رویکردهای نوین در مهندسی عمران
دوره هفتم، شماره اول، ۱۴۰۲، صفحه: ۱۷-۳۰

بهینه سازی طرح اختلاط بتن سبک نسبتا مقاوم با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی

محمد امامی کورنده [*1]، فرزانه واشقانی فراهانی [2]

[*1] استادیار گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران (Emamiacademic@gmail.com)

[2] کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد صفادشت، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۰۴، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۲۸)

چکیده

امروزه بتن به عنوان اصلی‌ترین مصالح در ساخت سازه در کشور عزیزمان ایران به کار می‌رود. از اینرو انواع بتن از لحاظ رفتار، وزن و مقاومت توسط محققین مختلف تحقیق شده و دغدغه مهم محققین از دیرباز بوده است. بتن سبک، بتن پر مقاومت، بتن متخلل، بتن خود متراکم و ... نمونه‌هایی از این تحقیقات در زمینه مهندسی عمران هستند که در سالهای اخیر سالیانه مسابقات مختلف نیز در این زمینه برگزار شده است. تحقیق حاضر به بحث و بررسی در زمینه طرح اختلاط نوع خاصی از بتن نسبتا سبک و نسبتا مقاوم بوده است. هدف اصلی از این مقاله بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن مکعبی (۵*۵ سانتی‌متری) با استفاده از مدلهای شبکه عصبی مصنوعی است. برنامه آزمایشات در این تحقیق با ۲۰۰ طرح اختلاط در زمینه بتن مکعبی و تهیه بانک اطلاعاتی شروع شده و با کاربرد انواع ساختار شبکه عصبی چندلایه پرسپترون مدلسازی شده است. شاخصهای ارزیابی مورد استفاده در این تحقیق شامل ضریب رگرسیون (R) و میانگین مربعات خطا (MSE) هستند که از آنها برای معرفی ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده است. نتایج حاصل از مدلسازی بر پایه آزمونهای آزمایشگاهی انجام شده نشان دادند که ضریب همبستگی برای اکثر مدلها بیش از ۸۵ درصد حاصل شده است که بر اساس معیار اشمیت از کارایی مناسب شبکه عصبی مصنوعی حکایت دارد. همچنین شبه عصبی با دولایه پنهان ۸ نرونی با ضریب همبستگی میانگین ۹۳ درصد در سه مجموعه یادگیری، آموزشی و ارزیابی و شاخص خطای میانگین ۰/۱۸۲ به عنوان ساختار بهینه در مجموعه ساختارهای مورد استفاده انتخاب شده است.

کلمات کلیدی

بتن مکعبی، نیمه سبک، نسبتا مقاوم، شبکه عصبی مصنوعی، شاخص ارزیابی.

رویکردهای نوین در مهندسی عمران
دوره هفتم، شماره اول، ۱۴۰۲، صفحه: ۱۷-۳۰

Optimizing the Mix Design of Relatively Strength Lightweight Concrete Using the Artificial Neural Network Method

Mohammad Emami Korandeh [1*], Frazaneh Vasheghani Farahani [2]

*[*1] Assistant Professor, Department of Civil Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran (Emamiacademic@gmail.com)*

[2] M.Sc., Department of Civil Engineering, Safadasht Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

(Date of received: 23/02/2023, Date of accepted: 18/05/2023)

ABSTRACT

Today, concrete is used as the main material in the construction of structures in our beloved country of Iran. Therefore, various types of concrete have been researched by different researchers in terms of behavior, weight, and resistance, and have been an important concern of researchers for a long time. Lightweight concrete, high-strength concrete, porous concrete, self-compacting concrete, etc. are examples of this research in the field of civil engineering, which has been held in various competitions in recent years. The present research has been discussed in the field of mixing design of a specific type of relatively light and relatively resistant concrete. The main goal of this article is to optimize the cubic concrete mixing design (5x5 cm) using artificial neural network models. The experiment program in this research started with 200 mixing designs in the field of cubic concrete and preparing a database and it was modeled by using various perceptron multilayer neural network structures. The evaluation indices used in this research include the regression coefficient (R) and the mean square error (MSE), which have been used to introduce the optimal structure of the artificial neural network. The results of the modeling based on the laboratory tests showed that the correlation coefficient for most of the models is more than 85%, which indicates the appropriate efficiency of the artificial neural network based on the Schmidt criterion. Also, pseudo-neuron with double hidden layer of 8 neurons with an average correlation coefficient of 93% in three sets of learning, training and evaluation and an average error index of 0.182 has been selected as the optimal structure in the set of structures used.

Keywords:

Cube concrete, Semi-light, Relatively resistant, Artificial neural network, Evaluation index.

