

## A model for predicting the shear strength of reinforced concrete beams strengthened with polymeric fibers using artificial neural networks

Moein Chamak<sup>1</sup>, Amirhosein Hashemi<sup>2\*</sup>, Pooria Rashvand<sup>3</sup>

1- Master's in Construction Management, Faculty of Engineering, Civil Engineering Department, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

2- Assistant Professor, Faculty of Engineering, Civil Engineering Department, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

2- Assistant Professor, Faculty of Engineering, Civil Engineering Department, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

### ABSTRACT

Reinforced concrete structures are widely used in civil infrastructure due to their favorable load-bearing properties, high compressive strength, and economical construction. However, the shear performance of these structures has always been a major concern in their design and operation. One of the common methods for strengthening reinforced concrete members is the use of fiber-reinforced polymers (FRP). Reinforcing bars made of FRP are widely utilized due to their numerous advantages compared to steel reinforcement. However, studies conducted on FRP-reinforced concrete beams have primarily focused on their longitudinal behavior, and their shear strength has not been comprehensively investigated. The primary aim of this research is to propose a model based on Artificial Neural Networks (ANN) for predicting the shear strength of FRP-reinforced concrete beams. For this purpose, a database of 177 FRP-reinforced concrete beams was compiled from the results of existing studies. The proposed model provides a high-accuracy prediction of the shear strength of these beams. Additionally, to evaluate the performance of the proposed model, residual analysis and comparisons of the outputs of the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) and the Artificial Neural Network (ANN) were conducted. The results demonstrated that the ANN model exhibits superior accuracy. The proposed model can serve as an efficient tool for calculating the shear strength of FRP-reinforced concrete beams. Consequently, within the parameter ranges defined in this study, there will be no need for costly and time-consuming experimental studies.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 17 February 2025

**Revise Date:** 16 March 2025

**Accept Date:** 07 April 2025

### Keywords:

Polymeric fibers

FRP

Reinforced concrete  
shear strength of beams  
artificial neural network

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.506922.3664

\*Corresponding author: Amirhosein Hashemi

Email address: [sa.hashemi1360@iaau.ac.ir](mailto:sa.hashemi1360@iaau.ac.ir)

## ارائه مدلی برای پیش بینی مقاومت برشی تیرهای بتنی مسلح شده با الیاف پلیمری با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی

معین چمک<sup>۱</sup>، امیرحسین هاشمی<sup>۲\*</sup>، پوریا رشوند<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد مدیریت ساخت، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

۳- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

### چکیده

سازه های بتنی مسلح به دلیل ویژگی های باربری مطلوب، مقاومت بالا در برابر فشار و قابلیت ساخت اقتصادی، به طور گسترده در زیرساخت های عمرانی مورد استفاده قرار می گیرند. با این وجود، عملکرد برشی این سازه ها همواره یکی از نگرانی های اصلی در طراحی و بهره برداری از آنها بوده است. یکی از روش های متداول تقویت اعضای بتن مسلح، استفاده از الیاف پلیمری است. میلگردهای ساخته شده از الیاف پلیمری مسلح (FRP) به دلیل مزایای متعدد، نسبت به میلگردهای فولادی به صورت گسترده تری مورد استفاده قرار می گیرند. با این حال، مطالعات انجام شده بر روی تیرهای بتنی مسلح با FRP عمدتاً بر رفتار طولی این تیرها متمرکز بوده و مقاومت برشی آنها به طور کامل بررسی نشده است. هدف اصلی این پژوهش، ارائه مدلی مبتنی بر شبکه های عصبی مصنوعی (ANN) برای پیش بینی مقاومت برشی تیرهای بتنی مسلح با الیاف پلیمری است. بدین منظور، یک پایگاه داده شامل ۱۷۷ تیر بتن مسلح با FRP از نتایج تحلیل مقالات موجود گردآوری شد. مدل پیشنهادی امکان پیش بینی مقاومت برشی تیرهای مذکور را با دقت بالا فراهم می کند. علاوه بر این، به منظور ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی، تحلیل باقیمانده و مقایسه خروجی های سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی (ANFIS) و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) انجام شد. نتایج نشان داد که مدل شبکه عصبی از دقت بالاتری برخوردار است. این مدل پیشنهادی می تواند به عنوان ابزاری کارآمد برای محاسبه مقاومت برشی تیرهای بتنی مسلح با FRP مورد استفاده قرار گیرد. به این ترتیب، در بازه پارامترهای تعریف شده در این پژوهش، دیگر نیازی به صرف هزینه و زمان برای مطالعات آزمایشگاهی وجود نخواهد داشت.

کلمات کلیدی: الیاف پلیمری، FRP، بتن مسلح، مقاومت برشی تیر، شبکه عصبی مصنوعی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2025.506922.3664	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2025.506922.3664	۱۴۰۴/۱۰/۳۰	۱۴۰۴/۰۱/۱۸	۱۴۰۴/۰۱/۱۸	۱۴۰۳/۱۲/۲۶	۱۴۰۳/۱۱/۲۹
*نویسنده مسئول: امیرحسین هاشمی						
sa.hashemi1360@iaue.ac.ir					پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

سازه‌های بتنی مسلح به دلیل ویژگی‌های باربری مطلوب، مقاومت بالا در برابر فشار و قابلیت ساخت اقتصادی، به‌طور گسترده در زیرساخت‌های عمرانی نظیر ساختمان‌ها، پل‌ها، سدها و تونل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این وجود، عملکرد برشی این سازه‌ها همواره یکی از نگرانی‌های اصلی در طراحی و بهره‌برداری از آن‌ها بوده است. برش به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب سازه‌های بتنی شناخته می‌شود، زیرا معمولاً منجر به شکست ناگهانی و غیرمنتظره در سازه می‌شود که می‌تواند پیامدهای اقتصادی و ایمنی جدی به همراه داشته باشد [۱]. افزایش مقاومت برشی اعضای بتنی همواره یک چالش اساسی بوده و روش‌های مختلفی برای بهبود آن پیشنهاد شده است که یکی از مؤثرترین آن‌ها استفاده از الیاف پلیمری تقویت‌شده (FRP) به‌عنوان جایگزینی برای میلگردهای فولادی است [۲].

FRP به دلیل ویژگی‌هایی همچون مقاومت بالا در برابر خوردگی، وزن سبک، استحکام کششی قابل توجه و سهولت در اجرا، به‌عنوان یکی از مؤثرترین مواد تقویتی برای بهبود عملکرد برشی سازه‌های بتنی شناخته شده است [۳]. برخلاف میلگردهای فولادی که در محیط‌های خورنده و مناطق ساحلی به‌سرعت دچار زنگ‌زدگی و کاهش مقاومت می‌شوند، FRP می‌تواند عملکرد طولانی‌مدت سازه را تضمین کند [۴]. همچنین، این مواد می‌توانند وزن کلی سازه را کاهش داده و در نتیجه، نیروهای داخلی سازه را کم کنند. با وجود این مزایا، برخی چالش‌ها مانند مدول الاستیسیته پایین، کاهش مقاومت در محل خم‌ها، رفتار خطی تا شکست، و ضعف در انتقال تنش‌های برشی هنوز به‌عنوان محدودیت‌های کلیدی استفاده از FRP در تقویت برشی مطرح هستند [۵].

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که روش‌های مختلفی برای تقویت برشی تیرهای بتنی با استفاده از FRP توسعه یافته‌اند که مهم‌ترین آن‌ها شامل خاموت‌های FRP، نوارهای FRP، شبکه‌های FRP و پیش‌تنیدگی FRP است [۶]. یکی از رایج‌ترین روش‌ها استفاده از خاموت‌های FRP است که می‌تواند به‌طور مؤثری ترک‌های برشی را محدود کرده و ظرفیت برشی تیر را افزایش دهند. با این حال، مطالعات نشان داده‌اند که مقاومت در محل خم‌ها کاهش می‌یابد و این مسئله باعث افت کارایی خاموت‌ها می‌شود [۷]. برای رفع این مشکل، برخی پژوهشگران پیشنهاد داده‌اند که نوارهای FRP به‌عنوان جایگزین خاموت‌های معمولی استفاده شوند. این روش نه تنها ضعف مکانیکی محل خم‌ها را کاهش می‌دهد، بلکه توزیع تنش بهتری را در ناحیه برشی تیر ایجاد می‌کند و در نتیجه، عملکرد برشی را بهبود می‌بخشد [۸].

علاوه بر این، روش دیگری که اخیراً مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از شبکه‌های FRP<sup>۱</sup> است. این شبکه‌ها می‌توانند نیروهای برشی را در کل سطح مقطع تیر توزیع کنند و از تمرکز تنش در یک نقطه خاص جلوگیری نمایند [۹]. تحقیقات نشان داده‌اند که عملکرد شبکه‌های FRP در مقایسه با خاموت‌های FRP بهتر بوده و تأثیر بیشتری در افزایش ظرفیت برشی و کنترل عرض ترک‌ها دارند [۱۰].

علاوه بر روش‌های فوق، یکی دیگر از راهکارهای مؤثر برای بهبود مقاومت برشی تیرهای بتنی استفاده از FRP پیش‌تنیده است. پیش‌تنیدگی در FRP باعث افزایش سختی برشی، بهبود عملکرد خمشی و کاهش تغییر شکل‌های غیرالاستیک در طول بهره‌برداری از سازه می‌شود [۱۱]. این روش به‌ویژه در سازه‌هایی که تحت بارگذاری‌های متناوب و ضربه‌ای قرار دارند، مؤثر است. برخی پژوهش‌ها نشان داده‌اند که ترکیب FRP با بتن‌های مهندسی‌شده (ECC) و بتن‌های الیافی نیز می‌تواند تأثیر قابل توجهی در افزایش ظرفیت برشی تیرهای بتنی داشته باشد [۱۲].

یکی از چالش‌های مهم در طراحی و ارزیابی عملکرد تیرهای بتنی تقویت‌شده با FRP، پیش‌بینی دقیق مقاومت برشی آن‌ها است. مدل‌های سنتی طراحی که بر اساس روابط تجربی و نیمه‌تجربی تدوین شده‌اند، معمولاً دقت کافی ندارند، زیرا بسیاری از این روابط بر اساس مجموعه‌ای محدود از داده‌های آزمایشگاهی توسعه یافته‌اند و نمی‌توانند تمامی متغیرهای تأثیرگذار را در نظر بگیرند [۱۳]. برای حل این مشکل، روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و یادگیری ماشین به‌عنوان رویکردی نوین برای پیش‌بینی مقاومت برشی تیرهای بتنی پیشنهاد شده‌اند.

<sup>۱</sup> FRP Grids

الگوریتم‌های یادگیری ماشین از جمله شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)، سیستم‌های فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS)، جنگل تصادفی (Random Forest) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) توانسته‌اند با تحلیل داده‌های آزمایشگاهی، مدل‌های دقیقی برای پیش‌بینی مقاومت برشی ارائه دهند [۱۴]. مطالعات نشان داده‌اند که مدل‌های ANN و ANFIS قادرند الگوهای پیچیده و غیرخطی بین پارامترهای تأثیرگذار بر مقاومت برشی را شناسایی کنند و دقت بالاتری نسبت به مدل‌های سنتی ارائه دهند [۱۵]. همچنین، الگوریتم‌های Random Forest و SVM می‌توانند با تحلیل داده‌های تجربی، نتایج قابل‌اعتمادی را برای پیش‌بینی مقاومت برشی ارائه کنند [۱۶].

مطالعات متعددی پیرامون استفاده از الیاف پلیمری مسلح (FRP) به‌عنوان جایگزین میلگردهای فولادی در بتن مسلح انجام شده است. با این حال، بیشتر این تحقیقات بر مقاومت خمشی تیرهای بتن مسلح متمرکز بوده و بررسی مقاومت برشی این تیرها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. روش‌های تحلیلی و نیمه‌تجربی رایج برای پیش‌بینی مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح با FRP، به دلیل پیچیدگی رفتار برشی و وابستگی آن به متغیرهای متعدد، همواره با محدودیت‌هایی مواجه بوده‌اند. در سال‌های اخیر، مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی به‌ویژه شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) برای پیش‌بینی مقاومت برشی مورد توجه قرار گرفته‌اند، اما چالش‌هایی نظیر عدم وجود پایگاه داده جامع، تأثیر پارامترهای متنوع و پیچیدگی‌های مدل‌سازی همچنان وجود دارد.

مطالعات اخیر تلاش کرده‌اند تا برخی از شکاف‌های تحقیقاتی موجود را برطرف کنند. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی، به‌ویژه شبکه‌های عصبی مصنوعی، می‌تواند دقت پیش‌بینی مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح با FRP را افزایش دهد. بررسی‌ها نشان داده‌اند که مدل‌های مبتنی بر یادگیری ماشین، در صورت داشتن داده‌های کافی، عملکرد بهتری نسبت به روش‌های تحلیلی سنتی دارند. همچنین، ترکیب مدل‌سازی تئوری با تکنیک‌های هوش مصنوعی، به‌عنوان رویکردی نوین، دقت پیش‌بینی‌ها را بهبود بخشیده و امکان ارائه مدل‌هایی با قابلیت تعمیم‌پذیری بالاتر را فراهم کرده است.

