

برآورد استحکام فشاری ماسه ریخته گری در مقادیر گوناگون رطوبت با استفاده از شبکه عصبی

مصنوعی

رامین مشک آبادی^{۱*}، غلام رضا مرامی^۲ و کمال جهانی^۳

چکیده

کیفیت قطعات ریخته گری در قالب گیری ماسه به گونه‌ای چشم گیر به خواص ماسه مورد استفاده از قبیل استحکام فشاری، نفوذپذیری، سختی قالب و... بستگی دارد که این خواص نیز به پارامترهایی مانند رطوبت، اندازه و شکل دانه ماسه، میزان چسب و... بستگی دارند. در این مقاله، تعداد ۸۴ آزمایش عملی برای بدست آوردن داده های مورد نیاز برای شبیه سازی که همان استحکام فشاری ماسه در درصد رطوبت های معین بودند، انجام گرفته است و روش پژوهش بر مبنای استفاده از مدل های شبکه عصبی بمنظور برآورد استحکام در درصدهای رطوبت دیگر می باشد. مقایسه نتایج بدست آمده از مدل با نتایج آزمایش های عملی جدید نشان می دهند که با استفاده از شبکه عصبی می توان با دقت بالایی استحکام فشاری ماسه را پیش از استفاده برای قالب گیری تا میزان خطای کم تر از ۱٪ تخمین زد.

واژه های کلیدی: ماسه ریخته گری، رطوبت، استحکام فشاری، شبکه عصبی مصنوعی.

۱- مربی گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر.

۲- کارشناس ارشد مهندسی مکترونیک، دانشگاه تبریز.

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز.

*- نویسنده مسئول مقاله: r-meshkabadi@iau-ahar.ac.ir

پیشگفتار

ریخته گری در قالب ماسه یکی از قدیمی‌ترین و محبوب‌ترین روش‌های ریخته گری در دنیاست. یکی از اهداف ریخته گران، تهیه یک قطعه ریخته شده با کیفیت قابل قبول و هزینه کم است. مخلوط قالب گیری متشکل از ماسه، مواد چسبی، آب و غیره است. استحکام تر یا چسبندگی ماسه قالب گیری که می‌توان آن را قابلیت ماسه برای نگهداری دانه‌های ماسه دانست، از راه آزمایش‌های استحکام فشاری، استحکام برشی و استحکام کششی اندازه گیری می‌شود. استحکام تر به شکل، اندازه، مقدار کوبش و دانه بندی ماسه بکار رفته و همچنین، مقدار چسب، رطوبت و سایر مواد اضافه شونده دیگر بستگی دارد.

بیش‌ترین علت بروز عیب در این روش مربوط به مخلوط ماسه می‌باشد. اثر رطوبت بیش از سایر عوامل است و بیش‌ترین استحکام تر و کم‌ترین عیوب در قطعه در مقدار مشخصی از رطوبت و چسب بدست می‌آید که می‌توان با دانستن پارامتر مهم مقدار رطوبت، به آن دست یافت.

انتخاب درست مقدار و نوع مواد تشکیل دهنده ماسه نقشی بسیار مهم در رسیدن به تولید یک قطعه با کیفیت ایفا می‌کند و در طول سالیان متمادی خواص فیزیکی ماسه به وسیله پژوهشگران زیادی کنترل و گزارش‌هایی ارائه شده است.

روش‌های گوناگونی برای آزمایش خواص ماسه مانند میزان تراکم پذیری و سیالیت ماسه و ... و نیز انواع گوناگونی از گراف‌های کنترلی برای ماسه، ایجاد شده‌اند که در کنترل خواص ماسه بسیار مفید بوده‌اند [۱].

چنگ و دوستانش [۲] سعی کردند رابطه ای بین چگالی و تراکم پذیری ماسه بدست آورند. هرچند رابطه آن‌ها روی یک مدل یک بعدی بود و دو رابطه تجربی برای استحکام تر و چگالی برحسب مقدار آب موجود در مخلوط قالب گیری بدست می‌داد، اما نقطه ضعف مدل آن‌ها در این بود که چگالی به تنهایی معیاری برای تعیین مقدار بهینه آب موجود در مخلوط قالب گیری نیست و مقدار استحکام ماسه نیز می‌تواند معیاری مهم برای تعیین میزان رطوبت باشد. همچنین، آن‌ها بمنظور بررسی مقدار

نفوذپذیری ماسه مدل نوینی را همراه با نتایج آزمایش‌های عملی خود ارائه کردند تا نشان دهند که مقدار نفوذپذیری ماسه چقدر متاثر از میزان رطوبت، چسب بنتونیت و ... است.

