

به کارگیری روش شبکه عصبی در تخمین مقاومت فشاری بتن حاوی الیاف فولادی با استفاده از آزمایش break-off

بنیامین گنجه خسروی^۱، سید حسین قاسم‌زاده موسوی نژاد^{۲*}، جواد رزاقی لنگرودی^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۲- استادیار، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۳- استادیار، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

چکیده

در این مقاله آزمایش نیمه مخرب break-off برای ارزیابی مقاومت بتن حاوی الیاف فولادی در محل مورد بررسی قرار گرفته است. در سال‌های اخیر، استفاده از مقادیر کم الیاف فولادی، به عنوان یکی از راه‌حل‌های مناسب مقابله با مشکل شکست ناگهانی بتن توسعه یافته است. جهت فراهم کردن یک پایگاه آماری کامل و جامع، ۲۴ طرح اختلاط با مقادیر مختلف عیار سیمان ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، با نسبت آب به سیمان ثابت ۰/۴، حداکثر اندازه سنگدانه ۱۲/۵ و ۲۵ میلی‌متر و الیاف فولادی با نسبت‌های حجمی ۰/۳۳، ۰/۶۷ و ۱ درصد انتخاب گردید. سپس، عوامل تأثیرگذار بر خصوصیات بتن حاوی الیاف فولادی و همچنین نتایج آزمایش Break-off مورد ارزیابی قرار گرفته است. بررسی نتایج آزمایشگاهی حاکی از آن است که درصد و مشخصات الیاف فولادی بکار رفته در بتن، نتایج آزمایش Break-off را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین، در این مقاله جهت پیش‌بینی مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در سنین مختلف از مدل‌سازی عددی شبکه عصبی استفاده شده است. شبکه‌های عصبی مصنوعی قابلیت آموزش دیدن را از روی نمونه‌های موجود و تعمیم دادن رفتار را به خوبی دارا می‌باشند. این مسئله، شبکه‌های عصبی را به یک ابزار قوی جهت مدل کردن مکانیزم‌های پیچیده علوم مهندسی تبدیل می‌کند. شاخص‌های مختلف آماری برای مقایسه عملکرد مدل در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل شبکه عصبی عملکرد مطلوبی در پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن دارد.

کلمات کلیدی: آزمایش break-off، آزمایش نیمه مخرب، مقاومت بتن، الیاف فولادی، شبکه عصبی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2017.86365.1194	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.86365.1194	۱۳۹۷/۱۰/۳۰	۱۳۹۶/۰۸/۱۹	۱۳۹۶/۰۸/۱۹	۱۳۹۶/۰۸/۱۲	۱۳۹۶/۰۲/۲۸
سید حسین قاسم‌زاده موسوی نژاد					*نویسنده مسئول:	
h.mosavi@guilan.ac.ir					پست الکترونیکی:	

Evaluation of neural network model for compressive strength of the steel fiber reinforced concrete using break-off method

Benyamin Ganjeh Khosravi¹, S.H Ghasemzadeh Mosavinejad^{2*}, Javad Razzaghi³

1- PhD. Student, Civil Engineering, Faculty of Civil, Engineering, Guilan University, Rasht, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Guilan University, Rasht, Iran

3- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Guilan University, Rasht, Iran

ABSTRACT

In the present paper break-off test as a partially-destructive method is used for durability evaluation of steel fiber reinforced concrete. In recent years, utilizations of steel fibers have been known as an appropriate solution method for sudden fracture of concrete. In order to provide a comprehensive statistical database, 24 mixtures are designed with various cement content (400, 450, and 500 Kg/m³), maximum aggregate size (12.5, 25 mm), steel fibre volume fractions (0, 0.33, 0.67, 1 %), and the constant water/cement ratio of 0.4 for all mixtures. Hence, influencing factors of steel fiber reinforced concrete characteristics and break-off test results are evaluated. The investigations show that the volume fraction of steel fibers and its features significantly affect the results of break-off test. Furthermore, in this study conventional numerical neural networks are developed for predicting the compressive strength of concrete with various mixtures and ages. ANN is sophisticatedly capable of being trained from the existent data and extending their behavior on a new dataset. This ability introduced ANN as an apt tool for modeling the complex mechanisms and systems in engineering applications. Statistical indices are used to compare the efficiency and accuracy of models. The result of this study has confirmed the accuracy of artificial neural network models in determination of the compressive strength of concrete.

ARTICLE INFO

Received: 18/05/2017

Revised: 03/11/2017

Accepted: 10/11/2017

Keywords:

*Break-off Test,
Concrete strength,
steel fiber,
partially-destructive test,
artificial neural network*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2017.86365.1194

*Corresponding author: S.H Ghasemzadeh Mosavinejad

Email address: h.mosavi@guilan.ac.ir

۱- مقدمه

متداول ترین روش برای تعیین مقاومت بتن تهیه نمونه‌های مکعبی یا استوانه‌ای استاندارد می‌باشد که به صورت ایده‌آل متراکم و عمل‌آوری شده‌اند و نتیجه آن مستقیماً به‌عنوان مقاومت بتن استفاده می‌شود [۱،۲]. این نمونه‌ها معمولاً در سنین ۷ و ۲۸ روز آزمایش می‌شوند، لذا آگاهی یافتن از مشکلات بتن دارای تأخیر بوده و امکان تکرار آزمایش نیز وجود ندارد [۲]. از طرفی عواملی چون نوع و اندازه نمونه، شرایط عمل‌آوری، تراکم، تصادفی بودن نوع و مقدار مصالح مصرفی در اختلاط بتن از جمله عواملی است که بر اساس آن می‌توان ادعا نمود نمونه‌های استاندارد به‌طور کامل معرف مشخصات و خصوصیات واقعی بتن بکار رفته نیستند. عوامل ذکر شده ضرورت ارزیابی مقاومت بتن در محل را نشان می‌دهد و بدین منظور روش‌های مختلفی ابداع شده‌اند که به دو گروه عمده غیر مخرب و نیمه مخرب تقسیم می‌شوند. در روش‌های غیر مخرب هیچ‌گونه آسیب سازه‌ای به عضو مورد بررسی وارد نمی‌شود، پایین بودن زمان آزمایش و سهولت انجام آن مهم‌ترین دلایل استفاده از این روش می‌باشد. از طرفی اساسی‌ترین نقص روش‌های غیر مخرب این است که ارتباط فیزیکی معناداری بین پارامتر سنجیده شده و مقاومت بتن وجود ندارد [۲]. لذا استفاده از این تکنیک‌ها در ارزیابی خواص بتن در مقایسه با سایر روش‌ها با خطای زیادی همراه است.

آزمایش‌های نیمه مخرب با خسارت جزئی بر عضو همراه می‌باشند. در این آزمایش‌ها با توجه به اینکه پارامتری که اندازه‌گیری می‌شود با مقاومت بتن مرتبط می‌باشد از قابلیت اعتماد بالاتری نسبت به روش‌های غیر مخرب برخوردار است. انتخاب هر یک از این روش‌ها به عواملی چون هزینه، قابلیت دسترسی، سرعت و قابلیت اعتماد به نتایج بستگی دارد. در جدول ۱ روش‌های متداول و قابلیت آن‌ها در ارزیابی مقاومت بتن مقایسه شده‌اند [۱].

