

## بررسی و پیش بینی خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت کاه و گچ به کمک مدل شبکه استنتاج عصبی فازی تطبیقی

فرزانه میراخورلو<sup>۱</sup>، ابراهیم نجفی کانی<sup>۲\*</sup>

| اطلاعات مقاله  | چکیده   |
|--|---|
| دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۲۹   |   |
| پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۱۱  |   |
| <b>واژگان کلیدی:</b><br>گچ،<br>خواص مکانیکی،<br>الیاف طبیعی،<br>کامپوزیت گچ،<br>مدل آنفیس،<br>میکروساختار. | <p>کمبرود منابع زیست محیطی و اقتصادی خواستار افزایش پژوهش در زمینه جایگزین‌های جدید در ساخت و ساز عمرانی است. در چند دهه گذشته، گچ به عنوان مواد نازک کاری دیوار و سقف استفاده شده است. مطالعات فراوانی انجام شده است تا از الیاف طبیعی به عنوان تقویت کننده گچ استفاده شود و طی آن موفق به سبک سازی کامپوزیت‌های گچی شده‌اند. در این پژوهش، از ماده لیگنوسلولزی الیاف کاه برنج در ۸ سطح نسبت به وزن گچ جهت ساخت پنل‌های گچی استفاده گردید. همچنین از متیل سلولز، آهک، نشاسته و محلول‌های قلیایی آهک اشباع و هیدروکسیدتاسیم ۱ مولار به عنوان اصلاح کننده‌ی کاه و به منظور فرآوری کاه در این تحقیق به کار گرفته شد. از هر ترکیب، ۳ نمونه ساخته شد و تهیه نمونه‌ها مطابق با استاندارد و اندازه گیری خواص فیزیکی و مکانیکی از جمله مقاومت خمشی-فشاری و دانسیته مطابق با استانداردهای مربوطه انجام گرفت. به کمک برنامه نویسی در نرم افزار متلب و با استفاده از شبکه عصبی- فازی آنفیس، مدلی جهت پیش‌بینی خواص ترکیبات جدید انجام شد و نیز پیشنهاد ترکیبات بهینه استخراج شده از مدل به دست آمد. کاه عملکرد ضعیفی در مقاومت‌ها از خود نشان داد و دانسیته را حدود ۱۲ درصد کاهش داد. کاه فرآوری شده منجر به بهبود مقاومت فشاری-خمشی شد و مقاومت خمشی را ۹ درصد افزایش داد. نتایج حاصل از بررسی های میکروساختاری با میکروسکوپ الکترونی تاییدی بر نتایج رشد مقاومت بوده است.</p> |

### ۱- مقدمه

روز به روز راه‌های مناسب‌تری برای استفاده از ضایعات آن ارائه می‌شود. در راستای کاهش مصرف انرژی و کاهش گازهای آلاینده هوا و کاهش مصرف گچ می‌توان از ضایعات کشاورزی به صورت الیاف در ساخت کامپوزیت‌های گچی استفاده کرد [۱].

از آنجایی که که نمی‌توان ماده‌ای یافت که همه خواص مورد نظر را برای بهبود عملکرد کیفی محصول نهایی دارا باشد، باید به دنبال چاره‌ای دیگر بود. اگر مواد مهندسی به سه دسته اصلی فلز، پلیمر و سرامیک طبقه‌بندی شود، کامپوزیت<sup>۲</sup> دسته چهارمی است که در واقع ترکیبی از سه

رشد جمعیت و تغییر سطح زندگی بشر، تنوع طلبی و افزایش مصرف از یک سو و محدود شدن منابع طبیعی و منابع کشاورزی از سوی دیگر، انسان‌ها را مجبور به یافتن راه‌هایی جدید در رفع احتیاجاتشان نموده است. کاهش گازهای آلاینده و حفظ محیط زیست از دیگر دغدغه‌های جوامع بشری است. تولید گچ با وجود آلاینده‌هایی که به همراه دارد یکی از شاخصه‌های توسعه یافتگی کشورها به خصوص کشورهای در حال توسعه است و برنج دومین غله جهان و اصلی ترین محصول کشاورزی این مناطق است که

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: e\_najafi@semnan.ac.ir

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه سمنان  
۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه سمنان

<sup>2</sup> Composite

نمونه‌های بدون این ذرات گردیده است [۷]. در بررسی انجام شده توسط بیلبا<sup>۹</sup>، خواص باگاس اصلاح شده با سیلان در تولید کامپوزیت‌های سیمانی نشان داد که سیلان سبب تغییراتی در ساختار الیاف از قبیل واکنش‌پذیری و افزایش ابعاد آن شده است [۸].

در تحقیق انجام شده توسط تورگال<sup>۱۰</sup> بررسی اصلی بر مبنای بهبود خواص مواد ساختمانی با پایه سیمان است. محققان تحقیق نامبرده به دنبال بهبود عملکرد سیمان به کمک فیبرهای گیاهی<sup>۱۱</sup> بوده‌اند [۹]. در مطالعه انجام شده توسط واسکونسوس<sup>۱۲</sup> از کاه برای تقویت بلوک‌های پایه سیمانی استفاده شده است. سه مدل مختلف برای ترکیب با درصدهای مشخص شبیه‌سازی شده است و همچنین با توجه به معیارهای مختلف نتایج آن از لحاظ آلاینده‌گی و مصرف انرژی و هزینه تمام شده مورد بررسی قرار گرفت [۱۰]. در مطالعات انجام شده توسط چینتا<sup>۱۳</sup> و کاراده<sup>۱۴</sup> کامپوزیت‌های مختلف مانند کاه برنج و فیبرهای طبیعی به صورت الیاف طبیعی استفاده شده است [۱۱-۱۲].

در تحقیق انجام شده توسط آلبارا<sup>۱۵</sup> نیز بررسی کامپوزیت گج استفاده شده در جنوب اردن مورد مطالعه واقع شده که اهمیت این بررسی را نشان می‌دهد [۱۳]. در مطالعه انجام شده توسط خرمی و همکاران افزایش ظرفیت باربری خمشی<sup>۱۶</sup> کامپوزیت‌های سیمانی با استفاده از الیاف طبیعی صورت گرفته است [۱۴]. در تحقیق انجام شده توسط آبرل<sup>۱۷</sup> بر اساس افزودنی‌های مختلف مانند اسیدهای چرب و نمک، سیلان، پارافین-واکس و الکیل سیلیکون جذب آب در کامپوزیت‌های گچی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که کاهش جذب آب برای الکیل سیلیکون تا ۲٪ می‌باشد [۱۵]. مطالعات محدودی در زمینه استفاده از شبکه‌های هوش مصنوعی جهت شبیه‌سازی خواص مکانیکی از قبیل مقاومت فشاری و کششی و ... چه در حوزه سیمان چه در حوزه گج صورت گرفته است. روی<sup>۱۸</sup> در سال ۲۰۰۵ با استفاده از هوش مصنوعی آنفیس<sup>۱۹</sup> جهت پیش‌بینی خواص سختی سطحی نشان داد که تابع عضویت

دسته دیگر است. موادی چند جزئی که خواص آنها در مجموع از هرکدام از اجزاء بهتر است. ضمن آنکه اجزای مختلف، کارایی یکدیگر را بهبود می‌بخشند. کامپوزیت (ماده مرکب یا چندسازه) بصورت زیر تعریف می‌شود: ماده‌ای اطلاق می‌شود که از دو فاز ماتریس و تقویت‌کننده تشکیل شده باشد. کامپوزیت شامل یک فاز زمینه (ماتریکس<sup>۱</sup>) و یک یا چند فاز تقویت‌کننده (پرکننده یا فیلر<sup>۲</sup>) است. البته ترکیب مواد در کامپوزیت یک ترکیب فیزیکی<sup>۳</sup> و ماکروسکوپی<sup>۴</sup> است؛ یعنی اجزای تشکیل‌دهنده یک کامپوزیت با هم به صورت شیمیایی ترکیب نمی‌شوند به طوری که اجزای تشکیل‌دهنده ماهیت شیمیایی و طبیعی خود را کاملاً حفظ می‌کنند و سطح مشترک مشخصی<sup>۵</sup> بین اجزا وجود دارد. تعدادی از مطالعات نشان داده‌اند که الیاف مصنوعی<sup>۶</sup> تقویت شده با گج دارای بهترین راندمان خواص مکانیکی هستند ولی هزینه‌های زیاد و اثر آن بر محیط زیست دانشمندان و مهندسان را به سنتز<sup>۷</sup> مواد جدید و کم هزینه و دارای منابع تجدید شونده و سازگار با محیط زیست هدایت کرده است [۲-۴].

