



مقایسه آزمایش Break-off و مدول گسیختگی برای تعیین مقاومت بتن الیاف فولادی با استفاده از شبکه عصبی

سید حسین قاسم زاده موسوی نژاد*، بنیامین گنجه خسروی، جواد رزاقی لنگرودی
دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۴-۲۶
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۵-۲۷
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۵-۲۹
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۳-۲۷

کلمات کلیدی:

آزمایش break-off
مدول گسیختگی
آزمایش نیمه مخرب
الیاف فولادی
شبکه عصبی

خلاصه: آزمایش مدول گسیختگی بتن جهت تعیین مقاومت در برابر شکست ناشی از خمش و محاسبه لنگر ترک خوردگی نقش مهمی دارد. به منظور تعیین این پارامتر طبق استاندارد ASTM-C78 نیاز به برش از سازه موجود یا ساخت نمونه‌های با مقطع مربعی ۱۵۰ میلی متر و طول ۷۰۰ میلی متر می‌باشد. از آنجائی که تهیه نمونه با ابعاد فوق در محل دشوار می‌باشد و عملاً باعث تخریب سازه می‌شود، استفاده از آزمایش نیمه مخرب با خسارت جزئی بر عضو، مدنظر قرار گرفته است. در این مطالعه آزمایش نیمه مخرب break-off برای ارزیابی مقاومت بتن حاوی الیاف فولادی در محل به عنوان جایگزین آزمایش مدول گسیختگی مدنظر قرار گرفته است. جهت فراهم کردن یک پایگاه آماری کامل و جامع، ۲۴ طرح اختلاط انتخاب گردید. سپس، عوامل تأثیرگذار بر خصوصیات بتن حاوی الیاف فولادی، نتایج آزمایش Break-off و مدول گسیختگی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر متوسط مقاومت مدول گسیختگی و Break-off با افزایش مقدار سیمان افزایش می‌یابد. همچنین این مقادیر برای سنگدانه بزرگتر، بیشتر می‌باشند. همچنین وجود الیاف فولادی مانع گسترش و توسعه ریزترک‌های داخلی بتن شده و باعث افزایش مقاومت خمشی می‌شود که منجر به افزایش مقاومت Break-off و مدول گسیختگی می‌شود. همچنین، در این مقاله جهت پیش‌بینی مقاومت خمشی آزمایش مدول گسیختگی در سنین مختلف از مدل سازی عددی شبکه عصبی استفاده شده است. شاخص‌های مختلف آماری برای مقایسه عملکرد مدل در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل شبکه عصبی ابزار قدرتمندی جهت پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن می‌باشد.

۱- مقدمه

مقاومت کششی بتن معمولی در مقایسه با مقاومت فشاری بتن بسیار پائین و در حدود ۸ تا ۱۲٪ مقاومت فشاری آن است [۱]. برای تعیین مقاومت کششی بتن آزمایش‌های مختلفی مانند آزمایش کشش مستقیم، آزمایش دونیم شدن و مقاومت کششی در خمش مرسوم به مدول گسیختگی توسط آئین‌نامه‌های مختلف پیشنهاد شده است. تنش کششی نهایی در آزمایش خمشی، مدول گسیختگی نامیده می‌شود. از این پارامتر جهت طراحی اعضاء خمشی استفاده می‌شود. متداولترین آزمایش‌ها، تهیه نمونه‌های مکعبی یا استوانه‌ای است که طبق استاندارد بصورت ایده‌آل متراکم و عمل‌آوری می‌شوند و نتایج

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: h.mosavi@guilan.ac.ir

آن مستقیماً به عنوان مقاومت بالقوه بتن در نظر گرفته می‌شود [۲].
۳. از آنجاییکه این نمونه‌ها معمولاً در سنین ۷ و ۲۸ روز آزمایش می‌شوند، آگاهی یافتن از مشکلات بتن بکار رفته با تأخیر همراه بوده و امکان تکرار آزمایش نیز وجود ندارد.

همچنین عواملی چون نوع نمونه، اندازه نمونه، نوع قالب، شرایط عمل‌آوری، تراکم، پرداخت سطوح نهایی بتن و تغییرات اتفاقی حادث در نوع و مقدار مصالح مصرفی در اختلاط بتن از جمله عواملی است که براساس آن میتوان ادعا نمود نمونه‌های استاندارد بطور کامل معرف مشخصات و خصوصیات واقعی بتن بکار رفته نیستند [۳].

عوامل فوق بر ضرورت ارزیابی مقاومت بتن در محل تاکید می‌نماید و بدین منظور روش‌های مختلفی ابداع شده‌اند که می‌توان



آنها را در دو گروه عمده غیرمخرب و نیمه‌مخرب ارزیابی نمود. آزمایش‌های نیمه‌مخرب با خسارت جزئی بر عضو مورد بررسی همراه می‌باشند، هر چند آسیب جزئی وارد شده بر عملکرد سازه تأثیری ندارند. در این آزمایش‌ها با توجه به اینکه پارامتری که اندازه‌گیری میشود با مقاومت بتن مرتبط می‌باشد، از قابلیت اعتماد بالاتری نسبت به روش‌های غیرمخرب برخوردار است.

در آزمایش نیمه‌مخرب (BO) Break-off، مانومتر مکانیکی به موازات سطح تمام شده نمونه بتنی باری را به مغزه جزئی استوانه‌ای بتنی وارد کرده و باعث گسیختگی در قسمت کف نمونه مغزه میشود. کریستیانس و همکاران نشان دادند که عواملی چون نسبت آب به سیمان، سن بتن، شرایط نگهداری و نوع سیمان میتواند بر نتایج آزمایش در ارزیابی مقاومت بتن مؤثر باشد. در این آزمایش دقت $\pm 20\%$ در محدوده اطمینان $\pm 95\%$ مورد انتظار است [۲، ۴]. جوانسن [۵] به بررسی کاربرد این روش برای سنجش تغییرات مقاومت بتن در طول عمل‌آوری و شرایط آن پرداخت و در نهایت ادعا نمود که این روش در نشان دادن تغییرات مقاومت بتن به مراتب مناسبتر از روش نمونه مکعبی می‌باشد. کارلسون [۶] یک مقاله پیرامون آزمایش BO منتشر نمود که در پایان بدین نتیجه رسید که این روش در آینده به عنوان یکی از بهترین روش‌های سنجش مقاومت بتن در محل پذیرفته خواهد شد. بارکر و رامبرز [۷] تأثیر نسبت آب به سیمان، ماکزیمم اندازه سنگدانه و شکل سنگدانه را روی جواب آزمایش BO بررسی کردند. نائیک و همکاران [۸] یک تحلیل رگرسیون بین نتایج روش BO و نمونه استوانه‌ای صورت دادند که حاکی از ارتباط مناسب این نتایج با هم بوده است. بانگی و میلارد [۲] یک کتاب منتشر نمودند که در آن روش BO مورد بررسی قرار گرفت و نشان دادند که در این آزمایش دقت $\pm 20\%$ در محدوده اطمینان $\pm 95\%$ مورد انتظار است. لین و همکاران [۹] کارائی آزمایش BO را برای ارزیابی کیفیت پیوستگی در سطح مشترک میلگرد و بتن مورد بررسی قرار دادند. نتایج تجربی آنها نشان داد که لنگر آزمایش BO انطباق مناسبی با مقاومت چسبندگی در سطح مشترک میلگرد و بتن دارد. مدندوست و همکاران [۱۰] به بررسی عددی آزمایش Break-off با استفاده از نرم‌افزار آباکوس پرداختند. در این بررسی به نحوه ترک خوردگی و خردشدگی المان‌ها و گسترش آنها پرداخته شد و جهت صحت‌سنجی نتایج عددی بدست آمده توسط آنها با نتایج نائیک و همکاران [۸]

مورد مقایسه قرار گرفت.

مدول گسیختگی بتن در محاسبه‌ی لنگر ترک‌خوردگی تیرهای بتن مسلح و به ویژه اعضای پیش تنیده که ترک نخوردن عضو یک اصل است، نقش اساسی دارد. برای تعیین این پارامتر طبق روشهای استاندارد فعلی، نیاز به برشی از تاوه و یا ساخت نمونه‌های با مقطع مربعی می‌باشد. یکی از اولین پژوهش‌های مدول گسیختگی بتن، توسط آبرامز با عنوان بررسی جامع مقاومت خمشی تیرهای بتنی عریض ارائه شد. او در این پژوهش، ۷۵۰ نمونه بتنی مکعب مستطیلی با ابعاد و طرح‌های اختلاط مختلف را تحت آزمایش چهار نقطه‌ای قرار داد و اثر ۱۳ پارامتر مختلف از جمله مقاومت فشاری بتن، سن بتن و عمق مقطع را بر مقاومت خمشی بتن مورد بررسی قرار داد. نتایج پژوهش او همگی بیانگر این نکته بودند که رابطه غیرخطی بین مقاومت فشاری و مقاومت خمشی وجود دارد [۱۱]. با توجه به اهمیت مدول گسیختگی بتن در تعیین لنگر ترک خوردگی عضو و میزان حداقل فولاد، آیین‌نامه‌های بتن به بررسی مقاومت خمشی بتن و چگونگی تعیین آن برای مقاصد طراحی پرداخته‌اند و با گذشت زمان و پیشرفت فنآوری بتن این روابط نیز در حال اصلاح و تکمیل می‌باشند. با توجه به تحقیقات صورت گرفته، روابط ارائه شده در آیین‌نامه‌ها مربوط به بتن‌های با مقاومت فشاری کمتر از ۴۰ مگاپاسکال هستند. امروزه با پیشرفت فنآوری بتن، مقاومت فشاری بتن بسیار فراتر از این مقدار رفته است و نیاز به اصلاح روابط آیین‌نامه‌ای می‌باشد. لگرون و پالتر، با تحلیل آماری بر روی ۳۹۵ داده بدست آمده از بتن‌هایی با مقاومت تا ۱۳۰ مگاپاسکال روابط جدیدی بین مدول گسیختگی بتن با مقاومت فشاری آن برقرار کردند [۱۲]. بازان و نوک، با توجه به روش استاندارد موجود برای تعیین مقاومت خمشی، دو روش را برای تعیین اثر اندازه‌ی نمونه بر مدول گسیختگی بتن، پیشنهاد نمودند [۱۳].

