



مدلسازی طرح اختلاط بتن متخلخل با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

محمد امامی کورنده^{۱*}، سید عظیم حسینی^۱، علیرضا صبوری املشی^۲

^{۱*} استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۲ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

(Emamiacademic@gmail.com)

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۲۵، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۱۵)

چکیده

بتن پرکاربردترین مصالح در صنعت ساخت و ساز کشور به شمار می‌رود. بتن متخلخل نیز به جهت دارا بودن خواص خاص مانند نفوذپذیری بالا همواره مورد توجه محققین قرار داشته است. مقاله حاضر به تعیین طرح مخلوط بتن متخلخل با مقاومت مشخص بر پایه برنامه آزمایشگاهی و مدلسازی به روش استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پرداخته است. برنامه آزمایشات در این تحقیق با ۲۰۰ طرح اختلاط در زمینه بتن متخلخل استوانه‌ای و تهیه بانک اطلاعاتی شروع شده و با کاربرد انواع شبکه عصبی چند لایه پرسپترون (MLP) مدلسازی شده است. شاخصهای ارزیابی شامل ضریب رگرسیون و میانگین مربعات خطا برای بررسی کارایی ساختارهای شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده است. نتایج نشان دادند که ضریب رگرسیون حاصل در اکثر ساختارهای به کار رفته بالای ۸۵ درصد بوده و در شبکه عصبی با ساختار بهینه برابر ۹۵ درصد به دست آمده است. همچنین شاخص خطای مورد ارزیابی در شبکه عصبی با ساختار بهینه ۰/۱۲۱ تعیین شده است.

کلمات کلیدی

بتن متخلخل، شبکه عصبی مصنوعی، چند لایه پرسپترون، شاخص خطا.



Modeling of Porous Concrete Mixing Plan using Artificial Neural Network

Mohammad Emami Korandeh ^{1*}, Seyed Azim Hosseini ¹, Alireza Sabouri Amlashi ²

^{1*} Assistant Professor, Department of Civil Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

² M.Sc., Department of Civil Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

(Emamiacademic@gmail.com)

(Date of received: 16/09/2023, Date of accepted: 06/11/2023)

ABSTRACT

Concrete is the most widely used material in the construction industry of the country. Porous concrete has always been the focus of researchers due to its special properties such as high permeability. The present article has determined the design of porous concrete mix with specific strength based on the laboratory program and modeling by using artificial neural network. The experiment program in this research started with 200 mixing plans in the field of porous cylindrical concrete and preparing a database and it was modeled by using different types of multilayer perceptron neural network (MLP). Evaluation indices including regression coefficient and mean square error have been used to check the efficiency of artificial neural network structures. The results showed that the regression coefficient in most of the structures used was above 85% and in the neural network with the optimal structure it was 95%. Also, the evaluated error index in the neural network with optimal structure is determined to be 0.121.

Keywords:

Porous concrete, Artificial neural network, Multilayer perceptron, Error index.