در پژوهش انجام شده توسط طاهری نیا، امکان استفاده از کاغذ بازیافتی در ساخت فرآورده مرکب الیاف-سیمان را مورد مطالعه قرار داده و بیان نمودند پل‌های ساخته شده با ۱۰ درصد الیاف کاغذ بازیافتی و ۵ درصد کلرید کلسیم بالاترین خواص فیزیکی و مکانیکی را دارا می‌باشند [۵]. همچنین مطالعه انجام شده توسط قاسمی پور در بررسی ویژگی‌های کامپوزیت‌های سیمانی تقویت شده با خمیر الیاف کارتن بازیافتی بیان شد که این کامپوزیت‌ها با ذرات میکروسیلیس تقویت شده بود. در مقایسه با نمونه‌های بدون الیاف به این نتیجه رسیدند که استفاده از الیاف سبب بهبود مقدار جذب آب گردیده است [۶].

در پژوهشی تحت عنوان تاثیر نانو سیلیس بر ساختار میکروسکوپی و خواص مکانیکی بتن‌های سیمانی توسط بوشهریان<sup>۸</sup> بیان نمودند که نانو سیلیس سبب بهبود رفتارهای فیزیکی و مکانیکی بتن‌های حاصله در مقایسه با

<sup>11</sup> Natural fibers

<sup>12</sup> Vasconcelos

<sup>13</sup> Chinta

<sup>14</sup> Karade

<sup>15</sup> Albara

<sup>16</sup> Bending

<sup>17</sup> Aberle

<sup>18</sup> Roy

<sup>19</sup> Anfis

<sup>1</sup> Matrix

<sup>2</sup> Filler

<sup>3</sup> Physical

<sup>4</sup> Macroscopic

<sup>5</sup> Specific common surface

<sup>6</sup> Artificial fibers

<sup>7</sup> Synthesis

<sup>8</sup> Boshehrian

<sup>9</sup> Bilba

<sup>10</sup> Fernadndo Pacheco-Torgal.

گردید. برای تهیه فیبر قابل استفاده در تولید کامپوزیت گچی، ابتدا الیاف به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی گراد قرار داده شد تا رطوبت آن به طور کامل گرفته شود. سپس به وسیله آسیاب برقی آسیاب شد و از الک عبور داده شد به طوری که از الک مش ۶۰ کامل عبور کرده و روی الک مش ۱۲۰ باقی بماند. ترکیبات شیمیایی کاه مورد استفاده به شرح زیر است: سلولز ۵۱ درصد، لیگنین ۲۳ درصد، مواد استخراجی ۶ درصد و خاکستر ۲۳/۱۴ درصد.

آهک هیدراته جهت فعال کردن کاه استفاده شد. آهک در دو سطح (۲٪ و ۵٪) به کار گرفته شد. کاه به مدت ۲۴ ساعت در محلول اشباع آب و آهک غوطه ور شد و پس از عبور از صافی به مدت ۲ ساعت در آون با دمای ۶۰ درجه سانتی گراد قرار داده شد.

پتاسیم هیدروکسید یا پتاس با خلوص ۹۸٪ تهیه شده از کمپانی مرک برای فرآوری کاه و اصلاح آن مورد استفاده قرار گرفت. کاه به مدت ۲۴ ساعت در محلول اشباع پتاسیم هیدروکسید غوطه ور شد. سپس پس از عبور از صافی و شست شوی آن، به مدت ۲ ساعت در آون با دمای ۶۰ درجه سانتی گراد قرار داده شد تا خشک شود.

در این تحقیق، از نشاسته در دو سطح (۵٪ و ۲٪) برای افزایش قدرت چسبندگی ماتریس و الیاف استفاده شده است. نشاسته از لحاظ ساختاری یک ترکیب خوشه‌ای از پلیمرهای خطی است که در آن پیوندهای زنجیری آلفا ۱ و ۴ ستونی از واحدهای گلوکز و شاخه‌های فرعی با پیوند آلفا ۱ و ۵ را تشکیل داده‌اند.

متیل سلولز نوعی تثبیت‌کننده، نگهدارنده و جذب‌کننده آب، تشکیل دهنده لایه و غلظت دهنده بوده که جهت بهسازی استحکام می‌تواند محصولات را زیبا و بدون هیچگونه ترک و حباب و عیب ایجاد نموده و قدرت چسبندگی را افزایش دهد که در نتیجه باعث شکل‌پذیری آسان و افزایش استحکام محصول نهایی خواهد شد. در این پژوهش از متیل سلولز در دو سطح (۵٪ و ۲٪) استفاده گردیده است.

## ۲-۱- مقاومت فشاری<sup>۲</sup>

نمونه شاهد و نمونه‌های حاوی فیبر برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری تحت آزمون قرار گرفت. مقاومت فشاری

زنگوله ای نتایج بهتری نسبت به تابع مثلثی دارد [۱۶]. در تحقیق انجام شده توسط یدالهی و همکاران در سال ۲۰۱۶، مقاومت فشاری کامپوزیت های ژئوپلیمری با استفاده از شبکه مصنوعی آنفیس و تابع عضویت زنگوله ای شبیه سازی شد و نتایج بدست آمده سازگاری بیشتری نسبت به رگراسیون خطی نشان داد [۱۷].

وخشوری و نژادی در سال ۲۰۱۸ با استفاده از مدل آنفیس روشی برای پیش بینی مقاومت فشاری بتن خودتراز و ارتباط آن با اسلامپ و ترکیب طرح اختلاط بتن تولید شده ارائه کردند [۱۸].

با توجه به آنچه آورده شد، در این زمینه و مقایسه اولیه در زمینه انواع الیاف مورد استفاده، الیاف طبیعی در کامپوزیت‌های گچی نسبت به الیاف مصنوعی ضعیف تر عمل کرده است ولی از لحاظ آلودگی‌های زیست محیطی و سازگاری زیست محیطی بیشتر می‌توان بیان داشت که الیاف طبیعی به عنوان جایگزین الیاف مصنوعی قابل استفاده هستند. با توجه به کمبود بررسی‌ها در این زمینه، نیاز به تحقیقات بیشتر و به کارگیری علوم جدیدتر در این زمینه احساس می‌شود.

در این پژوهش سعی شده است به اصلاح خواص کامپوزیت گچ توسط الیاف طبیعی با استفاده از افزودنی‌های و با روش‌های مختلف پرداخته شود و همچنین با استفاده از شبکه عصبی آنفیس<sup>۱</sup> به ارایه مدلی جهت پیش بینی خواص محصول کامپوزیت نهایی استفاده شود. در بخش بعدی آزمایش‌های انجام شده و نحوه اجرای آنها به همراه نتایج ارایه خواهد گردید. سپس در بخش سوم تحلیل‌ها و نتایج اولیه و تصاویر میکروسکوپ الکترونی آورده خواهد شد. پس از آن و در بخش چهارم نحوه مدلسازی آنفیس و نتایج حاصل از آن برای تخمین و پیش بینی خواص سایر ترکیب‌ها ارایه خواهد گردید.

## ۲- مواد و روش آزمایش

گچ استفاده شده در این پژوهش، گچ صنعتی ساختمانی با ترکیب شیمیایی  $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$  است که دارای خلوص ۹۲٪ وزنی از سولفات کلسیم، آب کریستالی ۵/۴٪ و با دانه بندی ۲٪ باقیمانده روی الک مش ۱۲۰ می باشد. آب مورد استفاده آب شهری قابل شرب می‌باشد. کاه برنج مورد استفاده در این تحقیق، از مزارع برنج شهرستان ساری تهیه

<sup>۲</sup> Compressive strength

<sup>۱</sup> ANFIS (Adaptive Neuron Fuzzy Inference System)

(۲) تصویر دستگاه اندازه‌گیری مقاومت فشاری و خمشی نشان داده شده است.