هم‌چنین، پژوهش‌هایی به وسیله کوندو و لاهییری [۳] در مورد بررسی تاثیر پارامترهایی مانند درصد چسب بنتونیت و زمان به عمل آمدن آن در خواص ماسه ریخته گری با استفاده از روش‌های آماری انجام گرفته است و نشان می‌دهد که با استفاده از تجزیه و تحلیل آماری می‌توان در پیش بینی خواص ماسه موفق بود.

با توجه به این‌که دستیابی به ترکیب بهینه مخلوط ماسه یکی از مهم‌ترین مشکلات موجود در صنعت ریخته گری بوده است، در پژوهش‌های انجام گرفته به وسیله کاروناکار و دوستان [۴]، اثر اندازه دانه، میزان و درصد خاک رس، رطوبت و سختی دانه‌ها در مقاومت برشی و میزان نفوذ پذیری ماسه بررسی شده است و نتایج آن‌ها نشان دهنده توانایی مدل‌های بکار گرفته شده مانند الگوریتم ژنتیک در پیش بینی خواص ماسه تر می‌باشد.

ناگوربابو و دوستانش [۵]، خواص ماسه ریخته گری را با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی و نوروفازی بررسی کرده‌اند. در این پژوهش مقدار نفوذپذیری ماسه بر اساس مقادیر گوناگون خاک رس، رطوبت و زمان به عمل آمدن ماسه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده به وسیله شبکه عصبی و مدل نورو فازی در مقایسه با آزمایش‌های عملی با هم تطابق کامل دارند.

در پژوهش‌های دیگر به وسیله پاراپاگودار و دوستان [۶]، مشکلات مربوط به شبیه سازی خواص ماسه با استفاده از تلفیق شبکه‌های عصبی پرسو (BPNN) و الگوریتم ژنتیک (GA) بهینه سازی شده است.

هم‌چنین پژوهشگران دیگری پارامترهای ورودی و خروجی ماسه ریخته گری را با استفاده از شبکه‌های عصبی و الگوریتم ژنتیک شبیه سازی کرده و نشان داده‌اند که می‌توان خواص مورد نظر برای ماسه را با استفاده از روش‌های شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک کنترل کرد [۷و۸].

1 - Bach Propagation Neural Network

2 - Genetics Algorithm

داده ها را به عنوان داده‌های آزمایش شبکه^۲ برای اطمینان از همگرایی شبکه کنار گذاشته می‌شوند تا از درستی کار شبکه اطمینان یابند [۱۰].

مواد و روش ها

با توجه به این که در کارخانه ها و مکان های آموزشی قالب گیری بیش تر به روش ماسه انجام می‌شود، بنابراین مخلوط ماسه تولید شده بایستی در طول زمان مشخصی خواص لازم برای تولید قطعه با کیفیت را داشته باشد و با توجه به این که رطوبت مهم ترین عنصر تاثیرگذار بر کیفیت ماسه ریخته گری به روش ماسه است، آزمایش‌های متعددی برای کسب داده های مربوط به استحکام فشاری تر با درصد های رطوبت اولیه مشخص طی چهار مرحله و در طول چهار زمان گوناگون انجام شد که از این داده ها برای آموزش و آزمایش شبکه عصبی استفاده شده است.

استحکام فشاری^۳ ماسه ریخته‌گری، بیش‌ترین تنش فشاری است که نمونه استاندارد می‌تواند آن را تحمل کند پیش از این که نمونه دچار گسیختگی و فروپاشی شود. نمونه مورد آزمایش استوانه ای با قطر و ارتفاع ۵۰/۸ میلی متر است که به کمک دستگاه کوبه آزمایشگاهی ایجاد می‌شود. مخلوط قالب‌گیری که حاوی ماسه سیلیسی با عدد $AFS^4=79.5$ و ۱۰٪ چسب بنتونیت سدیمی و رطوبت های گوناگون است، سه بار کوبیده شده و استحکام فشاری مخلوط ماسه در چهار مرحله گوناگون (هریک ساعت، یک بار) بر اساس استاندارد AFS اندازه‌گیری شده است [۱۱].

نیروی فشاری با نرخ 25 g/cm^2 (بر اساس DIN52401) در هر ثانیه تا زمانی که نمونه گسیخته شود، وارد می‌شود و پس از شکست نمونه بیش‌ترین تنش را که نمونه می‌تواند تحمل کند، نشان داده می‌شود. گفتنی است که برای هر درصد رطوبت معین تعداد چهار نمونه ساخته شده و آزمایش گردید [۱۱].