۱- مقدمه

بتن به‌عنوان مصالح ساختمانی قرن حاضر و پرمصرف‌ترین ماده بعد از آب و به‌ویژه بتن‌های سبک در صنعت ساخت و ساز روز به روز گسترش می‌یابد. سبک‌سازی و تولید مصالح سبک و در عین حال مقاوم، تحول عظیمی در صنعت ساختمان ایجاد نموده است. انواع بتن‌های سبک غیرسازه‌ای و سازه‌ای توانسته‌اند با داشتن خواص مناسبی نظیر سبکی وزن، عایق حرارتی، هزینه‌های کمتر تولید و حمل و نیز مقاومت کافی در برابر نیروهای زلزله جایگاه ویژه‌ای در صنعت ساختمان داشته باشند. تولید قطعات پیش‌ساخته و پیش‌تنیده با بتن سبک نیز توانسته است در صنعتی شدن ساختمان نقش مهمی را ایفا نماید. ابتدا تاریخچه مختصری از بتن‌های سبک در دنیا بیان شده و سپس انواع بتن‌های سبک سازه‌ای و غیرسازه‌ای آورده می شود. خواص فیزیکی، مقاومتی و دوام این بتن‌ها مورد بحث قرار خواهد گرفت. با توجه به اهمیت بتن‌های سبک سازه‌ای برای کشور زلزله‌خیز ایران، مختصری از کار تحقیقاتی انجام شده برای تولید این بتن‌ها ارائه خواهد شد. وحیدرضا کلات جاری و همکاران در سال ۱۳۸۷ تحقیقی در زمینه دست یابی به بتن سبک سازه ای و بتن سبک مقاومت بالا با حداقل وزن انجام دادند [۱]. در این تحقیق پس از ساخت ۴۸۰ نمونه استوانه ای استاندارد، ۱۲ طرح اختلاط حاصل گردید و مقاومت فشاری و وزن مخصوص آنها ملاک ارزیابی قرار گرفت. نتایج بدست آمده در محدوده مورد قبول آیین نامه ACI بوده و نشاندهنده امکان ساخت بتن سبک سازه ای و مقاومت بالا با حداقل وزن، با استفاده از مصالح موجود میباشد. در نهایت ارزیابی اقتصادی بر روی نمونه ها صورت پذیرفته است. علیرضا انتظاری و همکاران در سال ۱۳۸۹ به بررسی خصوصیات مکانیکی بتن سبک سازه ای پرداختند [۲]. در این تحقیق خصوصیات بتن سبک (LWAC) سازه ای ساخته شده با مصالح سبک منطقه آذربایجان ایران بررسی شده است. علی صدرممتازی و همکاران در سال ۱۳۹۱ به بررسی روابط طراحی تیر بتن مسلح سبک سازهای حاوی سبک دانه های رس منبسط شده و پلی استایرن منبسط شده پرداختند [۴]. در این مقاله تاثیر به کارگیری دو نوع مصالح سبک مصنوعی شامل رس منبسط شده در بتن خودتراکم ارزیابی شده و الزامات بتن خودتراکم در حالت تازه و امکان قرار گیری در ردهٔ ۲ پلی استایرن منبسط شده در بتن خودتراکم سبک سازه‌ای در حالت سخت شده، مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی ویژگی های مکانیکی پانل های پیش ساخته تولید شده با بتن سبک دانه الیافی تحقیق دیگری بود که توسط ناصری و همکاران در سال ۱۳۹۳ انجام شد [۵]. در این تحقیق مشخصات مکانیکی پانل های پیش ساخته بتن سبک دانه الیافی مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته و مناسب بودن این پانل ها برای کاربرد در ساخت عناصر ساختمانی به صورت پیش ساخته مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی خصوصیات مقاومتی و انتقالی بتن سبک خودتراکم حاوی الیاف پلی پروپیلن توسط اسماعیلی و همکاران در سال ۱۳۹۵ انجام شد. به کار بستن سنگدانه های سبک در ساخت بتن خودتراکم، موجب ایجاد خصوصیات بتن سبک و بتن خودتراکم در یک ماده ساختمانی به نام بتن سبک خودتراکم می گردد. مطالعات امکان سنجی سرباره حجم بالا به عنوان جایگزینی سیمان برای بتن پوسته نخل نفت سبک وزن ساختاری پایدار توسط هونگ مو و همکاران در سال ۲۰۱۵ انجام شد [۷]. این مقاله مطالعه‌ای را در مورد استفاده از سرباره با حجم بالا به عنوان ماده جایگزین سیمان و پوسته نخل (OPS) به عنوان یک سنگدانه سبک وزن برای تولید یک بتن سبک وزن پایدار (LWC) ارائه می کند. قاسم زاده و همکاران در سال ۱۳۹۵ در تحقیقی به بررسی تاثیر میکروسیلیس و نانوسیلیس بر خواص مکانیکی بتن سبک الیافی پرداختند [۸]. در این مطالعه هفده طرح مختلف تحت آزمایش های مقاومت مکانیکی و جذب آب و وزن مخصوص قرار گرفتند که نتایج به دست آمده درصد جایگزینی بهینه میکروسیلیس و نانوسیلیس را به ترتیب ۱۰ و ۳ درصد و تاثیر الیاف فولادی را بهتر از الیاف پلی پروپیلن بر خواص مکانیکی بتن سبک نشان می دهد. تولید یک بتن متراکم سبک وزن تازه توسط ترکیب حجم زیادی از مواد بازیافتی تحقیقی دیگر است که توسط فراهانی و همکاران در سال ۲۰۱۸ انجام شده است [۱۱]. این مقاله در مورد استفاده از پوسته درخت نخل به عنوان دانه های درشت و همچنین خاکستر بادی و پوسته برنج به عنوان مکمل مواد سیمانی برای تولید بتن سبک وزن سازگار با محیط زیست را گزارش می‌کند. ارزیابی عملی استفاده از بتن های سبک خودتراکم در احداث سازه های بتن آرمه تحقیق دیگری است که توسط پوراحمدی و همکاران در سال ۱۳۹۸ انجام شد [۱۲]. در این پژوهش، قابلیت حفظ همگن بودن مخلوط و مشخصات مکانیکی بتن سبک خودتراکم LWSCC ساخته شده با سبک دانه های رایج در کشور شامل اسکوریا، لیکا و پومیس در صورت استفاده کاربردی از آن