بتن به عنوان 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 می‌شود. 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 دست‌یابی به بتن سبک سازه‌ای و بتن سبک مقاومت بالا با حداقل وزن انجام دادند [۱]. در این تحقیق پس از ساخت ۴۸۰ نمونه استوانه‌ای استاندارد، ۱۲ طرح اختلاط حاصل گردید و مقاومت فشاری و وزن مخصوص آنها ملاک ارزیابی قرار گرفت. نتایج بدست آمده در محدوده مورد قبول آیین‌نامه ACI بوده و نشان‌دهنده امکان ساخت بتن سبک سازه‌ای و مقاومت بالا با حداقل وزن، با استفاده از مصالح موجود میباشد. در نهایت ارزیابی اقتصادی بر روی نمونه‌ها صورت پذیرفته است. علیرضا انتظاری و همکاران در سال ۱۳۸۹ به بررسی خصوصیات مکانیکی بتن سبک سازه‌ای پرداختند. در این تحقیق خصوصیات بتن سبک (LWAC) سازه‌ای ساخته شده با مصالح سبک منطقه آذربایجان ایران بررسی شده است [۲]. علی صدرممتازی و همکاران در سال ۱۳۹۱ به بررسی روابط طراحی تیر بتن مسلح سبک سازه‌ای حاوی سبک دانه‌های رس منبسط شده و پلی‌استایرن منبسط شده پرداختند [۳]. 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 قرارگیری در رده ۲ پلی‌استایرن منبسط شده در بتن خودتراکم سبک سازه‌ای در حالت سخت شده، مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی ویژگی‌های مکانیکی پانل‌های پیش‌ساخته تولید شده با بتن سبک دانه الیافی تحقیق دیگری بود که توسط ناصری و همکاران در سال ۱۳۹۳ انجام شد. در این تحقیق مشخصات مکانیکی پانل‌های پیش‌ساخته بتن سبک دانه الیافی مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته و مناسب بودن این پانل‌ها برای کاربرد در ساخت عناصر ساختمانی به صورت پیش‌ساخته مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی خصوصیات مقاومتی و انتقالی بتن سبک خودتراکم حاوی الیاف پلی‌پروپیلن توسط اسماعیلی و همکاران در سال ۱۳۹۵ انجام شد [۴]. به کار بستن سنگدانه‌های سبک در ساخت بتن خودتراکم، موجب ایجاد خصوصیات بتن سبک و بتن خودتراکم در یک ماده ساختمانی به نام بتن سبک خودتراکم می‌گردد. مطالعات امکان‌سنجی 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 می‌کند. 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 هدفه طرح مختلف تحت آزمایش‌های 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 پلی‌پروپیلن بر خواص مکانیکی بتن سبک نشان می‌دهد. تولید یک بتن مترکم 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 دانه‌های 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 بتن‌های سبک خودتراکم در احداث سازه‌های 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 دانه‌های رایج در کشور شامل اسکوریا، لیکا و پومیس در صورت استفاده کاربردی از آن



در ستون‌های بتن آرمه، به کمک روش‌های نیمه مخرب و غیرمخرب بررسی می‌شود. برای رسیدن به این هدف، ستون‌های بتن مسلح ساخته شده با بتن سبک خودتراکم، به کمک آزمایش نیمه مخرب مغزه‌گیری به منظور تعیین مقاومت فشاری و نفوذپذیری و آزمایش غیر مخرب التراسونیک در ارتفاع‌های مختلف ستون‌ها، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ساجدی و همکاران در سال ۱۴۰۰ در تحقیقی به بررسی تاثیر آب مغناطیسی بر خواص رئولوژی و مکانیکی بتن‌های سبک پرداختند [۱۳]. در این مقاله پژوهش‌های انجام شده در مورد تاثیر آب مغناطیسی بر خواص ریولوژی و مکانیکی بتن‌های 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 بتن‌های سبک خواهد شد. بیشترین کارایی خمیر سیمان در نمونه‌های ساخته شده با آب مغناطیسی با چرخش ۶۵ دقیقه‌ای 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 متخلخل با مقاومت حداکثر 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 متخلخل 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 متخلخل

بتن متخلخل یک واژه است و طبق تعریف، ماده‌ای است با اسلامپ صفر که اجازه می‌دهد آب از آن عبور کند منابع آب زیرزمینی را تغذیه کند و مواد تشکیل دهنده آن سیمان پرتلند، سنگدانه درشت، مقدار کم یا فاقد ریزدانه، آب و مواد افزودنی می‌باشد. این عناصر در نهایت بتن سخت شده با حفرات مرتبط را تولید می‌کنند. طول عمر خدمت دهی روسازی متخلخل حاوی سنگدانه‌های درشت، حدوداً ۵۰-۳۰٪ بیشتر از روسازی معمولی است. دانه بندی و اندازه سنگدانه‌های درشت، نسبت آب به مواد سیمانی و میزان تراکم، بر اندازه حفرات اثر می‌گذارند و معمولاً ۸-۲ میلی‌متر هستند. معمولاً برای ساخت بتن متخلخل از درشت‌دانه‌های با اندازه یکسان استفاده می‌شود که می‌توان به راحتی به درصد حفرات بیش از ۱۵٪ رسید. این طرح‌های اختلاط عمدتاً دارای نفوذپذیری بالا و مقاومت ناکافی می‌باشند. اندازه سنگدانه، دانه بندی و مقدار سنگدانه مصرفی در مخلوط بتن متخلخل، همگی از عوامل تاثیرگذار بر مقاومت فشاری بدست آمده می‌باشند. افزایش مقدار خمیر سیمان به معنای افزایش مقاومت کلی مخلوط بتن متخلخل می‌باشد. افزایش در سطح خمیر سیمان، می‌تواند به راحتی از طریق استفاده از سنگدانه ریز بدست آید. با استفاده از سنگدانه ریز، سطح مخصوص سنگدانه‌ها بیشتر شده و خمیر سیمان سطح گسترده تری از سنگدانه‌ها را پوشش می‌دهد. مشخصات خمیر سیمان در بتن متخلخل تنوع گسترده‌ای نسبت به بتن معمولی دارد. خمیر سیمان استفاده شده در بتن متخلخل باید چسبندگی و عدم روانی بالایی داشته باشد. 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 شن رودخانه‌ای در این طرح مورد استفاده قرار گرفتند. شکل (۲) تصویری از آماده سازی مصالح جهت طرح اختلاط را نشان می‌دهد. از میان دانه‌بندی‌های تک الک و دو الک پس از انجام آزمایش‌های نفوذپذیری و تست کششی دانه‌بندی الک ۳/۸ الک‌های موجود در نمونه می‌باشد. در ابتدای آزمایشات انجام شده از سنگ سیلیس، طبیعی، گرانیت، پرلیت و لیکا مورد استفاده قرار گرفت. پس از انجام آزمایشات متعدد تصمیم بر استفاده از سنگ طبیعی برای نمونه گرفته شد.



