

S. Aramesh*

Faculty Member, Department of
Civil Engineering, Faculty of
Semnan, Technical and
Vocational University (TVU),
Semnan, Iran.

e-mail: saramesh@tvu.ac.ir

P. Fakharian

Faculty of Civil Engineering,
Semnan University, Semnan,
Iran.

e-mail:
pouyanfakharian@semnan.ac.ir

New Models for Determining Concrete Elastic Modulus Considering Variation in Values of Compressive Strength

Modulus of elasticity has played an essential role in the analysis and design of reinforced concrete structures and is a fundamental property required to calculate the lateral deformation of structures. This study proposes new models for predicting the elastic modulus of normal - and high-strength concrete using a hybrid polynomial neural network-invasive weed optimization algorithm (PNN-IWO). This paper attempts to estimate the elastic modulus concrete in terms of compressive strength in compliance with conventional building codes. To examine the validity of the proposed models, a comprehensive evaluation has been performed between the elastic modulus results predicted by PNN-IWO, experimental data, and those determined using buildings codes and various models. The assessment is performed in terms of coefficient of determination, root mean square error, and mean absolute error. It should be noted that the mean absolute error of the proposed model for normal- and high-strength concrete were calculated as 9.02%, 3.8%, respectively. The results demonstrate that the proposed models have a very strong potential to predict the elastic modulus of both normal- and high-strength concrete within the range of the considered compressive strength.

Keywords: Concrete; Elastic modulus; Compressive strength; Polynomial neural network; Invasive weed optimization algorithm

* Corresponding author

Received 01 February 2022, Revised 11 April 2022, Accepted 20 April 2022.

DOI: 10.22091/cer.2022.7871.1357

مدل‌های جدید برای تعیین مدول الاستیسیته بتن با در نظر گیری تغییرات مقاومت فشاری

مدول الاستیسیته بتن در مراحل آنالیز و طراحی سازه‌های بتن‌آرمه نقش کلیدی داشته است و اثرات تعیین‌کننده‌ای در تغییر شکل جانبی سازه دارد. در این مطالعه روابط جدیدی برای محاسبه مدول الاستیسیته بتن‌های با مقاومت معمولی و مقاومت بالا با استفاده از ترکیب شبکه عصبی چند جمله‌ای و الگوریتم بهینه‌سازی علف هرز مهاجم ارائه شده است. مشابه روابط آئین‌نامه‌های مرسوم، سعی شده است که مدل‌های پیشنهادی به صورت ساده و براساس پارامتر مقاومت فشاری بتن تعیین شوند. برای بررسی صحت روابط پیشنهادی سعی شده است ارزیابی جامعی بین مقادیر آزمایشگاهی، نتایج مدل‌های ارائه شده در این مطالعه و روابط بیان شده توسط آئین‌نامه‌ها، دستورالعمل‌ها و محققین مختلف انجام گیرد. برای ارزیابی جامع از سه شاخص آماری: ضریب تشخیص، معیار خطای جذر میانگین مربعات و معیار میانگین درصد قدرمطلق خطا استفاده شده است. قابل ذکر است که درصد خطای نسبی رابطه‌های پیشنهادی برای بتن معمولی ۹/۰۲ درصد و برای بتن مقاومت بالا ۳/۸ درصد می‌باشد. همچنین نتایج ضریب همبستگی حاکی از آن است که مدل‌های پیشنهادی عملکرد بسیار مناسبی داشته و می‌توانند به عنوان ابزاری مناسب برای تعیین مدول الاستیسیته بتن‌های با مقاومت معمولی و بالا مورد استفاده قرار گیرند.

واژگان کلیدی: بتن، مدول الاستیسیته، مقاومت فشاری، شبکه عصبی چند جمله‌ای، الگوریتم بهینه‌سازی علف هرز.

سیما آرامش*

مربی، دپارتمان مهندسی عمران، دانشکده فنی و حرفه‌ای پسران سمنان، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان سمنان، سمنان، ایران.
پست الکترونیک:
saramesh@tvu.ac.ir

پویان فخاریان

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
پست الکترونیک:
pouyanfakharian@semnan.ac.ir

۱- مقدمه

می‌تواند استفاده شود. بایستی توجه شود که مدول الاستیسیته بتن به پارامترهایی همچون: مقاومت فشاری مشخصه، سن بتن، مشخصات سنگدانه‌های مصرفی، نوع سیمان مصرفی، سرعت بارگذاری و ابعاد نمونه آزمایشی بستگی دارد. تعیین دقیق مدول الاستیسیته مورد تأیید دستورالعمل‌های معتبر عموماً آزمایشی پیچیده‌ای است که نیاز به بارگذاری چرخه‌ای و اندازه‌گیری مداوم و مرحله‌ای کرنش دارد [۶]. نزدیک‌ترین تقریب به مدول الاستیسیته به دست آمده از رفتار واقعی الاستیک، مدول الاستیسیته اولیه است که شیب مماس بر منحنی در مبدا است. این مدول به صورت مستقیم در طراحی مورد استفاده قرار نمی‌گیرد زیرا فقط به تنش‌ها و کرنش‌های کوچک ارتباط دارد. مدول سکانتی را می‌توان معیاری عملی‌تر مدول الاستیسیته

مدول الاستیسیته یکی از مشخصه‌های مکانیکی بتن است که در محاسبه تغییر شکل سازه‌های بتن‌آرمه از آن استفاده می‌شود [۱-۴]. بتن در دو حالت کشش و فشار از مصالح غیرخطی و غیرالاستیک است، از این رو واژه مدول الاستیسیته به دلیل ثابت نبودن (مشابه مصالح الاستیک خطی) باید با قدری احتیاط به کار برده شود [۵]. به عبارت دیگر کلمه مدول الاستیسیته برای تشریح پاسخ مصالح در نقاط مختلف منحنی تنش کرنش

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۱۱/۱۲، بازنگری ۱۴۰۱/۰۱/۲۲، پذیرش ۱۴۰۱/۰۱/۳۱.
DOI: 10.22091/cer.2022.7871.1357 شناسه دیجیتال

زیادی با واقعیت منطبق است. بر این اساس، آئین‌نامه‌های TS 500 و EC2، CSA A23.3، BS 8110، ACI 318 و همچنین محققینی مانند گاردنر و زائو^۱ روابط ساده شده‌ای را برای بتن‌های با مقاومت فشاری رده معمولی ارائه داده‌اند [۷-۱۲]. همچنین آئین‌نامه‌هایی مانند ACI 363، CEB-FIP، NS 3473 و FHWA و محققینی مانند وی^۲ و همکاران و راشید^۳ و همکاران روابطی را برای محاسبه مدول الاستیسیته بتن‌های با مقاومت فشاری بالا پیشنهاد داده‌اند [۲، ۱۳-۱۷]. خلاصه‌ای از روابط مذکور در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- روابط پیشنهادی برای محاسبه مدول الاستیسیته