شکل ۲: تصویر دستگاه اندازه‌گیری مقاومت فشاری (سمت راست) و مقاومت خمشی (سمت چپ)

### ۲-۳- روند آزمایش

در فاز اول، بررسی تاثیر الیاف کاه برنج بر روی خواص کامپوزیت‌های گچی صورت می‌گیرد. در این تحقیق نسبت گچ به آب ثابت در نظر گرفته شد تا ویسکوزیته و روانی خمیر تولید شده برای تمامی نمونه‌ها ثابت باقی بماند و مقدار الیاف کاه برنج در ۸ سطح مختلف در نظر گرفته شد. اختلاط مواد در دو فاز صورت گرفت به طوری که الیاف کاه با گچ در یک فاز جامد با همزن برقی با هم مخلوط شدند. سپس در مرحله بعد، فاز جامد با آب مطابق با استاندارد با یکدیگر مخلوط شده تا یک خمیر هموزن ایجاد شود و در نهایت عمل قالب‌گیری انجام شد. در بخش کامپوزیت گچ-کاه اصلاح شده نیز نسبت آب به گچ ثابت و ۶۰٪ و مقدار کاه اضافه شده ۳٪ وزنی نسبت به گچ در نظر گرفته شد و مواد اصلاح‌کننده دیگر با مقادیر متغییر در نظر گرفته شد که در جدول زیر اطلاعات ساخت نمونه‌ها آورده شده است. نحوه اختلاط گچ و کاه و قالب‌گیری مانند مرحله قبلی بوده است.

### ۳- تحلیل نتایج کامپوزیت گچ-کاه

نتایج آزمایش مقاومت فشاری و خمشی و دانسیته برای کامپوزیت گچ-کاه و نمونه شاهد بعد از یک روز در شکل (۳)، (۴) و (۵) مشخص هستند. مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و دانسیته گچ یک روزه به ترتیب ۱۲/۵۰ مگاپاسکال، ۲/۲۵ مگاپاسکال و ۱/۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. همانطور که مشخص است، افزودن کاه به گچ مقاومت فشاری آن را کاهش داده است و با افزایش

برای هر نمونه در دو نوبت یک روزه و ۷ روزه بعد از ساخت نمونه‌ها در قالب‌های ۲۰×۲۰×۲۰ میلی‌متر مورد آزمون قرار گرفت. نمونه‌ها برای مقاومت فشاری موازی با سطح پنل با افزایش نیروی فشاری تا زمانی که شکست رخ دهد مورد آزمایش قرار گرفت. دستگاه اندازه‌گیری مقاومت فشاری ساخت ایران و شرکت آزمون بوده که امکان بارگذاری تا ۵ تن را دارد. بنابراین می‌توان حداکثر بار شکست را محاسبه کرد. مقاومت فشاری از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۹]:

$$K_p = \frac{W}{A} \quad (1)$$

که در معادله (۱) داریم:

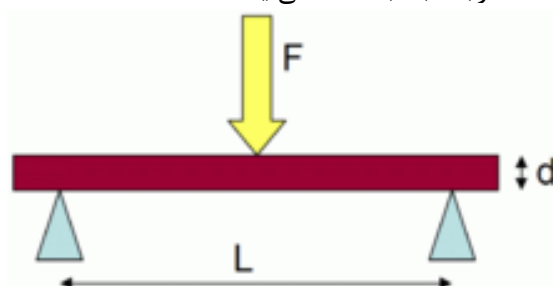
$$K_p \text{ مقاومت فشاری } \left( \frac{N}{mm^2} \right) \\ W \text{ حداکثر نیروی اعمال شده به نمونه آزمون } (N) \\ A \text{ سطح مقطع نمونه آزمون } (mm^2)$$

### ۲-۲- مقاومت خمشی<sup>۱</sup>

نمونه‌های ساخته شده برای آزمون مقاومت خمشی دارای ابعاد ۱۵×۱۶۰×۱۶۰ میلی‌متر می‌باشند. مقاومت خمشی برای هر نمونه در دو نوبت یک روزه و هفت روزه بعد از ساخت مورد آزمون قرار گرفت. بار به صورت عمودی بر سطح پنل وارد شد. دستگاه با دقت ۰/۱ سرعت به کار گرفته شد تا زمانی که شکستگی اتفاق افتد و حداکثر بار از دستگاه خوانده شد. مقاومت خمشی از معادله زیر محاسبه شد که با توجه به شکل (۱) نگارش می‌گردد:

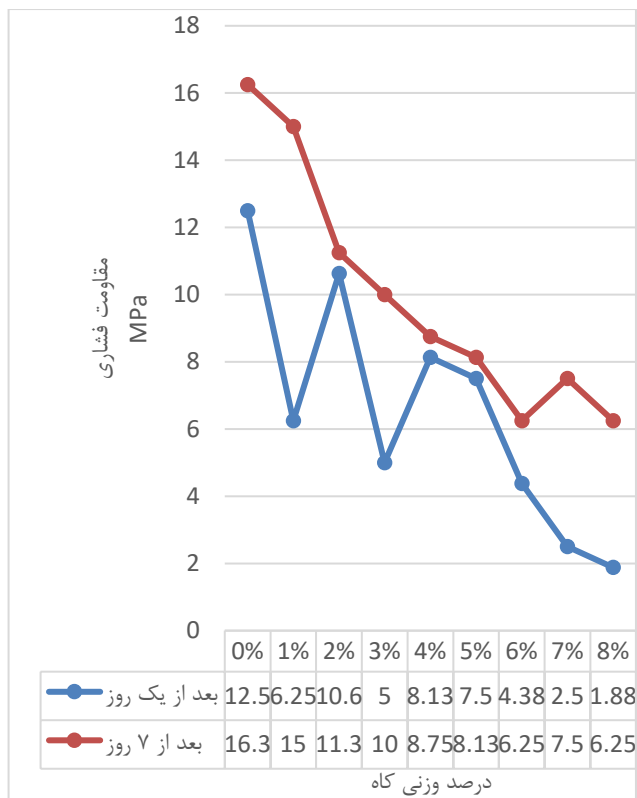
$$p = \frac{3FL}{2Wd^2} \quad (2)$$

مقاومت خمشی از رابطه بالا به دست می‌آید. شایان ذکر است که مقاومت فشاری نیز بر اساس روابط مقاومت مصالح همانند رابطه بالا به دست می‌آید.

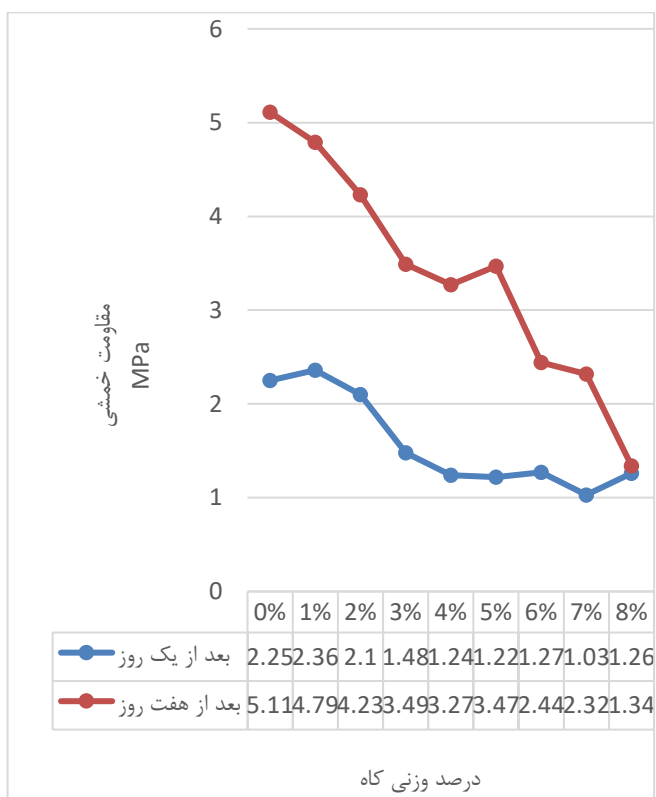


دستگاه اندازه‌گیری مقاومت خمشی ساخت ایران و شرکت آزمون بوده که امکان بارگذاری تا ۲ تن را دارد. در شکل