در سالهای اخیر، استفاده از بتن حاوی مقادیر الیاف فولادی بدلیل مزایای آن در افزایش چقرمگی و مقاومت بتن بویژه کششی و خمشی گسترش یافته است [۱۴-۱۶]. مقاومت کششی کم در مقایسه با مقاومت فشاری ضعف اصلی بتن می‌باشد که این رفتار شکننده موجب شکست ناگهانی و فرو ریختن سازه‌های بتنی در هنگام زلزله میگردد. یکی از راه‌حل‌های مناسب مقابله با مشکل ترد بودن و شکست ناگهانی بتن، استفاده از مقادیر کم الیاف در

ریز مصرفی از نوع رودخانه‌های و درشت دانه از نوع طبیعی شکسته با حداکثر اندازه ۱۲/۵ و ۲۵ میلی متر با وزن مخصوص ۲/۶۵ مطابق الزامات BS882:1992 [۲۰] می باشد. از الیاف فولادی قلابدار و کم کربن با طول ۵ سانتیمتر، قطر ۰/۸ میلی متر و نسبت ابعاد ۶۲/۵ و چگالی ۷/۸۵ گرم بر سانتیمتر مکعب استفاده شده است.

۲-۲- طرح اختلاط

دستیابی به یک طرح اختلاط مناسب، بهداشتن دانش بالا خواص بتن و تجربه کافی نیاز دارد. به منظور فراهم کردن پایگاه جامع اطلاعات برای بررسی عوامل مؤثر بر خصوصیات مکانیکی بتن حاوی الیاف فولادی و تأثیر آن بر نتایج آزمایش BO و مدول گسیختگی سطوح متفاوتی از سیمان مصرفی، حداکثر سایز سنگدانه و درصد الیاف انتخاب گردید. مقادیر عیار سیمان ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب با نسبت آب به سیمان ثابت ۰/۴ در نظر گرفته شد. حداکثر سایز سنگدانه در دو سطح ۱۲/۵ و ۲۵ میلی متر در نظر گرفته شد و با توجه به مطالعات ذکر شده [۱۵، ۱۸، ۱۹]، الیاف مصرفی با نسبت‌های حجمی ۰، ۰/۳۳، ۰/۶۷ و ۱ درصد اختیار شد.

بر این اساس ۲۴ طرح اختلاط مطابق جزئیات جدول ۱ پایه‌ریزی شد. تعداد ۳۶۰ نمونه سخت شده بتنی در سنین مورد نظر جهت آزمایش BO و ۲۱۶ نمونه سخت شده جهت آزمایش مدول گسیختگی ارزیابی شده و خصوصیات مکانیکی آنها ثبت گردید. نامگذاری طرحها براساس مقدار سیمان (۵۰۰، ۴۵۰، ۴۰۰ kg/m³، C=۴۰۰)، مقدار وزنی الیاف فولادی (۷۸، ۵۳، ۲۶، SF=۰ kg/m³)، حداکثر سایز سنگدانه (AS=۱۲، ۲۵ mm) صورت گرفته است.

۲-۳- ملاحظات تئوری آزمایش Break-off

در آزمایش نیمهمخرب BO، مانومتر مکانیکی به موازات سطح تمام شده نمونه بتنی باری را به مغزه جزئی استوانه‌های بتنی وارد کرده و باعث گسیختگی در قسمت کف نمونه مغزه میشود. با توجه به رابطه (۱) تنش در سطح شکست آزمایش BO، را میتوان به مقاومت خمشی و یا به مقاومت فشاری بتن ارتباط داد [۹].

$$f_{BO} = \frac{M}{S}, \quad M = P_{BO} \times h \quad (1)$$

در شکل ۱ نحوه آزمایش BO نشان داده شده است. درحقیقت

بتن می باشد. در هم آمیختگی بتن و الیاف فولادی میتواند منجر به بهبود خصوصیات بتن بویژه مشخصات حالت سخت شده بتن گردد [۱۷]. در تحقیقات آزمایشگاهی متعددی، سودمندی استفاده از الیاف به اثبات رسیده است. چنانکه گزارش ها نشان می دهد افزودن ۲۰ تا ۵۰ کیلوگرم الیاف در متر مکعب بتن میتواند بطور قابل توجهی خصوصیات مهندسی بتن سخت شده شامل چقرمگی، مقاومت در مقابل بارهای ضرب‌های، مقاومت کششی، مقاومت پیچشی، مقاومت در برابر لایه‌لایه شدگی و مقاومت در برابر ساییدگی را افزایش دهد [۱۵، ۱۸، ۱۹]. بدین علت بتن الیاف فولادی به عنوان بتن مورد بررسی در این مطالعه انتخاب شده است.

مرور مطالعه‌های پیشین نشان می دهد که تاکنون مطالعه جامعی که اثر همه پارامترهای مؤثر بر آزمایش BO و مدول گسیختگی شامل مشخصات بتن و سن بتن (۱۴ تا ۹۰ روز) را در برگیرد صورت نگرفته است. در این مطالعه آزمایش BO و مدول گسیختگی با جزئیات بیشتر، برای اثبات کارایی کنترل کیفیت در ارزیابی مقاومت بتن مورد بررسی قرار گرفته است.

هدف از مطالعه حاضر، بررسی پارامترهای مؤثر بر نتایج آزمایش BO و مدول گسیختگی شامل مقدار سیمان، حداکثر اندازه سنگدانه، سن بتن و مقدار الیاف فولادی می باشد. همچنین قابلیت اعتماد و دقت نتایج از جنبه آماری مورد ارزیابی قرار گرفته است. به اعتقاد نویسندگان، تاکنون گزارشی از بکارگیری مدل‌های پیش‌بینی مقاومت در تبیین آزمایش‌های BO و مدول گسیختگی با در نظر داشتن خصوصیات مختلف منتشر نشده است. لذا روش مدلسازی شبکه عصبی داده‌های آزمایشگاهی جهت ارزیابی مقاومت خمشی بتن مدنظر قرار گرفت. پژوهش حاضر می‌تواند زمینه را برای ارائه روش آزمایش استاندارد تعیین مقاومت خمشی بتن با استفاده از روش مدول گسیختگی و روش آزمایش BO مشابه آنچه در آزمایش فشاری مورد استفاده قرار می‌گیرد، هموار کند.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

در این مقاله از سیمان پرتلند تیپ II با وزن مخصوص ۳/۱۵ و سطح مخصوص بلین ۳۱۶۵ سانتیمتر مربع بر گرم استفاده شده است. آب بکار رفته در بتن آب آشامیدنی می باشد. سنگدانه‌های

جدول ۱. جزئیات طرحهای اختلاط (kg/m³)

