۷۰	حداکثر ۳	حداکثر ۲/۹	۱۶۹۲
(%) Na <sub>2</sub> O	۰/۳۲	-	-	۱۶۹۵
(%) K <sub>2</sub> O	۰/۵۱	-	-	۱۶۹۵
(%) L.O.I	۲/۰۲	حداکثر ۳	حداکثر ۲/۹	۱۶۹۲
(%) Acid remaining insoluble	۰/۳۲	حداکثر ۰/۷۵	حداکثر ۰/۷	۱۶۹۲
(%) Free lime	۱/۲۳	-	-	۱۶۹۲
(%) C <sub>3</sub> S	۵۳	-	-	۱۶۹۲
(%) C <sub>2</sub> S	۲۰/۸	-	-	۱۶۹۲
(%) C <sub>3</sub> A	۵	حداکثر ۸	حداکثر ۶/۵	۱۶۹۲

جدول ۴. آنالیز شیمیایی میکروسیلیس  
Table 4. Chemical analysis of microsilica

CL	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	C	SiC	H <sub>2</sub> O
۰/۰۴	۰/۱۰	۰/۱۶	۱/۰۱	۰/۳۱	۰/۹۷	۰/۴۹	۱/۳۲	۰/۸۷	۹۶/۴	۰/۳	۰/۵	۰/۸

جدول ۵. آنالیز شیمیایی پودر سیلیس و ماسه سیلیسی  
Table 5. Chemical analysis of silica powder and silica sand

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	S	
<۹۹	۰/۰۵	۰/۰۳	<۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	<۰/۰۲	(%) پودر سیلیس
۹۹-۹۷	۱/۷-۰/۴	۰/۶-۰/۲	-	۰/۲-۰/۰۷	-	۰/۰۱-۰	۰/۰۶-۰/۰۲	-	ماسه سیلیسی

جدول ۶. خواص فیزیکی و مکانیکی الیاف و فنر فلزی بازیافتی  
Table 6. Physical and mechanical properties of recycled metal fibers and springs

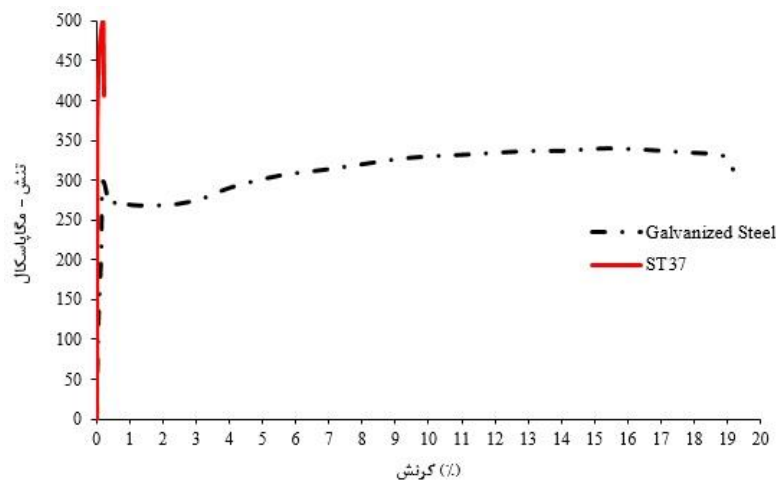
نام الیاف	مقطع	طول (mm)	قطر (mm)	قطر/طول	مقاومت کششی (MPa)	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	مدول الاستیسیته (GPa)
فنر فلزی	دایره	۲۵	۰/۸	۳۱/۲۵	>۱۲۰۰	۷۸۵۰	۱۶۰
الیاف فولادی	دایره	۵۰	۰/۸	۶۲/۵۰	>۱۲۰۰	۷۸۵۰	۱۶۰



الف- فنر فلزی      ب- الیاف فولادی

شکل ۱. تصویر الیاف و فنر

Fig. 1. Fiber and spring image A- Metal spring B- Steel fibers



شکل ۲. مقایسه منحنی تنش-کرنش فنر فولادی کم کربن (گالوانیزه) و فولاد ST37

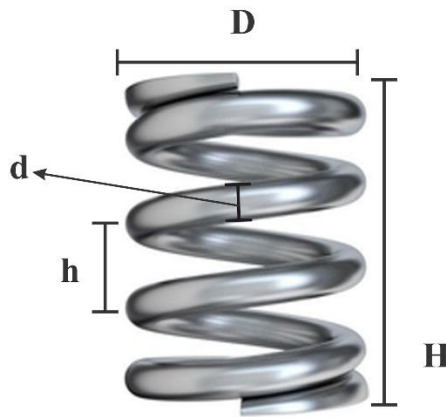
Fig. 2. Comparison of stress-curve strain of low carbon steel spring (galvanized) and ST37 steel

فولاد ST37 به ترتیب برابر ۲۴۰ و ۳۷۰ مگاپاسکال می‌باشد. بنابراین مقادیر تنش در این دو ماده تقریباً با یکدیگر برابر می‌باشند. هم‌چنین درصد کرنش تسلیم و نهایی در فنر به ترتیب برابر با ۰/۱۳ و ۱۹ و در فولاد ST37 به ترتیب برابر ۰/۰۱ و ۰/۲۵ می‌باشد. بنابراین کرنش فنر گالوانیزه بسیار بیشتر از فولاد ST37 بوده بدین معنا که رفتار نرم‌تری دارد. هم‌چنین جزئیات هندسی نمای فنر فلزی در شکل ۳ نشان داده شده‌است.

که در آن، D قطر حفره‌ی فنر ( در این پژوهش برابر ۸ و ۱۲ میلی‌متر)، d قطر مفتول فنر که برابر ۰/۸ میلی‌متر و H طول فنر (۲/۵ سانتی‌متر) می‌باشد.

مترمکعب می‌باشد. قابل‌ذکر است که خصوصیات گالوانیزه از جمله مقاومت حرارتی، مدول الاستیسیته و چگالی

تقریباً با خصوصیات فولاد ST37 برابر بوده (طبق آزمایش‌های انجام‌شده در آزمایشگاه مهندسی مواد دانشگاه سمنان) و رفتار مشابهی دارند. در شکل ۲ 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 شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد سختی اولیه (مدول الاستیسیته) فنر گالوانیزه و فولاد ST37 با یکدیگر برابر بوده، هم‌چنین مقادیر تنش تسلیم و نهایی فنر برابر ۲۶۶ و ۳۴۰ مگاپاسکال و این مقادیر برای