جدول ۱: مقایسه آزمایش‌های نیمه مخرب و غیر مخرب ارزیابی مقاومت بتن [۱]

روش آزمایش	هزینه	سرعت آزمایش	میزان آسیب وارده	خصوصیت	قابلیت اعتماد
مغزه گیری	بالا	کند	متوسط	متوسط	خوب
Pull-out	متوسط	سریع	کم	فقط نزدیک سطح	متوسط
مقاومت نفوذ	متوسط	سریع	کم	فقط نزدیک سطح	متوسط
Pull-off	متوسط	متوسط	کم	فقط نزدیک سطح	متوسط
Break-off	متوسط	متوسط	کم	فقط نزدیک سطح	متوسط
گسیختگی داخلی	پائین	کند	کم	فقط نزدیک سطح	متوسط
ارزیابی اولتراسونیک	پائین	کند	اصلاً	خوب	ضعیف
سختی سطح بتن	بسیار پائین	بسیار کند	غیرمحمول	روی سطح	ضعیف

جدول ۲ حداقل تعداد تست‌های مورد نیاز هر آزمایش را جهت دستیابی به نتایج مطلوب را نشان می‌دهد. دقت در پیش‌بینی مقاومت در بیشتر نمونه‌ها به دقت و قابلیت اطمینان آزمایش بستگی دارد. اما برای حداکثر دقت ارزیابی در محدوده اطمینان ۹۵٪ با تعداد n نمونه به $\frac{12}{\sqrt{n}}\%$ محدود می‌شود.

جدول ۲: مقایسه ضریب تغییرات آزمایش‌ها در محل و حداکثر دقت ارزیابی در محدوده اطمینان ۹۵٪ ± [۱]

روش آزمایش	ضریب تغییرات آزمایش‌ها در محل (%)	حداکثر دقت ارزیابی در محدوده اطمینان ۹۵٪ ± (%)
مغزه گیری - نمونه استاندارد	۱۰	±۱۰
مغزه گیری - نمونه کوچک	۱۵	±۱۵
Pull-out	۸	±۲۰
گسیختگی داخلی	۱۲	±۲۸
Pull-off	۸	۱۵

±۲۰	۹	Break-off
±۲۰	۴	ارزیابی اولتراسونیک
±۲۵	۴	ضربه چکش

در آزمایش نیمه مخرب (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. کریستیانسن 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 [۳، ۱].

جوانسن [۴] مهم‌ترین کاربرد این روش را تعیین مقاومت در محل بتن برای تشخیص زمان مناسب برای قالب برداری معرفی کرده است. همچنین 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 [۵].

جوانسن [۶] یک مقاله پیرامون کاربرد روش BO برای سنجش مقاومت فشاری دال بتنی بکار رفته در روسازی باند فرودگاه منتشر کرد. بایفرس [۷] با مطالعه روش BO برای نمونه‌های با نسبت آب به سیمان متفاوت، اندازه سنگدانه متفاوت، مناسب بودن روش BO برای سنجش مقاومت بتن را گزارش نمود.

دال یورگنسن [۵-۸] طی دو مطالعه مستقل، کاربرد روش را در آزمایش مقاومت گیرش اپوکسی و بتن بررسی نمود. همچنین پاسخ آزمایش را با آزمایش Pull-out برای نمونه‌های مشابه بررسی نمود. کارلسون [۹] یک مقاله پیرامون آزمایش BO منتشر نمود که در پایان بدین نتیجه رسید که این روش در آینده به‌عنوان یکی از بهترین روش‌های سنجش مقاومت بتن در محل پذیرفته خواهد شد.

بارکر و رامبرز [۱۰] تأثیر نسبت آب به سیمان، ماکزیمم اندازه سنگدانه و شکل سنگدانه را روی جواب آزمایش BO بررسی کردند. نائیک و همکاران [۱۱] یک تحلیل رگرسیون بین نتایج روش BO و نمونه استوانه‌ای صورت دادند که حاکی از ارتباط مناسب این نتایج باهم بوده است. بانگی و میلارد [۱] 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 [۱۲] 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. همچنین توانایی ارزیابی آسیب در این قسمت را دارد.

در سال‌های اخیر، استفاده از بتن حاوی مقادیر الیاف فولادی به دلیل مزایای آن در افزایش چقرمگی و مقاومت بتن به‌ویژه کششی و خمشی گسترش یافته است [۱۳، ۱۴، ۱۵]. مقاومت کششی کم در مقایسه با مقاومت فشاری ضعف اصلی بتن می‌باشد که این رفتار شکننده موجب شکست ناگهانی و فروریختن سازه‌های بتنی در هنگام زلزله می‌گردد. با استفاده از آرماتورهای فولادی در جهت نیروهای کششی می‌توان این مشکل را برطرف نمود. اما جهت نیروهای کششی در بسیاری از مواقع به‌طور دقیق مشخص نیست. یک راه‌حل مناسب برای غلبه بر این مشکل استفاده از مقادیر کم الیاف جهت جلوگیری و کنترل رشد ترک و افزایش مقاومت کششی بتن می‌باشد [۱۶].

در تحقیقات آزمایشگاهی متعددی، سودمندی استفاده از الیاف به اثبات رسیده است. چنانکه گزارشات نشان می‌دهد افزودن ۲۰ تا ۵۰ کیلوگرم الیاف در مترمکعب بتن می‌تواند به‌طور 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 [۱۴، ۱۷، ۱۸]. بدین علت بتن الیاف فولادی به‌عنوان بتن مورد بررسی در این مطالعه انتخاب شده است.

با مرور اجمالی بر انواع روش‌های نیمه مخرب در ارزیابی مقاومت بتن می‌توان دریافت که کلیه آزمایش‌های ذکر شده تحت تأثیر پارامترهای مختلفی قرار دارند و در تفسیر نتایج آن‌ها باید ملاحظه و دقت نظر ویژه‌ای بعمل آورد. نتایج بررسی‌های گذشته نشان می‌دهد که، در این میان در کنار آزمایش مغزه گیری، آزمایش Break-off نتایج مناسبی در ارزیابی مقاومت بتن ارائه می‌کند.

مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تاکنون مطالعه جامعی که اثر همه پارامترهای مؤثر بر آزمایش BO شامل مشخصات بتن و سن بتن (۱۴ تا ۹۰ روز) را در برگیرد، صورت نگرفته است. در این مطالعه آزمایش BO به‌عنوان یکی از روش‌های نیمه مخرب با جزئیات بیشتر، برای اثبات کارایی کنترل کیفیت در ارزیابی مقاومت بتن در محل مورد بررسی قرار گرفته است.

شبکه‌های عصبی ابزارهای قدرتمندی هستند که از دانش کنونی ما راجع به شبکه‌های عصبی جانداران نشأت می‌گیرند. در شبکه‌های عصبی هدف آن است که با استفاده از تعداد زیادی عناصر محاسباتی ساده که با حجم زیادی از اتصالات به یکدیگر مربوط شده‌اند، کارایی و عملکرد موردنظر بدست آید. شبکه‌های عصبی که از انواع پردازشگرهای موازی می‌باشند قابلیت‌های فراوانی در پردازش و طبقه‌بندی اطلاعات دارند. شبکه‌های عصبی به‌عنوان یک ابزار علمی برای پیاده‌سازی و تفهیم الگوریتم‌های پیچیده ریاضی مورد استفاده قرار می‌گیرند. هدف از مطالعه حاضر، بررسی پارامترهای مؤثر بر نتایج آزمایش BO شامل مقدار سیمان، حداکثر اندازه سنگدانه، سن بتن و مقدار الیاف فولادی می‌باشد. همچنین قابلیت اعتماد و دقت نتایج از جنبه آماری مورد ارزیابی قرار گرفت. به اعتقاد نویسندگان، تاکنون گزارشی از به‌کارگیری مدل‌های پیش‌بینی مقاومت در تبیین آزمایش Break-off با در نظر داشتن خصوصیات مختلف منتشر نشده است. لذا تکنیک مدل‌سازی شبکه عصبی داده‌های آزمایشگاهی جهت ارزیابی مقاومت فشاری بتن مدنظر قرار گرفت.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