Table 1. Concrete mixture details

| شماره | طرح | مقدار سیمان | آب | درشت دانه | شن | الیاف فولادی | |
|-------|--------------|-------------|-----|-----------|-----|--------------|------|
| | | | | | | % | kg |
| ۱ | C۴۰۰SF۰۰AS۱۲ | ۴۰۰ | ۱۶۰ | ۱۰۹۹ | ۸۰۵ | ۰ | ۰ |
| ۲ | C۴۰۰SF۲۶AS۱۲ | ۴۰۰ | ۱۶۰ | ۱۰۹۹ | ۸۰۵ | ۰/۳۴ | ۲۶/۵ |
| ۳ | C۴۰۰SF۵۳AS۱۲ | ۴۰۰ | ۱۶۰ | ۱۰۹۹ | ۸۰۵ | ۰/۶۸ | ۵۳ |
| ۴ | C۴۰۰SF۷۸AS۱۲ | ۴۰۰ | ۱۶۰ | ۱۰۹۹ | ۸۰۵ | ۱ | ۷۸ |
| ۵ | C۴۵۰SF۰۰AS۱۲ | ۴۵۰ | ۱۸۰ | ۱۰۴۰ | ۷۶۲ | ۰ | ۰ |
| ۶ | C۴۵۰SF۲۶AS۱۲ | ۴۵۰ | ۱۸۰ | ۱۰۴۰ | ۷۶۲ | ۰/۳۴ | ۲۶/۵ |
| ۷ | C۴۵۰SF۵۳AS۱۲ | ۴۵۰ | ۱۸۰ | ۱۰۴۰ | ۷۶۲ | ۰/۶۸ | ۵۳ |
| ۸ | C۴۵۰SF۷۸AS۱۲ | ۴۵۰ | ۱۸۰ | ۱۰۴۰ | ۷۶۲ | ۱ | ۷۸ |
| ۹ | C۵۰۰SF۰۰AS۱۲ | ۵۰۰ | ۲۰۰ | ۹۸۸ | ۷۲۴ | ۰ | ۰ |
| ۱۰ | C۵۰۰SF۲۶AS۱۲ | ۵۰۰ | ۲۰۰ | ۹۸۸ | ۷۲۴ | ۰/۳۴ | ۲۶/۵ |
| ۱۱ | C۵۰۰SF۵۳AS۱۲ | ۵۰۰ | ۲۰۰ | ۹۸۸ | ۷۲۴ | ۰/۶۸ | ۵۳ |
| ۱۲ | C۵۰۰SF۷۸AS۱۲ | ۵۰۰ | ۲۰۰ | ۹۸۸ | ۷۲۴ | ۱ | ۷۸ |
| ۱۳ | C۴۰۰SF۰۰AS۲۵ | ۴۰۰ | ۱۶۰ | ۱۰۹۹ | ۸۰۵ | ۰ | ۰ |
| ۱۴ | C۴۰۰SF۲۶AS۲۵ | ۴۰۰ | ۱۶۰ | ۱۰۹۹ | ۸۰۵ | ۰/۳۴ | ۲۶/۵ |
| ۱۵ | C۴۰۰SF۵۳AS۲۵ | ۴۰۰ | ۱۶۰ | ۱۰۹۹ | ۸۰۵ | ۰/۶۸ | ۵۳ |
| ۱۶ | C۴۰۰SF۷۸AS۲۵ | ۴۰۰ | ۱۶۰ | ۱۰۹۹ | ۸۰۵ | ۱ | ۷۸ |
| ۱۷ | C۴۵۰SF۰۰AS۲۵ | ۴۵۰ | ۱۸۰ | ۱۰۴۰ | ۷۶۲ | ۰ | ۰ |
| ۱۸ | C۴۵۰SF۲۶AS۲۵ | ۴۵۰ | ۱۸۰ | ۱۰۴۰ | ۷۶۲ | ۰/۳۴ | ۲۶/۵ |
| ۱۹ | C۴۵۰SF۵۳AS۲۵ | ۴۵۰ | ۱۸۰ | ۱۰۴۰ | ۷۶۲ | ۰/۶۸ | ۵۳ |
| ۲۰ | C۴۵۰SF۷۸AS۲۵ | ۴۵۰ | ۱۸۰ | ۱۰۴۰ | ۷۶۲ | ۱ | ۷۸ |
| ۲۱ | C۵۰۰SF۰۰AS۲۵ | ۵۰۰ | ۲۰۰ | ۹۸۸ | ۷۲۴ | ۰ | ۰ |
| ۲۲ | C۴۵۰SF۰۰AS۲۵ | ۵۰۰ | ۲۰۰ | ۹۸۸ | ۷۲۴ | ۰/۳۴ | ۲۶/۵ |
| ۲۳ | C۵۰۰SF۵۳AS۲۵ | ۵۰۰ | ۲۰۰ | ۹۸۸ | ۷۲۴ | ۰/۶۸ | ۵۳ |
| ۲۴ | C۵۰۰SF۷۸AS۲۵ | ۵۰۰ | ۲۰۰ | ۹۸۸ | ۷۲۴ | ۱ | ۷۸ |

برای همه ارزیابیها میانگین پنج نمونه از بتن مورد نظر به عنوان نتیجه آزمایش BO گزارش گردید.

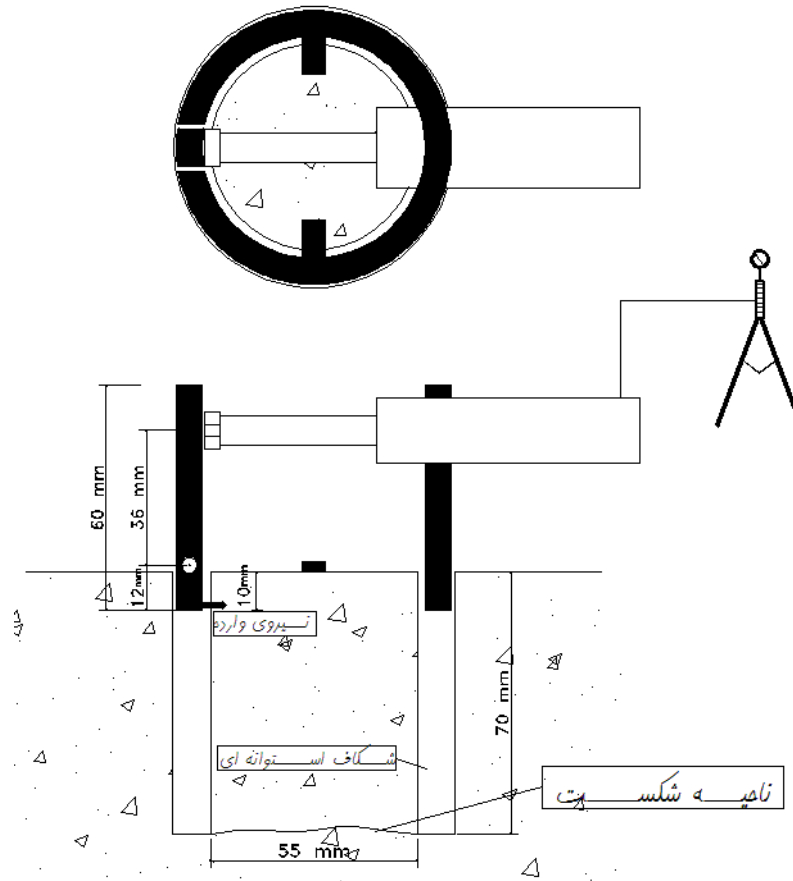
۴-۲- ملاحظات تئوری آزمایش مدول گسیختگی

این آزمایش مطابق آیین نامه ASTM [۲۲] انجام شده است. مطابق استاندارد ASTM-C78 مقاومت خمشی مدول گسیختگی تیرهای مستطیلی بصورت آزمایش چهار نقطه‌ای بر روی تیر بتنی منشوری به ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۷۰۰ میلی متر انجام گردید. کناره‌های نمونه باید با کف و بالای آن زاویه قائمه بسازند. تمام سطوح نمونه باید صاف بوده و از پریدگی، برآمدگی، سوراخ یا فرو رفتگی قابل تشخیص، عاری باشند. مدول گسیختگی از رابطه زیر محاسبه میشود:

$$R = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (۲)$$

آزمایش BO معادل یک تیر طره با مقطع دایره‌ای تحت بار متمرکز در انتهای آزاد آن می‌باشد. نیروهای موردنظر آزمایش توسط یک مانومتر مکانیکی اندازه‌گیری میشود و سپس تنش آزمایش BO محاسبه میگردد. نمونه آزمایشی دارای قطر ۵۵ میلی متر و ارتفاع ۷۰ میلی متر می‌باشد. نمونه آزمایش در بتن به روش دریل کردن بتن سخت شده با استفاده از مته نمونه‌گیر در زمان آزمایش ایجاد میگردد. آزمایش BO به نسبت آزمایش‌های دیگر نیمه مخرب نسبتاً ساده‌تر انجام می‌شود، نتایج آن قابل تکرار بوده و به برنامه‌ریزی قبلی نیاز ندارد.

مطابق استاندارد ASTM [۲۱] برای آزمایش BO حداقل فاصله مرکز آزمایش از لبه خارجی مقطع ۱۵۰ میلی متر و حداقل ضخامت دال بتنی ۱۰۰ میلی متر می‌باشد، در نتیجه ابعاد نمونه‌های مکعبی آزمایش BO ۱۵۰×۳۰۰×۳۰۰ میلی متر انتخاب گردید. همچنین



شکل ۱. نحوه آزمایش Break-off

Fig. 1. Schematic diagram of a break-off test procedure

تا اینکه خروجی شبکه و هدف بر هم منطبق گردند. نرون ها اجزا اصلی شبکه های عصبی میباشند که اساساً از سه بخش وزن، بایاس و تابع انتقال تشکیل میشود. معمولاً مدل های شبکه عصبی از سه بخش اصلی لایه ورودی، لایه پنهان و لایه خروجی تشکیل شده است. هر نرون در لایه ورودی به نرون های لایه پنهان متصل می باشد و باید توجه شود که هیچ اتصالی بین نرون ها در یک لایه وجود ندارد. تعداد نرون ها در هر لایه به عوامل متعددی بستگی دارد.

۱-۵-۲- شبکه عصبی پیشخور^۱

در شبکه های عصبی پیشخور نرون ها در لایه هایی منظم شده اند و هر نرون به تمامی نرون های لایه بعدی اتصال دارد [۲۳]. نرون ها هیچ اتصالی با نرون های هم لایه و یا نرون های لایه های غیرمجاور ندارند. شبکه های پیشخور از یک لایه ورودی، یک و یا چند لایه

که در آن R مدول گسیختگی (MPa)، P حداکثر بار اعمال شده (N)، L طول دهانه (mm)، b عرض متوسط نمونه (mm) و d عمق متوسط نمونه (mm) است.

۵-۲- شبکه عصبی

شبکه های عصبی ابزارهای قدرتمندی هستند که از دانش کنونی ما راجع به شبکه های عصبی جانداران نشأت می گیرند. در شبکه های عصبی هدف آن است که با استفاده از تعداد زیادی عناصر محاسباتی ساده که با حجم زیادی از اتصالات به یکدیگر مربوط شده اند، کارایی و عملکرد مورد نظر بدست آید. شبکه های عصبی که از انواع پردازشگرهای موازی می باشند قابلیت های فراوانی در پردازش و طبقه بندی اطلاعات دارند. پس از آموزش شبکه عصبی، اعمال یک ورودی خاص به آن، منجر به دریافت پاسخی خاص میشود. شبکه عصبی بر مبنای تطابق و هم سنجی بین ورودی و هدف سازگار میشود

آمده است. با کاهش اندازه سنگدانه، سطح مخصوص افزایش مییابد و سهم ناحیه انتقال نیز افزایش مییابد، بنابراین مقاومت بتن توسط نواحی انتقال بزرگتری متأثر می‌گردد و این موضوع که ناشی از کاهش اندازه سنگدانه است میتواند منجر به پایینتر بودن مقاومت فشاری شود.

