

## پیش‌بینی رفتار ستون‌های بتن آرمه دایروی شکل محصورشده با FRP به وسیله‌ی شبکه عصبی مصنوعی

حسین نادرپور<sup>۱</sup>، پویان فخاریان<sup>۲\*</sup>، فاطمه مستخدمین حسینی<sup>۳</sup>

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۳- دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

naderpour@semnan.ac.ir

pouyanfakharian@semnan.ac.ir

fhosseini@semnan.ac.ir

### چکیده:

ستون‌ها، اعضای اصلی تاثیرگذار در مقاوم‌سازی ساختمان‌ها می‌باشند که تحت تاثیر بار محوری و لنگر خمشی قرار دارند. لذا محصور نمودن ستون‌های بتنی با صفحات کامپوزیتی از جنس پلیمرهای مسلح شده با الیاف، موسوم به ورقه‌های FRP، با نسبت مقاومت به وزن بالا، عمر مفید زیاد، خصوصیات حرارتی قابل کنترل و مقاومت در برابر خوردگی، از جمله روش‌های نوین مقاوم‌سازی سازه‌ها و افزایش ظرفیت باربری خمشی و برشی و شکل‌پذیری ستون‌ها محسوب می‌گردد. آزمایش‌هایی که با اعمال فشار محوری به ستون‌های دارای گرد گوشگی انجام گرفته است، نشان می‌دهد هرچه ستون به مقاطع دایره‌ای نزدیک‌تر شود، رفتار بهبود می‌یابد. اگر چه رفتار ستون‌های بتن آرمه محصور شده با FRP یا دارای آرماتور عرضی توسط پژوهشگران زیادی مورد مطالعه قرار گرفته است، اما تحقیق در مورد دورپیچ نمودن ستون با FRP زمانی که آرماتورهای عرضی پاسخگوی محصورشدگی مورد نیاز ستون نیستند، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. عواملی نظیر قطر ستون، مقاومت و کرنش بتن، مساحت محصورشدگی با آرماتورهای عرضی، مقاومت آرماتورهای عرضی، فواصل آن‌ها از یکدیگر و نحوه دور پیچ نمودن، ضخامت، مدول الاستیسیته و کرنش گسیختگی FRP، تاثیر بسزایی در مقاومت فشاری و کرنش نهایی ستون‌های بتنی محصور شده دارد. در این مقاله، با در نظر گرفتن مطالعات تجربی، نتایج آزمایشات معتبر و تاثیر پارامترهای مهم ذکر شده، مدل جدیدی ارائه شده است که با استفاده از آن، مقاومت نهایی ستون‌های دایروی محصورشده با FRP تعیین می‌گردد. در نهایت، نتایج بدست آمده از مدل پیشنهادی با روابط آیین‌نامه‌های ACI318-14 و FIB 14 و همچنین مدل‌های معتبر ارائه شده توسط محققان مقایسه گردید و دقت بالاتری بدست آمد.

واژه‌های کلیدی: مقاوم سازی، ستون بتن آرمه، FRP، مقطع دایره‌ای شکل، شبکه عصبی مصنوعی، محصورشدگی.

## ۱- مقدمه

ستون‌های بتنی مسلح اعضای کلیدی مقاوم در برابر بارهای افقی و قائم سازه‌های بتنی محسوب می‌شوند. از این رو مقاوم بودن این اعضا نقش مهمی در مقاومت کل سازه دارد. استفاده از پیش‌تنیدگی خارجی، غلاف فولادی یا بتنی و صفحات الیاف پلیمری (FRP) برخی از روش‌های متعارف هستند. مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی مسلح با استفاده از کامپوزیت‌های FRP، در مقایسه با سایر روش‌های ذکر شده، به دلیل دستیابی به مقاومت بالاتر در ازای زحمت کمتر و همچنین عدم تغییر در شکل و ابعاد سازه، به عنوان روش متداول در سراسر جهان پذیرفته شده است. از ویژگی‌های اصلی کامپوزیت‌های پلیمری می‌توان مقاومت مناسب در برابر خوردگی، سادگی اجرا در محل نصب و سبکی آن‌ها را برشمرد. عامل دیگر در گسترش کاربردی مصالح FRP روند کاهش قیمت این مصالح می‌باشد. ستون‌های بتن‌آرمه به منظور اطمینان از تغییر شکل‌های بزرگ تحت بار قبل از شکست، نیاز به محصورشدگی جانبی دارند تا به مقاومت کافی برسند. از این رو از دورپیچ FRP جهت مهیا کردن محصورشدگی خارجی برای ستون‌های بتن‌آرمه، زمانی که آرماتور عرضی داخلی ناکافی است، استفاده می‌شود [۱]. طراحی سازه‌های ساده‌تر و مقاوم‌تر، مقاومت کششی بسیار بالا و مناسب در سیستم‌های پیش‌تنیدگی و خستگی کمتر مصالح FRP نسبت به فولاد از دیگر دلایل عمده بهره‌گیری از این مصالح می‌باشد. در این مقاله، روابط معتبر آیین‌نامه‌ای و مدل‌های تنش ستون‌های بتن‌آرمه دایره‌ای تقویت شده توسط FRP تشریح شده است. سپس بر اساس یک پایگاه داده برگرفته از نتایج آزمایشات معتبر در این زمینه، به کمک مدل‌سازی با شبکه‌های عصبی مصنوعی، ارتباط داده‌های ورودی و داده هدف که تنش فشاری نهایی بتن می‌باشد، تعیین می‌گردد.

