

پیش بینی خواص مکانیکی بتن سبک مسلح به الیاف بازالت حاوی دوده سیلیس و خاکستر بادی با سیستم استنتاج عصبی - فازی سازگار

سیدحسین قاسم‌زاده موسوی‌نژاد*^۱، فرزاد جوهری مجد^۲، اشکان سرادار^۳

^۱ دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت
^۲ کارشناسی ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، مؤسسه آموزش عالی کادوس، رشت
^۳ کارشناسی ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۳/۲۵، نشر آنلاین: ۱۴۰۰/۳/۲۵

چکیده

بتن به‌عنوان یک ماده ساختمانی دارای مزایا و معایبی است. از جمله معایب بتن، مقاومت و کرنش کششی بسیار کم و ترد بودن آن تحت بارگذاری خمشی یا فشاری است که این رفتار شکننده، موجب شکست ناگهانی سازه‌های بتنی هنگام زلزله می‌گردد. از سویی مقاومت کم سبک‌دانه‌ها و شکنندگی این مصالح موجب بروز عملکرد ضعیف‌تر بتن‌های سبک در مقابل شکل‌پذیری می‌شود. در همین راستا، در این تحقیق به بررسی خصوصیات مکانیکی بتن سبک سازه‌های حاوی لیکا (Leca) و مقادیر مختلف الیاف بازالت (Basalt) (۰ تا ۰/۵ درصد) پرداخته شد. همچنین از مواد پوزولانی دوده سیلیس و خاکستر بادی به‌منظور اصلاح برخی خواص بتن در مخلوط‌های بتنی سبک به‌عنوان جایگزین بخشی از وزن سیمان استفاده شد. در مجموع ۲۱ طرح اختلاط ساخته شده و خواص تازه و سخت‌شده آن در سنین مختلف ۷ و ۲۸ و ۹۰ روزه تحت آزمایش قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد حضور الیاف بازالت موجب کاهش اسلامپ و مقاومت فشاری به‌ترتیب تا ۳۷ و ۱۳ درصد می‌شود. با این حال تمامی مخلوط‌ها دارای کیفیت در رده "خوب" و از نظر مقاومتی در گروه "بتن سازه‌ای" قرار گرفته‌اند. همچنین افزودن الیاف موجب بهبود مقاومت‌های کششی و خمشی و نیز جمع‌شدگی شد. از سویی دیگر، به‌منظور پیش‌بینی نتایج تجربی از سیستم استنتاج عصبی - فازی سازگار، ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) به‌عنوان روشی مطمئن در ارزیابی و تخمین نتایج استفاده گردید که نتایج تحلیل عددی آن بیانگر برآورد دقیق نتایج تجربی بود.

کلمات کلیدی: بتن سبک، الیاف بازالت، دوده سیلیس، خاکستر بادی، خواص مکانیکی، سیستم استنتاج عصبی - فازی سازگار.

۱- مقدمه

صدمات ناشی از ازدیاد وزن ساختمان را به حداقل می‌رساند. امروزه در امر سبک‌سازی سازه‌ها با استفاده از انواع بتن‌های سبک و به‌کارگیری از آن‌ها در قسمت‌های مختلف سازه مانند اعضای غیرباربر (غیر سازه‌ای) یا تیرها و ستون‌ها (اعضاء باربر) موجب افت وزن کلی سازه شده و نهایتاً منجر به کاهش در ابعاد سازه می‌شود (Min Hong Zhang, ۱۹۹۱).

نیاز گسترده و روزافزون جامعه به ساختمان و مسکن و به دنبال آن ضرورت استفاده از سیستم‌های نوین به‌منظور افزایش سرعت ساخت‌وساز، سبک‌سازی و نیز مقاوم نمودن ساختمان‌ها در برابر زلزله به امری اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است.

۱-۱- بتن سبک

تکنولوژی بتن سبک، فناوری نوینی به‌شمار نمی‌رود. ابتدایی‌ترین نوع آن مربوط به هزاره سوم قبل از میلاد و شکل مدرن آن در سال‌های ۱۱۸ تا ۱۳۸ میلادی مورد استفاده قرار گرفت (Neville و Brooks, ۱۹۸۷؛ Jafari و Mahini, ۲۰۱۷). با افزایش تقاضا برای استفاده از بتن و مصالح سبک، فناوری تولید ساخت بتن سبک‌دانه پر مقاومت از سال‌های ۱۹۷۰ میلادی در

سبک‌سازی سازه‌های بتنی از مباحث مهم در صنعت ساختمان‌سازی و پروژه‌های عمرانی می‌باشد که مورد توجه مهندسان و محققان می‌باشد. کاهش وزن ساختمان با به‌کارگیری مصالح سبک، علاوه بر صرفه‌جویی در هزینه، زمان و انرژی، در واقع زیان‌های ناشی از حوادث طبیعی مانند زلزله را کاهش داده و

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۴-۳۵۱۴۵۲۰

آدرس ایمیل: h.mosavi@guilan.ac.ir (س.ح. قاسم‌زاده موسوی‌نژاد)، farzad.johari1985@gmail.com (ف. جوهری مجد)،

ashkan.saradar@gmail.com (ا. سرادار).

ساخت این بتن‌ها صرفاً با استفاده از سنگ‌دانه‌های سبک و مقاوم امکان‌پذیر است (Kurt و همکاران، ۲۰۱۶؛ Mo و همکاران، ۲۰۱۶؛ Nikbin و همکاران، ۲۰۱۶).

۱-۲- بتن الیافی

بتن به‌عنوان یک ماده ساختمانی دارای مزایا و معایبی است، از جمله معایب بتن، مقاومت کششی بسیار کم آن در مقابل مقاومت فشاری بالای بتن است که این رفتار ترد و شکننده، موجب شکست ناگهانی سازه‌های بتنی هنگام زلزله می‌گردد (Gao و همکاران، ۱۹۹۷). یکی از راه‌حل‌های مناسب برای مقابله با این مشکل، علاوه بر مسلح کردن بتن با آرماتور، استفاده از انواع الیاف می‌باشد (Kayali و همکاران، ۲۰۰۳).

کاربرد الیاف به‌طور گسترده از اوایل سال ۱۹۶۰ میلادی در کشورهای صنعتی آغاز شد و در طی این چند دهه جنس و شکل الیاف و نحوه ساخت بتن الیافی بهبود یافته است (Mehta، ۱۹۸۶). الیاف بازالت، که الیافی نوظهور با پتانسیل‌های صنعتی و آسیب‌رسانی کم‌تر به محیط‌زیست می‌باشد؛ به‌تدریج تبدیل به گزینه‌ای مناسب برای صنایع کامپوزیت شده است (Sadrmomtazi و همکاران، ۲۰۱۸).

این الیاف از نظر مشخصات فیزیکی و مکانیکی، رقیب ویژه‌ای برای الیاف صنعتی همچون شیشه و کربن محسوب می‌شود. تولید صنعتی این الیاف مستقیماً از ذوب کردن سنگ بازالت به‌دست می‌آید (Ma و همکاران، ۲۰۱۳) با توجه به درصد بالای سیلیس در ساختار سنگ بازالت، الیاف ساخته‌شده از آن گزینه‌ای مناسب و سازگار با ماتریس سیمانی است (Ralegaonkar و همکاران، ۲۰۱۸؛ Zhao و همکاران، ۲۰۱۸).

با ورود الیاف به بتن دو نوع وضعیت ترک‌خوردگی، موازی با الیاف و یا عمود بر الیاف اتفاق می‌افتد که در صورت عبور الیاف، به‌صورت عمود بر لبه‌های ترک، با عملکرد پل‌زندگی الیاف، یکپارچگی ترک‌ها را تا تغییر شکل‌های زیاد حفظ می‌کند و مقاومت کششی و خمشی بتن به‌دلیل خاصیت دوزندگی الیاف بالا می‌رود (Zollo، ۱۹۹۷). همچنین حضور الیاف در بتن به‌طور قابل‌توجهی در شرایط محیطی مختلف بر عملکرد ترک‌خوردگی آن تأثیر مثبت می‌گذارد (Shah و Rangan، ۱۹۷۱؛ Nili و Afroughsabet، ۲۰۱۰).

به‌طور نمونه در شرایط محیطی گرم و خشک موجب کنترل ترک‌های سنین اولیه و یا ثانویه ناشی از جمع‌شدگی می‌شوند. همچنین در حرارت‌ها بالا موجب جلوگیری از قله‌کن‌شدگی و یا پدیده پوسته‌پوسته شدن بتن می‌گردد (Liu و Chen، ۲۰۰۴). همچنین استفاده از الیاف می‌تواند در برخی مواقع باعث جلوگیری از آب انداختگی بتن و یا از انتقال آب به سطح بتن جلوگیری کند که نتیجه آن همگن شدن بتن و یکسان‌سازی نسبت آب به سیمان

انواع سازه‌ها توسعه پیدا کرد. تولید بتن سبک در ایران پیش‌تر به‌صورت سنتی با استفاده از دانه‌های سبکی چون رس شکفته، سنگ پا، پوکه معدنی و یا بتن‌های گازی تولید می‌شد. اما امروزه با تزریق هوا در داخل اختلاط ماسه و سیمان، امکان سبک نمودن وزن آن هرچه بیشتر فراهم و اختلاط‌های کم‌وزن (۱۳۰۰ تا ۱۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب) تحت نام بتن سبک کفی تولید می‌گردد (Kolver Igarashi و Bentur، ۲۰۰۱).

بتن سبک توسط سنگ‌دانه‌های سبک یا ماتریس‌های سیمانی سبک تولید می‌شود و در کشورهای مختلف، بتن سبک دارای تقسیم‌بندی‌های گوناگونی می‌باشد که بر مبنای مقاومت فشاری به‌صورت: الف) غیرسازه‌ای، ب) مقاومت متوسط، پ) سازه‌ای می‌باشد (Bate، ۲۰۲۱) (شکل (۱)). متداول‌ترین روش برای به‌دست آوردن بتن سبک، استفاده از سنگ‌دانه‌های سبک شامل سنگ-دانه‌های مصنوعی یا سنگ‌دانه‌های طبیعی است (Polta و همکاران، ۲۰۱۰؛ Aslam و همکاران، ۲۰۱۷).

بتن سبک غیرسازه‌ای معمولاً به‌عنوان جداساز سبک به‌عنوان عایق صوتی مورد استفاده قرار می‌گیرد که دارای جرم مخصوص کم‌تر از ۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و مقاومت فشاری ۰/۳۵ تا ۷ مگاپاسکال است (Colangelo و همکاران، ۲۰۱۶). بتن سبک با مقاومت متوسط از لحاظ وزن مخصوص و مقاومت فشاری در محدوده‌ای بین بتن‌های سبک غیرسازه‌ای و سازه‌ای قرار دارند، به‌گونه‌ای که مقاومت فشاری آن‌ها بین ۷-۱۷ N/mm² و جرم مخصوص آن‌ها بین ۸۰۰-۱۴۰۰ Kg/m³ می‌باشند (Shafiq و همکاران، ۲۰۱۶). بتن‌های مذکور معمولاً در بلوک‌های مجوف بتنی، کف‌سازی‌ها و موارد مشابه مورد استفاده قرار می‌گیرند. بتن سبک سازه‌ای براساس برخی استانداردها دارای چگالی تا ۲۰۰۰ Kg/m³ و مقاومت فشاری حداقل ۱ YMPa تعریف شده است.

