

ارزیابی عملکرد مدل های شبکه عصبی مصنوعی، نروفازی و رگرسیون چندمتغیره در پیش بینی مقاومت فشاری بتن به کمک روش بار نقطه ای

میثم عفتی^{۱*}، رحمت مدندوست^۲ و زینب فلاح زرگو بازکیایی^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۰۱ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۲۴	امروزه تعیین مقاومت بتن درجا مورد توجه است. ضرورت انجام آزمایش های درجا را می توان در عامل های مختلفی چون تغییر یا توسعه سازه، بررسی کیفیت، ارزیابی مقاومت و عملکرد بتن جست و جو کرد. در این پژوهش، عملکرد مدل های شبکه عصبی مصنوعی، نروفازی تطبیقی و رگرسیون چندمتغیره با هدف سنجش مقاومت فشاری بتن با روش بار نقطه ای مورد مطالعه قرار می گیرد. همچنین رابطه ای محاسباتی براساس روش رگرسیون چندمتغیره برای پیش بینی مقاومت فشاری بتن با روش بار نقطه ای ارائه می شود. نتیجه ها نشان دهنده مناسب بودن مدل های شبکه عصبی، نروفازی و رگرسیون در پیش بینی مقاومت بتن به روش بار نقطه ای است. ضریب همبستگی برای مدل شبکه عصبی، نروفازی و رگرسیون غیرخطی به ترتیب ۰/۹۴۱۲، ۰/۸۲۴۴ و ۰/۸۹۳۸ است که نشان دهنده خطای کمتر و در نتیجه دقت و عملکرد بهتر شبکه عصبی در پیش بینی مقاومت بتن به روش بار نقطه ای دارد. نتیجه این پژوهش نشان داد که توافق خوبی میان سنجش مقاومت فشاری بتن به کمک روش های مبتنی بر محاسبات نرم و مشاهدات واقعی وجود دارد که علاوه بر سهولت، موجب کاهش زمان ارزیابی مقاومت بتن درجا و کاهش هزینه مطالعات آزمایشگاهی می شود.
واژگان کلیدی: مقاومت فشاری بتن، روش بار نقطه ای، محاسبات نرم، شبکه عصبی مصنوعی، نروفازی، رگرسیون چندمتغیره.	

۱- مقدمه

تا امروز تلاش های گسترده ای برای کنترل کیفی و کمی مقاومت بتن درجا صورت گرفته و روش های مختلفی تحت عنوان برآورد مقاومت بتن درجا به صورت های غیرمخرب و نیمه مخرب معرفی شده و مورد استفاده قرار گرفته است. روش های آزمایش درجا به طور مستقیم، مقاومت فشاری نمونه های استاندارد را محاسبه نمی کنند؛ اما می توان توسط نمودار کالیبره رابطه ای بین مقاومت فشاری بتن و عامل اندازه گیری شده توسط این آزمایش ها برقرار کرد [۱]. با مطالعه روی انواع آزمایش های درجا مقاومت بتن، ملاحظه می شود که تمام این آزمایش ها تحت تأثیر

عامل های زیادی هستند که در بررسی نتیجه ها باید مورد توجه قرار گیرد. آزمایش بار نقطه ای، از جمله آزمایش های نیمه مخرب مطرح در زمینه تعیین مقاومت فشاری بتن درجا می باشد. در آزمایش بار نقطه ای نمونه مغزه استخراج شده از سازه توسط دستگاه بار نقطه ای تحت دو بار متمرکز قرار می گیرد که از طریق دو فک مخروطی به نمونه اعمال می شود و شاخص بار نقطه ای (IS) و نیروی گسیختگی (P) (با توجه به نوع دستگاه بار نقطه ای) در لحظه شکست از دستگاه خوانده می شود [۲]. در این مطالعه، به منظور صرفه جویی در زمان، هزینه و مصالح روش های هوشمندی برای پیش بینی مقاومت

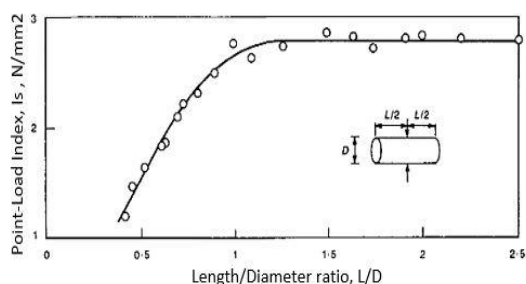
* پست الکترونیک نویسنده مسئول: meysameffati@guilan.ac.ir

۱. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

۲. دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

۳. دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه گیلان

شاخص بار نقطه‌ای تغییر نمی‌کند. الگوی کلی تأثیر نسبت طول به قطر نمونه مغزه بر نتیجه آزمایش بار نقطه‌ای طبق نتیجه روبینز در شکل (۲) نشان داده شده است. نتیجه وی نشانگر وجود رابطه‌ای خطی بین شاخص بار نقطه‌ای و مقاومت فشاری بوده است. از مزایای آزمایش بار نقطه‌ای را عدم نیاز به کلاهدک گذاری نمونه‌های مغزه پس از استخراج از سازه، نیاز به نیرویی به مراتب کوچک‌تر برای شکست نمونه‌های مغزه و انجام آزمایش با دستگاه ساده و قابل حمل ذکر کرد.



شکل ۲- تأثیر نسبت طول به قطر بر نتیجه آزمایش بار نقطه‌ای [۲]

روش بار نقطه‌ای در سال ۱۹۸۹ توسط ریچاردسون [۳] مورد بررسی قرار گرفت. بتن با ترکیبات مختلف و نمونه‌های بتن با قطرهای مختلف را به دو صورت قطری و محوری تحت آزمایش بار نقطه‌ای قرار داد. ریچاردسون رابطه‌ای نمایی به شکل رابطه (۱) برای ارتباط بین نتیجه آزمایش بار نقطه‌ای و مقاومت فشاری تعریف کرد [۳].

$$f_c = K(Is)^n \quad (1)$$

زاکوئب و همکاران [۴] در سال ۲۰۰۶ رابطه‌ای مناسب بین شاخص بار نقطه‌ای IS و مقاومت مغزه بتن f_c برای نمونه‌های مغزه کوچک با اندازه‌های ۳۵ و ۵۰ میلی‌متر و دو نسبت طول به قطر ۱/۵ و ۲ معرفی کردند.

زاکوئب و ایشیباشی [۵] در سال ۲۰۰۹ آزمایش بار نقطه‌ای را برای دو نسبت طول به قطر مورد بررسی قرار دادند. نتیجه آن‌ها نشانگر افزایش شاخص بار نقطه‌ای با افزایش نسبت طول به قطر بوده است. مطالعه آن‌ها کارایی روش بار نقطه‌ای در تعیین مقاومت بتن درجا را گزارش کرد و فرمولی برای اصلاح نمونه‌های مغزه با قطر و نوع بارگذاری مختلف ارائه کردند. لونت سلوکوک [۶] در سال ۲۰۱۵ رابطه‌ای بین IS/f_c و f_c برای بتن با رده مقاومت کمتر از ۶۰ مگاپاسکال به کمک آنالیز رگرسیون معرفی کرد.

فشاری بتن پیشنهاد شده است. بدین منظور مدل‌های هوشمند شبکه عصبی مصنوعی که مبتنی بر یادگیری نتیجه‌های آزمایش‌های انجام‌شده موجود بار نقطه‌ای و نروفازی تطبیقی (ANFIS)^۱ که مبتنی بر یادگیری و مدل‌سازی عدم قطعیت است، برای پیش‌بینی مقاومت بتن بررسی شده، با نتیجه‌های یکی از متداول‌ترین مدل‌های آماری موجود (رگرسیون چندمتغیره) مورد مقایسه قرار می‌گیرند.



شکل ۱- دستگاه آزمایش بار نقطه‌ای

در بخش بعدی، به مطالعات انجام‌شده در زمینه آزمایش بار نقطه‌ای برای سنجش مقاومت فشاری بتن درجا پرداخته می‌شود. در بخش ۳ به صورت گام‌به‌گام به مراحل انجام این مطالعه اشاره شده و توضیح مختصری درباره مدل‌های مختلف ارائه شده است. در بخش ۴ پیاده‌سازی و بحث روی مدل‌های مختلف صورت می‌گیرد و در انتها در بخش ۵ به ارزیابی روش‌های پیشنهادی پرداخته خواهد شد.