رده مقاومت فشاری	آئین‌نامه/محقق	رابطه پیشنهادی
بتن معمولی	ACI 318	$4700 * \sqrt{f_c}$
	BS 8110	$20 + 0.2f_c$
	CSA A23.3	$4500 * \sqrt{f_c}$
	EC2	$22000 * \left(\frac{f_c}{10}\right)^{0.3}$
	TS 500	$3.25 * \sqrt{f_c} + 14$
	Zhao و Gardner	$9(f_c)^{\frac{1}{3}}$
بتن مقاومت بالا	ACI 363	$3320 * \sqrt{f_c} + 6890$
	CEB-FIP	$10000 * (f_c + 8)^{\frac{1}{3}}$
	NS 3473	$9500 * (f_c)^{0.3}$
	FHWA	$3837 * \sqrt{f_c}$
	Wee و همکاران	$10200 * (f_c)^{\frac{1}{3}}$
	Rashid و همکاران	$8900 * (f_c)^{0.33}$

در سال‌های اخیر محققین روابط و رویکردهای متنوعی را در زمینه محاسبه مدول الاستیسیته بتن با در نظرگیری رده مقاومت فشاری ارائه داده‌اند. دمیر^۴ با استفاده از تئوری منطق فازی به تعیین مدول الاستیسیته

معرفی نمود که اثر کمی روی تنش‌های معمول سرویس دارند که دلیل آن اصلاح شیب اولیه در نمودار تنش می‌باشد. به دلیل خطاهای اندازه‌گیری ناشی از وضعیت نشیمن نمونه در ابتدای آزمایش یا به دلیل بسته شده ترک‌های از قبل ایجاد شده که در مرحله بارگذاری بسته می‌شوند، تعیین مدول الاستیسیته مماس اولیه و سکانتی به آسانی و دقت بالا قابل تعیین نیست. از این‌رو، استفاده از مدول وتری که شیب خط ترسیمی بین دو نقطه مشخص از منحنی تنش-کرنش است، کاربرد بیشتری دارد. مدول وتری و سکانتی که در چهل درصد مقاومت فشاری نهایی تعیین می‌شوند اختلاف چندانی نباید با یکدیگر داشته باشند، هرچند حالت وتری از دقت بیشتری برخوردار است. مدول وتری در مقایسه با مدول مماس اولیه، محافظه‌کارانه‌تر است و از نتایج آزمایش آسان‌تر تعیین می‌شود. از طرف دیگر مدول وتری وقتی که تنش بیش از ۴۰ درصد مقاومت فشاری به بتن اعمال می‌شود، کرنش اضافی را کمتر تخمین می‌زند. در چنین مواردی، مدول الاستیسیته اندازه‌گیری شده در نقطه تقاطع، ملاک بهتری از پاسخ بتن می‌باشد [۵]. مدول الاستیسیته وتری بر اساس ASTM C469 بر روی یک نمونه استوانه‌ای استاندارد انجام گرفته و براساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E_c = \frac{S_2 - S_1}{\epsilon_2 - 0.00005} \quad (1)$$

که در رابطه فوق، S_1 و S_2 به ترتیب تنش متناظر با کرنش طولی 0.00005 و چهل درصد تنش نهایی می‌باشد.

براساس پیچیدگی‌های اشاره شده و برای جلوگیری از انجام آزمایش تعیین مدول الاستیسیته، محققان و آئین‌نامه‌ها سعی کرده‌اند که مقدار مدول الاستیسیته را به صورت تابعی از مقاومت فشاری بتن تعیین کنند. پارامتر مقاومت فشاری به این دلیل انتخاب شده است که عوامل تاثیرگذار بر مقاومت فشاری نمونه بتنی به صورت مستقیم مدول را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهند، و این موضوع تا حد

² Gardner and Zhao

³ Wee

⁴ Rashid

⁵ Demir

است. نویسندگان در این مطالعه تلاش نموده اند که روابط پیشنهادی دارای عملکرد بهتری از روابط موجود باشند.

۲- نمونه‌های جمع‌آوری شده

برای ایجاد سیستم مبتنی بر ترکیب شبکه عصبی چند جمله‌ای و الگوریتم بهینه‌سازی علف هرز، نیاز به دیتابیس آزمایشگاهی می‌باشد. نتایج آزمایشگاهی در دو بخش مجزا تقسیم‌بندی شده‌اند، بخش اول: نمونه‌های با بتن معمولی و بخش دوم: نمونه‌های با بتن مقاومت بالا. در بخش مرتبط با بتن معمولی از نتایج آزمایشگاهی مراجع [۲۳ و ۲۴] استفاده شده است. نتایج بخش مربوط به بتن مقاومت بالا از مطالعات وی و همکاران، جسوگلو^۷ و همکاران و شانگ^۸ ایجاد شده است [۱۶، ۲۵ و ۲۶]. قابل ذکر است که دیتابیس‌های مشابهی در مطالعات دیگر نیز مورد استفاده قرار گرفته است [۲۰-۲۲]. دیتابیس شامل ۷۰ نمونه آزمایشگاهی مرتبط با بتن معمولی و ۸۹ نمونه مرتبط با بتن مقاومت بالا می‌باشد. مقاومت فشاری در نظر گرفته شده در دیتابیس متناظر با نتایج ۲۸ روزه است. اگرچه معیار یکسانی برای تعیین مرز بین بتن مقاومت بالا و بتن معمولی که مورد تأیید همه آئین‌نامه باشد وجود ندارد اما می‌توان بتن مقاومت بالا را بتنی دانست که دارای مقاومت فشاری در محدوده بیشتر از ۵۰ مگاپاسکال است. بایستی توجه شود که برای تولید بتنی با مقاومت بالا، نیاز به کنترل کیفیت دقیق‌تر و همچنین دقت بیشتر در انتخاب مصالح و نسبت‌های آن است. بتن با مقاومت بالا، در مقایسه با بتن معمولی، بیشتر شبیه مصالح همگن رفتار می‌کند و شیب منحنی‌های تنش-کرنش در آن نسبت به بتن معمولی زیادتر است و رفتار آن تا نسبت‌های تنش-مقاومت بیشتری در مقایسه با بتن‌های با مقاومت معمولی، خطی است زیرا مقدار و روند افزایش ترک‌های موثرین در ناحیه

بتن‌های معمولی و مقاومت بالا پرداختند. در مطالعه مذکور سعی گردیده است که قوانین به‌کار برده شده تا حد ممکن ساده انتخاب شوند [۱۸]. در مطالعه دیگری، با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی به پیش‌بینی مدول الاستیسیته پرداخته است. در این مطالعه سه مدل ایجاد شده که پارامترهای تعداد لایه پنهان و تعداد نورون‌ها در لایه پنهان به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شده است [۱۹]. مطالعات یان و شی^۶ نشان از عملکرد مطلوب رویکرد ماشین بردار پشتیبان در پیش‌بینی مدول الاستیسیته بتن دارد. این رویکرد یکی از روش‌های یادگیری با نظارت است که از آن برای طبقه‌بندی و پیش‌بینی استفاده می‌کنند [۲۰]. گندمی و همکاران استفاده از تکنیک برنامه‌نویسی ژنتیک را در پیش‌بینی مدول الاستیسیته مورد استفاده قرار دادند. در مطالعه مذکور، سه مدل پیشنهاد شده است: مدل اول برای بتن‌های معمولی، مدل دوم برای بتن‌های با مقاومت بالا و مدل سوم برای هر دو رده مقاومتی [۲۱]. احمدی ندوشان استفاده از سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی را مورد بررسی قرار دادند که نتایج حاکی از عملکرد مناسب آن داشت [۲۲].