بتن سبک		
غیر سازه ای	مقاومت متوسط	سازه ای
چگالی kg/m ³	۲۰۰-۵۰۰-۷۵۰	۱۰۰۰-۱۲۵۰-۱۴۰۰-۱۵۰۰-۱۷۵۰-۲۰۰۰
مقاومت	(۲-۰/۷)	(۱۴-۲)
سنگدانه		
ورمیکولیت	پومیس	خاکستر بادی
پرلیت	اسکوریا	لیکا
		سریاره
دیگر بتن‌های سبک		
بتن اسفنجی		

شکل ۱- انواع بتن سبک (Sari و Pasamehmetoglu، ۲۰۰۵)

که در آن p_i ، q_i و r_i پارامترهای مربوط به قانون i ام هستند و همچنین A_i و B_i برچسب‌های زبانی می‌باشند. با توجه به شکل (۲) لایه‌های اول و چهارم شامل نقاط تطبیقی می‌باشند به طوری که در طی فرآیند آموزش قابل تغییر و سایر لایه‌ها شامل نقاط ثابت می‌باشند. لایه‌های موجود را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

لایه (۱) نقاط موجود در این لایه به پارامترهای یک تابع تطبیق می‌یابند:

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x), \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

$$O_{1,i} = \mu_{B_{i-2}}(x), \quad i = 3, 4 \quad (4)$$

در این روابط μ_{A_i} و μ_{B_i} درجات توابع عضویت برای مجموعه‌های A_i و B_i می‌باشند.

لایه دوم) در این لایه تمام نقاط موجود ثابت می‌باشند. نتیجه ضرب سیگنال‌های ورودی، گره خروجی می‌باشد و این خروجی توسط گره بعدی دریافت می‌شود.

$$O_{2i} = w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(x), \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

لایه سوم) مشابه لایه دوم، تمام گره‌ها در این لایه ثابت می‌باشند. در این لایه وزن هر گره بر مجموع وزن‌های گره‌ها تقسیم می‌شود:

$$O_{3i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_j w_j} \quad (6)$$

لایه چهارم) هر گره در این لایه گره تطبیقی برای یک خروجی با تابع زیر می‌باشند:

$$O_{4i} = \bar{w}_i f = (p_i x + q_i y + r_i) f \quad (7)$$

لایه پنجم) تک نقطه موجود در این لایه یک گره ثابت می‌باشد. در این لایه نتیجه کلی با جمع کردن همه سیگنال‌های ورودی از لایه‌های قبل محاسبه می‌شود.

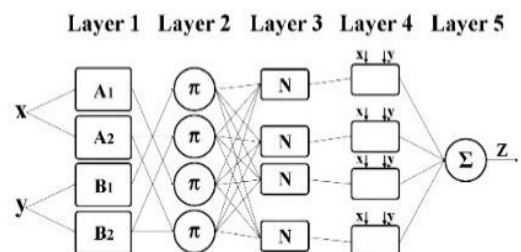
$$O_{5i} = \sum \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (8)$$

ANFIS دارای دو روش برای یادگیری است. قانون یادگیری پایه ANFIS، شیفت‌گرادیان عقب^۴ است که سیگنال خطا را به صورت بازگشتی از لایه خروجی روبه عقب^۵ به گره‌های ورودی^۶ محاسبه می‌کند. این قانون یادگیری دقیقاً مشابه قانون یادگیری پروپا^۷ است که در شبکه‌های عصبی مشترک استفاده می‌شود (Yuan و همکاران، ۲۰۱۴).

در تمام بتن و تداوم عمل هیدراتاسیون^۱ می‌باشد (Rattanasak و Chindaprasirt، ۲۰۰۱).

۱-۳- سیستم استنتاج عصبی- فازی سازگار (ANFIS)^۲

سیستم استنتاج عصبی فازی سازگار تصحیح‌شده روشی قدرتمند برای پیش‌بینی نتایج است که اخیراً برای پیش‌بینی خواص بتن به کار گرفته شده است (Jang، ۱۹۹۳؛ Sadrmtazi و همکاران، ۲۰۱۳). ANFIS نوعی شبکه عصبی مصنوعی است که براساس سیستم فازی Takagi-Sugeno می‌باشد که در اوایل دهه ۹۰ ایجاد شده است (Du و همکاران، ۲۰۱۰). این سیستم با ترکیب شبکه‌های عصبی و مفاهیم منطق فازی می‌تواند از امکانات هر دو آن‌ها در یک قالب بهره‌بردارد. در این تحقیق به منظور ترکیب خطی متغیرهای ورودی تعریف‌شده به عنوان هر قاعده از سیستم Sugeno FIS استفاده شده است. همچنین خروجی نهایی مربوط به مدل فازی در این مطالعه شامل میانگین وزنی هر قانون خروجی^۳ می‌باشد (Übeyli و Güler، ۲۰۰۵؛ Sobhani و همکاران، ۲۰۱۰؛ Madandoust و همکاران، ۲۰۱۲). در شکل (۲) به صورت شماتیک معماری ANFIS برای مدل Sugeno دو ورودی با چهار قاعده به نمایش درآمده است.



شکل ۲- شماتیک معماری ANFIS برای مدل Sugeno دو ورودی با چهار قاعده

یک Sugeno FIS شامل دو متغیر ورودی یعنی x و y است. به عنوان مثال، یک متغیر خروجی واحد f به دو قاعده فازی ختم می‌شود که در روابط (۱) و (۲) آمده است (Sohani و همکاران، ۲۰۱۰؛ Sadrmtazi و همکاران، ۲۰۱۳).

$$\text{Rule 1. if } x \text{ is } A_2, y \text{ is } B_1 \text{ then } f_1 = p_1 x + q_1 y + r_1 \quad (1)$$

$$\text{Rule 2. if } x \text{ is } A_2, y \text{ is } B_2 \text{ then } f_2 = p_2 x + q_2 y + r_2 \quad (2)$$

5. Backward
6. The input nodes
7. Back propa learning

1. Hydration
2. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)
3. The weighted average of each rule's output
4. Back propa

۴-۱- مروری بر تحقیقات پیشین

تحقیقات مختلفی در زمینه بتن‌های سبک الیافی انجام شده است. Hejazi و همکاران (۲۰۱۵) خواص مکانیکی بتن سبک سازه‌ای حاوی پنج نوع الیاف (فولاد صنعتی و ضایعاتی، شیشه، پلی‌پروپیلن و کاه) به صورت تکی و ترکیبی مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج حاصل تحقیق آن‌ها نشان داد که در بین نمونه‌های ساخته شده، مخلوط‌های دارای ترکیب دو جزئی، عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های تک جزئی داشتند. همچنین بیشترین مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و جذب انرژی به ترتیب مربوط به طرح‌های حاوی ترکیب الیاف (فولاد صنعتی و پلی‌پروپیلن)، (شیشه و پلی‌پروپیلن) و (فولاد صنعتی و شیشه) بود.

در تحقیق Dabbagh و Mohammaddoost در سال ۲۰۱۷ اثر هندسه الیاف فولادی بر مقاومت مکانیکی بتن ساخته شده با سبک‌دانه اسکوریا^۹ بررسی شد. نتایج آن‌ها نشان داد که افزودن الیاف موجب رشد ضریب پواسون^{۱۰} و مدول الاستیسیته^{۱۱} شده که این موضوع برای مخلوط‌های حاوی الیاف با طول بلندتر محسوس بود.

Wang-A و Wang-B (۲۰۱۳) به مطالعه آزمایشگاهی، مشخصات استاتیکی و دینامیکی بتن سبک تقویت شده توسط الیاف فولادی (۰ تا ۲ درصد) پرداخت. این مطالعه بهبود خواص مکانیکی بتن سبک و همچنین افزایش مقاومت ضربه‌ای بتن سبک حاوی الیاف فولادی را نشان داد.

Ghasemzadeh و Ghorbani (۲۰۱۸) خواص مکانیکی بتن‌های سبک الیافی حاوی میکرو و نانوسیلیس^{۱۲} را ارزیابی کردند. آن‌ها گزارش دادند میزان جایگزینی بهینه میکروسیلیس^{۱۳} و نانوسیلیس به ترتیب ۱۰ و ۳ درصد و عملکرد الیاف فولادی به-مراتب بالاتر از الیاف پلی‌پروپیلن بود.

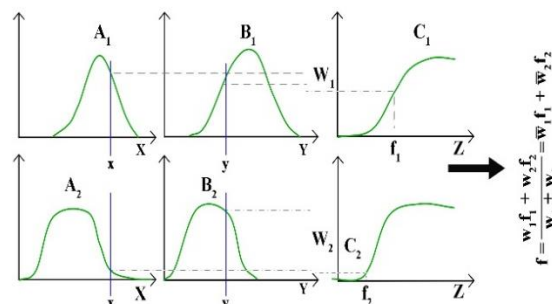
Fashandi و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی بتن سبک تقویت شده توسط ضایعات فرش (با درصد جایگزینی ۱، ۲ و ۳ درصد) پرداختند. مطالعه آن‌ها افزایش خاصیت انعطاف‌پذیری بتن سبک و همچنین پتانسیل بالای محیطی ضایعات اصلاح شده فرش، برای تولید بتن سبک پایدار را نشان می‌دهد. در مطالعه Libre و همکاران (۲۰۱۱) با عنوان خواص مکانیکی بتن سبک مسلح به الیاف ترکیبی (فولادی و پلی‌پروپیلن) ساخته شده با پومیس^{۱۴} طبیعی، نشان داده شد که حضور الیاف موجب کاهش خطر جداشدگی سنگ‌دانه‌های مخلوط بتن می‌شود. همچنین حضور مقادیر کم‌تر از ۰/۲٪ الیاف پلی‌پروپیلن تأثیری بر خواص

ANFIS Edit با چهار ورودی و یک لایه خروجی برای پیش-بینی نتایج آزمایشگاهی پیاده‌سازی شده است. چهار Sugeno FISS مورد استفاده قرار گرفت که هر قاعده به‌عنوان یک ترکیب خطی متغیرهای ورودی تعریف شده است. مقاومت فشاری به‌عنوان لایه خروجی برای تولید هر یک از Sugeno FIS انتخاب شده است. همچنین لایه‌های ورودی به کارگرفته شده شامل سیمان، دوده سیلیسی، خاکستر بادی و الیاف بازالت و خروجی شامل مقاومت فشاری در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱- محدوده متغیرهای ورودی و خروجی

متغیر	محدوده	
	حداکثر	حداقل
ورودی	۴۵۰	۴۰۵
سیمان (kg/m ³)	۴۵	۰
خاکستر بادی (kg/m ³)	۴۵	۰
دوده سیلیس (kg/m ³)	۱۳/۷۵	۰
الیاف بازالت (%)	خروجی	
مقاومت فشاری (Mpa)	۴۳	۱۳/۵

داده‌های تست به سه گروه تقسیم شدند: ۷۰٪ از داده‌ها به-عنوان مجموعه آموزشی، ۱۵٪ به‌عنوان تست مجموعه و ۱۵٪ به-عنوان مجموعه اعتبار سنجی تقسیم شدند. تعداد تابع عضویت (MF) در هر ساختار ANFIS متفاوت است، که با آزمایش تعداد مختلفی تعیین می‌شود. لایه‌های ورودی، نوع تابع عضویت و نوع MF برای هر ساختار FIS (مقاومت فشاری) مشابه است. همچنین پارامترهای لازم برای مدل‌سازی ANFIS شامل (سیمان، خاکستر بادی، دوده سیلیس و بازالت الیاف) می‌باشد. همچنین در شکل (۳) مدل فازی Sugeno به نمایش درآمده است.



شکل ۳- مدل فازی Sugeno (Ghorbanzadeh و همکاران،

(۲۰۱۸)

12. Nanosilica
13. Microsilica
14. Pumice

8. Membership Function
9. Scoria
10. Poisson's ratio
11. Modulus of Elasticity

وزن EPS را با استفاده از رگرسیون، شبکه عصبی و ANFIS مدل-سازی کردند و ضعف مدل رگرسیون در قیاس با مدل‌های ANN و ANFIS را نتیجه گرفتند.

