

مدلسازی و بهینه‌سازی خواص مکانیکی نانو کامپوزیت‌های اپوکسی/هیدروکسی

آپاتیت/گرافن اکساید

احسان حسنی^۱، ساسان فولادپنجه^{۲*}

۱- گروه مهندسی شیمی، واحد تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران.

۲- گروه مهندسی مکانیک، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود.

چکیده

در این مقاله، یک مطالعه‌ی تجربی و عددی بر روی مدول یانگ و استحکام خمشی کامپوزیت‌های تقویت شده با گرافن اکساید و نانوذرات هیدروکسی آپاتیت انجام شده است. گرافن اکساید تا سقف ۰/۵ درصد وزنی و نانوذرات هیدروکسی آپاتیت تا سقف ۷ درصد وزنی مورد استفاده قرار گرفته است. درصدهای وزنی مورد استفاده از طریق طراحی آزمایش و به کمک روش طراحی کامپوزیت مرکزی بدست آمده‌اند که به عنوان پارامترهای مؤثر بر خواص یاد شده نیز لحاظ گردیده‌اند. همچنین این دو پارامتر به عنوان پارامترهای ورودی جهت مدلسازی نتایج توسط روش شبکه عصبی مصنوعی در نظر گرفته شده‌اند. نتایج تجربی نشان می‌دهد افزایش محتوای نانوذرات باعث افزایش مدول یانگ و استحکام خمشی شده است. همچنین نتایج مدلسازی نشان می‌دهد که میانگین خطای بدست آمده از روش شبکه عصبی مصنوعی دارای کمترین میانگین خطا بوده است. بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک صورت گرفته است و نتایج نشان می‌دهد که مقدار بهینه‌ی مدول یانگ در ۲/۷۳۹ درصد وزنی نانوذرات هیدروکسی آپاتیت و ۰/۴۹۲ درصد وزنی از گرافن اکساید بدست آمده است و مقدار آن ۸۷۶/۹ مگاپاسکال است. همچنین مقدار بهینه‌ی استحکام خمشی معادل ۲۴/۳۲ مگاپاسکال گزارش شده است که در ۰/۰۲۱ درصد وزنی از گرافن اکساید و ۲/۴۳۵ درصد وزنی نانوذرات هیدروکسی آپاتیت بدست آمده است.

واژه‌های کلیدی: مدول یانگ، شبکه عصبی مصنوعی، استحکام خمشی، هیدروکسی آپاتیت، گرافن اکساید.

ایمیل نویسنده مسئول: S.fooladpanjeh@iau-shahrood.ac.ir

۱- مقدمه

۲۹/۵۲ مگاپاسکال به ۵۶/۶۸ مگاپاسکال رسید که ۹۲ درصد رشد این خاصیت را در برداشت. همچنین برای خاصیت استحکام پیچشی نیز ۴۶ درصد افزایش را گزارش کردند؛ با این توضیح که مقدار آن از ۱۲۴۹/۹۲ مگاپاسکال به ۱۸۳۰/۶۸ مگاپاسکال رسید. برای آزمایش مقاومت به ضربه نیز، افزایش آن را از ۳/۴۴ ژول به ۵/۴۹ ژول گزارش کردند. احمدی و همکاران [۴] تأثیر پارامترهای ساخت بر خواص مکانیکی فوم‌های ترکیبی اپوکسی/ میکروبالن سرامیکی را مورد بررسی قرار دادند. آنها با استفاده از ۳۶ نوع فوم ترکیبی، تأثیر پارامترهای ساخت این فوم‌ها را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج نشانگر آن است که سرعت و ترتیب اختلاط اجزاء در میزان مقاومت فوم ترکیبی اثر چندانی ندارد. کی و همکاران [۵] تأثیر افزودن نانوذرات رس را بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد هر چند افزودن نانورس باعث افزایش قابل توجه مدول الاستیک و چقرمگی شکست رزین اپوکسی می‌شود، اما استحکام شکست و کرنش شکست با افزایش میزان ذرات رس به صورت قابل توجهی کاهش می‌یابند. دوراما و همکاران [۶] اثر افزودن و محتوای نانوذرات سیلیکا را به اپوکسی

استفاده از رزین اپوکسی به دلیل انعطاف‌پذیری و خواص مناسب، به طور گسترده‌ای در زمینه‌های مختلفی نظیر هوافضا، کشتی-سازی و خودروسازی کاربرد دارد. همچنین به دلیل ویژگی‌های مفید نظیر سختی مناسب، مقاومت بالا و هزینه پایین، مورد استفاده قرار می‌گیرد. متأسفانه بیشتر اپوکسی‌ها ذاتاً شکننده هستند؛ بنابراین می‌توان از مواد پرکننده مختلفی در مقیاس میکرو و نانو جهت تقویت خواص فیزیکی و مکانیکی نظیر استحکام ضربه‌ای، مدول فشاری و مدول کششی بهره برد. در چند دهه‌ی گذشته، محققین از پرکننده‌های مختلفی جهت بهبود خواص مکانیکی استفاده کرده‌اند [۱و۲]. براگا و ماگالهاس [۳] تأثیر دو نوع مختلف از ذرات شیشه را با درصدهای حجمی مختلف در نانوکامپوزیت پایه اپوکسی مورد بررسی قرار دادند. آنها سه ترکیب مختلف را در آزمایش‌های مدول یانگ، استحکام پیچشی و مقاومت به ضربه خود به کار بردند و افزایش هر سه خاصیت مکانیکی را گزارش کردند؛ به گونه‌ای که مدول یانگ از