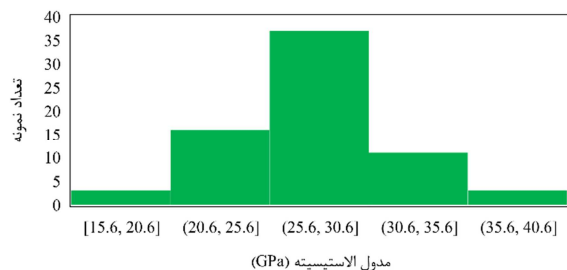
در این مقاله به بررسی استفاده از ترکیب شبکه عصبی چند جمله‌ای و الگوریتم بهینه‌سازی علف هرز مهاجم برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته بر اساس مقاومت فشاری مشخصه بتن با استفاده از دیتابیس جامعی از نتایج آزمایشگاهی جمع‌آوری شده، پرداخته شده است. هدف اصلی این مطالعه پیشنهاد روابطی ساده برای کاربردهای مهندسی است. روابط ارائه شده در دو دسته برای بتن‌های معمولی و بتن‌های با مقاومت بالا ارائه شده است. جهت اطمینان از عملکرد رویکردهای پیشنهادی، مقایسه‌ای بین نتایج روابط پیشنهادی و روابط موجود (جدول ۱) بر اساس نمونه‌های آزمایشگاهی انجام گرفته

⁷ Gesoglu

⁸ Shannag

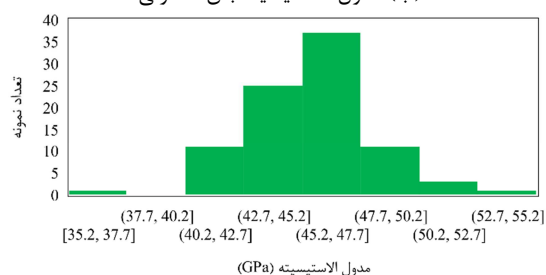
⁶ Yan and Shi

نشان می‌دهد. در شکل ۱ نمودار هستیوگرام دیتابیس آزمایشگاهی نشان داده شده است.



مدول الاستیسیته (GPa)

(ب) مدول الاستیسیته بتن معمولی

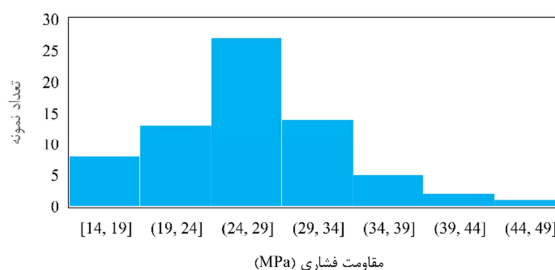


مدول الاستیسیته (GPa)

(ت) مدول الاستیسیته بتن مقاومت بالا

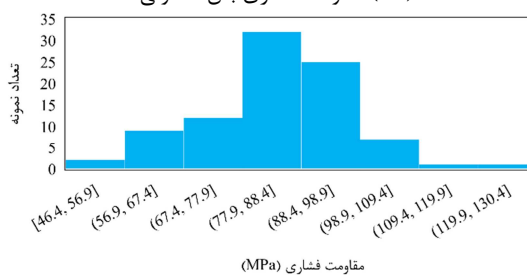
شکل ۱- هستیوگرام مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته برای بتن معمولی و بتن مقاومت بالا

انتقال کمتر است. بنابراین، بتن مقاومت بالا در هنگام گسیختگی تردی بیشتر و انبساط حجمی کمتری از خود



مقاومت فشاری (MPa)

(الف) مقاومت فشاری بتن معمولی



مقاومت فشاری (MPa)

(پ) مقاومت فشاری بتن مقاومت بالا

۳- شبکه عصبی چند جمله‌ای (PNN^۹)

جدیدی به سیستم هوشمند آموزش داده شود، قادر خواهد بود خروجی‌های مورد نظر را با دقت بالایی ارائه دهد. سیستم‌های هوشمند به میزان زیادی غیرخطی بوده و می‌توانند اثر پیچیده متقابل متغیرهای ورودی و خروجی در یک سیستم را بدون داشتن دانش اولیه در ارتباط با طبیعت چنین اثراتی به دست دهند. این سیستم‌ها، یک روش عملی برای حل توابع با مقادیر حقیقی، گسسته و برداری با استفاده از مثال‌ها ارائه می‌دهند و بنابراین در بسیاری از کاربردهای مهندسی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۳۲ و ۳۳].

شبکه عصبی چند جمله‌ای یکی از روش‌های کارآمد برای حل مسائل مدل‌سازی و رگرسیون است و اساس کار آن تکرار یک سری اجزای بسیار ساده است، ساختار کلی آن لایه‌ای است اما ساختار لایه‌ای که اجزای سازنده لایه‌های آن بسیار ساده بوده و با رویکرد بسیار ساده‌ای طراحی شده است. این رویکرد به دلیل آن‌که در تعداد زیاد باهم ترکیب می‌شوند و لایه‌ها به صورت متوالی قرار می‌گیرند می‌توانند به اندازه کافی پیچیدگی ایجاد کنند.

سیستم‌های هوشمند یک ابزار پردازش اطلاعات می‌باشند که از سیستم‌های بیولوژیکی نظیر مغز انسان برای پردازش اطلاعات الهام گرفته‌اند [۲۷-۳۱]. مهمترین مزیت این سیستم‌ها، ساختار نوین پردازشگر اطلاعاتی آن‌ها می‌باشد. این سیستم متشکل از تعداد زیادی المان‌های متصل به هم می‌باشد که به صورت متحد در زمینه حل مسائل مشخص به کار گرفته می‌شوند. یادگیری در سیستم‌های هوشمند به مانند مغز انسان به کمک مثال صورت می‌پذیرد. یک سیستم هوشمند برای یک کاربرد معین (مانند شناسایی یک الگوی مشخص و یا طبقه‌بندی اطلاعات) در طول پروسه یادگیری، طرح‌ریزی می‌شود. سیستم هوشمند با در اختیار داشتن ترکیبات معینی از داده‌های ورودی و خروجی می‌تواند در جهت استخراج مشخصات و روابط بین داده‌ها آموزش ببیند. پس از طی پروسه آموزش، چنانچه داده‌های ورودی

۱-۳- مبانی ریاضی PNN

^۹ Polynomial Neural Network

ازای تمام نمونه‌های دو متغیره، خروجی مطلوب برقرار گردد. بنابراین هریک از توابع $Z(x_i, x_j)$ برای کل نمونه ها (هر ردیف داده جمع‌آوری شده) نوشته می‌شود. اگر فرض شود که کل نمونه ها شامل N آزمایش مستقل است، بنابراین داریم:

$$Aa = Y \quad (7)$$

که در معادله فوق:

$$a = \{a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\} \quad (8)$$

$$Y = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_N\}^T$$

از مقادیر بردارهای ورودی و شکل تابع به راحتی قابل مشاهده است که:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & x_{1p} & x_{1q} & x_{1p}x_{1q} & x_{1p}^2 & x_{1q}^2 \\ 1 & x_{2p} & x_{2q} & x_{2p}x_{2q} & x_{2p}^2 & x_{2q}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{Mp} & x_{Mq} & x_{Mp}x_{Mq} & x_{Mp}^2 & x_{Mq}^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

برای تعیین ضرایب $\{a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\}$ می‌توان از قاعده کمترین مربعات خطا استفاده نمود.

$$E = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - Z_i)^2}{N} \rightarrow \min \quad (10)$$

روش کمترین مربعات از آنالیز رگرسیون چندگانه حل معادلات را به شکل زیر نتیجه می‌دهد:

$$a = (A^T A)^{-1} A^T Y \quad (11)$$

چنانچه ماتریس $A^T A$ وارون‌پذیر نباشد از روش قاعده‌مند سازی تیخونوف جهت حل معادله فوق استفاده می‌شود.