۲- مطالعات پیشین

روبینز [۲] برای اولین بار در سال ۱۹۸۰ مناسب بودن آزمایش بار نقطه‌ای برای سنجش مقاومت بتن درجا را گزارش کرد. بالغ بر ۴۵۰ نمونه مغزه را مورد بررسی قرار داد و تأثیر اندازه قطر نمونه، اندازه سنگدانه و نسبت طول به قطر را روی نتیجه آزمایش بار نقطه‌ای مورد بررسی قرار داد. روبینز نشان داد که عامل‌هایی مثل اندازه قطر نمونه مغزه، اندازه بزرگ‌ترین سنگدانه می‌تواند بر نتیجه آزمایش بار نقطه‌ای در ارزیابی مقاومت بتن مؤثر باشد. طبق گزارش روبینز، در آزمایش بار نقطه‌ای قطری مقدار شاخص بار نقطه‌ای با افزایش نسبت طول به قطر نمونه افزایش می‌یابد و برای نمونه‌های با نسبت طول به قطر بزرگ‌تر از ۱/۲ مقدار

¹ Adaptive Neuro-fuzzy Inference System (ANFIS)

مصنوعی، نروفازی تطبیقی و رگرسیون چندمتغیره، مقاومت فشاری نمونه استاندارد بتن مدل سازی و عملکرد آنها با کمک معیارهای متداول ارزیابی عملکرد، مورد بررسی قرار گرفته است. مقادیر مقاومت فشاری نمونه بتن به صورت تابعی از شاخص بار نقطه‌ای، قطر نمونه، طول نمونه، اندازه بزرگ‌ترین سنگدانه و شرایط عمل‌آوری با کمک الگوریتم‌های هوشمند ANFIS, ANN و همچنین رگرسیون چندمتغیره پیش‌بینی شده است و در نهایت با کمک رگرسیون مدل پیشنهادی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن از نتیجه آزمایش بار نقطه‌ای در شکلی صریح ارائه شده است. اولین گام روش پیشنهادی ارائه اطلاعات مورد نیاز برای آموزش، صحت‌سنجی و آزمایش شبکه عصبی و جمع‌آوری اطلاعات از نتیجه آزمایش بار نقطه‌ای نمونه‌های بتنی است. داده‌های آموزش، صحت‌سنجی و آزمون مورد استفاده در روش پیشنهادی تحقیق شامل ۷۶ نمونه از نتیجه مقاومت فشاری با روش بار نقطه‌ای، از پژوهش‌های مدندوست [۸]، روبینز [۲] و زاکوب [۴] جمع‌آوری شده که در جدول ۱ ارائه گردیده است. در شکل (۳) روش پیشنهادی تحقیق ارائه شده است. با کمک نرم‌افزار Matlab R2018a تحلیل شبکه عصبی و ANFIS و با کمک نرم‌افزار Spss25 تحلیل رگرسیون چندمتغیره خطی و غیرخطی بر روی نتایج حاصل از آزمایش‌های محققان انجام شد و مقدار مقاومت فشاری بتن درجا پیش‌بینی گردید.

۱-۳- شبکه عصبی مصنوعی

شبکه عصبی مصنوعی یک سامانه پردازشی داده‌هاست که از مغز انسان ایده گرفته است. پردازنده‌های کوچک و زیادی که به شکل شبکه‌ای موازی با یکدیگر و به هم پیوسته رفتار می‌کنند، کار پردازش اطلاعات را برای حل مسئله در شبکه عصبی انجام می‌دهند [۱۳]. ساختار اصلی شبکه عصبی دارای سه لایه متمایز است. شبکه عصبی مصنوعی شامل یک لایه ورودی است که تعداد نرون در لایه ورودی برابر با تعداد متغیرهای ورودی شبکه می‌باشد. هر گره در لایه ورودی به تمام گره‌های لایه پنهان وصل می‌شود. شبکه عصبی می‌تواند دارای یک یا تعداد بیشتری لایه پنهان باشد. هر گره در لایه پنهان می‌تواند با توجه به ساختار شبکه عصبی و تعداد لایه‌های پنهان در آن، به گره‌های یک لایه پنهان دیگر یا به گره‌های لایه خروجی وصل شود.

فلاح و مدندوست [۷] در سال ۱۳۹۵ تأثیر الیاف‌های مختلف فولادی، فورتا و پلی‌پروپیلن را در نتیجه آزمایش بار نقطه‌ای مورد بررسی قرار دادند. نتیجه آنها نشان‌دهنده تأثیر الیاف در بهبود مقادیر شاخص بار نقطه‌ای و مقاومت فشاری بتن در سنین مختلف بوده است.

مدندوست و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۸ با مطالعه روش بار نقطه‌ای برای سنجش مقاومت فشاری بتن برای نمونه‌های مغزه با قطر ۵۰ و ۷۰ میلی‌متر، در شرایط عمل‌آوری خشک و مرطوب و تراز مقاومت مختلف، مناسب بودن روش بار نقطه‌ای برای تعیین مقاومت بتن را گزارش کردند. در پژوهشی در سال ۲۰۱۲ بیان شده است که شبکه عصبی و نروفازی می‌تواند با دقت خوبی، مقاومت فشاری نمونه مغزه بتن را پیش‌بینی کند. مدندوست و همکاران [۹] با استفاده از ۵ عامل ورودی از خواص بتن مثل مقاومت نمونه مغزه، نسبت طول به قطر نمونه مغزه، قطر مغزه، اندازه سنگدانه و سن بتن مدل شبکه عصبی و نروفازی را برای پیش‌بینی مقاومت فشاری نمونه استاندارد ایجاد کردند.

مطالعات محدودی روی آزمایش بار نقطه‌ای به‌عنوان آزمایش نیمه‌مخرب برای برآورد مقاومت فشاری بتن درجا صورت گرفته است و ضرورت انجام مطالعات بیشتر و بررسی عامل‌های مختلف بر نتیجه آن احساس می‌شود. همچنین مرور مطالعات گذشته نشان‌دهنده عملکرد مطلوب شبکه عصبی و نروفازی در پیش‌بینی خصوصیات مدل‌های مختلف است [۱۰-۱۲]. مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تاکنون کمتر از روش‌های هوشمند برای تعیین مقاومت بتن به روش بار نقطه‌ای استفاده شده است. بنابراین در این مطالعه، از روش‌های مبتنی بر محاسبات نرم مدل شبکه عصبی و نروفازی برای پیش‌بینی مقاومت بتن به روش بار نقطه‌ای استفاده شده است و نتیجه این مدل‌ها با نتیجه آزمایشگاهی و نتیجه مدل آماری رگرسیون چندمتغیره مقایسه شده‌اند. با توجه به اینکه برآورد مقاومت بتن به روش بار نقطه‌ای با توجه به لزوم استخراج مغزه از سازه بتنی پرهزینه است، در صورت پیش‌بینی مقاومت بتن با استفاده از مدل‌های هوشمند تا حد زیادی می‌توان از مشکل هزینه گزاف و صرف زمان در بخش آزمایشگاهی کاست و تعداد نمونه‌برداری را به حداقل رساند.

۳- روش پیشنهادی تحقیق

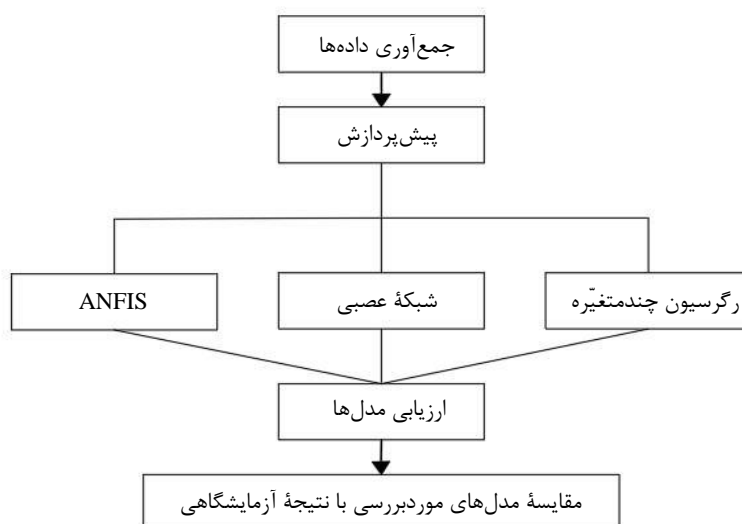
در پژوهش حاضر با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی

شبکه عصبی مصنوعی از نوع پرسپترون با روش بهینه‌سازی لونیبرگ مارکوارت استفاده شد و بهترین ساختار شبکه با استفاده از شاخص آماری خطای میانگین مربعات^۱ (MSE) انتخاب گردید. الگوریتم لونیبرگ مارکوارت، اغلب سریع‌ترین الگوریتم پس‌انتشار خطا می‌باشد.

تعداد نرون در لایه خروجی برابر با تعداد متغیرهای خروجی شبکه است. در شبکه عصبی ساختار مدل نرون از رابطه (۲) به دست می‌آید که در این رابطه، متغیرهای a و p به ترتیب خروجی و ورودی نرون هستند:

$$a=f(Wp+b) \quad (2)$$

در این مطالعه، به منظور برآورد مقاومت فشاری، از مدل



شکل ۳- روند انجام پژوهش

فازی تشکیل یافته و دارای قابلیت هر دو روش، از جمله قابلیت حسابگری شبکه عصبی و تصمیم‌گیری منطق فازی است. مدل ANFIS نخستین بار در سال ۱۹۹۳ توسط ژانگ معرفی شد [۱۴]. رفتار کلی خروجی در مدل ANFIS توسط یک مجموعه از عامل‌های قابل‌اصلاح تعیین می‌گردد و از استنتاج فازی سوگنو استفاده می‌کند. مدل پیشنهادی تحقیق برای تعیین مقاومت فشاری دارای پنج لایه است که از الگوریتم یادگیری Back-Propagation استفاده می‌کند و تصویر شماتیک آن در شکل (۴) نشان داده شده است. هر نود در لایه اول یک تابع عضویت است. میزان تعلق هر ورودی به بازه‌های فازی در لایه اول مشخص می‌شود. در لایه دوم وزن قانون‌ها با حاصل ضرب مقادیر ورودی هر گره در هم به دست می‌آید. محاسبه وزن نسبی قوانین در لایه سوم صورت می‌گیرد. لایه چهارم، لایه قوانین است که از عملیات روی سیگنال‌های ورودی به این لایه حاصل می‌شود. لایه پنجم، لایه خروجی شبکه است که وظیفه آن جمع‌بندی تمام ورودی‌ها به این گره است.