روند تغییرات مقاومت فشاری با حضور الیاف علی‌الخصوص در مقادیر مصرف بالاتر آن، در همه سنین و نیز برای مقادیر مختلف سیمان ثابت نیست. دلیل این اختلافات ناشی از عدم دقت در روش آزمایش، ماهیت غیر هموزن مصالح و مواد دانه‌ای بویژه در حضور مقادیر بیشتر الیاف فولادی باشد؛ چرا که به هیچ وجه نمی‌توان تضمینی در بوجود آمدن شرایط کاملاً مساوی از توزیع و جهت‌گیری مناسب الیاف در اختیار داشت.

نتایج وو و همکاران [۲۷] نشان داد که برای یک مقدار ثابت نسبت آب به سیمان مقاومت بتن در آزمایش فشاری با افزایش اندازه درشت دانه افزایش مییابد. آنها بیان کردند که این پدیده میتواند بواسطه درگیری فیزیکی سنگدانه توضیح داده شود. چرا که می‌تواند بر مقاومت فشاری و انرژی شکست بتن مشارکت کند و این عملکرد احتمالاً برای سنگدانه‌های بزرگتر قابل توجه است. همچنین نشان دادند که افزایش مقاومت شکل گرفته میتواند به بهبود اسکلت و ساختار بتن نسبت داده شود. در واقع با مقایسه بتن‌های حاوی نسبت سنگدانه به سیمان مشابه، اگر مقاومت معادل مدنظر باشد، بتن ساخته شده با سنگدانه‌های کوچکتر میبایست از سیمان بیشتری استفاده شود [۲۸].

همچنین میتوان نتیجه گرفت که مقادیر مقاومت فشاری به مقدار الیاف وابستگی زیادی دارد. با ارزیابی روند تغییرات مقاومت فشاری با سن، میتوان نتیجه گرفت که با افزایش نسبت حجمی الیاف بکار رفته، مقادیر مقاومت فشاری بدست آمده افزایش نشان می‌دهد. این رفتار برای مقادیر مختلف سیمان مشابه و همچنین برای سنگدانه‌های کوچکتر واضحتر است. به عنوان نمونه در عیار سیمان ۴۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، افزایش نسبت حجمی الیاف از صفر تا ۱٪، مقادیر فشاری برای سنگدانه ۱۲/۵ میلی‌متر در سن ۲۸ روز از ۳۲/۵ به ۴۰/۱ مگاپاسکال افزایش داشته و مقادیر متناظر برای سنگدانه ۲۵ میلی‌متر، به ترتیب ۴۴/۹ و ۴۶/۹ مگاپاسکال می‌باشد. به عبارت دیگر با افزایش نسبت حجمی الیاف از صفر تا ۱٪ مقادیر مقاومت

پنهان و یک لایه خروجی تشکیل شده‌اند. روش منطقی و جامعی برای بدست آوردن تعداد نرون‌ها و لایه‌های مورد نیاز هر مسأله وجود ندارد و برای آن باید براساس تجربه و آزمون و خطا عمل کرد [۲۴]. در این مطالعه از شبکه عصبی پیشخور با دو لایه پنهان استفاده شده است.

۲-۵-۲- الگوریتم Back propagation

Back propagation یکی از پرکاربردترین الگوریتمها برای آموزش شبکه عصبی مصنوعی می‌باشد. در این روش از روش کاهش شیب تابع خطا استفاده میشود که طی آن خطاها از لایه خروجی به سمت لایه ورودی پخش شده و وزنها به‌گونه‌ای اصلاح میشوند که خطا کمینه شود. بنابراین، فرآیند آموزش شامل اصلاح تدریجی وزنها در جهت کمینه کردن تابع خطا می‌باشد. این عمل تا زمانی که یکی از معیارهای توقف ارضا شود ادامه مییابد [۲۴، ۲۵].

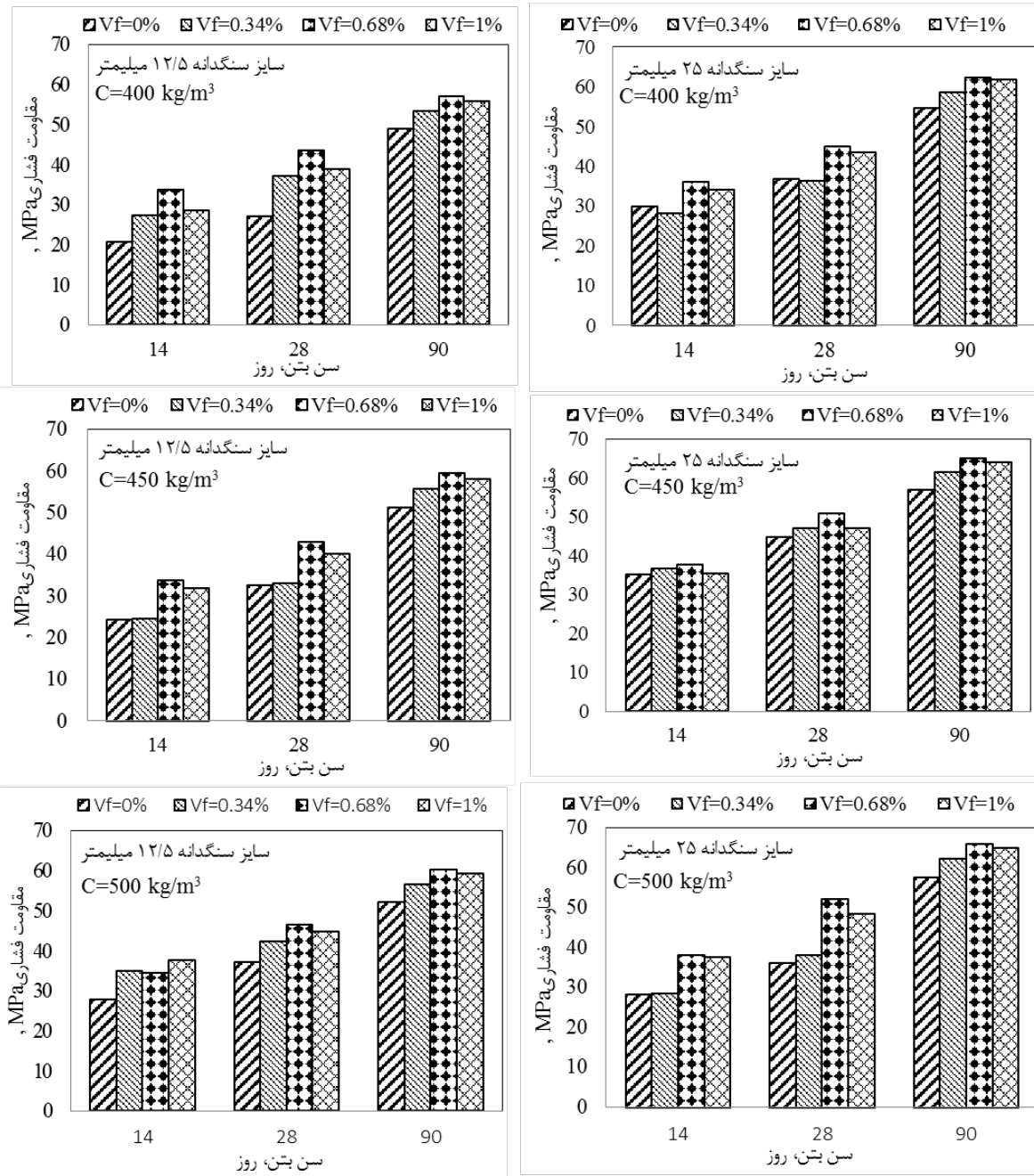
۳- نتایج و بحث

۳-۱- خواص مکانیکی اندازه‌گیری شده

مقاومت بتن عموماً به عنوان با ارزشترین خاصیت آن در طراحی سازه در نظر گرفته میشود، زیرا یک تصویر کلی از کیفیت بتن بدست می‌دهد، همچنین مقاومت با ساختار هیدراته شده سیمان رابطه مستقیم دارد.

در این قسمت، نتایج ارزیابی‌های انجام شده و تأثیر پارامترهای مؤثر بر نتایج آزمایش مقاومت فشاری شامل مشخصات بتن، مقدار سیمان، حداکثر اندازه سنگدانه و سن بتن و همچنین تأثیر الیاف فولادی ارائه گردیده است. تأثیر سن بتن بر تغییرات مقاومت فشاری برای نسبت‌های حجمی مختلف الیاف و با در نظر گرفتن اندازه-های ۱۲ و ۲۵ میلی‌متر سنگدانه در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین این تأثیر برای مقادیر مختلف سیمان در نظر گرفته شده است.