مطالعه Nazari و Khalaj (۲۰۱۲) با موضوع مدل‌سازی مقاومت فشاری بتن سبک با استفاده از رگرسیون، شبکه عصبی و ANFIS، نشان می‌دهد که سیستم رگرسیون پتانسیل مناسبی برای پیش‌بینی نتایج ندارد در حالی سیستم شبکه عصبی مصنوعی نتایج واقع‌بینانه‌تری از پیش‌بینی را ارائه می‌کند. هدف این مطالعه، بررسی خصوصیات مکانیکی بتن سبک سازه‌ای حاوی لیکا و مقادیر مختلف الیاف بازالت و همچنین مواد پوزولانی (دوده سیلیس و خاکستر بادی) می‌باشد. علاوه بر این، سیستم استنتاج عصبی- فازی سازگار (ANFIS) به‌منظور پیش‌بینی نتایج تجربی نیز لحاظ گردید.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

در تحقیق حاضر از سیمان تیپ یک ۴۲۵ آبی یک مطابق استاندارد ASTM C150 (۲۰۲۰) استفاده شده است. همچنین از دو پوزولان معدنی دوده سیلیس و خاکستر بادی به‌عنوان جایگزین بخشی از وزن سیمان در طرح‌های اختلاط استفاده شده است. در جدول (۲)، خواص فیزیکی و ترکیب شیمیایی مواد سیمانی به نمایش درآمده است. سنگ‌دانه مصرفی در این پژوهش شامل: درشت‌دانه از نوع سبک‌دانه لیکا (رس منبسط‌شده) و ریزدانه از نوع ماسه رودخانه‌ای شسته شده (دارای چگالی ۲/۵۶ و حداکثر قطر ۴/۷۵ میلی‌متر) بود. لازم به ذکر است که سبک‌دانه مصرفی از نوع سازه‌ای و تهیه‌شده از کارخانه لیکای ساوه می‌باشد. چگالی دانه‌های لیکا در محدوده اندازه ۴/۷۵ تا ۹/۵ میلی‌متر برابر $1/01 \text{ gr/cm}^3$ بود. همچنین جذب آب ۲۴ ساعته لیکای مخلوط ۱۱٪ و جذب آب نیم‌ساعته آن ۸٪ به‌دست‌آمده است که منطبق با محدودیت‌های استاندارد ASTM C330 (۲۰۱۷) می‌باشد. الزاماتی برای سبک‌دانه‌ها ذکر گردیده است. الیاف مصرفی از نوع بازالت خردشده با حداکثر طول ۱۲ میلی‌متر و تهیه‌شده از شرکت Tila بود. مشخصات الیاف به‌صورت (قطر: ۱۳ میکرون، چگالی: برابر $2/67 \text{ gr/cm}^3$ ، مدول الاستیسیته: ۸۵ تا ۹۵ گیگاپاسکال، مقاومت کششی: ۲۸۰۰ تا ۳۲۰۰ مگاپاسکال و کشامدگی: ۳/۲ درصد) می‌باشد.

مکانیکی نداشت اما با افزایش آن تا ۰/۵٪ موجب بهبود مقاومت خمشی و چقرمگی بتن می‌شود.

Badogiannis و همکاران (۲۰۱۹) به ارزیابی مقاومت مکانیکی بتن سبک حاوی پومیس، تقویت‌شده با الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن پرداختند. آن‌ها بهبود ۱۶ تا ۷۶ درصد مقاومت فشاری و به‌علاوه بهبود ۴۷ تا ۱۱۰ درصد مقاومت خمشی بتن سبک مسلح به الیاف را گزارش کردند. همچنین آن‌ها تأثیر افزودن الیاف از نظر نسبت پواسون و مدول الاستیسیته را نسبتاً ناچیز رؤیت کردند.

Gesog'lu و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی بتن سبک حاوی خاکستر بادی و دوده سیلیس پرداختند. آن‌ها گزارش کردند، استفاده از دوده سیلیس خواص مکانیکی بتن سبک را بهبود می‌بخشد اما بر انقباض بتن سبک تأثیر منفی دارد. به‌علاوه مطالعه آن‌ها انقباض بیشتر بتن سبک معمولی با نسبت آب به سیمان پایین‌تر را نسبت به آب به سیمان بالاتر را نشان داد.

Chindaprasirt و Rattanasak (۲۰۰۴) رفتار انقباض بتن سبک حاوی ترکیبات گلیکول^{۱۵} و خاکستر بادی را موردبررسی قرار دادند. مطالعه آن‌ها نشان داد افزودن ترکیبات گلیکول می‌تواند منجر به کاهش انقباض بتن سبک شود و علاوه بر این جایگزینی بخشی از سیمان با خاکستر بادی نیز کاهش انقباض بتن سبک را نتیجه می‌دهد.

بسیاری از محققان برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)، منطق فازی^{۱۶} یا گاهی الگوریتم‌های ژنتیک (Genetic algorithm) استفاده می‌کنند. از طرف دیگر، مطالعات تحقیقاتی بسیار کمی نیز وجود دارد که فقط کاربرد ANFIS را به‌منظور بهبود یادگیری و سازگاری خودکار بررسی کرده‌اند.

Sohani و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی مقاومت خمشی بتن سبک EPS^{۱۷} با استفاده از مدل‌های رگرسیون، شبکه عصبی و ANFIS پرداختند. مطالعه آن‌ها نشان داد در بین کلیه مدل‌های مذکور، تابع عضویت زنگوله‌ای شکل مدل ANFIS دارای بهترین عملکرد است و می‌تواند مقاومت خمشی بتن سبک‌وزن EPS را بهتر از سایر مدل‌ها پیش‌بینی کند. همچنین در مطالعه دیگر Sadrmomtazi و همکاران (۲۰۱۳) مقاومت فشاری بتن سبک

جدول ۲- خواص فیزیکی و شیمیایی مواد سیمانی

چگالی	خواص فیزیکی								ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)
	سطح مخصوص (m ² /kg)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	
۳/۱۵	۳۱۰	۶۴/۳۴	۲۱/۰۸	۵/۳۶	۳/۶۳	۲	۰/۸۲	۰/۵	۲/۱
۲/۲	۱۹۵۰۰	۱/۵	۹۰	۱	۲	۲	۰	۰	۰
۲/۵۴	۴۱۰	۸/۶	۵۹/۳	۲۳/۴	۴/۸	۰/۶	-	۳/۲	۰/۱

نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر در سن ۲۸ روز انجام شد. جذب آب نمونه‌های مورد آزمایش روی نمونه‌های مکعبی ۱۵۰ میلی‌متری طبق استاندارد ASTM C140-01 (۲۰۱۸) در سن ۲۸ و ۹۰ روز انجام گرفت. مدول الاستیسیته مطابق استاندارد ASTM C496 (۱۹۹۶) روی نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر در سن ۲۸ روز انجام شد. مدول الاستیسیته طبق رابطه (۹) محاسبه و اندازه‌گیری شد.

$$E = \frac{f_c}{\epsilon} \quad (9)$$

که در آن E مدول الاستیسیته بتن (GPa) و ϵ کرنش متناظر تنش در محدوده ارتجاعی بتن می‌باشد. آزمایش انقباض یا جمع‌شدگی مطابق استاندارد ASTM C157 (۲۰۱۷) روی نمونه‌های ۲۸۰×۷۰×۷۰ میلی‌متر در سن ۷ و ۲۸ و ۹۰ روز انجام شد. برای اندازه‌گیری انقباض، پس از خارج کردن نمونه‌ها از حوضچه در سن‌های موردنظر، با استفاده از دستگاه شاخص استاندارد اندازه‌گیری، انقباض آن‌ها اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است که نتایج خواص بتن‌های سبک سخت‌شده در این مقاله، حاصل از اندازه‌گیری نتیجه متوسط سه نمونه می‌باشد.

۳- بحث و بررسی نتایج

۳-۱- اسلامپ و وزن مخصوص

نتایج حاصل از آزمایش اسلامپ در جدول (۳) آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، بالاترین مقادیر اسلامپ متعلق به مخلوط‌های گروه FA^{۱۸} می‌باشند که بین ۲۱ تا ۳۲ درصد در مقایسه با مخلوط‌های فاقد پوزولان رشد داشته است. افزایش اسلامپ بتن سبک با حضور خاکستر بادی، توسط L₀ و همکاران (۲۰۰۴) نیز گزارش گردید. ذرات ریز خاکستر بادی بارهای منفی (سطحی) سیمان را جذب کرده و از پدیده فلوکولاسیون^{۱۹} (کلوخه‌ای شدن ضعیف) جلوگیری می‌کند که موجب توزیع و پخش بهتر ذرات سیمانی می‌شوند. همچنین شکل کروی و سطح صاف ذرات خاکستر بادی باعث کاهش اصطکاک ذرات بتن شده و به اصطلاح باعث روغن‌کاری میان

۳-۲- ساخت و عمل‌آوری مخلوط‌های بتنی سبک

در مجموع ۲۱ طرح اختلاط بتن سبک در این تحقیق طراحی و ساخته شد که نسبت آب به مواد سیمانی و عیار مواد سیمانی آن‌ها ثابت و به ترتیب ۰/۴ و ۴۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شد. در مخلوط‌های بتن سبک دوده سیلیس و خاکستر بادی هرکدام ۱۰ درصد وزنی جایگزین سیمان شدند. الیاف بازالت نیز در مقادیر ۰، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ درصد حجم مخلوط بتن براساس مطالعات گذشته (Fan و همکاران، ۲۰۱۱؛ Ralegonkar و همکاران، ۲۰۱۸) مورد استفاده قرار گرفت. لازم به ذکر است که برای ساخت مخلوط‌ها ابتدا سبک‌دانه لیکا با آب مازاد (جذب آب لیکا) وارد میکسر شده و پس از حدود ۳۰ ثانیه مخلوط شدن، ماسه و نصف آب اختلاط به مخلوط بتن اضافه گردید و بعد از چند دقیقه مابقی مصالح شامل مواد سیمانی، باقی‌مانده آب و فوق‌روان‌کننده به آن اضافه شد. پس از آماده شدن مخلوط تازه آزمایش اسلامپ انجام گرفت. بعد از آن به منظور ارزیابی خواص سخت‌شده، مخلوط در قالب‌های از پیش آماده ریخته شده و تحت ۲۴ ساعت عمل‌آوری با پوشش پلاستیکی قرار گرفتند. سپس نمونه‌ها از قالب بیرون آورده شده و در دمای اتاق و در حوضچه‌های آب تا روز آزمون نگهداری شدند. در جدول (۳) مشخصات طرح اختلاط‌های بتن سبک مشاهده می‌شود.

۳-۲- چیدمان آزمایش‌ها

کارایی بتن تازه با استفاده از آزمایش اسلامپ مطابق استاندارد ASTM C143 (۲۰۱۵) انجام شد. آزمایش مقاومت فشاری براساس استاندارد BS-EN 12390-3 (۲۰۰۲) روی نمونه‌های مکعبی ۱۵۰ میلی‌متری در روزهای ۷ و ۲۸ و ۹۰ روز انجام شد. نمونه‌های بتنی تحت بار یکنواخت و سرعت ۲/۵ مگاپاسکال بر ثانیه بارگذاری شدند. آزمایش مقاومت خمشی روی نمونه‌های منشوری با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۳۵۰ میلی‌متر در سن ۲۸ روز مطابق استاندارد ASTM C1018 (۱۹۹۷) انجام شد. نمونه‌های منشوری تحت خمش بار سه نقطه‌ای با سرعت بارگذاری ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه بارگذاری شده‌اند. آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (به روش دونیم شدن) براساس استاندارد ASTM C496 (۱۹۹۶) روی

درصد موجب افت اسلامپ شده است. مطابق نتایج جدول (۳) مشاهده می‌شود که مخلوط‌های بتنی حاوی پوزولان (گروه SF یا FA) دارای وزن مخصوص نهایی کم‌تری در مقایسه با نمونه‌ها فاقد پوزولان (OPC) می‌باشند. با حضور مواد پوزولانی در مخلوط‌ها و جایگزینی آن‌ها با سیمان، وزن مخصوص بتن کاهش می‌یابد که علت آن وزن مخصوص پایین‌تر پوزولان‌های جایگزین شده نسبت به سیمان می‌باشد. حضور الیاف بازالت موجب افزایش وزن مخصوص نمونه‌ها شده است. که دلیل آن را می‌توان به وزن مخصوص بالای الیاف بازالت نسبت داد.