بردارهای ورودی و خروجی شبکه توسط الگوریتم لونیبرگ مارکوارت به‌طور تصادفی به داده‌های آموزش، صحت‌سنجی و آزمون تقسیم شده‌اند که درصد اختصاص یافته به بخش آموزش، صحت‌سنجی و آزمون در مدل بهینه در این مطالعه به ترتیب ۷۰، ۱۵ و ۱۵ درصد است که ۵۴ داده برای آموزش و ۱۱ داده برای صحت‌سنجی و ۱۱ داده برای آزمون به‌صورت تصادفی انتخاب شده است. البته شایان توجه است که باید قبل از آموزش شبکه عصبی، تمام داده‌ها برای یکسان‌سازی ارزش داده‌ها نرمال‌سازی شوند. در این پژوهش، با استفاده از رابطه (۳) داده‌ها نرمال‌سازی شدند:

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (3)$$

در رابطه فوق X مقادیر واقعی متغیر، X_{max} مقدار بیشینه و X_{min} مقدار کمینه در داده‌ها و X_{norm} مقادیر نرمال‌شده هستند.

۲-۳- شبکه نروفازی

ANFIS یکی از متداول‌ترین و پرکاربردترین مدل‌های نروفازی است که از ترکیب شبکه عصبی مصنوعی و منطق

^۱. Mean Squared Error

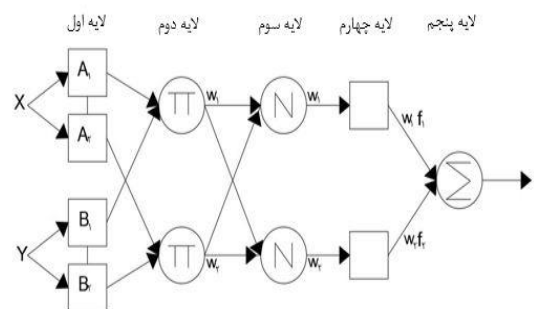
جدول ۱- داده‌های مورد مطالعه [۲، ۴ و ۸]

مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	شاخص بار نقطه‌ای (مگاپاسکال)	شرایط عمل‌آوری	اندازه بزرگ‌ترین سنگدانه (میلی‌متر)	طول (میلی‌متر)	قطر (میلی‌متر)
۱۵/۶۵	۱/۵۷	۱	۱۲/۷	۱۰۰	۵۰
۱۵/۶۵	۱/۴۵	۱	۱۲/۷	۱۴۰	۷۰
۲۰/۷۹	۱/۸۸	۱	۱۲/۷	۱۰۰	۵۰
۲۰/۷۹	۱/۶۳	۱	۱۲/۷	۱۴۰	۷۰
۲۳/۸۱	۲/۱	۱	۱۲/۷	۱۰۰	۵۰
۲۳/۸۱	۱/۹۱	۱	۱۲/۷	۱۴۰	۷۰
۲۶/۷۶	۲/۳۵	۱	۱۲/۷	۱۰۰	۵۰
۲۶/۷۶	۲/۱	۱	۱۲/۷	۱۴۰	۷۰
۱۴/۷۶	۱/۴۶	۰	۱۲/۷	۱۰۰	۵۰
۱۴/۷۶	۱/۳۵	۰	۱۲/۷	۱۴۰	۷۰
۱۸/۸۹	۱/۶۴	۰	۱۲/۷	۱۰۰	۵۰
۱۸/۸۹	۱/۴۵	۰	۱۲/۷	۱۴۰	۷۰
۲۱/۵۲	۱/۸۹	۰	۱۲/۷	۱۰۰	۵۰
۲۱/۵۲	۱/۶۸	۰	۱۲/۷	۱۴۰	۷۰
۲۳/۸۲	۱/۹۳	۰	۱۲/۷	۱۰۰	۵۰
۲۳/۸۱	۱/۷۷	۰	۱۲/۷	۱۴۰	۷۰
۲۹/۰۵	۲/۵۱	۱	۱۲/۷	۱۰۰	۵۰
۲۹/۰۵	۲/۱۴	۱	۱۲/۷	۱۴۰	۷۰
۳۷/۹	۲/۷۶	۱	۱۲/۷	۱۰۰	۵۰
۳۷/۹	۲/۴۶	۱	۱۲/۷	۱۴۰	۷۰
۴۳/۸۱	۳/۱۸	۱	۱۲/۷	۱۰۰	۵۰
۴۳/۸۱	۲/۷۶	۱	۱۲/۷	۱۴۰	۷۰
۴۹/۲۹	۳/۴۷	۱	۱۲/۷	۱۰۰	۵۰
۴۹/۲۹	۲/۹۲	۱	۱۲/۷	۱۴۰	۷۰
۲۸/۱	۲/۱۲	۰	۱۲/۷	۱۰۰	۵۰
۲۸/۱	۲/۰۲	۰	۱۲/۷	۱۴۰	۷۰
۳۶/۱۹	۲/۵۸	۰	۱۲/۷	۱۰۰	۵۰
۳۶/۱۹	۲/۲۸	۰	۱۲/۷	۱۴۰	۷۰
۴۰/۱	۲/۸	۰	۱۲/۷	۱۰۰	۵۰
۴۰/۱	۲/۵	۰	۱۲/۷	۱۴۰	۷۰
۴۵/۶۲	۳/۱	۰	۱۲/۷	۱۰۰	۵۰
۴۵/۶۲	۲/۶	۰	۱۲/۷	۱۴۰	۷۰
۲۲/۸۹	۱/۹۱	۱	۱۰	۵۸/۵	۳۹
۳۰/۴۰	۲/۰۶	۱	۱۰	۵۸/۵	۳۹
۴۰/۷۹	۲/۴۷	۱	۱۰	۵۸/۵	۳۹
۵۰/۶	۲/۶۸	۱	۱۰	۵۸/۵	۳۹
۲۲/۸۹	۱/۵۵	۱	۱۰	۱۰۲	۶۸
۳۰/۴۰	۱/۹۱	۱	۱۰	۱۰۲	۶۸
۴۰/۷۹	۲/۱۳	۱	۱۰	۱۰۲	۶۸
۵۰/۶۰	۲/۳۸	۱	۱۰	۱۰۲	۶۸
۲۲/۸۹	۱/۲۸	۱	۱۰	۱۵۰	۱۰۰
۳۰/۴۰	۱/۵۴	۱	۱۰	۱۵۰	۱۰۰

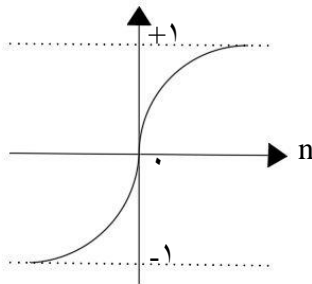
۱۰۰	۱۵۰	۱۰	۱	۱/۸۲	۴۰/۷۹
۱۰۰	۱۵۰	۱۰	۱	۲/۱۲	۵۰/۶۰
۳۹	۵۸/۵	۵	۱	۲/۰۸	۲۵
۳۹	۵۸/۵	۱۰	۱	۱/۸۸	۲۵
۳۹	۵۸/۵	۱۵	۱	۲/۵۴	۲۵
۳۹	۵۸/۵	۲۰	۱	۱/۶۸	۲۵
۶۸	۱۰۲	۵	۱	۱/۷۶	۲۵
۶۸	۱۰۲	۱۰	۱	۱/۷۹	۲۵
۶۸	۱۰۲	۱۵	۱	۱/۸۱	۲۵
۶۸	۱۰۲	۲۰	۱	۱/۵۵	۲۵
۱۰۰	۱۵۰	۵	۱	۱/۴۶	۲۵
۱۰۰	۱۵۰	۱۰	۱	۱/۴۹	۲۵
۱۰۰	۱۵۰	۱۵	۱	۱/۵۱	۲۵
۱۰۰	۱۵۰	۲۰	۱	۱/۴۴	۲۵
۳۵	۵۲/۵	۲۰	.	۲/۲۷	۱۹/۱۲
۳۵	۷۰	۲۰	.	۲/۳۲	۱۹/۱۲
۵۰	۵۲/۵	۲۰	.	۱/۸۷	۱۹/۱۲
۵۰	۷۰	۲۰	.	۱/۹۳	۱۹/۱۲
۳۵	۵۲/۵	۲۰	.	۳/۲۴	۳۹/۵۶
۳۵	۷۰	۲۰	.	۳/۳۱	۳۹/۵۶
۵۰	۵۲/۵	۲۰	.	۲/۵۷	۳۹/۵۶
۵۰	۷۰	۲۰	.	۲/۶۱	۳۹/۵۶
۳۵	۵۲/۵	۲۰	.	۳/۲۱	۳۶/۱۳
۳۵	۷۰	۲۰	.	۳/۲۸	۳۶/۱۳
۵۰	۵۲/۵	۲۰	.	۲/۷۱	۳۶/۱۳
۵۰	۷۰	۲۰	.	۲/۷۷	۳۶/۱۳
۳۵	۵۲/۵	۲۰	.	۳/۶۱	۴۷/۱۱
۳۵	۷۰	۲۰	.	۳/۶۹	۴۷/۱۱
۵۰	۵۲/۵	۲۰	.	۳/۰۶	۴۷/۱۱
۵۰	۷۰	۲۰	.	۳/۰۲	۴۷/۱۱
۳۵	۵۲/۵	۲۰	.	۳/۹۵	۵۵/۵۴
۳۵	۷۰	۲۰	.	۴/۰۵	۵۵/۵۴
۵۰	۵۲/۵	۲۰	.	۳/۲۷	۵۵/۵۴
۵۰	۷۰	۲۰	.	۳/۳۴	۵۵/۵۴