تغییر طول در زمان شکست نمونه‌های تقویت شده با گرافن اکساید بیشتر از نمونه‌های اپوکسی خالص است. ونگ و همکاران [۱۱] تأثیر افزودن گرافن تا ۳ درصد وزنی را به پلی آمید، به روی استحکام و مدول کششی بررسی کردند. آنها گزارش کردند که بیشترین مقدار استحکام کششی در ۳ درصد وزنی گرافن رخ داده است که ۵۴ درصد نسبت به پلی آمید خالص افزایش یافته است. همچنین در مورد مدول کششی نیز بیشترین مقدار در همان ۳ درصد وزنی از گرافن بدست آمده که ۶۳ درصد افزایش را نشان داده است. هانگ و همکاران [۱۲] اثر ترکیبی نانولوله‌های کربنی و گرافن را بر الیاف پلی‌پروپیلن مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان می‌دهد مدول یانگ در ترکیب پلی‌پروپیلن، کربن نانوتیوب و صفحات گرافن بیشتر از حالت‌های دیگر است که بیانگر آن است که افزودن کربن نانوتیوب و گرافن نسبت به حالت‌های جداگانه تأثیر بیشتری بر این خاصیت دارد. ژانگ و همکاران [۱۳] خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت شده با دانه‌های شیشه و گرافن را بررسی کردند. نتایج آنها برای دانه‌های شیشه تا سقف ۵۰ درصد وزنی و گرافن تا سقف ۱/۲۵ درصد وزنی نشان می‌دهد که بیشترین مقدار مدول یانگ در ۳۰ درصد وزنی دانه‌های شیشه و ۰/۷۵ درصد وزنی گرافن بدست آمده است و مقدار آن برابر ۴۰۳ مگاپاسکال می‌باشد و در مقایسه با اپوکسی خالص، ۵۵ درصد رشد کرده است. بیشترین مقدار استحکام فشاری نیز در همان مقادیر یاد شده (۳۰ درصد وزنی دانه‌های شیشه و ۰/۷۵ درصد وزنی گرافن) گزارش شده است. در مورد خاصیت تغییر طول نیز بیشترین مقدار در درصد‌های وزنی بیان شده بدست آمده است و بعد از آن، شاهد کاهش این خاصیت می‌باشیم. نتایج بدست آمده از تحقیق مانو و همکاران [۱۴] نشان می‌دهد که افزودن گرافن اکساید تا ۰/۵ درصد وزنی به رزین اپوکسی، باعث افزایش استحکام فشاری نانوکامپوزیت می‌شود. در تحقیقی که توسط لی و همکاران [۱۵] صورت گرفت، استحکام کششی نانوکامپوزیت پلی‌لاکتیک اسید/ هیدروکسی آپاتیت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آنها نشان داد که بیشترین مقدار این خاصیت در ۱۰ درصد وزنی از نانوذرات هیدروکسی آپاتیت بدست آمده که مقدار آن برابر ۵۴ مگاپاسکال است و با افزودن نانوذرات، کاهش استحکام کششی گزارش شده است. بررسی خواص مکانیکی هیدروکسی آپاتیت و کربن نانوتیوب توسط اوسوریو و همکارانش [۱۶] صورت گرفت. نتایج آنها برای چقرمگی شکست نشان می‌دهد که بیشترین مقدار در ۰/۵ درصد وزنی از نانوذرات هیدروکسی آپاتیت بدست آمده است و مقدار آن برابر $2/59 \text{ MPa.m}^{1/2}$ می‌باشد و با افزودن نانوذرات، کاهش این خاصیت بیان شده است. همچنین برای استحکام کششی، بیشترین مقدار در ۱ درصد وزنی از نانوذرات بدست آمده است و مقدار آن ۲۵/۱۵ مگاپاسکال است

پلی بنزوکسازین بررسی کردند. آنها گزارش کردند که افزودن نانوذرات سیلیکا به اپوکسی، باعث افزایش مدول یانگ شده و همچنین با افزایش محتوای ذرات نیز، مدول یانگ افزایش می‌یابد. آنها نشان دادند که با افزودن ۳۰ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا به اپوکسی خالص، مقدار مدول یانگ تا ۸۳ درصد افزایش می‌یابد. وانگ و همکاران [۷] به بررسی خواص کششی نانوکامپوزیت پلی‌بوتیلن سوکسینات- گرافن پرداختند. درصد‌های وزنی ۰/۵، ۱ و ۲ از گرافن مورد استفاده قرار گرفت و نتایج آنها نشان داد که بهترین مقدار استحکام کششی نمونه‌ها در ۲ درصد وزنی بدست آمده است و مقدار آن برابر $37/2$ مگاپاسکال است که نسبت به پلی‌بوتیلن خالص ۲۰ درصد افزایش را نشان می‌دهد. منگ و همکاران [۸] تأثیر صفحات گرافن را بر کامپوزیت سرامیک بر پایه‌ی آلومینیوم مورد بررسی قرار دادند. خواص چقرمگی شکست و استحکام خمشی نانوکامپوزیت مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج آنها بیانگر آن است که $4/6 \text{ MPa.m}^{1/2}$ بیشترین مقدار چقرمگی شکست می‌باشد و در مقایسه با اپوکسی خالص ($3/9 \text{ MPa.m}^{1/2}$)، ۱۷ درصد افزایش داشته است. همچنین نتایج آنها نشان می‌دهد که مقدار استحکام خمشی از ۲۹۰ مگاپاسکال برای اپوکسی خالص به ۳۳۴ مگاپاسکال برای نانوکامپوزیت تقویت شده با ۱ درصد وزنی گرافن، افزایش یافته است. منبری و همکاران [۹] خواص مکانیکی نانوکامپوزیت هیبریدی پلی‌پروپیلن/ تالک/ گرافن را با پلی‌پروپیلن/ گرافن مقایسه کردند. همان‌طور که از نتایج مشخص است، افزودن تالک تأثیر قابل توجهی بر روی مدول الاستیک پلی‌پروپیلن دارد و با افزودن ۱۵ درصد وزنی تالک، مدول الاستیک از ۵۵۱ مگاپاسکال به ۷۱۲ مگاپاسکال رسیده است. اما در مورد استحکام کششی وضعیت متفاوت است؛ به گونه‌ای که با افزودن ۱۵ درصد وزنی تالک به پلی‌پروپیلن، کاهش این خاصیت گزارش شده است و مقدار آن از $31/6$ مگاپاسکال به $26/7$ مگاپاسکال رسیده است که دلیل اصلی این کاهش را برهم کنش ضعیف بین تالک و پلی‌پروپیلن نسبت داده‌اند. در مورد آزمون ضربه نیز افزودن تالک به پلی‌پروپیلن باعث کاهش ۱۶ درصدی این خاصیت شده است که علت آن تمرکز تنش در لبه‌های تیز تالک که خود عاملی برای رشد ترک است، بیان شده است. وان و همکاران [۱۰] تأثیر افزودن گرافن اکساید را بر اپوکسی بررسی کرده‌اند. گرافن اکساید تا سقف ۰/۲ درصد وزنی به ماتریس اپوکسی اضافه شده است و نتایج آنها بیانگر آن است که افزودن گرافن اکساید به مقدار ۰/۲۵ درصد وزنی به ماتریس اپوکسی، بیشترین مقدار استحکام کششی را بدست آورده است. مقدار استحکام کششی از $52/98$ مگاپاسکال برای اپوکسی خالص، به $83/43$ مگاپاسکال رسیده است که رشدی معادل ۵۷ درصد گزارش شده است. همچنین وان و همکاران گزارش کرده‌اند که

به کمک روش‌های عصبی مصنوعی و سطح پاسخ، مقادیر بهینه‌ی خواص بالا را گزارش کردند. مقدار بهینه‌ی استحکام کششی در ۳ درصد حجمی نانوذرات و مقدار بهینه‌ی استحکام پیچشی در ۳/۱۷ درصد حجمی نانوذرات گزارش شد. لو و همکاران [۲۱] استحکام کششی کامپوزیت کلسیم فسفات/ نانولوله‌های کربن/ سرم آلومین را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایشگاهی آنها نشان داد که بیشترین مقدار این خاصیت در ۰/۵ درصد وزنی نانولوله‌های کربن و ۱۵ درصد وزنی سرم آلومین بدست آمده است و مقدار آن برابر ۱۴ مگاپاسکال می‌باشد. همچنین آنها با کمک روش سطح پاسخ توانستند با خطای ۸ درصد به مقدار ۱۳/۴۷ مگاپاسکال دست یابند.