اجزاء بتن می‌شود که در نهایت سهولت در روانی و بهبود کارایی را نتیجه می‌دهد. با این حال حضور دوده سیلیس موجب کاهش اسلامپ بین ۸ تا ۲۴ درصد در مقایسه با مخلوط فاقد پوزولان شده که عمده دلیل نرمی بسیار بالای آن است که منجر به بروز پدیده خود خشک‌شدگی در مخلوط‌های بتنی می‌شود.

Madandoust و همکاران (۲۰۱۱) نیز کاهش اسلامپ بتن سبک در حضور دوده سیلیس را نتیجه گرفتند. با افزودن الیاف همان‌گونه که انتظار می‌رود اسلامپ روندی نزولی را در پیش گرفته است. که به نظر می‌رسد افزودن الیاف در مخلوط‌های گروه OPC^۲ و SF^۱ و FA و ترکیبی به ترتیب تا ۲۵، ۳۷، ۳۰ و ۲۱

جدول ۳- مشخصات طرح‌های اختلاط بتن سبک ساخته شده در هر مترمکعب (کیلوگرم)

گروه	مشخصه مخلوط‌ها	چسباننده / آب	سیمان	خاکستر بادی	دوده سیلیس	ماسه	لیکا	الیاف بازالت	اسلامپ (mm)	وزن مخصوص (kg/m ³)
سیمان	CB0	۰/۴	۴۵۰	۰	۰	۱۱۲۰	۲۷۰	۰	۹۰	۱۸۴۷
	CB1	۰/۴	۴۵۰	۰	۰	۱۱۲۰	۲۷۰	۲/۷۵	۸۶	۱۸۵۵
	CB2	۰/۴	۴۵۰	۰	۰	۱۱۲۰	۲۷۰	۵/۵	۸۴	۱۸۶۲
	CB3	۰/۴	۴۵۰	۰	۰	۱۱۲۰	۲۷۰	۸/۲۵	۸۰	۱۸۶۹
	CB4	۰/۴	۴۵۰	۰	۰	۱۱۲۰	۲۷۰	۱۱	۷۵	۱۸۷۶
خاکستر بادی	CB5	۰/۴	۴۵۰	۰	۰	۱۱۲۰	۲۷۰	۱۳/۷۵	۶۷	۱۸۸۸
	FAB0	۰/۴	۴۰۵	۴۵	۰	۱۱۲۰	۲۷۰	۰	۱۱۹	۱۸۲۹
	FAB1	۰/۴	۴۰۵	۴۵	۰	۱۱۲۰	۲۷۰	۲/۷۵	۱۱۳/۴	۱۸۳۴
	FAB2	۰/۴	۴۰۵	۴۵	۰	۱۱۲۰	۲۷۰	۵/۵	۱۱۰/۶	۱۸۴۰
	FAB3	۰/۴	۴۰۵	۴۵	۰	۱۱۲۰	۲۷۰	۸/۲۵	۱۰۰/۸	۱۸۴۹
دوده سیلیس	FAB4	۰/۴	۴۰۵	۴۵	۰	۱۱۲۰	۲۷۰	۱۱	۹۲/۴	۱۸۵۷
	FAB5	۰/۴	۴۰۵	۴۵	۰	۱۱۲۰	۲۷۰	۱۳/۷۵	۸۲/۶	۱۸۶۶
	SFB0	۰/۴	۴۰۵	۰	۴۵	۱۱۲۰	۲۷۰	۰	۸۲	۱۸۰۵
	SFB1	۰/۴	۴۰۵	۰	۴۵	۱۱۲۰	۲۷۰	۲/۷۵	۷۸	۱۸۱۱
	SFB2	۰/۴	۴۰۵	۰	۴۵	۱۱۲۰	۲۷۰	۵/۵	۷۳	۱۸۲۱
خاکستر بادی + دوده سیلیس	SFB3	۰/۴	۴۰۵	۰	۴۵	۱۱۲۰	۲۷۰	۸/۲۵	۶۴	۱۸۳۰
	SFB4	۰/۴	۴۰۵	۰	۴۵	۱۱۲۰	۲۷۰	۱۱	۵۹	۱۸۳۸
	SFB5	۰/۴	۴۰۵	۰	۴۵	۱۱۲۰	۲۷۰	۱۳/۷۵	۵۱	۱۸۴۸
	FASFB0	۰/۴	۳۶۰	۴۵	۴۵	۱۱۲۰	۲۷۰	۱	۴۸/۶	۱۸۱۴
	FASFB2	۰/۴	۳۶۰	۴۵	۴۵	۱۱۲۰	۲۷۰	۵/۵	۴۳/۲	۱۸۳۳
FASFB4	۰/۴	۳۶۰	۴۵	۴۵	۱۱۲۰	۲۷۰	۱۱	۳۷/۸	۱۸۴۶	

راهنما: (۱) در جدول فوق OPC، FA، SF و FA+SF به ترتیب بیانگر مخلوط‌های (بدون پوزولان)، (حاوی خاکستر بادی)، (حاوی دوده سیلیس) و (ترکیب هر دو پوزولان) است. (۲) در قسمت نام طرح، B بیانگر الیاف بازالت و عدد مقابل آن حجم مصرفی آن را نشان می‌دهد.

بین ۳-۵ درصد و بین ۳-۰ درصد تقسیم‌بندی می‌شود. در تحقیق حاضر، تمامی ۲۱ طرح اختلاط دارای جذب آب اولیه کم‌تر از ۳ درصد است که بیانگر قرارگیری کیفیت بتن‌های سبک ساخته شده در رده "خوب" است. مطابق نتایج ملاحظه می‌گردد، حضور پوزولان‌ها سبب کاهش جذب آب نهایی شده است به نحوی که جذب آب نهایی گروه مخلوط‌های FA و SF نسبت به سری OPC

۳-۲- جذب آب

نتایج جذب آب اولیه و نهایی نمونه‌های بتن سبک الیافی در جدول (۳) ارائه شده است. جذب آب بالای سبک‌دانه‌ها (از جمله لیکا) می‌تواند بر عملکرد بلندمدت مخلوط‌ها تأثیرگذار باشد. طبق آیین‌نامه CEB-FIP (۱۹۸۹) کیفیت بتن به سه دسته: ضعیف، متوسط و خوب بر اساس جذب آب اولیه به ترتیب ۵ درصد و بالاتر،

از نتایج چنین برداشت می‌شود که خاکستر بادی در سنین ۷ و ۲۸ روز نرخ افزایش مقاومت پایین‌تری در مقایسه با دوده سیلیس را نشان می‌دهد که این موضوع را می‌توان به سرعت کم واکنش شیمیایی و خاکستر بادی نسبت داد. با این حال، با افزایش زمان تا ۹۰ روز و کامل‌تر شدن فرآیند هیدراتاسیون اختلاف مقاومت فشاری روندی صعودی را در پیش می‌گیرد. در سنین ۷ یا ۲۸ مقاومت فشاری مخلوط‌های ترکیبی (حاوی دو پوزولان) در مقایسه با مخلوط‌های حاوی دوده سیلیسی به نسبت کم‌تر است در حالی که در مقایسه با مخلوط‌های حاوی خاکستر بادی بیشتر است. این موضوع بیانگر قدرت بالای دوده سیلیس در تسریع واکنش‌های شیمیایی است که ارتباط مستقیم با ریزی ذرات دوده سیلیس دارد.

از سویی، با افزایش میزان استفاده از الیاف بازالت، مقاومت فشاری کاهش پیدا کرده است. به‌طور مثال، در سن ۲۸ روز با افزایش الیاف تا ۰/۵ درصد، مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی خاکستر بادی، دوده سیلیس و فاقد پوزولان به ترتیب حداکثر ۱۲، ۷ و ۱۳ درصد بود. مقدار اخیر برای مخلوط‌های ترکیبی پوزولانی ۶ درصد بود. در نتیجه، بدیهی است که اضافه کردن الیاف بازالت روشی مؤثر برای افزایش مقاومت فشاری نخواهد بود (Borhan, ۲۰۱۲). در تمامی مخلوط‌ها با افزایش سن، نرخ افت مقاومت فشاری محسوس‌تر به نظر می‌رسد. ضمناً تمامی طرح‌های ساخته‌شده در این تحقیق در محدوده بتن سبک سازه‌ای قرار می‌گیرند، به طوری که کم‌ترین مقاومت ۲۸ روزه برابر ۲۳ مگاپاسکال است که از حداقل مقاومت فشاری ۲۸ روزه استاندارد یعنی ۱۷ مگاپاسکال بیشتر می‌باشد.

۳-۴- مقاومت ویژه و مدول الاستیسیته

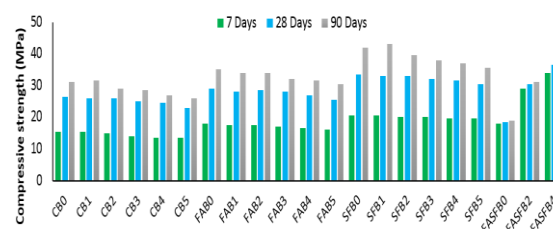
نسبت مقاومت فشاری ۲۸ روزه به چگالی بتن را عملکرد سازه‌ای بتن می‌نامند (Georg, ۲۰۰۹). نتایج مقاومت ویژه مخلوط‌های بتن سبک در جدول (۴) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مخلوط‌های حاوی دوده سیلیس عملکرد سازه‌ای بالاتری را به خود اختصاص داده‌اند. در حالی که مخلوط‌های فاقد پوزولان کم‌ترین عملکرد سازه‌ای را داشتند. در مجموع طرح SFB0 و CB5 با عملکرد سازه‌ای ۱۸/۵ و ۱۲/۲ به ترتیب دارای بالاترین و پایین‌ترین عملکرد سازه‌ای هستند. حضور الیاف بازالت به‌طور کلی سبب کاهش عملکرد سازه‌ای مخلوط‌های بتن سبک می‌گردد. با این حال شدت افت عملکرد در مخلوط‌های بدون پوزولان با افزایش درصد الیاف، در مقایسه با مخلوط‌های پوزولانی بیشتر است. به‌طور کلی حضور الیاف در سری مخلوط‌های OPC، SF و FA به ترتیب ۱۵، ۱۱ و ۱۴ درصد عملکرد

(با میزان یکسان استفاده از الیاف)، به ترتیب تا ۱۰ و ۳۸ درصد کاهش داشته است. نتیجه حاصل توسط AzariJafari و همکاران (۲۰۱۸) نیز گزارش شده است. حضور الیاف موجب افزایش جذب آب در گروه‌های مخلوط بتنی OPC، FA و SF به ترتیب تا ۴۶، ۵۴ و ۶۶ درصد شده است. عمده دلیل این موضوع را می‌توان به نحوه اختلاط و نیز توزیع الیاف در حجم بتن نسبت داد. با افزایش مقدار الیاف ریسک گلوله‌ای و توده‌ای شدن مخلوط بالا می‌رود. همچنین مطابق برخی تحقیقات، به دلیل آب‌گریز بودن الیاف بازالت پس از ریختن مخلوط بتن در قالب‌ها، بخشی از آب مربوط به کارایی در بخش تحتانی الیاف تجمع کرده و پس از مدتی جذب ماتریس سیمانی می‌شود که این موضوع موجب بروز ریز حفرات می‌شود که در نهایت افزایش جذب آب و نیز افت مقاومت فشاری را موجب می‌شود.