در ستون‌های بتن‌آرمه، به کمک روش های نیمه مخرب و غیرمخرب بررسی می‌شود. برای رسیدن به این هدف، ستون های بتن مسلح ساخته شده با بتن سبک خودتراکم، به کمک آزمایش نیمه مخرب مغزه‌گیری به منظور تعیین مقاومت فشاری و نفوذناپذیری و آزمایش غیر مخرب التراسونیک در ارتفاع های مختلف ستون‌ها، مورد بررسی قرار گرفته اند. ساجدی و همکاران در سال ۱۴۰۰ در تحقیقی به بررسی تاثیر آب مغناطیسی بر خواص رئولوژی و مکانیکی بتن های سبک پرداختند [۱۳]. در این مقاله پژوهش‌های انجام شده در مورد تاثیر آب مغناطیسی بر خواص ریولوژی و مکانیکی بتن های سبک مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. آنچه از مجموع بررسی‌ها حاصل شد، بیانگر آن است که استفاده از آب مغناطیسی باعث بهبود خواص مکانیکی بتن های سبک خواهد شد. بیشترین کارایی خمیر سیمان در نمونه های ساخته شده با آب مغناطیسی با چرخش ۶۵ دقیقه ای آب در میدان مغناطیسی با شدت ۱ تسلا، حاصل گردید. با توجه به آنکه بتن یکی از اصلی‌ترین مصالح در فرآیند ساخت و ساز در ایران است، هدف اصلی تحقیق حاضر به کاربرد روش شبکه عصبی مصنوعی در تهیه طرح اختلاط بتن نسبتا سبک و نسبتا مقاوم می‌پردازد. داده‌های مورد استفاده در این تحقیق از مجموعه آزمایشات انجام شده در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب استخراج شده است. بخش اول مقاله حاضر به مقدمه و مروری بر ادبیات فنی تحقیق پرداخته است. در بخش دوم این مقاله، به معرفی و تعریف بتن نسبتا سبک و نسبتا مقاوم پرداخته شده است. بخش سوم به بررسی روش شبکه عصبی مصنوعی پرداخته است. در بخش چهارم، بانک اطلاعاتی و شرایط مدلسازی بیان شده است. بخش پنجم به تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از مدلسازی پرداخته است.

۲- بتن نسبتا سبک و نسبتا مقاوم

بتن از دیرباز مورد توجه محققین مختلف بوده است. طرح اختلاط بتن همواره در فرآیند ساخت بتن تاثیرگذار است. در این مقاله هدف از بتن نسبتا سبک و نسبتا مقاوم، ساخت نمونه‌هایی است برای رسیدن به مقاومت مشخص و وزن مشخص. هدف وزنی این بتن برابر ۲۷۰ گرم و هدف مقاومتی آن ۵۰ مگاپاسکال می‌باشد. برنامه آزمایشات بر اساس قالبهای مکعبی ۵ در ۵ در ۵ سانتیمتری انتخاب شده است. شکل (۱) نمونه‌های ساخت شده در این برنامه آزمایشات را نشان می‌دهد.

شکل ۱: نمونه‌های مکعبی ساخته شده.

۲-۱- مصالح

با توجه به هدف از ساخت بتن در این تحقیق، از سنگدانه‌های مختلفی استفاده شده است. همچنین از افزودنی‌هایی مانند روان کننده و میکروسیلیس نیز بهره گرفته شده است. سنگدانه‌هایی مانند گرانیت، سیلیس، قروه، بازالت و پرلیت در این طرح مورد استفاده قرار گرفتند. شکل (۲) تصویری از آماده سازی مصالح جهت طرح اختلاط را نشان می‌دهد.

شکل ۲: مصالح مورد استفاده در ساخت بتن.

۲-۲- *طرح اختلاط*

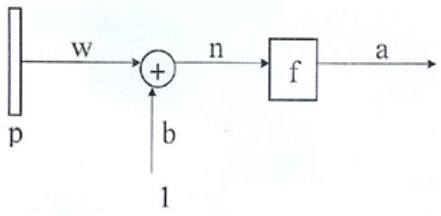
جهت رسیدن به وزن و مقاومت مورد نظر در این تحقیق، بیش از ۲۰۰ طرح اختلاط مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. بر این اساس با تغییر مقادیر وزنی مصالح مختلف سعی بر این شد تا بهترین طرح جهت رسیدن به مقاومت ۷ روزه ۵۰ مگاپاسکال تعیین گردد. در شکل (۳) نمونه‌ای مکعبی از بتن ساخته شده نشان داده شده است.

شکل ۳: نمونه ای مکعبی با وزن مشخص روی ترازو.

۳- شبکه عصبی مصنوعی

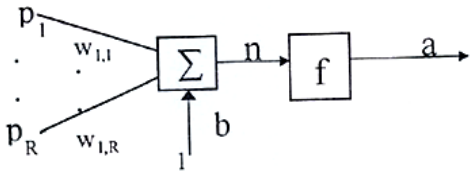
شبکه‌های عصبی چه در بعد آنالیز و توسعه ساختاری و چه در بعد پیاده‌سازی سخت‌افزاری، از نظر کمی، کیفی و توانایی، در حال رشد و پیشرفت می‌باشند و تکنیکهای مختلفی از محاسبات عصبی همچنان در حال افزایش هستند. دراین بخش به معنای شبکه‌های عصبی، حدود انتظارات از این شبکه‌ها و شباهتهای آنها با شبکه‌های واقعی پرداخته شده است. هنگامی‌که این جمله را مطالعه می‌کنید از مغز بعنوان یک سیستم شبکه‌های عصبی بیولوژیکی پیچیده جهت فهم مطالب استفاده می‌کنید. از مغز بعنوان یک سیستم پردازش اطلاعات با ساختار موازی و کاملاً پیچیده که دودرصد وزن بدن را تشکیل داده و بیست درصد اکسیژن بدن را مصرف می‌کند برای خواندن، حرکت، نوشتن و کلیه اعمال آگاهانه و بسیاری از رفتارهای ناخودآگاه استفاده می‌شود. برای واضح شدن این موضوع یک بازی تنیس را درنظر بگیرید. بازیکن اول با سرعتی بیش از ۱۳۰کیلومتردرساعت به توپ ضربه می‌زند و بازیکن دوم نیز با سرعتی معادل ۶۰کیلومتردرساعت به توپ ارسالی پاسخ می‌دهد. تصورنمایید چه حجم عظیمی از اطلاعات و سیگنالها جهت این کار و طی زمانی کمتر از چندصدم ثانیه بایستی در مغز پردازش شود. این که مغز چگونه قادر به انجام این کار است از

زمانی مطرح شد که دریافتند، مغز برای محاسبات خود، از ساختاری کاملاً مغایر با ساختار کامپیوترهای متداول استفاده می‌کند. تلاش برای فهم این موضوع از سال ۱۹۱۱ قوت گرفت، زمانی که برای نخستین بار شخصی به نام سگال[1] اعلام کرد که مغز از عناصر اصلی ساختاری به نام نورون[2] تشکیل یافته است. شکل (۴) ساختار یک نورون تک‌ورودی را نشان می‌دهد. اسکالرهای a و p به‌ترتیب خروجی و ورودی هستند.