در این مقاله، یک بررسی تجربی و تحلیل عددی بروی برخی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی/ هیدروکسی‌آپاتیت/ گرافن اکساید انجام شده است. نتایج آزمایشات تجربی گزارش شده و این نتایج به کمک سه روش مدل‌سازی آماری سطح پاسخ خطی، مرتبه دو و شبکه عصبی مصنوعی مدل شده و مقایسه‌ای بین نتایج مدل‌ها صورت گرفته است و بهترین مدل با کمترین میانگین خطا ارائه شده است. همچنین مقدار بهینه‌ی هر یک از پارامترها به کمک روش الگوریتم ژنتیک^۱ مشخص شده است.

۲- فعالیت‌های تجربی ۲-۱- مواد

رزین اپوکسی با اسم تجاری RL-440 از شرکت پارس کامپوزیت تهیه شده است. نانوذرات هیدروکسی‌آپاتیت با اندازه ذرات متوسط ۲۰ تا ۱۰۰ نانومتر، با خلوص ۹۹/۹ درصد و با چگالی 0.8 g/cm^3 مورد استفاده قرار گرفت. همچنین گرافن اکساید با درصد خلوص ۹۹ درصد و چگالی 1 g/cm^2 از شرکت مهرگان شیمی تهیه شده است. هاردنر آمینی HY-441 نیز مورد استفاده قرار گرفته است.

۲-۲- آماده‌سازی نانوکامپوزیت

در این تحقیق، پلیمر ترموست بر پایه‌ی اپوکسی بیسفنول، با افزودن نانوذرات هیدروکسی‌آپاتیت تا ۷ درصد وزنی و گرافن اکساید تا ۰/۵ درصد وزنی، تقویت شده است. رزین اپوکسی از نوع RL-440 بوده و علت انتخاب این رزین، پایین بودن نسبی ویسکوزیته‌ی آن نسبت به سایر موارد موجود است که این امر به محققین این امکان را می‌دهد تا به راحتی بتوان از آن در

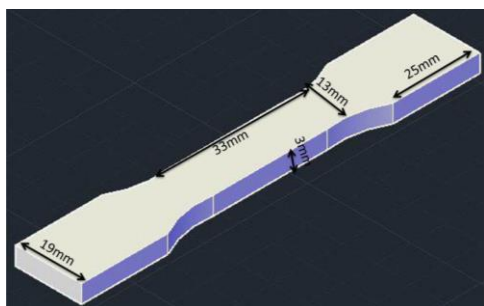
که ۸۲ درصد افزایش یافته است. زیرجد و همکاران [۱۷] خواص مکانیکی پلی‌متیل‌متاکریلیت اسید را به همراه نانوذرات هیدروکسی‌آپاتیت مورد بررسی قرار دادند. آنها با استفاده از سه درصد وزنی ۲/۵، ۵ و ۱۰ از هیدروکسی‌آپاتیت، استحکام خمشی نمونه‌ها را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج آنها بیانگر آن است که بهترین مقدار استحکام خمشی در ۲/۵ درصد وزنی نانوذرات بدست آمده و نسبت به پلی‌متیل‌متاکریلیت خالص تنها ۳ درصد افزایش یافته است. هانگ و همکاران [۱۸] استحکام کششی، خمشی و مقاومت به ضربه کامپوزیت‌های پلی‌ال لاکتید/ هیدروکسی‌آپاتیت را مورد آزمایش قرار دادند. بیشترین مقدار استحکام کششی در ۴ درصد وزنی نانوذرات هیدروکسی‌آپاتیت گزارش شده است و مقدار آن برابر ۷۵ مگاپاسکال است و با افزایش نانوذرات، این خاصیت کاهش یافته است. در مورد استحکام خمشی نمونه‌ها نیز وضعیت به همین منوال است و بیشترین مقدار این خاصیت در ۴ درصد وزنی نانوذرات بدست آمده است. همچنین بیشترین مقدار مقاومت به ضربه در ۴ درصد وزنی نانوذرات هیدروکسی‌آپاتیت گزارش شده است و مقدار آن $4/6 \text{ KJ/m}^2$ بیان شده است.

در زمینه‌ی مدل‌سازی خواص مکانیکی نیز تحقیقات گسترده‌ای صورت گرفته است که در این حوزه، محققین برای رسیدن به یک جواب مناسب، از روش‌های مختلفی استفاده کرده‌اند. در آزمایشی که توسط فریدون و همکاران [۱۹] صورت گرفت، خواص مکانیکی اپوکسی/ پلی‌استایرن/ کربن نانوتیوب مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج آنها نشان داد که بیشترین مقدار استحکام خمشی برابر ۵۹/۱ مگاپاسکال است. در مورد مقاومت به ضربه نمونه‌ها نیز بیشترین مقدار، معادل $37/8 \text{ KJ/m}^2$ است. مدل‌سازی به کمک روش سطح پاسخ صورت گرفت و نتایج آنها برای استحکام کششی نشان می‌دهد که اگرچه بهترین مقدار برای کربن نانوتیوب در ۳/۶ درصد وزنی بدست آمده است اما افزایش مقدار پلی‌استایرن تأثیر چندانی در نتایج مدل‌سازی نداشته است. همچنین مقدار بهینه‌ی استحکام خمشی در ۰/۸ درصد وزنی از کربن نانوتیوب و ۴/۲ درصد وزنی از پلی‌استایرن بدست آمده است و مقدار آن ۵/۲ مگاپاسکال می‌باشد. نتیجه‌ی مدل‌سازی برای مقاومت به ضربه نیز در ۱/۳ درصد از کربن نانوتیوب و ۴/۵ درصد از پلی‌استایرن گزارش شده است که مقدار آن 41 KJ/m^2 می‌باشد. مورفی و همکاران [۲۰] خواص مکانیکی پلی‌استر به همراه اکسید آلومینیوم و کلسیم کربنات را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج آزمایشگاهی آنها برای استحکام خمشی و پیچشی نشان داد که بیشترین مقدار در ۴ درصد حجمی از نانوذرات بدست آمده است و مقدار آنها به ترتیب ۳۰/۴۵ مگاپاسکال و ۸۹/۷۵ مگاپاسکال است. آنها همچنین

^۱ Genetic Algorithm

۳-۲- مدول یانگ و استحکام خمشی

آزمون کشش بر اساس استاندارد ASTM D638 [۲۲] انجام شده است. این آزمون بر روی نمونه‌های دمبلی شکل که در شکل (۲) قابل مشاهده است، انجام گرفته است.



شکل ۲. نقشه و ابعاد ساخت نمونه آزمایش کشش.

نمونه‌های آماده شده داخل دستگاه سنتام که دارای فک‌های بسیار قوی برای گرفتن دو سر نمونه می‌باشد، قرار گرفته و سپس دو فک به حرکت درآمده و با سرعت ثابت ۲ میلی‌متر بر دقیقه از یکدیگر دور می‌شوند (شکل (۳) - الف). در شکل (۳) - ب، نمونه تحت آزمایش کشش قابل مشاهده است.