شکل ۳. جزئیات هندسی نمای فنر فلزی

Fig. 3. Geometric details of metal spring facade

جدول ۷. اسامی طرح‌ها

Table 7. Names of projects

12SP2	12SP1	8SP2	8SP1	SF2	SF1	A	نام نمونه
بتن حاوی فنر ۱۲ به مقدار ۰/۶	بتن حاوی فنر ۱۲ به مقدار ۰/۳	بتن حاوی فنر ۸ به مقدار ۰/۶	بتن حاوی فنر ۸ به مقدار ۰/۳	بتن حاوی الیاف فولادی به مقدار ۰/۶ درصد	بتن حاوی الیاف فولادی به مقدار ۰/۳ درصد	نمونه شاهد	
درصد حجمی	درصد حجمی	درصد حجمی	درصد حجمی	درصد حجمی	درصد حجمی		

## ۱-۲- طرح اختلاط بتن مصرفی

با توجه به این که طبق آزمایش‌ها از قبل انجام شده در این پژوهش، استفاده‌ی بیش از مقدار ۰/۶ درصد از فنر در بتن، احتمال درهم پیچیدگی و ایجاد فاصله بین سنگدانه‌ها در بتن را افزایش خواهد داد، لذا استفاده‌ی بیش از ۰/۶ درصد حجمی از فنر در بتن، پیشنهاد نمی‌شود. جدول ۷ اسامی طرح‌های استفاده شده در مقاله آورده شده‌است.

همان‌طور که از جدول ۷ مشاهده می‌شود، نمونه‌ی شاهد (نمونه‌ای که هیچ‌گونه فنری در آن به کار نرفته باشد) با حرف A و نمونه‌های حاوی فنر فلزی و الیاف فولادی به ترتیب با نماد SP و SF نشان داده شده‌اند. اعداد سمت چپ فنرها (۱۲-۸) نشان‌دهنده قطر فنر و اعداد ۱ و ۲ مقابل نمادهای SP و SF به ترتیب نمایانگر ۰/۳ و ۰/۶ درصد حجمی استفاده آن‌ها در بتن می‌باشند.

مقدار کلیه مصالح ساخت بتن بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب و هم‌چنین درصد حجمی الیاف و فنر در جدول ۸ آورده شده‌است. از ابر روان‌ساز پرکربوکسیلاتی به‌عنوان کاهنده‌ی آب و با هدف

افزایش کارپذیری بتن استفاده شد. کلیه‌ی مراحل اختلاط، ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه سمنان انجام شد.

جهت ساخت بتن پودری واکنش‌پذیر ابتدا پودر سیلیس و ماسه سیلیسی در حالت خشک به مدت دو دقیقه در درون میکسر با یکدیگر مخلوط شده سپس یک سوم از مقدار آب و روان‌کننده به ترکیب اضافه شد و به مدت یک دقیقه با هم ترکیب شدند. سپس نیمی از سیمان و میکروسیلیس و در نهایت آب، مواد سیمانی و روان‌کننده باقی مانده به ترکیب اضافه گشته و در این حالت به مدت سه دقیقه با هم ترکیب شدند. در نهایت فنر و الیاف مصرفی به ترکیب اضافه شدند و میکسر در این حالت نیز به مدت دو دقیقه چرخید.

## ۲-۲- روش آزمایش

عمل‌آوری نمونه‌ها مطابق استاندارد ISIRI581 [۲۲] و بر روی بتن‌های ۲۸ روزه اعمال گردید. ابتدا به میزان موردنظر (طبق طرح اختلاط) مخلوط بتن به همراه الیاف و فنر و ابر روان‌کننده ساخته،

جدول ۸. مشخصات طرح های اختلاط  
Table 8. Specifications of mixing schemes

بر حسب درصد حجمی بتن		ابر روان کننده	میکروسیلیس	ماسه سیلیسی	پودر سیلیس	آب	سیمان	نام طرح
الیاف فولادی	فنر فلزی باز یافتی							
.	.	۳۹/۴۸۰	۲۰۲	۹۲۴	۱۷۸	۱۸۰	۸۴۰	A
۰/۳	.	۳۹/۴۸۰	۲۰۲	۹۲۴	۱۷۸	۱۸۰	۸۴۰	SF1
۰/۶	.	۳۹/۴۸۰	۲۰۲	۹۲۴	۱۷۸	۱۸۰	۸۴۰	SF2
.	۰/۳	۳۹/۴۸۰	۲۰۲	۹۲۴	۱۷۸	۱۸۰	۸۴۰	8SP1
.	۰/۶	۳۹/۴۸۰	۲۰۲	۹۲۴	۱۷۸	۱۸۰	۸۴۰	8SP2
.	۰/۳	۳۹/۴۸۰	۲۰۲	۹۲۴	۱۷۸	۱۸۰	۸۴۰	12SP1
.	۰/۶	۳۹/۴۸۰	۲۰۲	۹۲۴	۱۷۸	۱۸۰	۸۴۰	12SP2



شکل ۴. نحوه‌ی قرارگیری نمونه‌ها در زیر جک

Fig. 4. How the samples are placed under the jack

فشاری، در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شد اند. همانطور که از شکل ۴ مشخص است، برای انجام تست مقاومت فشاری، نمونه‌ها بین دو فک به فاصله‌ی ۲۰ سانتی‌متر از یکدیگر قرار داده شده و با سرعت مناسب تحت فشار قرار گرفتند. همچنین با وجود این که مقطع فوقانی و تحتانی کلیه نمونه‌ها کاملاً صاف بوده اما به جهت اطمینان برای جلوگیری از ایجاد هرگونه تمرکز تنش در نمونه‌ها، صفحاتی بین نمونه‌ها و فک دستگاه قرار داده شد. همچنین با توجه به شکل ۵، همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش درصد اسید استفاده شده

سپس فرآیند نمونه‌گیری بتن در نمونه‌های استوانه‌ای  $10 \times 20$  سانتی‌مترمربع و در مجموع به تعداد ۱۲۶ عدد (برای هر طرح و هر تست، ۳ عدد نمونه ساخته شد) انجام شد. هر قالب، در سه مرحله بتن‌ریزی و در هر بار ویبره گردید. پس از مدت ۲۴ ساعت قالب‌ها باز و داخل حوضچه‌ی آب در محلول اسیدی سولفات منیزیم (۰، ۵ و ۱۰ درصد) در دمای حدود ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار داده و نمونه‌ها پس از مدت ۲۸ روز از داخل حوضچه‌ی آب خارج و سپس آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی بر روی آن‌ها انجام شد. لازم به ذکر است که سرعت بارگذاری دستگاه جهت تست مقاومت فشاری و کششی به ترتیب ۰/۵ و ۰/۲۵ مگاپاسکال بر ثانیه بر طبق استاندارد EN-12390-13 [۲۳] انتخاب گردید.

### ۳- انجام آزمایش و بررسی نمونه‌ها

با توجه به این که هنگام خروج نمونه‌ها از درون حوضچه عمل‌آوری، آب‌های سطحی بر روی نمونه‌ها وجود داشته بنابراین به مدت حدود کمتر از یک ساعت صبر کرده تا آب‌های سطحی روی نمونه‌ها از بین رفته و سپس نمونه‌ها در حالت تر (خیس) تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی قرار گرفتند.