<sup>۱</sup> Bending Strength



شکل ۳: نتایج آزمایش مقاومت فشاری درصدهای مختلف کاه  
یک روزه و هفت روزه



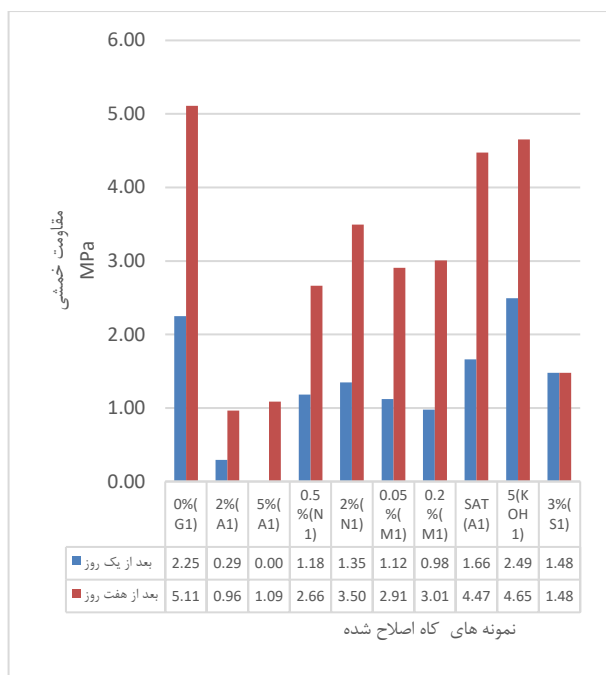
شکل ۴: نتایج آزمایش های مقاومت خمشی درصدهای  
مختلف کاه بعد از یک روز و هفت روزه

درصد کاه تا ۸ درصد این کاهش بیشتر می شود تا به مقدار ۱/۸۸ مگاپاسکال برسد. بهترین نتیجه مقاومت فشاری و مقاومت خمشی مربوط به سطح ۵ درصد می باشد که ۳۴ درصد کاهش یافته است. بهترین نتیجه مقاومت خمشی مربوط به ۳ درصد می باشد که ۳۴ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است و همچنین دانسیته نیز برای کاه ۳ درصد و ۵ درصد ۱۳ درصد کاهش یافته است. مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و دانسیته برای کامپوزیت گچ-کاه هفت روزه به ترتیب  $16/25 \text{ MPa}$ ،  $14/11 \text{ MPa}$  و  $5/11 \text{ g/cm}^3$  می باشد. همانطور که مشخص است، بین درصدهای مختلف تقریباً بهترین نتیجه مربوط به کاه ۳ درصد و ۵ درصد شبیه به حالت ۱ روزه می باشد ولی در کل از نمونه شاهد ضعیف تر عمل کرده است. نتایج مقاومت فشاری ۴۵ درصد، مقاومت خمشی ۳۵ درصد، و دانسیته ۶ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته اند.

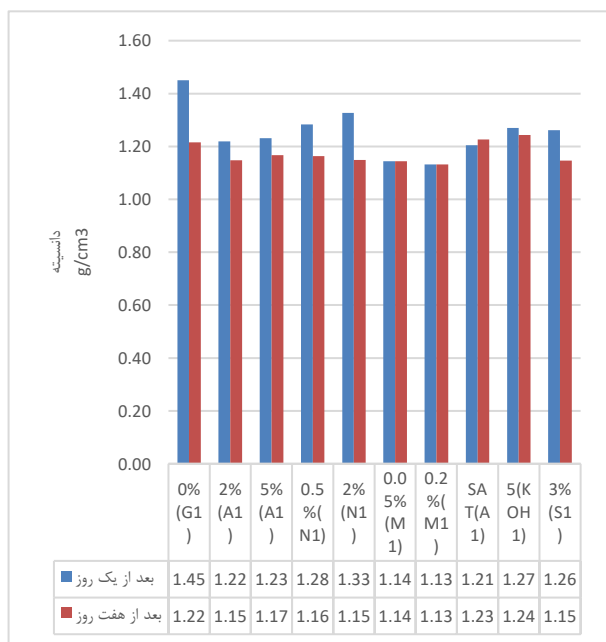
نتایج آزمایش مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و دانسیته کامپوزیت گچ-کاه اصلاح شده نیز بعد از یک و هفت روز در شکل های (۶)، (۷) و (۸) نشان داده شده است. مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و دانسیته گچ شاهد هفت روزه به ترتیب  $16/25 \text{ MPa}$ ،  $14/25 \text{ MPa}$  و  $2/25 \text{ g/cm}^3$  می باشد. با توجه به نتایج می توان گفت که کاه فرآوری شده با پتاسیم هیدروکسید یک مولار بهترین نتیجه را رقم زد. این ترکیب و پس از آن کاه فرآوری شده با آهک اشباع بهترین پیشنهاد برای اصلاح کاه می باشد. مقاومت فشاری، مقاومت خمشی به ترتیب ۷ درصد کاهش، ۱۲ درصد افزایش و ۹ درصد افزایش را نشان می دهد و همچنین دانسیته ثابت مانده است.

جدول ۱: شرایط انجام آزمایش و ترکیب درصد مواد مصرفی در مرحله استفاده از کاه اصلاح شده

| کد   | کاه | آهک | نشاسته | متیل سلولوز | غوطه‌ور در پتاس اشباع | غوطه‌ور در آهک اشباع |
|------|-----|-----|--------|-------------|-----------------------|----------------------|
| A1   | ٪۳  | ٪۲  | ٪۰     | ٪۰          | ٪۰                    | ٪۰                   |
| A2   | ٪۳  | ٪۵  | ٪۰     | ٪۰          | ٪۰                    | ٪۰                   |
| N1   | ٪۳  | ٪۰  | ٪۰٫۵   | ٪۰          | ٪۰                    | ٪۰                   |
| N2   | ٪۳  | ٪۰  | ٪۲     | ٪۰          | ٪۰                    | ٪۰                   |
| M1   | ٪۳  | ٪۰  | ٪۰     | ٪۰٫۰۵       | ٪۰                    | ٪۰                   |
| M1   | ٪۳  | ٪۰  | ٪۰     | ٪۰٫۲        | ٪۰                    | ٪۰                   |
| SA T | ٪۰  | ٪۰  | ٪۰     | ٪۰          | ٪۳                    | ٪۰                   |
| KO H | ٪۰  | ٪۰  | ٪۰     | ٪۰          | ٪۰                    | ٪۳                   |



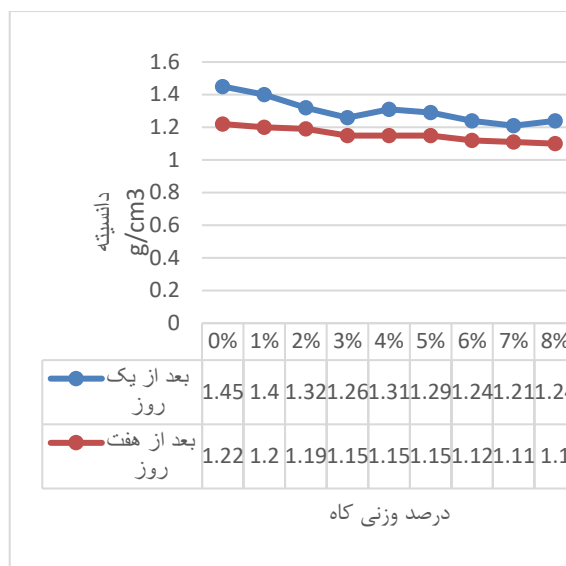
شکل ۷: مقاومت خمشی کامپوزیت گچ-کاه اصلاح شده بعد از هفت و یک روز