با توجه به این شکاف‌های تحقیقاتی، پژوهش حاضر با گردآوری یک پایگاه داده جامع شامل ۱۷۷ تیر بتن مسلح با FRP و مقایسه روش ANN با ANFIS، به دنبال ارائه مدلی دقیق‌تر برای پیش‌بینی مقاومت برشی این تیرها است. مدل پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان جایگزینی برای آزمایش‌های پرهزینه و زمان‌بر مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این، تحلیل باقیمانده و بررسی عملکرد مدل از جنبه‌های جدیدی است که کمتر در تحقیقات پیشین به آن پرداخته شده است. بنابراین، نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان یک روش کارآمد و نوین برای پیش‌بینی دقیق‌تر مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح با FRP مورد استفاده قرار گیرد و شکاف‌های موجود در ادبیات تحقیق را پوشش دهد.

در این پژوهش، تعداد نمونه‌های مورد استفاده بر اساس داده‌های استخراج شده از مطالعات معتبر پیشین انتخاب شده است. پایگاه داده شامل ۱۷۷ تیر بتن مسلح با FRP است که از نتایج پژوهش‌های پیشین گردآوری شده‌اند. این تعداد نمونه به‌گونه‌ای انتخاب شده است که طیف وسیعی از متغیرهای مؤثر بر مقاومت برشی، از جمله عرض جان، عمق تقویت کششی، نسبت برش به عمق، مقاومت فشاری بتن، نسبت تقویت میلگرد FRP و مدول الاستیسیته FRP را دربرگیرد. همچنین، برای جلوگیری از بیش‌برازش و افزایش تعمیم‌پذیری مدل، داده‌ها به دو مجموعه آموزشی (۷۰ درصد) و آزمایشی (۳۰ درصد) تقسیم‌بندی شده‌اند.

هدف این تحقیق، ارائه مدلی برای پیش‌بینی مقاومت برشی تیرهای بتنی مسلح با FRP با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی است. در این تحقیق، داده‌های مقاله‌ای منتشر شده در سال ۲۰۲۰ شامل ۱۷۷ داده ورودی و ۶ پارامتر اصلی استفاده شده‌اند. انتخاب شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) به‌عنوان روش اصلی در این پژوهش به دلیل توانایی بالای آن‌ها در شناسایی الگوهای پیچیده و غیرخطی بین متغیرهای تأثیرگذار بر مقاومت برشی صورت گرفته است. مدل‌های تجربی و نیمه‌تجربی سنتی معمولاً دقت کافی ندارند، زیرا بر اساس مجموعه داده‌های محدودی تدوین شده‌اند. در مقابل، مدل ANN می‌تواند با یادگیری از داده‌های گسترده، عملکرد بهتری در پیش‌بینی مقاومت برشی ارائه دهد. علاوه بر این، مقایسه نتایج ANN و ANFIS نشان داده است که ANN نوسانات کمتری داشته و دقت بالاتری را ارائه می‌کند، که این امر نشان‌دهنده قابلیت بالای این مدل در مسائل مهندسی سازه است.

نوآوری اصلی این پژوهش در ارائه یک مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) برای پیش بینی مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح با FRP نهفته است. برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً بر روی رفتار خمشی این تیرها تمرکز داشته‌اند، این پژوهش به‌طور ویژه مقاومت برشی را بررسی کرده است. همچنین، در این تحقیق برای نخستین بار مقایسه‌ای میان مدل ANN و سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی (ANFIS) صورت گرفته و تحلیل باقیمانده به‌منظور بررسی دقت مدل ارائه شده است. از دیگر نوآوری‌های این پژوهش، گردآوری پایگاه داده‌ای گسترده شامل ۱۷۷ نمونه از تیرهای بتن مسلح با FRP و تحلیل دقیق متغیرهای مؤثر بر مقاومت برشی است که موجب افزایش دقت مدل پیشنهادی شده است.

## ۲- روش تحقیق

بررسی‌های تجربی متعددی در زمینه تعیین مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح با الیاف پلیمری انجام شده است. در این مطالعات، برخی از رایج‌ترین معادلاتی که برای به دست آوردن داده‌های خروجی بر مبنای ورودی‌های متغیر مورد استفاده قرار می‌گیرند، ارائه شده‌اند [۱۶]. شایان ذکر است که این معادلات از آیین‌نامه‌ها، استانداردها و راهنماهای معتبر استخراج شده‌اند، از جمله راهنمای طراحی انجمن بتن آمریکا و کتابچه راهنمای طراحی کانادا، راهنماهای انجمن مهندسان سازه بریتانیا، توصیه‌نامه‌های طراحی JSCE-CNRDT 203-06 و گروه CAN/CSA-S806-02.

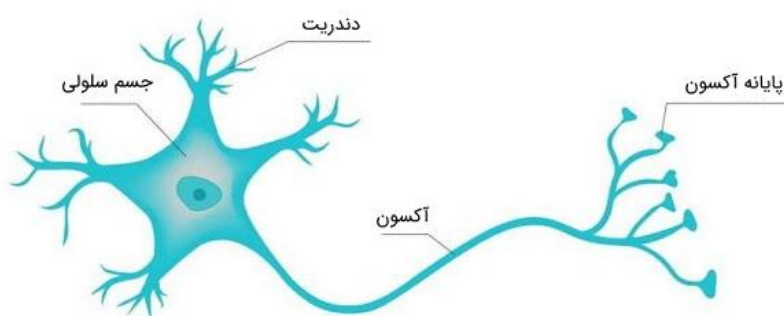
متغیرهای ورودی این معادلات شامل موارد زیر هستند: عرض جان، عمق کششی میلگردها، ضریب برش و عمق، مقاومت فشاری بتن، ضریب میلگرد FRP، مدول الاستیسیته FRP، و مقاومت برشی تیر. جدول شماره یک، پارامترهای ورودی و خروجی به دست آمده از روش استنتاج فازی عصبی تطبیقی (ANFIS) را نشان می‌دهد. همچنین، جدول شماره ۲ شامل تمامی نمونه‌های مورد مطالعه است.

جدول ۱: بخشی از داده‌های نمونه آنالیز ANFIS [۱۶]

ورودی ۱: عرض $b$ (mm)	ورودی ۲: عمق تقویت کششی $d$ (mm)	ورودی ۳: نسبت برش و عمق $a/d$	ورودی ۴: مقاومت فشاری بتن (Mpa) $f_c$	ورودی ۵: نسبت تقویت FRP $\rho_f$	ورودی ۶: مدول الاستیسیته FRP (GPA)
خروجی (ANFIS): مقاومت برشی $V_1$ $\rho_f$					

شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌عنوان ابزاری مناسب و کارآمد برای حل مسائل پیچیده‌ای که مدل‌سازی آن‌ها دشوار است، شناخته می‌شوند. این شبکه‌ها که از مهم‌ترین شاخه‌های هوش مصنوعی هستند، به دلیل توانایی بالا در شبیه‌سازی و پیش‌بینی، کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف پیدا کرده‌اند. ساختار شبکه‌های عصبی مصنوعی از عملکرد مغز انسان الهام گرفته شده است، مغزی که از میلیاردها سلول عصبی تشکیل شده و قابلیت پردازش اطلاعات به‌صورت موازی و هماهنگ را داراست. هر نرون، به‌عنوان کوچک‌ترین واحد پردازش در این شبکه‌ها، مشابه عملکرد یک سلول عصبی واقعی عمل می‌کند و نقشی کلیدی در یادگیری و تصمیم‌گیری ایفا می‌کند.

به‌طور کلی، هر نرون شامل سه بخش اصلی است: دندریت‌ها که وظیفه دریافت سیگنال‌ها از دیگر نرون‌ها را دارند، اکسون که سیگنال‌ها را به دیگر نرون‌ها انتقال می‌دهد، و بدنه سلول که مرکز پردازش و تصمیم‌گیری است. این ساختار پیچیده و هماهنگ، شبکه‌های عصبی را قادر می‌سازد تا مسائل گوناگون را با دقت و کارایی بالا حل کنند. برای درک بهتر ساختار و نحوه عملکرد این نرون‌ها، شکل شماره یک، نمونه ساده‌ای از اجزای اصلی نرون شامل دندریت، اکسون و بدنه سلول را نشان می‌دهد. این تصویر می‌تواند به‌خوبی روند الهام‌گیری شبکه‌های عصبی مصنوعی از ساختار طبیعی مغز انسان را توضیح دهد.



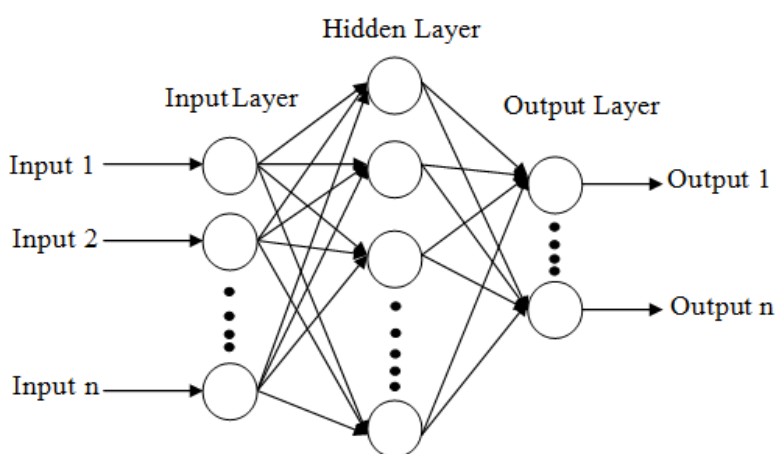
شکل ۱: ساختار یک شبکه عصبی

شبکه‌های عصبی مصنوعی مشابه مغز انسان، بر اساس تجربیات و مشاهدات، قابلیت یادگیری دارند. یادگیری در این شبکه‌ها به معنای ایجاد ارتباطات جدید بین نرون‌ها یا تغییر در ارتباطات موجود است. شبکه‌های عصبی با تجزیه و تحلیل داده‌ها و کشف الگوها و روابط پیچیده میان آن‌ها، تأثیر پارامترهای مختلف بر متغیر خروجی را بررسی کرده و تابعی با دقت قابل قبول ارائه می‌دهند.

به‌طور کلی، شبکه‌های عصبی به دو نوع اصلی تقسیم می‌شوند: شبکه‌های پیش‌خور و شبکه‌های پس‌خور. تفاوت اصلی این دو در وجود سیگنال برگشتی است؛ به‌طوری‌که در شبکه‌های پس‌خور، حداقل یک سیگنال از یک نرون به همان نرون، نرون‌های لایه خودش، یا لایه قبلی بازمی‌گردد. با این حال، در بسیاری از موارد، از شبکه‌های پیش‌خور به دلیل سادگی و پایداری بیش‌تر استفاده می‌شود.

یکی از چالش‌های اصلی در طراحی شبکه‌های عصبی مصنوعی، تعیین تعداد نرون‌ها و لایه‌های موردنیاز برای هر مسئله است. این فرآیند معمولاً به روش آزمون و خطا و با توجه به تجربه انجام می‌شود، زیرا روش منطقی و دقیقی برای این کار وجود ندارد.

شکل ۲ نمونه‌ای از یک شبکه عصبی چندلایه پیش‌خور را نشان می‌دهد که در آن داده‌ها از لایه ورودی به لایه‌های پنهان منتقل شده و پس از پردازش، به لایه خروجی می‌رسند. این ساختار، که اغلب برای مسائل پیچیده به کار می‌رود، یکی از پرکاربردترین انواع شبکه‌های عصبی مصنوعی است.



شکل ۲: شمای شمای شبکه عصبی مصنوعی

با توجه به شکل ۳، خروجی در لایه آخر از رابطه یک بدست می‌آید [۱۷]:

$$O = f \left( \sum g \left( \sum x_i w_{ij} I_p \right) w_j H_q \right) \quad (1)$$

در این رابطه، I و H به ترتیب نشان دهنده لایه ورودی و لایه مخفی هستند w. وزن های اتصال بین لایه ها را نشان می دهد و p و q به ترتیب تعداد نرون های لایه ورودی و لایه مخفی را مشخص می کنند. همچنین، F به عنوان تابع انتقال لایه خروجی و g به عنوان تابع انتقال لایه مخفی معرفی شده اند. برای آموزش شبکه های عصبی مصنوعی چند لایه پیش خور، الگوریتم پس انتشار خطا یکی از پرکاربردترین و مؤثرترین روش ها محسوب می شود.

در این الگوریتم از روش کاهش شیب تابع خطا استفاده می شود؛ به این ترتیب که خطاها از لایه خروجی به سمت لایه های قبلی منتشر شده و وزن ها به نحوی اصلاح می شوند که مقدار خطا به حداقل ممکن کاهش یابد. این فرآیند آموزش شامل اصلاح تدریجی وزن ها در راستای کمینه سازی تابع خطا است. این روند تا زمانی ادامه می یابد که یکی از معیارهای توقف (مانند رسیدن به مقدار خطای مشخص یا حداکثر تعداد تکرار) برآورده شود [۱۷].

در سال های اخیر، روش ها و آزمایش های متعددی در خصوص تقویت برشی تیرهای بتن آرمه مسلح شده با الیاف پلیمری انجام شده است. از آن جا که شبکه های عصبی مصنوعی توانایی یادگیری و پیش بینی مسائل پیچیده را دارند، استفاده از آن ها در مسائل سازه ای به طور قابل توجهی افزایش یافته است.