یک شبکه عصبی مصنوعی^۱ ایده ای است برای پردازش داده ها که از سامانه عصبی زیستی الهام گرفته شده و مانند مغز به پردازش داده ها می پردازد. عنصر کلیدی این ایده، ساختار جدید سامانه پردازش داده‌هاست. این سامانه از شمار زیادی عناصر پردازشی به هم پیوسته (نرون) تشکیل شده که برای حل یک مسئله با یکدیگر هماهنگ کار می‌کنند. شبکه های عصبی نظیر انسان ها با مثال یاد می‌گیرند. یک شبکه عصبی برای انجام وظیفه‌ای مشخص، مانند شناسایی الگوها و دسته بندی داده ها، در طول یک پروسه یادگیری، تنظیم می‌شود.

در بسیاری از مسایل پیچیده ریاضی که به حل معادلات بفرنج غیر خطی منجر می‌شود، یک شبکه عصبی چند لایه می‌تواند به سادگی با تعریف اوزان و توابع مناسب مورد استفاده قرار گیرد. توابع فعالیت گوناگونی به فراخور اسلوب مسئله در نرون ها بکار می‌روند. در این نوع شبکه‌ها از یک لایه ورودی جهت اعمال ورودی‌های مسئله، یک لایه پنهان و یک لایه خروجی که در نهایت پاسخ های مسئله را ارایه می‌کنند، استفاده می‌شود. تاثیر تعداد لایه های مخفی و نرون های هر لایه بر دقت شبکه به گونه‌ای گسترده بررسی شده است. در شکل ۱ ساختار کلی یک شبکه عصبی نشان داده شده است [۹].

هدف از این مقاله برآورد صحیح استحکام فشاری ماسه تر ریخته گری در مقادیر گوناگون رطوبت با استفاده از فرایند آموزش و آزمایش شبکه‌های عصبی می‌باشد. دلیل استفاده از این روش نبودن رابطه ای صریح بین میزان رطوبت و استحکام فشاری ماسه می‌باشد. پژوهشگرانی که در این زمینه کار کرده اند از روش هایی چون ارائه مدل ریاضی، روش های آماری و الگوریتم ژنتیک استفاده نموده اند که هرکدام ضعف های مربوط به خود را در این مسئله نشان داده اند و باتوجه به توضیحات بالا می‌توان با استفاده از داده های بدست آمده از آزمایش‌های تجربی شبکه را آموزش داده و حداکثر استحکام فشاری تر را بر اساس بردارهای ورودی جدید رطوبت در زمان های گوناگون پیش بینی کرد. همچنین بردارهای ورودی جدید که در آموزش استفاده نشده اند به شبکه اعمال می‌شوند و جواب صحیحی از شبکه بدست می‌آید، بنابراین تعدادی از

² - Test Data

³ - Compressive Strength

⁴ - American Foundry Society

¹ - Artificial Neural Network

بمنظور ایجاد ساختار مناسب برای شبکه و آموزش آن، نمونه‌های متعددی با درصدهای رطوبت گوناگون به عنوان متغیر مسئله، از هر کدام به تعداد چهار عدد ساخته شده و پس از کوبش و تهیه نمونه‌های آزمون آزمایش استحکام فشاری مخلوط ماسه در چهار زمان گوناگون به شرح داده شده بر روی نمونه‌ها انجام گردید که نتایج آن‌ها در جدول‌های ۱، ۲ و ۳ ارائه شده است. جهت اندازه‌گیری رطوبت محیط از رطوبت سنج ثابت و جهت اندازه‌گیری دمای محیط از دماسنج استفاده شده است.

با در دست داشتن داده‌های تجربی، یک سیستم هوشمند از نوع شبکه عصبی پسر (BP) در محیط نرم‌افزار MATLAB طراحی شد که دارای سه لایه (یک لایه ورودی، یک لایه مخفی و یک لایه خروجی) می‌باشد. لایه ورودی شامل ۴ ورودی رطوبت در ۴ زمان گوناگون پس از فرآوری ماسه و لایه خروجی شامل یک خروجی یعنی مقدار استحکام فشاری ماسه تر می‌باشد. تعداد گره‌های لایه مخفی نیز ۱۰ عدد می‌باشد. با توجه به این‌که با انتخاب تعداد گره‌های مخفی کم، تعداد تکرارهای لازم برای آموزش شبکه خیلی زیاد می‌شود و دقت برآورد نیز کاهش می‌یابد و چون زیاد بودن تعداد گره‌های مخفی باعث افزایش زمان آموزش شبکه می‌شود، تعداد ۱۰ عدد گره در لایه مخفی به صورت سعی و خطا مناسب تشخیص داده شد که از نظر دقت و درستی نتایج بدست آمده بسیار مناسب می‌باشد. تابع تبدیل بکار رفته در شبکه از نوع تابع سیگموئید باینری به صورت زیر می‌باشد [۸]:

$$f(x) = \frac{2}{1 + \exp(-x)} - 1 \quad (1)$$

نتایج و بحث

برای آموزش شبکه، از داده‌های بدست آمده از آزمایش‌های عملی جدول‌های ۱ و ۲ و ۳ استفاده شد. نتیجه هر آزمایش یک دسته داده آموزشی برای آموزش شبکه است که در آن مقادیر ورودی و خروجی معلوم می‌باشد. در شبکه ارتباط بین نورون‌ها به وسیله مقدار وزنی تعیین می‌شود. در ابتدا مقدار این بردار وزنی به صورت مقادیر تصادفی انتخاب می‌شود. در هر آموزش،