شکل ۴: مدل نورون تک‌ورودی.

عموماً یک نورون بیش از یک ورودی دارد. شکل (۵) یک نورون با R ورودی را ارایه می‌دهد. بردار ورودی با P نمایش داده می‌شود. اسکالرهای $P_i(i=1,2,...,R)$ عناصر بردار P هستند. مجموعه سیناپسهای $W_{1,i}$،عناصر ماتریس وزن w را تشکیل می‌دهند. در این حالت w یک بردار سطری با عناصر $j=1,....,R$ و $W_{1,j}$ است. هرعنصر از بردار ورودی p در عنصر متناظر از w ضرب می‌شود. نورون یک جمله بایاس b دارد که با حاصل‌ضرب ماتریس وزن w با بردار ورودی p جمع می‌شود.



شکل ۵: مدل چند ورودی یک نورون.

۳-۱- شبکه عصبی چندلایه پرسپترون (MLP)

پرکاربردترین معماری شبکه‌های عصبی، شبکه‌های چند لایه پیشخور (Feed Forward) هستند که معمولاً شبکه‌های چند لایه‌ای پرسپترون و به طور اختصار MLP (Multi Layer Perceptron) گویند. این نوع شبکه‌ها دارای مشخصات زیر هستند:

پردازنده‌های شبکه به چند لایه مختلف تقسیم می‌شوند.

۱- حداقل تعداد لایه‌ها در این شبکه‌ها، ۲ است.

۲- پردازنده‌های هر لایه فقط مجاز به دریافت سیگنال از پردازنده‌های لایه قبل خود هستند و سیگنال خروجی این پردازنده نیز به پردازنده‌های بعدی اعمال می‌شود.

۳- در این شبکه‌ها به لایه اول، ورودی، به لایه آخر، خروجی و به لایه‌های میانی، لایه‌های پنهان می‌گویند. ورودی‌های شبکه پارامترهای مؤثر در تعیین خروجیها هستند. بنابراین تعداد گره‌های لایه ورودی و خروجی در حقیقت از همان آغاز استفاده از شبکه معلوم است. تعداد گره‌های لایه پنهان و همچنین تعداد لایه‌های پنهان از طریق سعی و خطا بدست می‌آید. در حقیقت تعداد مناسب گره‌ها و لایه‌های پنهان، وقتی به دست می‌آید که شبکه بهترین جواب را ارائه دهد. دو روش عمده تخریبی و سازنده وجود دارد. در

[1] Segal
[2] Neuron

روش اول، شبکه‌ای با تعداد زیادی گره و لایه شروع می‌گردد و با حذف واحدهای اضافی و اتصالات مربوط به ساختار بهینه شبکه نزدیک می‌شوند و در روش دوم با یک شبکه ساده با گره‌های پنهان کم شروع کرده با افزایش گره‌ها، تا حد کمترین خطا پیش می‌روند. در اکثر مواقع به منظور پردازش مناسب اطلاعات وجود یک یا دو لایهٔ پنهان کافی است. تعداد گره‌ها در لایه پنهان معمولاً بین نصف تا دو یا سه برابر تعدادگره‌های لایه ورودی است.

۴- بانک اطلاعاتی

برنامه آزمایشات جهت تکمیل بانک اطلاعاتی تهیه شد. بر اساس این برنامه ۲۰۰ نمونه مکعبی بتنی با ابعاد ۵ در ۵ در ۵ سانتی‌متری ساخته شد و طرح اختلاط آن ثبت گردید. پس از گذشت ۷ روز از ساخت نمونه و عمل‌آوری آن در شرایط استاندارد نمونه تحت آزمایش شکست قرار گرفت. بانک اطلاعاتی مطابق جدول (۱) برای این مجموعه آزمایشات جمع‌آوری شد. پارامترهای ورودی و خروجی بر این اساس انتخاب شدند که سنگدانه‌های سنگین (گرانیت و سیلیس)، سنگدانه متوسط وزن (بازالت و قروه) و سنگدانه سبک (لیکا و پرلیت) به عنوان پارامترهای ورودی انتخاب شدند. سعی بر این شده است با این فرضیات تعداد پارامترهای ورودی کاهش یابد تا با داده‌های موجود شبکه عصبی در مدلسازی همگرایی مناسبتری داشته باشد. وزن آب و سیمان هم به عنوان پارامترهای ورودی دیگر انتخاب شدند. بنابراین پنج پارامتر ورودی سنگدانه سنگین Heavyweight Aggregate (HA)، سنگدانه متوسط Mediumweight Aggregate (MA)، سنگدانه سبک Lightweight Aggregate (LA)، سیمان (C) و آب (W) می‌باشند. پارامترهای خروجی نیز شامل دو پارامتر مقاومت فشاری ۷ روزه (Fc) و وزن نمونه (M) در نظر گرفته شده است.

جدول ۱: نمونه‌ای از بانک اطلاعاتی ورودی و خروجی.