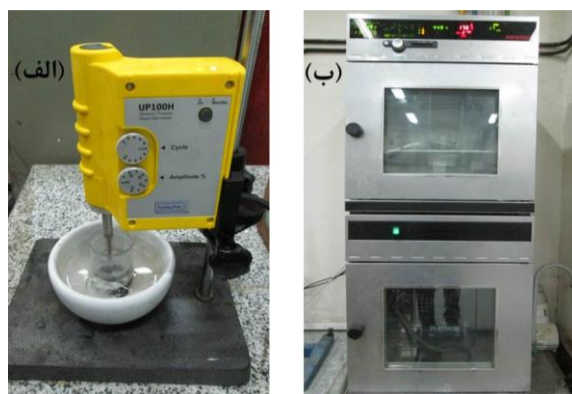


شکل ۳. (الف) شمایی از دستگاه سنتام با فک‌های آزمون کشش، (ب) نمونه تحت آزمایش.

برای بدست آوردن استحکام خمشی^۴، نمونه‌ها بر اساس کد D-790 ساخته شده‌اند. سرعت انجام این آزمایش بر اساس استاندارد ۲ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شده است. ابعاد نمونه‌های مورد استفاده در این آزمایش، $80 \times 14 \times 3$ میلی‌متر می‌باشد. در این

سیستم‌های قالبگیری حساس و ظریف استفاده نمود، بدون آنکه در مدل بدست آمده اشکال و ضعفی به جای بماند. همچنین با توجه به غلظت پایین محصول، امکان استفاده‌ی آن به همراه انواع پرکننده‌های معدنی فراهم است.

برای تهیه کامپوزیت، رزین و نانوذرات هیدروکسی آپاتیت با درصدهای وزنی مورد نظر، بوسیله‌ی یک همزن مکانیکی به مدت دو ساعت و با سرعت ۱۱۰۰ rpm با یکدیگر ترکیب شدند. لازم به ذکر است که درصدهای وزنی با کمک طراحی آزمایش به روش پاسخ سطح و بر مبنای الگوی کامپوزیت مرکزی و توسط نرم افزار Minitab بدست آمده است. سپس برای از بین بردن حباب‌های ایجاد شده، ترکیب موجود به مدت ۳۰ دقیقه در آون با دمای ۸۰ درجه سانتیگراد قرار گرفت. در ادامه، ابتدا گرافن اکساید با کمک همزن مکانیکی و سپس هاردنر آمینی HY-441 به ترکیب اضافه شد و به مدت پنج دقیقه هم‌زده شد. سپس برای ترکیب بهتر نانوذرات، از دستگاه هموژنایزر^۱ که در شکل (۱) - الف مشاهده می‌شود، کمک گرفته شد. ترکیب بدست آمده به مدت ۱۵ دقیقه هم‌گن‌سازی شد. در نهایت برای ایجاد یک فضای خلاء برای از بین بردن حباب‌های ایجاد شده از هم‌زدن ترکیب، از یک آون خلاء (شکل (۱) - ب) به مدت ۲۰ دقیقه استفاده شد. سرانجام، ترکیب در قالب‌های سیلیکونی از پیش ساخته شده، قالب‌گیری شد و به منظور پخت اولیه نمونه‌ها، قالب‌ها در آون به مدت ۵ ساعت و با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد پخته^۲ شدند و بعد از آن در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد، به مدت ۱ ساعت پساپخت^۳ شدند.



شکل ۱. (الف) هم‌گن‌سازی ترکیب با استفاده از دستگاه هموژنایزر، (ب) پمپ خلاء.

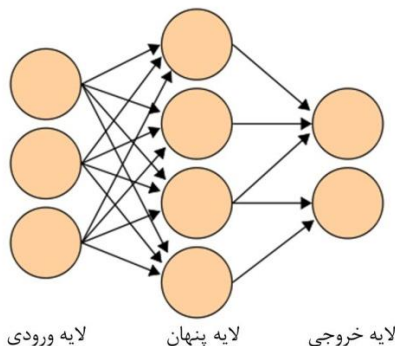
^۱ Homogenizer

^۲ Cure

^۳ Post cure

^۴ Flexural strength

دنیای بیرون در ارتباط هستند، در حالی که سایرین مخفی یا درونی هستند.



شکل ۵. مدل شبکه عصبی مصنوعی پس از انتشار^۴.

موضوع مهم دیگر در شبکه، الگوریتم یادگیری یا همان روش اصلاح الگوهای ارتباط عناصر درونی بر اساس تابعی از داده‌های آموزش است. هدف در مرحله‌ی آموزش شبکه، گسترش یک ساختار درونی است که شبکه را قادر سازد تا الگوهای جدید و مشابه داده‌های تجربی مرحله‌ی آموزش را به طرز صحیحی پیش-بینی یا طبقه‌بندی کند [۲۳].

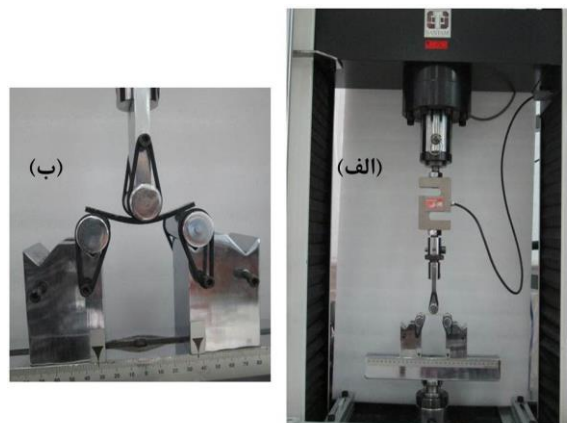
۳-۱-۱- معیار خطای مدل

خطای عددی در مدل می‌تواند به دلیل انتخاب توابع پایه، نقاط شبیه‌سازی و یا عوامل دیگر باشد. دقت مدل را می‌توان به کمک چندین معیار سنجید؛ به عنوان مثال، خطای نسبی (RE^0) یک نمونه از این دست است که با معادله (۱) بیان می‌شود.

$$RE = \frac{|\hat{Y}(x) - Y(x)|}{Y(x)} \quad (1)$$

بطوری‌که $\hat{Y}(x)$ تقریب مبتنی بر مدل بوده و $Y(x)$ پاسخ بدست آمده از نتایج تجربی است. همچنین می‌توان از روش‌های تحلیل آماری $ANOVA^1$ برای بررسی قابلیت مدل جهت تشخیص اثرات پارامترهای طراحی به روی پاسخ کمک گرفت [۲۴ و ۲۵]. یک معیار متداول دیگر، ضریب همبستگی پیرسون می‌باشد که به عنوان

تحقیق از آزمایش خمش سه نقطه‌ای (سه محوره) برای اندازه-گیری مقاومت خمشی نمونه‌های کامپوزیتی تولید شده، استفاده گردید. شکل (۴)-الف نشان دهنده‌ی دستگاه سنتام با فک‌های مورد استفاده برای این آزمایش است. همچنین در شکل (۴)-ب نمونه در حال آزمایش قابل مشاهده است.