## ۲- ستون دایره‌ای محصور شده با FRP

بیشتر اعضای بتنی بهسازی یا طراحی شده با دورپیچ FRP دارای آرماتور عرضی داخلی هستند. هسته بتنی در این اعضا تحت عمل محصورشدگی آرماتور عرضی یا اسپیرال و دورپیچ FRP است. با این وجود به علت استفاده از داده‌های تجربی محدود از اولین آزمایشاتی که انجام شده، این مدل‌های ارائه شده برای بتن محصورشده با FRP و یا FRP و خاموت عرضی، پیش‌بینی دقیق و منطقی از رفتار نمونه‌ای که توسط پژوهشگران دیگر تست شده است، ارائه نمی‌کند. این مدل‌ها عملکرد ستون‌های محصورشده با FRP و خاموت عرضی را نسبت به انعطاف‌پذیری و مقاومت خمشی، کم برآورد می‌کنند و یا در بعضی موارد ظرفیت مقطع بیشتر برآورد می‌شود. در جدول ۱ پارامترهای موثر بر رفتار ستون‌های دایره‌ای شکل معرفی شده‌اند.

جدول ۱- پارامترهای موثر در رفتار ستون‌های بتن‌آرمه دایره‌ای شکل محصورشده با FRP

پارامتر	توضیح
$D (m)$	قطر مقطع ستون
$f'_{co} (MPa)$	حداکثر مقاومت فشاری بتن محصور نشده
$\varepsilon_{co}$	کرنش محوری بتن محصور نشده متناظر با $f'_{co}$
$t (mm)$	ضخامت دورپیچ FRP
$E_{FRP} (GPa)$	مدول الاستیسیته FRP
$f_{fu} (MPa)$	تنش تسلیم FRP
$f_{ys} (MPa)$	مقاومت تسلیم فولاد
$s (m)$	فاصله آرماتور عرضی
$d_b (mm)$	قطر آرماتور عرضی
$f'_{cu} (MPa)$	تنش فشاری نهایی بتن

معادلات زیادی برای محاسبه مدول الاستیسیته بتن پیشنهاد شده است. معادلات مدول الاستیسیته بتن ACI [۲] برای بتن با وزن نرمال به صورت زیر هستند:

$$E_c = 4700\sqrt{f'_{c0}} \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

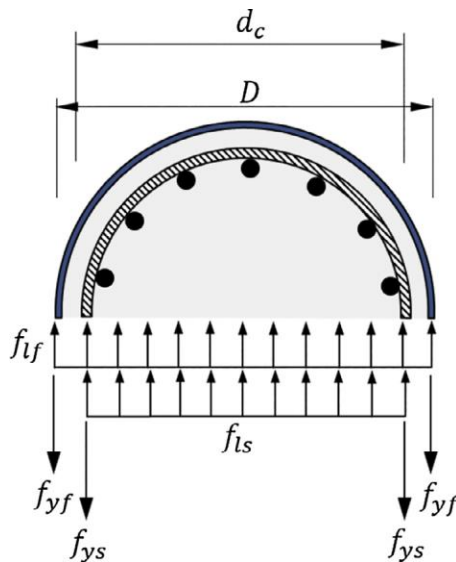
$$E_c = 57000\sqrt{f'_{c0}} \quad (\text{psi})$$

که  $f'_{c0}$  مقاومت فشاری بتن محصور نشده است.

$$f_{lf} = \frac{2 \times t_f \times f_{yf}}{D} \quad (2)$$

$$f_{ls} = \frac{2 \times A_{st} \times f_{ys}}{s \times d_c}$$

$D$  و  $d_c$  به ترتیب قطر مقطع ستون بتنی و هسته بتنی هستند.  $f_{lf}$  و  $f_{ls}$  فشار محصورشدگی مهیا شده توسط FRP و فولاد جانبی می‌باشند. در روابط بالا،  $t_f$ ،  $f_{yf}$ ،  $A_{st}$ ،  $f_{ys}$  و  $s$  به ترتیب ضخامت FRP، مقاومت نهایی FRP، سطح مقطع فولاد عرضی، مقاومت تسلیم فولاد و فاصله فولاد عرضی هستند. مکانیزم محصورشدگی بتن، محصورشدگی FRP و آرماتور عرضی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- مکانیزم محصورشدگی برای بتن محصورشده با FRP و فولاد عرضی [۳]

Samman و همکاران [۴] در سال ۱۹۹۸ رفتار یکنواخت بتن محصورشده را نشان دادند که معادله منحنی تنش-کرنش یکنواخت این مدل به صورت زیر است:

$$f_c = \frac{(E_1 - E_2) \times \varepsilon_c}{\left[ 1 + \left( \frac{(E_1 - E_2) \times \varepsilon_c}{f_0} \right)^n \right]^{1/n}} + E_2 \times \varepsilon_c \quad (3)$$

در این رابطه داریم:

$$f'_{cu} = f'_{c0} + 6.0 \times f_{lf}^{0.7} \quad [\text{MPa}] = f'_{c0} + 3.38 \times f_{lf}^{0.7} \quad [\text{ksi}] \quad (4\text{-الف})$$

$$E_1 = 3950\sqrt{f'_{c0}} \quad [\text{MPa}] = 47.586\sqrt{1000 \times f'_{c0}} \quad [\text{ksi}] \quad (4\text{-ب})$$

$$E_2 = 245.61 \times f_{c0}'^{0.2} + 1.3456 \times \frac{E_{frp} \times t_f}{D} [\text{MPa}] = 52.411 \quad (4-ج)$$

$$\times f_{c0}'^{0.2} + 1.3456 \times \frac{E_{frp} \times t_f}{D} [\text{ksi}]$$

$$f_0 = 0.872 \times f_{c0}' + 0.371 \times f_{yf} + 6.258 [\text{MPa}] = 0.872 \quad (4-د)$$

$$\times f_{c0}' + 0.371 \times f_{yf} + 0.908 [\text{ksi}]$$

Samman از پارامتر  $n = 1.5$  برای رابطه (۳) استفاده نمود.