Output Parameter		Input Parameters				
F_c (mPa)	M (gr)	HA (gr)	MA (gr)	LA (gr)	C (gr)	W (gr)
200	182	50	112	50	62	25
210	190	55	100	45	65	26
524	267	53	100	25	85	24
267	280	59	103	26	82	27
230	286	115	100	5	84	18
280	293	120	103	8	83	20
270	257	95	70	15	86	19
364	260	97	75	17	90	21
372	277	135	46	15	80	21
385	280	136	45	16	84	23
450	235	125	10	10	90	24
455	240	128	12	8	92	25
325	261	135	11	11	100	26
356	265	140	15	18	102	28
580	278	100	68	20	135	33
760	279	103	72	23	138	37
830	297	157	44	5	90	22
825	305	160	46	8	93	26
677	287	141	60	6	90	25
671	292	143	63	9	95	27

۴-۱- شاخص های ارزیابی

برای ارزیابی کارایی مدلهای شبکه عصبی مورد استفاده نیاز به شاخصهای است که بتوان کارکرد مدلها را در مقایسه با مجموعه داده‌ها و همچنین نتایج تجربی مورد قضاوت قرار داد. از اینرو از شاخصهای زیر جهت ارزیابی مدلها و در نهایت مقایسه کارایی آنها نسبت به یکدیگر استفاده شده است:

- ضریب همبستگی[3] (R): درجه ارتباط بین دو متغیر بوسیله این پارامتر نشان داده می‌شود. ضریب همبستگی بین دو متغیر x و y به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \qquad (۱)$$

که در این رابطه $\bar{x}$ و $\bar{y}$ به ترتیب میانگین x و y در مجموع داده‌ها هستند. مقادیر بالای این ضریب نشاندهنده ارتباط قوی بین متغیرها در دو مجموعه داده است و در مقابل مقدار پایین R ارتباط ضعیف و یا عدم ارتباط بین دو مجموعه را نشان می‌دهد. اسمیت[4] (۱۹۸۶) محدوده ذیل را برای ارزیابی ضریب همبستگی بین صفر و یک پیشنهاد کرد.

$\|R\| \geq 0.8$	همبستگی قوی بین دو دسته متغیر وجود دارد	(۲)
$0.2 < \|R\| < 0.8$	همبستگی بین دو دسته متغیر وجود دارد	(۳)
$\|R\| < 0.2$	همبستگی بسیار ضعیف بین دو دسته متغیر وجود دارد	(۴)

در این تحقیق از R جهت ارزیابی همبستگی بین جوابهای حاصل از مدلهای مبتنی بر شبکه چندلایه پرسپترون استفاده شده است.

- میانگین مربعات خطا[5] (MSE): این شاخص نیز بیانگر متوسط مقدار خطا، تفاوت مقدار بدست آمده از آزمایشها و مدلها است، با این تفاوت که تمرکز بیشتری روی خطاهای بزرگتر دارد. رابطه (۵) نشاندهنده این شاخص است.

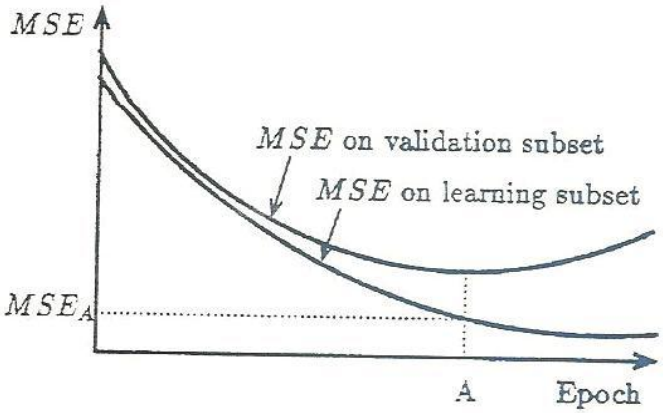
$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (E_i)^2 \qquad (۵)$$

۴-۲- روش *Cross Validation*

زمانیکه شبکه در حال آموزش است، در واقع نگاشت بین ورودی و خروجی پیچیده و پیچیده‌تر می‌شود. در واقع فرآیند یادگیری شبکه دارای دو مرحله است. در مرحله اول شبکه داده‌های آموزشی را می‌آموزد و در واقع در جهت افزایش قدرت تعمیم پیش می‌رود و در مرحله دوم شبکه شروع به از بر کردن داده‌های آموزشی می‌کند که به نوبه خود قدرت تعمیم شبکه را کاهش می‌دهد. روش Cross Validation روشی است برای متوقف کردن آموزش در انتهای مرحله اول آن. این روش بانک اطلاعاتی مورد استفاده را به

[3] Cofficient of correlation
[4] Smith
[5] Root Mean Square Error

سه زیر مجموعه آموزشی[۶]، آزمایشی[۷] و ارزیابی[۸] تقسیم می‌کند. شبکه توسط مجموعه داده‌های آموزشی، آموزش داده شده و خطای شبکه برای داده‌های آموزشی و ارزیابی به طور همزمان مورد بررسی قرار می‌گیرد و با توجه به خطای داده‌های ارزیابی آموزش شبکه متوقف می‌گردد (شکل ۶). به عبارت دیگر زمانی که خطا برای داده‌های ارزیابی افزایش یابد، با وجود کاهش خطا برای داده‌های آموزشی، شبکه شروع به از بر کردن داده‌های آموزشی کرده است و در این مرحله آموزش شبکه متوقف شده و شبکه در مقابل مجموعه آزمایش مورد قضاوت نهایی قرار می‌گیرد.



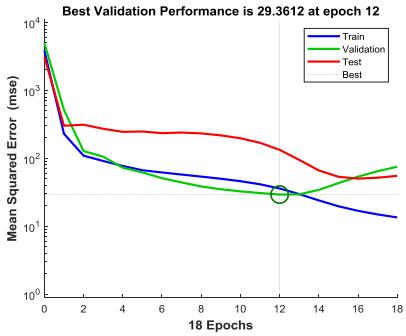
شکل ۶: خطا برای مجموعه‌های آموزشی و ارزیابی.

۵- پیاده سازی شبکه عصبی

برای پیاده‌سازی شبکه‌های عصبی مورد استفاده، آموزش و ارزیابی آنها از جعبه ابزار شبکه عصبی MATLAB 9.5 (20018b) استفاده شده است. این نرم‌افزار با توجه به توابع متعدد، قابلیت برنامه‌نویسی، الگوریتمهای آموزشی و ساختارهای متعدد برای شبکه‌های عصبی و قدرت پردازش و تحلیلهای آماری در حل مسایل مهندسی بسیار مورد توجه محققین بوده است.