### ۳-۱- مقاومت فشاری

نمای کلی نحوه‌ی انجام آزمایش مقاومت فشاری و همچنین مود گسیختگی مقطع میانی نمونه‌ها پس از انجام آزمایش مقاومت



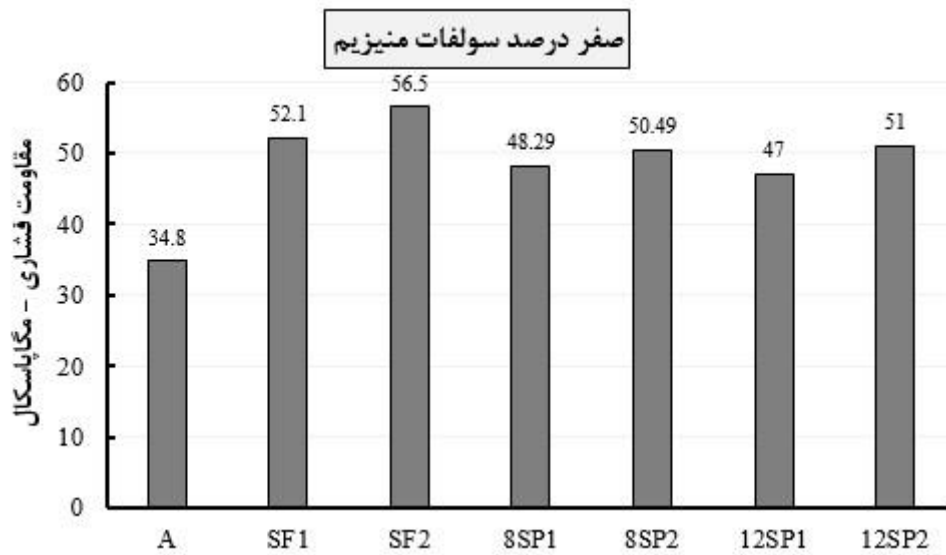
پ) محیط ۱۰٪ اسیدی

ب) محیط ۵٪ اسیدی

الف) محیط ۰٪ اسیدی

شکل ۵. نحوه شکست مقطع میانی نمونه‌ها پس از تست مقاومت فشاری

Fig. 5. How to break the mid-section of the specimens after the compressive strength test  
A) 0% acidic environment b) 5% acidic environment c) 10% acidic environment



شکل ۶. مقاومت فشاری در محیط ۰٪ اسیدی

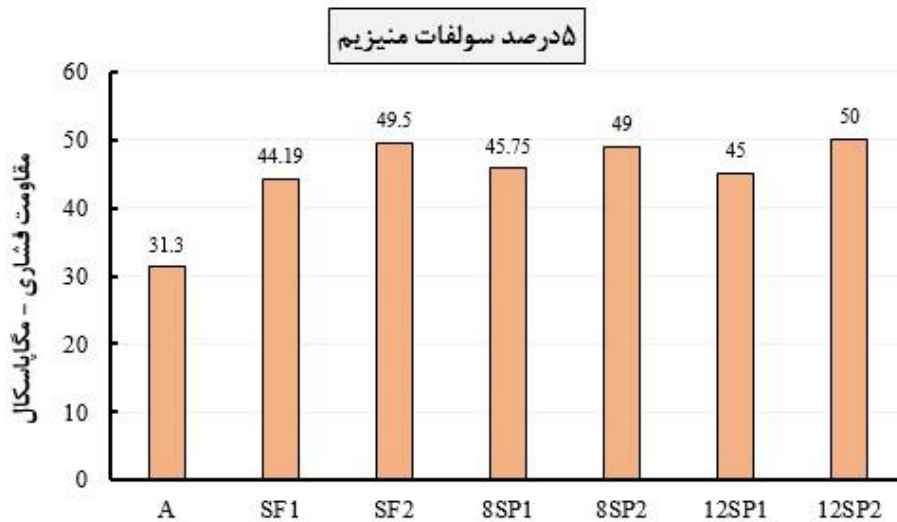
Fig. 6. Compressive strength in 0% acidic environment

۶ تا ۸ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶ که نتایج مربوط به آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در محیط صفر درصد اسیدی (حوضچه آب بدون سولفات منیزیم) می‌باشد، با افزودن فنر و الیاف به بتن مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد همواره افزایش یافته است. به‌بیا دیگر، با افزودن الیاف فولادی در مقادیر ۰/۳ و ۰/۶ درصد حجمی به بتن باعث افزایش مقاومت فشاری به ترتیب تا ۱/۵۰ و ۱/۶۲ برابر نمونه شاهد شده است. همچنین با افزودن فنر فلزی بازیافتی با قطر ۸ میلی‌متر (۸SP) در مقادیر ۰/۳ و ۰/۶ درصد حجمی به بتن، باعث

در محیط عمل‌آوری، طول و تعداد ترک‌ها در مقطع میانی نمونه‌ها افزایش ست. بنابراین با افزایش خاصیت اسیدی محیط، آثار تخریبی بیشتری به بتن پودری واکنش‌پذیر وارد شده، به‌طوری که حدس زده می‌شود در استفاده از محیط با ۱۵٪ خاصیت اسیدی، مقطع میانی نمونه‌ها پس از تست فشار به‌طور کامل تخریب شده و یا ترک‌ها در تمامی مقطع نمونه مشاهده خواهد شد.

نتایج مربوط به آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها با قرارگیری در محیط‌های با ۰، ۵ و ۱۰ درصد محلول سولفات منیزیم در اشکال‌های





شکل ۷. مقاومت فشاری در محیط ۵٪ اسیدی

Fig. 7. Compressive strength in 5% acidic environment

تن الیاف فولادی هزینه‌ای در حدود ۱۰۰۰ دلار صرفاً جهت خرید آن (بدون هزینه حمل و اختلاط) باید پرداخت نمود که با توجه به افزایش روزافزون استفاده از الیاف در بتن و توسعه ساخت‌وساز در ایران و سایر کشورها، این هزینه به چندین برابر افزایش خواهد یافت. حال با توجه به این که استفاده از فنر فلزی بازیافتی به‌عنوان ماده‌ای دورریز لحاظ شده، بنابراین هزینه‌ای جهت تهیه آن پرداخت نشده و در پروژه‌های عمرانی هم به لحاظ اقتصادی و هم به لحاظ فنی کاملاً توجیه‌پذیر می‌باشد.