در این مقاله از سیمان پرتلند تیپ II [۱۹] با وزن مخصوص ۳/۱۵ و سطح مخصوص بلین ۳۱۶۵ سانتی‌متر مربع بر گرم استفاده شده است. آب بکار رفته در بتن آب آشامیدنی می‌باشد. سنگدانه‌های ریز مصرفی از نوع رودخانه‌ای و درشت‌دانه از نوع طبیعی شکسته با حداکثر اندازه ۱۲/۵ و ۲۵ میلی‌متر با وزن مخصوص ۲/۶۵ مطابق الزامات BS882:1992 [۲۰] می‌باشد. از الیاف فولادی قلابدار و کم کربن با طول ۵ سانتی‌متر، قطر ۰/۸ میلی‌متر 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، به داشتن دانش بالا خواص بتن و تجربه کافی نیاز دارد. به‌منظور فراهم کردن پایگاه جامع اطلاعات برای بررسی عوامل مؤثر بر خصوصیات مکانیکی بتن حاوی الیاف فولادی و تأثیر آن بر نتایج آزمایش Break-off سطوح متفاوتی از سیمان مصرفی، حداکثر سائز سنگدانه و درصد الیاف انتخاب گردید. مقادیر عیار سیمان ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب با نسبت آب به سیمان ثابت ۰/۴ در نظر گرفته شد. حداکثر سائز سنگدانه در دو سطح ۱۲/۵ و ۲۵ میلی‌متر و الیاف مصرفی با نسبت‌های حجمی ۰، ۰/۳۳، ۰/۶۷ و ۱ درصد اختیار شد.

بر این اساس ۲۴ طرح اختلاط مطابق جزئیات جدول ۳ پایه‌ریزی شد. تعداد ۳۶۰ نمونه سخت شده بتنی در سنین موردنظر ارزیابی شده و خصوصیات مکانیکی آن‌ها ثبت گردید. نام‌گذاری طرح‌ها بر اساس مقدار سیمان ($500, 450, 400 \text{ kg/m}^3$ ، $C=400$)، مقدار وزنی الیاف فولادی ($78, 53, 26, 0 \text{ kg/m}^3$ ، $SF=0$)، حداکثر سائز سنگدانه ($25, 12 \text{ mm}$ ، $AS=12$) صورت گرفته است.

جدول ۳: جزئیات طرح‌های اختلاط (kg/m^3)

شماره	طرح	مقدار سیمان	درشت دانه آب		الیاف فولادی		
			مسه	درشت دانه	%	kg	
1	C400SF00AS12	400	160	1099	805	0	0
2	C400SF26AS12	400	160	1099	805	0.34	26.5
3	C400SF53AS12	400	160	1099	805	0.68	53
4	C400SF78AS12	400	160	1099	805	1	78
5	C450SF00AS12	450	180	1040	762	0	0
6	C450SF26AS12	450	180	1040	762	0.34	26.5
7	C450SF53AS12	450	180	1040	762	0.68	53
8	C450SF78AS12	450	180	1040	762	1	78
9	C500SF00AS12	500	200	988	724	0	0
10	C500SF26AS12	500	200	988	724	0.34	26.5
11	C500SF53AS12	500	200	988	724	0.68	53
12	C500SF78AS12	500	200	988	724	1	78
13	C400SF00AS25	400	160	1099	805	0	0
14	C400SF26AS25	400	160	1099	805	0.34	26.5
15	C400SF53AS25	400	160	1099	805	0.68	53
16	C400SF78AS25	400	160	1099	805	1	78
17	C450SF00AS25	450	180	1040	762	0	0
18	C450SF26AS25	450	180	1040	762	0.34	26.5
19	C450SF53AS25	450	180	1040	762	0.68	53
20	C450SF78AS25	450	180	1040	762	1	78
21	C500SF00AS25	500	200	988	724	0	0
22	C500SF26AS25	500	200	988	724	0.34	26.5
23	C500SF53AS25	500	200	988	724	0.68	53
24	C500SF78AS25	500	200	988	724	1	78

۲-۳- خصوصیات مکانیکی

مقاومت بتن عموماً به عنوان بارزترین 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. مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی $15 \times 15 \times 15$ سانتی‌متری مطابق BS EN 12390 [۲۱] در سنین ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روز ارزیابی شده است. نمونه‌ها پس از یک روز نگهداری در محیط آزمایشگاه، در شرایط مرطوب تا سن موردنظر عمل‌آوری شده‌اند. برای همه ارزیابی‌ها حداقل میانگین سه نمونه از بتن موردنظر به عنوان نتیجه گزارش شده است.

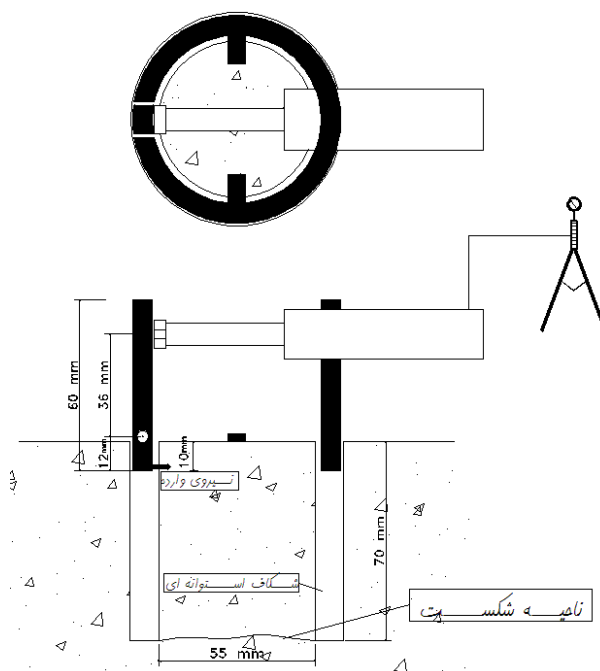
مطابق استاندارد ASTM [۲۲] برای آزمایش BO حداقل فاصله مرکز آزمایش از لبه خارجی مقطع 150 میلی‌متر و حداقل ضخامت دال بتنی 100 میلی‌متر می‌باشد. در نتیجه ابعاد نمونه‌های مکعبی آزمایش BO $15 \times 30 \times 30$ سانتیمتر انتخاب گردید. همچنین برای همه ارزیابی‌ها میانگین پنج نمونه از بتن موردنظر به عنوان نتیجه آزمایش BO گزارش گردید.

۲-۴- ملاحظات تئوری آزمایش Break-off

در آزمایش نیمه مخرب BO، مانومتر مکانیکی به موازات سطح تمام‌شده نمونه بتنی باری را به مغزه جزئی استوانه‌ای 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 [۲۳].

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

در شکل ۱ نحوه آزمایش BO نشان داده شده است. در حقیقت آزمایش BO معادل یک تیر طره با مقطع دایره‌ای تحت بار متمرکز در انتها آزاد آن می‌باشد. نیروهای موردنظر آزمایش توسط یک مانومتر مکانیکی اندازه‌گیری می‌شود و سپس تنش آزمایش BO محاسبه می‌گردد. نمونه آزمایشی دارای قطر 55 میلی‌متر و ارتفاع 70 میلی‌متر 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.