در این تحقیق از داده های مورد استفاده شده در مقاله منتشر شده در سال ۲۰۲۰ [۱۸] استفاده شده و پیش از شروع شبیه سازی، داده ها به طور تصادفی در دو گروه تقسیم بندی می شود :

۱- داده های آموزش: این داده ها از میان داده های اعتبار سنجی شده و به منظور هدایت پروسه آموزش به کار گرفته می شوند، همچنین این داده ها برای بروز کردن وزن های شبکه عصبی به هنگام آموزش مورد استفاده قرار می گیرند. عمدتاً از میان کل داده ها ۷۰ درصد آنها را (به طور تصادفی یا با یک پیش فرض) به عنوان داده های آموزش انتخاب می کنند. پس از آن که شبکه توسط این داده ها آموزش دید، وزن ها مقدار نهایی خود را یافته اند به نحوی که شبکه برای داده های آموزش، کمترین خطا را بدست می دهد (در این تحقیق داده های شماره ۱ تا ۱۲۴ یعنی ۷۰ درصد کل داده ها به عنوان داده های آموزش مورد استفاده قرار گرفت).

۲- داده های تست: پس از آن که شبکه توسط داده های آموزش تا رسیدن به حداقل خطا آموزش یافت، مابقی داده ها (۳۰٪ باقی مانده) که در آموزش نقشی نداشته اند به عنوان ورودی به شبکه داده شده و پاسخ شبکه با پاسخ مطلوب مقایسه می گردد و بدین ترتیب راندمان شبکه آموزش دیده محک زده می شود [۱۷]. (در این تحقیق داده های شماره ۱۲۵ تا ۱۷۷ یعنی ۳۰ درصد مابقی داده ها به عنوان داده های تست مورد استفاده قرار گرفت).

در ساختار شبکه عصبی مطابق جدول ۱ موثرترین متغیرهای در داده ها به عنوان متغیرهای ورودی به مدل استفاده شده است. تعداد لایه های مخفی برابر ۵ و تعداد نرون های لایه مخفی برابر با ۱۵ انتخاب گردید و این انتخاب بر اساس تجربه و روش آزمون و خطا صورت گرفت. همچنین در آموزش شبکه از feed-forwardbackprop استفاده شده است. انتخاب مناسب ترین و کارا ترین شبکه با بهره گیری از مقالات مختلف و همچنین با سعی و خطا و تغییر در نوع معماری شبکه، تابع انتقال، تعداد لایه ها و تعداد نرون ها صورت یافت. پارامترهای ورودی به شبکه در جدول ۱ و ۲ معرفی شده اند. در صورتی که ورودی ها و اهداف شبکه نرمال شود، آموزش شبکه عصبی می تواند نتایج کارآمد را منعکس کند. به منظور استفاده از ورودی ها و خروجی ها در شبکه، حداقل و حداکثر مقادیر داده ها در هر گروه به صفر تا یک تغییر پیدا کرد. در ادامه داده های طبقه بندی شده و مقیاس شده با عنوان های input train، input test، target train و target test وارد نرم افزار متلب شده است.

در این تحقیق، برای تحلیل و پیش بینی مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح با FRP از یک پایگاه داده شامل ۱۷۷ نمونه استفاده شده است. پارامترهای این داده ها شامل موارد مختلفی هستند که در ادامه به تفصیل شرح داده می شود.

ابتدا، ردیف نمونه ها نشان دهنده شماره شناسایی هر یک از تیرهای آزمایش شده است که به طور منحصر به فرد هر تیر را در پایگاه داده معرفی می کند. سپس، عرض (mm) b که به میلی متر اندازه گیری می شود، نمایانگر عرض جان تیر است. این پارامتر بر مقاومت برشی

تیر تأثیر می‌گذارد زیرا عرض تیر رابطه مستقیم با ظرفیت تحمل بار برشی آن دارد. بعد از آن، عمق تقویت کششی ( $d$  (mm) که نشان‌دهنده فاصله از سطح بالای تیر تا مرکز میلگردهای تقویت‌کننده کششی است، یکی از پارامترهای تأثیرگذار در پیش‌بینی مقاومت برشی است. عمق تیر بر توزیع تنش‌ها و رفتار برشی تیر تأثیرگذار است.

**نسبت برش و عمق  $a/d$**  که از تقسیم طول برش ( $a$ ) به عمق تقویت کششی ( $d$ ) به دست می‌آید، یکی از فاکتورهای کلیدی در مدل‌سازی مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح با FRP است. افزایش این نسبت می‌تواند منجر به کاهش مقاومت برشی شود. همچنین، مقاومت فشاری بتن ( $f'_c$  (MPa) که با واحد مگاپاسکال (MPa) اندازه‌گیری می‌شود، نمایانگر مقاومت فشاری بتن است. این پارامتر یکی از فاکتورهای اصلی در تحلیل مقاومت برشی است، زیرا رابطه مستقیمی با توانایی تیر در تحمل بارهای فشاری و برشی دارد.

**نسبت تقویت  $f'_c$  (MPa)** نیز به نسبت مقادیر فشاری و تقویتی در بتن و FRP اشاره دارد و تأثیر آن بر مقاومت برشی از این نظر اهمیت دارد که ترکیب مواد تقویتی با بتن می‌تواند باعث بهبود رفتار تیر تحت بارهای برشی شود. در ادامه، مدول الاستیسیته  $FRP$  ( $E_{FRP}$ ) که به واحد گیگاپاسکال (GPa) اندازه‌گیری می‌شود، نمایانگر سختی و انعطاف‌پذیری مواد تقویتی FRP است. این پارامتر به‌طور مستقیم بر توانایی تیر در تحمل تنش‌های برشی تأثیر می‌گذارد.

در نهایت، خروجی ۱: **مقاومت برشی (ANFIS)** که توسط مدل استنتاج فازی عصبی تطبیقی (ANFIS) محاسبه می‌شود، پیش‌بینی مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح با FRP را انجام می‌دهد. این مدل از داده‌های ورودی برای شبیه‌سازی رفتار برشی تیر استفاده می‌کند و در نهایت مقاومت برشی را پیش‌بینی می‌نماید. مشابه با آن، خروجی ۲: **مقاومت برشی (ANN)** که توسط مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) پیش‌بینی می‌شود، مشابه مدل ANFIS عمل کرده و مقاومت برشی تیر را پیش‌بینی می‌کند. مدل ANN به‌ویژه برای شبیه‌سازی روابط غیرخطی و پیچیده بین متغیرهای تأثیرگذار بر مقاومت برشی استفاده می‌شود.

این پارامترها و خروجی‌ها به‌طور کامل در مدل‌سازی و پیش‌بینی مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح با FRP تأثیرگذار بوده و در تحلیل نتایج نهایی مدل‌های ANFIS و ANN کاربرد دارند.

جدول شماره ۲: داده‌ها و خروجی‌ها نمونه برای تحلیل به دو روش ANFIS و ANN [۱۶].

ردیف نمونه‌ها	عرض $b$ (mm)	عمق تقویت کششی $d$ (mm)	نسبت برش و عمق آگهی	مقاومت فشاری بتن $f'_c$ (MPa)	نسبت تقویت $f'_c$ (MPa)	مدول الاستیسیته FRP $E_{FRP}$ (GPa)	خروجی ۱: مقاومت برشی (ANFIS) $V_I$	خروجی ۲: مقاومت برشی (ANN)
۱	۲۰۰	۳۲۵	۳.۲	۴۴.۶	۰.۷	۱۳۷	۱.۹۷۶۶۶۷	۱.۴۹۳۷۲۸۱۸۸
۲	۲۰۰	۳۲۵	۳.۲	۴۵	۰.۷	۱۳۷	۲.۱۰۵	۱.۴۹۷۵۵۲۵۲
۳	۲۰۰	۳۲۵	۳.۲	۴۶.۹	۰.۹	۵۸	۱.۹۹	۱.۵۵۱۰۰۶۲۶
۴	۲۵۰	۲۶۵	۳.۱	۳۴.۱	۱.۹	۵۶	۲.۲۷۳۳۳۳	۱.۶۳۹۳۱۳۵۷۶
۵	۲۵۰	۲۶۵	۳.۱	۲۲.۹	۱.۹	۵۶	۱.۹۵۶۶۶۷	۱.۵۶۷۱۲۰۶۰۷
۶	۳۰۰	۱۵۰	۴	۲۲.۷	۱.۳	۲۹	۱.۶۲۳۳۳۳	۱.۳۲۹۹۴۲۴۵۲
۷	۳۰۰	۱۵۰	۴	۲۷.۸	۱.۸	۲۹	۱.۴۸۵	۱.۳۱۸۵۸۴۸۴
۸	۱۵۰	۲۵۰	۳	۳۴.۳	۱.۵۱	۱۰۵	۱.۳۱۳۳۳۳	۱.۰۸۲۴۹۰۷۵
۹	۱۵۰	۲۵۰	۳	۳۴.۳	۳.۰۲	۱۰۵	۱.۰۹۶۶۶۷	۰.۹۷۵۵۶۵۸۸۷

۱۰	۱۵۰	۲۵۰	۳	۳۴.۳	۲.۲۷	۱۰.۵	۱۰.۵	۰.۹۷۰۲۱۱۸۲۱
۱۱	۲۰۰	۲۶۰	۲.۷	۳۴.۷	۱.۳	۱۳۰	۱.۲۶	۰.۹۷۲۲۱۰۹۰۴
۱۲	۱۵۰	۲۱۰	۳.۶۵	۲۷.۹۶۵	۱.۳۱	۴۵	۱.۲۰۳۳۳۳	۱.۰۳۰۲۵۳۸۴۳
۱۳	۱۵۰	۲۱۰	۳.۶۵	۳۲.۳۸۵	۱.۳۱	۴۵	۱.۳۶۶۶۶۷	۱.۰۴۰۷۳۵۹۹۱
۱۴	۲۵۴	۲۲۲	۳.۲	۳۹	۱.۵۵	۳۴	۰.۵۶	۰.۶۲۷۶۸۸۹۴۹
۱۵	۳۰۵	۱۹۲	۴.۱	۳۸	۰.۳۶	۴۱.۴	۱.۰۵۵	۰.۹۱۷۲۱۰۰۴۸
۱۶	۳۰۵	۱۵۷.۵	۴.۵	۲۸.۶	۰.۷۳	۴۰	۱.۱۷	۰.۹۸۲۱۷۱۵۵۲
۱۷	۲۲۹	۲۲۵	۴.۰۶	۳۶.۳	۱.۱۱	۴۰.۳	۱.۳۰۶۶۶۷	۱.۰۸۴۰۰۳۱
۱۸	۲۲۹	۲۲۵	۴.۰۶	۳۶.۳	۱.۱۱	۴۰.۳	۱.۲۸۸۳۳۳	۱.۰۸۴۰۰۳۱
۱۹	۲۲۹	۲۲۵	۴.۰۶	۳۶.۳	۱.۱۱	۴۰.۳	۱.۲۳	۱.۰۸۴۰۰۳۱
۲۰	۱۷۸	۲۲۵	۴.۰۶	۳۶.۳	۱.۴۲	۴۰.۳	۱.۱۲۵	۱.۰۳۱۵۵۷۵۹۳
۲۱	۱۷۸	۲۲۵	۴.۰۶	۳۶.۳	۱.۴۲	۴۰.۳	۱.۴	۱.۰۳۱۵۵۷۵۹۳
۲۲	۱۷۸	۲۲۵	۴.۰۶	۳۶.۳	۱.۴۲	۴۰.۳	۱.۲۸۳۳۳۳	۱.۰۳۱۵۵۷۵۹۳
۲۳	۲۲۹	۲۲۵	۴.۰۶	۳۶.۳	۱.۶۶	۴۰.۳	۱.۱۸۸۳۳۳	۱.۰۵۱۶۳۵۳۳۹
۲۴	۲۲۹	۲۲۵	۴.۰۶	۳۶.۳	۱.۶۶	۴۰.۳	۱.۴۴۳۳۳۳	۱.۰۵۱۶۳۵۳۳۹
۲۵	۲۲۹	۲۲۵	۴.۰۶	۳۶.۳	۱.۶۶	۴۰.۳	۱.۳۲۶۶۶۷	۱.۰۵۱۶۳۵۳۳۹
۲۶	۲۷۹	۲۲۵	۴.۰۶	۳۶.۳	۱.۸۱	۴۰.۳	۱.۰۴۳۳۳۳	۰.۹۲۸۴۹۱۸۲۹
۲۷	۲۷۹	۲۲۵	۴.۰۶	۳۶.۳	۱.۸۱	۴۰.۳	۱.۰۹	۰.۹۲۸۴۹۱۸۲۹
۲۸	۲۷۹	۲۲۵	۴.۰۶	۳۶.۳	۱.۸۱	۴۰.۳	۱.۰۹۵	۰.۹۲۸۴۹۱۸۲۹
۲۹	۲۵۴	۲۲۴	۴.۰۸	۳۶.۳	۲.۰۵	۴۰.۳	۰.۹۵۱۶۶۷	۰.۹۵۸۰۰۸۷۲۴
۳۰	۲۵۴	۲۲۴	۴.۰۸	۳۶.۳	۲.۰۵	۴۰.۳	۱.۲۸۸۳۳۳	۰.۹۵۸۰۰۸۷۲۴
ردیف نمونه ها	عرض (mm) b	عمق تقویت کششی d (mm)	نسبت برش و عمق آگهی	مقاومت فشاری بتن f <sub>c</sub> (MPa)	نسبت تقویت f <sub>c</sub> (MPa)	مدول الاستیسیته FRP ρ (GPa)	خروجی ۲ (ANFIS): مقاومت برشی VI	خروجی ۲ (ANN): مقاومت برشی
۳۱	۲۵۴	۲۲۴	۴.۰۸	۳۶.۳	۲.۰۵	۴۰.۳	۱.۱۷۶۶۶۷	۰.۹۵۸۰۰۸۷۲۴
۳۲	۲۲۹	۲۲۴	۴.۰۸	۳۶.۳	۲.۲۷	۴۰.۳	۱.۱۸۱۶۶۷	۰.۹۶۹۱۳۴۰۵۵
۳۳	۲۲۹	۲۲۴	۴.۰۸	۳۶.۳	۲.۲۷	۴۰.۳	۱.۱۳۸۳۳۳	۰.۹۶۹۱۳۴۰۵۵
۳۴	۲۲۹	۲۲۴	۴.۰۸	۳۶.۳	۲.۲۷	۴۰.۳	۱.۱۲۳۳۳۳	۰.۹۶۹۱۳۴۰۵۵
۳۵	۱۷۸	۲۷۹	۲.۷	۲۴.۱	۲.۳	۴۰	۱.۷۹۵	۱.۴۰۹۴۳۶۴۲
۳۶	۱۷۸	۲۸۷	۲.۶	۲۴.۱	۰.۷۷	۴۰	۱.۶۲۵	۱.۳۲۹۴۲۰۹۵۲
۳۷	۱۷۸	۲۸۷	۲.۶	۲۴.۱	۱.۳۴	۴۰	۱.۵۳۶۶۶۷	۱.۲۶۵۹۳۷۰۳۱
۳۸	۴۵۷	۳۶۰	۳.۴	۳۹.۷	۰.۹۶	۴۰.۵	۱.۲۰۳۳۳۳	۰.۹۴۳۹۶۲۹۹۳
۳۹	۴۵۷	۳۶۰	۳.۴	۳۹.۹	۰.۹۶	۳۷.۶	۱.۰۸۶۶۶۷	۰.۹۳۱۱۸۶۲۴۵
۴۰	۴۵۷	۳۶۰	۳.۴	۴۰.۳	۰.۹۶	۴۷.۱	۱.۱۹۳۳۳۳	۰.۹۷۸۷۱۲۲۷
۴۱	۴۵۷	۳۶۰	۳.۴	۴۲.۳	۱.۹۲	۴۰.۵	۱.۲۱۵	۱.۰۶۵۰۷۲۶۵۳
۴۲	۴۵۷	۳۶۰	۳.۴	۴۲.۵	۱.۹۲	۳۷.۶	۱.۳۹۱۶۶۷	۱.۰۴۸۵۲۳۷۲۳
۴۳	۱۶۰	۳۴۶	۲.۸	۳۷.۳	۰.۷۲	۴۲	۱.۹۶۵	۱.۶۷۱۱۰۷۶۸۷
۴۴	۱۶۰	۳۴۶	۲.۸	۳۷.۳	۰.۷۲	۴۲	۲.۲۹۸۳۳۳	۱.۶۷۱۱۰۷۶۸۷