شکل ۴. (الف) شمایی از دستگاه یونیورسال آزمایش خمش سه نقطه‌ای، (ب) نمونه در حال آزمایش.

۳-۲- مدلسازی عددی^۱ و بهینه‌سازی^۲

۳-۱-۳- شبکه عصبی مصنوعی (ANN^3)

شبکه عصبی مصنوعی ساختاری متشکل از تعدادی واحد (نرون مصنوعی) است که بهم وصل شده‌اند. هر واحد دارای یک مشخصه ورودی/خروجی می‌باشد و محاسبه یا عملی منطقی را اجرا می‌کند. خروجی هر واحد با توجه به اتصالات درونی آن با سایر واحدها تعیین می‌گردد. ANN خانواده‌ای متشکل از شبکه-های گوناگون می‌باشد. عملکرد کلی شبکه‌های عصبی مصنوعی، توسط توپولوژی شبکه، خصوصیات نرون منفرد و الگوریتم یادگیری و داده‌های آموزش معین می‌شود. شکل (۵) یک شبکه فرضی با مقیاس کوچک را نشان می‌دهد که در آن نرون‌ها به صورت مربع و اتصالات درونی به وسیله‌ی خطوطی نشان داده شده‌اند. باید توجه داشت که بعضی نرون‌ها به صورت مستقیم با

⁴ After Propagation

⁵ Relative error

⁶ Analysis of variance

¹ Numerical modeling

² Optimization

³ Artificial Neural Network

۴- نتایج و بحث

در این بخش، مدول یانگ، استحکام خمشی و تغییر طول‌های نمونه‌های ساخته شده از کامپوزیت پایه پلیمری تقویت شده با نانوذرات هیدروکسی آپاتیت و گرافن اکساید مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مربوط در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. مدول یانگ، استحکام خمشی و تغییر طول‌های کامپوزیت‌های تقویت شده با درصد‌های وزنی مختلف از نانوذرات.

کد نمونه	هیدروکسی آپاتیت (wt.%)	گرافن اکساید (wt.%)	مدول یانگ (MPa)	تغییر طول (%)	استحکام خمشی (MPa)	تغییر طول (%)
A	۰	۰	۷۲۰/۲۲	۳/۶۴	۱۹/۳۳	۵/۷
B	۲/۷۵	۰	۸۱۰/۱۱	۲/۰۸	۲۹/۹۷	۱/۵۹
C	۰/۲۷	۰/۰۵	۸۰۰/۲۹	۲/۶	۲۱/۴۷	۱/۳۸
D	۵/۲۲	۰/۰۵	۸۴۳/۵۸	۱/۶	۲۰/۶۹	۲/۴۷
E	۰	۰/۱۹	۸۰۷/۷۹	۱/۶۵	۱۹/۲۳	۲/۷۹
F	۲/۷۵	۰/۱۹	۸۹۹/۸۷	۱/۲۸	۲۲/۵۶	۱/۸۵
G	۶/۲۵	۰/۱۹	۷۲۸/۴۳	۱/۲۴	۲۰/۲۹	۳/۵۲
H	۰/۲۷	۰/۳۸	۸۲۹/۵۵	۰/۰۹	۲۴/۵۵	۱/۲۲
I	۵/۲۲	۰/۳۸	۸۰۳/۲۳	۱/۳۳	۲۴/۸۷	۱/۱۷
J	۲/۷۵	۰/۴۷	۷۶۹/۵۴	۱/۰۷	۲۱/۶۵	۱/۴۹

۴-۱- نتایج تجربی

با توجه به نتایج گزارش شده در جدول ۱، مقدار مدول یانگ برای اپوکسی خالص ۷۲۰/۲۲ مگاپاسکال است. بیشترین مقدار بدست آمده نیز در کامپوزیت تقویت شده با ۰/۱۹ درصد وزنی گرافن اکساید و ۲/۷۵ درصد وزنی از نانوذرات هیدروکسی آپاتیت (نمونه F) مشاهده می‌شود ۸۹۹/۸۷ درصد رشد را نسبت به اپوکسی خالص نشان می‌دهد. همچنین برای استحکام خمشی نیز مقدار بدست آمده برای اپوکسی خالص برابر ۱۹/۳۳ مگاپاسکال می‌باشد. بیشترین مقدار بدست آمده در ۲/۷۵ درصد وزنی نانوذرات هیدروکسی آپاتیت و عدم حضور گرافن اکساید گزارش شده است که مقدار آن برابر ۲۹/۹۷ مگاپاسکال می‌باشد که نسبت به اپوکسی خالص ۵۵/۰۴ درصد افزایش داشته است. همچنین در نتایج بدست آمده، افزایش این خاصیت را برای تمامی حالت‌ها به جز نمونه (E) شاهد هستیم. همانطور که بسیاری از محققین اشاره کرده‌اند، کسر حجمی و پخش مناسب نانوذرات می‌تواند بر خواص مکانیکی تأثیرگذار باشد [۲۹ و ۲۸]. نمودار شکل (۶) برای درک بهتر نتایج تجربی ارائه شده است.

معیار شباهت استفاده می‌شود و عکس آن معادل با معیار خطا خواهد بود. ضریب همبستگی پیرسون عددی بین ۱ و -۱ است که <۱> به معنی همبستگی مثبت کامل، <۰> به معنی نبود همبستگی و <-۱> به معنی همبستگی منفی کامل است. رابطه (۲) ضریب همبستگی پیرسون را نشان می‌دهد.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

۳-۲- سطح پاسخ (RSM^۱)

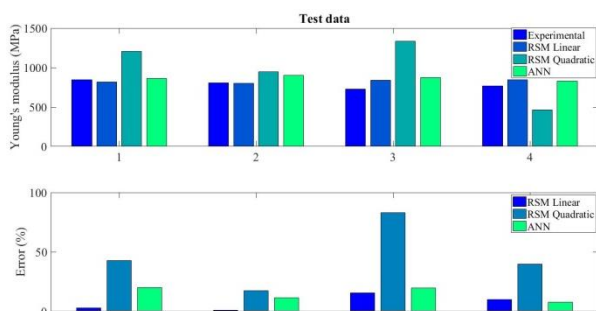
روش سطح پاسخ یک مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری و ریاضیات کاربردی برای ساخت مدل‌های تجربی است. هدف در طرح‌های رویه پاسخ، بهینه سازی پاسخ (متغیر خروجی) است که متأثر از چندین متغیر مستقل (متغیرهای ورودی) می‌باشد. یک آزمایش، یک سری از آزمون‌هاست که اجرا نامیده می‌شوند. در هر آزمایش، تغییرات در متغیرهای ورودی به منظور تعیین علل تغییرات در متغیر پاسخ ایجاد می‌شوند. در طرح‌های رویه پاسخ، ساخت مدل‌های رویه پاسخ یک فرآیند تکراری می‌باشد. به محض اینکه یک مدل تقریبی بدست آمد، توسط روش نیکویی برازش مورد آزمون قرار می‌گیرد که آیا جواب رضایت‌بخش است یا خیر؛ اگر جواب تأیید نشود، فرآیند دو مرتبه آغاز می‌شود و آزمایش‌های بیشتری صورت می‌گیرد. در طراحی آزمایش‌ها، هدف، شناسایی و تحلیل متغیرهای مؤثر بر خروجی‌ها با کمترین تعداد آزمایش است. اولین قدم در روش سطح پاسخ، پیدا کردن تقریب مناسب برای رابطه‌ی صحیح بین پاسخ و مجموعه متغیرهای مستقل می‌باشد. برای پیدا کردن بهترین درجه‌ی مدل، معمولاً از چند جمله‌ای‌های مرتبه پایین استفاده می‌شود. اگر پاسخ بوسیله‌ی یک تابع خطی از متغیرهای مستقل مدل شود، آنگاه تابع تقریب روش سطح پاسخ، مدل درجه اول نامیده می‌شود. در این حالت، روش سطح پاسخ معادل با رگرسیون خطی چندگانه^۲ محسوب می‌شود [۲۷ و ۲۶].