مدل Youssef و همکاران [۵] در سال ۲۰۰۷ بر اساس نتایج آزمایش‌های بزرگ مقیاس روی مقاطع دایره‌ای، مربعی و مستطیلی محصورشده با FRP ارائه شد. اولین بخش این مدل شبیه‌سازی چندجمله‌ای رفتار بتن محصورشده است. دومین قسمت آن، پیش‌بینی رفتار صعودی کرنش از متوسط تا بالای مقطع و رفتار نزولی آن، از پایین تا متوسط مقطع محصورشده را نشان می‌دهد. معادله تنش-کرنش این مدل به صورت زیر است:

$$f_c = E_c \times \varepsilon_c \left[ 1 - \frac{1}{n} \left( 1 - \frac{E_2}{E_c} \right) \times \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_t} \right)^{n-1} \right] \quad \text{و} \quad n = \frac{(E_c - E_2) \times \varepsilon_t}{E_c \times \varepsilon_t - f_t}$$

$$0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_t \quad \text{و} \quad E_2 > 0 \quad (5)$$

$$f_c = E_c \times \varepsilon_c \left[ 1 - \frac{1}{n} \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_t} \right)^{n-1} \right] \quad \text{و} \quad n = \frac{E_c \times \varepsilon_t}{E_c \times \varepsilon_t - f_t}$$

$$0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_t \quad \text{و} \quad E_2 < 0$$

$$f_c = f_t + E_2 \times (\varepsilon_c - \varepsilon_t) \quad \varepsilon_t \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}$$

برای مقطع دایروی، مقاومت نهایی و کرنش با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\frac{f_{cu}'}{f_{c0}'} = 1.0 + 2.25 \left( \frac{f_{yf}}{f_{c0}'} \right) \quad (6-الف)$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.003368 + 0.259 \times \left( \frac{f_{yf}}{f_{c0}'} \right) \times \left( \frac{f_{yf}}{E_{frp}} \right)^{0.5} \quad (6-ب)$$

$$\frac{f_t}{f_{c0}'} = 1.0 + 3.0 \left( \frac{4 \times t \times E_{frp} \times \varepsilon_{jt}}{D \times f_{c0}'} \right)^{5/4} \quad (6-ج)$$

$$\varepsilon_t = 0.002748 + 0.1169 \times \left( \frac{4 \times t \times E_{frp} \times \varepsilon_{jt}}{D \times f_{c0}'} \right)^{6/7} \times \left( \frac{f_{yf}}{E_{frp}} \right)^{0.5} \quad (6-د)$$

مدل‌های ارائه شده برای محصورشدگی همزمان FRP و آرماتور عرضی به شرح زیر است. Kawashima و همکاران [۶] در سال ۲۰۰۰ از ترکیب دو مدل Hushikuma [۷] و Hosotani [۸]، یک مدل جدید با دو بخش ارائه دادند. بخش اول به مشخصات بتن محصورشده بستگی دارد و بخش دوم می‌تواند صعودی یا نزولی باشد که به نسبت فولاد عرضی و FRP وابسته است. معادلات منحنی تنش-کرنش همان رابطه (۵) هستند. شیب بخش دوم با معادله زیر به دست می‌آید:

$$E_2 = -0.658 \frac{f_{c0}'^2}{\frac{4t}{d_c} \times \varepsilon_{cft} \times E_{frp} + 0.196 \times f_{ls}} + 0.078 \times E_{frp} \times \sqrt{\frac{4t_f}{d_c}} \quad (7)$$

$$f_t = f_{c0}' + 1.93 \times \frac{4t}{d_c} \times \varepsilon_{cft} \times E_{frp} + 4.4 \times f_{ls} \quad (8)$$

$\varepsilon_{cft} = 1500 \mu$  می‌باشد.

دومین مدل که هر دو محصورشدگی FRP و فولاد را در نظر گرفت، توسط Lee و همکاران [۹] در سال ۲۰۰۹ ارائه شد. این مدل شامل سه قسمت است. بخش اول با معادله سهمی شکل با شیب معادل مدول الاستیسیته بتن شروع می‌شود. این بخش با تابع چندجمله‌ای بعد از کرنش بتن محصورنشده در بیش‌ترین مقاومت فشاری می‌باشد. تاثیر محصورشدگی FRP و خاموت اسپیرال در مقاومت فشاری بتن در قسمت دوم منحنی نشان داده شده است. تاثیر خاموت ثابت باقی می‌ماند و اثر محصورشدگی FRP تا کرنش نهایی در این قسمت منحنی افزایش می‌یابد. فرمول این مدل به شرح زیر است:

$$f_c = E_c \times \varepsilon_c + (f'_{c0} - E_c \times \varepsilon_{c0}) \times \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} \right)^2 \quad 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c0}$$

$$f_c = f'_{c0} + (f_{cs} - f'_{c0}) \times \left( \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{c0}}{\varepsilon_{cs} - \varepsilon_{c0}} \right)^{0.7} \quad \varepsilon_{c0} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cs} \quad (9)$$

$$f_c = f_{cs} + (f_{cu} - f_{cs}) \times \left( \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{cs}}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{cs}} \right)^{0.7} \quad \varepsilon_{cs} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}$$

داریم:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cu} \left\{ 0.85 + 0.03 \times \left( \frac{f_{lf}}{f_{ls}} \right) \right\} \quad \text{و} \quad f_{cs} = 0.95 \times f_{cu} \quad f_{lf} \geq f_{ls} \quad (10\text{-الف})$$

$$\varepsilon_{cs} = 0.7 \times \varepsilon_{cu} \quad \text{و} \quad f_{cs} = f'_{cu} \times \left( \frac{\varepsilon_{cs}}{\varepsilon_{cu}} \right)^{0.4} \quad f_{lf} < f_{ls} \quad (10\text{-ب})$$

مقاومت نهایی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$f_{cu} = f'_{c0} \times \left( 1 + 2 \frac{f_{lf} + f_{ls}}{f'_{c0}} \right) \quad (11)$$