شکل ۱: نحوه آزمایش Break-off

۲-۵- شبکه عصبی

شبکه‌های عصبی از عناصر عملیاتی ساده‌ای به صورت موازی ساخته می‌شوند. این عناصر از سیستم‌های عصبی زیستی الهام گرفته شده‌اند. در طبیعت ساختار شبکه‌های عصبی از طریق نحوه اتصال بین اجزا تعیین می‌شود. بنابراین می‌توان یک ساختار مصنوعی به تبعیت از شبکه‌های طبیعی ساخته شود و با تنظیم مقادیر هر اتصال تحت عنوان وزن اتصال، نحوه ارتباط بین اجزا آن تعیین شود. پس از آموزش شبکه عصبی، اعمال یک ورودی خاص به آن، منجر به دریافت پاسخی خاص می‌شود. شبکه عصبی بر مبنای تطابق و هم‌سنجی بین ورودی و هدف سازگار می‌شود تا اینکه خروجی شبکه و هدف بر هم منطبق گردند. با استفاده از دانش برنامه‌نویسی می‌توان ساختار داده‌ای طراحی کرد که همانند یک نرون عمل نماید. سپس با ایجاد شبکه‌ای از این نرون‌های مصنوعی بهم پیوسته و ایجاد یک الگوریتم آموزشی برای شبکه و اعمال این الگوریتم به شبکه، آن را آموزش داد. عموماً تعداد زیادی از زوج‌های ورودی و خروجی بکار گرفته می‌شوند تا در این روند که از آن تحت عنوان آموزش نظارت‌شده یاد می‌شود، شبکه آموزش داده شود.

نرون‌ها اجزای اصلی شبکه‌های عصبی می‌باشند که اساساً از سه بخش وزن، بایاس و تابع انتقال تشکیل می‌شود. معمولاً مدل‌های شبکه عصبی از سه بخش اصلی لایه ورودی، لایه پنهان و لایه خروجی تشکیل شده است. هر نرون در لایه ورودی به نرون‌های لایه پنهان متصل می‌باشد و باید توجه شود که هیچ اتصالی بین نرون‌ها در یک لایه وجود ندارد. تعداد نرون‌ها در هر لایه به عوامل متعددی بستگی دارد. به عنوان مثال، تعداد نرون‌های ورودی و خروجی به پارامترهای ورودی و خروجی مورد نظر در مدل‌سازی بستگی داشته و معمولاً تعداد نرون‌ها در لایه پنهان به کمک روش‌های مختلف بر اساس پیچیدگی مسئله مورد نظر تعیین می‌شود.

۲-۵-۱- شبکه عصبی Feed Forward

در شبکه‌های عصبی Feed Forward نرون‌ها در لایه‌هایی منظم شده‌اند و هر نرون به تمامی نرون‌های لایه بعدی اتصال دارد [۲۴]. نرون‌ها هیچ اتصالی با نرون‌های هم‌لایه و یا نرون‌های لایه‌های غیر مجاور ندارند. شبکه‌های Feed Forward از یک لایه ورودی، یک یا چند لایه پنهان و یک لایه خروجی تشکیل شده‌اند. متناسب با هر اتصال یک وزن در نظر گرفته می‌شود. لایه ورودی داده‌های ورودی را دریافت می‌-

کند و به نرون‌های لایه پنهان انتقال می‌دهد. سپس داده‌ها پس از پردازش، به لایه خروجی وارد می‌شوند. خروجی نرون‌های لایه خروجی پیش‌بینی شبکه عصبی متناسب با داده‌های ورودی می‌باشد. روش منطقی و جامعی برای بدست آوردن تعداد نرون‌ها و لایه‌های موردنیاز هر مسئله وجود ندارد و برای آن باید بر اساس تجربه و آزمون و خطا عمل کرد [۲۵]. در این مطالعه از شبکه عصبی Feed Forward با دولایه 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 تکنیک کاهش شیب تابع خطا استفاده می‌شود که طی آن خطاها از لایه خروجی به سمت لایه ورودی پخش شده و وزن‌ها به گونه‌ای 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 [۲۵-۲۶].

۳- بررسی نتایج

۳-۱- نتایج آزمایش Break-off

در این قسمت، نتایج ارزیابی‌های انجام شده و تأثیر پارامترهای مؤثر بر نتایج آزمایش BO 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 اندازه‌های ۱۲ و ۲۵ میلی‌متر سنگدانه در جدول ۴ نشان داده شده است. همچنین این تأثیر برای مقادیر مختلف سیمان در نظر گرفته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش سن بتن مقادیر مقاومت فشاری افزایش می‌یابد که کاملاً متناظر با توسعه فرآیند هیدراتاسیون می‌باشد. با کمی دقت در نتیجه‌گیری و بر اساس شکل می‌توان گفت که تأثیر سن بتن برای سنگدانه ۲۵ میلی‌متر مشهودتر است. به‌ویژه این تأثیر در درصد‌های بیشتر الیاف نمود بیشتری دارد. در ضمن مقایسه جدول نشان می‌دهد که این رفتار برای مقادیر مختلف عیار سیمان مشابه می‌باشد.

مشابه با نتایج نیک‌بین و همکاران [۲۷]، V_u و همکاران [۲۸] مقاومت فشاری با افزایش اندازه سنگدانه افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال در عیار سیمان ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و نسبت حجمی الیاف ۰/۰۶۸٪ مقادیر مقاومت فشاری برای سنگدانه‌های ۱۲/۵ و ۲۵ میلی‌متر به ترتیب ۴۳/۵ و ۴۵/۰ مگا پاسکال در سن ۲۸ روز بدست 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 احتمالاً 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 به‌ویژه در حضور مقادیر بیشتر الیاف فولادی باشد. چراکه به‌هیچ‌وجه نمی‌توان تضمینی در به وجود آمدن شرایط کاملاً مساوی از توزیع و جهت‌گیری مناسب الیاف در اختیار داشت.

نتایج V_u و همکاران [۲۸] نشان داد که برای یک مقدار ثابت نسبت آب به سیمان مقاومت بتن در آزمایش فشاری با افزایش اندازه درشت‌دانه افزایش می‌یابد. آن‌ها بیان کردند که این پدیده می‌تواند به‌واسطه درگیری فیزیکی سنگدانه توضیح داده شود. چراکه 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 [۲۹]. 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. به‌عنوان 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 مگا پاسکال افزایش داشته و مقادیر متناظر برای سنگدانه ۲۵ میلی‌متر به ترتیب ۴۴/۹ و ۴۶/۹ مگا پاسکال می‌باشد. به‌عبارت‌دیگر با افزایش نسبت حجمی الیاف از صفر تا ۱٪ مقادیر مقاومت فشاری به ترتیب برای سنگدانه‌های ۱۲/۵ و ۲۵ میلی‌متر افزایشی برابر ۲۳/۳٪ و ۴/۵٪ را در این سن تجربه کرده‌اند.

پارامتر شاخص تقویت‌کنندگی الیاف تغییرات مقاومت فشاری بتن‌های حاوی الیاف نسبت به بتن بدون الیاف را نشان می‌دهد. این فاکتور توسط محققین مختلفی برای تعیین اثر ترکیبی و همزمان حجم الیاف مصرفی و نسبت ابعاد آن بر خصوصیات بتن پذیرفته شده است [۳۲،۳۱،۳۰]. در مطالعات پیشین نسبت حجمی الیاف V_f و نسبت ابعاد آن l/d دو پارامتر مهم در ارزیابی عملکرد بتن حاوی الیاف فولادی بشمار آمده‌اند که به‌شدت نتایج مقاومت فشاری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. شواهد متناقض قابل‌توجهی از تأثیر الیاف بر مقاومت فشاری به ازای 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 [۳۶،۳۵،۳۴،۳۳].