۳-۳- مقاومت فشاری

در اکثر مطالعات در زمینه تأثیر الیاف بازالت بر مقاومت فشاری، اذعان شده است که حضور این الیاف تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری ندارد و حتی در برخی مواقع موجب کاهش مقاومت می‌شود (Ralegaonkar و همکاران، ۲۰۱۸). نتایج مقاومت فشاری بتن‌های سبک الیافی در شکل (۴) و جدول (۴) نشان داده شده است. مطابق نتایج، همان‌طور که انتظار می‌رود، با بالا رفتن سن نمونه‌ها مقاومت فشاری تمامی مخلوط‌ها افزایش یافته است. این موضوع بیانگر تکمیل فرآیند هیدراتاسیون و تشکیل محصولات فرعی و ثانویه سیمانی (همچون ژل سیلیکات^{۲۲} کلسیم هیدراته و اترینگیت^{۲۳}) است. حضور پوزولان‌های خاکستر بادی و دوده سیلیس موجب بهبود مقاومت فشاری در مقایسه با نمونه‌های فاقد پوزولان شده است. Shannag (۲۰۰۰) نیز در مطالعه خود به این نتیجه اشاره کرده است.

در مطالعه حاضر، به‌طور مثال، در سن ۲۸ روز مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی خاکستر بادی و دوده سیلیس به ترتیب ۱۱ و ۲۹ درصد بیشتر از نمونه‌های فاقد پوزولان است. همچنین در مخلوط‌های ترکیبی مقدار افزایش مقاومت فشاری ۱۹ درصد است.



شکل ۴- نتایج مقاومت فشاری مخلوط‌های بتن سبک



شکل ۵- آزمایش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته

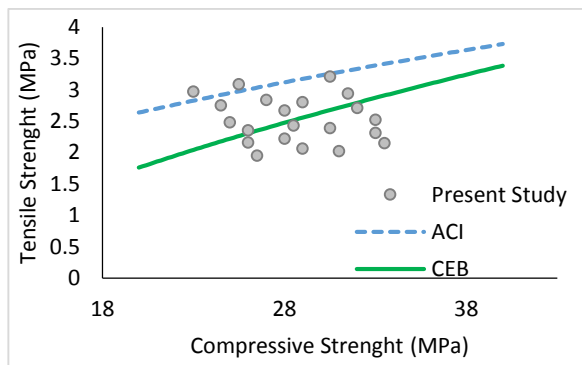
سازه‌های را کاهش داده است. مطابق با استاندارد NBR 8522 (۲۰۰۸)، که مطابق با استاندارد ASTM C 469 (۲۰۱۴) است، مدول الاستیسیته، که مربوط به مدول Secant است، براساس شیب یک خط مستقیم کشیده شده از مبدأ تا نقطه‌ای از منحنی تنش در مقابل تغییر شکل تعیین می‌شود که مطابق با ۰.۴٪ تنش گسیختگی در نمونه‌های استوانه‌ای است. سه نمونه از هر اختلاط در سن ۲۸ روزگی مورد تحلیل قرار گرفت. مدول الاستیسیته بتن (مدول یانگ) از اندازه‌گیری فرکانس رزونانس (عرضی) نمونه‌ها، طبق استاندارد ASTM C 215 (۲۰۱۹) تعیین شد. این مدول از ۳ نمونه استوانه‌ای (قطر ۱۵۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ سانتی‌متر) از هر اختلاط در سن ۲۸ روزگی تعیین شد. نتایج و نحوه اندازه‌گیری آزمایش مدول الاستیسیته طرح‌های بتنی سبک الیافی به ترتیب در جدول (۴) و شکل (۵) ارائه شده است.

جدول ۴- نتایج مقاومت فشاری، جذب آب، عملکرد سازه‌ای، مدول الاستیسیته و مقاومت خمشی مخلوط‌های بتن سبک

مشخصه مخلوط‌ها	مقاومت فشاری (MPa)			جذب آب (%)		عملکرد سازه‌ای (* 10 ⁻³ Mpa. m ³ /kg)	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت خمشی (MPa)	
	۷	۲۸	۹۰	اولیه	نهایی				
CB0	۱۵/۵	۲۶/۵	۳۱	۱/۷۳	۴/۲۹	۱۴/۳۵	۲۷/۷	۱۰/۷۷	
CB1	۱۵/۵	۲۶	۳۱/۵	۱/۸۴	۴/۶۶	۱۴/۰۲	۲۹/۴	۱۱/۱۴	
CB2	۱۵	۲۶	۲۹	۱/۹۷	۵/۱۶	۱۳/۹۶	۳۱/۲	۱۲/۴۲	
CB3	۱۴	۲۵	۲۸/۵	۲/۱۹	۵/۴۳	۱۳/۳۸	۳۲/۸	۱۳/۲۹	
CB4	۱۳/۵	۲۴/۵	۲۷	۲/۳۵	۵/۸۸	۱۳/۰۶	۳۳/۶	۱۴/۶۳	
CB5	۱۳/۵	۲۳	۲۶	۲/۵۶	۶/۲۷	۱۲/۱۸	۳۴/۳	۱۵/۹۲	
FAB0	۱۸	۲۹	۳۵	۱/۴۴	۳/۶۹	۱۵/۸۶	۲۸/۴	۱۱/۰۶	
FAB1	۱۷/۵	۲۸	۳۴	۱/۷۵	۴/۱۱	۱۵/۲۷	۲۹/۹	۱۲/۵۶	
FAB2	۱۷/۵	۲۸/۵	۳۴	۱/۹۲	۴/۵۶	۱۵/۴۹	۳۱/۶	۱۳/۸۱	
FAB3	۱۷	۲۸	۳۲	۲/۱۳	۴/۹۷	۱۵/۱۴	۳۲/۸	۱۴/۳۴	
FAB4	۱۶/۵	۲۷	۳۱/۵	۲/۲۹	۵/۳۸	۱۴/۵۴	۳۴/۴	۱۵/۷۸	
FAB5	۱۶	۲۵/۵	۳۰/۵	۲/۴۵	۵/۷۳	۱۳/۶۷	۳۵/۵	۱۷/۲۱	
SFB0	۲۰/۵	۳۳/۵	۴۲	۰/۲۶	۲/۴	۱۸/۵۶	۲۹/۱	۱۱/۱۹	
SFB1	۲۰/۵	۳۳	۴۳	۰/۴۱	۲/۸۲	۱۸/۲۲	۳۱/۳	۱۲/۸۳	
SFB2	۲۰	۳۳	۳۹/۵	۰/۵۸	۳/۳۶	۱۸/۱۲	۳۲/۱	۱۳/۹۱	
SFB3	۲۰	۳۲	۳۸	۰/۷۲	۳/۵۵	۱۷/۴۹	۳۳/۹	۱۵/۴۴	
SFB4	۱۹/۵	۳۱/۵	۳۷	۰/۸۹	۳/۷۲	۱۷/۱۴	۳۶/۵	۱۷/۶۶	
SFB5	۱۹/۵	۳۰/۵	۳۵/۵	۱/۱	۳/۹۹	۱۶/۵۰	۳۷/۱	۱۸/۱۳	
FASFB0	۱۸	۱۸/۵	۱۹	۰/۹۴	۳/۱۱	۱۷/۰۹	۲۸/۸	۱۰/۹۳	
FASFB2	۲۹	۳۰/۵	۳۱	۱/۲۸	۳/۴۵	۱۶/۶۴	۳۱/۹	۱۳/۵۱	
FASFB4	۳۴	۳۶/۶	۳۸/۵	۱/۴۷	۴/۲۲	۱۵/۷۱	۳۵/۱	۱۶/۶۳	

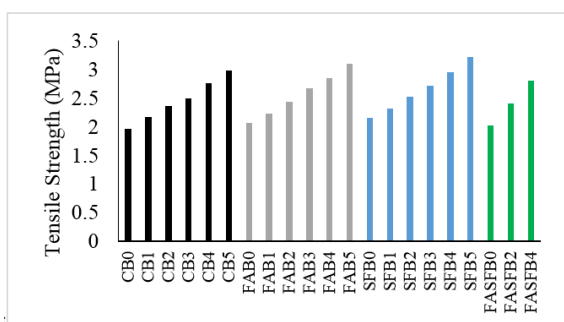
جدول ۵- نتایج مقاومت کششی مخلوط‌های بتن سبک (مطالعه حاضر، ACI و CEB)

مشخصه مخلوط‌ها	CB0	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	FAB0	FAB1	FAB2	FAB3	FAB4	FAB5	SFB0	SFB1	SFB2	مطالعه حاضر
مقاومت کششی (MPa)	۳/۰۴	۳/۰۱	۳/۰۱	۳/۰۱	۲/۹۵	۲/۹۲	۲/۸۳	۲/۱۸	۳/۱۲	۳/۱۵	۳/۱۲	۳/۰۷	۲/۹۸	۳/۴۱	۳/۳۹	۲/۵۲
	۲/۳۵	۲/۳۱	۲/۳۱	۲/۳۱	۲/۲۲	۲/۱۸	۲/۰۴	۲/۵۶	۲/۴۸	۲/۵۲	۲/۴۸	۲/۴۸	۲/۴۶	۲/۳۹	۲/۸۷	۲/۸۷

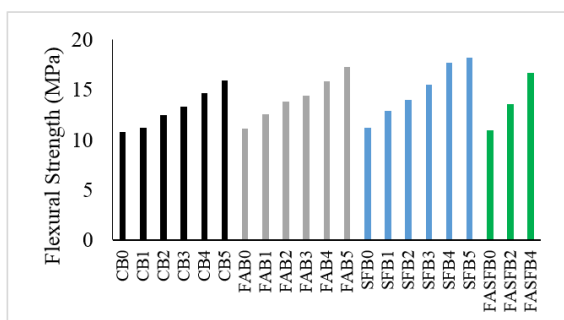


شکل ۶- مقایسه نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم با آیین‌نامه‌های ACI و CEB-FIB

نتایج و سیستم اندازه‌گیری مقاومت خمشی بتن‌های سبک نیز به ترتیب در شکل (۸) و (۹) به نمایش درآمده است. نتایج مقاومت کششی و خمشی روند مشابهی را طی می‌کنند. با حضور الیاف در بتن، مقاومت خمشی افزایش می‌یابد که دلیل آن مقاومت الیاف در برابر انتشار ترک‌ها و جلوگیری از شکست ناگهانی می‌باشد که سبب افزایش ظرفیت باربری می‌گردد. افزودن الیاف در سری مخلوط‌های بتنی OPC، FA و SF به ترتیب ۴۹، ۵۵ و ۶۲ درصد موجب رشد مقاومت خمشی شده است. مطالعه Jiang در سال ۲۰۱۴ نیز این امر را تأیید می‌کند. همچنین جایگزینی دوده سیلیس و خاکستر بادی نیز موجب بهبود مقاومت خمشی می‌شود.



شکل ۷- نتایج مقاومت کششی مخلوط‌های بتن سبک



شکل ۸- نتایج مقاومت خمشی مخلوط‌های بتن سبک

خصوصیات سبک‌دانه‌ها، مدول الاستیسیته بتن را تحت تأثیر قرار می‌دهند. از این رو می‌توان کاهش در میزان مدول الاستیسیته بتن سبک را ناشی از مدول الاستیسیته کمتر سبک‌دانه‌ها نسبت به خمیر سیمان و سنگ‌دانه‌ها دانست. همان‌طور که از نتایج دریافت می‌شود، حضور پوزولان موجب بهبود مدول الاستیسیته تا ۶ درصد شده است. حضور حداکثری الیاف موجب افزایش مدول الاستیسیته در سری مخلوط‌های OPC، FA و SF به ترتیب تا ۲۳، ۲۵ و ۲۷ درصد شده است. مطالعه Arslan (۲۰۱۶) نیز این نتیجه را بازگو می‌کند.