مشابه با نتایج نیک‌بین و همکاران [۲۶]، وو و همکاران [۲۷] مقاومت فشاری با افزایش اندازه سنگدانه افزایش می‌یابد. به عنوان مثال در عیار سیمان ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و نسبت حجمی الیاف ۰/۶۸٪ مقادیر مقاومت فشاری برای سنگدانه‌های ۱۲/۵ و ۲۵ میلی‌متر، به ترتیب ۴۳/۵ و ۴۵/۰ مگاپاسکال در سن ۲۸ روز بدست

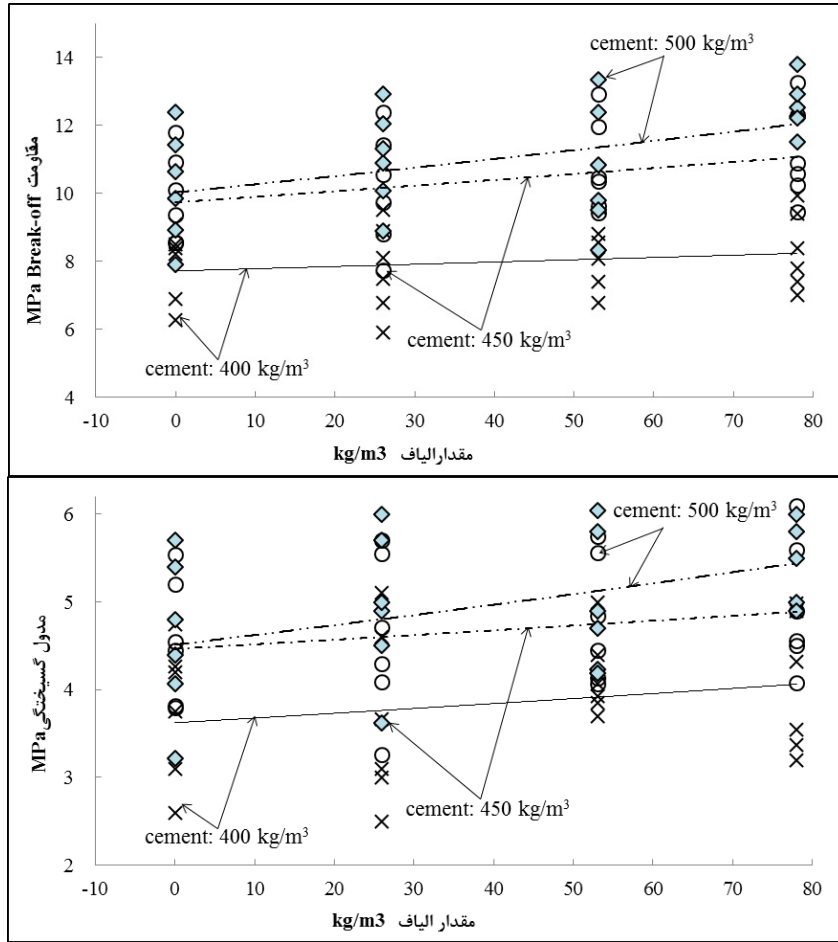


شکل ۲. تأثیر سن بتن بر تغییرات مقاومت فشاری برای نسبت های حجمی مختلف الیاف با اندازه های مختلف سنگدانه

Fig. 2. Variation of the Compressive strength versus concrete age with various fibre for different aggregates sizes

حجم الیاف مصرفی و نسبت ابعاد آن بر خصوصیات بتن پذیرفته شده است [۲۹، ۳۰]. در مطالعه های پیشین نسبت حجمی الیاف V_f و نسبت ابعاد آن l/d دو پارامتر مهم در ارزیابی عملکرد بتن حاوی الیاف فولادی بشمار آمده اند که بشدت نتایج مقاومت فشاری را تحت تأثیر قرار می دهد. شواهد متناقض قابل توجهی از تأثیر الیاف بر مقاومت

فشاری به ترتیب برای سنگدانه های ۱۲/۵ و ۲۵ میلی متر افزایشی برابر ۳۲/۳٪ و ۴/۵٪ را در این سن تجربه کرده اند. پارامتر شاخص تقویت کنندگی الیاف تغییرات مقاومت فشاری بتن های حاوی الیاف نسبت به بتن بدون الیاف را نشان می دهد. این فاکتور توسط محققین مختلفی برای تعیین اثر ترکیبی و همزمان



شکل ۳. تغییرات مقادیر مقاومت Break-off و مدول گسیختگی با مقدار الیاف برای عبارهای مختلف سیمان

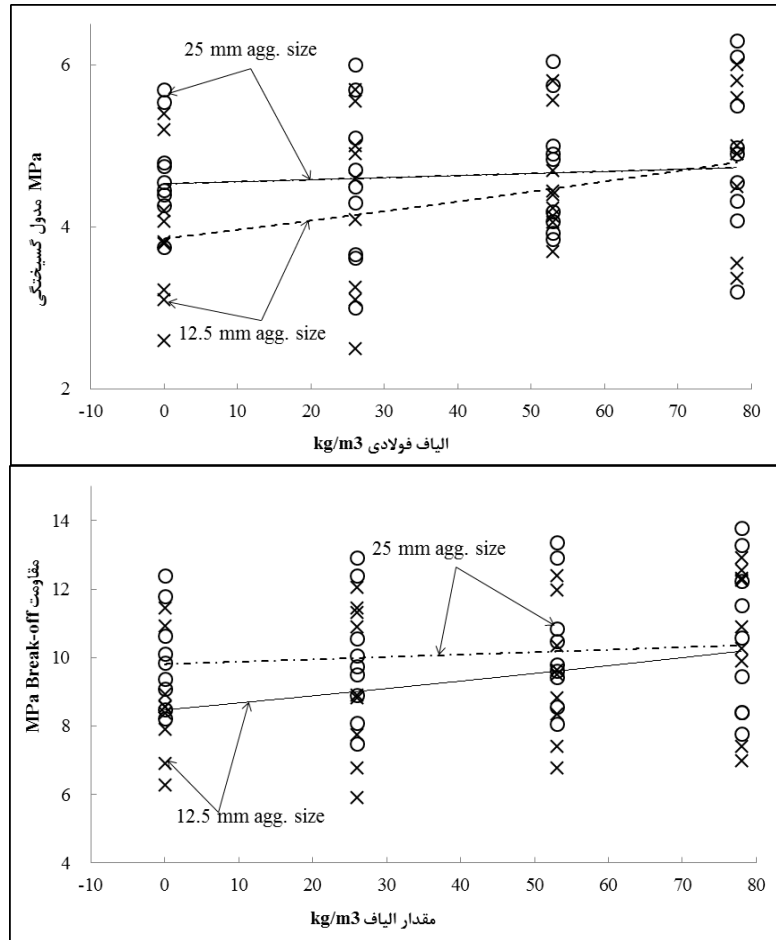
Fig. 3. Variation of Break-off and flexural strength values relative to fibers fraction for different cement contents

دلیل افزایش خلل و فرج ناشی از آن می‌تواند منجر به بروز آشفته‌گی و اغتشاش در ماتریس بتن هم شود. خلل و فرج می‌تواند به مثابه نقص و آسیب در جایی که ریزترک‌ها شروع می‌شوند، تلقی گردند. این موضوع ممکن است اینگونه توضیح داده شود که الیاف موازی با جهت بارگذاری می‌تواند همانند خلل و فرج عمل کند، همچنانکه حفرات اضافی نیز ممکن است با حضور الیاف به وجود آیند.

بنابراین تأثیر الیاف بر مقاومت فشاری را می‌توان تعادل دو وضعیت پل زدن الیاف روی ترک‌ها و افزایش خلل و فرج ایجاد شده توسط آنها در نظر گرفت [۳۴، ۳۵]. همچنین کاهش مقاومت می‌تواند ناشی از کاهش کارایی بتن در حضور درصد بالاتر الیاف باشد. به عبارت دیگر افزایش الیاف منجر به کاهش کارایی بتن شده که این موضوع کاهش تراکم بتن را به همراه دارد.

فشاری بازای یک فاکتور الیاف مشخص وجود دارد. مشابه تحقیقات گذشته یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که نسبت مقاومتها با افزایش مقدار شاخص تقویت الیاف بهبود می‌یابد [۳۱-۳۴].

عمل مسلح‌کنندگی که توسط الیاف فراهم می‌شود را می‌توان از هر دو جنبه میکرو و ماکرو بررسی نمود. در مقیاس میکرو، الیاف از گسترش ریزترک‌ها جلوگیری می‌کند که منجر به افزایش مقاومت فشاری می‌گردد. در مقیاس ماکرو، افزایش الیاف قابلیت جذب انرژی را به همراه دارد؛ در واقع هدف اصلی و اولیه افزودن الیاف بهبود قابلیت و ظرفیت جذب انرژی بعد از ترک محسوب می‌شود. توانایی الیاف در کنترل رشد ریزترک‌ها به تعداد الیاف، شکل‌پذیری و چسبندگی با ماتریس مرتبط است. گرچه به نظر می‌رسد تعداد بیشتر الیاف احتمالاً در محدود کردن ریزترک‌ها مؤثرتر باشد؛ اما از سویی افزودن الیاف به



شکل ۴. تغییرات مقادیر مقاومت Break-off و مدول گسیختگی با مقدار الیاف برای دو اندازه سنگدانه مختلف
 Fig. 4. break-off and flexural strength versus fibers fraction for two aggregates sizes