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؛ درواقع 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 دلیل افزایش خلل و فرج ناشی از آن می‌تواند منجر به بروز آشفستگی و اغتشاش در ماتریس بتن هم شود. خلل و فرج می‌تواند به‌مثابه نقص و آسیب‌درجایی 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، همچنان که حفرات اضافی نیز ممکن است با حضور الیاف به وجود آیند.

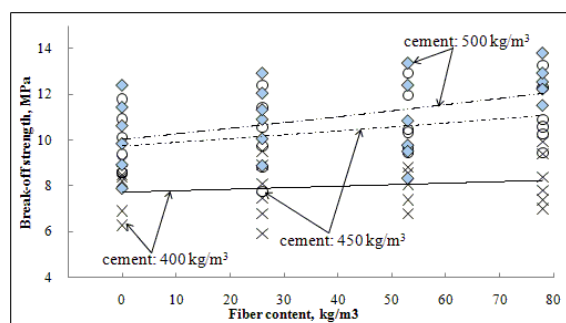
بنابراین تأثیر الیاف بر مقاومت فشاری را می‌توان تعادل دو وضعیت پل زدن الیاف روی ترکها و افزایش خلل و فرج ایجادشده توسط آن‌ها در نظر گرفت [۳۷،۳۶]. همچنین کاهش مقاومت می‌تواند ناشی از کاهش کارایی بتن در حضور درصد بالاتر الیاف باشد. به‌عبارت‌دیگر افزایش الیاف منجر به کاهش کارایی بتن شده که این موضوع کاهش تراکم بتن را به همراه دارد.

بر این اساس با افزایش درصد الیاف تا ۰/۶۸٪ مقاومت فشاری روندی افزایشی داشته و اضافه نمودن مقدار الیاف به ۱٪ موجب کاهش مقاومت فشاری بتن شده است. به‌عنوان‌مثال افزایش نسبت حجمی الیاف از ۰/۶۸ به ۱ درصد و عیار سیمان ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مقادیر مقاومت فشاری برای سنگدانه ۱۲/۵ میلی‌متر در سن ۲۸ روز از ۴۳/۵ به ۳۹/۰ مگا پاسکال کاهش داشته است و مقادیر متناظر برای سنگدانه ۲۵ میلی‌متر به ترتیب ۴۵/۰ و ۴۳/۴ مگا پاسکال می‌باشد.

جدول ۴: تأثیر سن بتن بر تغییرات مقاومت فشاری برای نسبت‌های حجمی مختلف الیاف با اندازه‌های مختلف سنگدانه

سن بتن (روز)	الیاف فولادی	سایز سنگدانه	آزمایش مقاومت فشاری عیار سیمان			آزمایش مقاومت فشاری عیار سیمان			آزمایش مقاومت فشاری عیار سیمان		
			عیار سیمان	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	Break-off (مگاپاسکال)	عیار سیمان	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	Break-off (مگاپاسکال)	عیار سیمان	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	Break-off (مگاپاسکال)
14	SF0	AS12.5	C400	20.7	7.2	C450	24.4	8.7	C500	27.8	9.1
28	SF0	AS12.5	C400	27.0	7.9	C450	32.5	9.8	C500	37.2	10.2
90	SF0	AS12.5	C400	49.0	9.6	C450	51.2	12.5	C500	52.1	13.1
14	SF26	AS12.5	C400	27.3	6.8	C450	24.5	8.9	C500	34.9	12.5
28	SF26	AS12.5	C400	37.1	7.8	C450	33.0	10.1	C500	42.3	13.0
90	SF26	AS12.5	C400	53.3	10.2	C450	55.8	13.1	C500	56.5	13.8
14	SF53	AS12.5	C400	33.7	7.8	C450	33.8	11.1	C500	34.4	9.6
28	SF53	AS12.5	C400	43.5	8.5	C450	42.9	11.8	C500	46.5	10.9
90	SF53	AS12.5	C400	56.9	10.1	C450	59.5	13.7	C500	60.1	14.2
14	SF78	AS12.5	C400	28.6	6.9	C450	31.9	11.8	C500	37.6	14.1
28	SF78	AS12.5	C400	39.0	7.9	C450	40.1	12.5	C500	44.8	14.4
90	SF78	AS12.5	C400	55.8	10.5	C450	58.1	14.1	C500	59.2	14.8
14	SF0	AS25	C400	30.0	9.4	C450	35.2	10.7	C500	28.3	11.3
28	SF0	AS25	C400	36.7	9.7	C450	44.9	11.6	C500	36.2	12.2
90	SF0	AS25	C400	54.7	10.4	C450	56.9	13.5	C500	57.5	14.2
14	SF26	AS25	C400	28.2	8.6	C450	36.6	11.2	C500	28.5	10.2
28	SF26	AS25	C400	36.2	9.3	C450	47.0	12.1	C500	38.2	11.5
90	SF26	AS25	C400	58.7	10.9	C450	61.4	14.2	C500	62.2	14.8
14	SF53	AS25	C400	36.0	9.2	C450	37.8	10.8	C500	38.2	11.2
28	SF53	AS25	C400	45.0	9.8	C450	50.7	12.0	C500	52.3	12.4
90	SF53	AS25	C400	62.2	11.0	C450	65.0	14.8	C500	66.0	15.3
14	SF78	AS25	C400	34.0	8.9	C450	35.4	10.8	C500	37.6	13.2
28	SF78	AS25	C400	43.4	9.6	C450	46.9	12.1	C500	48.5	14.0
90	SF78	AS25	C400	61.7	11.2	C450	64.0	15.2	C500	65.1	15.8

در شکل ۲ رفتار کلی مقاومت BO با مقدار الیاف فولادی برای مقادیر مختلف سیمان ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب صرف نظر از سن بتن، اندازه سنگدانه نشان داده شده است. با توجه به شکل می توان گفت که مقادیر متوسط مقاومت BO با افزایش مقدار سیمان افزایش می یابد. به عنوان مثال مقادیر متوسط مقاومت BO به ترتیب برای سیمان ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب ۷/۹، ۹/۹، ۱۰/۲ مگا پاسکال برای بتن بدون الیاف و ۸/۳، ۱۱/۱، ۱۲/۶ مگا پاسکال برای بتن با مقدار الیاف ۱٪ بدست آمده است.

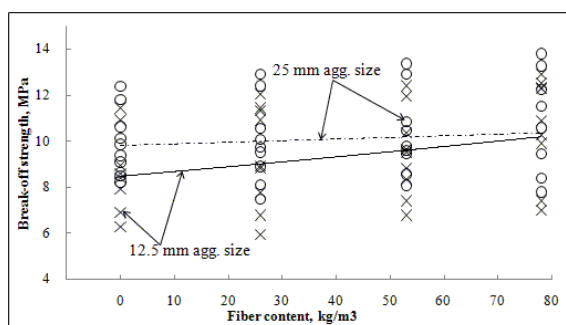


شکل ۲: تغییرات مقادیر مقاومت Break-off با مقدار الیاف برای عیارهای مختلف سیمان

شایان ذکر است پراکندگی زیاد نتایج شکل ۲ احتمالاً مربوط به نادیده گرفتن تأثیر سن بتن، اندازه سنگدانه است. همچنین توزیع و جهت گیری 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 می یابد. در نتیجه هرچه مقدار سنگدانه ها بیشتر شود، جمع شدگی و آب انداختن کمتر می گردد و

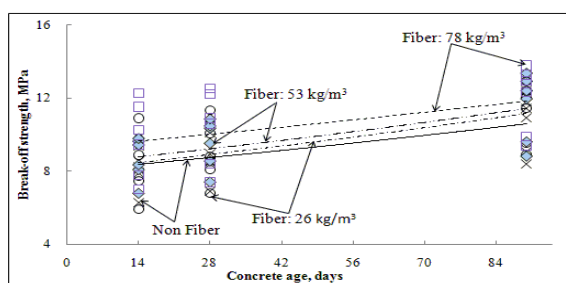
خسارت کمتری به پیوستگی بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها وارد می‌شود و تغییرات حرارتی ناشی از حرارت هیدراتاسیون کمتر خواهد بود [۳۵].