شبکه با داده‌های ورودی مقدار خروجی را محاسبه می‌کند و در صورت وجود اختلاف بین مقدار خروجی واقعی و خروجی محاسبه شده، خطا را به عقب منتشر کرده و مقادیر وزنی بین گره‌ها را تصحیح می‌کند. این کار آن قدر ادامه می‌یابد تا مقدار خطای شبکه برای نمونه‌های آموزشی از مقدار 0.00001 کم‌تر شود. شبکه پس از ۱۷۲۳ تکرار آموزش دید و نمودار نرخ آموزش شبکه و نمودار آموزش شبکه در شکل‌های ۲ و ۳ آورده شده است.

پس از ایجاد شبکه با استفاده از داده‌های بدست آمده از انجام آزمایش‌های گوناگون تعیین استحکام فشاری بر روی ماسه، (جدول‌های ۱ و ۲ و ۳)، آزمایش‌های شبکه در مقادیر رطوبت ۵/۵ و ۱۱ درصد انجام گرفت به این صورت که نتایج بدست آمده از شبکه طراحی شده با نتایج بدست آمده از آزمایش‌های انجام شده در دو درصد رطوبت بالا با هم مقایسه شدند که نتایج مقایسه در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده‌اند که بیانگر خطای بسیار کم (در حدود ۰.۱٪) شبکه در رطوبت ۵/۵ درصد است، اما در رطوبت ۱۱ درصد خطای زیادی (در حدود ۱۳٪) را نشان می‌دهد. علت آن این است که معمولاً درصد رطوبت لازم برای ریخته‌گری انواع فلزات آهنی و غیر آهنی متفاوت بوده و برای آلومینیم حدود ۶ تا ۸/۵ درصد، برای فولاد حدود ۴ تا ۶ درصد و برای چدن ۶ تا ۸ درصد است که در رطوبت بیشتر از مقادیر بالا (۱۱ درصد) شبکه مورد نظر به دلیل این‌که با پارامتر جدید «آب دی هیدراته» مواجه می‌شود، توانایی پیش‌بینی صحیح رفتار ماسه ریخته‌گری را از دست می‌دهد و این عامل سبب اختلاف نتایج شبکه و مقادیر واقعی شده است [۱۲ و ۱۳]. در جدول ۴ نتایج بدست آمده از شبکه عصبی طراحی شده (استحکام فشاری ماسه) در رطوبت‌های ۵/۵ و ۱۱ درصد برای آزمایش شبکه نشان داده شده‌اند.

پس از آموزش و آزمایش شبکه، آزمایش‌های بالا روی مخلوط‌های با درصد‌های رطوبت ۵/۲ و ۷/۳ و ۹/۲ دوباره انجام گرفت و با نتایج بدست آمده از شبکه عصبی مقایسه شد که این نتایج در جدول‌های ۵ و ۶ نشان داده شده‌اند. برای مقایسه بهتر این نتایج، داده‌های این جدول‌های در شکل‌های ۶ و ۷ و ۸ ارایه شده‌اند. شکل‌های ۶ و ۷

این روش که متأثر از استحکام قالب و به بیان دیگر، مقدار رطوبت موجود در ماسه است، می توان به نتایج زیر رسید:

۱- با استفاده از نتایج این پژوهش خواهیم توانست از ایجاد اسکرپ در خط تولید به دلیل توقف خط پس از چند ساعت جلوگیری کنیم که باعث کاهش هزینه ها و افزایش راندمان خط تولید خواهد شد.

۲- مدل ارائه شده قادر به پیش بینی استحکام ماسه در محدوده درصد های رطوبت مناسب بدون انجام آزمایش های عملی و با خطای بسیار کم (کمتر از ۱٪) می باشد.

۳- مدل ارائه شده نشان می دهد که مناسب ترین مقدار رطوبت برای ماسه مورد نظر با ترکیب ارائه شده در رطوبت ۶٪ می باشد (شکل ۹).