شکل ۲: مصالح مورد استفاده در ساخت بتن متخلخل.

۲-۲- طرح مخلوط

جهت رسیدن به تخلخل 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 حداکثر زمان عبور آب تعیین گردد. در شکل (۳) نمونه‌ای استوانه‌ای از بتن ساخته شده نشان داده شده است. با توجه به استاندارد آیین‌نامه مسابقات نمونه مسابقه در قالبی استوانه‌ای فلزی با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و با ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر قالب‌گیری گردید. پس از عمل‌آوری نمونه‌ها توسط دستگاه برش سنگ از طرفین به اندازه ۲/۵ سانتی‌متر مطابق آیین‌نامه کوتاه شده و به ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر رسید. از جمله عیارهایی که مورد



بررسی قرار گرفت عیارهای ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ می باشد که از میان آن ها عیار ۲۰۰ منتخب برای نمونه قرار گرفت.



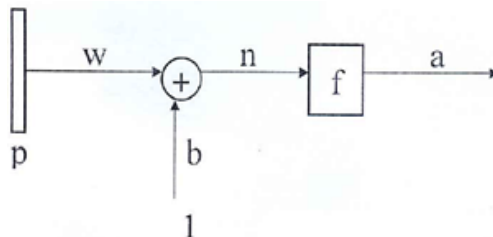
شکل ۳: نمونه های استوانه‌ای از بتن متخلخل و عمل آوری آنها در آزمایشگاه.

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. در این بخش به معنای شبکه‌های عصبی، حدود انتظارات از این شبکه‌ها و شباهت‌های آنها با شبکه‌های واقعی پرداخته شده است. هنگامی که 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 در نظر بگیرید. بازیکن اول با سرعتی بیش از ۱۳۰ کیلومتر در ساعت به توپ ضربه می‌زند و بازیکن دوم نیز با سرعتی معادل ۶۰ کیلومتر در ساعت به توپ ارسالی پاسخ می‌دهد. تصور نمایید 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^۱ اعلام کرد که مغز از عناصر اصلی ساختاری به نام نورون^۲ تشکیل یافته است. شکل (۴) ساختار یک نورون تک‌ورودی را نشان می‌دهد. اسکالره‌های a و p به ترتیب خروجی و ورودی هستند.

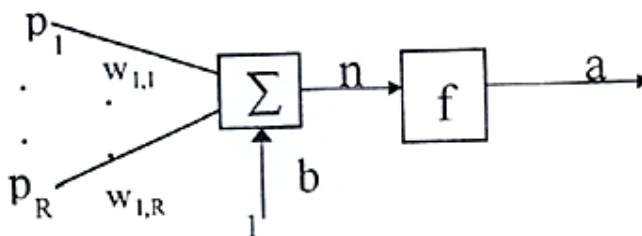
¹ Segal

² Neuron



شکل ۴: مدل نورون تک ورودی.

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. اسکالرهایی $P_i (i=1,2,\dots,R)$ 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 $z=1,\dots,R$ و $W_{1,z}$ است. هر عنصر از بردار ورودی p در عنصر متناظر از W ضرب می‌شود. نورون یک جمله بایاس b دارد که با حاصل ضرب ماتریس وزن W با بردار ورودی p جمع می‌شود.



