

Prediction of Adhesion Parameters of Hook-shaped Steel Fibers and Concrete Using Artificial Neural Networks

Amir Ebrahim Akbari Bagal*

Department of Civil Engineering, Bostanabad Branch, Islamic Azad University, Bostanabad, Iran

Masoud Ghaderi

Department of Civil Engineering, Ghermi Branch, Islamic Azad University, Ghermi, Iran

Amir.Akbari.civil@gmail.com

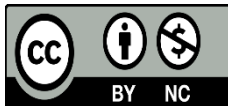
DOI:

Keywords:

steel fibers,
artificial neural
network,
pullout force,
finite element
model.

Abstract

As steel fibers are important reinforcement materials in concrete, in this study, the behavior of hook-shaped steel fibers from concrete is predicted through the use of artificial neural networks. In the absence of comprehensive laboratory data, data obtained from finite element analysis was used for modeling. The simulations are carried out using ABAQUS software's finite element method in 3D. Using the concept of the transition zone of the interface, whose parameters were obtained by inverse finite element analysis and experimental tests conducted on a sample of fibers, this model has been developed to simulate the interaction between fibers and concrete. On the basis of the results of the numerical model validated against the experimental results, the effective parameters of the fibers were extracted, and a neural network was then constructed based on the results. A multilayer forward perceptron artificial neural network and back-propagation training algorithm are used to predict pull-out force, with Marquardt-Lonberg optimization applied. The results demonstrate that the neural network model presented in this research is an effective method for predicting the pull-out force of fibers from concrete, in part because it allows the use of more variables in modeling, as well as delivering more accurate results.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می باشد).

پیش‌بینی پارامترهای چسبندگی الیاف فولادی هوک شکل و بتن با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی

امیر ابراهیم اکبری بقال*

استادیار، دانشکده عمران، واحد بستان آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، بستان آباد، ایران.

مسعود قادری

مربی، دانشکده مهندسی عمران، واحد گرمیری، دانشگاه آزاد اسلامی، گرمی، ایران.

Amir.Akbari.civil@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۰۵ شهریور ۱۴۰۲

تاریخ دریافت: ۰۹ اردیبهشت ۱۴۰۲

چکیده

با توجه به اهمیت بکارگیری الیاف فولادی در تقویت بتن، در تحقیق حاضر با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی به پیش‌بینی رفتار بیرون کشیدگی الیاف فولادی هوک شکل از بتن پرداخته شده است. به دلیل محدودیت داده‌های جامع آزمایشگاهی، از داده‌های به دست آمده از تحلیل المان محدود به عنوان ورودی شبکه عصبی استفاده شده است. به منظور شبیه‌سازی بیرون کشیدگی الیاف از روش المان محدود سه‌بعدی و نرم‌افزار آباکوس استفاده می‌شود. در مدل المان محدود، اندرکنش بین الیاف و بتن با استفاده از مفهوم ناحیه انتقالی سطح مشترک شبیه‌سازی شده است که پارامترهای آن با استفاده از روش المان محدود معکوس و استفاده از نتایج تست تجربی بیرون‌کشیدگی انجام پذیرفته بر روی یک نمونه الیاف به دست آمده است. پس از صحت‌سنجی نتایج مدل عددی با نتایج تجربی، نتایج به ازای پارامترهای مؤثر الیاف استخراج شده و بر اساس آنها مدل‌سازی با استفاده از شبکه‌های عصبی صورت گرفته است. پیش‌بینی نیروی بیرون‌کشیدگی توسط شبکه‌های عصبی مصنوعی چندلایه و الگوریتم آموزش انتشار به عقب، با تکنیک بهینه‌سازی مارکوردت-لونبرگ انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل شبکه عصبی ارائه شده در این تحقیق، به دلیل توانایی استفاده از متغیرهای بیشتر در مدل‌سازی و نتایج دقیق‌تر، روشی مؤثر برای پیش‌بینی نیروی بیرون‌کشیدگی الیاف از بتن است.

کلید واژگان: الیاف فولادی، شبکه عصبی مصنوعی، نیروی بیرون‌کشیدگی، مدل المان محدود.

۱- مقدمه

مواد ساخته شده از سیمان مانند بتن عمدتاً دارای رفتاری ترد و شکننده بوده و در مقابل نیروهای کششی بسیار ضعیف هستند که با استفاده از افزودنی‌های مختلف مانند استفاده از نانو مواد و الیاف می‌توان به بهبود آن کمک نمود (۱-۳). بررسی مطالعات نشان می‌دهد که الیاف فلزی با مواد متفاوت، ضریب لاغری و شکل‌های هندسی مختلف یکی از بهترین روش‌ها به منظور بهبود خواص شکنندگی بتن، استحکام خمشی، استحکام کششی و قابلیت جذب انرژی در برابر بارهای ضربه‌ای می‌باشد (۴-۶). بنابراین در سال‌های اخیر، مطالعه تأثیر الیاف بر مشخصات مکانیکی بتن مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است (۷، ۸).

دنگ^۱ و همکاران (۹) در یک مطالعه مروری به بررسی برخی از مطالعات انجام شده در زمینه رفتار چسبندگی الیاف فولادی با بتن پرداختند و نشان دادند که پارامترهایی مانند نوع الیاف، کسر حجمی، طول مدفون شدگی الیاف، هندسه الیاف، جهت الیاف، بر خواص چسبندگی الیاف با بتن تأثیرگذار می‌باشد. بر اساس مطالعه آنها عمدتاً دو مکانیزم مختلف چسبندگی بین ماتریس و الیاف وجود دارد که عبارت‌اند از: رفتار چسبندگی شیمیایی و اثر اصطکاک در سطح تماس در نتیجه مدفون شدگی الیاف در داخل بتن. مکانیزم اول عمدتاً توسط خواص ناحیه انتقالی سطح مشترک^۲ تعریف می‌شود که به مشخصات سطح الیاف و واکنش شیمیایی الیاف با ماتریس بستگی دارد (۹-۱۱) و مکانیزم دوم وابستگی زیادی به شکل هندسی الیاف دارد (۱۲، ۱۳). یوو^۳ و کیم^۴ (۱۴) به بررسی تجربی رفتار بیرون کشیدگی انواع مختلف الیاف فولادی با هندسه‌های مستقیم، هوک، پیچشی^۵ و خمیده از بتن پرداختند و نشان دادند که الیاف هوک شکل دارای بیشترین نیروی بیرون کشیدگی هستند. بنتی^۶ و همکاران (۱۵) نشان دادند که الیاف هوک رفتاری متفاوت نسبت به الیاف مستقیم دارند و استفاده از الیاف هوک شکل باعث افزایش ۴/۵ برابری در حداکثر نیروی بیرون کشیدگی الیاف از بتن می‌شود. اسماعیلی و همکاران (۳) با استفاده مدل عددی به پیش‌بینی رابطه ای برای نیروی بیرون کشیدگی برحسب لغزش الیاف فولادی هوک شکل پرداختند. دهقانی و همکاران (۱۶) به مقایسه رفتار بیرون کشیدگی انواع مختلف الیاف هوک از بتن معمولی پرداختند. مایدا^۷ (۱۷) رفتار بیرون