۳-۵- مقاومت کششی غیرمستقیم و خمشی

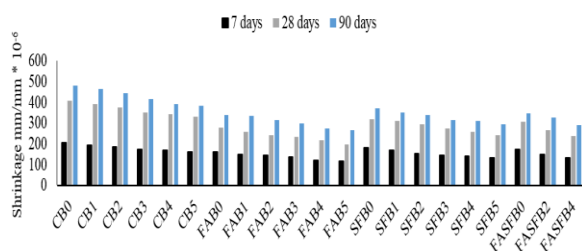
نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم بتن‌های سبک الیافی در جدول (۵) ارائه شده است. بر اساس استاندارد ASTM C 330 (۲۰۱۷) بتن‌های سبک‌دانه سازه‌ای باید دارای حداقل مقاومت کششی دونیم شدگی ۲ مگاپاسکال باشد. که در تحقیق حاضر به جز طرح CBO تمامی طرح‌ها شرط فوق را برآورده می‌سازند. همچنین در جدول (۵) نتایج مقاومت کششی این تحقیق با روابط آیین‌نامه‌های ACI363R (۱۹۹۷) و CEB-FIP (۱۹۸۹) مقایسه شده‌اند. جهت مقایسه نتایج، رابطه مقاومت کششی براساس مقاومت فشاری در دو آیین‌نامه ACI363R (۱۹۹۷) و CEB-FIP (۱۹۸۹) به ترتیب در روابط (۱۰) و (۱۱) ارائه شده است.

$$f_t = 0.59(f_c)^{0.5} \quad (10)$$

$$f_t = 1.56\left(\frac{f_c - 8}{10}\right)^{2/3} \quad (11)$$

در ادامه در شکل (۶) نتایج مقاومت کششی در برابر مقاومت فشاری حاصله از این تحقیق و آیین‌نامه‌ها به نمایش درآمده است. از نحوه توزیع مقادیر مقاومت کششی می‌توان دریافت که رابطه پیشنهادی آیین‌نامه CEB-FIP (۱۹۸۹) به نظر نزدیک به نتایج حاصل از این تحقیق است و درواقع رابطه ACI نتایج را دست بالا برآورد می‌کند. مطابق جدول (۵) و شکل (۷) می‌توان دریافت که حضور حداکثری الیاف در سری مخلوط‌های بتنی OPC، FA و SF به ترتیب موجب رشد مقاومت کششی تا ۵۲، ۵۰ و ۴۹ درصد شده است. بهبود حاصل، توسط Jiang و همکاران (۲۰۱۴) نیز گزارش شده است. همچنین جایگزینی دوده سیلیس و خاکستر بادی نیز به ترتیب تا ۱۰ و ۸ درصد موجب بهبود مقاومت کششی شده است. Gholhaki و Pachideh (۲۰۲۰) نیز بهبود مقاومت کششی بتن توسط پوزولان را نتیجه گرفتند.

نتایج مقدار کرنش حاصل از جمع‌شدگی در شکل (۱۱) ارائه شده است. این پدیده می‌تواند موجب بروز تغییرشکل‌های ناخواسته، تغییر در توزیع تنش و حتی ترک‌خوردگی اعضای بتنی گردد. در اثر از دست رفتن آب بتن، تنش‌هایی کششی سطحی ایجاد می‌شود که منجر به ایجاد ترک در بتن می‌گردد. مقدار این جمع‌شدگی به عوامل متعددی از جمله شرایط محیطی نظیر درجه حرارت و رطوبت نسبی هوا، نسبت آب به سیمان، حجم آب مصرفی، نوع سیمان و مواد چسباننده، نوع سنگ‌دانه از نظر جذب آب و جمع‌شدگی خود سنگ‌دانه در اثر از دست دادن آب، مدول الاستیسیته سنگ‌دانه و تراکم بتن بستگی دارد.



شکل ۱۱- نتایج جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن مخلوط‌های بتن سبک

همان‌طور که در شکل (۱۱) ملاحظه می‌گردد، حضور پوزولان‌های دوده سیلیس و خاکستر بادی سبب کاهش جمع‌شدگی به ترتیب تا ۲۳ و ۲۹ درصد در سن ۲۸ و ۹۰ روز شده است. با توجه به عملکرد خاکستر بادی در درازمدت به دلیل سرعت کم واکنش آن در سن ۹۰ روز نرخ تأخیر در بروز جمع‌شدگی آن نسبت به دوده سیلیس بالاتر است. کاهش جمع‌شدگی بتن توسط محققین دیگر نیز گزارش گردید (Güneyisi و همکاران، ۲۰۰۸، Murnal؛ Kate، ۲۰۱۳). علاوه بر این در مورد تأثیر حضور الیاف بازالت بر جمع‌شدگی می‌توان بیان کرد که حضور الیاف موجب کاهش انقباض نمونه‌های بتن سبک شده است. به طوری که با افزودن الیاف تا ۰/۵ درصد حجمی، انقباض در مخلوط‌های گروه OPC در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه به ترتیب حداکثر ۲۱، ۱۹ و ۲۰ درصد کاهش می‌یابد. مقادیر فوق برای مخلوط‌های گروه FA و SF به ترتیب (۲۷، ۲۸ و ۲۱ درصد) و (۲۵، ۲۶ و ۲۰ درصد) بود. Jiang و همکاران (۲۰۱۰) کاهش انقباض بتن توسط الیاف را گزارش کردند.



شکل ۹- آزمایش مقاومت خمشی

۳-۶- انقباض

برای اندازه‌گیری جمع‌شدگی یا همان انقباض، نمونه‌های منشوری به ابعاد ۷۰×۷۰×۲۸۰ میلی‌متر مورد آزمایش قرار گرفتند. لوگوهای (پولک مختص این آزمایش) بر روی این نمونه‌ها به فاصله ۱۵۰ میلی‌متر از همدیگر چسبانده شد و سپس در محیطی خشک قرار گرفتند. سپس به‌طور متناوب تا سن ۹۰ روزگی با استفاده از ابزار مخصوصی موسوم به گیج، اقدام به اندازه‌گیری تغییر طول نمونه برای تعیین میزان انقباض شد. جهت مشخص نمودن میزان جمع‌شدگی نمونه منشوری در سنین مختلف، کافی است که تکیه‌گاه‌های دستگاه را بر روی لوگوهای تعبیه‌شده، قرار داده و مقدار عددی را که گیج نشان می‌دهد را قرائت نمود. تفاوت مقادیر قرائت‌شده در سنین مختلف، تغییر طول مربوطه را نشان می‌دهد که نمونه‌ای از آن در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۱۰- اندازه‌گیری انقباض نمونه منشوری

پیش‌بینی نتایج تجربی پی برد. شکل (۱۲) همبستگی بسیار خوب، بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج تخمین زده‌شده برای مقاومت فشاری بتن را نشان می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر اثر الیاف بازالت بر بتن‌های سبک ساخته‌شده با دوده سیلیس و خاکستر بادی بررسی و نتایج آن استفاده سیستم منطق فازی مقایسه شد. خلاصه نتایج حاصل از آزمایش‌ها به صورت زیر است:

۱- میزان اسلامپ مخلوط‌های گروه FA بین ۲۱ تا ۳۲ درصد در مقایسه با مخلوط‌های فاقد پوزولان رشد داشت درحالی‌که حضور دوده سیلیس موجب کاهش آن بین ۸ تا ۲۴ درصد شد. همچنین افزودن الیاف در مخلوط‌های گروه OPC و SF و FA و ترکیبی به ترتیب تا ۲۵، ۳۷، ۳۰ و ۲۱ درصد موجب افت اسلامپ می‌شود.

۲- جذب آب اولیه تمامی مخلوط‌ها کم‌تر از ۳ درصد می‌باشد که طبق استاندارد CEB-FIP بیانگر قرارگیری کیفیت بتن‌های سبک ساخته‌شده در رده "خوب" است.

۳- حضور پوزولان‌های خاکستر بادی و دوده سیلیس موجب بهبود مقاومت فشاری در مقایسه با نمونه‌های فاقد پوزولان شده است. به‌طور مثال، در سن ۲۸ روز مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی خاکستر بادی و دوده سیلیس به ترتیب ۱۱ و ۲۹ درصد رشد کرده است. علی‌رغم کاهش مقاومت فشاری با به‌کارگیری الیاف، تمامی طرح‌های ساخته‌شده در محدوده بتن سبک سازه‌ای (بیشتر از ۱۷ مگاپاسکال) قرار می‌گیرند.

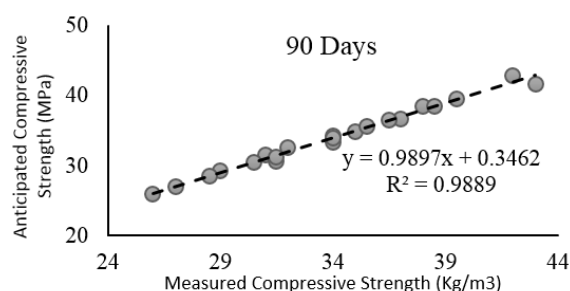
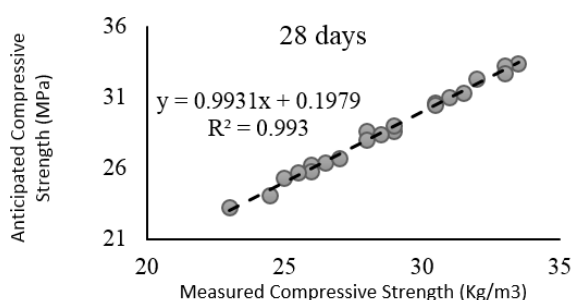
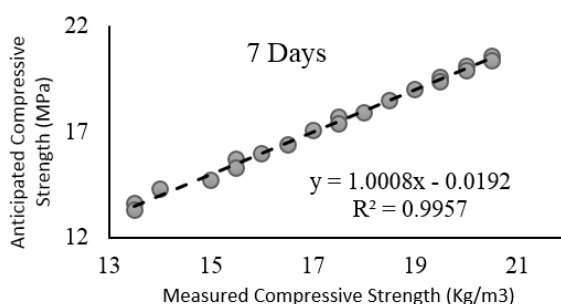
۴- عملکرد سازه‌ای مخلوط‌های حاوی دوده سیلیس در بالاترین سطح (نسبت مقاومت فشاری به چگالی ۱۸/۵) قرار دارد. افزودن حداکثر مقدار الیاف در سری مخلوط‌های OPC، SF و FA به ترتیب ۱۵، ۱۱ و ۱۴ درصد عملکرد سازه‌ای را کاهش داده است.

۵- حضور حداکثری الیاف در سری مخلوط‌های بتنی OPC، SF و FA به ترتیب موجب رشد مقاومت کششی تا ۵۲، ۵۰ و ۴۹ درصد شده است. نحوه توزیع مقادیر مقاومت کششی بیانگر برآورد نزدیک به واقعیت نتایج توسط رابطه پیشنهادی آیین‌نامه CEB-FIP بود درحالی‌که رابطه ACI نتایج را دست بالا برآورد می‌کند.

۶- حضور پوزولان‌های دوده سیلیس و خاکستر بادی سبب کاهش جمع‌شدگی به ترتیب تا ۲۳ و ۲۹ درصد شده است. همچنین با حضور الیاف تا ۰/۵ درصد حجمی، انقباض در

۴- تحلیل و پیش‌بینی نتایج با سیستم استنتاج عصبی فازی سازگار تصحیح‌شده

نتایج نشان داد که MF گائوسی^{۲۴} شکل، بهترین پیش‌بینی‌ها را برای هر ساختار FIS ارائه می‌دهد. در این مطالعه، هر دو روش هیبرید و Back propa مورد آزمایش قرار گرفتند و در نهایت روش هیبریدی به دلیل پیش‌بینی بهتر نتایج آزمایشگاهی انتخاب شد. برای به‌دست آوردن بهترین نتایج از مدل ANFIS با حداقل خطاها^{۲۵} در آموزش و فرآیند تست داده از روش بهینه‌سازی ترکیبی با ۲۰ تعداد دوره استفاده شد.