### ۳- شبکه‌های عصبی مصنوعی

شبکه عصبی نوعی ساختار ریاضی است که بر اساس مدل بیولوژیکی مغز انسان به وجود آمده است. هر شبکه عصبی مشتمل بر مجموعه‌ای از اجزاء کوچک داده پردازشی به نام نورون می‌باشد که هر نورون به نورون‌های دیگر از طریق یک رابطه جهت‌دار که دارای وزن مختص به خود است مرتبط می‌گردد. وزن‌ها نمایش دهنده اطلاعات مورد نیاز شبکه برای حل یک مسئله هستند. یک نورون بیولوژیکی دارای ۳ جزء دندریت، سوما و آکسون است. تعداد زیادی دندریت علائم دریافتی از سایر نورون‌ها را اصلاح می‌کنند و سوما (بدنه واحد پردازشگر)، علائم ورودی را جمع می‌نماید. اگر مقدار مجموع ورودی‌ها از یک حد آستانه فراتر رود، در آن صورت پردازشگر فعال شده و از طریق آکسون علائمی را به سلول بعدی انتقال می‌دهد. مکانیزم سلول‌های عصبی به صورت سری و موازی می‌باشد، بدین گونه که مجموعه سلول‌های عصبی موازی هم که هر یک دارای ورودی مخصوص به خود است، پس از انجام عمل پردازش، مجموعه‌ای از خروجی‌ها را تولید می‌کند. این خروجی‌ها به نوبه خود می‌تواند به عنوان ورودی‌های مجموعه دیگر از سلول‌های عصبی که به طور سری به مجموعه سلول‌های اولیه متصل هستند بکار رود. بنابراین خروجی هر نورون در ضرایب وزنی ضرب و به تابع تحریک غیرخطی به عنوان ورودی داده می‌شود. به طور کلی مجموعه سلول‌های عصبی موازی تشکیل یک لایه را می‌دهند. هر شبکه عصبی برای تولید خروجی خود می‌تواند یک یا چند لایه داشته باشد که معمولاً از این لایه‌ها تحت عنوان لایه‌های پنهان یاد می‌شود. آخرین لایه که در حقیقت خروجی شبکه را تولید می‌کند، لایه خروجی نام دارد. از انواع شبکه‌های قابل استفاده جهت پیش‌بینی، می‌توان به شبکه‌های انتشار برگشتی، پس انتشار، دلتا و ... اشاره کرد که در ادامه برای مدل‌سازی رفتار ستون‌های بتن آرمه محصور شده با FRP از شبکه پس انتشار برگشتی استفاده شده است. شبکه‌های پس انتشار برگشتی یکی از معروف‌ترین، مؤثرترین و آسان‌ترین مدل‌ها برای پیش‌بینی و پیش‌گویی چندین هدف در میان شبکه‌های پیچیده و چند لایه هستند [۱۰-۱۲]. در شکل ۲ نمایی از لایه نورون‌ها در شبکه عصبی نشان داده شده است.

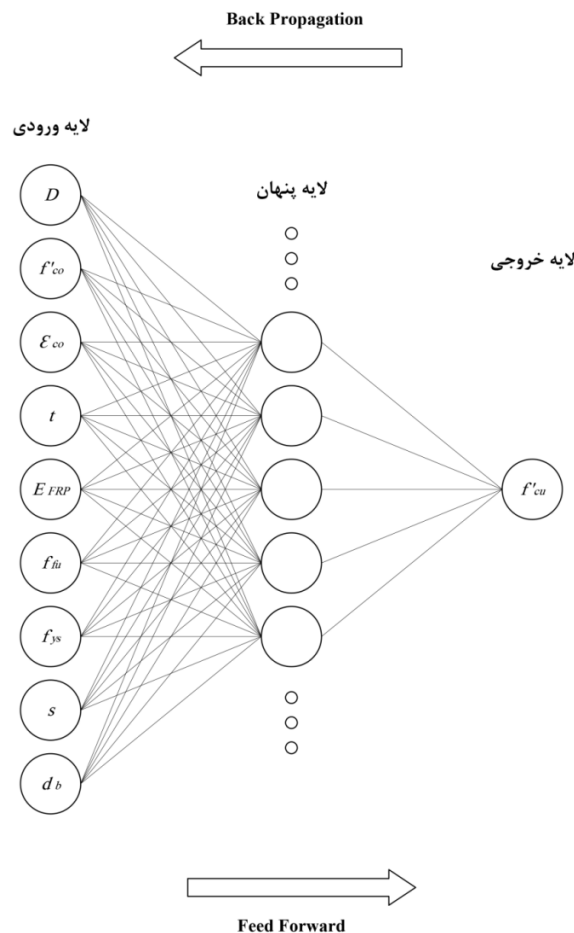
#### ۴- مدل سازی

برای آموزش شبکه عصبی از اطلاعات آزمایشات انجام شده در موضوع رفتار ستون های بتن آرمه دایروی شکل محصور شده با FRP استفاده شده است. طبق این مطالعات، در سال ۱۹۹۹، Demers و Neale با ۱۶ نمونه [۱۳]، Eid و Paultre در سال ۲۰۰۸ با ۸ نمونه [۱۴]، Lee و همکاران در سال ۲۰۱۰ با ۲۳ نمونه [۹]، Benzid و همکاران در سال ۲۰۱۰ با ۱۸ نمونه [۱۵] پژوهش کرده اند. در این مقاله با مجموعاً ۶۵ نمونه آزمایشگاهی فوق به آموزش شبکه عصبی مصنوعی پرداخته ایم. در ادامه مشخصات آماری برای ورودی ها و نتیجه مطالعات به صورت آماری در جدول ۲ بیان شده است. تمامی پارامترها مانند قطر D باید برای معرفی به شبکه با توجه به رابطه ۱۲ مقیاس شوند.

$$D_{scaled} = \left[ (0.9 - 0.1) \times \frac{(D - D_{min})}{(D_{max} - D_{min})} \right] + 0.1 \quad (12)$$