کشیدگی الیاف فولادی هوک شکل از بتن پر استحکام را به صورت تحلیلی و تجربی مطالعه کردند.

با توسعه روش‌های نوین شبیه‌سازی مهندسی، استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی به منظور پیش‌بینی رفتار مکانیکی در کاربردهای عمرانی به صورت چشمگیری افزایش یافته است. به عنوان مثال چابنه^۸ و همکاران (۱۸) در یک مطالعه مروری به بررسی روش‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی خواص مکانیکی بتن پرداختند. آستریس^۹ و همکاران (۱۹) کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن در سازه‌های موجود را مورد بررسی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که با وجود پیش‌بینی قابل قبول مدل‌های رگرسیونی، روش شبکه‌های عصبی مصنوعی، نتایج آزمایش‌ها را به طور دقیق پیش‌بینی می‌کند.

بررسی مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که هر چند در سال‌های اخیر مطالعاتی زیادی در زمینه بررسی رفتار چسبندگی الیاف با جنس‌ها و هندسه‌های مختلف با بتن انجام پذیرفته است ولی تاکنون پیش‌بینی رفتار بیرون کشیدگی الیاف از بتن با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین به خصوص روش شبکه‌های عصبی مصنوعی مورد توجه قرار نگرفته است. بر این اساس، هدف اصلی تحقیق حاضر پیش‌بینی رفتار پیوستگی میان الیاف فولادی هوک شکل و بتن با استفاده از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی و مطالعه تأثیر زاویه هوک بر مقاومت چسبندگی آن می‌باشد. بدین منظور در ابتدا با شبیه‌سازی المان محدود نتایج به ازای مقادیر مختلف قطر و زاویه انحراف انتهایی الیاف استخراج شده است. با نظر گرفتن این داده‌ها، مدل شبکه عصبی مصنوعی ایجاد و عملکرد آن مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- مدل‌سازی المان محدود

در شکل ۱-الف مدل شماتیکی از پیکربندی مدل المان محدود بیرون کشیدگی الیاف هوک شکل فولادی از بتن نشان داده شده است. شعاع الیاف هوک برابر r و طول و زاویه انتهایی آن به ترتیب برابر l و θ می‌باشد. شعاع ماتریس باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا اثر شرایط مرزی بر رفتار چسبندگی قابل صرف‌نظر کردن باشد، بنابراین شعاع آن در حدود ۲۰ برابر شعاع الیاف انتخاب شده است. الیاف تحت بارگذاری تک‌جهته^{۱۰}

⁶ Benedetty

⁷ Maida

⁸ Chaabene

⁹ Asteris

¹⁰ Uniaxial Tension

¹ Deng

² Interfacial Transition Zone (ITZ)

³ Yoo

⁴ Kim

⁵ Twisted

$$T = \begin{Bmatrix} T_n \\ T_s \\ T_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{mm} & 0 & 0 \\ 0 & K_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} \quad (1)$$

که در آن تنش جدایش در جهت قائم، T_s و T_t به ترتیب تنش‌های جدایش در جهات برشی اول و برشی دوم هستند، K ماتریس سختی، δ_n جابجایی در جهت قائم، δ_s و δ_t به ترتیب مؤلفه‌های جابجایی در جهات برشی اول و برشی دوم هستند. در این مدل فرض می‌شود که فرایند شکست را می‌توان به وسیله دو پارامتر تنش برشی ماکزیمم (T_{max}) و حداکثر کرنش جدایش بحرانی δ_{max} مورد توجه قرار می‌گیرد.

در تحقیق حاضر به منظور مطالعه تأثیر پارامترهای مختلف بر رفتار بیرون کشیدگی الیاف از بتن، پارامترهای تنش پیوستگی متوسط و انرژی مورد نیاز برای بیرون کشیدگی الیاف محاسبه می‌شود که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\tau_{av} = \frac{P_{max}}{\pi d_f L_E} \quad (2)$$

$$W_p = \int_{\delta=0}^{\delta=\delta_{sep}} T(\delta) d\delta \quad (3)$$

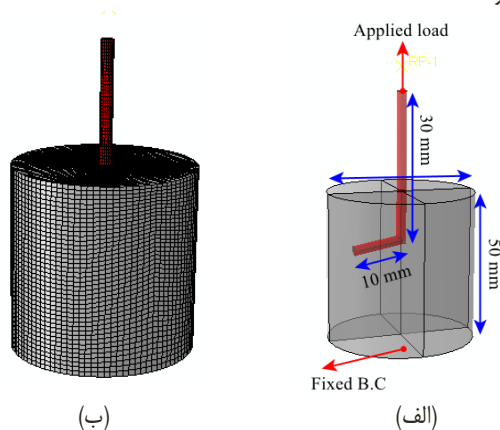
که در آن تنش متوسط چسبندگی (MPa)، P_{max} حداکثر نیروی بیرون کشیدگی (N)، d_f قطر الیاف (mm)، L_E طول اولیه مدفون شدگی (mm) و W_p انرژی بیرون کشیدگی (N/mm) می‌باشد.