شکل ۵: مدل چند ورودی یک نورون.

۳-۱- شبکه عصبی چند لایه 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:

- ۱- پردازنده‌های شبکه به چند لایه مختلف تقسیم می‌شوند.
- ۲- حداقل تعداد لایه‌ها در این شبکه‌ها، ۲ است.
- ۳- 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.
- ۴- 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 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 لایه پنهان کافی است. تعداد گره‌ها در لایه پنهان معمولاً بین نصف تا دو یا سه برابر تعداد گره‌های لایه ورودی است.



۴- بانک اطلاعاتی

برنامه آزمایشات جهت تکمیل بانک اطلاعاتی تهیه شد. بر اساس این برنامه ۲۰۰ نمونه استوانه‌ای بتنی با ابعاد ۱۰ در ۲۰ 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 و عبور آب قرار گرفت. بانک اطلاعاتی مطابق جدول (۱) برای این مجموعه آزمایشات جمع‌آوری شد. پارامترهای ورودی و خروجی بر این اساس انتخاب شدند که سنگدانه، سیمان، میکروسیلیس، آب و روان کننده 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 (A) Aggregate، میکروسیلیس (M)، روان کننده (L)، سیمان (C) و آب (W) می‌باشند. پارامترهای خروجی نیز شامل دو پارامتر مقاومت کششی ۷ روزه (Ft) و زمان عبور آب (T) در نظر گرفته شده است.

جدول ۱. تعدادی از نتایج آزمایشات جهت تکمیل بانک اطلاعاتی ورودی و خروجی.

Output Parameter		Input Parameters				
Ft (kg)	T (Sec)	A (gr)	M (gr)	L (gr)	C (gr)	W (gr)
1000	3.36	2200	36	3	240	53
950	3.77	2210	34	3	235	55
1100	3.37	2200	36	3	240	60
1900	3.95	2200	106	2.5	245	60
1300	3.65	2110	95	2.2	235	58
900	2.85	2080	33	5.5	220	55
1600	3.80	2080	88	5	220	56
2100	3.70	2000	105	8	210	50
2300	3.50	2050	100	7	210	53
1150	3.55	2020	55	5	200	54
2700	6.10	1950	125	10	285	85
2600	5.00	2000	120	10	285	80
2100	4.80	2020	35	5.3	211	63
1800	3.80	2010	85	5.0	215	60
800	3.55	2000	32	5.3	218	63
1500	3.85	2005	62	3.5	216	55
1650	3.95	2010	65	4.5	226	58
1740	3.75	2030	72	4.3	230	62
1700	5.3	2010	65	4.2	223	58



۴-۱- شاخصهای 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^۳ (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:

$$R = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

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^۴ (۱۹۸۶) محدوده ذیل را برای ارزیابی ضریب همبستگی بین صفر و یک پیشنهاد کرد.

$$|R| \geq 0.8 \quad \text{همبستگی قوی بین دو دسته متغیر وجود دارد} \quad (2)$$

$$0.2 < |R| < 0.8 \quad \text{همبستگی بین دو دسته متغیر وجود دارد} \quad (3)$$

$$|R| < 0.2 \quad \text{همبستگی بسیار ضعیف بین دو دسته متغیر وجود دارد.} \quad (4)$$

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

- میانگین مربعات خطا^۵ (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.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i)^2 \quad (5)$$

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 سه زیر مجموعه آموزشی^۶، آزمایشی^۷ و ارزیابی^۸ تقسیم می‌کند. شبکه توسط مجموعه داده‌های آموزشی، آموزش داده شده و خطای

³ Coefficient of correlation

⁴ Smith

⁵ Root Mean Square Error

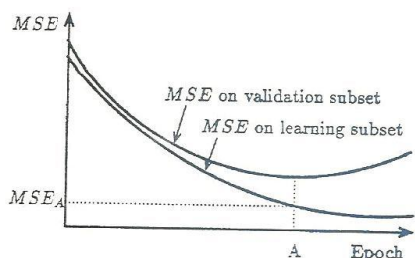
⁶ Training Subset

⁷ Testing Subset

⁸ Validation Subset



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.