جدول ۲- مشخصات آماری داده های ورودی و خروجی

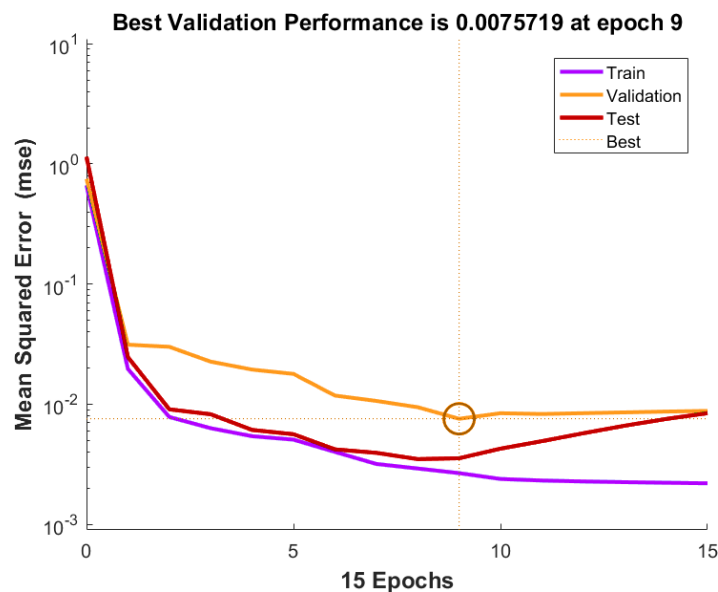
گره ورودی	$D$ (m)	$f'_{co}$ (MPa)	$\epsilon_{co}$	$t$ (mm)	$E_{FRP}$ (GPa)	$f_{fu}$ (MPa)	$f_{ys}$ (MPa)	$s$ (m)	$d_b$ (mm)	$f'_{cu}$ (MPa)
میانگین	0.20	40.59	0.00253	0.97	112.77	2824.34	632.49	0.11	7.18	68.96
مینیمم	0.15	25.00	0.00169	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	31.30
ماکزیمم	0.30	107.70	0.00377	3.00	250.00	4510.00	1200.00	0.30	11.30	150.80
انحراف استاندارد	0.069	14.43	0.00047	0.895	92.13420	1808.78	434.329	0.09	2.667	26.7414
ضریب تغییرات	0.340	0.356	0.18421	0.921	0.817015	0.640	0.686	0.81	0.371	0.387