شکل ۸: دانسیته کامپوزیت گچ-کاه اصلاح شده بعد از هفت و یک روز

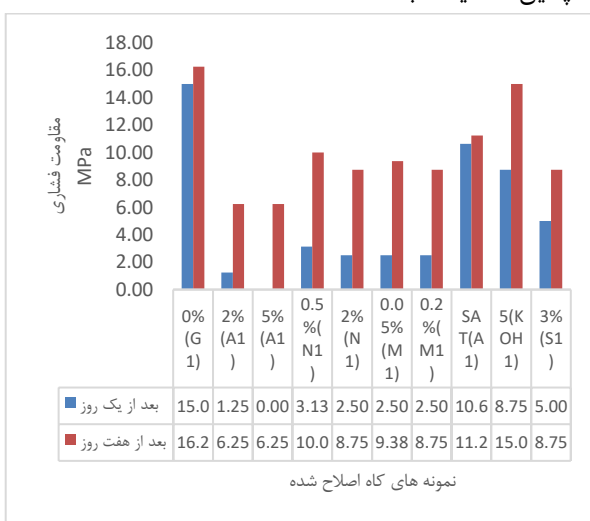
#### ۴- بررسی میکروساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی

همانطور که در بخش قبلی ذکر شد، به منظور فهم بهتر اختلاط و نحوه کنار هم نشستن مواد افزوده شده در ماتریس ایجاد شده، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برای تفسیر هر چه بهتر به کار می رود. نمونه‌های مختلف



شکل ۵: نتایج آزمایش دانسیته درصدهای مختلف کاه بعد از یک و هفت روز

نتایج آزمایش مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و دانسیته کامپوزیت گچ-کاه اصلاح شده نیز بعد از یک و هفت روز در شکل های (۶)، (۷) و (۸) نشان داده شده است. مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و دانسیته گچ شاهد هفت روزه به ترتیب ترتیب ۱۶/۲۵ MPa، ۲/۲۵ MPa و ۱/۲۲ g/cm<sup>3</sup> می‌باشد. با توجه به نتایج می‌توان گفت که کاه فرآوری شده با پتاسیم هیدروکسید یک مولار بهترین نتیجه را رقم زد. این ترکیب و پس از آن کاه فرآوری شده با آهک اشباع بهترین پیشنهاد برای اصلاح کاه می‌باشد. مقاومت فشاری، مقاومت خمشی به ترتیب ۷ درصد کاهش، ۱۲ درصد افزایش و ۹ درصد افزایش را نشان می دهد و همچنین دانسیته ثابت مانده است.



شکل ۶: آزمایش مقاومت فشاری کامپوزیت گچ-کاه اصلاح شده بعد از هفت روز و یک روز

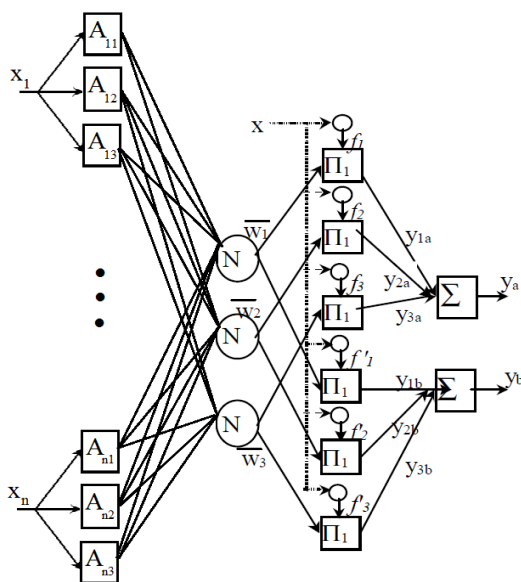


در شکل (۱۰) تصاویر مربوط به کامپوزیت گچ-کاه فرآوری شده با هیدروکسید پتاسیم نمایش داده شده است. همانطور که در شکل ملاحظه می شود بلورهای گچ به خوبی تقویت شده اند و اختلاط نیز به خوبی صورت گرفته است. نسبت به نمونه شاهد، بلورها بسیار ضخیم تر شده اند و همچنین اختلاط بیشتر صورت گرفته و اتصالات میان بلورها نیز تقویت شده که این امر منجر به بهبود عملکرد گچ در این مخلوط شده است.

### ۵- شبکه انفیس<sup>۱</sup>

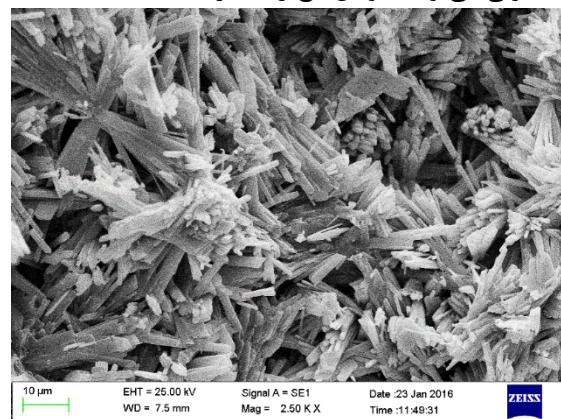
شبکه انفیس، شبکه عصبی<sup>۲</sup> استنتاج فازی<sup>۳</sup> است که توسط جانگ<sup>۴</sup> گردید [۲۴]. در ادامه این شبکه براساس مدل فازی سوگنو<sup>۵</sup> مرتبه اول<sup>۶</sup> تکمیل گردید [۲۵]. این شبکه غالباً بصورت ترکیب دو روش حداقل مربعات خطا<sup>۷</sup> و روش بازگشتی آموزش می بیند. شماتیک شبکه انفیس در شکل (۱۱) نشان داده شده است. این شبکه برای حالت دو ورودی  $x$  و  $y$ ، از دو قانون کلی پیروی می کند [۲۶]:

$$\begin{aligned} \text{Rule1: If } x \text{ is } A_1 \text{ and } y \text{ is } B_1, \text{ then} \\ z_1 = p_1x + q_1y + r_1 \\ \text{Rule2: If } x \text{ is } A_2 \text{ and } y \text{ is } B_2, \text{ then} \\ z_2 = p_2x + q_2y + r_2 \end{aligned} \quad (۴)$$

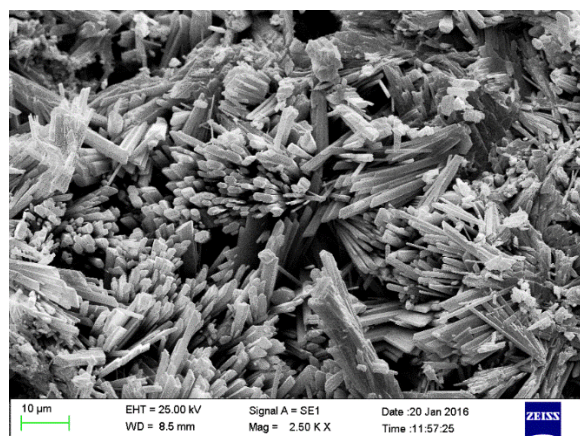


شکل ۱۱: شماتیک ساختار شبکه انفیس برای  $n$  ورودی و دو خروجی برگرفته شده از [۲۶].

عکس برداری شده و همچنین چینش ذرات کنار هم مورد بررسی قرار گرفت. به منظور فهم بهتر از ساختار خمیر سخت شده گچ، ساختار میکروسکوپی نمونه شاهد نیز مورد بررسی قرار گرفت. اگر رشد بلور گچ در سطح محصول به گونه ای باشد که تخلخل را کاهش و ساختمان بلورها را ضخیم و مستحکم کند، سختی سطحی افزایش می یابد. همچنین اگر اتصال بین بلورها به نحو بهتری صورت پذیرد افزایش مقاومت فشاری و خمشی به دنبال آن خواهد بود. [۲۰-۲۳]. شایان ذکر است که این رشد باید در سراسر بلورها باشد تا بتواند این خاصیت را در کل ساختار به وجود آورد. شکل ۹ تصویر میکروسکوپ الکترونی خمیر سخت شده گچ شاهد مورد استفاده را نشان می دهد. همانطور که در شکل ۹ مشخص است بلورهای گچ کاملاً جدا از یکدیگر و در فواصل مختلف قرار گرفته اند که پر نمودن این فواصل به خوبی می تواند خواص گچ را تغییر دهد.