با توجه به شکل ۷ که مربوط به آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در محیط حاوی ۵ درصد سولفات منیزیم بوده، همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزودن فنر فلزی بازیافتی و الیاف فولادی به بتن همواره مقاومت فشاری افزایش یافته‌است. با افزودن الیاف فولادی در مقادیر ۰/۳ و ۰/۶ درصد حجمی به بتن در محیط حاوی ۵ درصد سولفات منیزیم، مقاومت فشاری به ترتیب تا ۱/۴۱ و ۱/۵۸ برابر نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته‌است. این مقادیر در نمونه‌های حاوی فنرهای ۸SP و ۱۲SP به ترتیب برابر ۱/۴۶، ۱/۵۶، ۱/۴۴ و ۱/۵۹ می‌باشد. با مقایسه کلی از نتایج می‌توان دریافت که عملکرد الیاف فولادی و فنر تقریباً با هم مشابه بوده و مقاومت فشاری را به یک اندازه افزایش خواهند داد. هم‌چنین با مقایسه نتایج مربوط به نمونه‌های موجود در محلول صفر و ۵ درصد سولفات منیزیم مشاهده می‌گردد که مقاومت فشاری نمونه‌ها به‌علت اثرات خوردگی بر روی الیاف فولادی و فنر فلزی کاهش یافته

افزایش مقاومت فشاری به ترتیب تا ۱/۳۹ و ۱/۴۵ برابر نمونه شاهد شده‌است. این مقادیر در رابطه با فنر ۱۲SP به ترتیب ۱/۳۵ و ۱/۴۷ می‌باشد. بنابراین با مقایسه بین نتایج حاصل از افزودن فنر فلزی بازیافتی و الیاف فولادی به بتن، ملاحظه می‌شود که با وجود افزایش مقاومت بیشتر الیاف فولادی نسبت به فنر فلزی، اما این اختلاف بسیار ناچیز بوده و می‌توان گفت که نتیجه تقریباً یکسانی با هم دارند. علت این افزایش چشم‌گیر مقاومت فشاری بتن حاوی فنر فلزی بازیافتی (۸SP و ۱۲SP) را می‌توان با توجه به محدودیت حداکثر قطر سنگدانه استفاده‌شده در بتن و هم‌چنین عملکرد سه‌بعدی فنر در بتن و محصور شدن بخش زیادی از سنگدانه‌ها و خمیر سیمان در بتن و در نتیجه استحکام بهتر آن مرتبط دانست. هم‌چنین با توجه به این که جنس فنرها از گالوانیزه بوده و جنس الیاف فولادی از نوع فولاد بوده، لذا بتن حاوی فنرهای فلزی از شکل‌پذیری بیشتری نسبت به بتن حاوی الیاف فولادی برخوردار بوده، در نتیجه امکان تردشکنی کمتری نسبت به نمونه شاهد و نمونه حاوی الیاف فولادی دارند.

یکی از مسائل مطرح و اساسی امروزه در علوم مهندسی از جمله پروژه‌های عمرانی، بحث توجیه اقتصادی می‌باشد. با توجه به این که افزایش مقاومت فشاری بتن حاوی فنر فلزی و الیاف فولادی در مقدار استفاده ۰/۶ درصد بیشتر از مقدار استفاده ۰/۳ درصد بوده‌است، لذا با مقایسه‌ای کلی به بحث توجیه اقتصادی پرداخته خواهد شد. به‌عنوان مثال برای استفاده از الیاف فولادی در بتن در ایران، به ازای هر



شکل ۸. مقاومت فشاری در محیط ۱۰٪ اسیدی

Fig. 8. Compressive strength in 10% acidic environment

فولادی می‌باشد. با مقایسه بین نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها در محلول حاوی ۱۰ درصد سولفات منیزیم نسبت به محلول حاوی ۵ درصد سولفات منیزیم مشاهده می‌شود که به ترتیب ۷٪، ۴٪ و ۴٪ کاهش مقاومت رخ داده‌است. در این حالت نیز حضور فنر فلزی بازیافتی ساخته شده با گالوانیزه، سبب کاهش مقاومت کمتری نسبت به الیاف فولادی خواهد شد.

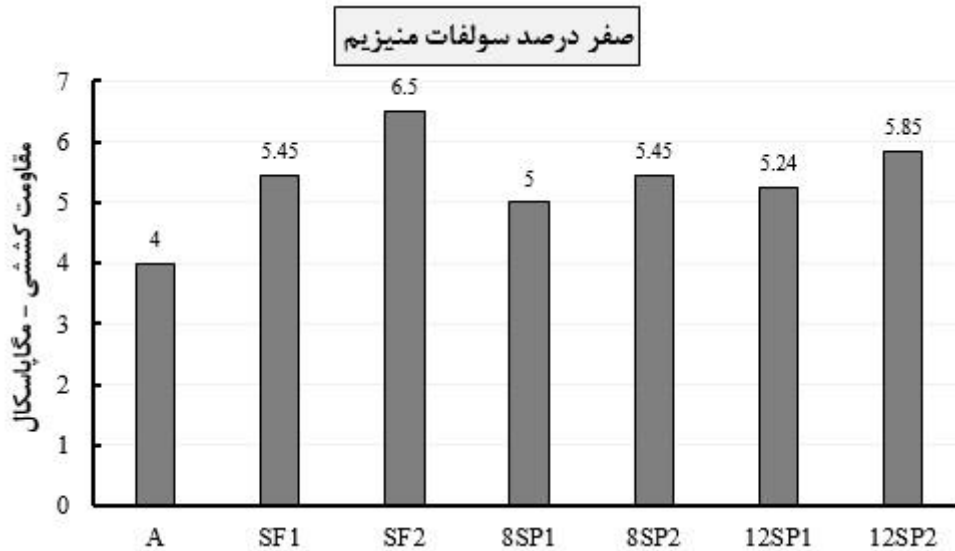
حال با توجه به این‌که مزایای فنی و اقتصادی استفاده از فنر فلزی بازیافتی در بتن پودری واکنش‌پذیر بخوبی روشن شد، می‌توان طبق نتایج و اختلافات اندک بین آن‌ها در نمونه‌های حاوی فنر به این نکته اشاره نمود که طبق طرح اختلاط استفاده‌شده در این مقاله، نمی‌توان بطور قطع بیان نمود که کدام یک از فنرها بهتر بوده و نسبت به دیگری ارجحیت دارند. بنابراین با توجه به ساین سنگدانه‌ها و طرح اختلاطی که استفاده می‌گردد و همچنین با تحقیقات بیشتر در این زمینه، می‌توان به نتایج بیشتری در رابطه با عملکرد هر فنر دست یافت.