$$\bar{Y}(X) = B_0 + \sum_{i=1}^N B_i X_i = B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 + \dots + B_N X_N \quad (3)$$

^۱ Response Surface Method

^۲ Multiple Linear Regression

شکل (۸)-الف، مقدار بدست آمده از هر یک از مدل‌ها در مقایسه با مقادیر تجربی، برای چهار نمونه‌ای که برای بخش آزمایش مدل‌ها در نظر گرفته شده است را نشان می‌دهد. همچنین نمودار (ب) درصد خطای هر یک از چهار مدل را مقایسه کرده است که میانگین خطای روش شبکه عصبی مصنوعی از دو روش دیگر کمتر است. لازم به ذکر است که مدلی را به عنوان مدل منتخب گزارش می‌نماییم که کمترین میانگین خطا را در هر دو قسمت آموزش و آزمایش داشته باشد؛ بنابراین با بررسی میانگین خطاها برای هر سه روش، ملاحظه شد که روش شبکه عصبی مصنوعی با میانگین خطای ۵/۴۷ درصد برای آموزش و ۹/۵۷ درصد برای آزمایش، دارای کمترین میانگین خطا بوده و به عنوان مدل منتخب برگزیده شد.

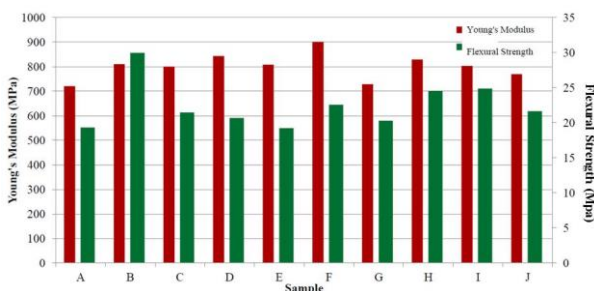


شکل ۸. الف) مقایسه روش‌های مدلسازی و نتایج تجربی برای آزمایش (ب) خطای هر مدل بر حسب درصد.

جدول ۲ مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل منتخب (شبکه عصبی مصنوعی) را برای انرژی نشان می‌دهد. با توجه به نتایج بدست آمده، ملاحظه می‌شود که در تمامی نقاط، پیش‌بینی‌های مدل بسیار نزدیک به مقادیر تجربی است.

جدول ۲. مقایسه نتایج مدول یانگ و مدل منتخب.

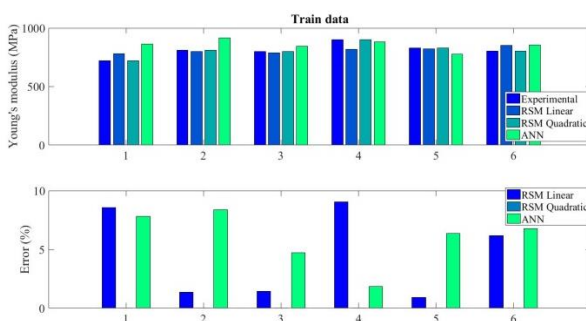
مدول یانگ (MPa)		محتوای ذرات (درصد وزنی)		کد نمونه
مدل منتخب	تجربی	HA	G	
۸۴۷/۹۶	۷۲۰/۲۲	۰	۰	A
۸۲۸/۰۱	۸۱۰/۱۱	۳/۵	۰	B
۸۴۱/۲۱	۸۰۰/۲۹	۱/۰۲	۰/۰۷	C
۸۰۵/۳۱	۸۴۳/۵۸	۵/۹۷	۰/۰۷	D
۸۲۹/۷۷	۸۰۷/۷۹	۰	۰/۲۵	E
۸۰۹/۸۲	۸۹۹/۸۷	۳/۵	۰/۲۵	F
۷۸۴/۴۳	۷۲۸/۴۳	۷	۰/۲۵	G
۸۰۹/۶۲	۸۲۹/۵۵	۱/۰۲	۰/۴۳	H
۷۷۳/۷۱	۸۰۳/۲۳	۵/۹۷	۰/۴۳	I
۷۸۳/۰۱	۷۶۹/۵۴	۳/۵	۰/۵	J



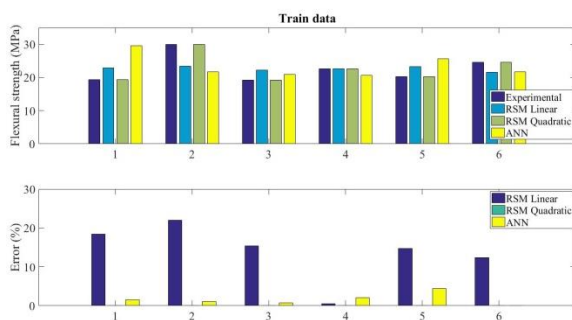
شکل ۶. تغییرات مدول یانگ و استحکام خمشی بر حسب درصدهای وزنی مختلف نانوذرات.

۴-۱- نتایج مدلسازی و بهینه‌سازی

همانطور که پیشتر اشاره شد، آزمایش‌های تجربی بر اساس طراحی آزمایش بر مبنای دو متغیر درصد وزنی نانوذرات هیدروکسی آپاتیت و گرافن اکساید انجام شده و نتایج گزارش شده‌اند. برای تأیید نتایج بدست آمده و همچنین بهینه‌سازی و دستیابی به یک نقطه‌ای خاص، که هدف نهایی هر آزمایش محسوب می‌شود، فرآیند مدلسازی با هدف کاستن هزینه‌ها و تسریع در روند بهینه‌سازی به کار گرفته می‌شود. در این تحقیق، تمامی روش‌های مدلسازی در حوزه نانوذرات مورد بررسی قرار گرفتند و از بین روش‌های موجود، روش‌های پاسخ سطح (خطی و مرتبه دوم) و شبکه عصبی مصنوعی به عنوان روش‌های منتخب لحاظ گردیده‌اند. با توجه به نتایج بدست آمده (جدول ۱)، مقادیر مدول یانگ با تغییر محتوای پرکننده‌ها تغییر می‌کند که نیازمند مدلسازی می‌باشد. در شکل (۷)-الف، مقدار بدست آمده از روش‌های مدلسازی سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی برای ۶ نمونه که به عنوان آموزش انتخاب شده‌اند، مقایسه شده است. شکل (۷)-ب، مقادیر خطای هر روش نسبت به مقدار تجربی گزارش شده است که با توجه به آن، ملاحظه می‌شود که کمترین خطای آموزش مربوط به روش سطح پاسخ مرتبه دو است که تقریباً نزدیک صفر است.