در شکل ۳ رفتار کلی مقاومت BO با مقدار الیاف فولادی برای دو اندازه حداکثر سنگدانه ۱۲/۵ و ۲۵ میلی‌متر، صرف‌نظر از سن بتن و مقدار سیمان داده شده است. به‌طور کلی می‌توان بیان نمود که مقادیر مقاومت BO برای سنگدانه بزرگ‌تر، بیشتر می‌باشد. همچنین بر اساس نتایج بدست آمده در این مطالعه، مقدار متوسط مقاومت BO برای بتن‌های بدون الیاف با سنگدانه ۲۵ میلی‌متر ۱۵٪ بزرگ‌تر از بتن‌های بدون الیاف حاوی سنگدانه ۱۲/۵ میلی‌متر می‌باشد. این مقدار برای بتن حاوی یک درصد الیاف فولادی فقط ۱٪ بزرگ‌تر می‌باشد. شایان‌ذکر است پراکندگی زیاد نتایج ناشی از نادیده گرفتن اثرات سن بتن، مقدار سیمان و مقادیر متفاوت الیاف می‌باشد.



شکل ۳: تغییرات مقادیر مقاومت Break-off با مقدار الیاف برای دو اندازه سنگدانه مختلف

تأثیر سن بتن بر رفتار کلی تغییرات مقاومت‌های BO با مقدار الیاف فولادی صرف‌نظر از مقدار حداکثر سنگدانه و مقدار سیمان در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش سن بتن مقادیر مقاومت فشاری افزایش می‌یابد که کاملاً متناظر با توسعه فرآیند هیدراتاسیون می‌باشد. با کمی دقت در نتیجه‌گیری و بر اساس شکل می‌توان گفت که تأثیر سن بتن برای سنگدانه ۲۵ میلی‌متر مشهودتر است. به‌ویژه این تأثیر در درصدهای بیشتر الیاف نمود بیشتری دارد. در ضمن این رفتار برای مقادیر مختلف عیار سیمان مشابه می‌باشد.



شکل ۴: تغییرات مقادیر مقاومت Break-off با سن بتن برای مقادیر مختلف الیاف

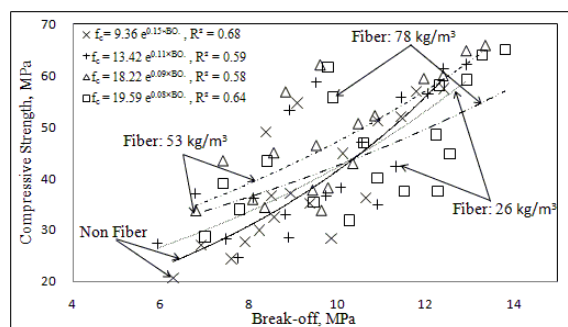
افزایش مقاومت BO در نتیجه افزودن الیاف و مشارکت آن‌ها قطعاً به مکانیزم عملکرد الیاف مربوط است. الیاف مانع گسترش و توسعه ریزترکهای داخلی بتن می‌گردد. در نتیجه باعث افزایش مقاومت خمشی می‌شود. همچنین شکل الیاف قلاب‌دار استفاده شده در بهبود چسبندگی ماتریس و الیاف و نیز به‌عنوان عامل مهم و مؤثر در افزایش مقاومت خمشی مورد توجه می‌باشد.

شایان‌ذکر است روند تغییرات مقاومت فشاری با توجه به 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 به‌ویژه در حضور مقادیر بیشتر الیاف فولادی باشد. چراکه به‌هیچ‌وجه نمی‌توان تضمینی در به وجود آمدن شرایط کاملاً مساوی از توزیع و جهت‌گیری مناسب الیاف در اختیار داشت. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر مقاومت فشاری به مقدار الیاف بکار رفته وابستگی زیادی دارد. با ارزیابی روند تغییرات مقاومت فشاری با سن بتن، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش نسبت حجمی الیاف بکار رفته، مقادیر مقاومت فشاری بدست آمده با افزایش همراه بوده است. این رفتار برای عیارهای مختلف سیمان مشابه و همچنین برای سنگدانه‌های کوچک‌تر

مشخص تر است. آزمایش BO موجب گسیختگی بتن در خمش می شود. بنابراین رابطه بین مقاومت BO و مقاومت فشاری می تواند ناشی از فاکتورهایی که رابطه بین مقاومت خمشی و فشاری را تحت تأثیر قرار می دهند، باشد. در ضمن افزایش نسبت مقاومت BO بتن های حاوی الیاف فولادی نسبت به سن بتن واضح تر می باشد.

۲-۳- تفسیر نتایج

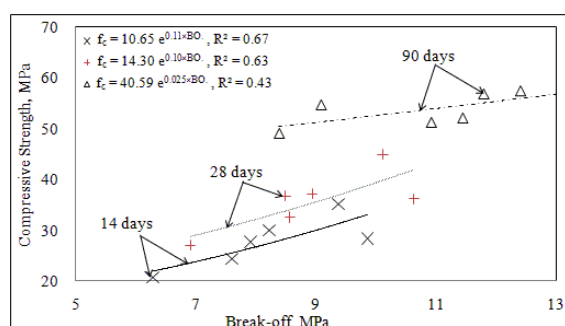
نتایج دامنه گسترده ای از آزمایشات نشان می دهد که می بایست منحنی های کالیبراسیون جداگانه ای بین مقاومت Break-off و مقاومت فشاری بتن در نظر گرفته شود. در شکل ۵ منحنی کالیبراسیون آزمایش برای بتن های مختلف در نظر گرفته شده است.



شکل ۵: مقایسه منحنی های کالیبراسیون برای بتن های مختلف با مقادیر مختلف الیاف فولادی

می توان بیان نمود که مقادیر مقاومت BO 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 به دلیل حضور الیاف فولادی، به نظر می رسد می بایست از منحنی های کالیبراسیون مختص هر بتن استفاده نمود.

همان طور که پیشتر بحث شد، مزیت وجود الیاف در بتن ناشی از مکانیزم مسلح کنندگی و تقویت کنندگی الیاف است، چراکه انرژی قابل توجهی در فرآیند بیرون کشیدگی آن ها پراکنده و تلف می شود. ذکر این نکته ضروریست که حداکثر نیروی شکست و انرژی جذب شده در فرآیند شکست به پارامترهای متعددی شامل خصوصیات مکانیکی، مشخصات هندسی الیاف، توزیع و جهت گیری مناسب الیاف و خصوصیات بتن وابستگی کامل دارد. شکل ۶ منحنی کالیبراسیون دیگری از آزمایش BO در سنین مختلف برای بتن شاهد بدون الیاف فولادی را نشان می دهد.



شکل ۶: مقایسه منحنی های کالیبراسیون برای بتن بدون الیاف فولادی در سنین مختلف

ضریب تغییرات مقاومت Break-off در این تحقیق در محدوده ۴٪ الی ۱۱٪ بدست آمده است. مقادیر بیشتر مربوط به بتن های حاوی درصد بیشتر الیاف مخصوصاً در سنین کمتر می باشد. نتایج نشان می دهد که قابلیت اعتماد این روش در ارزیابی مقاومت مناسب می باشد، چراکه ضریب تغییرات نتیجه شده در هر گروه از بتن های این آزمایش کمتر از ۱۱ درصد بوده است. باید توجه داشت که حتی در شرایط ایده آل با منحنی کالیبراسیون خاص، دقتی بیش از $\pm 15\%$ در محدوده اطمینان ۹۵٪ برای پیش بینی مقاومت فشاری بتن مورد انتظار نیست. 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 [۳۹،۳۸].