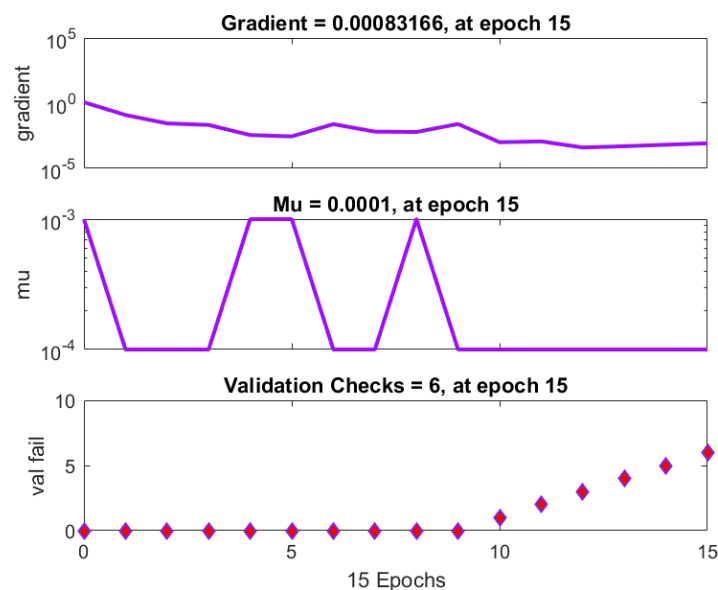
شکل ۲- نمونه شماتیک شبکه عصبی

### ۵- پیشنهاد مدل شبکه بهینه

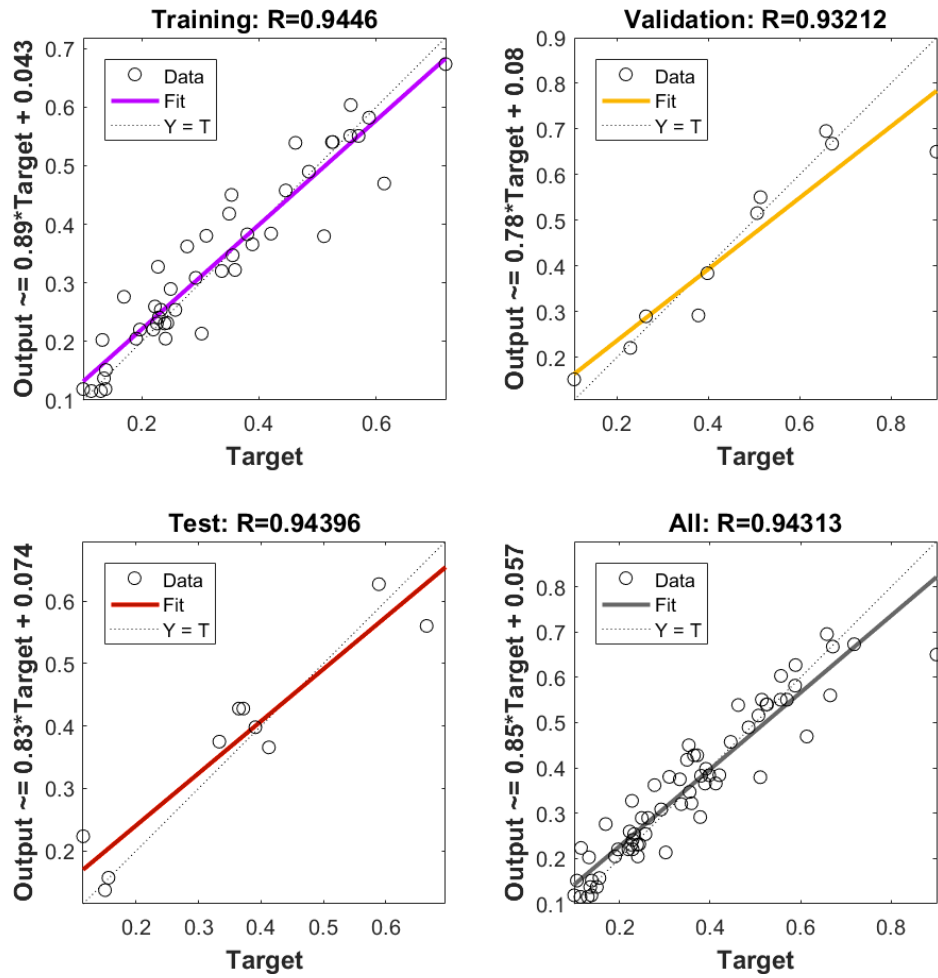
شبکه پس انتشار برگشتی دارای یک لایه ورودی است که تعداد ورودی‌های شبکه، بیانگر تعداد پارامترهای موجود در بخش ورودی می‌باشد. همچنین دارای یک یا چند لایه پنهان با تعدادی نورون می‌باشد. در این مدل، یک لایه پنهان با ۸ نورون در نظر گرفته شده است. از تابع تانزانت سیگموئید در لایه پنهان و در لایه خروجی از تابع خطی ساده استفاده شده است. در شکل ۳، میانگین مربع خطاها (MSE) در اپوک‌های مختلف یادگیری آورده شده است که با توجه به معیار همگرایی در نظر گرفته شده، مشاهده می‌شود یادگیری در اپوک ۹ به خوبی انجام شده است. شکل ۴، روند تغییرات شبکه طی اپوک‌های مختلف را نشان می‌دهد. در شکل ۵، مقادیر R به ازای چهار حالت آموزش، صحت سنجی، آزمایش و کل داده‌ها به دست آمده است. هر چه تمرکز این نقاط بر روی نیمساز ربع اول بیشتر باشد، نشانگر دقت بالاتر آن می‌باشد. شکل ۶ مقایسه نتایج آزمایشگاهی با پیش‌بینی شبکه عصبی را نشان می‌دهد.



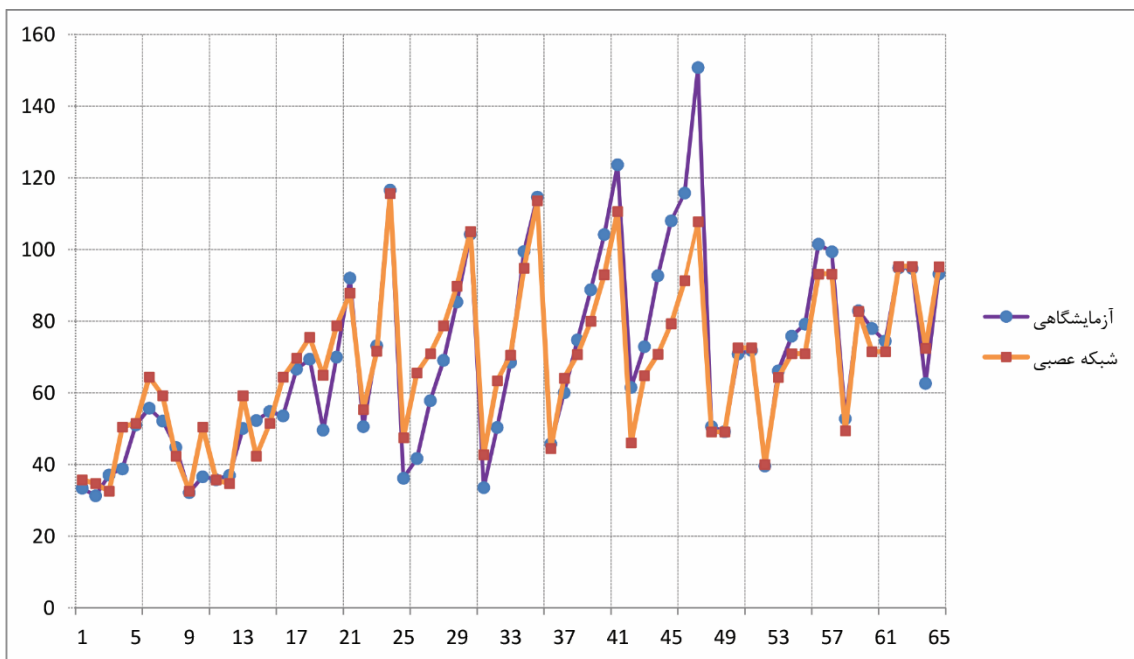
شکل ۳- نمودار میانگین مربعات خطا در فرآیند آموزش شبکه