شکل ۱۲- پیش‌بینی مقاومت فشاری (۷، ۲۸ و ۹۰ روزه) بتن

سبک با ANFIS در برابر نتایج آزمایشگاهی

تعداد دوره برای هر مدل FIS ثابت نیست و با آزمایش و خطا به‌دست آمده است. پیش‌بینی ANFIS و مقاومت فشاری بتن سبک در برابر نتایج آزمایشگاهی در شکل (۱۲) ارائه شده است. از نتایج به‌دست آمده می‌توان دریافت که مقادیر پیش‌بینی‌شده با مقادیر تجربی هم‌خوانی مناسبی دارند. با توجه به ضریب رگرسیون حاصله (بیشتر از ۰/۹۵)، می‌توان به توانایی بالای این سیستم در

- with short basalt fibre", *Materials & Design*, 2012, 42, 265-271.
- Chen B, Liu J, "Residual strength of hybrid-fiber-reinforced high-strength concrete after exposure to high temperatures", *Cement and Concrete Research*, 2004, 34 (6), 1065-1069.
- Chindaprasirt P, Rattanasak U, "Shrinkage behavior of structural foam lightweight concrete containing glycol compounds and fly ash", *Materials & Design*, 2011, 32 (2), 723-727.
- Colangelo F, Cioffi R, Liguori B, Iucolano F, "Recycled polyolefins waste as aggregates for lightweight concrete", *Composites Part B: Engineering*, 2016, 106, 234-241.
- Dabbagh H, Mohammaddoost H, "Influence of fiber geometry on the mechanical properties of structural steel fiber lightweight concrete made with Scoria aggregate", *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2017, 4 (1), 17-25.
- Du WL, Ho D, Capretz LF, "Improving software effort estimation using neuro-fuzzy model with SEER-SEM", arXiv preprint arXiv: 1507.06917, 2015.
- Euro-International Committee for Concrete. CEB-FIP: Diagnosis and Assessment of Concrete Structures: State of the Art Report, Euro-International Committee for Concrete, 1989.
- Fan FL, Xu JY, Bai EL, He Q, "Experimental study on impact-mechanics properties of basalt fibre reinforced concrete", In *Advanced Materials Research*, 2011, 168, 1910-1914.
- Fashandi H, Pakravan HR, Latifi M, "Application of modified carpet waste cuttings for production of eco-efficient lightweight concrete", *Construction and Building Materials*, 2019, 198, 629-637.
- Gao J, Sun W, Morino K, "Mechanical properties of steel fiber-reinforced, high-strength, lightweight concrete", *Cement and Concrete Composites*, 1997, 19 (4), 307-313.
- Gesoğlu M, Özturan T, Güneyisi E, "Shrinkage cracking of lightweight concrete made with cold-bonded fly ash aggregates", *Cement and concrete research*, 2004, 34 (7), 1121-1130.
- Ghasemzadeh Mousavinejad SH, Ghorbani Shemshad S, "Effect of silica fume and nano silica on mechanical properties of fiber-reinforced lightweight concrete", *Journal of Civil Engineering*, 2018, 31 (2), 129-141.
- Ghorbanzadeh O, Rostamzadeh H, Blaschke T, Gholaminia K, Aryal J, "A new GIS-based data mining technique using an adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) and k-fold cross-validation approach for land subsidence susceptibility mapping", *Natural Hazards*, 2018, 94, 497-517.
- Güler I, Übeyli ED, "Adaptive neuro-fuzzy inference system for classification of EEG signals using wavelet coefficients", *Journal of neuroscience methods*, 2005, 148 (2), 113-121.
- Güneyisi E, Gesoğlu M, Mermerdaş K, "Improving strength, drying shrinkage, and pore structure of concrete using metakaolin", *Materials and structures*, 2008, 41, 937-949.
- Hejazi M, Fathi F, Sadrarhami HR, "Study of mechanical properties of structural lightweight concrete مخلوط‌های OPC، FA و SF به‌ترتیب حداکثر ۱۹، ۲۸ و ۲۶ درصد کاهش می‌یابد.
- ۷- در روش تحلیل ANFIS نتایج مطلوبی به‌دست آمد به‌طوری‌که با دقت کمتر از دو درصد نسبت به نتایج آزمایشگاهی حکایت از دقت بالای این مدل دارد.
- ### ۶- مراجع
- Abnt NBR, 8522: "Concreto-Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão", Rio de Janeiro, 2008.
- Arslan ME, "Effects of basalt and glass chopped fibers addition on fracture energy and mechanical properties of ordinary concrete: CMOD measurement", *Construction and Building Materials*, 2016, 114, 383-391.
- Aslam M, Shafigh P, Nomeli MA, Jumaat MZ, "Manufacturing of high-strength lightweight aggregate concrete using blended coarse lightweight aggregates", *Journal of Building Engineering*, 2017, 13, 53-62.
- ASTM A, a387/A387M-17a "standard specification for pressure Vessel Plates, Alloy steel, Chromium-Molybdenum", West Conshohocken (PA): ASTM International, 2017.
- ASTM C, "Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete", ASTM C157-08, 2008.
- Astm C, 1018: "Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading)", American Society of Testing Materials, USA, 1997.
- ASTM C, 496-96, "Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens", 1996.
- ASTM C150/C150M-20, "Standard specification for Portland cement", Technical Report, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.
- ASTM I, "Standard test methods for sampling and testing concrete masonry units and related units. ASTM C140/C140M-20, 2018.
- Azarijafari H, Tajadini A, Rahimi M, Berenjian J, "Reducing variations in the test results of self-consolidating lightweight concrete by incorporating pozzolanic materials", *Construction and Building Materials*, 2018, 166, 889-897.
- Badogiannis EG, Christidis KI, Tzanetatos GE, "Evaluation of the mechanical behavior of pumice lightweight concrete reinforced with steel and polypropylene fibers", *Construction and Building Materials*, 2019, 196, 443-456.
- Bate SCC, "Guide for structural lightweight aggregate concrete: report of ACI committee 213", *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 1979, 1 (1), 5-6.
- Bentur A, Igarashi SI, Kovler K, "Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates. *Cement and concrete research*", 2001, 31 (11), 1587-1591.
- Borhan TM, "Properties of glass concrete reinforced

- Nazari A, Khalaj G, "Retracted: Prediction compressive strength of lightweight geopolymers by ANFIS", 2012.
- Neville AM, Brooks JJ, Concrete technology, Longman Scientific and Technical England, 1987.
- Nikbin IM, Aliaghazadeh M, Charkhtab SH, Fathollahpour A, "Environmental impacts and mechanical properties of lightweight concrete containing bauxite residue (red mud)", Journal of cleaner production, 2018, 172, 2683-2694.
- Nili M, Afroughsabet V, "The effects of silica fume and polypropylene fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete", Construction and Building Materials, 2010, 24 (6), 927-933.
- Pachideh G, Gholhaki M, Ketabdari H, "Effect of pozzolanic wastes on mechanical properties, durability and microstructure of the cementitious mortars", Journal of Building Engineering, 2020, 29, 101178.
- Polat R, Demirboğa R, Karakoç MB, Türkmen İ, "The influence of lightweight aggregate on the physico-mechanical properties of concrete exposed to freeze-thaw cycles", Cold Regions Science and Technology, 2010, 60 (1), 51-56.
- Ralegaonkar R, Gavali H, Aswath P, Abolmaali S, "Application of chopped basalt fibers in reinforced mortar: A review", Construction and Building Materials, 2018, 164, 589-602.
- Russell HG, Anderson AR, Banning JO, Cantor IG, Carrasquillo RL, Cook JE, Frantz GC, Hester WT, Saucier KL, Aitcin PC, Anderson FD, "State-of-the-art report on high-strength concrete", ACI Committee, 1997, 363, 92.
- Sadrmomtazi A, Sobhani J, and Mirgozar MA, "Modeling compressive strength of EPS lightweight concrete using regression, neural network and ANFIS", Construction and Building Materials, 2013, 42, 205-216.
- Sadrmomtazi A, Tahmouresi B, Saradar A, "Effects of silica fume on mechanical strength and microstructure of basalt fiber reinforced cementitious composites (BFRCC)", Construction and Building Materials, 2018, 162, 321-333.
- Sari D, Pasamehmetoglu AG, "The effects of gradation and admixture on the pumice lightweight aggregate concrete", Cement and concrete research, 2005, 35 (5), 936-942.
- Shafiqh P, Nomeli MA, Alengaram UJ, Mahmud HB, Jumaat MZ, "Engineering properties of lightweight aggregate concrete containing limestone powder and high volume fly ash", Journal of Cleaner Production, 2016, 135, 148-157.
- Shah SP, Rangan BV, February, "Fiber reinforced concrete properties", In Journal Proceedings, 1971, 68 (2), 126-137.
- Shah SP, Rangan BV, February, "Fiber reinforced concrete properties, In Journal Proceedings, 1971, 68 (2), 126-137.
- Sobhani J, Najimi M, Pourkhorshidi AR, Parhizkar T, "Prediction of the compressive strength of no-slump concrete: A comparative study of regression, neural network and ANFIS models", Construction and Building Materials, 2010, 24 (5), 709-718.
- Standard ASTM, "Standard test method for slump of reinforced with hybrid fibers", Amirkabir Journal of Civil Engineering, 2017, 49 (2), 335-346.
- Hoff GC, "Guide for the use of low-density concrete in civil works projects", Hoff Consulting Clinton MS, 2002.
- Hoff GC, "Guide for the use of low-density concrete in civil works projects", Hoff Consulting Clinton MS, 2002.
- Jafari S, Mahini SS, "Lightweight concrete design using gene expression programming", Construction and Building Materials, 2017, 139, 93-100.
- Jang JS, "ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system", IEEE transactions on systems, man and cybernetics, 1993, 23 (3), 665-685.
- Jiang C, Fan K, Wu F, Chen D, "Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete", Materials and Design, 2014, 58, 187-193.
- Jiang CH, McCarthy TJ, Chen D, Dong QQ, "Influence of basalt fiber on performance of cement mortar", In Key Engineering Materials, 2010, 426, 93-96.
- Kate GK, Murnal PB, "Effect of addition of fly ash on shrinkage characteristics in high strength concrete", International Journal of Advanced Technology in Civil Engineering, 2013, 2 (1), 11-16.
- Kayali O, Haque MN, Zhu B, "Some characteristics of high strength fiber reinforced lightweight aggregate concrete", Cement and concrete composites, 2003, 25 (2), 207-213.
- Kurt M, Gül MS, Gül R, Aydin AC, Kotan T, "The effect of pumice powder on the self-compactability of pumice aggregate lightweight concrete", Construction and Building Materials, 2016, 103, 36-46.
- Libre NA, Shekarchi M, Mahoutian M, Soroushian P, "Mechanical properties of hybrid fiber reinforced lightweight aggregate concrete made with natural pumice", Construction and Building Materials, 2011, 25 (5), 2458-2464.
- Lo TY, Cui HZ, Li ZG, "Influence of aggregate pre-wetting and fly ash on mechanical properties of lightweight concrete", Waste Management, 2004, 24 (4), 333-338.
- Ma JX, Zhang M, Zhao G, "Experimental research on basalt fiber reinforced cementitious composites", In Applied mechanics and materials, 2013, 253, 533-536.
- Madandoust R, Bungey JH, Ghavidel R, "Prediction of the concrete compressive strength by means of core testing using GMDH-type neural network and ANFIS models", Computational Materials Science, 2012, 51 (1), 261-272.
- Madandoust R, Ranjbar MM, Mousavi SY, "An investigation on the fresh properties of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene", Construction and Building Materials, 2011, 25 (9), 3721-3731.
- Mehta PK, Concrete, "Structure, properties and materials, 1986.
- Mo KH, Alengaram UJ, Jumaat MZ, Liu MYJ, Lim J, "Assessing some durability properties of sustainable lightweight oil palm shell concrete incorporating slag and manufactured sand", Journal of cleaner production, 2016, 112, 763-770.