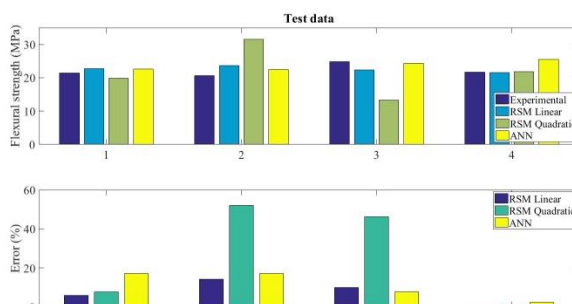


شکل ۷. الف) مقایسه روش‌های مدلسازی و نتایج تجربی برای آموزش (ب) خطای هر مدل بر حسب درصد.



شکل ۱۰. (الف) مقایسه روش‌های مدل‌سازی و نتایج تجربی برای آموزش (ب) خطای هر مدل بر حسب درصد.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، روش سطح پاسخ مرتبه‌ی یک بیشترین خطا و روش سطح پاسخ مرتبه‌ی دو، کمترین خطا را نشان می‌دهد. همچنین، شکل (۱۱)-الف، مقایسه‌ای از مقادیر بدست آمده از روش‌های مختلف مدل‌سازی با نتایج تجربی برای بخش آزمایش مدل‌ها و در قسمت (ب)، خطای هر مدل بر حسب درصد را نشان می‌دهد. با بررسی میانگین خطای بخش آموزش و آزمایش برای هر سه روش مدل‌سازی، مشخص شد که برای پارامتر استحکام خمشی نیز، روش شبکه عصبی مصنوعی به دلیل دارا بودن کمترین خطا (۲/۳۴) درصد برای آموزش و ۱۳/۶۶ درصد برای آزمایش) به عنوان مدل منتخب برگزیده شده است.

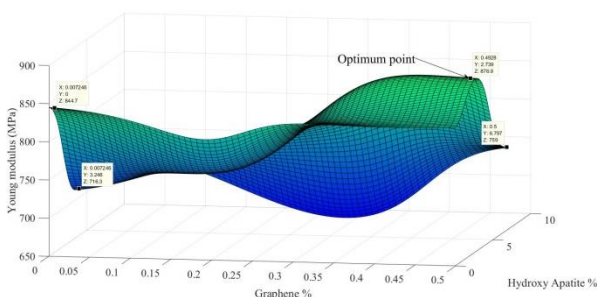


شکل ۱۱. (الف) مقایسه روش‌های مدل‌سازی و نتایج تجربی برای آزمایش (ب) خطای هر مدل بر حسب درصد.

در جدول ۳، نتایج مدل منتخب در مقایسه با نتایج تجربی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج مدل منتخب از تطابق قابل ملاحظه‌ای با نتایج تجربی برخوردار است.

در این بخش، بهینه‌سازی خاصیت مدول یانگ با استفاده از الگوریتم ژنتیک بر داده‌های بدست آمده از مدل منتخب صورت گرفته است. پارامترهای فرض شده به شرح زیر است؛ الگوریتم از نوع باینری بوده و برای هر متغیر، ۱۰ بیت اختصاص داده شده است. به این ترتیب تعداد بیت هر کروموزوم، ۲۰ بیت می‌باشد. نقاط شروع اولیه به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند. تعداد نقاط همپوشانی با توجه به طول کروموزوم، ۵ نقطه و احتمال جهش، برابر ۰/۰۱ فرض شده است. در نهایت برای متغیر اول (هیدروکسی آپاتیت)، عدد صحیح ۰ تا بیشینه درصد وزنی آن (۷ درصد) در نظر گرفته شده است. همچنین برای متغیر دوم (گرافن اکساید)، عدد صحیح ۰ تا ۵/۵ مشخص شده است. با فرض بیشینه کردن هر پارامتر، جواب‌های زیر بدست آمده است؛

در شکل (۹) نمودار سه بعدی تغییرات مدول یانگ بر حسب دو متغیر درصد وزنی نانوذرات به کمک روش شبکه عصبی مصنوعی ترسیم شده است. مقدار بهینه‌ی گزارش شده در ۲/۷۳۹ درصد وزنی نانوذرات هیدروکسی آپاتیت و ۰/۴۹۲ درصد وزنی از گرافن اکساید بدست آمده است و مقدار بهینه‌ی مدول یانگ ۸۷۶/۹ مگاپاسکال است.



شکل ۹. گراف سه بعدی مدول یانگ بازای درصدهای وزنی مختلف.

در ادامه، مدل‌سازی استحکام خمشی با استفاده از روش‌های یاد شده، مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل (۱۰)-الف، مقایسه‌ای از مقادیر بدست آمده از روش‌های مختلف مدل‌سازی با نتایج تجربی برای بخش آموزش مدل‌ها و در قسمت (ب)، خطای هر مدل بر حسب درصد نشان داده شده است.

است. استحکام خمشی نانوکامپوزیت تقویت شده با ۲/۷۵ درصد وزنی نانوذرات هیدروکسی آپاتیت و عدم حضور گرافن اکساید گزارش شده است که مقدار آن برابر ۲۹/۹۷ مگاپاسکال می‌باشد و با توجه به اپوکسی خالص، ۵۵/۰۴ درصد رشد را نشان داده است. با توجه به نتایج بدست آمده از مدلسازی عددی، روش شبکه عصبی مصنوعی به عنوان مدل منتخب برگزیده شده است و بهینه‌سازی خواص بر اساس این روش تدوین شده است. مقدار بهینه‌ی مدول یانگ در ۲/۷۳۹ درصد وزنی نانوذرات هیدروکسی آپاتیت و ۰/۴۹۲ درصد وزنی گرافن اکساید گزارش شده است و مقدار آن معادل ۸۶۷/۹ مگاپاسکال ارائه شده است. همچنین مقدار بهینه‌ی استحکام خمشی در ۰/۰۲۱ درصد وزنی گرافن اکساید و ۲/۴۳۵ درصد وزنی نانوذرات هیدروکسی آپاتیت مشخص شده است که مقدار آن ۲۴/۳۲ مگاپاسکال بدست آمده است.

۴- منابع

1. L. Gong, L. Zhao, L. Tang, H. Liu, Y. Mai, Journal of Composites Science and Technology, 15, 104-114, (2015).

۲. م. خلینا، م. بهشتی، مطالعه‌ی ویژه‌ی دوره‌ی دکتری مهندسی پلیمر، (۱۳۹۲).