سپاسگزاری

این مقاله برگرفته از طرح پژوهشی با عنوان " برآورد استحکام فشاری ماسه ریخته گری در مقادیر گوناگون رطوبت با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی " است که در دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر به تصویب رسیده است. نویسندگان مقاله از همکاری کلیه افراد و سازمان هایی که در انجام این پژوهش همکاری نمودند، بویژه حوزه معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر و کارگاه ریخته گری و آزمایشگاه ماسه دانشگاه تبریز صمیمانه سپاسگزاری می کنند.

نشان می دهند که نتایج بدست آمده از شبیه سازی بسیار نزدیک به نتایج واقعی هستند (خطا کم تر از ۱٪)، اما شکل ۸ نشان می دهد که این نتایج در رطوبت ۹/۲ درصد در حدود ۷٪ با هم اختلاف دارند؛ علت این اختلاف این است که شبکه مورد نظر به دلیل این که در درصد رطوبت های بیش تر از مقادیر مجاز (بین ۵ تا ۸ درصد) با پارامتر جدید « آب دی هیدراته » مواجه می شود، توانایی پیش بینی درست رفتار ماسه ریخته گری را از دست می دهد و این عامل سبب اختلاف نتایج شبکه و مقادیر واقعی شده است در حالی که در محدوده درصد های رطوبت مناسب برای ریخته گری انواع مواد مانند فولاد و چدن، شبکه دقت بسیار بالایی را از خود نشان می دهد. همچنین، شکل ۹ نشان می دهد که استحکام فشاری مخلوط ماسه ریخته گری با افزایش رطوبت تا مقدار بهینه ای افزایش و سپس این مقدار کاهش می یابد و علت آن این است که با افزایش رطوبت در ماسه به دلیل فعال شدن چسب، استحکام افزایش می یابد که پس از رسیدن به مقدار بیشینه با افزایش آب پس از درصد بهینه، دانه ها روی هم می لغزند و استحکام به شدت کاهش می یابد [۱۳].

نتیجه گیری

با توجه به کاربرد گسترده ریخته گری در قالب های ماسه ای در صنایع و اهمیت تولید قطعات با کیفیت در

References

- 1- K.G. Swift and J.D. Booker, Casting Processes, Manufacturing Process Selection Handbook, pp. 61-91, 2013.
- 2- Y. Chang, and H. Hocheng, "The flow ability of moldings sand", Journal of Materials Processing Technology, Vol.113, pp. 238- 244, 2001.
- 3- R. R. Kundu, and B.N. Lahiri, "Study and Statistical Modeling of Green Sand Mould Properties Using RSM", International Journal of Materials and Product Technology, Vol. 31, No. 2-4, pp.143-158, 2008.
- 4- Benny Karunakar, D., Datta, and G.L., "Controlling Green Sand Mould

- Properties Using Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms - A Comparison ", Applied Clay Science, Vol. 37, No. 1-2, pp. 58-66. , 2007.
- 5- N. Nagurbabu, R.K.Ohdar, and P.T. Push, "Application of Intelligent Techniques for Controlling the Green Sand Properties ", Proceeding of 55th Indian Foundry Congress, pp.178-186, 2007.
- 6- M. B. Parappagoudar, D.K. Pratihari, and G. L. Datta, "Forward and reverse Mappings in Green Sand Mould System Using Neural Networks", Applied Soft Computing, Vol.8, pp.239-260, 2008.

7- D. B. Karunakar, and G.L. Datta, "Modeling and Optimization of Green Sand Mould Parameters Using Genetic Algorithms", Transactions of Institute of Indian Foundry Men, Vol.51, pp. 262-267, 2003a.

8- D. B. Karunakar, and G.L. Datta, "Modeling of green sand mould parameters using artificial neural networks", Indian Foundry Journal, Vol.49, No.12, pp. 27-36, 2003b.

۹- ح. مناجاتی زاده، د. آصفی، ا. قدمیار، م. م. عقیده، ا. انصاری پور و احمد رضا سلیمی، "بررسی و تحلیل تأثیر شرایط تولید بر مقاومت به ضربه فولادهای میکرو آلیاژی مورد استفاده در لوله سازی با استفاده از شبکه عصبی،" مجله علمی - پژوهشی مواد نوین، شماره ۷، ص ۱-۱۰، بهار ۱۳۹۱.

10- M.J. Attalla, and D.J. Inman, "On Model Updating Using Neural Networks", Journal of Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.12, No.1, pp.135-161, 1998.

11- Mold and Core Test Handbook, 6th Edition, American Foundry Society (AFS), 2012.

12- C. Saikaew, and S. Wiengwiset, "Optimization of Molding Sand Composition for Quality Improvement of Iron Castings", Applied Clay Science, Volumes 67-68, pp. 26-31, 2012.