به منظور شبیه‌سازی رفتار غیرخطی بتن از مدل رفتاری پلاستیسیته تخریب شده بتن^۴ استفاده شده است. پارامترهای موجود در این مدل رفتاری عبارت‌اند از: زاویه اتساع^۵ ψ ، پتانسیل خروج از مرکزیت پلاستیک^۶، نسبت مقاومت فشاری دو محوره بتن به مقاومت فشاری تک محوره f_{bo}/f_{co} ، ضریب بارگذاری K_c و پارامتر ویسکوزیته. در جدول ۱ مشخصات مکانیکی مورد استفاده برای بتن نشان داده شده است.

زاویه‌ی اتساع کرنش پلاستیک، اثر برش را در فاز بعد از ناحیه الاستیک تعریف می‌نمایند. هنگامی که $\psi=0$ باشد، ماده هیچ گونه تغییر حجم کرنشی ندارد. در حقیقت زاویه اتساع رابطه بین حجم و کرنش برشی را مطابق رابطه زیر بیان می‌کند:

$$\psi = -\frac{\delta \varepsilon_t}{\delta \gamma} \quad (4)$$

با اعمال جابجایی δ به انتهای آزاد الیاف قرار گرفته و نیروی ایجاد شده P_a اندازه‌گیری می‌شود. جهت اعمال شرایط مرزی و مقید کردن ماتریس، انتهای پایین نمونه بتنی کاملاً مقید می‌شود. هندسه مدل المان محدود در نرم‌افزار ABAQUS از سه قسمت مختلف بتن، الیاف فولادی و ناحیه انتقالی سطح مشترک بین این دو ماده تشکیل شده است. خواص مکانیکی بتن با استفاده از مدل رفتاری پلاستیسیته تخریب شده بتن و الیاف فولاد با استفاده از مدل الاستیک-پلاستیک شبیه‌سازی شده است. در این تحقیق، به منظور شبیه‌سازی چسبندگی الیاف فولادی با بتن از مفهوم ناحیه انتقالی سطح مشترک استفاده شده است. الیاف فولادی با استفاده از المان‌های مکعبی C8D3R و با اندازه متوسط $90 \mu m$ مش‌بندی شده است. بتن نیز با استفاده از C8D3R با اندازه متوسط $0.2 mm$ مش‌بندی شده است. لازم به ذکر است که این ابعاد مش پس از بررسی استقلال از شبکه^۱ انتخاب شده است. مطابق شکل ۱ بارگذاری به صورت نیروی کششی به انتهای آزاد الیاف اعمال شده و شرایط مرزی اطراف ماتریس بتنی کاملاً مقید در نظر گرفته شده است.



شکل ۱ - (الف) مدل هندسی بتن با یک الیاف فولادی هوک شکل و (ب) مدل مش‌بندی شده

با توجه به اینکه الیاف از نوع هوک می‌باشند بنابراین به منظور شبیه‌سازی رفتار چسبندگی از رفتار مود ترکیبی شکست استفاده می‌شود. رابطه ساختاری بین تنش جدایش^۲ و لغزش^۳ به صورت زیر می‌باشد:

⁴ Concrete Damage Plasticity (CDP)

⁵ Dilation Angle

⁶ Plastic Potential Eccentricity

¹ Mesh independence study

² Traction

³ Separation

10		15
11		30
12		50
13		75
14		90
15	1.4	0
16		5
17		15
18		30
19		50
20		75
21		90
22	2	0
23		5
24		15
25		30
26		50
27		75
28		90

۴- شبکه عصبی

شبکه‌های عصبی مصنوعی یکی از شاخه‌های اصلی هوش مصنوعی است. ویژگی مهم شبکه‌های عصبی، علاوه بر تعداد نرون‌ها و لایه‌ها، روش پردازش داده‌ها یعنی جریان اطلاعات بین نرون‌های آن است. بنابراین بر اساس جریان داده‌ها، شبکه‌های عصبی شامل دو گونه شبکه‌های عصبی پیش‌رونده و شبکه‌های عصبی عقب‌گرد هستند. در شبکه‌های عصبی عقب‌گرد، از انتشار خطا به عقب برای تصحیح خطای موجود در جریان پیشرو استفاده می‌شود تا زمانی که خطا به کمترین مقدار مورد نظر برسد.

که در آن ϵ_f تغییرات کرنش حجمی و $\delta\gamma$ تغییرات کرنش برشی می‌باشد. برای بتن مسلح زاویه اتساع بین 20° تا 40° می‌باشد (۲۰-۲۲). هر چه مقدار این زاویه کوچکتر باشد رفتار مصالح ترد و هر چه این زاویه بزرگتر باشد ماده از خود رفتاری مانند مواد شکل‌پذیر نشان می‌دهد. پتانسیل خروج از مرکزیت پلاستیک عدد کوچک مثبتی است که برابر نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری بتن می‌باشد. مقدار پیش فرض آن در نرم‌افزار آباکوس برابر ۰/۱ است. وقتی که این عدد صفر باشد معیار دراگر-پراگر کلاسیک حاصل می‌شود (۲۳).

جدول ۱- مشخصات مکانیکی مورد استفاده برای بتن

Concrete properties	Compressive strength	E	Tensile strength	Fracture energy
	32.9 MPa	22.45 GPa	3.32 MPa	0.07 N/mm
CDP parameters	ψ	e	f_{bo}/f_{co}	K_c
	36	0.1	1.16	0.67

۳- مشخصات نمونه‌های تحت بررسی

در جدول ۲ محدوده پارامترهای تحت بررسی ارائه شده است.

جدول ۲- ماتریس طراحی برای مدل‌سازی پارامترهای هندسی

No	d_f (mm)	Angle
1	0.4	0
2		5
3		15
4		30
5		50
6		75
7		90
8	0.8	0
9		5

منزله عملکرد بهتر شبکه و مقدار صفر به معنای عدم وجود خطا است. از طرفی مقادیر Regression (R) معرف میزان همبستگی میان خروجی‌های شبکه و هدف است. به این ترتیب که $R = 1$ به معنی همبستگی کامل و $R = 0$ مبین تصادفی بودن و عدم همبستگی است؛ بنابراین دو معیار MSE و R جهت انتخاب عصبی ایده آل انتخاب می‌شود. ورودی‌های شبکه شامل قطر الیاف و زاویه هوک بوده و خروجی شبکه نیروی بیرون کشیدگی و انرژی مورد نیاز می‌باشد.