۴۵	۱۶۰	۳۴۶	۳.۳	۴۳.۲	۱.۱	۴۲	۱.۲۸۵	۱.۰۲۹۰۱۹۶۲۷
۴۶	۱۶۰	۳۴۶	۳.۳	۴۳.۲	۱.۱	۴۲	۱.۲۸	۱.۰۲۹۰۱۹۶۲۷
۴۷	۱۶۰	۳۲۵	۳.۵	۳۴.۱	۱.۵۴	۴۲	۱.۵۳۶۶۶۷	۱.۱۷۸۳۲۵۰۴۸
۴۸	۱۶۰	۳۲۵	۳.۵	۳۴.۱	۱.۵۴	۴۲	۱.۴۱۵	۱.۱۷۸۳۲۵۰۴۸
۴۹	۱۳۰	۳۱۰	۳.۱	۳۷.۳	۰.۷۲	۱۲۰	۱.۵۶۵	۱.۲۱۳۵۹۵۸۲۵
۵۰	۱۳۰	۳۱۰	۳.۱	۳۷.۳	۰.۷۲	۱۲۰	۱.۴۵۶۶۶۷	۱.۲۱۳۵۹۵۸۲۵
۵۱	۱۳۰	۳۱۰	۳.۷	۴۳.۲	۱.۱	۱۲۰	۱.۲۶۶۶۶۷	۱.۰۷۷۱۵۴۰۶۸
۵۲	۱۳۰	۳۱۰	۳.۷	۴۳.۲	۱.۱	۱۲۰	۱.۴۰۱۶۶۷	۱.۰۷۷۱۵۴۰۶۸
۵۳	۱۳۰	۳۱۰	۳.۷	۳۴.۱	۱.۵۴	۱۲۰	۱.۴۷۸۳۳۳	۱.۲۱۴۴۳۰۲۲۵
۵۴	۱۳۰	۳۱۰	۳.۷	۳۴.۱	۱.۵۴	۱۲۰	۱.۵۴۱۶۶۷	۱.۲۱۴۴۳۰۲۲۵
۵۵	۲۰۳	۲۲۵	۴.۰۶	۷۹.۶	۱.۲۵	۴۰.۳	۱.۱۵۸۳۳۳	۰.۸۵۶۵۹۴۳۷۶
۵۶	۲۰۳	۲۲۵	۴.۰۶	۷۹.۶	۱.۲۵	۴۰.۳	۰.۸۴۵	۰.۸۵۶۵۹۴۳۷۶
۵۷	۲۰۳	۲۲۵	۴.۰۶	۷۹.۶	۱.۲۵	۴۰.۳	۱.۱۷۱۶۶۷	۰.۸۵۶۵۹۴۳۷۶
۵۸	۱۵۲	۲۲۵	۴.۰۶	۷۹.۶	۱.۶۶	۴۰.۳	۱.۰۵۳۳۳۳	۰.۹۳۹۰۶۰۸۹۴
۵۹	۱۵۲	۲۲۵	۴.۰۶	۷۹.۶	۱.۶۶	۴۰.۳	۱.۱۲۶۶۶۷	۰.۹۳۹۰۶۰۸۹۴
۶۰	۱۵۲	۲۲۵	۴.۰۶	۷۹.۶	۱.۶۶	۴۰.۳	۱.۱۴	۰.۹۳۹۰۶۰۸۹۴
ردیف نمونه ها	عرض (mm) b	عمق تقویت کششی d (mm)	نسبت برش و عمق آگهی	مقاومت فشاری بتن $f_c$ (MPa)	نسبت تقویت $f_c$ (MPa)	مدول الاستیسیته FRP $\rho_f$ (GPA)	خروجی ۲ (ANFIS): مقاومت برشی VI	خروجی ۲ (ANN): مقاومت برشی
۶۱	۱۶۵	۲۲۴	۴.۰۸	۷۹.۶	۲.۱	۴۰.۳	۱.۱۲۵	۰.۸۸۹۵۵۳۱۷
۶۲	۱۶۵	۲۲۴	۴.۰۸	۷۹.۶	۲.۱	۴۰.۳	۰.۹۴۳۳۳۳	۰.۸۸۹۵۵۳۱۷
۶۳	۱۶۵	۲۲۴	۴.۰۸	۷۹.۶	۲.۱	۴۰.۳	۱.۰۷۳۳۳۳	۰.۸۸۹۵۵۳۱۷
۶۴	۲۰۳	۲۲۴	۴.۰۸	۷۹.۶	۲.۵۶	۴۰.۳	۱.۰۸۵	۰.۸۸۹۲۲۲۸۸۷
۶۵	۲۰۳	۲۲۴	۴.۰۸	۷۹.۶	۲.۵۶	۴۰.۳	۱.۰۲۶۶۶۷	۰.۸۸۹۲۲۲۸۸۷
۶۶	۲۰۳	۲۲۴	۴.۰۸	۷۹.۶	۲.۵۶	۴۰.۳	۱.۰۱۳۳۳۳	۰.۸۸۹۲۲۲۸۸۷
۶۷	۲۰۰	۲۲۵	۲.۶۷	۴۰.۵	۰.۲۵	۱۴۵	۱.۲۴	۱.۰۰۳۵۵۳۰۴۸
۶۸	۲۰۰	۲۲۵	۲.۶۷	۴۹	۰.۵	۱۴۵	۱.۲۱۶۶۶۷	۱.۰۰۹۲۳۷۳۹۷
۶۹	۲۰۰	۲۲۵	۲.۶۷	۴۰.۵	۰.۶۳	۱۴۵	۱.۲۲۵	۰.۹۵۳۱۲۴۰۰۸
۷۰	۲۰۰	۲۲۵	۲.۶۷	۴۰.۵	۰.۸۸	۱۴۵	۱.۰۰۵	۰.۹۶۱۴۳۳۳۴
۷۱	۲۰۰	۲۲۵	۳.۵۶	۴۰.۵	۰.۵	۱۴۵	۱.۳۱	۱.۱۶۸۴۵۱۳۱۷
۷۲	۲۰۰	۲۲۵	۴.۲	۴۰.۵	۰.۵	۱۴۵	۱.۰۷۵	۰.۹۰۲۰۳۴۴۰۱
۷۳	۱۵۰	۱۷۱	۳.۹	۲۸.۹	۰.۴۵	۳۸	۱.۲۰۱۶۶۷	۱.۰۱۳۶۳۵۲۸
۷۴	۱۵۰	۲۱۸	۳.۱	۲۸.۹	۰.۷۱	۳۲	۱.۲۵۳۳۳۳	۱.۰۸۳۹۱۶۱۸۳
۷۵	۱۵۰	۲۶۸	۲.۵	۲۸.۹	۰.۸۶	۳۲	۱.۴۰۶۶۶۷	۱.۱۳۶۰۸۳۵۵۶
۷۶	۱۵۰	۱۶۸	۴	۵۰.۱۵	۱.۳۹	۳۲	۱.۰۶۸۳۳۳	۰.۹۳۳۶۰۲۵۲۸
۷۷	۱۵۰	۲۱۸	۳.۱	۵۰.۱۵	۱.۰۶	۳۲	۱.۴۲۱۶۶۷	۱.۰۵۱۲۸۷۶۷۲
۷۸	۱۵۰	۲۶۸	۲.۵	۵۰.۱۵	۱.۱۵	۳۲	۱.۲۵۵	۱.۰۶۳۹۲۵۳۵۳