پس از تعیین ضرایب برای هر تابع دو متغیره، این توابع به صورت کامل ایجاد می‌شوند و تعداد آن‌ها برابر با $\frac{m(m-1)}{2}$ می‌باشد. در این مرحله می‌توان به لایه بعدی وارد شود. قبل از وارد شدن به لایه بعد بایدستی بر اساس معیاری مشخص تعدادی از توابع ایجاد شده انتخاب و در لایه بعد مجدد ترکیب شوند. در این مطالعه از معیار ارائه شده در رابطه ۱۲ برای انتخاب استفاده شده است.

رابطه نامشخص برای تابعی مانند f که بین پارامترهای ورودی مانند بردار $X=(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m)$ و مقادیر خروجی Y برقرار است را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$y_i = f(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{im}) \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (2)$$

رابطه دقیق f را می‌توان توسط تابع \bar{f} به نحوی تخمین زد که مجموع مربعات خطا به ازای کل داده‌های موجود کمینه گردد:

$$\bar{y}_i = \bar{f}(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{im}) \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (3)$$

$$E = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2}{N} \rightarrow \min \quad (4)$$

در روابط فوق، \bar{f} می‌تواند به صورت تابعی خطی و یا غیرخطی از متغیرهای ورودی باشد. نگاهی که بین متغیرهای ورودی و خروجی توسط PNN برقرار می‌شود، یک تابع غیر خطی به صورت رابطه زیر (سری Volterra) می‌باشد.

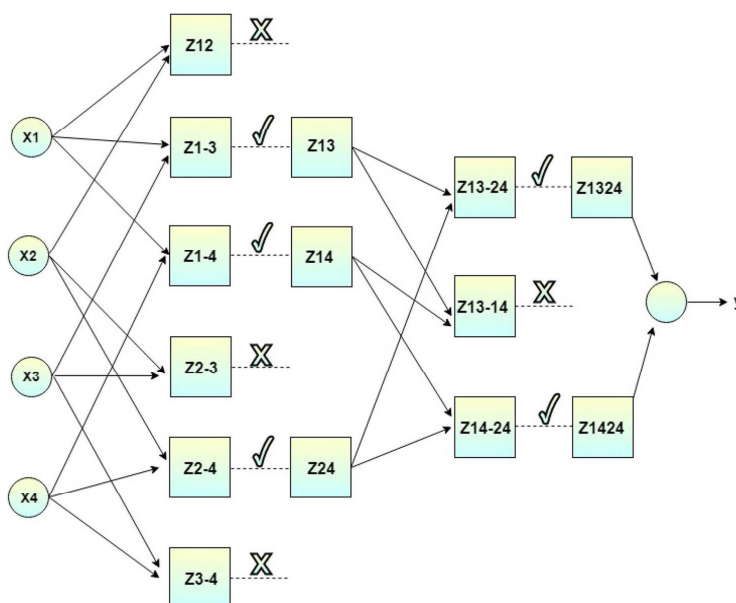
$$\begin{aligned} \bar{y} &= a_0 + \sum_{i=1}^m a_i x_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m a_{ij} x_i x_j \\ &+ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m a_{ijk} x_i x_j x_k \end{aligned} \quad (5)$$

رویکرد PNN بر اساس تجزیه سری Volterra به چند جمله‌ای‌های درجه دوم دو متغیره پایه‌گذاری شده که به صورت معادله ۶ قابل بیان می‌باشد.

$$\begin{aligned} Z(x_i, x_j) = Z_{ij} &= a_0 + a_1 x_i + a_2 x_j \\ &+ a_3 x_i x_j + a_4 x_i^2 \\ &+ a_5 x_j^2 \end{aligned} \quad (6)$$

در لایه اول تمامی حالات ممکن برای ایجاد تابع $Z(x_i, x_j)$ که برابر با $\binom{m}{2} = \frac{m(m-1)}{2}$ است ساخته می‌شود. تابع $Z(x_i, x_j)$ دارای شش ضریب مجهول می‌باشد، لذا بایدستی آن‌ها را طوری تنظیم کنیم که به

به‌عنوان یک نمونه از روند اشاره شده، ساختار شبکه عصبی با چهار پارامتر ورودی در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است در هر لایه پس از تشکیل توابع دو متغیره، مقدار e_c محاسبه شده و توابعی که دارای خطای بیشتری از e_c هستند حذف شده و به مرحله بعد وارد نمی‌شوند.



شکل ۲- ساختار رویکرد PNN با چهار پارامتر ورودی.

الگوریتم IWO یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی است که منشا الهام آن طبیعت بوده و از نحوه تکثیر و رشد بقای علف‌های هرز در سال ۲۰۰۶ الهام گرفته شده است [۳۴]. علف‌های هرز گیاهانی هستند که رشد هجوم آورنده آن‌ها تهدید مهمی برای گیاهان زراعی محسوب می‌شود. علف‌های هرز بسیار پایدار و تطابق‌پذیر در مقابل تغییرات محیط می‌باشند. بنابراین با گرفتن خصوصیات آن‌ها می‌توان به یک الگوریتم بهینه‌سازی قوی رسید. این الگوریتم تلاش می‌کند که از قدرت تطابق‌پذیری و تصادفی بودن جمعیت علف‌های هرز به طور ساده تقلید کند. این الگوریتم در عین سادگی، در یافتن نقاط بهینه بسیار مؤثر و سریع می‌باشد و براساس ویژگی‌های اولیه و طبیعی علف‌های هرز مانند تولید بذر، رشد و تنازع برای بقا در یک کلونی عمل می‌کند. این الگوریتم برای حل

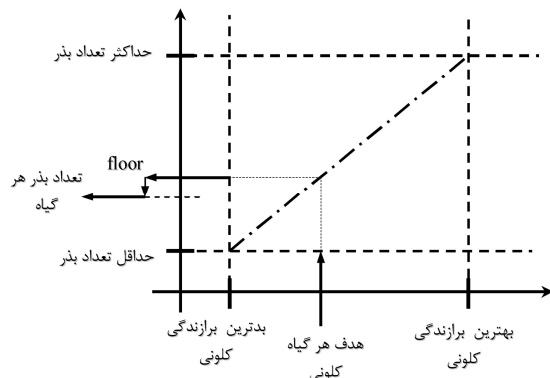
$$e_c = \alpha e_{min} + (1 - \alpha)e_{max} \quad (12)$$

در رابطه فوق، e_{min} و e_{max} به ترتیب برابر با کمینه و بیشینه خطا کل روابط دو متغیره ایجاد شده می‌باشند. همچنین پارامتر α در بازه صفر تا یک متغیر می‌باشد.