۵- بررسی نتایج

پارامترهای مدل ITZ با استفاده از نتایج تست‌های تجربی موجود که جزئیات آن در کار قبلی نویسندگان مقاله آمده است، مورد استفاده قرار می‌گیرد که در جدول ۳ ارائه شده است. سپس تأثیر پارامترهای مختلف بر رفتار چسبندگی الیاف هوک شکل با بتن مطالعه می‌شود.

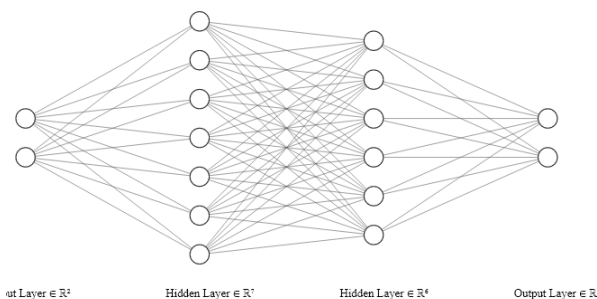
جدول ۳- پارامترهای مدل ناحیه چسبندگی به منظور تعریف اندرکنش میکرو الیاف فولادی با بتن

	T_{max}	δ_{max}	G_c
Steel fiber	8.03MPa	1.8×10^{-3} mm	0.83 MPa.mm

۵-۱ آنالیز حساسیت اندازه مش

شبیه‌سازی عددی برای هر یک از مدل‌ها با استفاده از مش ساختاری انجام شده است. مش بهینه با استفاده از روش همگرایی جواب انتخاب شده است؛ به طوری که جواب پایدار بوده و با کوچکتر شدن مش جواب تغییر نمی‌کند. از طرف دیگر با توجه به وابستگی حذف المان در خسارت بتن، اندازه مش مهم بوده و تأثیر مستقیم روی حذف المان در جابجایی شکست می‌گذارد. تحلیل انجام شده برای آنالیز حساسیت مش به طول المان برای نمونه No. 6 در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با ریزتر کردن مش‌ها، هنگامی که تعداد المان‌ها به 13058892 می‌رسد، حداکثر تنش تغییر محسوس نمی‌کند. بنابراین، ابعاد مناسب برای المان‌های الیاف و بتن به ترتیب برابر $90\mu\text{m}$ و 0.2mm می‌باشد.

در این مقاله برای تصحیح خطا از الگوریتم انتشار خطا به عقب استفاده می‌شود. نشان داده شده است که شبکه‌های با انتشار خطا به عقب برای مسائل پیشگویی، بهینه عمل می‌کنند (۲۴). در شکل ۲ شبکه عصبی مورد استفاده با دو لایه مخفی با سه نرون و لایه خروجی با دو نرون، نشان داده شده است.



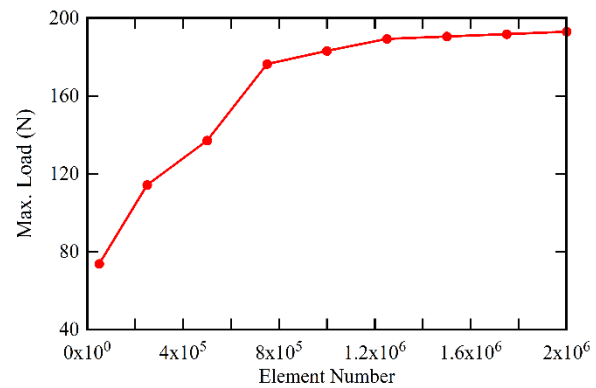
شکل ۲- شبکه عصبی با دو لایه مخفی با سه نرون و لایه خروجی با دو نرون

شبکه پس انتشار مورد استفاده یک شبکه چندلایه با تابع انتقال غیرخطی و قاعده یادگیری ویدر - هوف است. در این شبکه از بردار ورودی و هدف برای آموزش جهت تقریب زدن یک تابع یافتن رابطه میان ورودی و خروجی و دسته‌بندی ورودی‌های شبکه عصبی استفاده می‌شود. این شبکه با دارا بودن سه لایه میانی و دو لایه خروجی خطی توانایی تخمین هر تابعی با تعداد نقاط ناپیوستگی محدود را دارد. شبکه پس انتشار استاندارد یک الگوریتم با کاهش شیب است که در آن وزن‌های شبکه در جهت خلاف شیب تابع کارایی حرکت می‌کنند. در این الگوریتم ابتدا فرض بر این است که وزن‌های شبکه به صورت تصادفی انتخاب و در هر گام خروجی شبکه محاسبه شده و با توجه به میزان اختلاف خروجی با هدف وزن‌ها تصحیح می‌گردند تا در نهایت خطا کمینه شود. در الگوریتم پس انتشار تابع تحریک هر عصب برابر با جمع وزن‌دار ورودی‌های مربوط به آن در نظر گرفته می‌شود. در گام بعد جهت برقراری ارتباط خطا با ورودی‌ها، وزن‌ها و خروجی‌ها از روش Levenberg - Marquardt استفاده شده است. این روش استاندارد برای مسائل کمینه مربعات بوده و به صورت ترکیبی از روش نیوتن - گوس و بیشترین شیب نزول است. این الگوریتم به صورت تصادفی داده‌ها به سه بخش آموزش صحت و آزمایش تقسیم می‌کند.

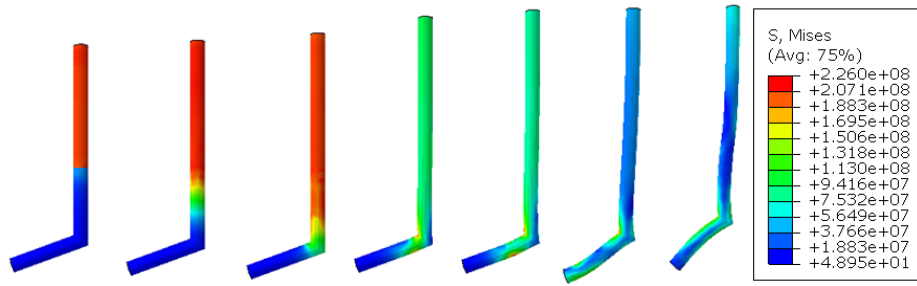
در مقاله حاضر از ۷۰٪ داده‌ها جهت آموزش، ۳۰٪ برای درستی سنجی شبکه عصبی استفاده شده است. ملاک توقف آموزش شبکه‌ها MSE (Mean Square Error) است؛ به گونه‌ای که مقادیر کم MSE به