۳-۳- رگرسیون چندمتغیره

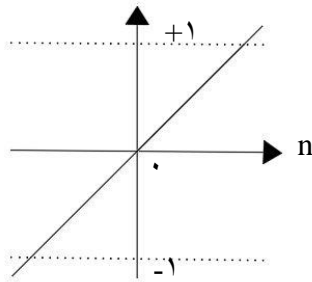
هدف از تحلیل رگرسیون، بیان متغیر وابسته به صورت تابعی از متغیرهای مستقل است. اگر هدف، استخراج رابطه بین متغیر وابسته و چند متغیر مستقل باشد، رگرسیون چندگانه مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر رگرسیون خطی می‌توان مدل‌هایی با ضابطه خاص تحت عنوان رگرسیون غیرخطی نیز برای ارتباط بین متغیر وابسته و متغیرهای مستقل ایجاد کرد. ضرایب در مدل رگرسیون



شکل ۴- شماتیک شبکه ANFIS [۱۴]



شکل ۵- تابع Tansigmoid



$$f(n) = n \quad (۵)$$

شکل ۶- تابع Pourelin

با بررسی‌های انجام‌شده و آزمون خطا مطابق شکل (۸)، مدلی با ۱ لایه پنهان و تعداد ۸ نرون در لایه پنهان به‌عنوان مدل نهایی انتخاب شد که مقدار MSE برای این مدل ۰/۰۲۳۶۵۱ تعیین شد.

به‌نحوی مشخص می‌شوند که مربع میانگین اختلاف بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی کمینه شود که به این روش کمینه مربعات می‌گویند.

۴- پیاده‌سازی و بحث

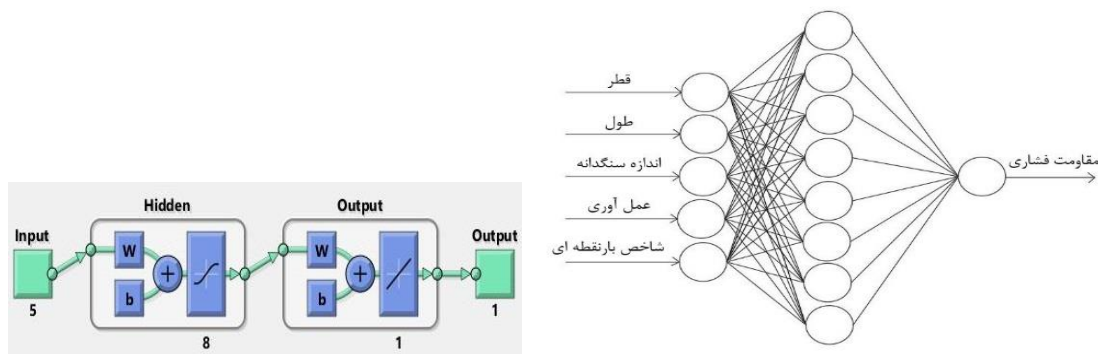
جهت ارزیابی مدل‌های مورد استفاده، پس از تعیین ساختار بهینه و پیش‌پردازش داده‌های ورودی، با استفاده از سعی و خطا و مشاهده ضرایب رگرسیون و میزان خطای میانگین مربعات، بهترین هندسه برای شبکه عصبی انتخاب شد. هرچه میزان R^2 به ۱ و میزان ریشه میانگین مربعات خطا^۱ (RMSE) به ۰ نزدیک‌تر باشد، عملکرد شبکه بهتر است.

۴-۱- پیش‌بینی مدل شبکه عصبی مصنوعی

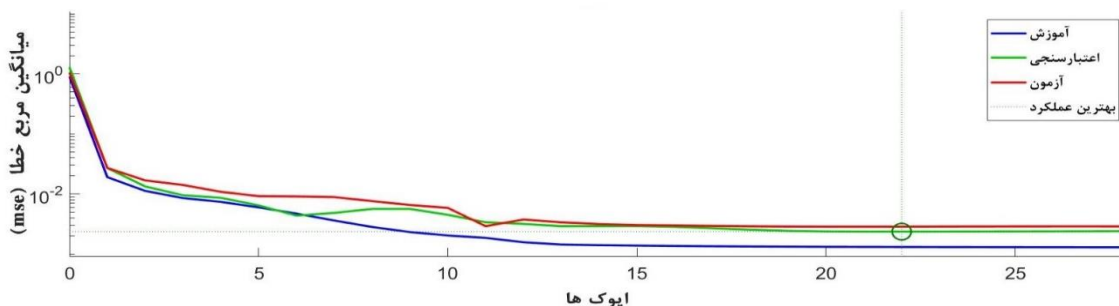
از تابع انتقال tan-sigmoid برای انتقال اطلاعات در آکسون‌ها استفاده شده است. خروجی این تابع بین ۱ و -۱ است که در شکل (۵) همراه با رابطه آن نشان داده شده است.

$$f(n) = \frac{2}{1+e^{-2n}} - 1 \quad (۴)$$

متغیر خروجی نیز تابع انتقال خطی purelin انتخاب شد که شکل و رابطه آن به‌صورت شکل (۶) است. سپس با تغییر دادن تعداد نرون‌های موجود در لایه پنهان تعداد نرون‌های محصول مشخص گردید.