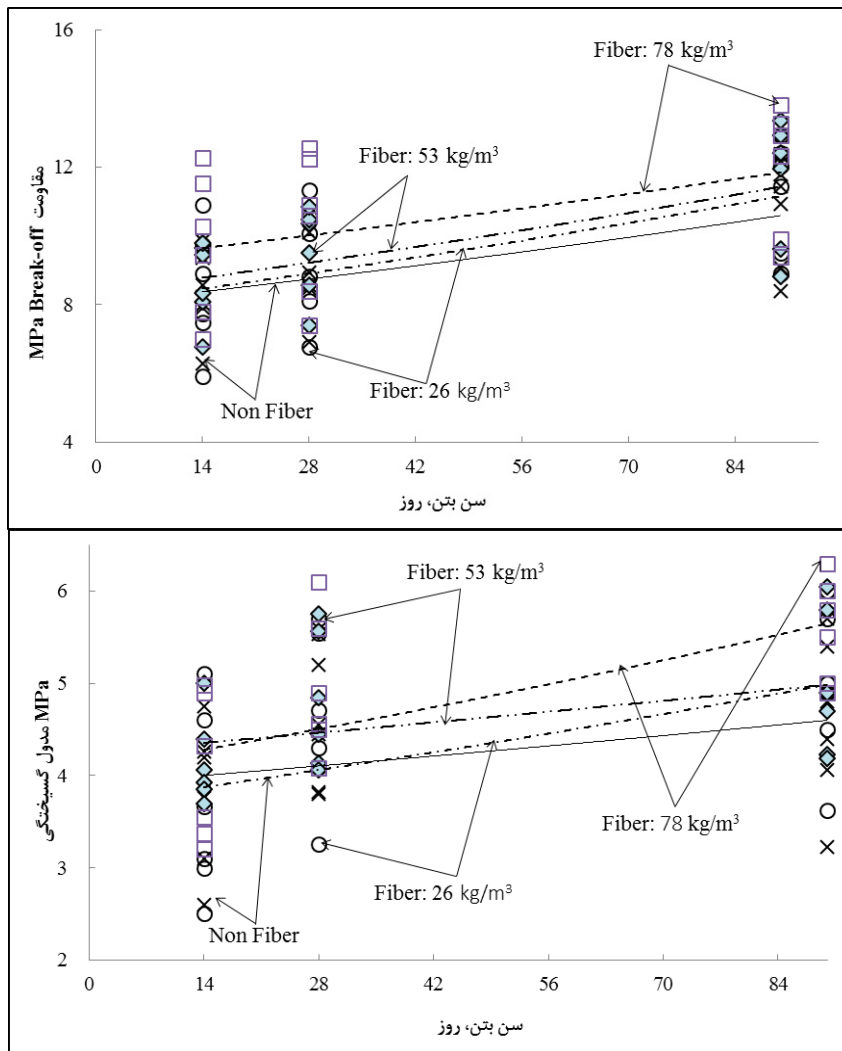
خسارت کمتری به پیوستگی بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها وارد می‌شود و تغییرات حرارتی ناشی از حرارت هیدراتاسیون کمتر خواهد بود [۳۳].

در شکل ۴ رفتار کلی مقاومت Break-off و مدول گسیختگی با مقدار الیاف فولادی برای دو اندازه حداکثر سنگدانه ۲۵ و ۱۲/۵ میلی‌متر، صرفنظر از سن بتن و مقدار سیمان داده شده است. به طور کلی میتوان بیان نمود که مقادیر مقاومت Break-off و مدول گسیختگی برای سنگدانه بزرگتر، بیشتر می‌باشد. همچنین براساس نتایج بدست آمده، مقدار متوسط مقاومت Break-off و مدول گسیختگی برای بتن‌های بدون الیاف با سنگدانه ۲۵ میلی‌متر، به ترتیب ۱۵٪ و ۴٪ بزرگتر از بتن‌های بدون الیاف حاوی سنگدانه ۱۲/۵ میلی‌متر می‌باشد. این مقدار برای بتن حاوی ۱٪ الیاف فولادی به ترتیب فقط ۱٪ و ۷٪ بزرگتر می‌باشد. شایان ذکر است پراکندگی زیاد

۳-۲- نتایج آزمایش Break-off و مدول گسیختگی

در شکل ۳ رفتار کلی مقاومت Break-off و مدول گسیختگی با مقدار الیاف فولادی برای مقادیر مختلف سیمان ۴۵۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب صرفنظر از سن بتن، اندازه سنگدانه نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که مقادیر متوسط مقاومت Break-off و مدول گسیختگی با افزایش مقدار سیمان افزایش می‌یابد.

شایان ذکر است پراکندگی زیاد نتایج شکل ۳ مربوط به نادیده گرفتن تأثیر سن بتن و اندازه سنگدانه است. همچنین توزیع و جهت‌گیری الیاف فولادی نیز تأثیر زیادی بر نتایج دارد. نویل اعتقاد دارد هرچه مقدار سنگدانه بیشتر شود، آب بیشتری جذب خواهد شد و لذا تأثیر نسبت آب مؤثر به سیمان کاهش می‌یابد. در نتیجه هرچه مقدار سنگدانه‌ها بیشتر شود، جمع‌شدگی و آب انداختن کمتر می‌گردد و



شکل ۵. تغییرات مقادیر مقاومت Break-off و مدول گسیختگی با سن بتن برای مقادیر مختلف الیاف
 Fig. 5. variations of break-off and flexural strength versus concrete age and fibre fractions

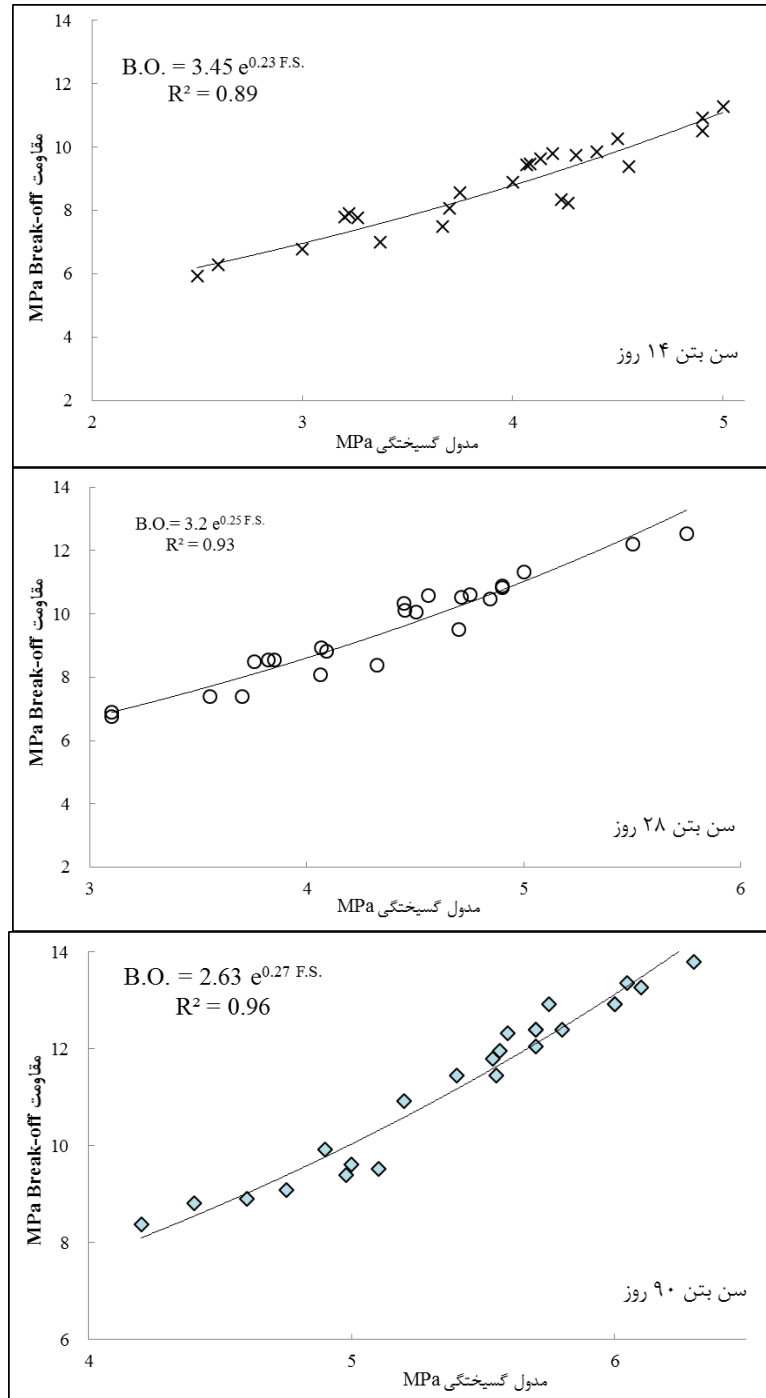
و در نتیجه باعث افزایش مقاومت خمشی میشود. همچنین شکل الیاف قلاب دار استفاده شده در بهبود چسبندگی ماتریس و الیاف و نیز به عنوان عامل مهم و مؤثر در افزایش مقاومت خمشی مورد توجه می باشد.

می توان بیان نمود که مقادیر مقاومت Break-off و مدول گسیختگی بتن های بدون الیاف فولادی نسبت به بتن دارای مقادیر بیشتر الیاف فولادی کمتر باشد. در ضمن با توجه به اختلاف مشخص منحنی های کالیبراسیون بدلیل حضور الیاف فولادی، به نظر میرسد می بایست از منحنیهای کالیبراسیون مختص هر بتن استفاده نمود. همانطور که پیشتر بحث شد، مزیت وجود الیاف در بتن ناشی از مکانیزم مسلح کنندگی و تقویت کنندگی الیاف است، چرا که انرژی

نتایج ناشی از نادیده گرفتن اثرات سن بتن، مقدار سیمان و مقادیر متفاوت الیاف می باشد.

تأثیر سن بتن بر رفتار کلی تغییرات مقاومت های Break-off و مدول گسیختگی با مقدار الیاف فولادی صرفنظر از مقدار حداکثر سنگدانه و مقدار سیمان در شکل ۵ نشان داده شده است. با مقایسه نتایج آزمایش مشاهده میشود که افزایش نسبت مقاومت مدول گسیختگی بتن های حاوی الیاف نسبت به بتن بدون الیاف با افزایش سن بتن مشخصتر میشود.

افزایش مقاومت Break-off و مدول گسیختگی در نتیجه افزودن الیاف و مشارکت آنها قطعاً به مکانیزم عملکرد الیاف مربوط است. الیاف مانع گسترش و توسعه ریز ترک های داخلی بتن می گردد



شکل ۶. مقایسه منحنیهای کالیبراسیون مقاومت آزمایش Break-off و مدول گسیختگی برای سنین مختلف
 Fig. 6. comparison of calibration curves for break-off and flexural strength at different ages

به اعتقاد نویسندگان، با توجه به پیچیده شدن موضوع و حضور پارامترهای مختلف تأثیرگذار، استفاده از روابط ساده آماری به تنهایی چندان رضایت بخش نیست و استفاده از مدل شبکه عصبی دقت بالاتر و مناسب تری دارند [۳۶، ۳۷].