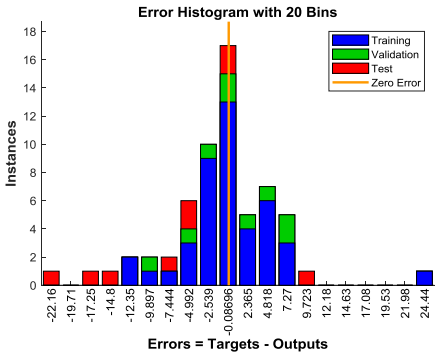
- شبکه عصبی پرسپترون چندلایه- آموزش و توقف آموزش: همانطور که گفته شد، از شبکه‌های دو و سه لایه پرسپترون با تعداد لایه‌های پنهان متفاوت استفاده شده است. باتوجه به مزیتهای روش ML، این روش مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق ضرایب روش ML، μ و β با توجه به مقادیر پیش‌فرض MATLAB به ترتیب ۰/۰۰۱ و ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است. همچنین برای بالا بردن قدرت تعمیم شبکه از روش Cross-Validation برای توقف آموزش استفاده شده است. در همین راستا بانک اطلاعاتی به سه مجموعه آموزشی، ارزیابی و آزمایشی تقسیم شده است. تمام شاخصهای ارزیابی جهت ارزیابی کارایی و دقت شبکه‌های چندلایه پرسپترون استفاده شده است. تعداد ۸۵ داده برای آموزش، ۱۸ داده برای مجموعه ارزیابی و تعداد ۱۸ داده برای مجموعه آزمایشی استفاده شده است. در شکل (۷) منحنی آموزشی برای شبکه MLP1 با یک لایه پنهان نشان داده شده است. پس از پایان آموزش مقادیر وزنها ذخیره شده و شبکه مورد نظر آماده است.

[6] Training Subset
[7] Testing Subset
[8] Validation Subset

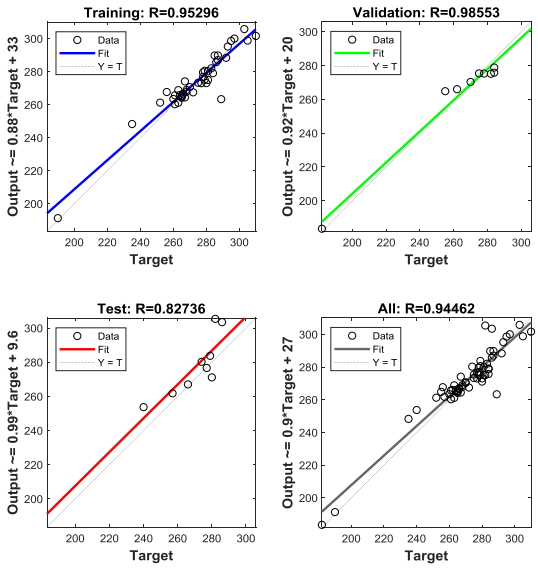


شکل ۷: منحنی آموزش شبکه عصبی به روش توقف آموزش.

همچنین نمودار هیستوگرام خطا و شکل رگرسیون داده‌های در فرآیندهای آموزش، آزمایش و اعتبارسنجی در شکلهای (۸) و (۹) نشان داده شده است.



شکل۸: هیستوگرام خطا برای شبکه عصبی MLP.



شکل ۹: مقادیر رگرسیون (همبستگی) برای حالتهای مختلف شبکه عصبی MLP .

در دو مدل شبکه عصبی چندلایه پرسپترون MLP1 و MLP2 از تعداد یک و دولایه پنهان استفاده شده است. به عنوان توابع فعالیت در لایه‌های پنهان از تابع تانژانت هیپربولیک و برای لایه خروجی از تابع سیگموید استفاده شده است. از آنجایی که تعداد نرونهای لایه پنهان در رفتار این شبکه‌ها نقش عمده‌ای دارد، مطالعه برروی عملکرد این شبکه‌ها با تعداد نرونهای متفاوت به روش ذیل انجام شده است. جهت انتخاب ساختار بهینه از نتایج مقادیر شاخصهای ارزیابی ارایه شده در جدول (۲) استفاده شده است. مجموعه ارزیابی به عنون بخشی از داده‌های تجربه نشده که در کنترل فرآیند آموزشی استفاده نشده است، می‌تواند توأماً نشاندهنده قدرت شبیه‌سازی شبکه (در مقابل داده‌های تجربه شده آموزشی) و قدرت پیش‌بینی شبکه (در مقابل داده‌های تجربه نشده آزمایشی و ارزیابی) در بررسیهای اولیه باشد. از این رو ابتدا کارکرد شبکه‌های آموزش دیده با تعداد نرونهای میانی متفاوت در مقابل این داده‌ها با توجه به شاخصهای خطا مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای انتخاب دقیق‌تر، شبکه‌هایی که در مقابل داده‌های ارزیابی عملکرد خوبی نشان داده‌اند، در مقابل مجموعه آزمایشی و آموزشی نیز مورد مطالعه قرار می‌گیرند و در نهایت هر شبکه‌ای که بهترین کارایی را در شبیه‌سازی (در مقابل مجموعه آموزشی) و در پیش‌بینی (در مقابل مجموعه ارزیابی و آزمایشی) از خود نشان دهد، به عنوان شبکه دارای تعداد نرونهای بهینه انتخاب می‌گردد.

جدول۲: مقایسه بین ساختارهای بهینه شبکه‌های MLP.