شکل ۹: تصویر میکروسکوپی خمیر سخت شده گچ شاهد



شکل ۱۰: تصویر از کامپوزیت گچ-کاه فرآوری شده با هیدروکسید پتاسیم

<sup>5</sup> Sugeno

<sup>6</sup> First order

<sup>7</sup> Least Square

<sup>1</sup> ANFIS

<sup>2</sup> Neural Network

<sup>3</sup> Inference System

<sup>4</sup> Jang

خروجی داده می‌شود. عملگر  $\Pi$  به صورت زیر می‌باشد:

$$O_i^2 = w_i = \prod_{j=1}^m g(x) \quad (7)$$

رابطه (۷) می‌تواند تعداد ورودی بیشتری نیز در خود جای دهد اما در این مقاله با توجه به ۱۲ ورودی تابع داریم. پس از انجام این موارد بایستی که وزن‌ها نرمال بشوند و این امر در لایه بعدی صورت می‌پذیرد. نرمالسازی بر اساس تقسیم وزن یک گره بر مجموع اوزان سایر گره‌ها بدست می‌آید.

$$O_i^3 = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad (8)$$

خروجی این لایه وزن‌های نرمال شده برای شروع شبکه نامیده می‌شوند. حال با توجه به رابطه (۴) هر یک از خروجی‌های نهایی به دست می‌آیند:

$$O_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad (9)$$

که در آن  $i = 1, 2$  می‌باشد و  $\bar{w}_i$  از لایه سوم به دست می‌آید. در نهایت لایه پنجم خروجی مسئله را به دست می‌دهد که به صورت روابط زیر برای دو خروجی نگارش می‌شود:

$$O_2^5 = y_a = \sum_i y_i = \sum_i \bar{w}_i f'_i = \sum_i \bar{w}_i (p'_i x + q'_i y + r'_i) \quad (10)$$

$$O_2^5 = y_b = \sum_i y_i = \sum_i \bar{w}_i f''_i = \sum_i \bar{w}_i (p''_i x + q''_i y + r''_i) \quad (11)$$

که در روابط بالا  $y_a$  و  $y_b$  خروجی‌های مطلوب سیستم هستند که روابط بالا به کمک حداقل مربعات<sup>۳</sup> حل می‌شوند. بنابراین با نگارش مجدد آنها روابط به صورت زیر خواهد شد [۲۶]:

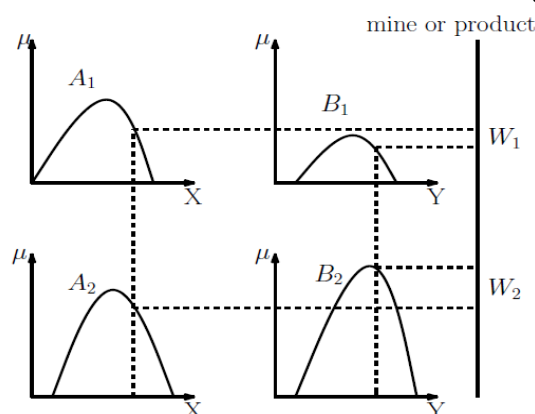
$$y_a = [w_1 x_1 \ w_1 x_2 \ w_1 \ w_2 x_1 \ w_2 x_2 \ w_2] \begin{bmatrix} p_1 \\ q_1 \\ r_1 \\ p_2 \\ q_2 \\ r_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$y_b = [w_1 x_1 \ w_1 x_2 \ w_1 \ w_2 x_1 \ w_2 x_2 \ w_2] \begin{bmatrix} p'_1 \\ q'_1 \\ r'_1 \\ p'_2 \\ q'_2 \\ r'_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

در قوانین بالا،  $(A_i \text{ و } B_i \ (i = 1, 2))$  توابع عضویت هستند که در شکل ۱۲ نشان داده شده‌اند. همچنین  $(p_i, q_i \text{ و } r_i)$  ثابت‌های از پیش تعیین شده شبکه عصبی می‌باشند. خروجی نهایی شبکه از رابطه زیر بدست می‌آید [۲۷]:

$$f = \frac{w_1 f_1 + w_2 f_2}{w_1 + w_2} \quad (5)$$

در معادله (۵)،  $w_i$  وزن‌های شبکه که براساس توابع عضویت بدست می‌آیند. شایان ذکر است که ورودی و خروجی شبکه‌های عصبی و تمام مدل‌های ریاضی اعداد می‌باشند.



شکل ۱۲: شماتیک توابع عضویت برگرفته از [۲۶].

بدین صورت که خواص به عدد تعبیر شده و سپس اعداد به دست آمده از مدل نیز به خواص تعبیر می‌گردند. در این قسمت به عنوان نوآوری و برای کاهش زمان محاسبات از مدل آنفیس جدید با دو خروجی با ساختار مشابه به آنفیس معمول استفاده شده است. همانطور که مشخص است، تعداد ورودی‌ها قابل تغییر می‌باشد و تعداد خروجی به صورت دوتایی برای به دست آوردن همزمان مقاومت فشاری و خمشی تعریف شده است. بر این اساس لایه اول به صورت زیر توابع عضویت را می‌سازد:

$$O_i^1 = g(x) \quad (6)$$

که در آن  $g$  تابع عضویت شبکه فازی می‌باشد و در این پژوهش به صورت زنگوله‌ای در نظر گرفته شده‌اند. ورودی‌های مسئله نیز مقادیر  $x_1$  تا  $x_n$  را دارند که وارد گره این توابع می‌شوند. در لایه دوم هر گره<sup>۱</sup> با حرف  $\Pi$  نشان داده شده‌اند که مشخص کننده وزن‌های اولیه<sup>۲</sup> هر قانون هستند. این وزن‌ها در سیگنال‌های ورودی ضرب شده و جمع آنها به

<sup>3</sup> least squares

<sup>1</sup> node

<sup>2</sup> firing strength



دوم خطا و همچنین مقدار مجدور میانگین است. این مقادیر به ترتیب ۰/۰۱۱۷ و ۰/۰۰۰۱ برای مقادیر مقاومت خمشی و فشاری نشان می‌دهند را در شکل (۱۴) نشان می‌دهد.

جدول ۲: داده‌های ورودی شبکه عصبی

| ردیف | بردار                    | نوع داده                |
|------|--------------------------|-------------------------|
| ۱    | چگالی ماده افزودنی       | داده نسبی ثابت          |
| ۲    | چگالی گچ                 | داده نسبی ثابت          |
| ۳    | درصد اختلاط ماده افزودنی | درصد ۰ تا ۱۰۰           |
| ۴    | ماده شیمیایی افزودنی     | داده نسبی جدول ۱        |
| ۵    | مدول یانگ ماده افزودنی   | داده نسبی ثابت          |
| ۶    | مدول یانگ گچ             | داده نسبی ثابت          |
| ۷    | ضریب پواسون ماده افزودنی | داده نسبی ثابت          |
| ۸    | ضریب پواسون گچ           | داده نسبی ثابت          |
| ۹    | جذب آب ماده افزودنی      | داده نسبی بر اساس مقدار |
| ۱۰   | جذب آب گچ                | داده نسبی بر اساس مقدار |
| ۱۱   | ماده جدید پودر شده است؟  | خیر = ۱ بلی             |
| ۱۲   | عمر ماده                 | داده نسبی - تعداد روز   |

جدول ۳: خروجی شبکه عصبی

| ردیف | بردار        | نوع خروجی |
|------|--------------|-----------|
| ۱    | مقاومت فشاری | داده نسبی |
| ۲    | مقاومت خمشی  | داده نسبی |

جدول ۴: نمونه تصادفی از داده‌های مورد استفاده به عنوان ورودی و خروجی جهت تعلیم به شبکه

| نمونه                | مقاومت فشاری | مقاومت خمشی | دانسیته |
|----------------------|--------------|-------------|---------|
| (G <sub>1</sub> ) ٪۰ | ۱۵           | ۲/۲۵        | ۱/۴۵    |
| (G <sub>2</sub> ) ٪۰ | ۱۲/۵         | ۲/۲۰        | ۱/۵۳    |
| (G <sub>3</sub> ) ٪۰ | ۱۲/۵         | ۲/۷۵        | ۱/۳۵    |
| (F <sub>1</sub> ) ٪۱ | ۱۲/۵         | ۲/۶۳        | ۱/۲۳    |
| (F <sub>2</sub> ) ٪۱ | ۱۲/۵         | ۲/۶۰        | ۱/۲۶    |
| (F <sub>3</sub> ) ٪۱ | ۸/۷۵         | ۱/۸۱        | ۱/۲۶    |

همچنین نمودار خطا ترسیم شده است. مقادیر انحراف معیار و میانگین خطا نیز در شکل (۱۵) قابل مشاهده هستند که خطای قابل قبولی را برای مدلسازی نشان می‌دهند. به منظور تست دقیق‌تر این مدل، داده‌های یک مدل

همانطور که نشان داده شد، توابع مورد استفاده در حالت دو خروجی شباهت زیادی با حالت معمول آنفیس دارد اما این مدل باعث کاهش زمان و حجم محاسبات می‌گردد. همین مدل توانایی افزایش خروجی را نیز دارد.