شکل ۴- روند تغییرات شبکه در مراحل آموزش شبکه



شکل ۵- نمودار رگرسیون شبکه پس از آموزش



شکل ۶- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبکه عصبی



## ۶- آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی

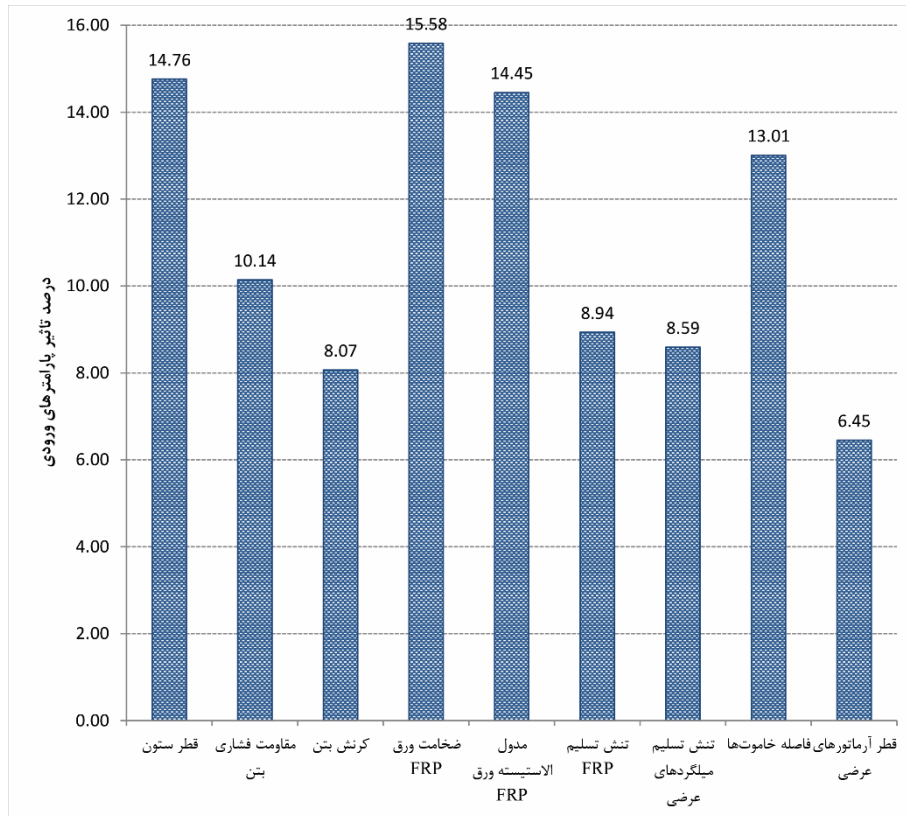
در طول سال‌های گذشته روش‌های مختلفی برای تحلیل اثر متغیرهای ورودی بر خروجی شبکه عصبی پیش‌خورنده پیشنهاد شده‌اند. آنالیز بر اساس مقادیر وزن، منحصرًا بر مبنای مقادیر ذخیره شده در ماتریس استاتیک وزن‌ها برای تعیین تاثیر نسبی هر یک از داده‌های ورودی بر داده‌های خروجی شبکه می‌باشد. معادلات مختلفی مبتنی بر مقادیر وزن‌ها ارائه شده است. یکی از کاربردی‌ترین معادلات، معادله Milne [۱۶] می‌باشد. این رابطه با محاسبه حاصل‌ضرب وزن‌ها  $w_{ji}$  (وزن اتصال بین نورون ورودی  $i$  و نورون مخفی  $j$ ) و  $w_{oj}$  (وزن اتصال بین نورون مخفی  $j$  و نورون خروجی  $o$ ) برای هر یک از نورون‌های مخفی شبکه به صورت مجموع حاصل‌ضرب‌های محاسبه شده بدست می‌آید.

$$Q_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^{n_{hidden}} \frac{w_{ji}}{\sum_{l=1}^{n_{inputs}} |w_{jl}|} \cdot w_{oj}}{\sum_{k=1}^{n_{inputs}} \left( \sum_{j=1}^{n_{hidden}} \frac{w_{jk}}{\sum_{l=1}^{n_{inputs}} |w_{jl}|} \cdot w_{oj} \right)} \quad (۱۳)$$

در رابطه (۱۳)،  $\sum_{l=1}^{n_{inputs}} |w_{jl}|$  مجموع وزن‌های اتصال بین نورون‌های ورودی  $N$  و نورون‌های مخفی  $J$ ،  $Q_{ik}$  درصد تاثیر متغیر ورودی  $X_i$  بر متغیر خروجی  $Y_k$  می‌باشد. با استفاده از این روش نسبت‌های صحیحی برای هر دو وزن مثبت و منفی بدست می‌آید.  $iw\{1,1\}$  وزن پارامترهای ورودی و  $iw\{2,1\}$  وزن خروجی می‌باشد. همان‌طور که از شکل ۷ مشاهده می‌شود، نتایج آنالیز حساسیت بیانگر این است که ضخامت ورق FRP، بیشترین درصد تاثیر و قطر آرماتورهای عرضی دارای کمترین درصد تاثیر بر روی تابع هدف را داشته‌اند.

$$iw\{1,1\} = \begin{bmatrix} -0.85269 & -0.19763 & -0.10083 & -0.56053 & -0.96172 & -0.42313 & 0.47938 & 0.69716 & 0.040052 \\ 0.89309 & -0.03222 & 0.016631 & 0.27964 & 0.88079 & -0.67815 & 0.36197 & 0.40372 & -0.78698 \\ -0.38655 & 0.98162 & -0.74207 & 0.55376 & 0.12992 & -0.5519 & -0.40346 & 0.71203 & 0.36706 \\ -0.84127 & -0.66822 & 0.12694 & 1.1868 & 0.45478 & -0.2645 & -0.82083 & 0.23573 & -0.61332 \\ 0.20255 & 0.71089 & -0.58678 & 0.69406 & -0.359 & -0.53649 & 0.17508 & -0.69617 & 0.094098 \\ 1.1076 & 0.16083 & -0.36109 & 0.63645 & 0.005522 & 0.069247 & 0.13148 & -0.9679 & 0.12058 \\ 0.35921 & -0.26231 & 0.16112 & -1.4095 & -1.8532 & -0.45973 & 0.029164 & -0.0089 & 0.10668 \\ -0.54839 & -0.84283 & -0.8979 & 0.31958 & -0.71586 & 0.25179 & -0.93077 & 0.83144 & 0.29004 \end{bmatrix}$$

$$iw\{2,1\} = [0.15493 \quad 0.43385 \quad 1.2266 \quad 0.30328 \quad 0.082849 \quad 0.52515 \quad -1.2695 \quad -0.63964]$$