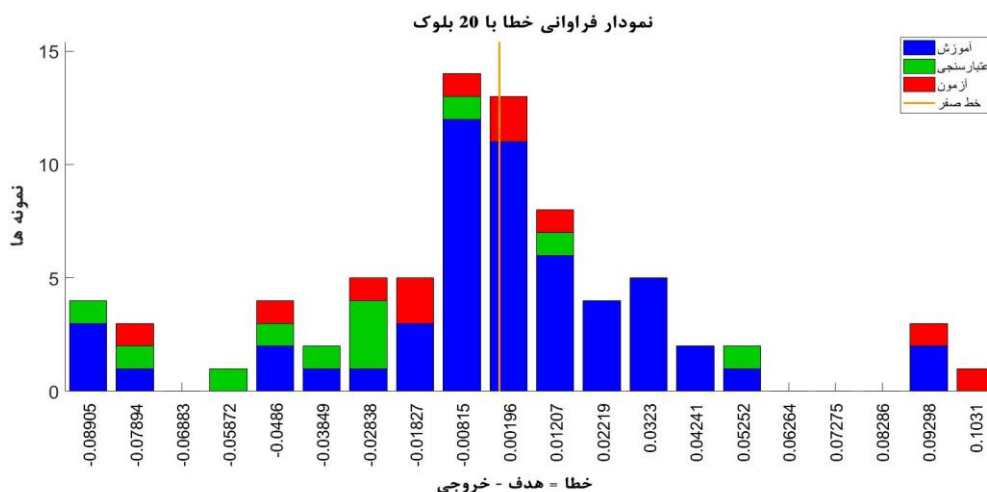


شکل ۷- شبکه عصبی مورد استفاده



شکل ۸- روند تغییرات تابع بهینه خطا برای شبکه بهینه

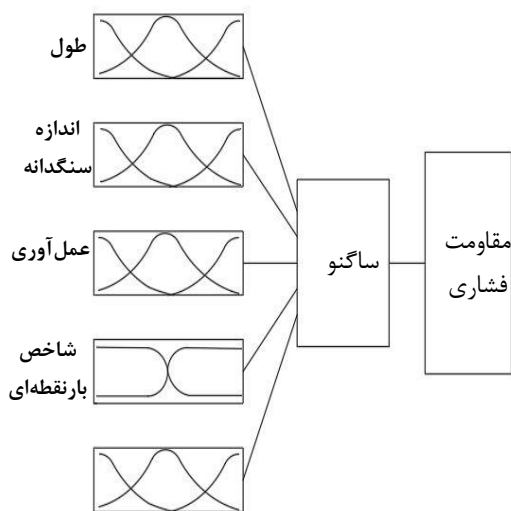
^۱ Root Mean Squared Error



شکل ۹- نمودار فراوانی خطای داده‌های آموزش، داده‌های اعتبارسنجی و داده‌های آزمون

۴-۲- پیش‌بینی مدل ANFIS

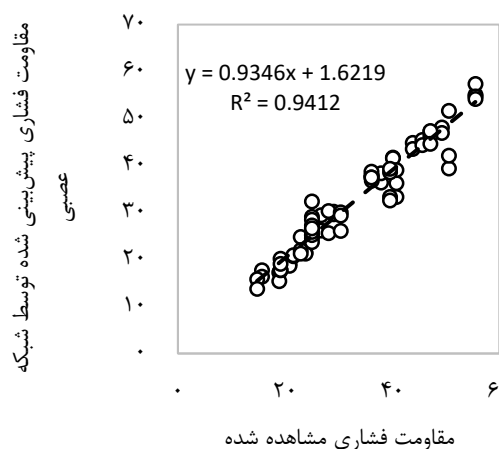
برای ایجاد یک شبکه ANFIS لازم است عامل‌هایی مانند نوع و تعداد تابع عضویت، روش یادگیری و تعداد تکرار در شبکه بهینه شوند. به‌منظور نیل به مدل بهینه برای تعیین مقاومت فشاری بتن به روش بار نقطه‌ای با روش سعی و خطا مقادیر مشخص شد که در نهایت، مدل با gauss2mf تابع و تعداد ۲ برای عامل عمل‌آوری و ۳ برای بقیه ورودی‌ها، روش یادگیری هیبرید و تعداد تکرار ۲۰ مرتبه به‌عنوان شبکه بهینه انتخاب گردید. در واقع ساختار بهینه شبکه با توجه به معیار RMSE تعیین شد. ساختار مدل ANFIS پیشنهادی برای تعیین مقاومت فشاری بتن به روش بار نقطه‌ای با ۵ ورودی و ۱ خروجی در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۱۱- نمایش ورودی‌ها و خروجی‌ها در مدل ANFIS پیشنهادی به‌منظور تعیین مقاومت فشاری بتن

شکل (۹) تصویر هیستوگرام فراوانی خطای داده‌ها را در شبکه عصبی نشان می‌دهد. هرچه نمودار هیستوگرام به توزیع نرمال شبیه‌تر باشد، نشان‌دهنده عملکرد مطلوب‌تر روش مورد استفاده است. همچنین از شکل (۹) می‌توان به این نکته اشاره کرد که در نمودار هیستوگرام خطا، بیشترین مقادیر خطا روی خطای صفر رخ داده است که نشان‌دهنده مناسب بودن شبکه در فرایند پیش‌بینی مقاومت بتن به روش بار نقطه‌ای است.

ارتباط نتیجه آزمایشگاهی و پیش‌بینی‌شده توسط مدل شبکه عصبی برای داده‌های آموزش، صحت‌سنجی و آزمون در شکل (۱۰) ارائه شده است. مطابق شکل، ضریب همبستگی رابطه بین خروجی شبکه عصبی و مقدار واقعی مقاومت فشاری به‌دست‌آمده از نتیجه آزمایشگاهی ۰/۹۷ است.



شکل ۱۰- نزدیکی نتیجه آزمایشگاهی و نتیجه پیش‌بینی‌شده مدل سیستم شبکه عصبی پیشنهادی

$$fc = -20.451 + 19.546 I + 0.424 D - 0.107 L - 0.41S \quad (۶)$$

با انتخاب مدل‌های مختلف غیرخطی، دو رابطه غیرخطی (۷) و (۸) نیز برای برآورد مقاومت فشاری بتن با روش بار نقطه‌ای به دست آمد:

$$fc = 0.489 (I)^{1.495} (D)^{1.121} (L)^{-0.54} (S)^{-0.109} \quad (۷)$$

$$fc = 5.877 + e^{0.61I} + e^{0.014D} + e^{-0.004L} + e^{-0.015S} \quad (۸)$$

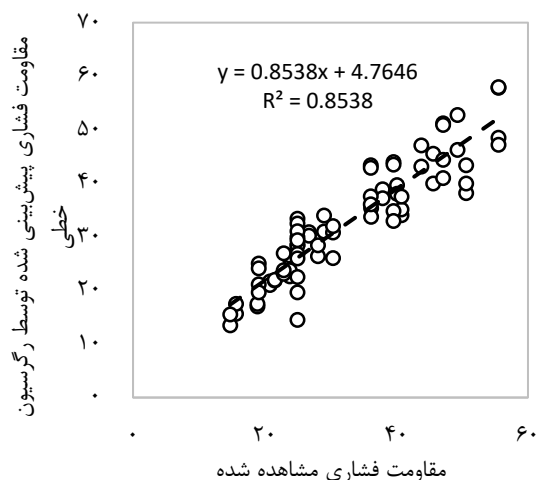
در روابط فوق، fc مقاومت فشاری بتن و I ، D ، L و S به ترتیب بیانگر شاخص بار نقطه‌ای، قطر، طول و اندازه بزرگ‌ترین سنگدانه نمونه است.

طبق نتیجه، تمام ترم‌های مدل مقدار p -value کمتر از ۰/۰۵ دارند؛ یعنی همگی در مدل رگرسیون در سطح ۰/۹۵ معنی‌دار هستند. مقادیر ضریب همبستگی^۱ R ، $RMSE$ و میانگین خطا^۲ (ME) برای مدل‌های رگرسیون خطی و غیرخطی فوق محاسبه و در جدول ۲ ارائه شده است تا مدلی که دارای کمترین مقدار $RMSE$ و ME و بیشترین میزان ضریب همبستگی است، معرفی شود. مقادیر $RMSE$ و ME طبق روابط (۹) و (۱۰) محاسبه شدند:

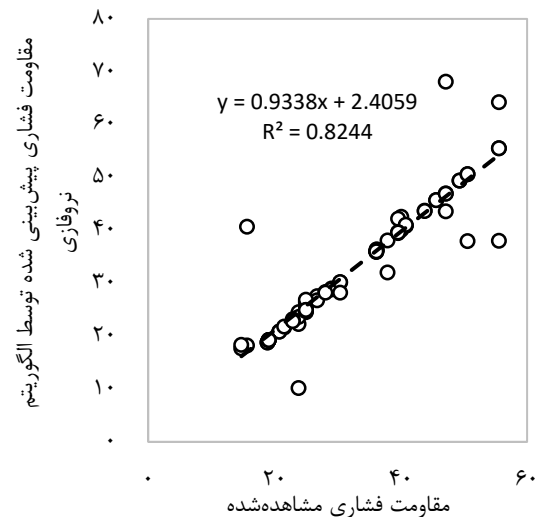
$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2 \right]^{0.5} \quad (۹)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i) \quad (۱۰)$$

که در روابط فوق، X_i و Y_i به ترتیب مقادیر مشاهده شده و مقادیر برآورد شده مقاومت فشاری توسط مدل‌های رگرسیون هستند. مقادیر R از شکل (۱۴) تا (۱۶) استخراج شده‌اند.



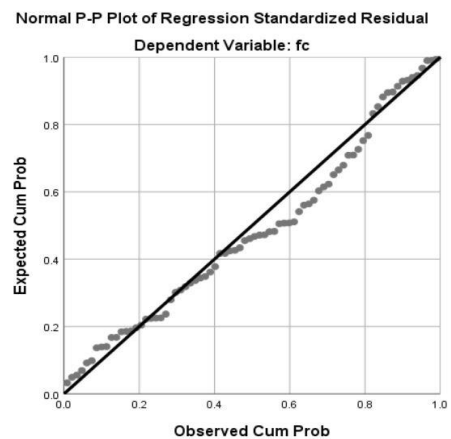
شکل ۱۴- ارتباط نتیجه آزمایشگاهی و نتیجه پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیون خطی رابطه (۵)



شکل ۱۲- ارتباط نتیجه آزمایشگاهی و نتیجه پیش‌بینی شده توسط مدل ANFIS پیشنهادی

۳-۴- پیش‌بینی مدل رگرسیون چندمتغیره

با توجه به ضرورت نرمال بودن داده‌ها در تحلیل رگرسیون، باید ابتدا نرمال بودن متغیرهای وابسته در مدل رگرسیونی بررسی شود. در این مطالعه، از روش توزیع داده‌ها Normal P-P Plot تا نرمال بودن داده‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. این کار از طریق رسم نمودار احتمال نرمال باقیمانده انجام شد که نتیجه آن در شکل (۱۳) ارائه شده است. اگر نقاط به خط رسم شده نزدیک باشند، توزیع به شکل نرمال بوده، خطای داده‌های وارد شده کمترین میزان است.