۷۹	۱۵۰	۲۲۳	۳.۳	۵۰.۴	۱.۲۸	۴۵	۱.۱۳	۰.۹۸۴۹۱۸۱۱۹
۸۰	۱۱۴	۲۹۴	۳.۱۱	۵۹.۷	۰.۵۹	۴۰.۸	۰.۸۰۸۳۳۳	۰.۷۳۲۵۴۱۷۱۹
۸۱	۱۱۴	۲۹۴	۳.۱۱	۳۲.۱	۰.۵۹	۴۰.۸	۱.۲۸	۱.۰۲۵۷۱۶۷۹۴
۸۲	۱۱۴	۲۹۴	۳.۱۱	۳۲.۱	۰.۵۹	۴۰.۸	۱.۲	۱.۰۲۵۷۱۶۷۹۴
۸۳	۲۲۹	۱۴۷	۳.۱۱	۵۹.۷	۰.۵۹	۴۰.۸	۱.۴۳۳۳۳۳	۱.۱۷۰۱۰۲۷۳۳
۸۴	۲۲۹	۱۴۷	۳.۱۱	۳۲.۱	۰.۵۹	۴۰.۸	۲.۲۹۶۶۶۷	۱.۵۰۴۹۷۵۲۰۲
۸۵	۲۲۹	۱۴۷	۳.۱۱	۳۲.۱	۰.۵۹	۴۰.۸	۱.۶۴۱۶۶۷	۱.۵۰۴۹۷۵۲۰۲
۸۶	۲۵۰	۳۰۵	۲.۵	۳۹.۸	۰.۸۶	۴۶.۵	۱.۳۸۸۳۳۳	۱.۰۹۷۲۱۴۴۳
۸۷	۲۵۰	۳۰۵	۳.۵	۳۹.۸	۰.۸۶	۴۶.۵	۱	۰.۸۹۳۲۷۳۲۰۳
۸۸	۲۵۰	۳۱۰	۲.۵	۳۴.۵	۰.۴۲	۱۴۵.۲	۱.۲۰۶۶۶۷	۱.۰۰۸۳۳۳۴۶۴
۸۹	۲۵۰	۳۱۰	۳.۵	۳۴.۵	۰.۴۲	۱۴۵.۲	۱.۱۰۶۶۶۷	۰.۹۳۴۴۷۱۶۹۵
۹۰	۲۵۰	۴۴۰	۲.۵	۴۴.۷	۰.۹	۴۶.۷	۱.۲۱۵	۱.۱۲۱۸۲۹۲۲۶
ردیف نمونه ها	عرض (mm) b	عمق تقویت کششی d (mm)	نسبت برش و عمق آگهی	مقاومت فشاری بتن f <sub>c</sub> (MPa)	نسبت تقویت f <sub>c</sub> (MPa)	مدول الاستیسیته FRP ρ(GPa)	خروجی ۲ (ANFIS): مقاومت برشی VI	خروجی ۲ (ANN): مقاومت برشی
۹۱	۳۰۰	۵۸۴	۲.۵	۳۷.۱	۰.۹۱	۴۶.۲	۱.۱۷۱۶۶۷	۰.۹۴۵۹۹۶۸۴۳
۹۲	۲۵۰	۴۴۲	۲.۵	۷۴.۲	۱.۲۵	۴۸.۲	۱.۳۸۳۳۳۳	۱.۱۲۴۰۵۴۲۹۲
۹۳	۳۰۰	۵۷۸	۲.۵	۷۴.۲	۱.۳۷	۴۸.۲	۱.۲۱۱۶۶۷	۱.۰۴۵۹۸۷۵۹
۹۴	۲۵۰	۴۶۰	۲.۵	۴۲.۴	۰.۴۵	۱۴۴.۴	۰.۹۰۳۳۳۳	۰.۸۲۹۲۱۵۶۳۲
۹۵	۳۰۰	۵۹۴	۲.۵	۳۷	۰.۴۳	۱۴۶.۵	۰.۹۹۵	۰.۸۵۲۵۹۶۲۱۱
۹۶	۲۵۰	۲۹۶	۲.۵	۳۹.۸	۱.۴۳	۴۶.۳	۱.۳۱۵	۱.۲۰۲۷۶۶۰۱
۹۷	۲۵۰	۲۹۶	۲.۵	۴۲.۴	۱.۴۳	۴۶.۳	۱.۳۹	۱.۲۰۱۵۱۴۴۱
۹۸	۲۵۰	۴۵۵	۲.۵	۳۷.۱	۰.۳۵	۴۶.۵	۱.۴۸۶۶۶۷	۱.۲۳۱۷۶۱۴۰۵
۹۹	۲۵۰	۴۳۴	۲.۵	۳۷.۱	۱.۴۷	۴۶.۳	۱.۳۷۵	۱.۰۹۱۸۴۲۹۸۱
۱۰۰	۲۵۰	۳۱۰	۲.۵	۴۲.۴	۰.۱۸	۱۴۴.۴	۱.۳۲۱۶۶۷	۱.۰۷۵۵۸۹۵۶۸
۱۰۱	۲۵۰	۳۱۰	۲.۵	۳۴.۵	۰.۶۷	۱۴۳.۳	۱.۱۸۵	۰.۹۹۰۱۳۳۱۱۸
۱۰۲	۲۵۰	۴۶۰	۲.۵	۴۲.۴	۰.۲۲	۱۴۵.۵	۱.۰۶۱۶۶۷	۰.۹۰۲۵۹۰۶۶۸
۱۰۳	۲۵۰	۴۳۹	۲.۵	۴۲.۴	۰.۶۵	۱۴۴.۶	۰.۹۳۶۶۶۷	۰.۸۱۵۲۷۴۲۰۱
۱۰۴	۲۵۰	۲۹۱	۲.۵	۶۵.۳	۰.۸۹	۴۶.۲	۱.۵۰۵	۱.۱۹۴۶۶۵۳۷۸
۱۰۵	۲۵۰	۲۹۱	۲.۵	۸۸.۳	۰.۸۹	۴۶.۲	۱.۴۵۵	۱.۱۷۸۴۹۸۸۸۱
۱۰۶	۲۵۰	۳۱۰	۲.۵	۶۵.۳	۰.۴۲	۱۴۵.۶	۱.۰۷۸۳۳۳	۰.۸۹۸۹۹۲۳۱۸
۱۰۷	۲۵۰	۳۱۰	۲.۵	۸۸.۳	۰.۴۲	۱۴۵.۶	۱.۰۷۵	۰.۹۱۶۳۷۵۶۴۸
۱۰۸	۴۵۰	۴۳۸	۳.۴۸	۳۵	۰.۵۵	۳۷	۱.۰۶۱۶۶۷	۰.۹۲۷۳۲۷۱۴۶
۱۰۹	۴۵۰	۱۹۴	۳.۹۳	۳۵	۰.۶۶	۳۷	۱.۳۰۱۶۶۷	۱.۰۵۶۸۸۵۱۰۵
۱۱۰	۴۵۰	۴۰۵	۳.۷۷	۳۵	۲.۳۶	۳۷	۱.۱۹	۰.۹۸۵۶۸۲۹۸۵
۱۱۱	۴۵۰	۱۸۸	۴.۰۵	۳۵	۲.۵۴	۳۷	۱.۲۲۵	۱.۰۱۱۳۴۰۷۸
۱۱۲	۲۵۰	۲۹۱	۲.۵	۶۵.۳	۰.۸۷	۴۶.۳	۱.۵۱۳۳۳۳	۱.۱۹۹۷۹۳۴۶۱
۱۱۳	۲۵۰	۴۴۲	۲.۵	۷۴.۲	۱.۲۵	۴۸.۲	۱.۳۸۳۳۳۳	۱.۱۲۴۰۵۴۲۹۲

۱۱۴	۳۰۰	۵۷۸	۲.۵	۷۴.۲	۱.۳۷	۴۸.۲	۱.۲۱۱۶۶۷	۱.۰۳۶۵۹۸۷۵۹
۱۱۵	۲۵۰	۳۱۰	۲.۵	۶۵.۲	۰.۴۲	۱۳۶	۱.۱۰۵	۰.۹۳۲۴۰۳۰۷۹
۱۱۶	۲۵۰	۴۴۹	۲.۵	۷۴.۲	۰.۶۹	۱۴۴	۰.۹۲	۰.۷۹۹۹۹۴۲۵۴
۱۱۷	۳۰۰	۵۹۴	۲.۵	۷۴.۲	۰.۶۵	۱۴۴	۰.۹۰۶۶۶۷	۰.۷۹۴۵۳۵۸۸۸
۱۱۸	۲۰۰	۲۱۵.۵	۲	۳۰	۰.۳۳	۱۴۶.۲	۱.۷۷۱۶۶۷	۱.۳۶۹۱۵۹۲۴۵
۱۱۹	۱۵۰	۲۱۵.۵	۲	۳۰	۰.۴۴	۱۴۶.۲	۱.۹۶۵	۱.۴۸۸۰۹۵۹۸۹
۱۲۰	۱۵۰	۲۱۵.۵	۲	۳۰	۰.۴۴	۱۴۶.۲	۱.۹۲۶۶۶۷	۱.۴۸۸۰۹۵۹۸۹
ردیف نمونه ها	عرض b (mm)	عمق تقویت کششی d (mm)	نسبت برش و عمق آگهی	مقاومت فشاری بتن $f_c$ (MPa)	نسبت تقویت $f_c$ (MPa)	مدول الاستیسیته FRP $\rho$ (GPa)	خروجی ۲ (ANFIS): مقاومت برشی VI	خروجی ۲ (ANN): مقاومت برشی
۱۲۱	۱۵۰	۲۱۳.۵	۲	۳۰	۰.۷۹	۱۴۷.۹	۲.۱۳۸۳۳۳	۱.۶۱۰۵۷۸۹۳۲
۱۲۲	۲۰۰	۲۱۵.۵	۲.۵	۳۰	۰.۳۳	۱۴۶.۲	۱.۲۵	۱.۰۲۹۸۱۹۲۶
۱۲۳	۱۵۰	۲۱۵.۵	۲.۵	۳۰	۰.۴۴	۱۴۶.۲	۱.۱۹۸۳۳۳	۰.۹۱۳۸۵۵۰۶۵
۱۲۴	۱۵۰	۲۱۵.۵	۲.۵	۳۰	۰.۴۴	۱۴۶.۲	۰.۹۶	۰.۹۱۳۸۵۵۰۶۵
۱۲۵	۱۵۰	۲۱۳.۵	۲.۵	۳۰	۰.۷۹	۱۴۷.۹	۱	۱.۱۹۲۹۰۲۲۴
۱۲۶	۱۵۰	۲۱۳.۵	۲.۵	۳۰	۰.۷۹	۱۴۷.۹	۰.۹۱۱۶۶۷	۱.۱۹۲۹۰۲۲۴
۱۲۷	۲۰۰	۲۱۵.۵	۳.۵	۳۰	۰.۳۳	۱۴۶.۲	۰.۹۰۶۶۶۷	۱.۴۵۴۸۳۳۴۶۵
۱۲۸	۲۰۰	۲۱۵.۵	۳.۵	۳۰	۰.۳۳	۱۴۶.۲	۱.۱۸۱۶۶۷	۱.۴۵۴۸۳۳۴۶۵
۱۲۹	۱۵۰	۲۱۵.۵	۳.۵	۳۰	۰.۴۴	۱۴۶.۲	۱.۰۱۱۶۶۷	۱.۴۸۱۵۶۷۵۴۸
۱۳۰	۱۵۰	۲۱۵.۵	۳.۵	۳۰	۰.۴۴	۱۴۶.۲	۱.۳۴	۱.۴۸۱۵۶۷۵۴۸
۱۳۱	۱۵۰	۲۱۳.۵	۳.۵	۳۰	۰.۷۹	۱۴۷.۹	۱.۱۷۸۳۳۳	۱.۳۹۷۰۹۰۷۴۳
۱۳۲	۱۵۰	۲۱۳.۵	۳.۵	۳۰	۰.۷۹	۱۴۷.۹	۱.۰۱۶۶۶۷	۱.۳۹۷۰۹۰۷۴۳
۱۳۳	۲۰۰	۲۱۵.۵	۴.۵	۳۰	۰.۳۳	۱۴۶.۲	۰.۹۳۶۶۶۷	۰.۹۷۸۵۹۴۸۷۳
۱۳۴	۲۰۰	۲۱۵.۵	۴.۵	۳۰	۰.۳۳	۱۴۶.۲	۰.۹۶۱۶۶۷	۰.۹۷۸۵۹۴۸۷۳
۱۳۵	۱۵۰	۲۱۵.۵	۴.۵	۳۰	۰.۴۴	۱۴۶.۲	۱.۱۴۳۳۳۳	۱.۰۳۷۷۶۲۴۴۷
۱۳۶	۱۵۰	۲۱۵.۵	۴.۵	۳۰	۰.۴۴	۱۴۶.۲	۱.۰۱۶۶۶۷	۱.۰۳۷۷۶۲۴۴۷
۱۳۷	۱۵۰	۲۱۳.۵	۴.۵	۳۰	۰.۷۹	۱۴۷.۹	۱.۰۳۱۶۶۷	۱.۰۴۰۱۵۳۳
۱۳۸	۱۵۰	۲۱۳.۵	۴.۵	۳۰	۰.۷۹	۱۴۷.۹	۱.۰۶۶۶۶۷	۱.۰۴۰۱۵۳۳
۱۳۹	۲۰۰	۲۱۵.۵	۲	۳۰	۰.۳۳	۴۸.۲	۲.۸۳۵	۲.۳۴۶۰۴۲۰۲۲
۱۴۰	۱۵۰	۲۱۵.۵	۲	۳۰	۰.۴۴	۴۸.۲	۲.۸۳	۲.۳۴۶۶۲۱۶۲۳
۱۴۱	۱۵۰	۲۱۵.۵	۲	۳۰	۰.۴۴	۴۸.۲	۳.۱۳۳۳۳۳	۲.۳۴۶۶۲۱۶۲۳
۱۴۲	۱۵۰	۲۱۳.۵	۲	۳۰	۰.۷۹	۴۹.۱	۲.۴۶۸۳۳۳	۲.۳۴۶۳۵۵۹۷۲
۱۴۳	۲۰۰	۲۱۵.۵	۲.۵	۳۰	۰.۳۳	۴۸.۲	۱.۳۹۸۳۳۳	۲.۱۲۰۲۱۵۰۹۱
۱۴۴	۱۵۰	۲۱۵.۵	۲.۵	۳۰	۰.۴۴	۴۸.۲	۱.۶۶	۱.۹۸۴۳۷۱۱۷۳
۱۴۵	۱۵۰	۲۱۵.۵	۲.۵	۳۰	۰.۴۴	۴۸.۲	۱.۶۱۳۳۳۳	۱.۹۸۴۳۷۱۱۷۳
۱۴۶	۱۵۰	۲۱۳.۵	۲.۵	۳۰	۰.۷۹	۴۹.۱	۱.۴۸	۲.۲۱۴۸۳۴۹۰۹
۱۴۷	۱۵۰	۲۱۳.۵	۲.۵	۳۰	۰.۷۹	۴۹.۱	۱.۶۱	۲.۲۱۴۸۳۴۹۰۹