۱۳- م. ح. فتحی، "مواد قالبگیری برای ریخته گری فلزات"، نشر ارکان، تهران، ۱۳۸۶.

پیوست‌ها

جدول ۱- نتایج آزمایش های عملی سنجش استحکام فشاری ماسه در مقادیر گوناگون رطوبت (روز نخست).

زمان انجام آزمایش	۱ ساعت	۲ ساعت	۳ ساعت	۴ ساعت
شرایط محیطی	رطوبت: ۴۳٪ و دما ۲۴°C	رطوبت: ۴۷٪ و دما ۲۴°C	رطوبت: ۴۹٪ و دما ۲۲°C	رطوبت: ۵۰٪ و دما ۲۱°C
رطوبت ماسه (درصد)	استحکام فشاری ماسه ($\times 100 \text{ gr/cm}^2$)			
۳	۲/۵۵	۳/۳	۲/۳	۰/۴
۴	۴/۷	۵	۴/۶	۴/۷۵
۵	۵/۴	۵/۸	۵/۲	۶/۱
۵/۵	۵/۸	۵/۸۵	۵/۶	۶/۴
۶	۶/۴۵	۶/۵	۶/۴۹	۷
۶/۵	۶/۶	۶/۷	۶/۵۸	۷/۱

جدول ۲- نتایج آزمایش های عملی سنجش استحکام فشاری ماسه در مقادیر گوناگون رطوبت (روز دوم).

زمان انجام آزمایش	۱ ساعت	۲ ساعت	۳ ساعت	۴ ساعت
شرایط محیطی	رطوبت: ۴۹٪ و دما ۲۳°C	رطوبت: ۵۰٪ و دما ۲۳°C	رطوبت: ۴۹٪ و دما ۲۱°C	رطوبت: ۴۹٪ و دما ۲۱°C
رطوبت ماسه (درصد)	استحکام فشاری ماسه ($\times 100 \text{ gr/cm}^2$)			
۷	۵/۷	۵/۴	۵/۴	۵
۷/۵	۵/۷	۵/۵	۵/۸	۵/۴
۸	۵/۸	۵/۶	۵/۷	۵/۳
۸/۵	۵/۶	۵/۷	۵/۴	۵/۵

۵/۲	۵/۸	۵/۲	۵/۵	۹
۵/۵	۵/۷	۵/۵	۵/۴	۹/۵
جدول ۳- نتایج آزمایش های عملی سنجش استحکام فشاری ماسه در مقادیر گوناگون رطوبت (روز سوم).				
زمان انجام آزمایش	۱ ساعت	۲ ساعت	۳ ساعت	۴ ساعت
شرایط محیطی	رطوبت: ۴۹٪ و دما ۲۲°C	رطوبت: ۵۱٪ و دما ۲۱°C	رطوبت: ۵۰٪ و دما ۲۱°C	رطوبت: ۵۲٪ و دما ۲۰°C
رطوبت ماسه (درصد)	استحکام فشاری ماسه ($\times 100 \text{ g/cm}^2$)			
۱۰	۲/۸	۳/۱۰	۳	۲/۷
۱۰/۵	۱/۸۵	۱/۴۵	۱/۳	۱/۶
۱۱	۱/۸۱	۱/۴۳	۱/۳۳	۱/۶
۱۲	۱/۲۷	۱/۲۵	۱/۳۵	۱/۲۹
۱۳	۱/۱	۱/۲۲	۱/۲	۱/۲۸
۱۴	۱/۰۵	۱/۱	۱/۰۵	۱/۱۵

جدول ۴- نتایج بدست آمده از شبکه عصبی در دو رطوبت ۵/۵ و ۱۱ درصد برای آزمایش شبکه و مقایسه با آزمایش های عملی.

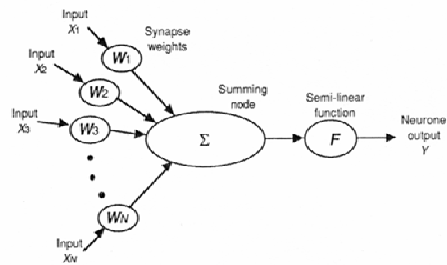
زمان انجام آزمایش	۱ ساعت	۲ ساعت	۳ ساعت	۴ ساعت
رطوبت ماسه (درصد)	استحکام فشاری ماسه ($\times 100 \text{ g/cm}^2$)			
۵/۵	۵/۸۱۰۲۶۹	۵/۷۹۹۴۱۲	۵/۶۱۸۰۳۰	۶/۴۶۱۲۰۷
۱۱	۲/۰۵۹۹۰۳	۱/۶۲۴۳۷۳	۱/۶۰۲۷۲۶	۱/۷۲۳۰۷۰

جدول ۵- نتایج آزمایش های عملی جدید برای مقایسه با شبکه عصبی.