شکل ۱۳- نمودار مقادیر باقیمانده استاندارد شده متغیر وابسته با استفاده از رگرسیون چندمتغیره خطی و غیرخطی رابطه بین مقاومت فشاری، شاخص بار نقطه‌ای و مشخصات نمونه در آزمایش بار نقطه‌ای حاصل شد که مطابق رابطه (۶) است:

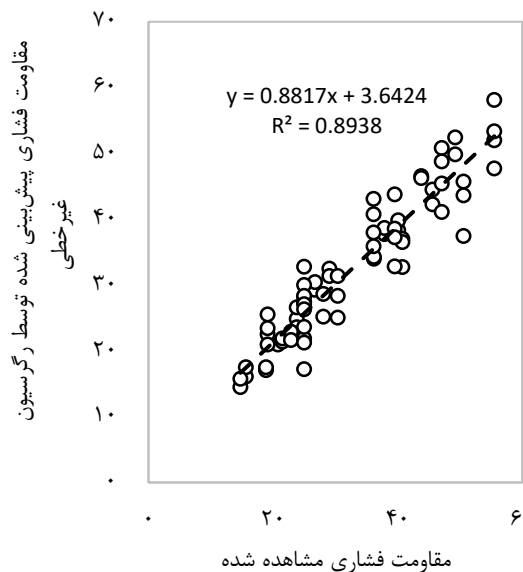
^۲. Mean Error

^۱. Correlation coefficient

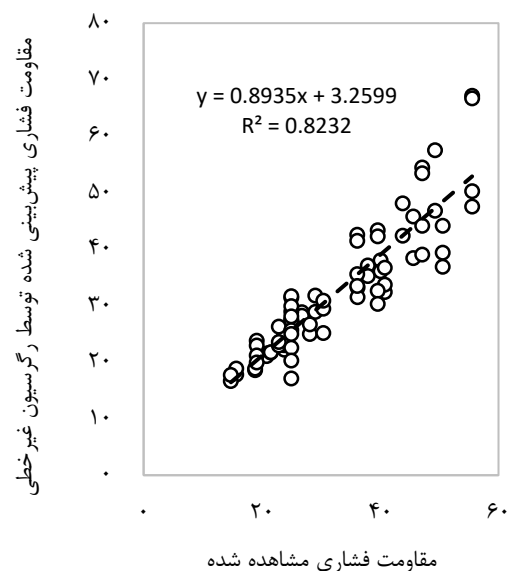
همان طور که در جدول ۱ ملاحظه می‌شود، مدل رگرسیون غیرخطی رابطه (۶) به‌عنوان بهترین روش برای برآورد مقاومت فشاری بتن با کمک روش بار نقطه‌ای با R بیشتر و مقادیر RMSE و ME کمترین مقدار است. همه نتایج‌های به‌دست‌آمده نشان داد که الگوی رگرسیون غیرخطی برآزش‌شده، از صحت و اعتبار کافی برخوردار است.

مقایسه میزان شاخص آماری R^2 مدل شبکه عصبی، ANFIS و رگرسیون چندمتغیره نشان می‌دهد که شبکه عصبی دارای بیشترین ضریب همبستگی به میزان ۰/۹۴۱۲ و مدل رگرسیون چندمتغیره غیرخطی و ANFIS به ترتیب با ضرایب همبستگی به ترتیب ۰/۸۲۴۴ و ۰/۸۹۳۸ دارای ضرایب کمتری هستند. به‌طور کلی بهترین عملکرد در پیش بینی مقاومت فشاری بتن با کمک روش بار نقطه‌ای، مربوط به مدل شبکه عصبی پیشنهادی است که از لحاظ هر دو معیار، بهتر از مدل ANFIS و رگرسیون چند متغیره می باشد.

برای درک مناسب‌تر از وضعیت عملکرد مدل‌های مختلف و مشاهده نتیجه‌های خروجی شبکه عصبی، ANFIS و رگرسیون خطی و نتیجه‌های آزمایشگاهی در شکل ۱۷ نشان داده شده است. براساس نمودار مذکور، پیش‌بینی‌های صورت‌گرفته توسط مدل شبکه عصبی، دارای عملکرد نسبتاً بهتری از مدل ANFIS و رگرسیون خطی در مقایسه با نتیجه‌های واقعی آزمایشگاهی است. بنابراین در مقایسه روش‌های مطرح در این مطالعه، روش ANFIS دارای پیش بینی‌های غیردقیق در برخی نقاط بوده است. بیشترین میزان خطا در پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن با روش بار نقطه‌ای در مدل‌های شبکه عصبی، ANFIS و رگرسیون خطی به ترتیب ۱۱، ۲۵ و ۱۲ مگاپاسکال بوده است. شکل (۱۷) نشان‌دهنده کارایی بهتر شبکه عصبی نسبت به مدل ANFIS و رگرسیون بوده که این نتیجه، تأییدکننده مطالعه اسکاف و همکاران (۱۹۹۸) است. به عبارت دیگر، در مدل‌های مبتنی بر شبکه عصبی، نوع خاصی از معادلات مورد نیاز نیست و با ایجاد روابط مناسب بین داده ورودی و خروجی طی فرایند یادگیری، نتایج مناسبی از برآورد و تخمین حاصل می‌شود.



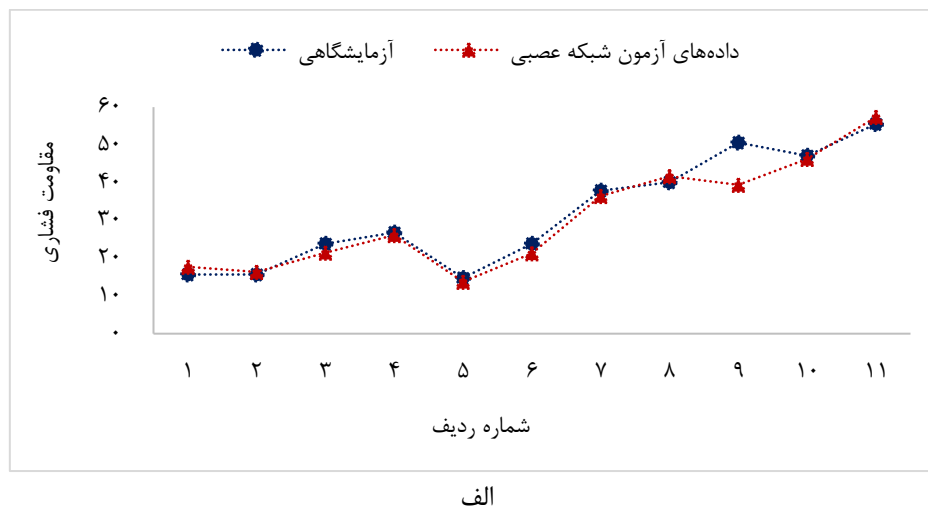
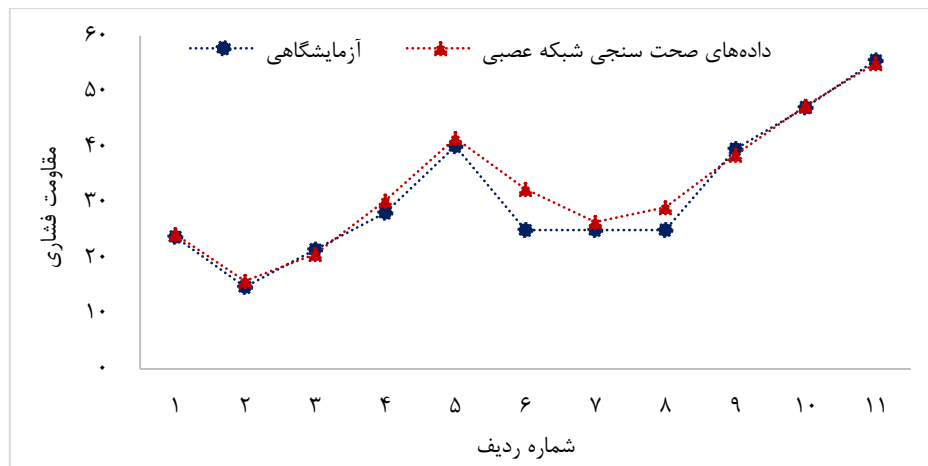
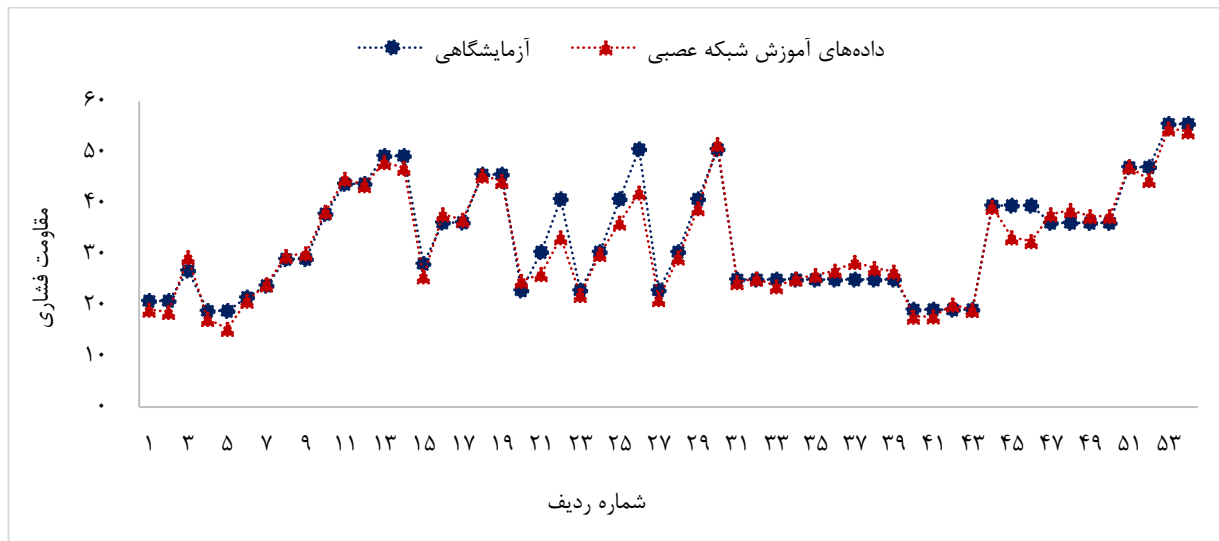
شکل ۱۵- ارتباط نتیجه آزمایشگاهی و نتیجه پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیون غیرخطی رابطه (۶)