### ۵-۱- نتایج شبیه‌سازی با آنفیس

با توجه به آنچه آورده شد و توضیح کامل مدل می‌توان در ادامه شبیه‌سازی را کمک نرم افزار متلب انجام داد. پیش از آن توضیحاتی نیز در مورد داده‌ها آورده می‌شود. بررسی بردارهای ورودی و خروجی به شرح زیر می‌باشد. در بردار ورودی موارد جدول یک وجود خواهند داشت که شامل ۱۲ ورودی عددی هست که یک بردار را می‌سازد. بنابراین در ورودی ۱۲ نرون وجود دارد. بر همین اساس نیز خروجی شبکه عصبی به صورت یک بردار یک در دو تعریف می‌گردد. بر اساس جدول ۲ و ۳ شبکه عصبی دارای ۱۲ نرون ورودی و ۲ نرون خروجی هست و برای دقت بالاتر دو لایه با ۱۰ عدد نرون به همراه بایاس اولیه برای همگرایی بهتر برای شبکه طراحی می‌گردد. آموزش شبکه عصبی بدین صورت است که ۷۰٪ داده‌ها به عنوان آموزش و ۲۰٪ به عنوان تست و ۱۰ درصد به صورت آزمون به شبکه داده می‌شود و دقت و سرعت آن در مدلسازی اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به آنکه در مورد هر ماده ۶ تست گرفته شد در مجموع ۹۰ داده به شبکه داده می‌شود. برخی از داده‌های ورودی در جدول ۴ قابل مشاهده است.

داده‌های خام اولیه به شبکه آموزش داده شده و با ۱۰ درصد داده‌ها تست می‌شود. در شکل (۱۴) مدل شبکه آنفیس نمایش داده شده است. همانطور که مشخص است داده‌های هدف به صورت علامت مثبت و خروجی‌های به دست آمده به صورت دایره‌های قرمز رنگ نمایش داده شده‌اند که در برخی نقاط عدم هماهنگی وجود دارد.

### ۵-۲- پیش بینی خواص توسط مدل توسعه داده شده

با توجه به نمودارهای مربوط به آموزش و خطای بسیار پایین با توجه به به کمک این مدل خواص ترکیب گچ با الیاف پوست موز از مدل حاصل از شبکه تعلیم داده شده، با توجه به ورودی‌ها گرفته می‌شود که جدول ۶ مقایسه نتایج را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است خواص توسط مدل شبکه آنفیس با دقت بسیار بالایی به دست آمده‌اند [۲۸-۲۹]. همچنین شکل (۱۴) خروجی به دست آمده برای شکل (۱۳) برای محاسبات مقدار جذر متوسط توان

جدول ۶: خواص به دست آمده توسط مدل آنفیس

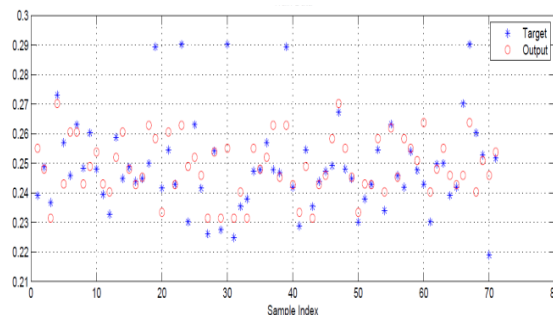
| ردیف | بردار        | منبع [۸] | ANFIS |
|------|--------------|----------|-------|
| ۱    | مقاومت فشاری | ۷/۸۹     | ۷/۷۲  |
| ۲    | مقاومت خمشی  | ۴/۸۹     | ۴/۷۱  |
| ۳    | ضریب جذب     | ۲۴/۶     | ۲۵/۱  |

### ۶- نتیجه‌گیری

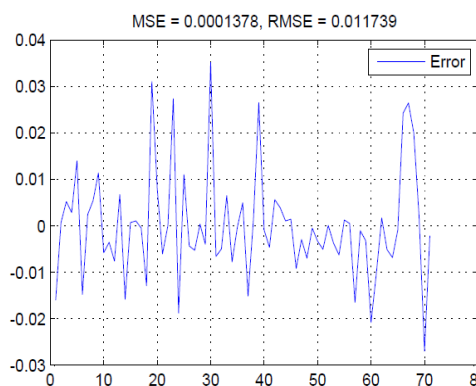
در این پژوهش، تحقیقات انجام شده پیرامون کامپوزیت‌های گچ با فیبر طبیعی و فرآوری فیبر مورد بررسی قرار گرفت. از اهداف این تحقیق می‌توان به کاربرد الیاف ضایعات سلولوزی و الیاف طبیعی در ساخت پنل، سبک کردن مصالح ساختمانی، بهبود مقاومت‌های کامپوزیت پنل گچ، به حداقل رساندن مصرف گچ، کمک به حفظ محیط زیست و دست یابی به بهترین نسبت گچ و الیاف طبیعی کاه در ساخت پنل گچ اشاره کرد. همچنین ارایه مدلی نرم‌افزاری که بتوان بدون آزمایش خواص گچ ترکیب شده با مواد جدید را با خطای مناسبی تخمین زد از جمله اهداف این پژوهش بوده است.

نتایج بدست آمده در این پژوهش نشان داد که در کامپوزیت گچ-کاه یک روزه و هفت روزه خواص مکانیکی تقریباً مشابه بودند و بهترین عملکرد کاه در درصد‌های ۳ و ۵ درصد بوده است. علت این امر به دلیل برقرار نشدن پیوند بین الیاف و ماتریس می‌باشد که در تصاویر میکروسکوپی علت این امر ملاحظه گردید. به همین دلیل سعی شد تا با استفاده از پلیمرهای طبیعی مثل نشاسته و متیل سلولز خواص آن را بهبود داد اما باز هم نتایج خوبی گرفته نشد. در ادامه استفاده از محلول‌های قلیایی برای بهبود خواص کاه مورد بررسی قرار گرفت. استفاده از محلول‌های قلیایی سبب حل شدن لیگنین موجود در کاه شده و سطح کاه را برای برقراری پیوند با ماتریس گچ آماده کرد. همانطور که نتایج نشان دادند، با این عمل فرآوری خواص خمشی کامپوزیت گچ ۱۲ درصد افزایش و دانسیته و جذب آب کاهش یافت. در ادامه براساس داده‌های آزمایش، یک مدل کارآمد از شبکه عصبی با ساختار آنفیس ارایه شد که علاوه بر امکان پیش‌بینی عملکرد محصول کامپوزیتی گچ-کاه در خواص مورد ارزیابی، دقت قابل قبولی را نیز از خود نشان داد. همچنین نتایج میکروسکوپی الکترونی روبشی مورد تفسیر قرار گرفتند که تاییدی بر نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها

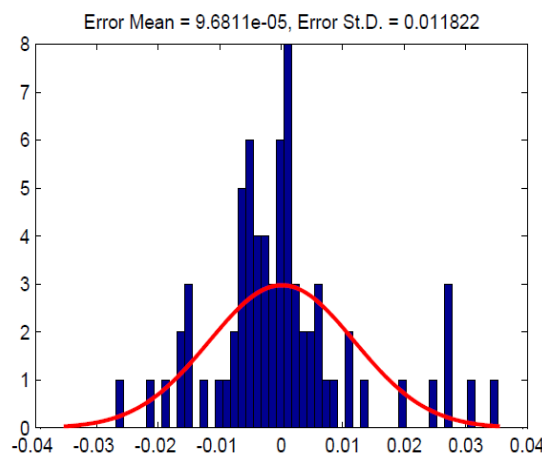
دیگر با پوست الیاف موز در آن کار مورد استفاده قرار گرفته به مدل ارائه شده در این کار داده شده و خروجی‌ها با هم مورد مقایسه قرار گرفته که در جدول ۶ آورده شده است. ملاحظه جدول ۶ نشان می‌دهد که خروجی‌های بدست آمده از مدل ایجاد شده در این کار توانایی بسیار خوبی در مدلسازی دارد و دقت قابل قبولی را از خود نشان می‌دهد.