Validation Subset				
Networks	Num. of neurons		R	MSE
MLP1	5		0.84	0.167
	8		0.92	0.112
	10		0.86	0.253
MLP2	5	5	0.84	0.161
	8	8	0.93	0.113
	10	10	0.91	0.156
Training Subset				
MLP1	5		0.88	0.356
	8		0.91	0.155
	10		0.85	0.421
MLP2	5	5	0.84	0.322
	8	8	0.94	0.222
	10	10	0.92	0.235
Testing Subset				
MLP1	5		0.81	0.179
	8		0.88	0.215
	10		0.83	0.281
MLP2	5	5	0.86	0.355
	8	8	0.92	0.163
	10	10	0.90	0.213

پس از انتخاب تعداد نرونهای بهینه برای هر دو ساختار، این دو ساختار نیز با استفاده از شاخصهای خطا با هم مقایسه شده و ساختار مناسب هر مدل انتخاب می‌شود. در مرحله بعد نیز مدلها با توجه به ساختار بهینه هر مدل با هم مقایسه می‌شوند. در قضاوت در مورد عملکرد و کارایی مدلها از دو دسته شاخص استفاده شده است: ضریب همبستگی (R) و شاخصهای مقدار خطا (MSE). شبکه و مدلی دارای کارایی بهتر در مجموعه مورد نظر است که دارای ضریب همبستگی و شاخصهای خطای مناسبتری باشد. برای قضاوت درباره ضریب همبستگی، از محدوده اسمیت (۱۹۸۶) استفاده شده است. به عنوان مثال اگر $R \leq 0.8$ برای هر کدام از مجموعه‌های سه‌گانه آموزشی، ارزیابی و آزمایشی بدست آید، شبکه کارایی خوبی در آن مجموعه داده ندارد. تمام شبکه‌ها عملکرد نسبتاً قابل قبولی از خود نشان می‌دهند. به این ترتیب ۵ شبکه با تعداد ۵، ۸، ۱۰ نرون تک لایه پنهان و ۵ و ۸ نرونی در دو لایه پنهان که

عملکرد بهتری دارند انتخاب شده‌اند. این چهار شبکه در مقابل مجموعه آموزشی و آزمایشی مورد ارزیابی قرار گرفته و در انتها شبکه با دو لایه پنهان ۸ نرونی با شاخصهای همبستگی و مقدار خطای بهتر در مجموعه آموزشی، ضریب همبستگی بهتر در مجموعه ارزیابی و آموزشی، MSE بهتر در مجموعه‌های ارزیابی و آزمایشی و با وجود مقدار بیشینه خطای بیشتر در مجموعه ارزیابی در مجموع نسبت به ساختارهای دیگر شبکه به عنوان بهترین ساختار مدل MLP انتخاب شده است.

۶- جمع بندی و نتیجه گیری

بتن به‌عنوان مصالح ساختمانی قرن حاضر و پرمصرف‌ترین ماده بعد از آب و به‌ویژه بتن‌های سبک در صنعت ساخت و ساز روز به روز گسترش می‌یابد. سبک‌سازی و تولید مصالح سبک و در عین حال مقاوم، تحول عظیمی در صنعت ساختمان ایجاد نموده است. بتن از دیرباز مورد توجه محققین مختلف بوده است. طرح مخلوط بتن همواره در فرآیند ساخت بتن تاثیرگذار است. در این مقاله هدف از بتن نیمه سبک و نسبتا مقاوم، ساخت نمونه‌هایی است برای رسیدن به مقاومت مشخص و وزن مشخص. هدف وزنی این بتن برابر ۲۷۰ گرم و هدف مقاومتی آن ۵۰ مگاپاسکال می‌باشد. برنامه آزمایشات بر اساس قالبهای مکعبی ۵ در ۵ در ۵ سانتیمتری انتخاب شده است. با توجه به هدف از ساخت بتن در این تحقیق، از سنگدانه‌های مختلفی استفاده شده است. همچنین از افزودنی‌هایی مانند روان کننده و میکروسیلیس نیز بهره گرفته شده است. سنگدانه‌هایی مانند گرانیت، سیلیس، قروه، بازالت و پرلیت در این طرح مورد استفاده قرار گرفتند. جهت رسیدن به وزن و مقاومت مورد نظر در این تحقیق، بیش از ۲۰۰ طرح اختلاط مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. بر این اساس با تغییر مقادیر وزنی مصالح مختلف سعی بر این شد تا بهترین طرح جهت رسیدن به مقاومت ۷ روزه ۵۰ مگاپاسکال تعیین گردد. برنامه آزمایشات جهت تکمیل بانک اطلاعاتی تهیه شد. بر اساس این برنامه ۲۰۰ نمونه مکعبی بتنی با ابعاد ۵ در ۵ در ۵ سانتی‌متری ساخته شد و طرح اختلاط آن ثبت گردید. پس از گذشت ۷ روز از ساخت نمونه و عمل‌آوری آن در شرایط استاندارد نمونه تحت آزمایش شکست قرار گرفت. پارامترهای ورودی و خروجی بر این اساس انتخاب شدند که سنگدانه‌های سنگین (گرانیت و سیلیس)، سنگدانه متوسط وزن (بازالت و قروه) و سنگدانه سبک (لیکا و پرلیت) به عنوان پارامترهای ورودی انتخاب شدند. سعی بر این شده است با این فرضیات تعداد پارامترهای ورودی کاهش یابد تا با داده‌های موجود شبکه عصبی در مدلسازی همگرایی مناسبتری داشته باشد. وزن آب و سیمان هم به عنوان پارامترهای ورودی دیگر انتخاب شدند. بنابراین پنج پارامتر ورودی سنگدانه سنگین Heavyweight Aggregate (HA)، سنگدانه متوسط Mediumweight Aggregate (MA)، سنگدانه سبک Lightweight Aggregate (LA)، سیمان (C) و آب (W) می‌باشند. پارامترهای خروجی نیز شامل دو پارامتر مقاومت فشاری ۷ روزه (Fc) و وزن نمونه (M) در نظر گرفته شده است. برای پیاده‌سازی شبکه‌های عصبی مورد استفاده، آموزش و ارزیابی آنها از جعبه ابزار شبکه عصبی MATLAB 9.5 (20018b) استفاده شده است. جهت معرفی ساختارهای بهینه در این تحقیق از روش سیکلی در کدنویسی شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده است. همچنین روش یادگیری با الگوریتم توقف آموزش Cross Validation جهت بهبود خاصیت تعمیم شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده است. پس از اتمام معرفی ساختارهای بهینه سه ساختار از شبکه عصبی تک لایه پرسپترون و سه ساختار از شبکه عصبی چند لایه پرسپترون به عنوان ساختارهایی با کارایی موفق‌تر در مدلسازی پدیده حاضر انتخاب شدند که در جدول (۲) ارایه شده است. نتایج این جدول نشان دادند که:

۱- ضریب رگرسیون (R) بالای ۸۵ درصد در این مدلها نشان دهنده کارایی مناسب روش شبکه عصبی مصنوعی در مدلسازی طرح مخلوط حاضر است.