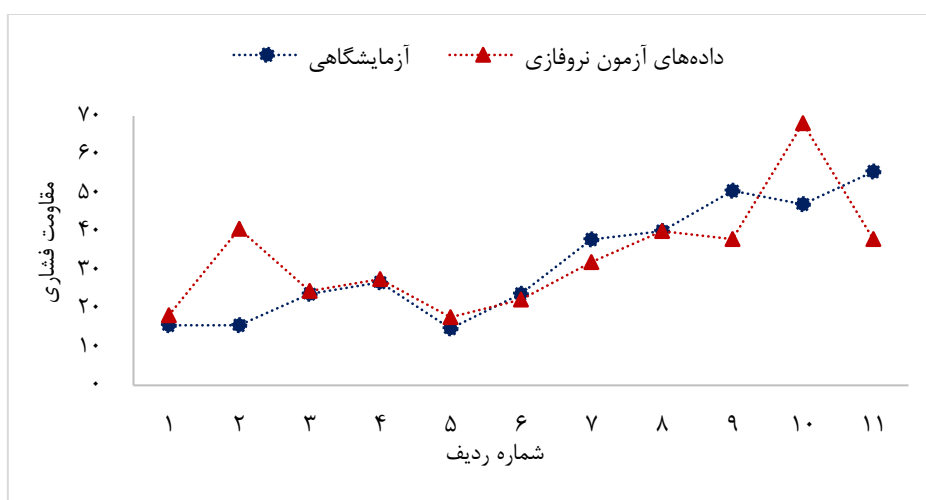
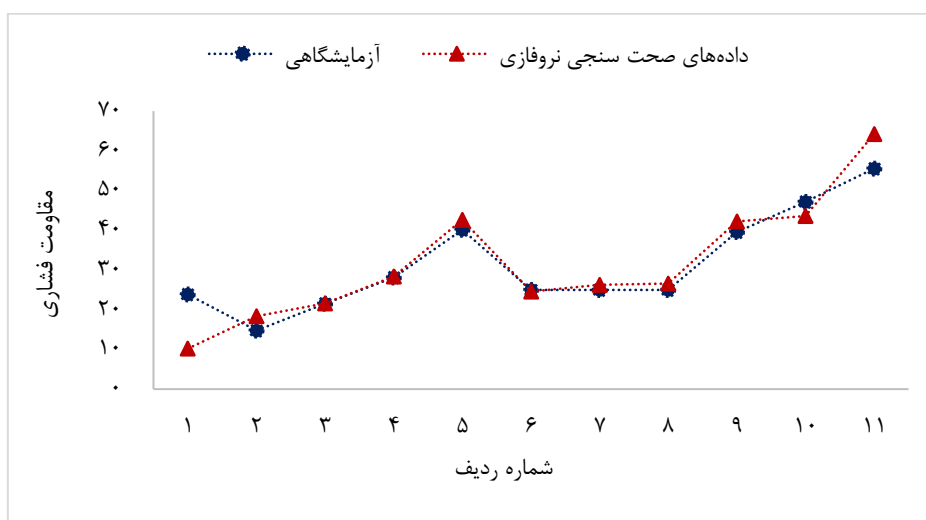
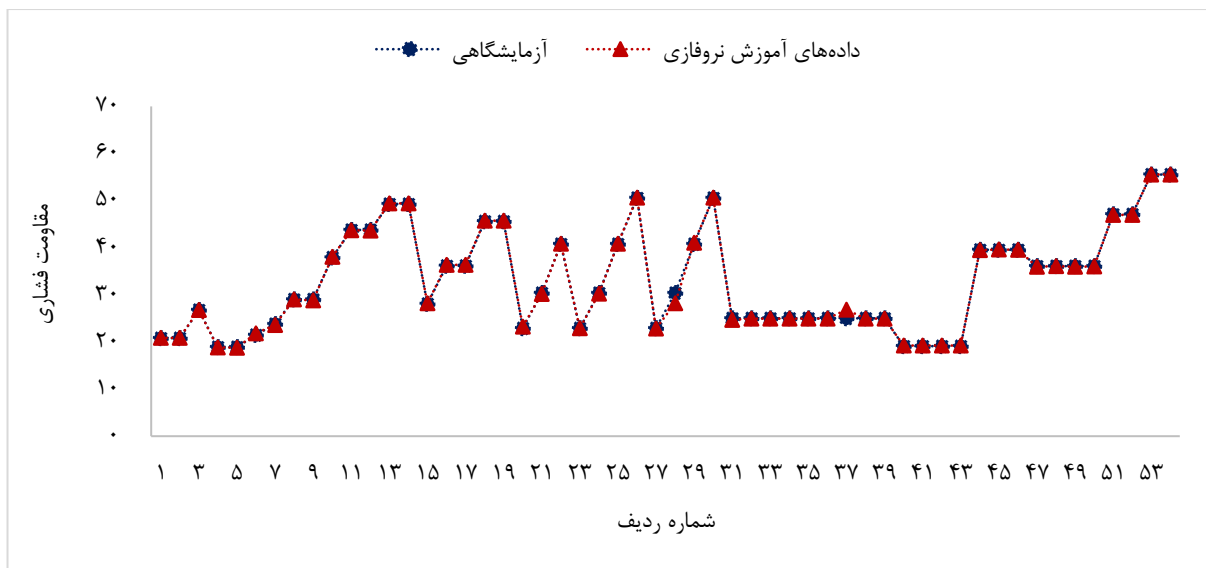


شکل ۱۶- ارتباط نتیجه آزمایشگاهی و نتیجه پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیون غیرخطی رابطه (۷)

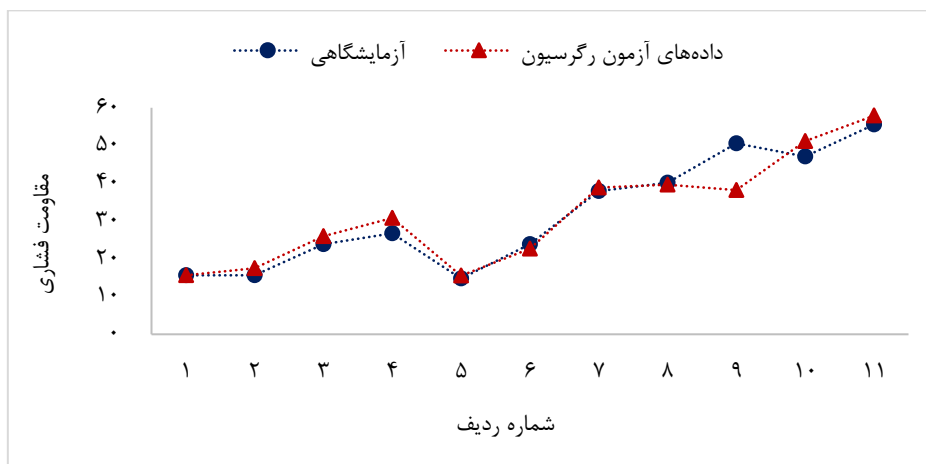
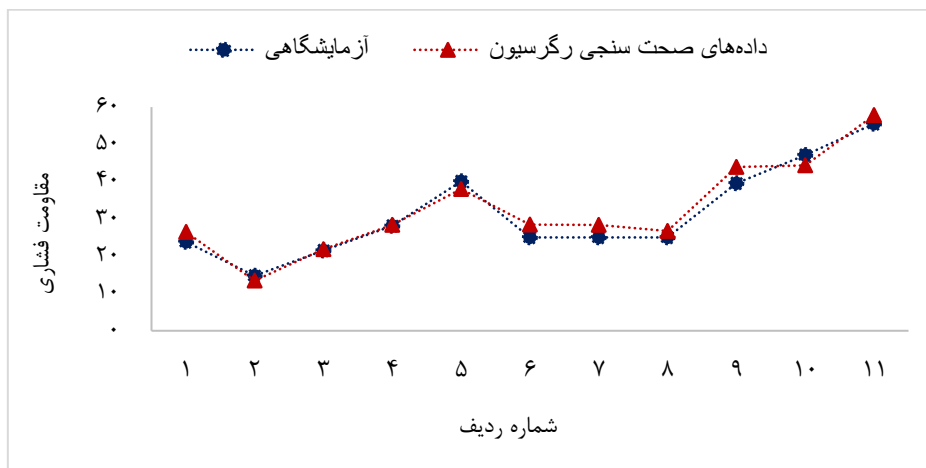
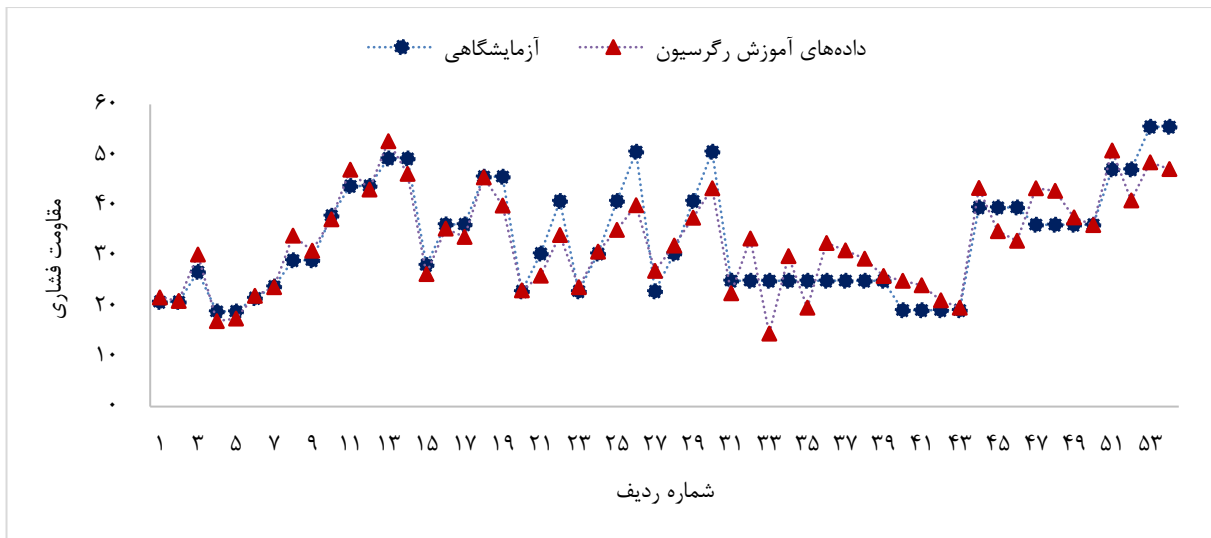
جدول ۲- مقایسه مدل‌های رگرسیون خطی و غیرخطی