در طراحی رویکرد PNN، هدف جلوگیری از رشد واگرایی شبکه و نیز مرتبط کردن شکل و ساختار شبکه به یک یا چند پارامتر عددی بوده، به گونه‌ای که با تغییر این پارامتر ساختار شبکه نیز تغییر کند. روش‌های تکاملی مانند الگوریتم بهینه‌سازی علف هرز مهاجم به دلیل قابلیت‌های منحصر به فرد خود در پیدا کردن مقادیر بهینه و امکان جستجو در فضاها غیرقابل پیش‌بینی می‌تواند کاربرد وسیعی در مراحل مختلف طراحی شبکه‌های عصبی چند جمله‌ای داشته باشد.

۴- الگوریتم بهینه‌سازی علف هرز مهاجم (IWO¹⁰)

¹⁰ Invasive Weed Optimization



شکل ۳- روند تولید بذر در یک کلونی علف هرز [۳۴]

این بدین معناست که دانه‌ها به صورت تصادفی و به نحوی پخش می‌شوند که نزدیک والدینشان باشند. انحراف استاندارد σ تابع تصادفی است که از مقدار اولیه $\sigma_{initial}$ به مقدار نهایی σ_{final} کاهش می‌یابد. رابطه بین پارامترهای اشاره شده و انحراف معیار را می‌توان به کمک رابطه زیر محاسبه نمود.

$$\sigma_{iter} = \left(1 - \frac{iter}{iter_{max}}\right)^n (\sigma_{initial} - \sigma_{final}) + \sigma_{final} \quad (14)$$

۳- این عمل تا حصول حداکثر تعداد گیاهان ادامه می‌یابد. حال فقط گیاهان با مطلوبیت بالا می‌توانند زنده بمانند و دانه بسازند و بقیه از بین می‌روند (حذف رقابتی). زمانی که بذرها موقعیت خود را یافتند در کنار والدینشان با هم و به صورت یک کلونی قرار می‌گیرند. سپس اعضا با برزندگی بدتر حذف می‌شوند تا تعداد اعضا به ماکزیمم مجاز برسد.

۵- مدل‌های پیشنهادی برای مدول الاستیسیته

تابع پیشنهادی برای تعیین مدول الاستیسیته بتن‌های با مقاومت معمولی و بالا براساس رویکرد PNN به صورت معادله زیر قابل بیان است.

$$E_{PNN} = f(f_c) \quad (15)$$

انواع مسائل بهینه‌سازی در حوزه‌های مختلف علوم و مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

این الگوریتم یک تعداد متناهی از علف‌های هرز بوده و هر کدام از آن‌ها علف‌های هرز جدیدی را بسته به سازگاری و شرایط خود تولید می‌کند. علف‌های هرز تولید شده در فضای جستجو به صورت تصادفی با توزیع نرمال تقسیم‌بندی می‌شوند. این روند تا رسیدن به حداکثر تعداد علف‌های هرز ادامه پیدا می‌کند. فقط علف‌های هرز با سازگاری بهتر می‌توانند زنده بمانند و تولید دانه کنند و بقیه حذف می‌شوند. برای شبیه‌سازی رفتار کلونی‌های علف هرز مراحل کلی زیر در نظر گرفته می‌شود:

۱- یک جمعیت متشکل از تعدادی بذر (راه حل‌های اولیه) با تعداد اعضای برابر با N_0 در فضای n -بعدی به صورت تصادفی پخش می‌شوند (ایجاد جمعیت اولیه).

۲- هر دانه تا گل دادن گیاه رشد می‌کند و براساس میزان شایستگی خود شروع به تولید دانه می‌کند (زاد و ولد). تعداد بذرهایی که هر گیاه تولید می‌کند به صورت خطی بین مقادیر حداقل (S_{min}) و حداکثر (S_{max}) ممکن بذرهایی تولیدی افزایش می‌یابد. تعداد این بذرهایی تولیدی برای گیاه i -ام در هر تکرار وابسته به مقدار هدف خود گیاه (F_i) و نیز بهترین (F_g) و بدترین (F_w) مقدار هدف در آن تکرار است. تعداد بذر تولیدی هر گیاه را می‌توان از رابطه ۱۳ محاسبه نمود. روند اشاره شده در شکل ۳ نشان داده شده است.

$$N_i = \frac{F_i - F_w}{F_g - F_w} (S_{max} - S_{min}) + S_{min} \quad (13)$$

۳- دانه‌های ایجاد شده به صورت تصادفی روی فضای جستجو با توزیع نرمال و با میانگین صفر و واریانس مختلف پخش شده و شروع به رشد می‌کنند (پراکندگی محیطی).

پارامترها، مبتنی بر تجربه نویسندگان و استفاده از نتایج مطالعات انجام شده می‌باشد [۳۷-۳۵]. قابل ذکر است که مدل‌های متنوعی در ابتدا بررسی شد و نتایج نشان داد که مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بعد از حدود ۳۰۰ تکرار به کمینه مقدار خود رسیده و بعد از آن ثابت خواهد ماند. از این‌رو در این مطالعه برای اطمینان این مقدار ۵۰۰ در نظر گرفته شده است.

که در آن، f_c بیانگر مقاومت فشاری بتن برحسب مگاپاسکال و E_{PNN} مقدار مدول الاستیسیته برحسب گیگاپاسکال را نشان می‌دهد.

در آموزش رویکرد PNN از الگوریتم بهینه‌سازی علف هرز مهاجم در محاسبات مربوط به ضرایب توابع دو متغیره استفاده شده است. مقادیر پارامترهای اصلی الگوریتم که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته اند در جدول ۲ ارائه شده است. مقادیر پیشنهادی برای

جدول ۲- مقادیر پیشنهادی برای پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی علف هرز مهاجم.