۳-۳-۳- مدل سازی 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 آن ها در پیش بینی خروجی بکار گرفته شود. با توجه به نتایج آزمایشگاهی صورت گرفته می توان انتظار داشت که مقاومت فشاری بتن (fc) 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.

۳-۳-۳-۱- مدل شبکه عصبی بکار گرفته شده

در این مطالعه، شبکه عصبی Feed Forward با الگوریتم Back propagation با دولا یه 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 بدست آمد. جهت پرهیز از پدیده Over Fitting، از استراتژی Early learning استفاده گردید و ۱۵٪ داده ها به صورت داده های Validation در نظر گرفته شد [۴۰].

۳-۳-۳-۲- ارزیابی عملکرد مدل شبکه عصبی

ارزیابی عملکرد مدل بخش مهمی از تحلیل به حساب می آید. به طور 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 معنی همبستگی بهتر و بیشتر 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^۱، تحلیل گری 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^۲ (RMSE)، مقدار اعتبار^۳ (VAF) و متوسط قدر مطلق خطاهای نسبی^۴ (MAPE) استفاده شده است.

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

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

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

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

¹ Adjusted

² Root Mean Square Error

³ Values Account For

⁴ Mean Absolute Percentage Error

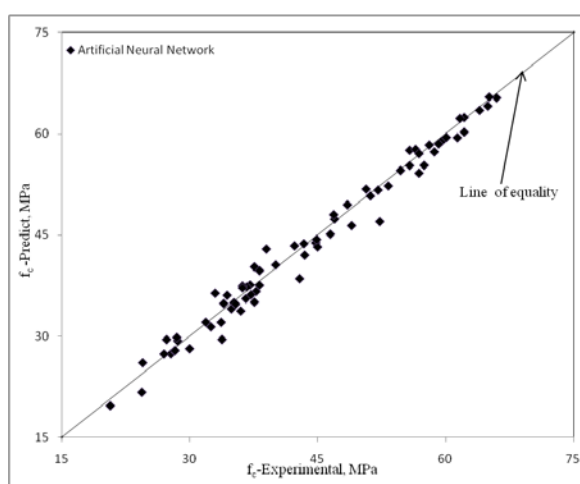
در روابط فوق \sqrt{p} و n به ترتیب بیانگر مقدار مشاهده شده، مقدار پیش‌بینی، تعداد پارامترهای مدل و تعداد نمونه‌ها می‌باشد. در جدول ۵ مقادیر محاسبه شده این شاخص‌ها برای نشان داده شده است. بر اساس این جدول، دقت مدل‌های ارائه شده به نوعی تأیید می‌شود، چراکه حدود ۸۰٪ تغییرات متغیر پاسخ با مدل‌های برازش شده می‌تواند بیان شود.

جدول ۵ مقادیر محاسبه شده این شاخص‌ها برای نشان داده شده است. بر اساس این جدول، دقت مدل‌های ارائه شده به نوعی تأیید می‌شود، چراکه حدود ۸۰٪ تغییرات متغیر پاسخ با مدل‌های برازش شده می‌تواند بیان شود.

جدول ۵: ارزیابی آماری مدل شبکه عصبی

	R_{adj}^2	RMSE	MAPE	VAF(%)
ANN	0.989	1.83	3.48	98

در شکل ۸ عملکرد بسیار مناسب مدل شبکه عصبی نشان داده شده است. این شکل توانایی پیش‌بینی بالای مدل شبکه عصبی را ثابت می‌کند. همان‌طور که در شکل مشهود است مقادیر واقعی و پیش‌بینی مقاومت فشاری در نزدیکی خط برابری ۵ مترکام شده‌اند.



شکل ۸: مقایسه نتایج آزمایشگاهی با مقادیر پیش‌بینی

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله آزمایش نیمه مخرب Break-off مورد بررسی قرار گرفت. لذا جنبه‌های مختلف آزمایش مورد ارزیابی واقع گردید و نتایج زیر از این بررسی حاصل شده است.

به‌طور کلی، برای نسبت آب به سیمان ثابت، مقادیر میانگین مقاومت BO با افزایش عیار سیمان افزایش می‌یابد. همچنین اندازه ماکزیمم سنگدانه در دو محدوده ۱۲/۵ میلی‌متر و ۲۵ میلی‌متر مورد بررسی نشان می‌دهد که مقادیر مقاومت BO برای سنگدانه بزرگ‌تر، بیشتر می‌باشد. این مقدار در بتن فاقد الیاف فولادی تأثیر مشهودتری نسبت به بتن حاوی الیاف فولادی دارد بطوریکه در بتن حاوی یک درصد الیاف فولادی با سنگدانه ۲۵ میلی‌متر فقط یک درصد بیشتر از مقدار نظیر آن برای بتن با سنگدانه ۱۲/۵ میلی‌متر می‌باشد.

روند کلی بهبود مقاومت BO با سن، مشابه بتن‌های مختلف می‌باشد. همچنین، افزایش نسبت مقاومت BO در بتن حاوی الیاف فولادی نسبت به مقدار نظیر برای بتن فاقد الیاف با افزایش سن بتن، مشاهده می‌شود. همچنین یک منحنی کالبره خاص برای بتن با مقادیر مختلف الیاف فولادی باید توسعه داده شود.

⁵ Line of equality

ضریب تغییرات مقاومت Break-off در این تحقیق در محدوده ۰.۴٪ الی ۱۱٪ بدست آمده است. نتایج ارزیابی‌ها حاکی از آن است که قابلیت اعتماد این روش در ارزیابی مقاومت مناسب می‌باشد، گرچه کاربرد قابل قبولی برای تخمین مقاومت بتن بر اساس یک منحنی کالیبراسیون کلی و عمومی وجود ندارد. فاکتورهای تأثیرگذار بر کالیبراسیون متعددند. بنابراین حتی در شرایط آزمایشگاهی مطلوب و با استفاده از منحنی کالیبراسیون معتبر بعید است که در محدوده اطمینان ۹۵٪ به دقتی بهتر از ± 0.15 در تخمین مقاومت فشاری بتن دست‌یافت. همچنین مقادیر بالاتر ضریب تغییرات ممکن است ناشی از ناهمگنی ذاتی بتن به‌ویژه در حضور الیاف فولادی باشد، زیرا تضمین شرایط توزیع همگن و قرارگیری مناسب جهت الیاف در مخلوط بتن عملاً غیرممکن است. شبکه‌های عصبی مصنوعی قابلیت آموزش دیدن را از روی نمونه‌های موجود و تعمیم دادن رفتار را به‌خوبی دارا می‌باشند. این مسئله، شبکه‌های عصبی را به یک ابزار قوی جهت مدل کردن مکانیزم‌های پیچیده علوم مهندسی تبدیل می‌کند. در این مقاله از این قابلیت در جهت پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن در طرح‌ها و سنین مختلف استفاده گردید. شبکه عصبی از نوع Feed Forward-Back Propagation با دویایه پنهان با تعداد مختلف نرون، آموزش داده شد و شبکه بهینه با ۱۰ نرون در هر لایه پنهان، تعیین گردید. نتایج مدل شبکه عصبی حاکی از عملکرد مطلوب این مدل است. قابل ذکر است که این موضوع با در نظر داشتن اینکه ۷۰٪ از داده‌ها در تشکیل مدل عصبی نقش داشته‌اند، برجسته‌تر می‌گردد.