قابلیتوجهی در فرآیند بیرون کشیدگی آنها پراکنده و تلف می‌شود. در شکل ۶ منحنی کالیبراسیون نتایج آزمایش Break-off و مدول گسیختگی نسبت یکدیگر در سنین مختلف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش سن همبستگی نتایج افزایش مییابد.

جدول ۲. ارزیابی آماری مدل شبکه عصبی

Table 2. statistical evaluation of predection models

| ANN | R^2_{adj} | RMSE | MAPE | VAF(%) |
|-------------------|-------------|------|------|--------|
| Break-off | 0.920 | 3.37 | 6.64 | 92 |
| Flexural strength | 0.907 | 3.19 | 6.47 | 93 |

۳-۳-۳- مدلسازی عددی

به دلیل نبود یک رابطه تئوری دقیق مابین ارتباط نتایج Break-off و مقاومت فشاری بتن حاوی الیاف فولادی، ناشی از عوامل تأثیرگذار متعدد بر نتایج و ماهیت غیرممکن بتن، مدل شبکه عصبی در تبیین این آزمایش با در نظر داشتن خصوصیات مختلف صورت گرفته است. زمانی که تعداد زیادی از متغیرهای مستقل ورودی وجود دارد، می بایست بهترین ترکیب از آنها در پیش بینی خروجی به کار گرفته شود. با توجه به نتایج آزمایشگاهی صورت گرفته میتوان انتظار داشت که مقاومت فشاری بتن (f_c) با مقدار سیمان (C)، مقدار الیاف فولادی (F)، حداکثر اندازه سنگدانه (da)، مقاومت Break-off (fb)، سنین آزمایش (T) به عنوان متغیرهای مستقل ورودی مدل شبکه عصبی مرتبط باشد.

۳-۳-۱- مدل شبکه عصبی بکار گرفته شده

در این مطالعه، شبکه عصبی پیشخور با الگوریتم Back propagation با دو لایه نرون در لایه پنهان استفاده گردید. تابع انتقال لایه پنهان log-sigmoid و لایه خروجی purelin در نظر گرفته شد. تعداد نرون ها پس از فرآیند آزمون و خطا به دست آمد. جهت پرهیز از پدیده بیش برآزش^۱، از استراتژی Early learning استفاده گردید و ۱۵٪ داده ها بصورت داده های صحت سنجی^۲ در نظر گرفته شد.

۳-۳-۲- ارزیابی عملکرد مدل شبکه عصبی

ارزیابی عملکرد مدل بخش مهمی از تحلیل به حساب می آید. بطور کلی ضریب تعیین چند متغیره R^2 بین مقادیر واقعی اندازه گیری شده و مقادیر پیش بینی شاخص خوبی برای کنترل عملکرد پیش بینی مدل می باشد. مقادیر بالاتر R^2 به معنای همبستگی بهتر و بیشتر

- 1 Over Fitting
- 2 Validation

نتایج پیش بینی مدل با نتایج آزمایشگاهی است. وقتی متغیر جدیدی به مدل اضافه می شود R^2 افزایش می یابد. بنابراین شاخص R^2 باید تعدیل شود. R^2_{adj} به عنوان ضریب تعیین تعدیل یافته^۳، تحلیلگری را که متغیر غیر ضروری وارد مدل می کند، جریمه می کند و در صورت اضافه شدن عبارات غیر ضروری به مدل کاهش می یابد. علاوه بر شاخص R^2_{adj} ، برای مقایسه عملکرد پیش بینی مدل های استخراج شده، مطابق روابط (۲) الی (۵) از شاخص های جذر میانگین مربعات خطی^۴ (RMSE)، مقدار اعتبار^۵ (VAF) و متوسط قدرمطلق خطاهای نسبی^۶ (MAPE) استفاده شده است.

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{n-1}{n-p} \times (1 - R^2) \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y - y')^2} \quad (3)$$

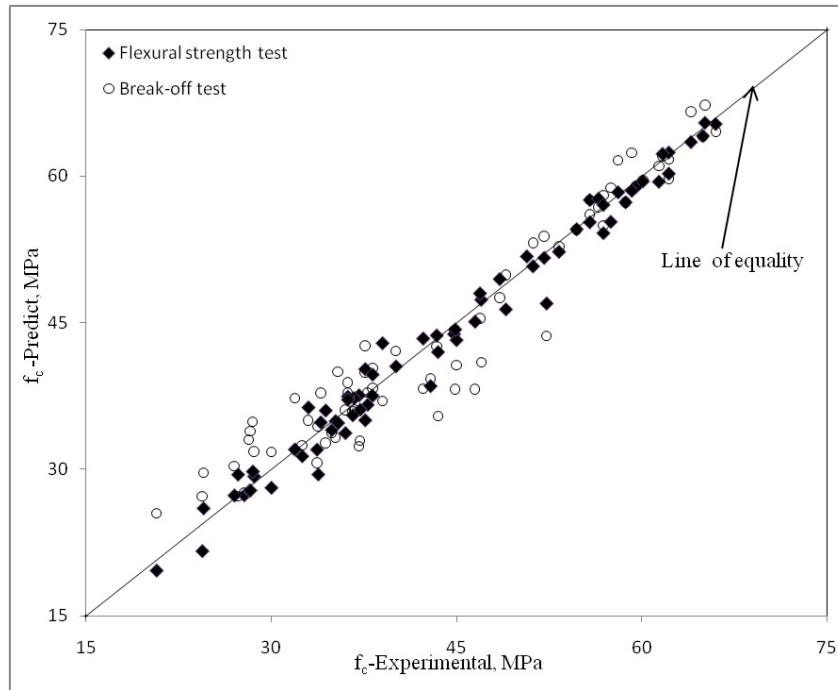
$$VAF = \left[1 - \frac{\text{var}(y - y')}{\text{var}(y)} \right] \times 100 \quad (4)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y - y'}{y} \right| \times 100 \quad (5)$$

در روابط فوق y ، y' ، p و n به ترتیب بیانگر مقدار مشاهده شده، مقدار پیش بینی، تعداد پارامترهای مدل و تعداد نمونه ها می باشد. در جدول ۲ مقادیر محاسبه شده این شاخص ها برای نشان داده شده است. براساس این جدول، دقت مدل های ارائه شده به نوعی تأیید می شود، چرا که حدود ۸۰٪ تغییرات متغیر پاسخ با مدل های برازش شده می تواند بیان شود.

جدول ۲ مقادیر محاسبه شده این شاخصها برای نشان داده شده است. براساس این جدول، دقت مدل های ارائه شده به نوعی تأیید میشود، چرا که حدود ۸۰٪ تغییرات متغیر پاسخ با مدل های برازش

- 3 Adjusted
- 4 Root Mean Square Error
- 5 Values Account For
- 6 Mean Absolute Percentage Error



شکل ۷. مقایسه نتایج آزمایشگاهی با مقادیر پیشبینی

Fig. 7. comparisons of prediction results (model results) and the real values

شده می‌تواند بیان شود.

در شکل ۷ عملکرد بسیار مناسب مدل شبکه عصبی نشان داده شده است. این شکل توانایی پیش‌بینی بالای مدل شبکه عصبی را ثابت میکند. قابل ذکر است که این موضوع با در نظر داشتن اینکه ۷۰٪ از داده‌ها در تشکیل مدل عصبی نقش داشته‌اند، برجسته‌تر می‌گردد. همانطور که در شکل مشهود است، مقادیر واقعی و پیش‌بینی مقاومت فشاری در نزدیکی خط برابری^۱ متراکم شده‌اند.

با استفاده از مدل شبکه عصبی می‌توان مقاومت بتن را در سن دلخواه و بدون صرف وقت زیاد، محاسبه کرد که این امر کمک بسیاری در صرفه‌جویی در زمان و هزینه به مهندسين سازه می‌کند. علاوه بر این، استفاده از مدل شبکه عصبی در پیش‌بینی مقاومت، استفاده از مواد خام طبیعی را کاهش می‌دهد و به کاربر کمک می‌کند طرح خود را در راستای توسعه پایدار قوت بخشد. استفاده از مدل‌های پیش‌بینی کننده می‌تواند به اعتبارسنجی طرح‌های اختلاطی که توسط نرم‌افزار طراحی شده‌اند کمک کند

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله آزمایش‌های Break-off و مدول گسیختگی مورد

بررسی قرار گرفت. لذا جنبه‌های مختلف آزمایش مورد ارزیابی واقع گردید و نتایج زیر حاصل شد.

۱- بطور کلی، برای نسبت آب به سیمان ثابت، مقادیر میانگین مقاومت Break-off و مدول گسیختگی با افزایش عیار سیمان افزایش می‌یابد.

۲- همچنین اندازه بیشینه سنگدانه در دو محدوده ۱۲/۵ میلی‌متر و ۲۵ میلی‌متر مورد بررسی نشان می‌دهد که مقادیر مقاومت Break-off و مدول گسیختگی برای سنگدانه بزرگتر، بیشتر می‌باشد. این مقدار برای آزمایش Break-off در بتن فاقد الیاف فولادی تأثیر مشهودتری نسبت به بتن حاوی الیاف فولادی دارد؛ به طوری که در بتن حاوی ۱٪ الیاف فولادی با سنگدانه ۲۵ میلی‌متر فقط یک درصد بیشتر از مقدار نظیر آن برای بتن با سنگدانه ۱۲/۵ میلی‌متر می‌باشد.