### ۲-۳- مقاومت کششی

برای انجام آزمایش مقاومت کششی نمونه‌ها، از روش کشش غیر مستقیم یا روش برزیلی استفاده شد. روش انجام آزمایش بدین صورت است که نمونه به صورت افقی یا خوابیده در زیر جک قرار گرفته به طوری که هیچ‌گونه انحرافی در راستای خود ندارد. سپس جک

که این مقادیر کاهش در نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی الیاف فولادی، فنر ۸SP و فنر ۱۲SP به ترتیب برابر ۱۲٪، ۱۲٪، ۳٪ و ۲٪ می‌باشد. حال با علم به این‌که مواد از جنس گالوانیزه مقاومت بیشتری نسبت به فولاد در برابر خوردگی دارد (در شرایط مشابه)، بنابراین نمونه‌های حاوی فنر فلزی در برابر محیط‌های اسیدی و خورنده دوام بیشتری داشته و کاهش مقاومت کمتری (در حدود ۴ الی ۶ برابر) نسبت به نمونه‌های حاوی الیاف فولادی دارند.

هم‌چنین در شکل ۸ نتایج مربوط به آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در محیط حاوی ۱۰ درصد سولفات منیزیم آورده شده‌است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقاومت فشاری تمامی نمونه‌ها در مقایسه با محیط ۰٪ و ۵٪ اسیدی کاهش یافته‌است. مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی الیاف فولادی در مقادیر ۰/۳ و ۰/۶ درصد حجمی به ترتیب ۱/۴۹ و ۱/۵۸ برابر نمونه شاهد است. هم‌چنین این مقادیر در نمونه‌های حاوی فنر ۸SP و ۱۲SP به ترتیب برابر ۱/۵۰، ۱/۶۱، ۱/۴۱ و ۱/۶۵ می‌باشد. در این حالات نیز اختلاف بین مقاومت‌ها چندان زیاد نبوده و با افزایش مقدار استفاده از الیاف و فنر در بتن، مقاومت فشاری نیز افزایش یافته‌است. نکته دیگر این است که، از آنجایی که با افزایش درصد استفاده از محلول سولفات منیزیم و هم‌چنین با علم به این‌که دوام فنر گالوانیزه بیشتر از الیاف فولادی بوده، بنابراین در این حالت (۱۰ درصد سولفات منیزیم) در اکثر موارد مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی فنر فلزی بازیافتی بیشتر از نمونه‌های حاوی الیاف



شکل ۹. مقاومت کششی در محیط ۰٪ اسیدی  
 Fig. 9. Tensile strength in 0% acidic environment

۰/۶ درصد، مقاومت کششی بتن به ترتیب تا ۱/۲۵ و ۱/۳۶ برابر نمونه شاهد افزایش یافته است. این مقادیر در بتن حاوی فنر ۱۲SP به ترتیب برابر ۱/۳۶ و ۱/۴۶ می باشد. در نتیجه علیرغم مقاومت کششی بیشتر نمونه های حاوی الیاف فولادی نسبت به نمونه های حاوی فنر فلزی بازیافتی، اما این اختلاف مقاومت ها بسیار اندک (حدود ۱۰ درصد) بوده و با لحاظ نمودن مسائل اقتصادی در استفاده از الیاف یا فنر می توان گفت که استفاده از فنر فلزی بازیافتی مقرون به صرفه تر می باشد.

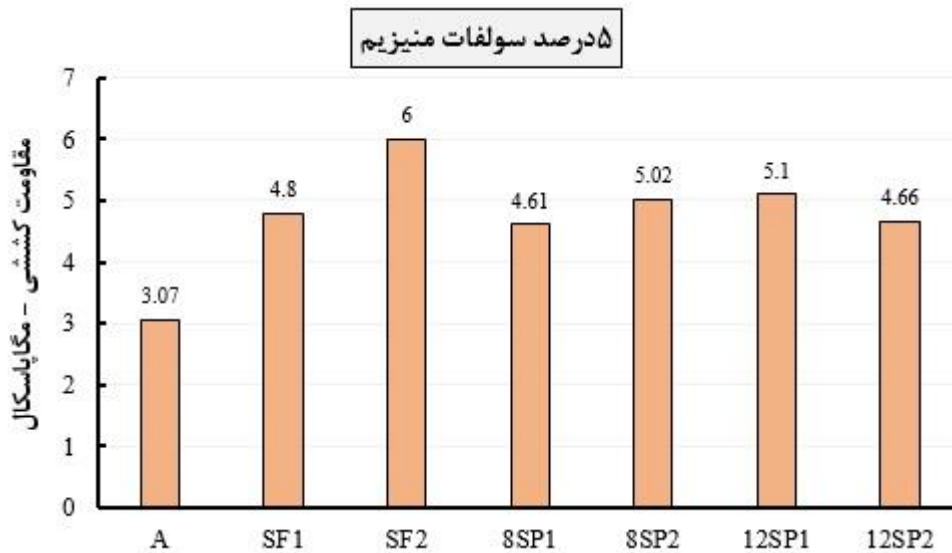
در شکل ۱۰ مقادیر مربوط به مقاومت کششی نمونه ها در محلول حاوی ۵٪ سولفات منیزیم آورده شده است. همان طور که ملاحظه می شود، مقاومت کششی نمونه شاهد برابر ۳/۰۷ مگاپاسکال (حدود ۳۰٪ کمتر از شرایط محلول ۰٪ اسید) بوده که با افزودن الیاف فولادی به بتن پودری واکنش پذیر در مقادیر ۰/۳ و ۰/۶ درصد حجمی به ترتیب ۱/۵۶ و ۱/۹۵ برابر افزایش خواهد یافت. این مقادیر برای نمونه های حاوی فنر ۸SP به ترتیب برابر ۱/۵۰ و ۱/۶۴ و برای فنر ۱۲SP به ترتیب برابر ۱/۶۶ و ۱/۵۲ می باشد. با توجه به نتایج، در مقدار استفاده از ۰/۳ درصد از الیاف یا فنر، مقاومت کششی فنر ۱۲SP بیشترین مقاومت کششی را داشته است. هم چنین در مقدار استفاده از ۰/۶ درصد الیاف یا فنر، نمونه های حاوی الیاف فولادی (SF) بیشترین مقاومت را از خود نشان داده اند.

هیدرولیک مورد نظر با اعمال نیروی قائم با سرعت ۰/۲۵ مگاپاسکال بر ثانیه، منجر به شکست نمونه خواهد شد. مقاومت کششی بتن بر حسب نیوتن بر میلی متر مربع طبق رابطه ۱ محاسبه می شود.