شکل ۱۳: مدل شبکه آنفیس برای مقدار مقاومت خمشی و فشاری.



شکل ۱۴: مقدار خطا برای هر نمونه در تست و مقدار مجذور میانگین خطا برای مقدار مقاومت خمشی و فشاری



شکل ۱۵: مقدار انحراف معیار خطا و میانگین خطا برای مقدار مقاومت خمشی و فشاری

با غلظت‌های مختلف از جمله هیدروکسید سدیم در شرایط مختلف از جمله زمان غوطه وری الیاف طبیعی در محیط قلیایی را مورد بررسی قرار داد. همچنین می‌توان درصدهای مختلف گاه را فرآوری کرده و روند تغییرات آن را مورد بررسی قرار داد. می‌توان افزودنی‌های مختلف و یا روش‌های فرآوری روی الیاف دیگر از جمله خمیر کاغذ و دیگر الیاف نیز مورد بررسی قرار گیرد.

و بیانگر تطبیق خواص فیزیکی با ساختار بلوری محصول نهایی است.

#### ۷- پیشنهادات

از جمله پیشنهادات آتی می‌توان فرضیه‌های تحقیق را در راستای مقایسه ابعاد مختلف الیاف و تاثیر آن‌ها بر کامپوزیت‌ها تغییر داد. می‌توان محلول‌های قلیایی مختلف

#### مراجع

- [1] S.K. Chinta, P.M. Katkar, Mahamed Jafer Mirji, "Natural fibres-reinforced in false ceiling", International Journal of Advanced Research in IT and Engineering, 2012, pp. 2278-6244.
- [2] A. Jahn, M. Schroder, M. Futing, K. Schenzel, and W. Diepen Brock, "Characterization of Alkali-treated Flax Fibers by Means of FT Raman Spectroscopy and Environmental Scanning Electron Microscopy", Spectrochim. Acta A: Mol. Biomol. Spectrosc., 58, 2002, pp. 271-2279.
- [3] R. Rowell, R. Young, and J. Rowell, Paper and Composites from Agro-based Resources, CRC Lewis, Boca Raton, FL, 1997
- [4] R.D. Sederoff, J. MacKay, J. Ralph, and R. Hatfield, Unexpected Variation in Lignin, Curr. Opin. Plant Biol, 2, 145-152, 1999.
- [۵] طاهری نیا، ع. ۱۳۸۷. امکان استفاده از کاغذ بازیافتی در ساخت فرآورده مرکب الیاف-سیمان، پایاننامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه آزاد اسلامی واحد چالوس
- [۶] قاسمی پور، ح. بابائی فر، س. طلایی پور، م. ۱۳۸۷. بررسی ویژگی‌های کامپوزیت‌های سیمانی تقویت شده با خمیر الیاف کارتن بازیافتی، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران
- [7] A. Boshehrian and P. Hosseini, "Effect of nano-SiO<sub>2</sub> particles on properties of cement mortar applicable for Ferro cement elements" ISSR Journals, CRL Letters, Vol. 2 (1), 2011.
- [8] K. Bilba, M.A. Arsene, "Silane treatment of bagasse fiber for reinforcement of cementitious composites", Composites: Part A 39, 2008, pp. 1488-1495.
- [9] F. Pacheco-torgal, S. Jalal, "Cementations building materials reinforced with vegetable fibers: A review", Construction and Building Materials, 25, 2011, pp. 575-581
- [10] G. Vasconcelos, A. Camoes, R. Fangueiro, N. Villa-Cha, C. Jesus, "Rice straw-cementitious bricks: analytical study on mechanical properties and sustainability measures", ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, vol.10, No. 18, OCTOBER 2015.
- [11] S.K. Chinta, P.M. Katkar, M.J. Mirji, "Natural fibers reinforced gypsum composites", Society for Science and Nature, 2004.
- [12] S. R, Karade, "Cement-bonded composites from lignocellulosic waste", Construction and Building Materials, 24, 2010, pp. 1323-1330.
- [13] A.I. Alrawashdeh, A.E. Al-Rawajfeh1, A.A. Al-Bedoor, "Production of plaseter from gypsum deposits in south Jordan: improvement of the setting time", Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 49, 3, 2014, pp. 293-302.
- [۱۴] مرتضی خرمی و همکاران، "افزایش ظرفیت باربری خمشی کامپوزیت‌های سیمانی با استفاده از الیاف طبیعی"، تحقیقات علوم چوب و کاغذ ایران، جلد ۲۴، شماره ۱۳۸۸، ۲۰۷-۲۰۶.
- [15] T. Aberle, P. Emmenegger, "New approaches to increase water resistance of gypsum based building materials". Global gypsum magazine, 2010.
- [16] S.S. Roy, "Design of adaptive neuro-fuzzy inference system for predicting surface roughness in turning operation", Journal of Scientific & Industrial Research, Vol. 64, 2005, pp. 653-659.

- [17] M.M. Yadollahi, A. Benli, R. Demirboga, "Application of adaptive neuro-fuzzy technique and regression models to predict the compressive strength of geopolymer composites", *Neural Computing and Applications*, January 2016.
- [18] B. Vakhshouri, Sh. Nejadi, "Prediction of compressive strength of self-compacting concrete by ANFIS models", *Neurocomputing*, 280, 2018, pp. 13–22.
- [19] F.P. Beer, E.R. Johnston, J.T. DeWolf, D.F. Mazurek, *Mechanics of Materials*, McGraw Hill, Sixth Edition, 2010.
- [20] J.D. Hogan, S. Boonsue, "Micro-scale deformation of gypsum during micro-indentation loading", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 54, 2012, pp. 140–149.
- [21] PSR. Prasad, A. Pradhan, TN. Gowd, "In situ micro-raman investigation of dehydration mechanism in natural gypsum". *Curr Sci*, 80(9), 2001, pp.1203–1207.
- [22] P.S.R. Prasad, A. Pradhan and T.N. Gowd, "In situ micro-Raman investigation of dehydration mechanism in natural gypsum, Department of Physics", Indian Institute of Technology, Kanpur 208, 2001, India.
- [23] S.K. Chinta, P.M. Katkar & M.J. Mirji, "Natural fibres reinforced gypsum composites", *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, Vol. 4 (3), 2013, pp. 318-325
- [24] S.S. Haykin, *Neural networks and learning machines*. Vol. 3. Upper Saddle River: Pearson Education, 2009.
- [25] C.S.N. Shitole, O. Zahran, and W. Al-Nuaimy, "Combining fuzzy logic and neural networks in classification of weld defects using ultrasonic time-of-flight diffraction", *Insight*, Vol 49, No 2, February 2007.
- [26] G.A. Carpenter and S. Grossberg. "The ART of adaptive pattern recognition by a self-organizing neural network", *Computer*, 21, No. 3, 2008, pp. 77-88.
- [27] O. Kisi, "Multi-layer perceptrons with Levenberg- Marquardt training algorithm for suspended sediment concentration prediction and estimation", *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques*, 49(6), December 2004.
- [28] L.M. Baltar, C.A.M. Baltar, "Effect of carboxy methyl cellulose on gypsum re-hydration process", *International Journal of Mineral Processing*, 125, 2013, pp. 5–9.