- hydraulic-cement concrete”, ASTM Annual Book of ASTM Standards, 2015.
- Standard ASTM, C215, “Standard test method for fundamental transverse, longitudinal and torsional resonant frequencies of concrete specimens”, ASTM Stand, 1-7, 2019.
- Standard ASTM, C469/C469M-14. “Standard test method for static modulus of elasticity and poisson’s ratio of concrete in compression”, 2014.
- Tesfamariam S, Najjaran H, “Adaptive network-fuzzy inferencing to estimate concrete strength using mix design”, Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19 (7), 550-560.
- Wang HT, Wang LC, “Experimental study on static and dynamic mechanical properties of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete”, Construction and Building Materials, 2013, 38, 1146-1151.
- Wang X, He J, Mosallam AS, Li C, Xin H, “The effects of fiber length and volume on material properties and crack resistance of basalt fiber reinforced concrete (BFRC)”, Advances in Materials Science and Engineering, 2019, 1-17.
- Yuan Z, Wang LN, Ji X, “Prediction of concrete compressive strength: Research on hybrid models genetic based algorithms and ANFIS”, Advances in Engineering Software, 2014, 67, 156-163.
- Zhang MH, Gjvovv OE, “Mechanical properties of high-strength lightweight concrete”, Materials Journal, 1991, 88 (3), 240-247.
- Zhao YR, Wang L, Lei ZK, Han XF, Shi JN, “Study on bending damage and failure of basalt fiber reinforced concrete under freeze-thaw cycles”, Construction and Building Materials, 2018, 163, 460-470.
- Zollo RF, “Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development”, Cement and concrete composites, 1997, 19 (2), 107-122.

EXTENDED ABSTRACT

Prediction of the Mechanical Properties of Lightweight Basalt Fiber Reinforced Concrete Containing Silica Fume and Fly Ash with an Adaptive Neuro-fuzzy inference system (AFNIS)

S. Hosein Ghasemzadeh Mousavinejad^{a,*}, Farzad Johari Majd^b, Ashkan Saradar^a

^a Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

^b Kadous Institute of Higher Education, Rasht, Iran

Received: 07 April 2020; Accepted: 15 June 2021

Keywords:

Adaptive neuro-fuzzy inference system, Basalt fiber, Fly ash, Lightweight concrete, Mechanical properties, Silica fume.

1. Introduction

Most studies show that some certain fiber can enhance to some extent both mechanical properties as well as ductility of lightweight concrete. On the other hand, due to high industrial potential as well as less damage to the environment, basalt fibers have gradually become an appropriate option to be used in the composite industries and thus is considered as a special competitor to other fibers (Ralegaonkar et al., 2018; Sadrmomtazi et al., 2018). In recent years, there has been a growing interest in the use of the intelligent inference and reasoning methods, including ANFIS and ANN to approximate nonlinear and complex concrete behaviors and predict its properties (Tesfamariam and Najjaran, 2007; Sadrmomtazi et al., 2013). Therefore, this study aimed to investigate mechanical properties of the lightweight structural concrete containing different amounts of basalt fibers (0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, and 0.5%) as well as pozzolanic materials (silica fume and fly ash). In addition, the modified ANFIS was used as a robust method to predict results to evaluate the experimental results.

2. Laboratory plan

Materials used in this study included Portland cement Type 2, LECA coarse grains with 11% 24-hour water absorption, fine grains of the washed river sand with a density of 2.56 and maximum diameter of 4.75mm, superplasticizer, silica fume and fly ash as a substitute for part of cement weight, and basalt fibers with a length of 12mm.



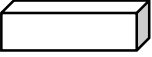
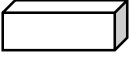


The mixtures were divided into four different groups in order to achieve the objectives of the study. Group 1: Nonpozzolanic mixtures (OPC), Group 2: Mixtures containing fly ash (FA), Group 3: Mixtures containing silica fume (SF), and Group 4: Mixtures containing both pozzolans (FA+SF). Then, 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, and 0.5% of the basalt fibers were added to each of the groups.

After fabrication and curing of the specimens to the intended age, experiments on the specimens were performed according to Table 1.

* Corresponding Author

E-mail addresses: h.mosavi@guilan.ac.ir (S. Hosein Ghasemzadeh Mousavinejad), farzad.johari1985@gmail.com (Farzad Johari Majd), ashkan.saradar@gmail.com (Ashkan Saradar)

Table 1. Experiments

Test	Curing	Sample size (mm)	Sample shape
Compressive strength	7, 28 & 90 days	150 × 150 × 150	
Water absorption	28 & 90 days	150 × 150 × 150	
Flexural strength	28 days	100 × 100 × 350	
Shrinkage	7, 28 & 90 days	70 × 70 × 280	
Indirect tensile strength	28 days	H=300, D=150	
The modulus of elasticity	28 days	H=300, D=150	

3. Results and discussion

The results of the study demonstrated that the presence of basalt fibers had minor effect on compressive strength. On the other hand, the presence of pozzolans such as fly ash and silica fume increased the compressive strength respectively by 11 and 29% in comparison to the non-fiber mixtures. According to Fig. 1 and 2, the presence of basalt fibers in the lightweight concrete increased tensile and flexural strength. Moreover, in the series of OPC, FA, and SF concrete mixtures, tensile strength increased by 52, 50, and 49% and flexural strength by 49, 55, and 62%, respectively. However, the presence of fibers decreased the shrinkage of the lightweight concrete specimens so that adding fibers up to 0.5% vol reduced shrinkage in the mixtures of OPC group by 21, 19, and 20%, respectively at 7, 28, and 90 days. In addition, shrinkage in the mixtures of FA group respectively reduced by 27, 28, and 21% at 7, 28, and 90 days by 25, 26, and 20% for the mixtures of SF group.

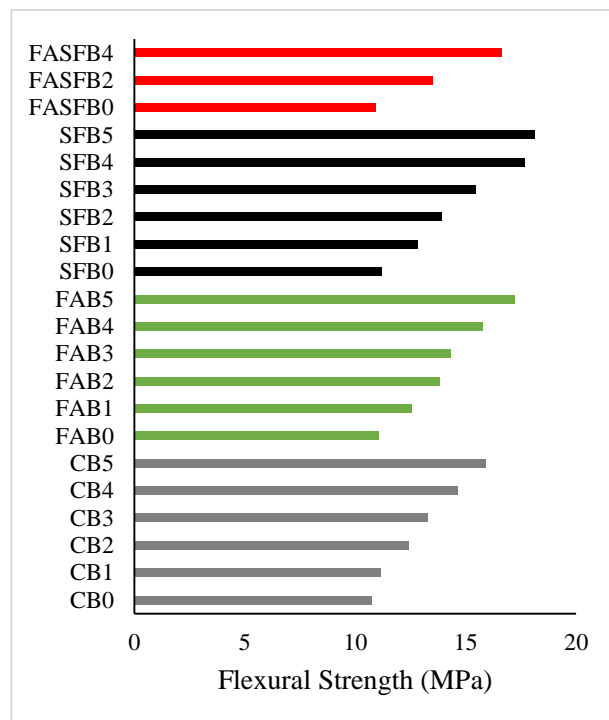


Fig. 1. Results of flexural strength of lightweight concrete mixtures

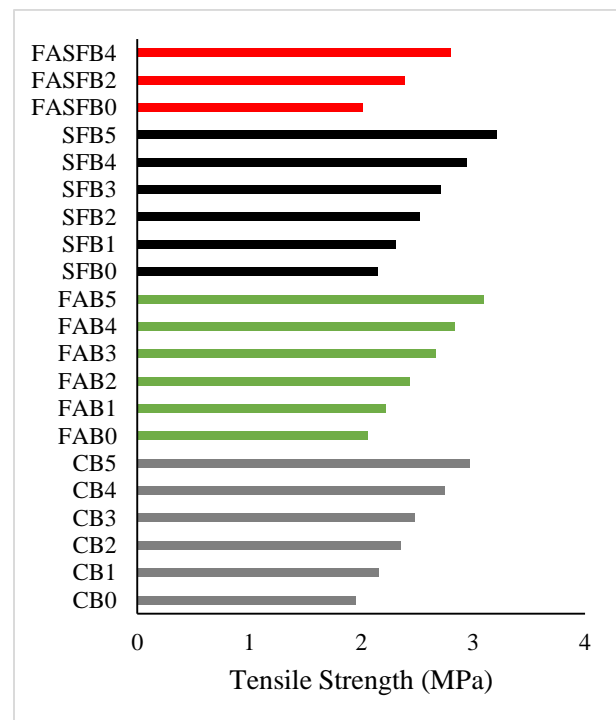


Fig. 2. The tensile strength results of lightweight concrete mixtures

Therefore, a hybrid optimization method with 20 courses was used to achieve the best results from ANFIS model with the epochs in the process of training and data testing. The number of courses for each FIS model was not constant and was determined by trial and error. Fig. 1 depicts a very good correlation between experimental results and the estimated results for compressive strength of the concrete.

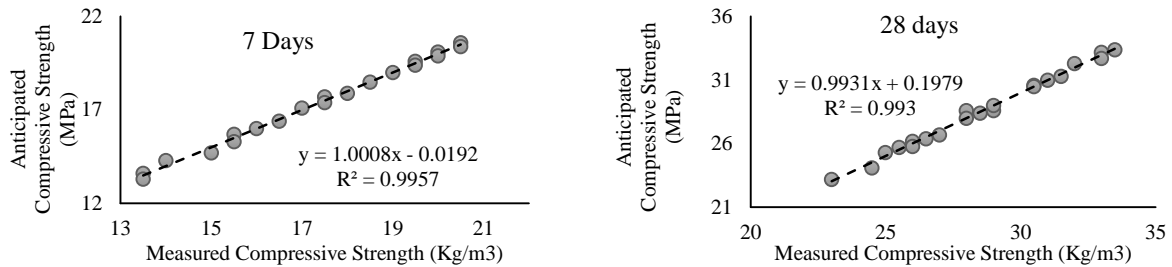


Fig. 3. Prediction of compressive strength (7 and 28 days) of the lightweight concrete with ANFIS against the experimental results

4. Conclusions

The use of pozzolans such as fly ash and silica fume improved compressive strength in comparison to the non-pozzolanic specimens. Moreover, shrinkage reduced by 23% and 29% for mixtures containing silica fume and fly ash, respectively. Addition of the basalt fibers to the lightweight concrete increased the tensile and flexural strength. Although the use of fibers reduced compressive strength, all the developed designs were within the category of lightweight concrete. Evaluation of the results through ANFIS analysis indicated acceptable results, reflecting the high accuracy of the model with less than 2% accuracy compared to the experimental results.

5. References

- Ralegaonkar R, Gavali H, Aswath P, Abolmaali S, "Application of chopped basalt fibers in reinforced mortar: A rewiw", *Construction and Building Materials*, 2018, 164, 589-602.
- Sadrmomtazi A, Sobhani J, Mirgozar MA, "Modeling compressive strength of EPS lightweight concrete using regression, neural network and ANFIS", *Construction and Building Materials*, 2013, 42, 205-216.
- Sadrmomtazi A, Tahmouresi B, Saradar A, "Effects of silica fume on mechanical strength and microstructure of basalt fiber reinforced cementitious composites (BFRCC)", *Construction and Building Materials*, 2018, 162, 321-333.
- Tesfamariam S, Najjaran H, "Adaptive network-fuzzy inferencing to estimate concrete strength using mix design", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2007, 19 (7), 550-560.