مقدار	نماد	پارامتر
۵۰	N_0	تعداد جمعیت اولیه
۵۰۰	$iter_{max}$	بیشترین تعداد تکرار
۱۰۰	W_{max}	بیشترین تعداد جمعیت
۲۰	S_{max}	ماکزیمم بذر تولیدی
۰	S_{min}	مینیمم بذر تولیدی
۲	n	شاخص غیر خطی بودن مدولاسیون
۰/۵	$\sigma_{initial}$	مقدار اولیه انحراف معیار
۰/۰۰۱	σ_{final}	انحراف معیار نهایی

فرآیند اشاره شده در دو بخش بتن با مقاومت معمولی (NSC^{11}) و مقاومت بالا (HSC^{12}) انجام گرفته و بر اساس بهترین شبکه‌های ایجاد شده، روابط زیر برای تعیین مدول الاستیسیته در گروه بتن‌های با مقاومت معمولی (رابطه ۱۶) و بتن‌های با مقاومت بالا (رابطه ۱۷) ارائه شده است. در روابط ارائه شده، واحد مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته به ترتیب مگاپاسکال و گیگاپاسکال است.

$$E_{c,NSC} = -24.57029 - 1.37891 \sin(f_c) - 0.37385 * f_c + 19.05308 \ln f_c \quad (16)$$

$$E_{c,HSC} = 34.5658 + 0.131236 * f_c \quad (17)$$

جهت اجرای فرآیند بهینه‌سازی، ابتدا داده‌های ورودی را به دو بخش آموزش و تست تقسیم‌بندی می‌شود. برای آموزش شبکه از ۸۰ درصد داده‌ها استفاده شده و ۲۰ درصد نمونه باقیمانده برای تست مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر این خطای آموزش و خطای پیش‌بینی به‌عنوان دو تابع هدف در نظر گرفته شده که با استفاده از ضرایب پیشنهادی الگوریتم بهینه‌سازی علف هرز مهاجم توابع هدف مزبور را محاسبه کرده و ساختار بهینه شبکه بدست می‌آید. به منظور به دست آوردن چندجمله‌ای مناسب برای برآورد مدول الاستیسیته نسبت به پارامترهای ورودی، در طراحی ساختار پیشنهادی ماکزیمم تعداد لایه‌های پنهان برابر ۳ در نظر گرفته شده است.

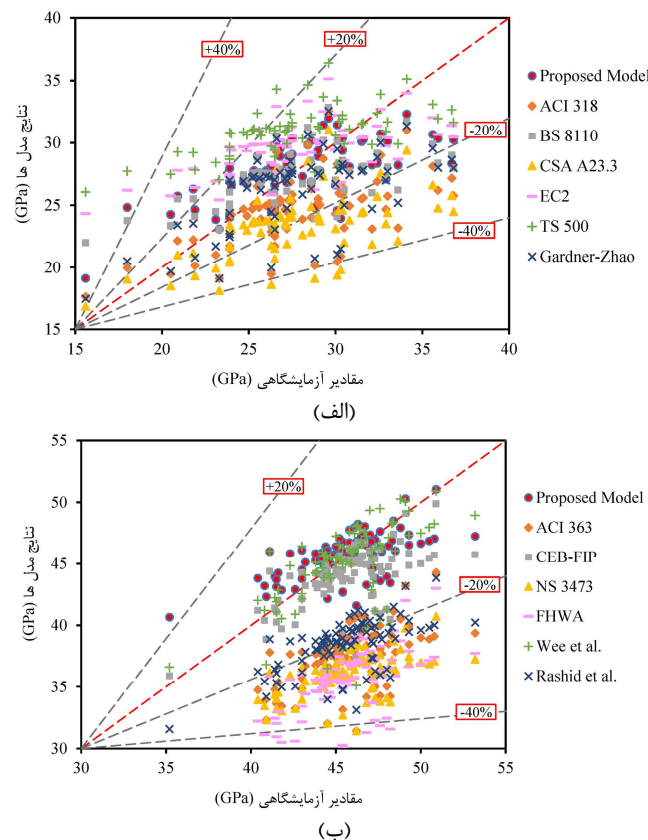
¹¹ Normal-Strength Concrete

¹² High-Strength Concrete

۶- بررسی عملکرد مدل‌های پیشنهادی

ایده‌آل در این نمودارها زمانی اتفاق می‌افتد که تمامی نقاط بر روی خط ۴۵ درجه قرار گیرند و در این حالت ضریب همبستگی برابر با یک می‌باشد. فاصله گرفتن از نیمساز نشان‌دهنده خطای مدل‌ها می‌باشد. مقایسه بین نتایج مربوط به مدل‌های پیشنهادی برای بتن NSC و HSC و سایر روابط موجود نشان می‌دهد که مدل‌های پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به روابط موجود (آئین نامه ای و محققین) دارند. نتایج نشان داده است که درصد خطای نسبی رابطه‌های پیشنهادی برای بتن معمولی و مقاومت بالا به ترتیب برابر با ۹/۰۲ درصد و ۳/۸ درصد است.

برای مقایسه عملکرد مدل‌های پیشنهادی با مدل‌های موجود و چک نمودن دقت مدل‌ها در تخمین مدول الاستیسیته بتن‌های با مقاومت معمولی و بالا، مقادیر بدست آمده از مدل با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند و نتایج مربوطه برای بتن‌های با مقاومت معمولی و بالا به ترتیب در شکل ۴ ارائه شده است. در شکل ۴، محور X بیانگر مقادیر آزمایشگاهی به دست آمده برای مدول الاستیسیته و محور Y بیانگر مقادیر متناظر به دست آمده از روابط می‌باشند. حالت

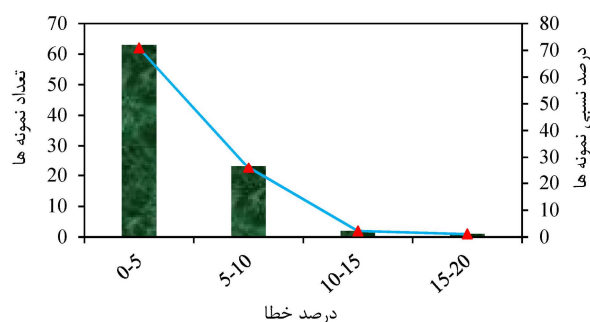


شکل ۴- مقایسه نتایج مدل پیشنهادی برای بتن (الف) NSC و (ب) HSC با مدل‌های موجود بر اساس مقادیر آزمایشگاهی

دارای خطای بیشتر از ۲۵ درصد می‌باشد. از سوی دیگر، بررسی عملکرد رابطه پیشنهادی برای HSC نشان داده است تمامی نمونه‌ها دارای خطا کمتر از بیست درصد بوده و تعداد نمونه‌ها در بازه صفر تا پنج، پنج تا ده، ۱۰ تا ۱۵ و ۱۵ تا ۲۰ به ترتیب برابر با ۶۳، ۲۳، ۲ و ۱ می‌باشد. نمودارهای توزیع پراکندگی تعداد نمونه‌ها در بازه‌های

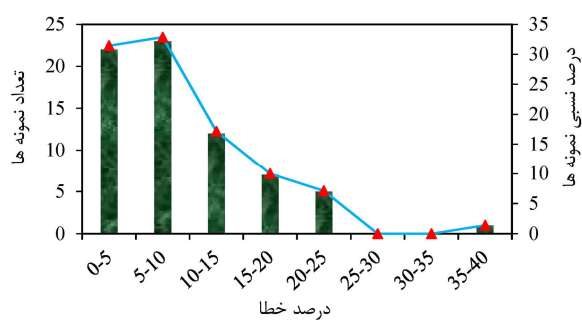
برای بررسی دقیق‌تر نتایج مدل‌های پیشنهادی برای بتن NSC و HSC، نمودارهای تعداد و درصد نمونه‌ها در بازه‌های مختلف درصد خطای نسبی در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در رابطه پیشنهادی برای NSC، بیش از ۹۱ درصد داده‌ها دارای خطا کمتر از ۲۰ درصد می‌باشند. همچنین فقط یک داده

پیشنهادی دارد.