مراجع

- [1] Bungey, J. H. and Millard S. G. and Grantham M. G. (2006). Testing of concrete in structures, 4th ed. Taylor & Francis Groups, London and New York, 352.
- [2] Long A. and Murray A. (1984). The pull-off partially destructive test for concrete. In: Malhotra VM, editor. Proc. Int. Conf. on In-Situ Non-Destructive Testing of Concrete. Ottawa, Canada, October. ACI SP-82, :327-350.
- [3] Neville A. M. (2011). Properties of concrete, 4th ed. London: Pitman Publishing, 687, 331.
- [4] Johansen R. (1976). A new method for determination of in-place concrete strength of form removal. 1st Eur. Colloq. on Construction Quality Control. Madrid, Spain, 12 pages.
- [5] Dahl-Jorgensen E. and Johansen R. (1984). General and specialized use of the break-off concrete strength testing method. Special Publication. 82, 293-308.
- [6] Johansen R. (1979). In Situ strength Evaluation of Concrete the Break-off Method. Concrete International. Vol. 1, No.9, 45-51.
- [7] Byfors, J. (1980). Plain concrete at early ages. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Report No. Facks-10044, Stockholm Sweden, 19 pages.
- [8] Dahl-Jorgensen E. (1982). Break-Off and Pull-Off Methods for Testing Epoxy-Concrete Bonding Strength. Project No. 160382, The Foundation of Scientific and Industrial Research of the Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway,.
- [9] Carlsson M. and Eeg I. R. and Jahren P. (1984). Field experience in the use of the "break-off tester". Special Publication, 82. 277-292.
- [10] Barker, M. G. and Ramirez, J. A. (1988). Determination of concrete strengths with break-off tester. Materials Journal, 85(4), 221-228.
- [11] Naik, T. and Salameh Z. and Hassaballah A. (1988). Evaluation of In-Place Strength of Concrete By The Break-Off Method. Proceedings of the NDT&E for Manufacturing and Construction Conference, University of Illinois, Urbana-Champaign, IL.
- [12] Lin Y. And Lin Y.F. and Hsiao C. (2010). Evaluation of bond quality at the interface between steel bar and concrete using the small-dimension break-off test. Materials and Structures. 1;43(5): 583-595.
- [13] Li V. C. (2002). Large volume, high-performance applications of fibres in civil engineering. Journal of Applied Polymer Science.;83(3): 660-686.
- [14] Aydin A. (2007). Self compactability of high volume hybrid fibre reinforced concrete. Construction and Building Materials. 21(6): 1149-1154.
- [15] Xu Z. and Hao H. and Li H. N. (2012). Mesoscale modelling of fibre reinforced concrete material under compressive impact loading. Construction and Building Materials. 26(1): 274-288.
- [16] Khalaj G. and Nazari A. (2012). Modeling split tensile strength of high strength self compacting concrete incorporating randomly oriented steel fibres and SiO₂ nanoparticles. Composites Part B: Engineering. 43(4): 1887-1892.

- [17] Luccioni B. and Ruano G. and Isla F. and Zerbino R. and Giaccio G. (2012). A simple approach to model SFRC. *Construction and Building Materials*. 37: 111-124.
- [18] Xu Z. and Hao H. and Li H.N. (2012). Mesoscale modelling of dynamic tensile behaviour of fibre reinforced concrete with spiral fibres. *Cement and Concrete Research*. 42(11): 1475-1493.
- [19] ASTM C 150, (2004). Standard Specification for Portland Cement, American Standards for Testing and Materials.
- [20] BS 882:(1992), Specification for aggregates from natural sources for concrete, London: BSI..
- [21] EN, BS. 12390-3. (2009). Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens 19.
- [22] ASTM C 1150 (1992) Standard test method for the break-off number of concrete, vol 04.02. Annual Book of ASTM Standards.
- [23] Yiching, L. and Yu-Feng, L. and Chiamen, H. (2010). Evaluation of bond quality at the interface between steel bar and concrete using the small-dimension break-off test, *Materials and Structures* 43: 583–595.
- [24] Adhikary, B. and Mutsuyoshi, H. (2006). Prediction of shear strength of steel fiber RC beams using neural networks. *Constr Build Mater*, 801–811.
- [25] Mukherjee, A. and Biswas, S. (1997). Artificial neural networks prediction of mechanical behavior of concrete at high temperature. *Nucl Eng Design*, 1-11.
- [26] Ince, R. (2004). Prediction of fracture parameters of concrete by artificial neural networks, *Eng Fract Mech*, 2143–59.
- [27] Nikbin, I. M. and Beygi, M. H. A. and Kazemi, M. T. and Vaseghi Amiri, J. and E Rahmani, and Rabbanifar, S. and Eslami, M. (2014). A comprehensive investigation into the effect of aging and coarse aggregate size and volume on mechanical properties of self-compacting concrete. *Materials & Design* 59: 199-210.
- [28] Xuan Hong, V. and Daudeville, L. and Malecot, Y. (2011). Effect of coarse aggregate size and cement paste volume on concrete behaviour under high triaxial compression loading. *Construction and Building Materials* 25.10: 3941-3949.
- [29] El-Dieb, A. and Reda Taha, S. (2012). Flow characteristics and acceptance criteria of fiber- reinforced self-compacted concrete (FR-SCC). *Construction and Building Materials* 27.1 585-596.
- [30] Khayat, K. and Schutter, D. (2013). Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete. State-of-the-art report of RILEM Technical Committee 228-MPS Vol. 14, Springer.
- [31] Madandoust, R. and Ranjbar, M. and Ghavidel, R. and Shahabi, F. (2015). Assessment of factors influencing mechanical properties of steel fiber reinforced self-compacting concrete. *Materials & Design* 83: 284-294.
- [32] Aslani, F. and Nejadi, S. (2013). 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: 121-133.
- [33] Güneysi, E. and Gesoğlu, M. and Akoi, A. O. M. and Mermerdaş, K. (2014). Combined effect of steel fiber and metakaolin incorporation on mechanical properties of concrete. *Composites Part B: Engineering* 56: 83-91.
- [34] AL-Ameeri, A. (2013). The effect of steel fiber on some mechanical properties of self compacting concrete. *American Journal of civil engineering* 1.3: 102-110.
- [35] Ghavidel, R. and Madandoust, R. and Ranjbar, M. (2015). Reliability of pull-of test for steel fiber reinforced self-compacting concrete. *Measurement* 73: 628-639.
- [36] Martinie, L. and Roussel, N. (2011). Simple tools for fiber orientation prediction in industrial practice. *Cement and Concrete research* 41.10: 993-1000.
- [37] Zerbino, R. and Tobes, J. M. and Bossio, M. E. and Giaccio, G. (2012). On the orientation of fibres in structural members fabricated with self compacting fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites* 34.2: 191-200.
- [38] Madandoust, R. and Ghavidel, R. and Nariman-Zadeh, N. (2010). Evolutionary design of generalized GMDH-type neural network for prediction of concrete compressive strength using UPV. *Computational Materials Science* 49.3: 556-567.
- [39] Madandoust, R. and Bungey, H. and Ghavidel, R. (2012). Prediction of the concrete compressive strength by means of core testing using GMDH-type neural network and ANFIS models. *Computational Materials Science* 51.1: 261-272.
- [40] Hudson Beale, M. and HaganHagan, M. T. and Demuth, H. B. (2012). *Neural Network Toolbox™ User's Guide*, MathWorks, Inc.