۱۴۸	۲۰۰	۲۱۵.۵	۳.۵	۳۰	-۰.۳۳	۴۸.۲	۱.۴۱۶۶۶۷	۱.۳۶۵۵۰۲۵۰۴
۱۴۹	۲۰۰	۲۱۵.۵	۳.۵	۳۰	-۰.۳۳	۴۸.۲	۱.۵۷۸۳۳۳	۱.۳۶۵۵۰۲۵۰۴
۱۵۰	۱۵۰	۲۱۵.۵	۳.۵	۳۰	-۰.۴۴	۴۸.۲	۱.۳۸۳۳۳۳	۱.۳۰۵۸۵۱۹۳
ردیف نمونه ها	عرض (mm) b	عمق تقویت کششی d (mm)	نسبت برش و عمق آگهی	مقاومت فشاری بتن $f_c$ (MPa)	نسبت تقویت $f_c$ (MPa)	مدول الاستیسیته FRP $\rho_f$ (GPa)	خروجی ۲ (ANFIS): مقاومت برشی VI	خروجی ۲ (ANN): مقاومت برشی
۱۵۱	۱۵۰	۲۱۵.۵	۳.۵	۳۰	-۰.۴۴	۴۸.۲	۱.۴۶	۱.۳۰۵۸۵۱۹۳
۱۵۲	۱۵۰	۲۱۳.۵	۳.۵	۳۰	-۰.۷۹	۴۹.۱	۱.۰۳۶۶۶۷	۱.۳۲۹۸۳۲۹۱
۱۵۳	۱۵۰	۲۱۳.۵	۳.۵	۳۰	-۰.۷۹	۴۹.۱	۱.۱۶۳۳۳۳	۱.۳۲۹۸۳۲۹۱
۱۵۴	۲۰۰	۲۱۵.۵	۴.۵	۳۰	-۰.۳۳	۴۸.۲	۱.۰۴۳۳۳۳	۱.۵۸۴۲۰۵۱۷۶
۱۵۵	۲۰۰	۲۱۵.۵	۴.۵	۳۰	-۰.۳۳	۴۸.۲	۱.۱۶۱۶۶۷	۱.۵۸۴۲۰۵۱۷۶
۱۵۶	۱۵۰	۲۱۵.۵	۴.۵	۳۰	-۰.۴۴	۴۸.۲	۱.۲۱	۱.۴۳۱۵۲۸۶۸۶
۱۵۷	۱۵۰	۲۱۵.۵	۴.۵	۳۰	-۰.۴۴	۴۸.۲	۱.۱۱	۱.۴۳۱۵۲۸۶۸۶
۱۵۸	۱۵۰	۲۱۳.۵	۴.۵	۳۰	-۰.۷۹	۴۹.۱	۱.۱۲۳۳۳۳	۱.۵۲۴۶۵۱۲۰۲
۱۵۹	۱۵۰	۲۱۳.۵	۴.۵	۳۰	-۰.۷۹	۴۹.۱	۱.۲۲۵	۱.۵۲۴۶۵۱۲۰۲
۱۶۰	۲۰۰	۲۱۵.۵	۳	۳۳.۶	-۰.۳۳	۱۴۶.۲	۰.۹	۱.۳۱۶۸۱۶۰۴۳
۱۶۱	۱۵۰	۲۱۵.۵	۳	۳۳.۶	-۰.۴۴	۱۴۶.۲	-۰.۷۵	۱.۳۹۱۴۳۹۶۳۶
۱۶۲	۱۵۰	۲۱۵.۵	۳	۳۳.۶	-۰.۴۴	۱۴۶.۲	-۰.۸۷	۱.۳۹۱۴۳۹۶۳۶
۱۶۳	۲۰۰	۲۱۵.۵	۳	۴۰.۳	-۰.۳۳	۱۴۶.۲	۰.۷۹۶۶۶۷	۱.۳۸۶۲۳۳۳۳
۱۶۴	۲۰۰	۲۱۵.۵	۳	۴۰.۳	-۰.۳۳	۱۴۶.۲	۰.۷۱۸۳۳۳	۱.۳۸۶۲۳۳۳۳
۱۶۵	۱۵۰	۲۱۵.۵	۳	۴۰.۳	-۰.۴۴	۱۴۶.۲	۰.۸۲۶۶۶۷	۱.۵۲۹۶۹۸۵۵۸
۱۶۶	۱۵۰	۲۱۵.۵	۳	۴۰.۳	-۰.۴۴	۱۴۶.۲	۰.۸۵۸۳۳۳	۱.۵۲۹۶۹۸۵۵۸
۱۶۷	۱۵۰	۲۱۳.۵	۳	۴۰.۳	-۰.۴۴	۱۴۷.۹	۱.۰۴	۱.۵۹۰۹۶۷۱۸۴
۱۶۸	۱۵۰	۲۱۳.۵	۳	۴۰.۳	-۰.۴۴	۱۴۷.۹	۱.۰۶۱۶۶۷	۱.۵۹۰۹۶۷۱۸۴
۱۶۹	۲۰۰	۲۱۵.۵	۳	۳۳.۶	-۰.۳۳	۴۱	۱.۲۰۳۳۳۳	۱.۵۸۸۰۲۰۸۸
۱۷۰	۱۵۰	۲۱۵.۵	۳	۳۳.۶	-۰.۴۴	۴۱	۱.۱۵۸۳۳۳	۱.۵۵۱۷۲۳۳۸۵
۱۷۱	۱۵۰	۲۱۵.۵	۳	۳۳.۶	-۰.۴۴	۴۱	۱.۴۸۵	۱.۵۵۱۷۲۳۳۸۵
۱۷۲	۲۰۰	۲۱۵.۵	۳	۴۰.۳	-۰.۳۳	۴۱	۱.۲۶۳۳۳۳	۱.۶۱۱۳۴۹۸۰۹
۱۷۳	۲۰۰	۲۱۵.۵	۳	۴۰.۳	-۰.۳۳	۴۱	۰.۹۵۳۳۳۳	۱.۶۱۱۳۴۹۸۰۹
۱۷۴	۱۵۰	۲۱۵.۵	۳	۴۰.۳	-۰.۴۴	۴۱	۱.۴۵۶۶۶۷	۱.۶۱۳۴۷۵۰۱۲
۱۷۵	۱۵۰	۲۱۵.۵	۳	۴۰.۳	-۰.۴۴	۴۱	۱.۱۹۵	۱.۶۱۳۴۷۵۰۱۲
۱۷۶	۱۵۰	۲۱۳.۵	۳	۴۰.۳	-۰.۴۴	۴۰	۱.۳۶۶۶۶۷	۱.۶۲۳۹۵۶۱۲۵
۱۷۷	۱۵۰	۲۱۳.۵	۳	۴۰.۳	-۰.۴۴	۴۰	۱.۵۳۸۳۳	۱.۶۲۳۹۵۶۱۲۵

## ۳- نتایج

با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق، روش پیشنهادی برای تعیین، ارزیابی و پیشبرد تیرهای بتن مسلح با میلگردهای FRP قابلیت توسعه و یکپارچه سازی بیش تر را دارد. به دلیل پیچیدگی مکانیسم برشی در تیرهای بتنی و تأثیرگذاری پارامترهای متنوع، ارائه یک مدل جامع و دقیق برای برآورد مقاومت برشی همچنان چالش برانگیز است. در حال حاضر، مقادیر دقیق مقاومت برشی در دسترس نیست و آیین نامه هایی مانند آیین نامه بتن آمریکا (ACI) و آیین نامه بتن ایران (آبا) نیز از فرمول های تجربی خاصی استفاده می کنند که بر پایه مجموعه ای از داده های محدود طراحی شده اند. با این حال، استفاده از مدل های شبکه عصبی مصنوعی، با بهره گیری از داده های آزمایشگاهی، دقت بیش تری در برآورد مقاومت برشی از خود نشان داده است [۱۷].

مقادیر نزدیک به عدد یک به معنای عملکرد بهتر شبکه است و مقادیر رگرسیون، همبستگی بین خروجی ها و هدرها را در شبکه ها اندازه گیری می کنند. مقدار رگرسیون در بازه صفر تا یک متغیر است و  $R=1$  به معنی ارتباط کامل بوده و  $R=0$  نشان می دهند که هیچ رابطه ای وجود ندارد. پس از بررسی نهایی شبکه در لایه پنهان با تعداد ۱۵ نرون به عنوان شبکه مناسب انتخاب شد. همان طور که از نتایج مشخص است، ضریب همبستگی رگرسیون تست  $0/96253$ ، مجموعه تمامی داده ها  $0/96124$  می باشد. دقت شبکه در مدل کردن مجموعه های آموزش، تست و کل داده ها نزدیک به هم می باشد و همچنین ضریب همبستگی به بالای  $95/0$  رسیده است که این امر قابلیت مناسب در مدل سازی و آموزش صحیح شبکه عصبی پیشنهادی را بیان می کند. خلاصه عملکرد بهینه شبکه عصبی آموزش شده در جدول شماره ۳ ارائه شده است.

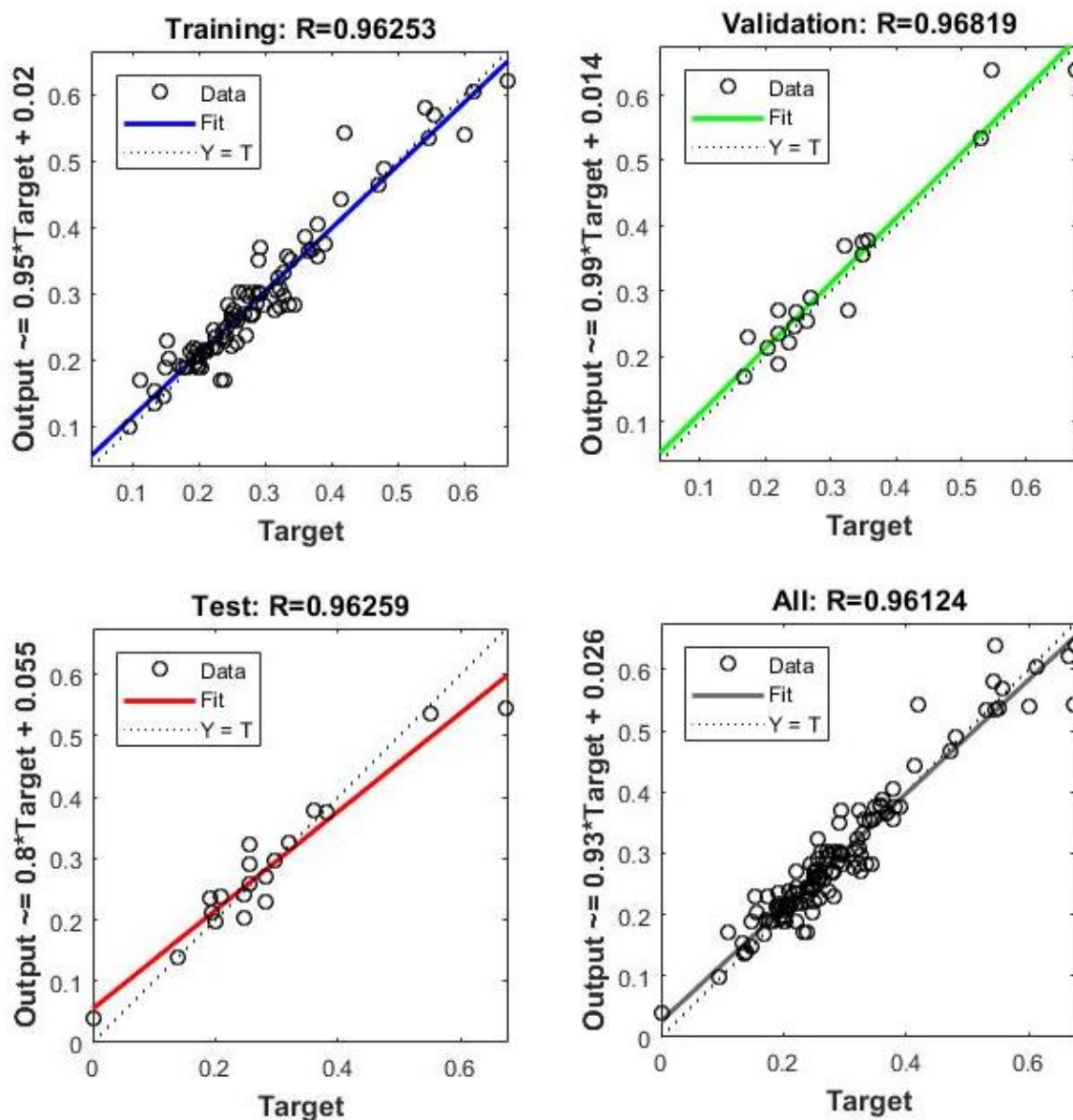
جدول ۳: خلاصه عملکرد بهینه شبکه عصبی آموزش شده (دقت پیش بینی مدل - R)

اعتبار سنجی (Validation)	مجموعه تمامی داده ها (ALL)	مجموعه داده ای ارزیابی (Training)	مجموعه داده ای آموزش (Test)
0/96819	0/96124	0/96253	0/96259

شکل شماره ۳، نمودارهای رگرسیون ارائه شده عملکرد شبکه عصبی مصنوعی را در پیش بینی مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح با میلگردهای FRP برای مجموعه های مختلف داده ها شامل آموزش، اعتبارسنجی، آزمایش و کل داده ها نشان می دهد. این نمودارها ارتباط بین خروجی پیش بینی شده توسط شبکه و مقادیر واقعی (هدف) را ارزیابی می کنند. ضرایب رگرسیون R که معیاری برای اندازه گیری همبستگی بین خروجی مدل و مقادیر واقعی هستند، در تمامی مراحل به مقادیری نزدیک به ۱ رسیده اند که بیانگر دقت و کارایی بالای شبکه می باشد.