شکل ۷- درصد تاثیر پارامترهای ورودی

## ۷- نتیجه گیری

در این مقاله تنش نهایی فشاری ستون‌های دایره‌ای شکل تقویت شده به وسیله FRP با استفاده از ۶۵ داده حاصل از آزمون آزمایشگاهی، مورد مطالعه قرار گرفته و در نهایت با استفاده از شبکه عصبی،  $f'_{cu}$  پیش‌بینی گردیده است. شبکه عصبی پیشنهادی در این مقاله از نوع انتشار برگشتی (BPNN) با ساختار ۱-۸-۹ می‌باشد که تابع انتقال آن در لایه پنهان از نوع تانژانت سیگموئید و در لایه خروجی از نوع خطی ساده است. تابع عملکرد خطا نیز میانگین مجموع مربعات خطا می‌باشد. در فرایند مدل‌سازی، شبکه‌ای بهینه محسوب می‌شود که هم‌زمان با داشتن بالاترین رگرسیون، کمترین میانگین مربعات خطا را نیز داشته باشد. بنابراین مهم‌ترین نکته در فرایند مدل‌سازی شبکه‌های عصبی مصنوعی، انتخاب شبکه با تعداد نرون کمتر و رگرسیون بیشتر است.

همچنین به منظور مشخص شدن میزان تاثیر هر یک از پارامترهای ورودی بر تنش نهایی فشاری، آنالیز حساسیت با استفاده از روش میلن با وزن‌های تنظیم شده و حاصل از شبکه عصبی ایده‌آل انجام شد که نتایج حاصل از آن نشان‌دهنده آن است که ضخامت ورق FRP بیشترین درصد تاثیر و قطر آرماتورهای عرضی، کمترین درصد تاثیر در تابع هدف را داشته‌اند.

## مراجع

- [1] برقیان. مجید، فرزام. مسعود، رضانی. پری، "نمودارهای اندرکنش ستون بتنی مسلح توخالی محصور با FRP"، نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر- مهندسی عمران و محیط زیست، دوره ۴۸، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵، ۵۳-۶۳.  
[http://ceej.aut.ac.ir/article\\_492.html](http://ceej.aut.ac.ir/article_492.html).
- [2] American Concrete Institute (ACI), ACI 318M-14: Building Code Requirements for Structural Concrete, 2014.
- [3] Shirmohammadi F, Esmaeily A, Kiaei pour Z, "Stress-strain model for circular concrete columns confined by FRP and conventional lateral steel", Eng. Struct. 84 (2015) 395-405. doi:10.1016/j.engstruct.2014.12.005.
- [4] Samaan M, Mirmiran A, Shahawy M, "Model of Concrete Confined by Fiber Composites", J. Struct. Eng.

- 124 (1998) 1025–1031. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1998)124:9(1025).
- [5] Youssef MN, Feng MQ, Mosallam AS, “Stress–strain model for concrete confined by FRP composites”, *Compos. Part B Eng.* 38 (2007) 614–628. doi:10.1016/j.compositesb.2006.07.020.
- [6] Kawashima K, Hosotani M, Yoneda K, “Carbon fiber sheet retrofit of reinforced concrete bridge piers”, in: *Proc. Int. Work. Annu. Commem. Chi-Chi Earthquake, Natl. Cent. Res. Earthq. Eng. Taipei, Taiwan, ROC, 2000*: pp. 124–135.
- [7] Hoshikuma J, Kawashima K, Nagaya K, Taylor AW, “Stress-Strain Model for Confined Reinforced Concrete in Bridge Piers”, *J. Struct. Eng.* 123 (1997) 624–633. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:5(624).
- [8] Hosotani M, Kawashima K, Hoshikuma JI, “A stress-strain model for concrete cylinders confined by carbon fiber sheets”, in: *PROCEEDINGS-JAPAN Soc. Civ. Eng., DOTOKU GAKKAI, 1998*: pp. 37–52.
- [9] Lee JY, Yi CK, Jeong HS, Kim SW, Kim JK, “Compressive Response of Concrete Confined with Steel Spirals and FRP Composites”, *J. Compos. Mater.* 44 (2010) 481–504. doi:10.1177/0021998309347568.
- [10] Naderpour H, Kheyroddin A, Ghodrati Amiri G, “Prediction of FRP-confined compressive strength of concrete using artificial neural networks”, *Compos. Struct.* 92 (2010) 2817–2829. doi:10.1016/j.compstruct.2010.04.008.
- [11] رضازاده عیدگاهی. دانیال، فصیحی. فاضل، نادرپور. حسین، "انتخاب آرایش بهینه ی شبکه ی عصبی در تحلیل خاک‌های مخلوط با خرده لاستیک‌های بازیافتی"، مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۴، دوره ی ۲-۳۱، شماره ی ۱/۱، ۱۰۵-۱۱۱.
- [12] نادرپور. حسین، وثوقی فر. حمیدرضا، قباخلو. احسان، "ارزیابی پارامترهای موثر در تفرق امواج زلزله‌های دور از گسل به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی"، مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۵، دوره ی ۲-۳۲، شماره ی ۱/۱، ۱۳-۲۳.
- [13] Demers M, Neale KW, “Confinement of reinforced concrete columns with fibre-reinforced composite sheets - an experimental study”, 26(2) (1999) 226–241.
- [14] Eid R, Paultre P, “Analytical Model for FRP-Confined Circular Reinforced Concrete Columns”, *J. Compos. Constr.* 12 (2008) 541–552. doi:10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:5(541).
- [15] Benzaid R, Mesbah H, Chikh NE, “FRP-confined Concrete Cylinders: Axial Compression Experiments and Strength Model”, *J. Reinf. Plast. Compos.* 29 (2010) 2469–2488. doi:10.1177/0731684409355199.
- [16] Milne L, “Feature selection using neural networks with contribution measures”, in: *Citeseer, 1995*: pp. 1–8.