۵-۲ نتایج مدل المان محدود

در شکل ۴ توزیع تنش پلاستیک برای نمونه No. 4 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در ابتدای اعمال نیروی کشیدگی، ابتدا قسمت‌های بالایی الیاف تحت تأثیر تنش‌های بیشتر قرار گرفته و سپس با غلبه بر نیروهای چسبندگی شیمیایی و اصطکاکی به تدریج توزیع تنش‌های پلاستیک در طول الیاف بیشتر می‌شود. با افزایش بیشتر نیروی اعمالی سطح تماس الیاف به صورت کامل از بتن کنده شده و الیاف شروع به جدایش کامل از بتن می‌کند که در این حالت مهار مکانیکی ایجاد شده در موقعیت خمیدگی هوک شکل باعث به وجود آمدن نقاط محلی انتقال نیروی بین الیاف و ماتریس می‌شود.



شکل ۳- آنالیز حساسیت به مش حداکثر نیروی بیرون کشیدگی برای نمونه No.6



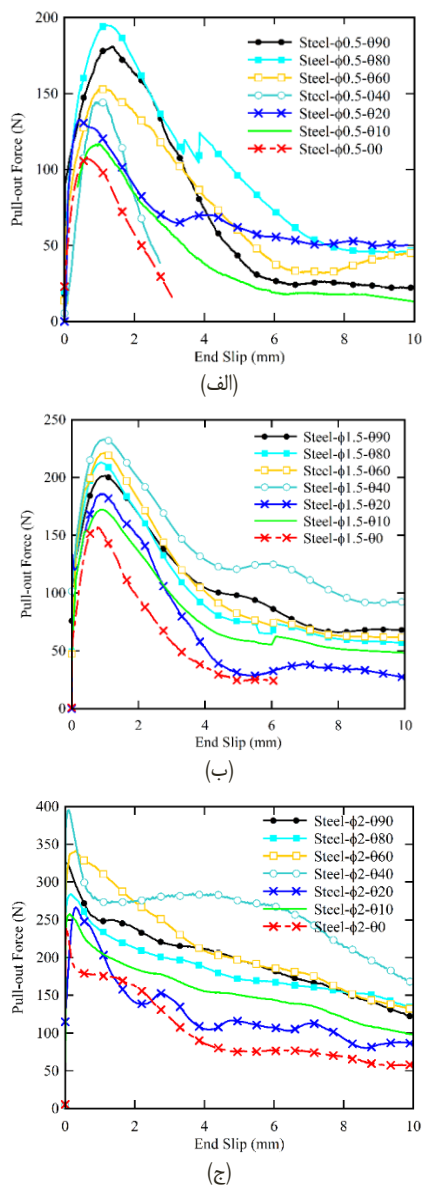
شکل ۴ - مراحل مختلف بیرون کشیدگی الیاف هوک با زاویه هوک ۱۰ درجه از بتن حین اعمال نیرو

زاویه هوک بیشتر می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود برای الیاف با قطر 0.5mm، با افزایش زاویه هوک از 0° به 80° نیروی بیرون کشیدگی در حدود 73% افزایش می‌یابد و در مقابل افزایش بیشتر زاویه هوک باعث کاهش پارامترهای بیرون کشیدگی الیاف هوک شکل می‌شود.

به منظور بررسی دقیق تأثیر پارامترهای الیاف بر مشخصه‌های چسبندگی، در جدول ۴ اثر آنها بر پاسخ بیرون کشیدگی از جمله نیروی بیرون کشیدگی، لغزش مربوط به نقطه بیشینه نیرو، انرژی بیرون کشیدگی، تنش مؤثر بیرون کشیدگی در هر حالت نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که نیروی بیرون کشیدگی و کل کار بیرون کشیدگی با افزایش

جدول ۴- اثر زاویه هوک و قطر الیاف بر نیروی بیرون کشیدگی، لغزش، انرژی بیرون کشیدگی و تنش مؤثر بیرون کشیدگی

Fiber Diameter (mm)	Hooke Angle (degree)	Pull-out Force (N)	Critical Separation (mm)	Pullout Work (N/mm)	Bond Stress (MPa)
0.4	0	402.99	0.67	1.32	107.97
	5	461.57	0.72	0.99	117.26
	15	681.75	0.44	1.52	134.03
	30	1053.43	0.98	1.93	143.02
	50	1270.58	1.08	1.07	155.24
	75	1584.69	1.26	1.24	197.25
	90	750.43	1.16	1.66	156.35
0.8	0	471.67	0.79	0.56	158.37
	5	614.08	0.89	0.88	174.53
	15	735.28	0.91	0.66	187.56
	30	1419.05	0.82	0.84	184.12
	50	1797.80	1.03	1.07	223.61
	75	977.68	0.99	0.68	215.84
	90	1086.76	1.10	0.72	203.92
1.4	0	987.78	0.04	0.60	242.91
	5	1198.87	0.12	0.12	259.87
	15	1640.24	0.31	0.72	269.47
	30	2789.62	0.18	1.06	399.66
	50	2621.96	0.30	0.30	343.60
	75	1986.67	0.16	0.16	287.95
	90	2025.05	0.08	0.90	338.75