در مرحله آموزش، ضریب رگرسیون  $R=0/96253$  نشان دهنده توانایی شبکه در یادگیری الگوها و روابط موجود در داده های آموزشی است. در مرحله اعتبارسنجی، ضریب رگرسیون  $R=0/96819$  دقت بالای مدل را در پیش بینی داده های جدید و تعمیم پذیری مناسب آن تأیید می کند. همچنین، در مرحله آزمایش، مقدار  $R=0/96259$  بیانگر عملکرد مطلوب شبکه در پیش بینی مقادیر خارج از داده های آموزشی است. در نهایت، برای تمامی داده ها، مقدار  $R=0/96124$  نشان می دهد که شبکه به صورت کلی عملکردی یکنواخت و دقیق در تمامی مراحل داشته است.

نتایج حاکی از آن است که شبکه عصبی توانسته است با دقتی بالا و ضرایب رگرسیون نزدیک به یک، ارتباط بین پارامترهای ورودی و مقاومت برشی تیرهای بتنی را مدل سازی کند. این عملکرد دقیق، قابلیت اعتماد به مدل را در پیش بینی مقادیر جدید و استفاده از آن به عنوان ابزاری نوین و موثر برای مسائل مهندسی سازه تأیید می کند.



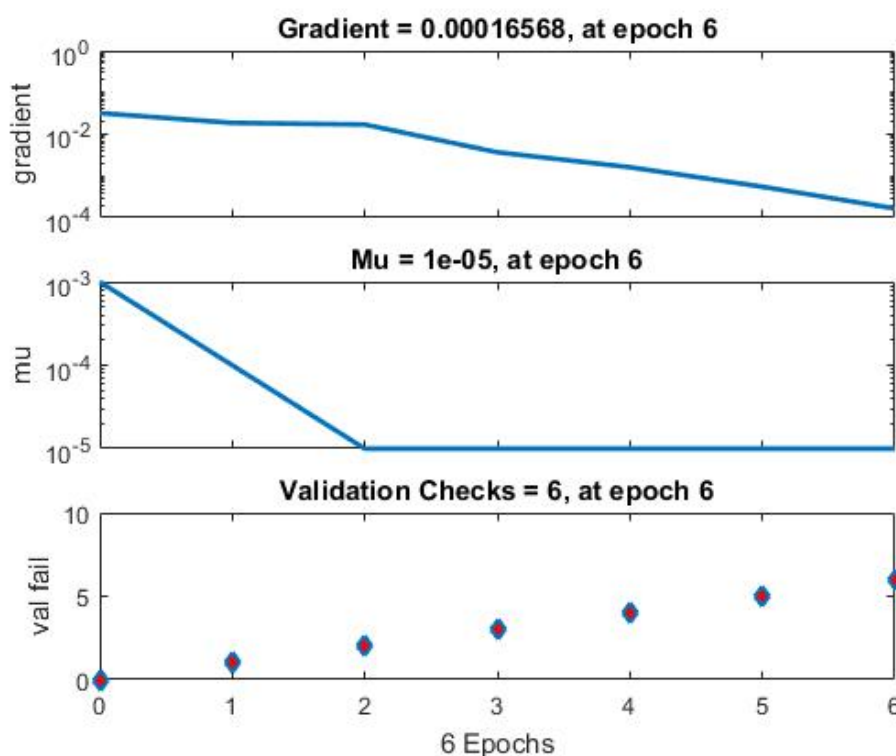
شکل ۳: نمودار رگرسیون شبکه پس از آموزش

نمودار شکل شماره ۴ فرآیند یادگیری شبکه عصبی آموزش داده شده با ۱۵ نرون در لایه پنهان را در طول شش دوره<sup>۲</sup> نمایش می دهد و شامل سه بخش است که تغییرات گرادیان، پارامتر  $M_{II}$  و اعتبارسنجی را نشان می دهد. بخش اول این نمودار، روند کاهش گرادیان را نمایش می دهد. مقدار گرادیان که نمایانگر نرخ تغییر تابع خطا است، به مرور کاهش یافته و در پایان به مقدار  $0.000165680$  رسیده است. این کاهش تدریجی بیانگر عملکرد موفق الگوریتم پس انتشار خطا در کمینه کردن تابع خطا و بهبود وزن های شبکه است. در بخش دوم، نمودار کاهش مقدار پارامتر  $M_{II}$  دیده می شود. این مقدار از  $10^{-3}$  شروع شده و به تدریج به  $10^{-5}$  کاهش یافته است. کاهش مقدار  $M_{II}$  بیانگر انتقال الگوریتم از جستجوی کلی به سمت تنظیمات دقیق تر است، که این فرآیند نقش کلیدی در همگرایی شبکه به حالت بهینه دارد. بخش سوم، نمودار اعتبارسنجی را نمایش می دهد که تعداد دفعات شکست در اعتبارسنجی را در هر دوره نشان می دهد. تعداد اعتبارسنجی های ناموفق در طول فرآیند آموزش ثابت مانده و در پایان به مقدار ۶ رسیده است. این رفتار نشان دهنده پایداری مدل و عدم وقوع بیش برزش<sup>۳</sup>

<sup>2</sup> Epoch

<sup>3</sup> Overfitting

است. در مجموع، این نمودارها نشان می‌دهند که شبکه عصبی با موفقیت توانسته است فرآیند یادگیری را تکمیل کرده و به تنظیمات بهینه وزنی برای پیش‌بینی مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح با میلگردهای FRP دست یابد، که این امر اعتبار و دقت مدل را تأیید می‌کند.

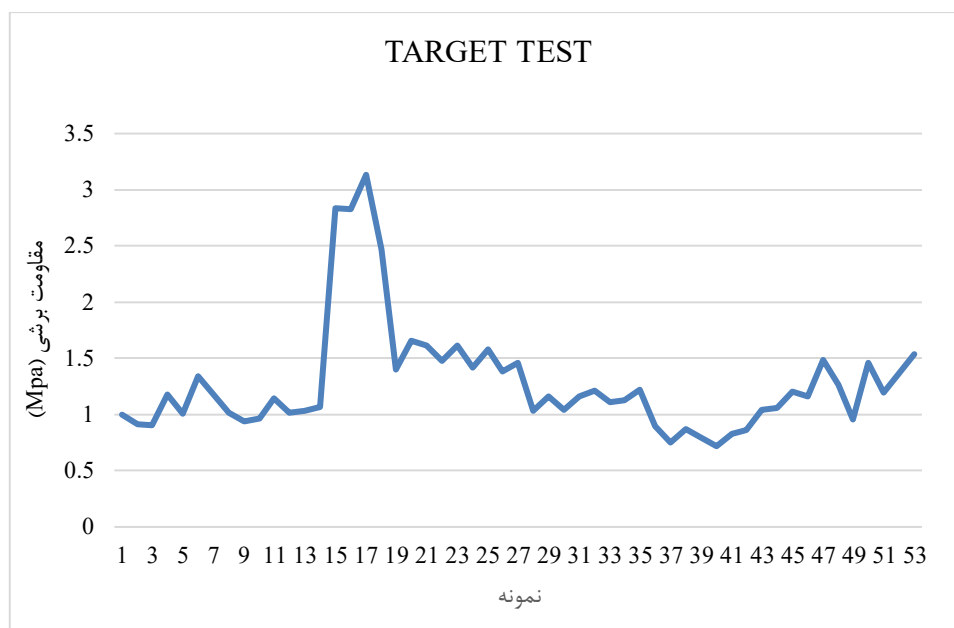


شکل ۴: نمودار نحوه یادگیری شبکه آموزش داده‌شده با تعداد ۱۵ نرون در لایه پنهان

نمودار شکل شماره ۵ تغییرات مقادیر پیش‌بینی شده مقاومت برشی توسط مدل شبکه عصبی فازی (ANFIS) را برای نمونه‌های مختلف سازه‌های بتنی تقویت شده با الیاف FRP نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر پیش‌بینی شده دارای نوسانات قابل توجهی بوده و در برخی نقاط، اختلاف قابل توجهی با مقادیر واقعی وجود دارد. این نوسانات نشان‌دهنده پیچیدگی مسئله پیش‌بینی مقاومت برشی و تأثیر عوامل مختلف بر آن است.

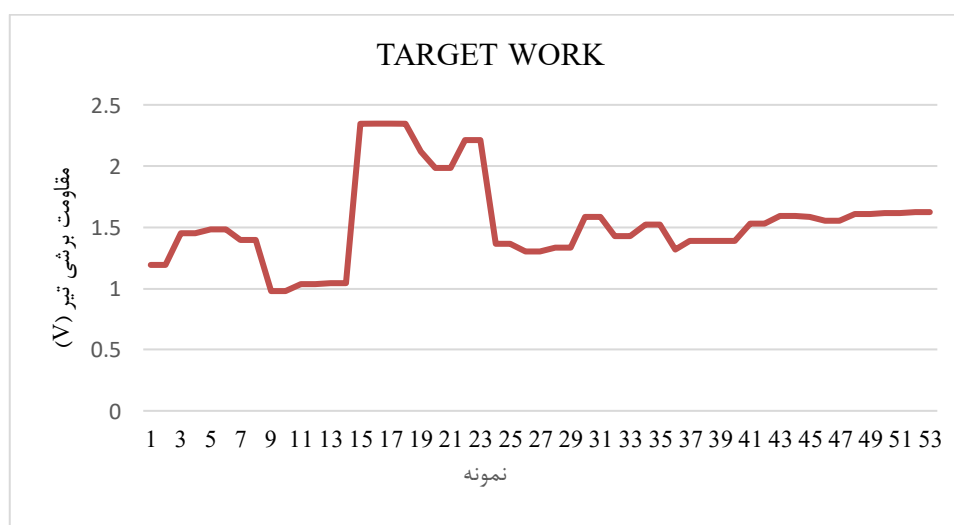
وجود یک پیک بزرگ در حدود نمونه ۱۷ نشان‌دهنده خطای قابل توجه مدل در پیش‌بینی مقاومت برشی این نمونه خاص است. این امر می‌تواند ناشی از نویز در داده‌ها، عدم پوشش کافی فضای داده‌ها توسط مدل یا پیچیدگی بیش از حد مدل باشد. با این حال، میانگین کلی پیش‌بینی‌ها نشان‌دهنده توانایی مدل در یادگیری الگوی کلی رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌ها است.

نتایج حاصل از این مدل نشان می‌دهد که شبکه‌های عصبی فازی می‌توانند ابزار مناسبی برای پیش‌بینی مقاومت برشی سازه‌های بتنی تقویت شده با الیاف FRP باشند. با این حال، برای بهبود دقت پیش‌بینی‌ها، لازم است به عوامل مختلفی از جمله کیفیت داده‌های آموزشی، ساختار مدل و پیچیدگی مسئله توجه شود.



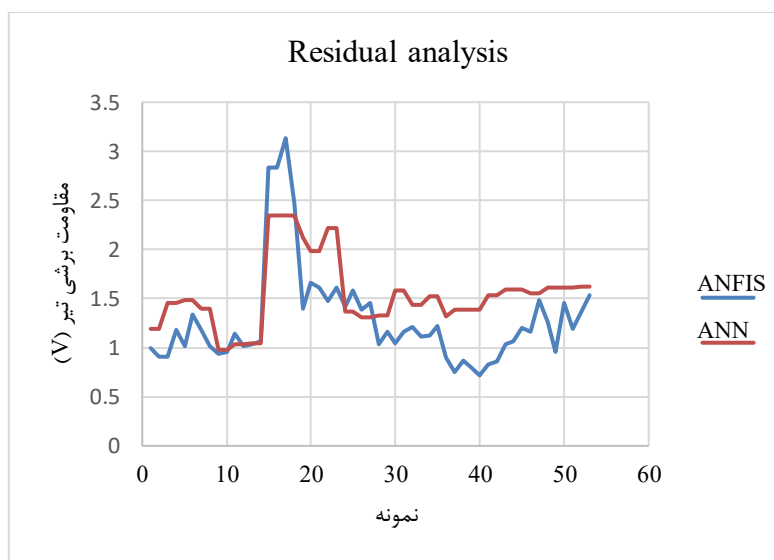
شکل ۵: نمودار مقادیر پیش بینی شده توسط سیستم ANFIS (مقادیر اولیه)

شکل شماره ۶ نمودار ارائه شده، نتایج حاصل از یک مدل پیش بینی مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network - ANN) را نشان می‌دهد. در این نمودار، محور افقی نشان‌دهنده نمونه‌های مختلف یا داده‌های ورودی به مدل است و محور عمودی نیز مقادیر پیش بینی شده مقاومت برشی تیرها توسط شبکه عصبی را بر حسب یک واحد مشخص (که در نمودار ذکر نشده است) نمایش می‌دهد. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، مقادیر پیش بینی شده دارای نوسانات قابل توجهی است. این نوسانات نشان‌دهنده این است که مدل ANN در پیش بینی دقیق مقاومت برشی همه نمونه‌ها موفق نبوده است. برخی از پیش‌بینی‌ها با مقدار واقعی بسیار نزدیک هستند (نقطه‌های نزدیک به خط وسط نمودار) و برخی دیگر دارای خطای قابل توجهی هستند (نقطه‌های دور از خط وسط نمودار). با توجه به شکل کلی نمودار، می‌توان گفت که میانگین کلی پیش‌بینی‌ها در محدوده خاصی قرار دارد. این نشان می‌دهد که مدل قادر به یادگیری یک الگوی کلی از رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌ها بوده است.