مدل	خطی رابطه ۵	غیرخطی رابطه ۶	غیرخطی رابطه ۷
RMSE	۴/۰۴۹	۳/۴۸۲	۴/۷۴۴
ME	۳/۲۲	۲/۷۲۹	۳/۴۳
R	۰/۹۲۴	۰/۹۴۵	۰/۹۰۷





ب



ج

شکل ۱۷- مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و پیش‌بینی‌شده توسط (الف) شبکه عصبی، (ب) ANFIS، (ج) رگرسیون چندمتغیره خطی

پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن به روش بار نقطه‌ای پیشنهاد می‌شود. در این پژوهش، مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، ANFIS و رگرسیون چندمتغیره مورد ارزیابی قرار گرفتند.

۵- نتیجه‌گیری

برای صرفه‌جویی در هزینه، زمان و مصالح، روش‌های هوشمند مبتنی بر یادگیری از نمونه‌های موجود جهت

پیش‌بینی مقاومت بتن با روش بار نقطه‌ای، گزینه مناسبی باشد. در واقع هرچند مدل رگرسیون چندمتغیره دارای عملکرد نسبتاً ضعیف‌تری نسبت به دو مدل دیگر موردبررسی در تعیین مقاومت فشاری بتن به روش بار نقطه‌ای است، به دلیل سرعت اجرای بالا دارای قابلیت بالا در پیش‌بینی مقاومت بتن به روش بار نقطه‌ای می‌باشد.

نتیجه‌های این پژوهش می‌تواند به عنوان روش کم‌هزینه و سریع در پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن درجا با نتیجه آزمایش بار نقطه‌ای بر مبنای عامل‌های شاخص بار نقطه‌ای و ابعاد و مشخصات نمونه، مورد توجه قرار گیرد و سبب صرفه‌جویی در مصالح و هزینه‌ها شود.

این پژوهش به خوبی نشانگر عملکرد مطلوب روش‌های هوشمند مبتنی بر یادگیری برای برآورد مقاومت فشاری بتن به روش بار نقطه‌ای است. شایان توجه است که بررسی اعتبار نتایج به دست آمده برای بتن‌های مختلف و داده‌های خارج از محدوده داده شده این پژوهش نیاز به مطالعه بیشتری داشته، امکان حصول الگوی متفاوت نیز وجود دارد.

پس از تعیین ساختار بهینه هریک از مدل‌های موردبررسی با کمک معیار آماری میانگین مربعات خطا و ضریب رگرسیون، با به کارگیری نتیجه آزمایش‌های انجام شده موجود به تعیین مقاومت فشاری با کمک روش بار نقطه‌ای و آزمون مدل‌های پیشنهادی پرداخته شد. یافته‌های این پژوهش که بر پایه روش‌های انتخاب شده است، نشان داد که مقادیر مقاومت فشاری پیش‌بینی شده توسط هر سه مدل مورد بررسی دارای ضریب همبستگی خوبی با مشاهدات آزمایشگاهی است؛ اما مدل شبکه عصبی با ضریب همبستگی بالا و کمترین میانگین خطا از توانمندی مناسب تری نسبت به دو مدل دیگر در تعیین مقاومت بتن درجا با روش بار نقطه‌ای برخوردار است. از دلایل موفقیت آمیز بودن شبکه عصبی نسبت به ANFIS در پیش‌بینی مقاومت بتن به روش بار نقطه‌ای، می‌توان به قابلیت بالای مدل شبکه عصبی در ایجاد رابطه غیرخطی بین ورودی‌ها و خروجی اشاره کرد.

شایان ذکر است مدل رگرسیون چندمتغیره با سرعت اجرای بسیار بالاتر و عملکرد قابل قبول نیز می‌تواند در بحث

مراجع

- [۱] رحمت مدندوست، ملک محمد رنجبر و مونا اسلامی، «بررسی روش‌های غیرمخرب و نیمه‌مخرب در ارزیابی مقاومت بتن»، چهارمین کنفرانس ملی مهندسی عمران، تهران، دانشگاه تهران، ۱۳۸۷.
- [2] P.J. Robins, "Point load strength test for concrete cores", Magazine of Concrete Research, Vol. 32, No. 111, 1980, pp. 101-111.
- [3] D.N. Richardson, "Point load test for estimating concrete compressive strength", ACI Materials Journal, Vol. 86. No. 4, 1989, pp. 409-416.
- [4] A. Zacoeb, k. Ishibashi and Y. Ito, "Estimating the compressive strength of drilled concrete cores by point load testing", Proceeding of the 29th JCI Annual Meeting, Vol. 29, No. 1, 2007, pp. 525-530.
- [5] A. Zacoeb and K. Ishibashi, "Point load test application for estimating compressive strength of concrete structures from small core", Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 4. No. 7, 2009, pp. 46-57.
- [6] L. Selçuk and H. Süleyman Gökçe, "Estimation of the compressive strength of concrete under point load and its approach to strength criterions", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 19, No. 6, 2015, pp. 1767-1774.
- [۷] زینب فلاح زرجو بازکیایی، «مطالعه عددی و تجربی رفتار بتن تحت آزمایش بار نقطه‌ای»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه، رشت، دانشگاه گیلان، ۱۳۹۵.
- [8] R. Madandoust, Z.F.Z Bazkiyaei and M. Kazemi, "factor influencing point load tests on concrete", asian journal of civil engineering, Vol. 19. No. 8, 2018, pp. 937-947.
- [9] R. Madandoust, H. Bungey and R. ghavidel, "prediction of concrete compressive strength by means of core testing using GMDH-type neural network and ANFIS models", Computational Materials Science, Vol. 51, No. 1, 2012, pp. 261-272.
- [۱۰] محمد مهدی یوسفی و موسی مظلوم، «روش‌های ترکیب شبکه عصبی در پیش‌بینی نتایج آزمایش‌های روانی و مقاومتی بتن خودتراکم»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، سال ۱۲، شماره ۳۷، ۱۳۹۳، صفحه ۳۴-۳۹.

[۱۱] جواد احدیان و فاطمه بهروزی، «کاربرد سیستم تطبیقی ANFIS در تخمین پتانسیل تحکیم خاک‌های رسی»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، سال ۱۴، شماره ۴۵، ۱۳۹۵، صفحه ۱۷-۳۱.

[۱۲] علی حیدری، داود توگلی و پویان فخاریان، «تقریب مقادیر ویژه ورق با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، سال ۱۱، شماره ۳۵، ۱۳۹۲، صفحه ۴۹-۶۲.

[۱۳] محمدباقر منهاج، مبانی شبکه‌های عصبی (هوش محاسباتی)، مرکز نشر دانشگاه امیرکبیر، ایران، ۱۳۸۱.

[14] J.S. Jang, "adaptive-network-based fuzzy inference system", IEEE transactions on systems, Vol 23, No. 3, 1993, pp. 665-685.

[15] M.G. Schap, F.J. Leij and M.T. Genuchten, "neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties", Journal of Soil Science Society of America, Vol. 62, No. 4, 1998, pp. 847-855.