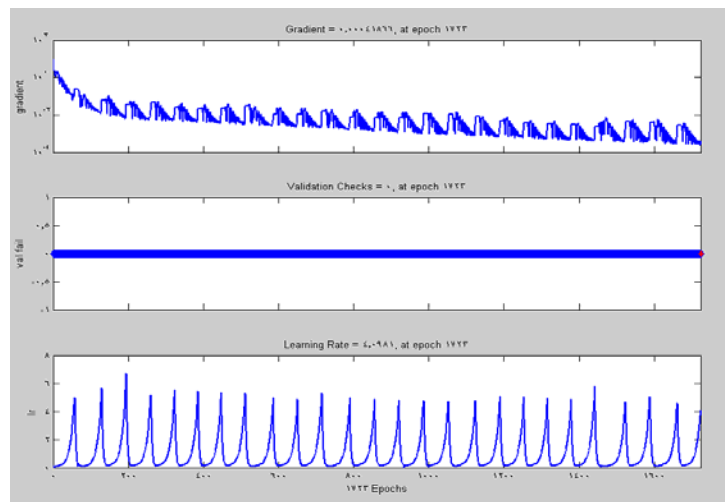
زمان انجام آزمایش	۱ ساعت	۲ ساعت	۳ ساعت	۴ ساعت
رطوبت ماسه (درصد)	استحکام فشاری ماسه ($\times 100 \text{ g/cm}^2$)			
۵/۲	۵/۵	۵/۸	۵/۳	۶/۲
۷/۳	۵/۷	۵/۴	۵/۵	۵/۳
۹/۲	۵/۵	۵/۳	۵/۸	۵/۴

جدول ۶- نتایج بدست آمده از شبکه عصبی برای مقایسه با آزمایش های عملی.

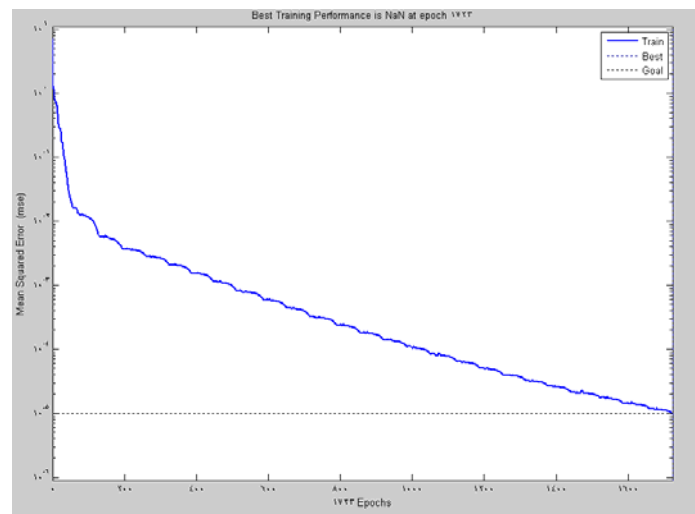
زمان انجام آزمایش	۱ ساعت	۲ ساعت	۳ ساعت	۴ ساعت
رطوبت ماسه (درصد)	استحکام فشاری ماسه ($\times 100 \text{ g/cm}^2$)			
۵/۲	۵/۵۲۷۹۵۰	۵/۷۱۳۲۴۵	۵/۳۲۱۸۱۷	۶/۲۱۱۸۷۸
۷/۳	۵/۷۴۰۵۴۳	۵/۳۶۹۹۹۹	۵/۵۱۳۷۲۳	۵/۳۱۵۴۲۷
۹/۲	۵/۱۴۷۸۳۰	۴/۹۰۴۲۰۰	۵/۳۱۴۵۳۲	۵/۱۰۷۹۹۵



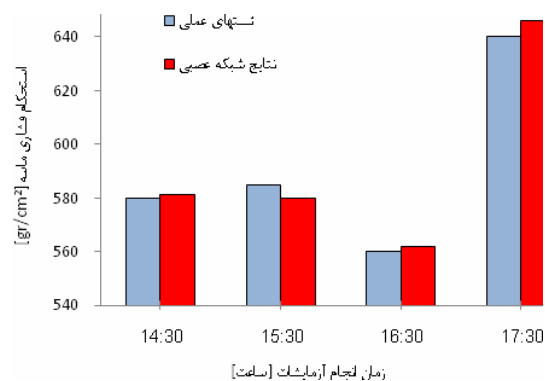
شکل ۱- ساختار شبکه عصبی [۱۰].