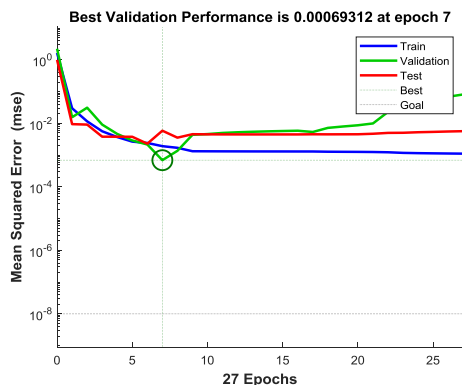


شکل ۶: خطا برای مجموعه‌های آموزشی و ارزیابی.

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.

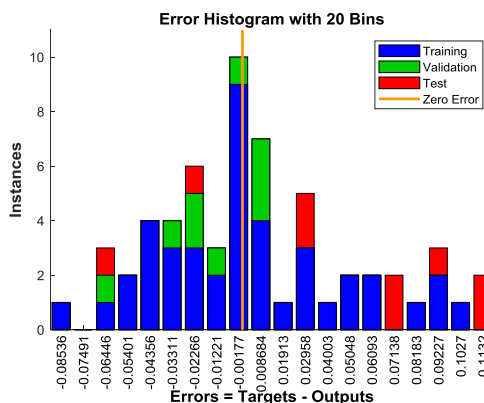
- شبکه عصبی پرسپترون چندلایه- آموزش و توقف آموزش: همانطور که گفته شد، از شبکه‌های دو و سه لایه پرسپترون با تعداد لایه‌های پنهان متفاوت استفاده شده است. با توجه به مزیت‌های روش ML، این روش مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق ضرایب روش ML، μ و β با توجه به مقادیر پیش فرض MATLAB به ترتیب 0.001 و 0.01 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.



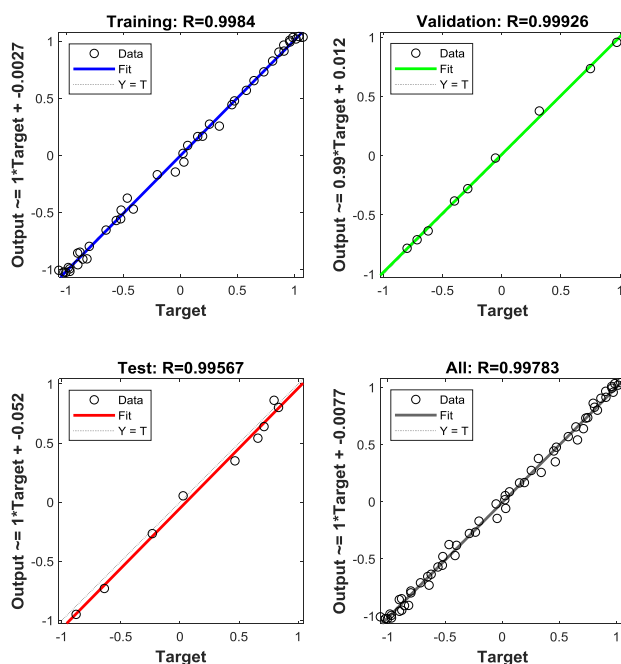
شکل ۷: منحنی آموزش شبکه عصبی به روش توقف آموزش.



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



شکل ۸: 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 سیگموئید استفاده شده است. از آنجایی که تعداد نرونهای لایه پنهان در رفتار این شبکه‌ها نقش عمده‌ای دارد، مطالعه بر روی عملکرد این شبکه‌ها با تعداد نرونهای متفاوت به روش ذیل انجام شده است. جهت انتخاب ساختار بهینه از نتایج مقادیر شاخص‌های ارزیابی ارائه شده در جدول (۲) استفاده شده است. مجموعه ارزیابی به عنوان بخشی از داده‌های تجربه نشده که در کنترل فرآیند آموزشی استفاده نشده است، می‌تواند توأمأ 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 نرونها 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 نرونها بهینه انتخاب می‌گردد.

جدول ۲. مقایسه بین ساختارهای بهینه شبکه‌های MLP.