3. R.A. Braga, P.A.A. Magalhaes Jr, Materials Science and Engineering C, 56, 269-273, (2015).

۴. ج. احمدی، غ. لیاقت، م. شکریه، ماهنامه علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، ۲، (۱۳۹۳).

5. D.K. Shin, J.J. Lee, IEE Transactions on Component, Packaging and Manufacture, 21, (1998).

6. D. Isala, J. Chanchira, T. Tsutomu, R. Sarawut, Composites: Part B, 56, 197, (2014).

7. X. Wang, H. Yang, L. Song, Y. Hu, W. Xing, H. Lu, Composites Science and Technology 72, 1-6, (2011).

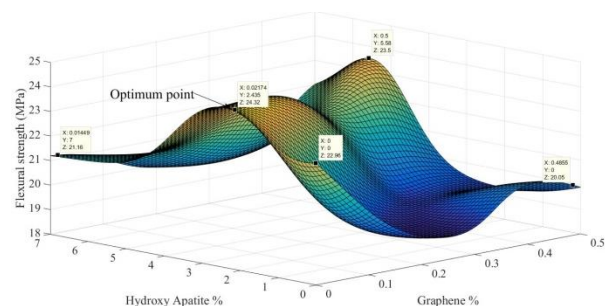
8. X. Meng, C. Xu, G. Xiao, M. Yi, Y. Zhang, Ceramics International 23, 13883-13889, (2016).

۹. س. منبری، ف. قاسمی، ا. قاسمی، ماهنامه علمی و پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، ۷، (۱۳۹۴).

جدول ۳. مقایسه نتایج استحکام خمشی و مدل منتخب.

کد نمونه	محتوای ذرات (درصد وزنی)		استحکام خمشی (MPa)	
	G	HA	تجربی	مدل منتخب
A	۰	۰	۱۹/۳۳	۲۲/۹۶
B	۰	۳/۵	۲۹/۹۷	۲۴/۴۲
C	۰/۰۷	۱/۰۲	۲۱/۴۷	۲۱/۴۷
D	۰/۰۷	۵/۹۷	۲۰/۶۹	۲۱/۵۲
E	۰/۲۵	۰	۱۹/۲۳	۱۹/۲۳
F	۰/۲۵	۳/۵	۲۲/۵۶	۲۲/۵۶
G	۰/۲۵	۷	۲۰/۲۹	۲۹/۲۰
H	۰/۴۳	۱/۰۲	۲۴/۵۵	۲۰/۲۱
I	۰/۴۳	۵/۹۷	۲۴/۸۷	۲۲/۰۸
J	۰/۵	۳/۵	۲۱/۶۵	۱۹/۴۴

شکل ۱۲ نمودار سه بعدی استحکام خمشی را بر اساس دو متغیر درصد وزنی نانوذرات نشان می‌دهد. در این نمودار، مقدار بهینه خاصیت استحکام خمشی که به کمک الگوریتم ژنتیک بدست آمده برابر ۲۴/۳۲ مگاپاسکال می‌باشد که در ۰/۰۲۱ درصد وزنی از گرافن اکساید و ۲/۴۳۵ درصد وزنی نانوذرات هیدروکسی آپاتیت بدست آمده است.



شکل ۱۲. گراف سه بعدی استحکام خمشی بازای درصدهای وزنی مختلف.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر نانوذرات هیدروکسی آپاتیت و گرافن اکساید بر پایه‌ی اپوکسی، به روی مدول یانگ و استحکام خمشی مورد بررسی قرار گرفت. درصدهای وزنی نانوذرات به کمک طراحی آزمایش و به روش کامپوزیت مرکزی بدست آمد. نتایج تجربی برای مدول یانگ نشان داد که بیشترین مقدار این خاصیت در ۰/۱۹ درصد وزنی گرافن اکساید و ۲/۷۵ درصد وزنی از نانوذرات هیدروکسی آپاتیت بدست آمده است و مقدار آن معادل ۸۹۹/۸۷ می‌باشد که نسبت به اپوکسی خالص ۲۴/۹۴ درصد رشد داشته

۲۷. ع. جبروتی، ع. غفرانی، چهارمین همایش فن‌آوری‌های نوین شیمی و مهندسی شیمی، (۱۳۹۴).
28. R. Belli, S. Kreppel, A. Petschelt, H. Hornberger, A.R. Boccaccini, U. Lohbauer, J. Mech. Behav. Biomed. Mater, 37, 100-108, (2014).
29. M.M. Taheri, M.R.A. Kabir, T. Shokuhfar, A. Hamlekhan, M.R. Shirdar, F. Naghizadeh, Materials & Desig, 82, 119-125, (2015).
10. Y.J. Wan, L.C. Tang, D. Yan, L. Zhao, Y.B. Li, L.B. Wu, J.X. Jiang, G.Q. Lai, Composites Science and Technology 82, 60-68, (2013).
11. C. Wang, Y. Lan, W. Yu, X. Li, Y. Qjan, H. Liu, Applied Surface Science, 362, 11-19, (2016).
12. G. Huang, S. Wang, P. Song, C. Wu, S. Chen, X. Wang, Composites: Part A, 59, 18-25, (2014).
13. X.F. Wu, Y.K. Zhao, Z.H. Zhao, Y. Sun, Y. Zhang, S.S. Zheng, F.J. Xiao, J.Chem.Soc.Pak, 38, 28-32, (2016).
14. E. Mannov, H. Schmutzler, S. Chandrasekaran, C. Viets, S. Buschhorn, F. Tolle, R. Mulhaupt, K. Schulte, Composites Science and Technology, 87, (2013).
15. J. Li, Y.F. Zheng, Applied Surface Science, 255, 494-497, (2008).
16. A.G. Osorio, L.A. dos Santos, C.P. Bergmann, Rev.Adv.Mater, 27, 58-63, (2011).
17. S.M. Zebarjad, S.A. Sajjadi, T.E. Sdrabadi, A. Yaghmaei, B. Naderi, Engineering, 3, 795-801, (2011).
18. Z. Hong, P. Zhang, C. He, X. Qiu, A. Liu, L. Chen, X. Chen, X. Jing, Biomaterials, 26, 6296-6304, (2005).
19. A. Fereidoon, A.H. Mashhadzadeh, Y. Rostamiyan, Sci.Eng.Compos.Mater, 20, (2013).
20. S. Sathiyamurthy, A.S. Thaheer, S. Jayabal, Indian Journal of Fiber & Textile Research, 38, 81-86, (2013).
21. K.L. Low, S.H. Tan, S.H. Sharif Zein, D.S. McPhail, A.R. Boccaccini, Materials and Design, 32, 3312-3319, (2011).
22. ASTM D638-02, Standard test method for tensile properties of plastics, 2002.
23. D. CiresAn, et al, Neural Networks, 32, 4-12, (2012).
24. G. Tabachnick, F. Barbara, Linda, Boston: Pearson International Edition, (2007).
25. G.E.P. Box, The Annals of Mathematical Statistics, 25, 290-302, (1954).
26. G. Venter, R.T. Haftka, J.H. Starnes, AIAA, (1996).