شکل ۶: نمودار مقادیر پیش بینی شده توسط سیستم ANN

نمودار شکل شماره ۷، مقایسه‌ای بین عملکرد دو مدل پیش‌بینی قدرتمند، یعنی شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی (ANFIS) در پیش‌بینی مقاومت برشی تیرها را ارائه می‌دهد. هر دو مدل به عنوان ابزارهای کارآمد در مهندسی عمران برای پیش‌بینی خواص مصالح و اجزای سازه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، هر دو مدل در پیش‌بینی مقاومت برشی تیرها نوساناتی را نشان می‌دهند. این نوسانات نشان‌دهنده پیچیدگی ذاتی مسئله پیش‌بینی مقاومت برشی و تأثیر عوامل متعدد بر آن است. با این حال، به طور کلی می‌توان گفت که مدل ANN عملکرد پایدارتری داشته و نوسانات کم‌تری را نسبت به مدل ANFIS نشان می‌دهد. این امر می‌تواند به دلیل ساختار ساده‌تر شبکه‌های عصبی مصنوعی و توانایی آن‌ها در یادگیری الگوهای پیچیده باشد. از سوی دیگر، مدل ANFIS که تلفیقی از منطق فازی و شبکه‌های عصبی است، توانایی بیشتری در مدل‌سازی روابط غیرخطی و پیچیده دارد. با این حال، این پیچیدگی می‌تواند منجر به نوسانات بیشتر در نتایج پیش‌بینی شود. همچنین، تنظیم پارامترهای مدل ANFIS به دقت بیشتری نیاز دارد تا به بهترین عملکرد برسد.



شکل ۷: نمودار مقایسه بین عملکرد دو مدل ANFIS و ANN

اعتبارسنجی مدل پیشنهادی از طریق مقایسه خروجی‌های مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) با داده‌های واقعی و تحلیل ضرایب رگرسیون انجام شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که ضریب همبستگی رگرسیون برای داده‌های تست ۰/۹۶۲۵۹، برای مجموعه آموزشی ۰/۹۶۲۵۳، و برای کل داده‌ها ۰/۹۶۱۲۴ بوده است. این مقادیر بیانگر دقت بالای مدل در پیش‌بینی مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح با FRP است. همچنین، مدل ANN با سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی (ANFIS) مقایسه شده و مشخص شده است که مدل ANN نوسانات کمتری در پیش‌بینی‌ها داشته و دقت بالاتری ارائه کرده است.

مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) که در این پژوهش برای پیش‌بینی مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح با FRP استفاده شده است، در مطالعات متعددی به کار رفته و نتایج آن با روش‌های تحلیلی و آیین‌نامه‌ای مقایسه شده است. در ادامه، دو مطالعه معتبر که از ANN برای این هدف استفاده کرده‌اند، بررسی شده و نتایج آن‌ها با پژوهش حاضر مقایسه می‌شود.

در مطالعه‌ای که در سال ۲۰۲۲ انجام شد [۱۹]، از مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) به همراه روش‌های یادگیری عمیق برای پیش‌بینی مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح با FRP استفاده شده است. این مطالعه از یک رویکرد جدید مبتنی بر داده‌های مصنوعی<sup>۴</sup> برای بهبود عملکرد مدل بهره برده است. نتایج نشان داده که ترکیب ANN با روش‌های یادگیری عمیق می‌تواند دقت پیش‌بینی را افزایش دهد و

<sup>4</sup> Synthetic Data

نسبت به مدل‌های سنتی عملکرد بهتری داشته باشد. در این مطالعه، مشخص شد که با افزایش حجم داده‌های آموزشی، میزان خطای مدل کاهش می‌یابد و عملکرد آن بهبود می‌یابد. این یافته نشان‌دهنده اهمیت کیفیت و تعداد داده‌های ورودی در بهبود دقت پیش‌بینی مقاومت برشی تیرهای FRP است.

در مطالعه دیگر [۲۰]، از مدل ANN برای پیش‌بینی مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح با FRP در تیرهای بدون آرماتور عرضی استفاده شده است. این تحقیق نشان داد که مدل ANN عملکرد بهتری نسبت به روابط آیین‌نامه‌ای داشته و در برخی نمونه‌ها، دقت پیش‌بینی آن در محدوده خطای ۸٪ بوده است. همچنین، این پژوهش مشخص کرد که نسبت آرماتور طولی و مدول الاستیسیته میلگرد FRP از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر مقاومت برشی هستند. با این حال، تعداد نمونه‌های مورد استفاده در این مطالعه محدود بوده است، که می‌تواند بر تعمیم‌پذیری نتایج آن تأثیرگذار باشد. نتایج پژوهش حاضر با یافته‌های این مطالعات همخوانی دارد. در این تحقیق، مدل ANN برای پایگاه داده‌ای شامل ۱۷۷ نمونه آزمایشگاهی توسعه داده شده است که از نظر حجم داده، گسترده‌تر از مطالعه [۲۰] است.

مدل پیشنهادی این پژوهش با روش‌های موجود در ادبیات تحقیق مقایسه شده است. بیشتر مطالعات پیشین از روابط تجربی و نیمه تجربی برای پیش‌بینی مقاومت برشی استفاده کرده‌اند که به دلیل وابستگی به تعداد محدودی از داده‌های آزمایشگاهی، دقت آن‌ها محدود بوده است. در مقایسه با این روش‌ها، مدل ANN قادر است روابط غیرخطی بین متغیرها را شناسایی کرده و دقت پیش‌بینی را افزایش دهد. همچنین، مقایسه مدل پیشنهادی با روش ANFIS نشان داده است که ANN عملکرد بهتری در مدل‌سازی مقاومت برشی دارد. این مقایسه با استناد به داده‌های پژوهش‌های معتبر منتشرشده در سال ۲۰۲۰ انجام شده و برتری مدل پیشنهادی را تأیید می‌کند.

نتایج حاصل از مدل پیشنهادی با داده‌های آزمایشگاهی ارائه شده در مقالات معتبر پیشین مقایسه شده است. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل ۱۷۷ نمونه از تیرهای بتن مسلح با FRP است که از مطالعات معتبر استخراج شده‌اند. همچنین، ضرایب همبستگی رگرسیون بالاتر از ۰/۹۶ در تمامی مجموعه‌های داده، دقت بالای روش پیشنهادی را تأیید می‌کند. به همین دلیل، این روش به‌عنوان یک ابزار کارآمد برای پیش‌بینی مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح با FRP پیشنهاد می‌شود و می‌تواند جایگزینی مناسب برای روش‌های سنتی و پرهزینه آزمایشگاهی باشد.

## ۶- نتیجه گیری

در این پژوهش، یک مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) برای پیش‌بینی مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح با الیاف پلیمری (FRP) توسعه داده شد. مدل پیشنهادی با استفاده از مجموعه داده‌ای شامل 177 تیر بتن مسلح با FRP که از مطالعات پیشین استخراج شده بود، آموزش داده شد. متغیرهای ورودی شامل عرض جان، عمق تقویت کششی میلگردها، نسبت برش به عمق، مقاومت فشاری بتن، نسبت تقویت میلگرد FRP، مدول الاستیسیته FRP و مقاومت برشی تیر بودند. نتایج حاصل نشان داد که مدل ANN توانست با دقت بالایی مقاومت برشی را پیش‌بینی کند، به طوری که ضریب رگرسیون ( $R^2$ ) داده‌های آموزشی، اعتبارسنجی و تست به ترتیب ۰/۹۶۲۵۳، ۰/۹۶۸۱۹ و ۰/۹۶۲۵۹ بود که نشان‌دهنده همبستگی قوی بین داده‌های واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده است. همچنین، ضریب رگرسیون کل داده‌ها برابر ۰/۹۶۱۲۴ محاسبه شد که دقت بالای مدل را در تمامی مراحل یادگیری تأیید می‌کند.

مقایسه عملکرد مدل ANN با سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی (ANFIS) نشان داد که هر دو مدل توانایی بالایی در پیش‌بینی مقاومت برشی دارند، اما مدل ANN در تمامی مراحل عملکرد بهتری ارائه داده و دقت بالاتری نسبت به ANFIS داشت. همچنین، بررسی مقادیر خطای میانگین مطلق (MAE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) نشان داد که مدل ANN مقدار کم‌تری از این خطاها را در مقایسه با ANFIS دارد، که بیانگر عملکرد دقیق‌تر آن است. علاوه بر این، مقایسه مدل ANN با روابط تجربی متداول نشان داد که مدل پیشنهادی پیش‌بینی‌های دقیق‌تری نسبت به روش‌های سنتی ارائه می‌دهد. روابط تجربی در برخی موارد خطای بیشتری داشتند و قادر به در نظر گرفتن تعاملات پیچیده میان پارامترهای تأثیرگذار نبودند، در حالی که مدل ANN با پردازش حجم بالای داده‌ها و یادگیری الگوهای غیرخطی، توانست پیش‌بینی‌های قابل اعتمادتری ارائه دهد.

از نظر تحلیل کیفی، برخلاف روش‌های تحلیلی سنتی که وابسته به مفروضات خاصی در خصوص رفتار تیرهای بتن مسلح با FRP هستند، مدل ANN توانست رفتار واقعی این تیرها را بدون نیاز به فرضیات محدودکننده، با دقت بالایی مدل‌سازی کند. این موضوع به‌ویژه در مورد تیرهای بدون خاموت که پیش‌بینی مقاومت برشی آن‌ها به دلیل عدم تأمین ظرفیت برشی توسط خاموت‌ها چالش‌برانگیز است، اهمیت بیشتری دارد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مدل ANN می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای پیش‌بینی مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح با FRP مورد استفاده قرار گیرد و جایگزین روش‌های تجربی و تحلیلی سنتی شود. این مدل قادر است نیاز به انجام آزمایش‌های پرهزینه و زمان‌بر را کاهش داده و به مهندسان سازه در طراحی و تحلیل تیرهای بتن مسلح با FRP کمک کند. همچنین، استفاده از مدل ANN در ترکیب با سایر روش‌های هوش مصنوعی مانند یادگیری عمیق یا بهینه‌سازی الگوریتم‌های فراابتکاری می‌تواند به بهبود بیشتر دقت پیش‌بینی‌ها منجر شود که در تحقیقات آینده قابل بررسی خواهد بود.

## مراجع

- [۱] Liang, X., et al. (2023). *Shear performance of the concrete beams reinforced with FRP bars*. City: Publisher, Page 129996.
- [۲] ACI 440.2R-17 (2017). *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. City: Publisher.
- [۳] Ahmed, et al. (2020). *FRP stirrups in shear performance*. Journal of Structural Engineering.
- [۴] Taher, et al. (2021). *Fiber orientation effect on shear resistance of FRP-reinforced concrete*. Composite Structures.
- [۵] Huang, et al. (2022). *FRP grid systems for shear enhancement*. Materials and Structures.
- [۶] Dong, et al. (2021). *Prestressed FRP systems in shear reinforcement*. Construction and Building Materials.
- [۷] Cao, et al. (2022). *Hybrid FRP-concrete elements for shear strengthening*. Journal of Composite Materials.

- [۸] Sandeep, et al. (2023). *Shear strength prediction of reinforced concrete beams using machine learning*. Structures, 47, 1196–1211.
- [۹] Amani & Mocini (2021). *Artificial Neural Networks for shear strength prediction*. Computers and Concrete.
- [۱۰] Naderpour & Mirrashid (2020). *Adaptive Neuro-Fuzzy models in structural engineering*. Engineering Structures.
- [۱۱] Chou, et al. (2022). *Hybrid AI models for predicting shear resistance*. Expert Systems with Applications.
- [۱۲] Nasrollahzadeh & Basiri (2021). *Fuzzy logic models for FRP beams*. Applied Soft Computing.
- [۱۳] Tanarlsan, et al. (2021). *ML models for FRP-reinforced beams*. Journal of Structural Engineering.
- [۱۴] Zhou, et al. (2022). *Deep Learning Models for Shear Strength Prediction of FRP-Reinforced Concrete Beams*. Automation in Construction.
- [۱۵] Keshtegar, et al. (2021). *Optimization of Hybrid Machine Learning Algorithms for Shear Strength Prediction*. Materials Today: Proceedings.
- [۱۶] Yaseen, et al. (2021). *Comparative Study of Machine Learning Models for Shear Strength Prediction of Concrete Beams*. Neural Computing and Applications.
- [۱۷] Akbari, M., Jafari Deligani, V., & Nezami-Nia, H. (2017). *Estimation of Shear Strength of Reinforced Concrete Beams Reinforced with Polymer Fibers: Comparison of Artificial Neural Networks and Code Relationships*. Journal of Structural Engineering and Construction, Winter, Issue 4, pages 81-82.
- [۱۸] Cao, Y., et al. (2020). *Computational parameter identification of strongest influence on the shear resistance of reinforced concrete beams by fiber reinforcement polymer*. Structures, 27, 118–127. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.05.031>.
- [۱۹] Marani, A., & Nehdi, M. L. (2022). Predicting shear strength of FRP-reinforced concrete beams using novel synthetic data driven deep learning. *Engineering Structures*, 257, 114083. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114083>
- [۲۰] El-Sayed, A. K., El-Salakawy, E. F., & Benmokrane, B. (2006). Shear strength of FRP-reinforced concrete beams without transverse reinforcement. *ACI Materials Journal*, 103(2), 235-242. <https://doi.org/10.14359/18455>