۲- شبکه عصبی مصنوعی با دولایه پنهان ۸ نرونی بهترین کارایی را بر اساس ضریب رگرسیون در سه مجموعه یادگیری، آزمایشی و ارزیابی از خود نشان داده است.

۳- شاخص خطا نیز در جدول (۲) گزارش شده و در این شاخص نیز مشاهده می‌گردد که شبکه دولایه پرسپترون با ۸ نرون با میانگین ۰/۱۸۲ بهترین عملکرد را داشته است.

۷- مراجع

۱- کلات جاری، و.، و منصوریان، پ.، ۱۳۸۷، **دست یابی به بتن سبک سازه ای و بتن سبک مقاومت بالا با حداقل وزن**، نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید (فارسی)(نشریه بین المللی علوم مهندسی)، ۱۹، ۹، (ویژه نامه مهندسی معدن، مواد و عمران))، ۹۵-۱۰۱. https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=97982

۲- انتظاری، ع.، و اسماعیلی، ج.، ۱۳۸۹، **بررسی خصوصیات مکانیکی بتن سبک سازه ای. مهندسی عمران و محیط زیست** (دانشکده فنی)، ۴۰، ۲ (پیاپی ۶۲))، ۱-۱۲. https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=220302

۳- صدرممتازی، ع.، و نصرتی، ح.، ۱۳۹۱، **بررسی روابط طراحی تیر بتن مسلح سبک سازهای حاوی سبک دانه های رس منبسط شده و پلی استایرن منبسط شده**، تحقیقات بتن، ۵، ۲، ۶۹-۸۳. https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=218809

۴- اسماعیلی، ج.، و کسایی، ج.، و رستمی مهر، ع.، و آتش فراز، ب.، ۱۳۹۵، **بررسی خصوصیات مقاومتی و انتقالی بتن سبک خودتراکم حاوی الیاف پلی پروپیلن**.، تحقیقات بتن،۹، ۱، ۳۹-۵۵. https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=284630

5-Emami M., 2014, **Modelling and Prediction of Coarse Grained Alluvium behavior by pressuremeter test results and Laboratory chamber**, Doctoral Dissertation, Tarbiat Modares University, Tehran. Iran

6- Emami M., 2009, **Application of artifitial neural networks in pressuremeter test results**, Master of Science thesis, Tarbiat Modares University. Tehran. Iran.

7- Kim Hung Mo, U. Johnson Alengaram, Mohd Zamin Jumaat, Soon Poh Yap, 2019, **Feasibility study of high volume slag as cement replacement for sustainable structural lightweight oil palm shell concrete**, Journal of Cleaner Production, 91, 297-304, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.021.

۸- قاسم زاده موسوی نژاد، س.، و قربانی شمشادسرا، ی.، ۱۳۹۷، **تاثیر میکروسیلیس و نانوسیلیس بر خواص مکانیکی بتن سبک الیافی**، مهندسی عمران (دانشکده مهندسی)، ۳۱، ۲ (پیاپی ۲۲)، ۱۲۹-۱۴۱ . https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=475025

9- Emami, M. and Yasrobi, S.S., 2014., **Modeling and interpretation of pressuremeter test results with artificial neural networks**, Geotechnical and Geological Engineering, 32, 2, 375-389.

10- Yasrebi, S. S., Emami, M., 2008, **Application of Artificial Neural Networks (ANNs) in prediction and interpretation of pressuremeter test results**, InThe 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG) 2008 Oct 1 (1634-1638).

11-Nodeh Farahani, J., Shafigh, P., and Bin Mahmud, H., 2017, **Production of A Green Lightweight Aggregate Concrete by Incorporating High Volume Locally Available Waste Materials**, Procedia Engineering,184, 778-783. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.158.

۱۲- پوراحمدی صفت عربانی، ح.، و صدرممتازی، ع.، و میر گذار لنگرودی، م.، و عمویی، م.، و کهنی خشکبیجاری، ر.، ۱۳۹۸، **ارزیابی عملی استفاده از بتن های سبک خودتراکم در احداث سازه های بتن آرمه**، مهندسی سازه و ساخت، ۶(ویژه نامه ۳ (پیاپی ۲۸))، ۱۹۳-۲۰۴. https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=571336

۱۳- ساجدی، س.، و هلاکویی، ح.، ۱۴۰۰، **بررسی تاثیر آب مغناطیسی بر خواص رئولوژی و مکانیکی بتن های سبک**، مهندسی سازه و ساخت، ۸(۳)، ۲۸۱-۲۹۹. https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=571497

14-Emami, M., and Yasrobi, S. S., 2012, **Modelling of pressuremeter tests with artifitial neural networks**, Sharif Journal of Civil Engineering.

۱۵- امامی کورنده، م.، نوربخش، س. ن.، ۱۳۹۹، **بهینه سازی وزن سازه فولادی به کمک روش شبکه عصبی مصنوعی**، رویکردهای نوین در مهندسی عمران، ۴، ۴، ۶۳- ۷۷.

۱۶- امامی کورنده، م.، عسگری، ب.، ۱۴۰۱، **بررسی پارامترهای تاثیرگذار بر پدیده فروپاشی پیشرونده در سازه های فولادی به کمک شبکه عصبی مصنوعی**، رویکردهای نوین در مهندسی عمران، ۶، ۲، ۲۷- ۴۴.