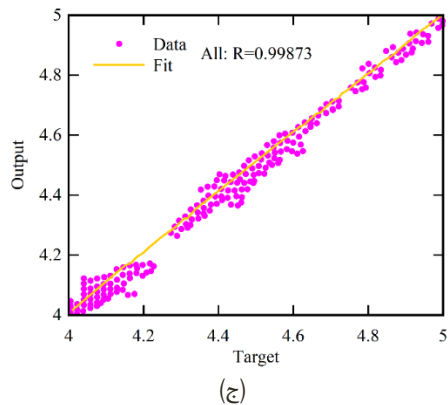
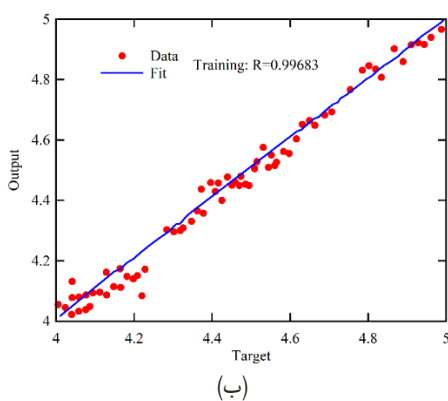
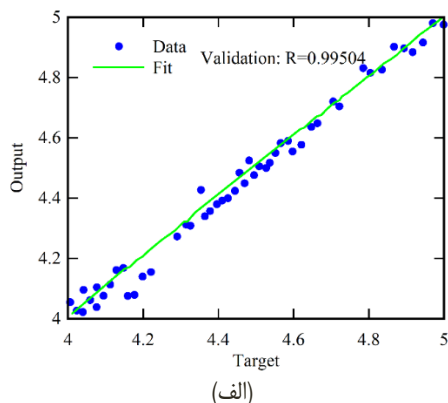


شکل ۵ - منحنی نیرو-لغزش برای نمونه‌های مختلف الیاف فولادی با (الف) قطر 0.5 mm، (ب) قطر 1.5 mm و (ج) قطر 2 mm

۳-۵ نتایج شبکه عصبی مصنوعی

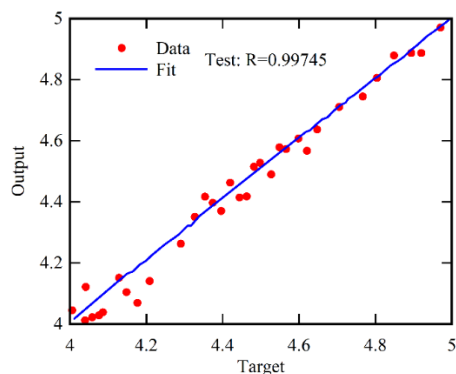
بر اساس تحلیل‌های صورت گرفته بر روی داده‌های مدل‌سازی با استفاده از روش برنامه‌نویسی در نرم‌افزار MATLAB، شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه پیشرو از نوع انتشار برگشی انتخاب گردید. معیار توقف آموزش شبکه‌ها $\text{Max_fail}=6$ ، $\text{Epoch}=1000$ و بقیه به صورت پیش فرض نرم‌افزار در نظر گرفته شده

در ادامه، به منظور بررسی دقیق‌تر تأثیر مشخصات هندسی الیاف بر رفتار پیوستگی الیاف و بتن در ادامه منحنی‌های نیرو-لغزش برای نمونه‌های مختلف تحت بررسی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در شکل ۵ منحنی‌های نیرو-لغزش برای نمونه‌های مختلف الیاف فولادی تحت بررسی ارائه شده است. با بررسی رفتار بیرون کشیدگی الیاف ساده و الیاف هوک شکل مشاهده می‌شود که در الیاف ساده (زاویه هوک صفر درجه)، بسته به میزان مقاومت اصطکاکی الیاف، لغزش به سمت خارج اتفاق می‌افتد و در نتیجه شکست از نوع لغزشی است. در الیاف هوک شکل، علاوه بر چسبندگی شیمیایی و پایداری اصطکاکی، چفت و بست مکانیکی بین بتن و بخش هوک شکل الیاف، سبب بالا رفتن مقاومت پیوستگی می‌گردد. در میان مکانیزم‌های پیوستگی، پیوستگی برشی الیاف هوک شکل با بتن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است زیرا بیشترین تنش پیوستگی را ایجاد می‌کند. در این مکانیزم پیوستگی، انتقال نیرو از طریق درگیر شدن بخش خمیده الیاف و کلیدهای بتنی بین آنها انجام می‌شود. در نتیجه در محل تماس بخش خمیده الیاف و بتن، تنش فشاری ایجاد می‌شود. بررسی منحنی‌های نیرو-لغزش نشان داده شده در شکل ۵ برای الیاف فولادی هوک شکل و الیاف فولادی مستقیم نشان می‌دهد که به ازای مشخصات یکسان الیاف، نیروی بیرون کشیدگی الیاف هوک شکل بیشتر از الیاف فولادی مستقیم می‌باشد. به عنوان نمونه برای الیاف با قطر 0.5mm حداکثر نیروی بیرون کشیدگی الیاف هوک شکل با زاویه 10° درجه، در حدود 10 درصد بیشتر از الیاف فولادی مستقیم است. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که مقدار جابجایی مورد نیاز برای جدایش نیز برای الیاف هوک شکل بیشتر از الیاف مستقیم می‌باشد. مقدار جابجایی جدایش برای الیاف هوک با زاویه 10° و فولادی مستقیم با قطر 0.5mm به ترتیب برابر با 0.63mm و 0.31mm می‌باشد. بنابراین استفاده از الیاف هوک باعث افزایش حدود 40% در جابجایی جدایش الیاف می‌شود که مقدار قابل ملاحظه‌ای می‌باشد. نتیجه قابل توجهی که از منحنی‌های نیرو-لغزش قابل مشاهده است این می‌باشد که بسته به قطر و زاویه هوک الیاف مکانیزم‌های مختلفی در رفتار بیرون کشیدگی الیاف وجود دارند. به عنوان مثال مشاهده می‌شود که سه ساز و کار رفتاری مختلف در حین بیرون کشیدگی این الیاف به وجود می‌آید: (۱) چسبندگی برشی ارتجاعی بین الیاف و ماتریس در سطح مشترک. (۲) چسبندگی برشی اصطکاکی که امکان لغزش نسبی در سطح مشترک الیاف و ماتریس را فراهم آورده و هنگامی اتفاق می‌افتد که چسبندگی اولیه از بین برود. (۳) مهار مکانیکی که باعث به وجود آمدن نقاط محلی انتقال نیرو بین الیاف و ماتریس می‌شود.