Validation Subset				
Networks	Num. of neurons		R	MSE
MLP1	3		0.82	0.187
	5		0.84	0.152
	8		0.92	0.162
	10		0.86	0.185
MLP2	5	5	0.85	0.131
	8	8	0.95	0.126
	10	10	0.85	0.110
Training Subset				
MLP1	3		0.81	0.235
	5		0.86	0.258
	8		0.91	0.346
	10		0.90	0.412
MLP2	5	5	0.87	0.235
	8	8	0.95	0.121
	10	10	0.93	0.362
Testing Subset				
MLP1	3		0.79	0.231
	5		0.90	0.215
	8		0.96	0.284
	10		0.92	0.261
MLP2	5	5	0.87	0.287
	8	8	0.90	0.134
	10	10	0.89	0.184



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 ۶ شبکه با تعداد ۳، ۵، ۸، ۱۰ نرون تک لایه پنهان و ۵، ۸ و ۱۰ 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 متخلخل مخلوطی از بتن شامل سیمان، آب، سنگدانه درشت یکنواخت درجه بندی شده و سایر افزودنی‌ها می‌باشد. جهت رسیدن به تخلخل 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 حداکثر زمان عبور آب تعیین گردد. پس از عمل‌آوری نمونه‌ها توسط دستگاه برش سنگ از طرفین به اندازه ۲/۵ سانتی‌متر مطابق آیین‌نامه کوتاه شده و به ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر رسید. از جمله عیارهایی که مورد بررسی قرار گرفت عیارهای ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ می‌باشد که از میان آن‌ها عیار ۲۰۰ منتخب برای نمونه قرار گرفت. برنامه آزمایشات جهت تکمیل بانک اطلاعاتی تهیه شد. بر اساس این برنامه ۲۰۰ نمونه استوانه‌ای بتنی با ابعاد ۱۰ در ۲۰ 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 و عبور آب قرار گرفت. پارامترهای ورودی و خروجی بر این اساس انتخاب شدند که سنگدانه، سیمان، میکروسیلیس، آب و روان کننده 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 Aggregate (A)، میکروسیلیس (M)، روان کننده (L)، سیمان (C) و آب (W) می‌باشند. پارامترهای خروجی نیز شامل دو پارامتر مقاومت کششی ۷ روزه (Ft) و زمان عبور آب (T) در نظر گرفته شده است. 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 ۶ شبکه با تعداد ۳، ۵، ۸، ۱۰ نرون تک لایه پنهان و ۵، ۸ و ۱۰ 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. نتایج نشان دادند که:

- ۱- شاخص ارزیابی ضریب همبستگی در اکثر ساختارهای مورد بررسی مقداری بیش از ۸۵ درصد داشته که نشان دهنده مدلسازی صحیح به کمک شبکه عصبی مصنوعی است.
- ۲- شبکه چندلایه پرسپترون با دولایه پنهان ۸ نرونی با ضریب همبستگی ۹۵ درصد در دو فاز یادگیری و اعتبارسنجی و ضریب رگرسیون ۹۰ درصد در فاز آزمایش، به عنوان ساختار بهینه معرفی شده است.
- ۳- شاخص خطا میانگین مربعات خطا نیز مورد ارزیابی قرار گرفت که بیشترین عدد حاصله برای تمامی ساختارهای انتخابی پس از مدلسازی اولیه برابر ۰/۴۱۲ گزارش شده است.
- ۴- شبکه چندلایه پرسپترون با دولایه پنهان ۸ نرونی در میانگین شاخص خطا نیز بهترین کارایی را از خود نشان داده است که با میانگین ۰/۱۲۷ در این شاخص نیز به عنوان شاخص بهینه انتخاب شده است.
- ۵- بررسی شاخص خطا نشان می‌دهد که اگرچه شبکه چندلایه پرسپترون با دولایه پنهان ۱۰ نرونی عملکرد بهتری در مجموعه یادگیری دارد ولی در دو مجموعه دیگر عملکرد ضعیفتری دارد که نشان از عدم قدرت تعمیم این ساختار 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 سازه‌های 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 artificial neural networks in pressuremeter test results**, Master of Science thesis, Tarbiat Modares University. Tehran. Iran.
- 7- Hung Mo, K., Johnson Alengaram, U., Zamin Jumaat, M., and Poh Yap, S., 2015, **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، 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., and Emami, M., 2008, **Application of Artificial Neural Networks (ANNs) in prediction and interpretation of pressuremeter test results**, In The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), 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 Pages 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، 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., Yasrobi, S. S., 2012, **Modelling of pressuremeter tests with artificial neural networks**, Sharif Journal of Civil Engineering, 2, 4, 25-36.