۳- روند کلی بهبود مقاومت Break-off و مدول گسیختگی با سن، مشابه بتن‌های مختلف می‌باشد. همچنین، افزایش نسبت مقاومت هر دو آزمایش در بتن حاوی الیاف فولادی نسبت به مقدار نظیر برای بتن فاقد الیاف با افزایش سن بتن، مشاهده می‌شود.

۴- ضریب تغییرات مقاومت Break-off در این تحقیق در محدوده ۴٪ الی ۱۱٪ به دست آمده است. نتایج ارزیابیها حاکی از آن

1 Line of equality

- specialized use of the break-off concrete strength testing method, Special Publication, 82 (1984) 293-308.
- [6] M. Carlsson, I. Eeg, P. Jahren, Field experience in the use of the "break-off tester", Special Publication, 82 (1984) 277-292.
- [7] M.G. Barker, J.A. Ramirez, Determination of concrete strengths with break-off tester, Materials Journal, 85(4) (1988) 221-228.
- [8] T. Naik, Z. Salameh, A. Hassaballah, Evaluation of In-Place Strength of Concrete By The Break-Off Method, in: Proceedings of the NDT&E for Manufacturing and Construction Conference, University of Illinois, Urbana-Champaign, IL, 1988.
- [9] Y. Lin, Y.-F. Lin, C. Hsiao, Evaluation of bond quality at the interface between steel bar and concrete using the small-dimension break-off test, Materials and Structures, 43(5) (2010) 583-595.
- [10] R. Madandoust, M. Kazemi, Numerical analysis of break-off test method on concrete, Construction and Building Materials, 151 (2017) 487-493.
- [11] D.A. Abrams, Flexural strength of plain concrete, Structural Materials Research Laboratory, 1922.
- [12] F. Legeron, P. Paultre, Prediction of modulus of rupture of concrete, Materials Journal, 97(2) (2000) 193-200.
- [13] Z.P. Bazant, D. Novak, Proposal for standard test of modulus of rupture of concrete with its size dependence, ACI Materials Journal, 98(1) (2001) 79-87.
- [14] V.C. Li, Large volume, high-performance applications of fibers in civil engineering, Journal of Applied Polymer Science, 83(3) (2002) 660-686.
- [15] A.C. Aydin, Self compactability of high volume hybrid fiber reinforced concrete, Construction and Building Materials, 21(6) (2007) 1149-1154.
- [16] Z. Xu, H. Hao, H. Li, Mesoscale modelling of fibre reinforced concrete material under compressive impact loading, Construction and Building Materials, 26(1) (2012) 274-288.

است که قابلیت اعتماد این روش در ارزیابی مقاومت مناسب می باشد، گرچه کاربرد قابل قبولی برای تخمین مقاومت بتن براساس یک منحنی کالیبراسیون کلی و عمومی وجود ندارد. فاکتورهای تأثیرگذار بر کالیبراسیون متعدّدند. بنابراین حتی در شرایط آزمایشگاهی مطلوب و با استفاده از منحنی کالیبراسیون معتبر بعید است که در محدوده اطمینان ۹۵٪ به دقتی بهتر از $\pm 15\%$ در تخمین مقاومت فشاری بتن دست یافت.

۵- مقادیر بالاتر ضریب تغییرات ممکن است ناشی از ناهمگنی ذاتی بتن بویژه در حضور الیاف فولادی باشد، زیرا تضمین شرایط توزیع همگن و قرارگیری مناسب جهت الیاف در مخلوط بتن عملاً غیرممکن است.

۶- بررسی نتایج نشان می دهد که آزمایش Break-off می تواند جایگزین مناسبی برای آزمایش مدول گسیختگی باشد. چراکه آزمایش Break-off نیاز به برنامه ریزی قبلی نداشته و به سادگی انجام شده و نتایج آن تکرار پذیر می باشد.

۷- مدل شبکه عصبی ارائه شده در این مطالعه از دو لایه نرون در لایه پنهان تشکیل شده است. خطای شبکه ارائه شده برای RMSE در آزمایش Break-off و مدول گسیختگی به ترتیب برابر $3/37$ و $3/19$ و برای MAPE به ترتیب برابر $0/0664$ و $0/0647$ درصد می باشد.

۸- ضریب همبستگی $0/92$ و $0/907$ برای کل داده ها نشان می دهد که مدل شبکه عصبی عملکرد مناسبی در پیش بینی داده ها داشته است.

مراجع

- [1] M. Wilson, S. Kosmatka, Design and control of concrete mixtures, High-Performance Concrete, 15 (2011) 299.
- [2] J.H. Bungey, M.G. Grantham, Testing of concrete in structures, Crc Press, 2014.
- [3] A. Long, A.M. Murray, The "Pul l-Off" Partially Destructive Test for Concrete, Special Publication, 82 (1984) 327-350.
- [4] A.M. Neville, Properties of concrete, Longman London, 1995.
- [5] E. Dahl-Jorgensen, R. Johansen, General and

- aggregate size and cement paste volume on concrete behavior under high triaxial compression loading, *Construction and Building Materials*, 25(10) (2011) 3941-3949.
- [28] A. El-Dieb, M.R. Taha, Flow characteristics and acceptance criteria of fiber-reinforced self-compacted concrete (FR-SCC), *Construction and Building Materials*, 27(1) (2012) 585-596.
- [29] R. Madandoust, M.M. Ranjbar, R. Ghavidel, S. Fatemeh Shahabi, Assessment of factors influencing mechanical properties of steel fiber reinforced self-compacting concrete, *Materials & Design*, 83 (2015) 284-294.
- [30] F. Aslani, S. Nejadi, Self-compacting concrete incorporating steel and polypropylene fibers: Compressive and tensile strengths, moduli of elasticity and rupture, compressive stress-strain curve, and energy dissipated under compression, *Composites Part B: Engineering*, 53 (2013) 121-133.
- [31] E. Güneysi, M. Gesoğlu, A.O.M. Akoi, K. Mermerdaş, Combined effect of steel fiber and metakaolin incorporation on mechanical properties of concrete, *Composites Part B: Engineering*, 56 (2014) 83-91.
- [32] A. Al-Ameeri, The Effect of Steel Fiber on Some Mechanical Properties of Self Compacting Concrete, 2013.
- [33] R. Ghavidel, R. Madandoust, M.M. Ranjbar, Reliability of pull-off test for steel fiber reinforced self-compacting concrete, *Measurement*, 73 (2015) 628-639.
- [34] L. Martinie, N. Roussel, Simple tools for fiber orientation prediction in industrial practice, *Cement and Concrete Research*, 41(10) (2011) 993-1000.
- [35] R. Zerbino, J.M. Tobes, M.E. Bossio, G. Giaccio, On the orientation of fibres in structural members fabricated with self compacting fibre reinforced concrete, *Cement and Concrete Composites*, 34(2) (2012) 191-200.
- [36] R. Madandoust, R. Ghavidel, N. Nariman-zadeh, Evolutionary design of generalized GMDH-type
- [17] G. Khalaj, A. Nazari, Modeling split tensile strength of high strength self compacting concrete incorporating randomly oriented steel fibers and SiO₂ nanoparticles, *Composites Part B: Engineering*, 43(4) (2012) 1887-1892.
- [18] B. Luccioni, G. Ruano, F. Isla, R. Zerbino, G. Giaccio, A simple approach to model SFRC, *Construction and Building Materials*, 37 (2012) 111-124.
- [19] Z. Xu, H. Hao, H. Li, Mesoscale modelling of dynamic tensile behaviour of fibre reinforced concrete with spiral fibres, *Cement and Concrete Research*, 42(11) (2012) 1475-1493.
- [20] B.S. Institution, Specification for aggregates from natural sources for concrete, British Standards Institution London, 1992.
- [21] C. ASTM, 1150: 1990. Standard Test Method for the Break-Off Number of Concrete, Annual Book of ASTM Standards, 4.
- [22] ASTM, C78 / C78M-16 : Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), in, ASTM International, 2016.
- [23] B.B. Adhikary, H. Mutsuyoshi, Prediction of shear strength of steel fiber RC beams using neural networks, *Construction and Building Materials*, 20(9) (2006) 801-811.
- [24] A. Mukherjee, S.N. Biswas, Artificial neural networks in prediction of mechanical behavior of concrete at high temperature, *Nuclear engineering and design*, 178(1) (1997) 1-11.
- [25] R. Ince, Prediction of fracture parameters of concrete by artificial neural networks, *Engineering Fracture Mechanics*, 71(15) (2004) 2143-2159.
- [26] I. Nikbin, M. Beygi, M. Kazemi, J.V. Amiri, E. Rahmani, S. Rabbanifar, M. Eslami, A comprehensive investigation into the effect of aging and coarse aggregate size and volume on mechanical properties of self-compacting concrete, *Materials & Design*, 59 (2014) 199-210.
- [27] X.H. Vu, L. Daudeville, Y. Malecot, Effect of coarse

of the concrete compressive strength by means of core testing using GMDH-type neural network and ANFIS models, Computational Materials Science, 51(1) (2012) 261-272.

neural network for prediction of concrete compressive strength using UPV, Computational Materials Science, 49(3) (2010) 556-567.
[37] R. Madandoust, J.H. Bungey, R. Ghavidel, Prediction

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S.H. Ghasemzadeh Mosavinejad, B.G. Khosravi, J. Razzaghi, Comparison of Break-off and Flexural Strength Test Results for Determining Strength of SFRC Using Neural Network Model, Amirkabir J. Civil Eng., 52(3) (2020) 565-580.

DOI: [10.22060/ceej.2019.14724.5727](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.14724.5727)