است. ۶۰٪ داده‌ها جهت آموزش، ۳۵٪ به منظور آزمایش در راستای جلوگیری از بیش برآزش شبکه و ۵٪ مابقی برای درستی‌سنجی شبکه عصبی استفاده شده است. مشاهده می‌گردد که شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه پیشرو از نوع انتشار برگشتی و آموزش توسط الگوریتم lm شبکه‌ی خوبی را ارائه می‌کند. در این تحقیق پس از سعی و خطای در تعداد نورون و لایه‌های مخفی شبکه عصبی مورد نظر، ۳ لایه مخفی انتخاب شد که در لایه اول ۱۰ نورون، در لایه دوم ۵ نورون و در لایه آخر ۱ نورون انتخاب شدند. در این حالت $R=0.99873$ و $MSE=0.1138$ به دست می‌آید. با آموزش مناسب یک شبکه عصبی می‌توان رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌های مسئله را بدون طی کردن فرآیند حل مسئله پیدا کرد. کدنویسی مربوطه در نرم‌افزار Matlab برای شبکه با یک لایه میانی ۲ تا ۲۱ نرون و همچنین به کارگیری الگوهای پس انتشار آزمایش شده است.

نرم‌افزار MATLAB در روند آموزش، داده‌هایی را که برای فرآیند آموزش وارد شبکه شده است را به سه قسمت آموزش، تست و ارزیابی تقسیم می‌کند و روند آموزش را در هر قسمت به صورت جداگانه انجام داده و نتایج را در نمودارهای جداگانه ارائه می‌دهد. نتایج شبکه عصبی و اعتبارسنجی نتایج در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده است.



شکل ۶- ارتباط بین خروجی‌های به دست آمده از شبکه‌ی عصبی و خروجی‌های واقعی نسبت به دسته‌های آموزشی (رگرسیون خطی)

شکل ۷- ارتباط بین خروجی‌های به دست آمده از شبکه‌ی عصبی و خروجی‌های واقعی نسبت به دسته‌های (الف) اعتبارسنجی، (ب) امتحانی و (ج) کل داده‌ها (رگرسیون خطی)

مناسی در پیش‌بینی پارامترهای بیرون‌کشیدگی الیاف فولادی از بتن دارد.

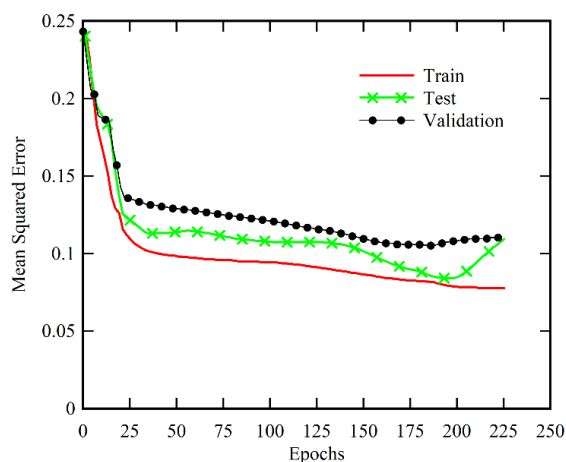
جدول ۵ - پارامترهای R و MSE به دست آمده از مدل شبکه پس‌انتشار تحقیق حاضر، معماری پرسپترون چندلایه، تابع پایه شعاعی و شبکه عصبی با تأخیر زمانی

نوع شبکه عصبی	R	MSE
پرسپترون چندلایه	0.95637	0.095
تابع پایه شعاعی (RBF)	0.99845	0.163
شبکه عصبی با تأخیر زمانی	0.97560	0.103
تحقیق حاضر	0.99873	0.120

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، برای اولین بار پیش‌بینی مشخصه‌های پیوستگی الیاف فولادی با بتن با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی مورد بررسی قرار گرفت. اندرکنش بین الیاف با بتن با استفاده از مفهوم ناحیه انتقالی سطح مشترک شبیه‌سازی شده است. برای استخراج داده‌های مورد نیاز برای آموزش شبکه عصبی مصنوعی از روش المان محدود به کمک نرم‌افزار ABAQUS استفاده شده و سپس به منظور پیش‌بینی رفتار این نوع سازه‌ها، مدل شبکه عصبی مصنوعی ارائه گردید. پس از بررسی دقت شبکه عصبی ارائه شده، تأثیر قطر و زاویه هوک الیاف روی مشخصه‌های نیروی بیرون‌کشیدگی، لغزش مربوط به نقطه بیشینه نیرو، انرژی بیرون‌کشیدگی، تنش مؤثر بیرون‌کشیدگی مورد بررسی قرار گرفت. در خصوص جذب انرژی بیرون‌کشیدگی الیاف هوک شکل، الیاف مایل نسبت به الیاف مستقیم مقدار بیشتری انرژی جذب می‌نمایند و مقدار انرژی بیرون‌کشیدگی بیشینه در زوایای تمایل ۳۵ درجه تا ۸۰ درجه رخ می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری در تخمین پارامترهای بیرون‌کشیدگی الیاف نشان می‌دهد که روش پیشنهادی تشخیص پارامترها با ساختار شبکه عصبی با آموزش پس‌انتشار خطا، بسیار مطلوب می‌باشد.

در شکل ۸ نیز روند عملکرد شبکه از آغاز فرآیند تحلیل تا همگرایی آورده شده است. این شکل نشان دهنده کاهش خطای عملکرد در طی آموزش شبکه است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش تکرار یا به اصطلاح Epoch، خطای شبکه کاهش می‌یابد. در این مدل، شبکه بعد از 90 Epoch به خطای کمینه خود دست یافته است. همچنین ملاحظه می‌شود در تکرار 225ام که خطای داده‌های ارزیابی شروع به افزایش کرده است، آموزش شبکه متوقف شده است. ضرایب همبستگی و تعیین، گویای رابطه صحیح و خطی بین نتایج به دست آمده در نرم افزار و نتایج حاصل از شبکه عصبی مصنوعی ارائه شده هستند. در شبکه های عصبی با توجه به اینکه دقت نتایج به دست آمده از محاسبات به دقت و محدوده اعداد استفاده شده در مراحل تست و آموزش شبکه وابسته است، باید در مراحل ذکر شده از داده‌های مورد اعتماد و با دقت بالا استفاده شود. اگر چه روش المان محدود یکی از ابزارهای کارآمد و قوی جهت شبیه‌سازی مسائل مهندسی است، اما شبیه‌سازی المان محدود یک فرآیند زمان‌بر بوده، تعیین دقیق و درست جنبه‌های گوناگون شرایط تغییر شکل مشکل است. بر این اساس، استفاده از روش شبکه عصبی ارائه به راحتی و با دقت بالا و در کمترین زمان می‌توان پارامترهای چسبندگی الیاف و بتن را پیش‌بینی کند.