ب) مدل پیشنهادی برای HSC

مشخص شده خطا نشان از عملکرد بسیار مناسب روابط



الف) مدل پیشنهادی برای NSC

شکل ۵- نمودار توزیع خطای نسبی در مدل‌های پیشنهادی

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (E_{i,exp} - \bar{E}_{exp})(E_{i,model} - \bar{E}_{model})]^2}{\sum_{i=1}^n (E_{i,exp} - \bar{E}_{exp})^2 \sum_{i=1}^n (E_{i,model} - \bar{E}_{model})^2} \quad (18)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_{i,exp} - E_{i,model})^2}{n}} \quad (19)$$

$$MAPE = \left(\frac{100}{n}\right) \sum_{i=1}^n \left(\frac{|E_{i,exp} - E_{i,model}|}{E_{i,exp}}\right) \quad (20)$$

که در روابط فوق، $E_{i,exp}$: مقادیر مدول الاستیسیته بدست آمده در آزمایش؛ \bar{E}_{exp} : میانگین همه مقادیر $E_{i,exp}$ ؛ $E_{i,model}$: مدول الاستیسیته بدست آمده از مدل؛ \bar{E}_{model} : میانگین همه مقادیر $E_{i,model}$ و n تعداد نمونه‌ها است. قابل ذکر است که محاسبات در دو گروه NSC و HSC به صورت مجزا انجام گرفته است. در هر گروه مقدار n به ترتیب برابر با ۷۰ و ۸۹ شد. مقادیر شاخص‌های آماری R ، $RMSE$ و $MAPE$ برای دو گروه NSC و HSC به ترتیب در جداول ۳ و ۴ ارائه شده است. بهترین عملکرد در مقادیر بدست آمده در ضریب همبستگی برای بتن معمولی و مقاومت بالا متعلق به روابط پیشنهادی می‌باشد. همچنین کمینه مقدار ضریب خطای جذر میانگین مربعات از نتایج روابط پیشنهادی بدست آمده است. قابل ذکر است که دقت رابطه پیشنهادی برای بتن‌های مقاومت بالا از دقت رابطه پیشنهادی برای بتن‌های معمولی بالاتر است. مقادیر بدست آمده برای هر دو گروه نشان می‌دهد که مدل‌های

برای بررسی دقیقتر عملکرد روش‌های توسعه داده شده از سه شاخص آماری ضریب تشخیص (R^2)، ضریب خطای جذر میانگین مربعات ($RMSE$) و ضریب میانگین درصد مطلق خطا ($MAPE$) استفاده شده است. ضریب تعیین یا ضریب تشخیص میزان تبیین واریانس یا تغییرات متغیر وابسته توسط مجموعه متغیرهای مستقل را نشان می‌دهد. مقدار این ضریب بین صفر و یک در نوسان است. اگر این همبستگی زیاد باشد، مدل داده‌ها را به نحو مناسبی برازش کرده است، در حالی که اگر همبستگی پایین (نزدیک به صفر) باشد، مدل برازش خوبی از داده‌ها ارائه نداده است. خطای جذر میانگین مربعات و ریشه میانگین مربعات خطا بیانگر فاکتوری از خطاهای موجود است و هنگامی که هدف ما ارزیابی دقت کل داده‌ها باشد، می‌توان از آن‌ها به عنوان شاخص‌های مهم استفاده نمود. معمولاً هرچه مدل بهتر بر داده‌ها منطبق باشد مقدار آنها کمتر می‌شود. در بهترین حالت بایستی مقدار $R=1$ و مقادیر $RMSE$ و $MAPE$ برابر صفر شوند که در عمل رسیدن به این آستانه‌ها بسیار سخت می‌باشد. مطالعات نشان داده است اگر مقدار R بزرگتر از ۰/۸ باشد و مقدار خطا در کمترین مقدار خود قرار گیرد، همبستگی قابل قبولی بین مقدار واقعی و تقریب زده شده برقرار است [۳۸]. نحوه محاسبه ضرایب اشاره شده در ادامه آمده است:

در رده بتن‌های معمولی، روابط CSA A23.3 و TS 500 دارای نتایج محافظه‌کارانه‌تر می‌باشند. این رویکرد در بتن‌های مقاومت بالا متعلق به NS 3473 و FHWA است.

پیشنهادی دارای کمترین مقادیر برای ضریب خطای جذر میانگین مربعات و ضریب میانگین درصد مطلق خطا می‌باشند. نتایج نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل‌های پیشنهادی در مقایسه با روابط موجود می‌باشند. همچنین

جدول ۳- مقادیر شاخص‌های آماری R، RMSE و MAPE برای نمونه‌های NSC

Gardner-Zhao	TS 500	EC2	CSA A23.3	BS 8110	ACI 318	مدل پیشنهادی	
۰/۵۸۷	۰/۵۶۹	۰/۵۷۸	۰/۵۷۲	۰/۵۷۳	۰/۵۷۸	۰/۷۶۵	R
۳/۷۵۲	۴/۵۵۹	۳/۷۹۳	۵/۵۹۹	۳/۴۱۹	۴/۶۹۴	۳/۰۷۸	RMSE
۹/۸۷۱	۱۵/۵۲۹	۱۲/۵۹۷	۱۵/۷۲۱	۹/۷۵۷	۱۲/۵۱۴	۹/۰۲	MAPE

جدول ۴- مقادیر شاخص‌های آماری R، RMSE و MAPE برای نمونه‌های HSC

Rashid و همکاران	Wee و همکاران	FHWA	NS 3473	CEB-FIP	ACI 363	مدل پیشنهادی	
۰/۶	۰/۵۵۷	۰/۶	۰/۵۹۲	۰/۵۹۱	۰/۶	۰/۶	R
۷/۵۱۶	۲/۹۲۳	۱۰/۶۷۸	۹/۹۲۸	۲/۹۸۹	۸/۵۶۴	۲/۱۷۱	RMSE
۱۵/۶۱۹	۴/۱۰۱	۲۲/۷۲۸	۲۱/۱۰۱	۴/۵۵	۱۷/۹۸۸	۳/۷۹۸	MAPE

عملکرد پایدار مدل‌های پیشنهادی دارد. برای بررسی دقت عملکرد مدل‌های پیشنهادی، مقایسه‌ای با روابط موجود و بر اساس مقادیر آزمایشگاهی انجام گرفته است. در گروه بتن با مقاومت معمولی از روابط BS 8110، ACI 318، Gardner و Zhao، EC2، TS 500، CSA A23.3 برای مقایسه استفاده شده است. همچنین روابط ACI 363، CEB-FIP، NS 3473، FHWA، Wee و همکاران و Rashid و همکاران در گروه بتن‌های با مقاومت بالا برای مقایسه با نتایج مدل پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داده است که مدل‌های پیشنهادی دارای عملکرد بهتری در تخمین مدول الاستیسیته بتن بوده و در صنعت ساخت و ساز می‌توانند به عنوان ابزاری کارآمد مورد استفاده قرار گیرند.

۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بر روی بتن‌های با مقاومت فشاری معمولی و بالا به ارائه روابطی جدید برای تعیین مدول الاستیسیته بتن با استفاده از ترکیب شبکه عصبی چند جمله‌ای و الگوریتم بهینه‌سازی علف هرز مهاجم پرداخته شده است. روابط پیشنهادی مشابه روابط موجود بر مبنای مقاومت فشاری بتن می‌باشند. برای اطمینان بهترین تقریب از مدول الاستیسیته بتن ضرایب چند جمله‌ای بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی علف هرز مهاجم تعیین شده است. در تمامی مدل‌های ساخته شده در این مطالعه عموماً بعد از حدود ۳۰۰ تکرار مقدار ریشه میانگین مربعات خطا به کمینه مقدار خود رسیده و بعد از آن ثابت مانده است که نشان از

مراجع

- [1] Mesbah HA, Lachemi M, Aitcin P-C. Determination of elastic properties of high-performance concrete at early ages. Mater J 2002;99:37-41.
- [2] 363 ACI. Report on High-Strength Concrete (ACI 363R-10). ACI; 2010.
- [3] Felix EF, Possan E, Carrazedo R. A New Formulation to Estimate the Elastic Modulus of Recycled Concrete Based on Regression and ANN. Sustainability 2021;13:8561.
- [4] Nguyen T-T, Thai H-T, Ngo T. Optimised mix design and elastic modulus prediction of ultra-high strength concrete. Constr Build Mater 2021;302:124150.
- [5] Mindess S, Young JF, Darwin D. Concrete, 2nd Edition Prentice Hall. Englewood Cliffs, NJ 2002.

- [6] ASTM-C469. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. ASTM Stand 2010.
- [7] 318 ACIC. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary, American Concrete Institute; 2014.
- [8] Standard B. Structural Use of Concrete: Code of Practice for Design and Construction, Part 1, BS 8110 1997.
- [9] Association CS. Design of concrete structures. Mississauga, Ont.: Canadian Standards Association; 2004.
- [10] Institution BS. Eurocode 2: Design of concrete structures: Part 1-1: General rules and rules for buildings. British Standards Institution; 2004.
- [11] Institute TS. Requirements for design and construction of reinforced concrete structures. TS500-2000 2000.
- [12] Gardner NJ, Zhao JW. Mechanical properties of concrete for calculation of long term deformations. Proc. Second Can. Symp. Cem. Concr., University of British Columbia Press, Vancouver, British Columbia, Canada; 1991, p. 150-9.
- [13] CEB-FIP C. model code 1990. Com Euro-International Du Beton, Paris 1991:87-109.
- [14] Standard N. Norwegian Council for building standardization. NS3473, Norw 1998.
- [15] Graybeal BA. Material property characterization of ultra-high performance concrete. United States. Federal Highway Administration. Office of Infrastructure ...; 2006.
- [16] Wee TH, Chin MS, Mansur MA. Stress-strain relationship of high-strength concrete in compression. J Mater Civ Eng 1996;8:70-6.
- [17] Rashid MA, Mansur MA, Paramasivam P. Correlations between mechanical properties of high-strength concrete. J Mater Civ Eng 2002;14:230-8.
- [18] Demir F. A new way of prediction elastic modulus of normal and high strength concrete—fuzzy logic. Cem Concr Res 2005;35:1531-8.
- [19] Demir F. Prediction of elastic modulus of normal and high strength concrete by artificial neural networks. Constr Build Mater 2008;22:1428-35. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.04.004>.
- [20] Yan K, Shi C. Prediction of elastic modulus of normal and high strength concrete by support vector machine. Constr Build Mater 2010;24:1479-85.
- [21] Gandomi AH, Faramarzarfar A, Rezaee PG, Asghari A, Talatahari S. New design equations for elastic modulus of concrete using multi expression programming. J Civ Eng Manag 2015;21:761-74.
- [22] Ahmadi-Nedushan B. Prediction of elastic modulus of normal and high strength concrete using ANFIS and optimal nonlinear regression models. *Construction and Building Materials* 2012;36:665-73.
- [23] Ozturan T. An investigation of concrete abrasion as two phase material. Fac Civ Eng Istanbul Tech Univ 1984.
- [24] Turan M, Iren M. Strain stress relationship of concrete. J Eng Archit 1997;12:76-81.
- [25] Gesoğlu M, Güneyisi E, Özturan T. Effects of end conditions on compressive strength and static elastic modulus of very high strength concrete. Cem Concr Res 2002;32:1545-50.
- [26] Shannag MJ. High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume. Cem Concr Compos 2000;22:399-406.
- [27] Naderpour H, Rafiean AH, Fakharian P. Compressive strength prediction of environmentally friendly concrete using artificial neural networks. *Journal of Building Engineering* 2018;16:213-9.
- [28] Naderpour H, Nagai K, Fakharian P, Haji M. Innovative models for prediction of compressive strength of FRP-confined circular reinforced concrete columns using soft computing methods. Compos Struct 2019;215:69-84. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.048>.
- [29] Naderpour H, Rezazadeh Eidgahee D, Fakharian P, Rafiean AH, Kalantari SM. A new proposed approach for moment capacity estimation of ferrocement members using Group Method of Data Handling. Eng Sci Technol an Int J 2020;23:382-91. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.05.013>.
- [30] Shahmansouri AA, Akbarzadeh Bengar H, Jafari A. Modeling the lateral behavior of concrete rocking walls using multi-objective neural network. J Concr Struct Mater 2020;5:110-28.
- [31] Shahmansouri AA, Akbarzadeh Bengar H, Ghanbari S. Experimental investigation and predictive modeling of compressive strength of pozzolanic geopolymer concrete using gene expression programming. J Concr Struct Mater 2020;5:92-117.
- [32] Ghanizadeh AR, Ziaee A, Khatami SMH, Fakharian P. Predicting Resilient Modulus of Clayey Subgrade Soils by Means of Cone Penetration Test Results and Back-Propagation Artificial Neural Network. J Rehabil Civ Eng 2022;10:146-62. <https://doi.org/10.22075/jrce.2022.25013.1568>.
- [33] Naderpour H, Sharei M, Fakharian P, Heravi MA. Shear Strength Prediction of Reinforced Concrete Shear Wall Using ANN, GMDH-NN and GEP. *Journal of Soft Computing in Civil Engineering* 2022;6:66-87.
- [34] Mehrabian AR, Lucas C. A novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization. Ecol Inform 2006;1:355-66.
- [35] Mohammed Abdelkader E, Moselhi O, Marzouk M, Zayed T. Hybrid Elman Neural Network and an Invasive Weed Optimization Method for Bridge Defect Recognition. Transp Res Rec 2021;2675:167-99.

- [36] Asteris PG, Cavaleri L, Ly H-B, Pham BT. Surrogate models for the compressive strength mapping of cement mortar materials. *Soft Comput* 2021;25:6347–72.
- [37] Huang L, Asteris PG, Koopialipour M, Armaghani DJ, Tahir MM. Invasive weed optimization technique-based ANN to the prediction of rock tensile strength. *Appl Sci* 2019;9:5372.
- [38] Smith GN. Probability and statistics in civil engineering. Collins London; 1986.