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi DL} \quad (1)$$

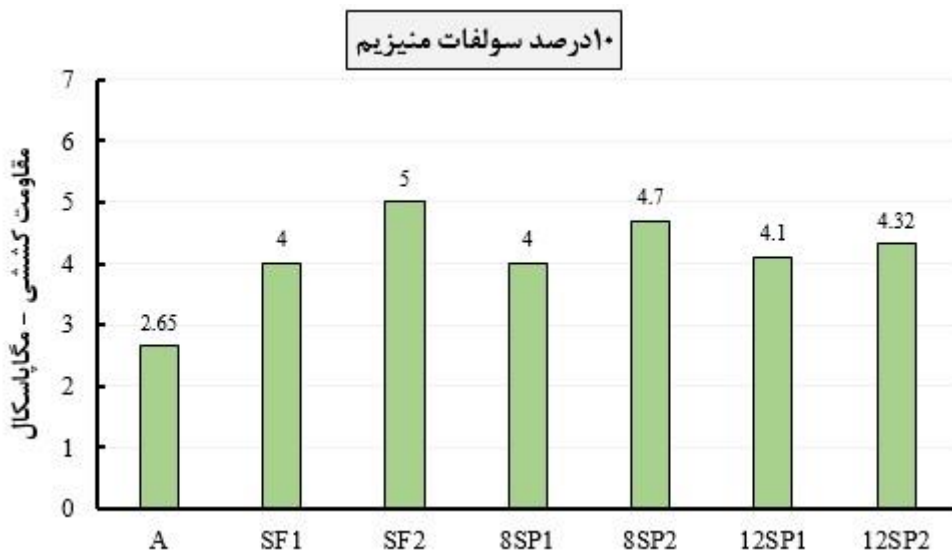
که در آن P برابر است با مقدار بار وارده بر حسب نیوتن، D قطر نمونه ای استوانه ای (۱۰۰ میلی متر) و L طول نمونه ای استوانه ای (۲۰۰ میلی متر) می باشد.

در شکل های ۹ تا ۱۱ روند تغییرات مقاومت کششی نمونه ها با توجه به محیط های اسیدی مختلف نشان داده شده است. با توجه به شکل ۹ که روند تغییرات مقاومت کششی نمونه ها در محیط معمولی (۰٪ اسید) را نشان می دهد، حضور الیاف فولادی و فنر فلزی بازیافتی در بتن پودری واکنش پذیر همواره سبب افزایش مقاومت کششی نسبت به نمونه شاهد (نمونه بدون الیاف و فنر) شده است. با افزودن ۰/۳ و ۰/۶ درصد (SF2 - SF1) الیاف فولادی به بتن پودری واکنش پذیر، مقاومت کششی به ترتیب تا ۱/۳۶ و ۱/۶۲ برابر نمونه شاهد افزایش یافته است. بنابراین با افزایش مقدار استفاده از الیاف فولادی در بتن پودری واکنش پذیر در مقدار مناسب، مقاومت کششی رو به افزایش خواهد بود. با توجه به نتایج به دست آمده از نتایج آزمایش مقاومت کششی نمونه های حاوی فنر ۸SP در مقادیر ۰/۳ و



شکل ۱۰. مقاومت کششی در محیط ۵٪ اسیدی

Fig. 10. Tensile strength in 5% acidic environment



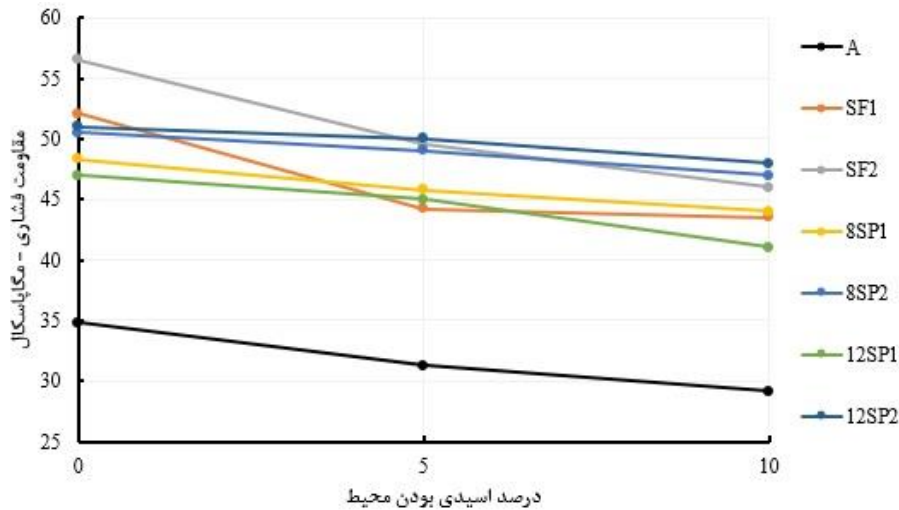
شکل ۱۱. مقاومت کششی در محیط ۱۰٪ اسیدی

Fig. 11. Tensile strength in 10% acidic environment

خواهدداشت.

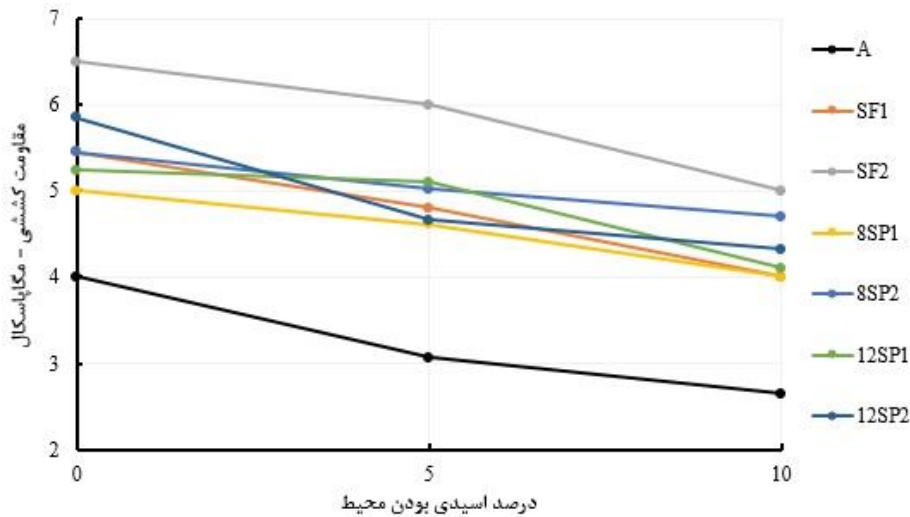
با توجه به نتایج حاصل از شکل ۱۱، استفاده از مواد با خاصیت الیافی در بتن پودری واکنش‌پذیر باعث افزایش مقاومت کششی تا ۱/۸۹ برابر نسبت به نمونه شاهد می‌شود. هم‌چنین با افزایش درصد استفاده از الیاف و فنر در بتن، مقاومت کششی نیز افزایش خواهد یافت. استفاده از الیاف فولادی، فنر ۸SP و فنر ۱۲SP در بتن به ترتیب مقاومت کششی را تا «۱/۵۰ و ۱/۸۹»، «۱/۷۷ و ۱/۵۰» و «۱/۵۵ و

با مقایسه بین مقاومت کششی نمونه‌ها در محیط‌های ۰٪ و ۵٪ اسیدی می‌توان به این نکته اشاره نمود که درصد افت مقاومت نمونه شاهد و نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و فنر ۸SP و فنر ۱۲SP نسبت به محیط ۰٪ اسیدی به ترتیب برابر ۲۳٪، ۱۲٪، ۸٪ و ۸٪ می‌باشد. علت این امر را می‌توان به جنس گالوانیزه فنرهای فلزی بازیافتی استفاده شده مرتبط دانست، چراکه اصولاً در شرایط مشابه گالوانیزه تحمل بیشتری در برابر حملات سولفات‌ها نسبت به الیاف فولادی



شکل ۱۲. مقاومت فشاری نمونه‌ها در محیط‌های اسیدی

Fig. 12. Compressive strength of samples in acidic environments



شکل ۱۳. مقاومت کششی نمونه‌ها در محیط‌های اسیدی

Fig. 13. Tensile strength of samples in acidic environments

صرفه اقتصادی نداشته و بنابراین استفاده از فتر فلزی بازیافتی از جنس گالوانیزه توصیه می‌شود.