شکل ۸ - میانگین مربعات خطا مربوط به داده‌های آموزش، اعتبار سنجی، آزمایش

به منظور ارزیابی دقت شبکه عصبی مورد استفاده در تحقیق حاضر، در جدول ۵ پارامترهای R و MSE به دست آمده از مدل شبکه پس‌انتشار تحقیق حاضر، معماری پرسپترون چندلایه، تابع پایه شعاعی و شبکه عصبی با تأخیر زمانی ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالت کلی شبکه پس‌انتشار مورد استفاده در تحقیق حاضر از دقت

مراجع

- [9] Deng Y, Zhang Z, Shi C, Wu Z, Zhang C. Steel Fiber–Matrix Interfacial Bond in Ultra-High Performance Concrete: A Review. *Engineering*. 2022; 96: 65-79.
- [10] Baghdad A, El Mabrouk K, Vaudreuil S, Nouneh K. Effects of high operating temperatures and holding times on thermomechanical and mechanical properties of autoclaved epoxy/carbon composite laminates. *Polymer Composites*. 2022; 43(2): 862-73.
- [11] Pi Z, Xiao H, Du J, Li C, Cai W, Liu M. Effect of the water/cement ratio on the improvement of pullout behaviors using nano-SiO₂ modified steel fiber and the micro mechanism. *Construction and Building Materials*. 2022; 338: 127-139.
- [12] Thiagarajan K, Umamaheswari N. Time-dependent behavior of pre-coated crimped, 4-Dimensional and 5-Dimensional steel fiber pull-out in normal and rubber concrete. *Construction and Building Materials*. 2022; 359: 129-146.
- [13] Zhang C, Zhang G, Shi X, Wang X. Effects of carbon nanotubes on the interlaminar shear strength and fracture toughness of carbon fiber composite laminates: a review. *Journal of Materials Science*. 2022; 57(4): 2388-410.
- [14] Yoo D-Y, Kim S. Comparative pullout behavior of half-hooked and commercial steel fibers embedded in UHPC under static and impact loads. *Cement and Concrete Composites*. 2019; 97: 89-106.
- [15] Benedetty CA, Krahl PA, Almeida LC, Trautwein LM, Siqueira GH, de Andrade Silva F. Interfacial mechanics of steel fibers in a High-Strength Fiber-Reinforced Self Compacting Concrete. *Construction and Building Materials*. 2021; 301: 124-144.
- [16] Dehghani A, Aslani F. Effect of 3D, 4D, and 5D hooked-end type and loading rate on the pull-out performance of shape memory alloy fibres embedded in cementitious composites. *Construction and Building Materials*. 2021; 273: 121-132.
- [17] Di Maida P. Analytical Approach for Modelling the Pull-Out Mechanism of Recycled Synthetic Fibres in Fibre-Reinforced Concrete (FRC).
- [1] Zhang P, Wang C, Gao Z, Wang F. A review on fracture properties of steel fiber reinforced concrete. *Journal of Building Engineering*. 2023; 32: 105-125.
- [2] Vahidi Pashaki P, Pouya M, Maleki VA. High-speed cryogenic machining of the carbon nanotube reinforced nanocomposites: Finite element analysis and simulation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2018; 232(11): 1927-36.
- [3] Esmaeili J, Andalibi K, Gencel O, Maleki FK, Maleki VA. Pull-out and bond-slip performance of steel fibers with various ends shapes embedded in polymer-modified concrete. *Construction and Building Materials*. 2021; 271: 123-140.
- [4] Zheng X, Zhang C, Gao S, Wang F. Predicting the bond strength between steel wire and mortar based on interfacial porosity and shrinkage. *Journal of Building Engineering*. 2023; 36: 106-118.
- [5] Li M, Sun J, Li L, Meng L, Wang S, Wei J. Effect of nanosilica on fiber pullout behavior and mechanical properties of strain hardening ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*. 2023; 367: 130-155.
- [6] Jiang K, Wang X, Ding L, Chen Z, Liu J, Wu Z. Experimental study on pullout behaviour of basalt fiber-reinforced polymers minibar embedded in ultra-high performance seawater sea-sand concrete. *Journal of Building Engineering*. 2023; 63: 106-123.
- [7] Esmaeili J, Khoshkanabi SP, Andalibi K, Kasaei J. An innovative method for improving the cyclic performance of concrete beams retrofitted with prefabricated basalt-textile-reinforced ultra-high performance concrete. *Structures*. 2023; 63: 32-46.
- [8] Esmaeili J, Andalibi K, Gencel O. Mechanical characteristics of experimental multi-scale steel fiber reinforced polymer concrete and optimization by Taguchi methods. *Construction and Building Materials*. 2021; 31: 69-76.

- Engineered Materials for Sustainable Structures. 2022; 134: 35-49.
- [18] Chaabene WB, Flah M, Nehdi ML. Machine learning prediction of mechanical properties of concrete: Critical review. Construction and Building Materials. 2020; 260: 116-130.
- [19] Asteris PG, Mokos VG. Concrete compressive strength using artificial neural networks. Neural Computing and Applications. 2020; 32(15): 11807-26.
- [20] Fakeh M, Jawdhari A, Fam A. Calibration of ABAQUS Concrete Damage Plasticity (CDP) Model for UHPC Material. International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete; 2023: Iowa State University Digital Press.
- [21] Saleh M, AlHamaydeh M, Zakaria M. Finite element analysis of reinforced concrete deep beams with square web openings using damage plasticity model. Engineering Structures. 2023; 278: 115-126.
- [22] Xue L, Ren X, Ballarini R. Damage-plasticity modeling of shear failure in reinforced concrete structures. Engineering Fracture Mechanics. 2023; 290: 109-136.
- [23] Kmiecik Pa, Kamiński M. Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration. Archives of civil and mechanical engineering. 2011; 11(3): 623-636.
- [24] Jiang J, Hu G, Li X, Xu X, Zheng P, Stringer J. Analysis and prediction of printable bridge length in fused deposition modelling based on back propagation neural network. Virtual and physical prototyping. 2019; 14(3): 253-266.