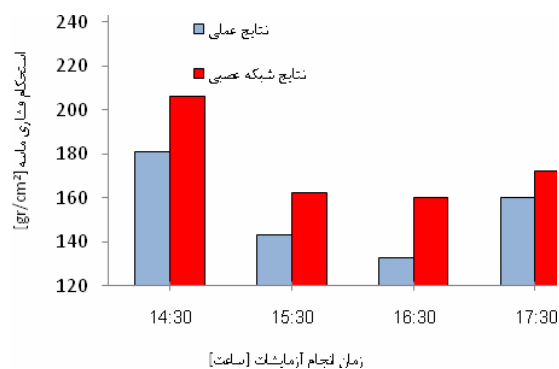
شکل ۲- نمودار نرخ آموزش شبکه تا رسیدن به خطای مطلوب.



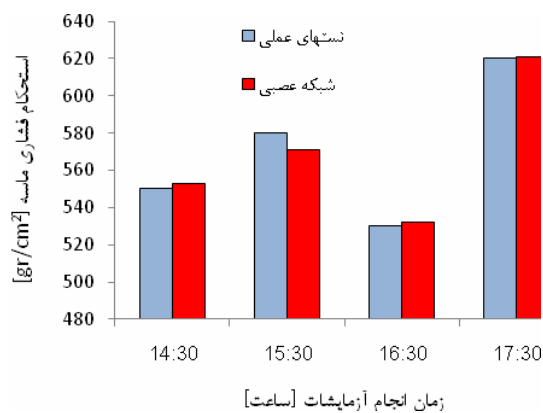
شکل ۳- نمودار آموزش شبکه برای رسیدن به خطای مطلوب.



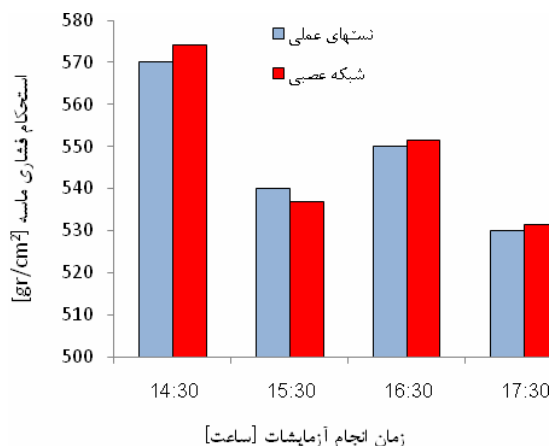
شکل ۴- مقایسه نتایج خروجی شبکه و آزمایش‌های عملی در رطوبت ۵/۵ درصد برای آزمایش شبکه.



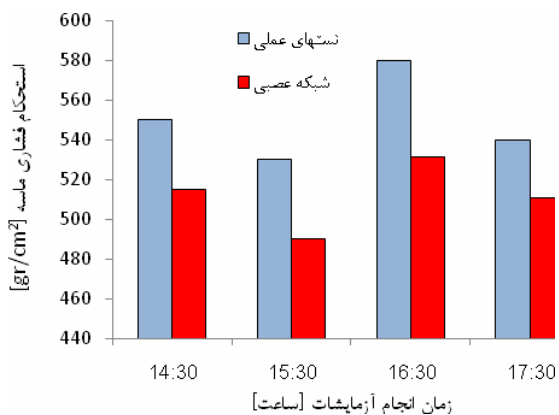
شکل ۵- مقایسه نتایج خروجی شبکه و آزمایش‌های عملی در رطوبت ۱۱ درصد برای آزمایش شبکه.



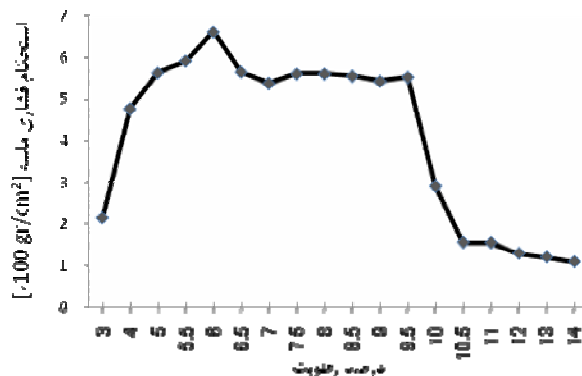
شکل ۶- مقایسه نتایج عملی جدید با رطوبت ۵/۲ با نتایج بدست آمده از شبکه عصبی.



شکل ۷- مقایسه نتایج عملی جدید با رطوبت ۷/۳ با نتایج بدست آمده از شبکه عصبی.



شکل ۸- مقایسه نتایج عملی جدید با رطوبت ۹/۲ با نتایج بدست آمده از شبکه عصبی.



شکل ۹- تغییرات استحکام فشاری ماسه نسبت به درصد رطوبت.