#### ۴- مقایسه عملکرد کلی نمونه‌ها

بهنظور ارزیابی و مقایسه عملکرد نمونه‌های حاوی الیاف و فتر در محیط‌های اسیدی، نتایج به‌صورت تجمعی در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ آورده شده‌است. همان‌طور که از شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، در محیط با ۰٪ خاصیت اسیدی، مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی الیاف فولادی

۱/۶۳ برابر نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌دهد. مقاومت کششی نمونه شاهد در محلول حاوی ۱۰٪ سولفات منیزیم نسبت به محلول حاوی ۰٪ و ۵٪ اسید به‌ترتیب تا حدود ۲۳٪ و ۱۳٪ کاهش یافته‌است. همچنین در کلیه نمونه‌ها همواره استفاده از مقدار ۰/۶ درصد الیاف یا فتر سبب افزایش مقاومت بیشتری نسبت به سایر حالات خواهد شد. در مجموع با لحاظ نمودن نکات فنی و اقتصادی در پروژه‌های عمرانی، می‌توان به این نکته اشاره نمود که به‌علت خوردگی و هزینه‌های زیاد استفاده از الیاف فولادی در بتن با تمام محاسنی که دارد، چندان

جدول ۹. روابط پیشنهادی جهت پیش‌بینی مقاومت نمونه‌ها

Table 9. Proposed relationships for predicting the strength of samples

نوع آزمایش	تابع رگرسیون	ضریب رگرسیون ( $R^2$ )
A	$F'_c = -0.565X + 34.57$	0.98
SF1	$F'_c = -0.86X + 50.89$	0.81
SF2	$F'_c = -1.05X + 55.92$	0.96
8SP1	$F'_c = -0.429X + 48.16$	0.99
8SP2	$F'_c = -0.349X + 50.57$	0.99
12SP1	$F'_c = -0.6X + 47.33$	0.96
12SP2	$F'_c = -0.3X + 51.17$	0.96
A	$F_T = -0.135X + 3.91$	0.95
SF1	$F_T = -0.145X + 5.47$	0.99
SF2	$F_T = -0.15X + 6.58$	0.96
8SP1	$F_T = -0.1X + 5.04$	0.98
8SP2	$F_T = -0.075X + 5.43$	0.99
12SP1	$F_T = -0.114X + 5.38$	0.84
12SP2	$F_T = -0.153X + 5.71$	0.91

اختلاط موجود در این مقاله بوده، لذا جهت ارائه روابط بیشتر در آینده قابل ارائه است.

#### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله تعداد ۱۲۶ عدد نمونه استوانه‌ای بتن پودری واکنش‌پذیر حاوی ۰/۳ و ۰/۶ درصد الیاف فولادی و فنر فلزی بازیافتی تحت محیط اسیدی حاوی سولفات منیزیم (۰٪ - ۵٪ - ۱۰٪) ساخته شده که نتایج زیر حاصل شدند:

- افزودن فنر فلزی با قطر ۸ و ۱۲ میلی‌متر (8SP - 12SP) و الیاف فولادی در بتن پودری واکنش‌پذیر در محیط ۰٪ اسیدی، مقاومت فشاری بتن را به ترتیب تا ۱/۶۲، ۱/۴۵ و ۱/۴۷ برابر مقاومت فشاری نمونه شاهد افزایش می‌دهد.

- با افزودن فنر فلزی و الیاف فولادی به بتن پودری واکنش‌پذیر در محیط ۵٪ و ۱۰٪ اسیدی، مقاومت فشاری تا ۱/۵ و ۱/۶ برابر نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته، به‌گونه‌ای که با افزایش میزان سولفات منیزیم در محیط عمل‌آوری، افزایش مقاومت نمونه‌های حاوی فنر نسبت به نمونه شاهد بیش از نمونه‌های حاوی الیاف فولادی می‌باشد. همچنین با افزایش میزان اسید، میزان افت مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی فنر به مراتب کمتر از نمونه‌های حاوی الیاف بوده به‌طوری که

بیش از سایر نمونه‌ها می‌باشند. اما با قرارگیری نمونه‌ها در محیط ۵٪ اسیدی، نمونه‌های حاوی الیاف فولادی با شیب و شدت بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها دچار افت مقاومت شده اند، که این مسأله را می‌توان به پتانسیل بیشتر الیاف فولادی در برابر خوردگی نسبت به فنر فلزی بازیافتی از جنس گالوانیزه مرتبط دانست. بنابراین با وجود این‌که افزودن الیاف و فنر به بتن پودری واکنش‌پذیر باعث افزایش چشم‌گیر مقاومت فشاری شده، اما فنرهای بازیافتی هم به لحاظ فنی و هم به لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیرترند. هم‌چنین در شکل ۱۳ نیز تقریباً چنین روندی برای مقاومت کششی نمونه‌ها مشاهده می‌شود.

#### ۵- روابط پیشنهادی جهت تعیین مقاومت فشاری و کششی

با توجه به این‌که مقادیر به‌دست آمده از این پژوهش از پیوستگی مناسبی برخوردار بوده، با برازش منحنی‌های درجه اول برای هر نمودار، روابطی جهت تعیین مقاومت فشاری و کششی بتن‌های حاوی الیاف و فنر در جدول ۹ پیشنهاد شده‌است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضریب رگرسیون تمامی روابط نزدیک به ۱ بوده، لذا روابط پیشنهادی از دقت مناسبی برخوردارند. در این روابط  $F'_c$  و  $F_T$  مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها و X پارامتر مربوط به درصد اسیدی بودن محیط می‌باشد. روابط فوق برای طرح

- Construction and Building Materials, 2016, 114, 109–118.
- [5] Zheng, W., Li, H., Wang, Y., “Compressive stress-strain relationship of steel fiber reinforced reactive powder concrete after exposure to elevated temperatures”, Construction and Building Materials, 2012, 35 (10), 931–940.
- [6] Anand, A., Abraham, G., “Effect of Polyester Fibers on the Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete (RPC)”, International Journal of Engineering Technology Science and Research, IJETS, 2017, 4(11).
- [7] Hou, X., Cao, S., Rong, Q., Zheng, W., Li, G., “Effects of steel fiber and strain rate on the dynamic compressive stress-strain relationship in reactive powder concrete”, Construction and Building Materials, 2018, 170, 570–581.
- [8] Ji, T., Chen, C., Zhuang, Y., “Evaluation method for cracking resistant behavior of reactive powder concrete”, Construction and Building Materials, 2012, 28(1), 45–49.
- [9] Al-Tikrite, A., Hadi, M., “Mechanical properties of reactive powder concrete containing industrial and waste steel fibres at different ratios under compression”, Construction and Building Materials, 2017, 154, 1024–1034.
- [10] Ju, Y., Liu, H., Sheng, G., “Experimental study of dynamic mechanical properties of reactive powder concrete under high-strain-rate impacts”, Science China Technological Sciences, 2010, 53, 2435–2449.
- [11] Jiao, C., Sun, W., “Impact resistance of reactive powder concrete”, Journal of Wuhan University of Technology-Mater, 2015, 30 (4), 752–757.
- [12] Canbaz, M., “The Effect of High Temperature on Reactive Powder Concrete”, Construction and Building Materials, 2014, 70, 508–513.
- [13] Kang, S. T., Lee, Y., Park, Y. D., “Tensile Fracture Properties of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPRC) with Steel Fiber”, Composite Structures, 2010, 92, 61–71.
- افت مقاومت در نمونه‌های حاوی فنر و الیاف به ترتیب حدود ۳٪ و ۱۲٪ می‌باشد.
- مقاومت کششی نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و فنر فلزی با قطر ۸ و ۱۲ میلی‌متر در محیط ۰٪ سولفات منیزیم به ترتیب ۱/۶۲، ۱/۳۶ و ۱/۴۶ برابر نمونه شاهد بوده‌است. اما با توجه به اختلاف کم افزایش مقاومت‌ها، نمونه‌های حاوی فنر به دلایل فنی و اقتصادی مقرون‌به‌صرفه‌تر بوده و برای پروژه‌های عمرانی به خصوص مناطق ساحلی و مناطق تحت حملات اسیدی توصیه می‌گردد.
- با افزودن فنر فلزی باز یافتی با قطر ۸ و ۱۲ میلی‌متر و الیاف فولادی به بتن پودری واکنش‌پذیر در محیط حاوی ۵٪ سولفات منیزیم، مقاومت کششی نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۱۹۵٪، ۱۶۴٪ و ۱۶۶٪ افزایش می‌یابد. این مقادیر افزایش مقاومت در محیط حاوی ۱۰٪ سولفات منیزیم به ترتیب برابر ۱۸۹٪، ۱۷۷٪ و ۱۶۳٪ می‌باشد. بنابراین اختلاف چندان زیادی در افزایش مقاومت نمونه‌ها در هر محیط (۵٪ - ۱۰٪) نسبت به نمونه شاهد وجود نداشته، اما میزان افت مقاومت کششی نمونه‌های حاوی فنر نسبت به نمونه‌های حاوی الیاف فولادی تا حدود ۴ برابر کمتر می‌باشد.
- با جمع‌بندی نتایج می‌توان گفت که با افزایش خاصیت اسیدی محیط، استفاده از فنر فلزی باز یافتی از جنس گالوانیزه در بتن پودری واکنش‌پذیر مقرون‌به‌صرفه‌تر از الیاف فولادی بوده و عملکرد مناسب‌تری دارد.

## مراجع

- [1] Yi, N. H., Kim, J. H. J., Han, T. S., “Blast-resistant characteristics of ultra-high strength concrete and reactive powder”, concrete, Construction and Building Materials, 2012, 28 (1), 694–707.
- [2] Su, Y., Li, J., Wu, C., “Effects of steel fibres on dynamic strength of UHPC”, Construction and Building Materials, 2016, 114, 708–718.
- [3] Zheng, W., Luo, B., Wang, Y., “Stress-strain relationship of steel-fibre reinforced reactive powder concrete at elevated temperatures”, Materials and Structures, 2015, 48 (7), 1–16.
- [4] Pyo, S., Mo, A., El-Tawil, S., “Crack propagation speed in ultra high performance concrete (UHPC)”,

- H., "Evaluation of Pure Shear Strength in Reactive Powder Concrete and its comparison with Normal Concrete", Magazine of Concrete Research, 2015, 8(1), 15-25.
- [20] Shervani Tabar, B., Chakherloo, J., "Investigation on the use of ordinary sand instead of silica sand with different replacement percentages and its effect on the compressive strength of reactive powder concrete", The 9th National Concrete Conference, Research Center for Roads, Housing and Urban Development, Tehran, Iran, 2017, 1-10.
- [21] Khaloo, A., Zanjani, M. M. Kh., Azizi, Kh., "Experimental investigation of silica fume content influence on performance of reactive powder concrete", Magazine of Concrete Research, 2012, 5(1), 69-78.
- [22] INSO581, 2015, concrete-making curing concrete test specimens in the laboratory- code of practice, 2nd. revision.
- [23] NF EN 12390-13 AFNOR, 2013, Testing hardened concrete, in: Determination of Secant Modulus of Elasticity in Compression, pages 18-455.
- [14] Park, S. H., Kim, D. J., Ryu, G. S., "Tensile Behavior of Ultra High Performance Hybrid Fiber Reinforced Concrete", Cement and Concrete Composites, 2012, 34, 172-184.
- [15] Qian, C. X., Stroeven, P., "Development of Hybrid Polypropylene-Steel Fiber Reinforced Concrete", Cement and Concrete Research, 2000, 30, 63-69.
- [16] Kim, D. J., Park, S. H., Ryu, G. S., "Comparative Flexural Behavior of Hybrid Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete with Different Macro Fibers", Construction and Building Materials, 2011, 25, 4144-4155.
- [17] Meraji, L., Afshin, H., Abedi, K., "Investigation into the Effects of Fibers Type on the Properties of Reactive Powder Concrete", Journal of Civil and Environmental Engineering, 2017, 46(4), 89-96.
- [18] Meraji, L., Afshin, H., Abedi, K., "Investigation into the Possibility of Reactive Powder Concrete Production Using Available Materials in Iran", Magazine of Concrete Research, 2012, 5(2), 7-18.
- [19] Toofani Milani, A., Afshin, H., Aliloo, Y., Naseri,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Gh. Pachideh, M. Gholhaki, A. Moshtagh, An Investigation of RPC containing Recycled Metal Spring and its Comparison with the Concrete including Steel Fibers Exposed to the Acidic Environment, Amirkabir J. Civil Eng., 52(2) (2020) 335-350.

DOI: 10.22060/ceej.2018.14772.5739

