



مطالعه تجربی و مدلسازی آماری خواص فشاری نانوکامپوزیت‌های اپوکسی / گرافن اکساید / هیدروکسی آپاتیت

ساسان فولادپنجه^۱، علی دادرسی^{۲*} و عبدالرضا علوی قره‌باغ^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

^۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

^۳ مربی، گروه مهندسی برق و کامپیوتر، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۲۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۰۸/۰۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۲۵

چکیده

در این مقاله، یک مطالعه تجربی و عددی بر استحکام فشاری، انرژی و تغییر طول کامپوزیت‌های تقویت شده با گرافن اکساید و نانوذرات هیدروکسی آپاتیت انجام شده است. گرافن اکساید تا ۰/۵ درصد وزنی و نانوذرات هیدروکسی تا ۷ درصد وزنی، مورد استفاده قرار گرفته است و درصدهای وزنی از طریق طراحی آزمایش و با روش کامپوزیت مرکزی بدست آمده‌اند. درصد وزنی پرکننده‌ها، به عنوان پارامترهای ورودی جهت مدلسازی نتایج توسط روش سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی در نظر گرفته شده‌اند. نتایج تجربی نشان می‌دهد، افزایش محتوای نانو ذرات، باعث افزایش استحکام فشاری شده است. همچنین نتایج مدلسازی نشان می‌دهد، میانگین خطای بدست آمده از روش شبکه عصبی مصنوعی، دارای کمترین میانگین خطا بوده است. بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک صورت گرفته و نتایج نشان می‌دهد، مقدار بهینه استحکام فشاری در ۷ درصد وزنی از نانو ذرات هیدروکسی آپاتیت و ۰/۲۸۹ درصد وزنی از گرافن اکساید حاصل می‌شود که مقدار آن برابر ۲۳/۹۵ مگاپاسکال است. مقدار بهینه انرژی معادل ۳۳/۳ J گزارش شده که در عدم حضور نانوذرات هیدروکسی آپاتیت و ۰/۲۳۹ درصد وزنی گرافن اکساید بدست آمده است؛ همچنین مقدار بهینه تغییر طول در ۰/۲۲۴ درصد وزنی گرافن اکساید و عدم حضور هیدروکسی آپاتیت گزارش شده که معادل ۲۳/۹۸ درصد است.

کلمات کلیدی: استحکام فشاری؛ شبکه عصبی مصنوعی؛ هیدروکسی آپاتیت؛ نانوکامپوزیت؛ الگوریتم ژنتیک؛ گرافن اکساید.

An Experimental Study and Statistical Modelling on Compressive Properties of Epoxy/ Graphene oxide/ Hydroxyapatite Nanocomposites

S. Fooladpanjeh¹, A. Dadrasi^{2*}, A. Alavi Gharebagh³

¹ M.S. Student, Department of Mechanical Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran

² Assist. Prof., Department of Mechanical Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran

³ Staff Member, Department of Electronic and Computer Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran

Abstract

In this article, an experimental and numerical study on compression strength, energy and elongation at break of nanocomposites reinforced by graphene oxide and hydroxyapatite nanoparticles has been done. Graphene oxide and hydroxyapatite were used up to 0.5 & 7 wt.%, respectively & Filler's weight fractions have been achieved by design of experiment through central composite design method. Weight fractions of fillers have been considered as input parameters for modeling by RSM and ANN. Experimental results show the addition of nanoparticles increase compression strength. Also, modeling results show that average error of ANN has the lowest average error. Optimization has been done by genetic algorithm method and the results show that the optimum value of compression strength was 23.95 Mpa in 7 wt.% of HA and 0.289 wt.% of GO. The optimum value of energy has been reported 33.3 J in 0.239 wt.% GO and in absence of HA nanoparticles. Also, the optimum value of elongation at break is in 0.224 wt.% GO and absence of HA that is equal to 23.98 percent.

Keywords: Compression Strength; Artificial Neural Network; Hydroxyapatite; Nanocomposite; Genetic Algorithm; Graphene Oxide.

۱- مقدمه

استفاده از رزین اپوکسی به دلیل انعطاف‌پذیری و خواص مناسب، به طور گسترده‌ای در زمینه‌های مختلفی نظیر، هوافضا، کشتی‌سازی 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 دهه گذشته، محققان از پرکننده‌های مختلفی جهت بهبود خواص مکانیکی استفاده کرده‌اند [۱ و ۲].

کی و همکاران [۳]، تأثیر افزودن نانو ذرات 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. هانگ و همکاران [۴]، اثر ترکیبی نانولوله‌های کربنی و گرافن را بر یاف 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 که افزودن کربن نانوتیوب و گرافن نسبت به حالت‌های جداگانه، تأثیر بیشتری بر این خاصیت دارد. وانگ و همکاران [۵]، 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 ۳۷/۲ مگاپاسکال است که نسبت به پلی-بوتیلن خالص، ۲۰ درصد افزایش را نشان می‌دهد. ونگ و همکاران [۶]، تأثیر افزودن گرافن تا ۳ درصد وزنی را به پلی‌آمید، به روی استحکام و مدول کششی بررسی کردند. آنها گزارش کردند که بیشترین مقدار استحکام کششی در ۳ درصد وزنی گرافن رخ داده که ۵۴ درصد نسبت به پلی‌آمید 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. در تحقیقی که

توسط لی و همکاران [۷] 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. زبرجد و همکاران [۸]، خواص مکانیکی پلی‌متیل-متاکریلیت اسید را به همراه نانوذرات هیدروکسی آپاتیت، مورد بررسی قرار دادند. آنها با استفاده از سه درصد وزنی ۲/۵، ۵ و ۱۰ از هیدروکسی آپاتیت، استحکام خمشی نمونه‌ها را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج آنها بیانگر آن است که بهترین مقدار استحکام خمشی در ۲/۵ درصد وزنی نانو ذرات بدست آمده و نسبت به پلی‌متیل‌متاکریلیت خالص، تنها ۳ درصد افزایش یافته است. بررسی خواص مکانیکی هیدروکسی آپاتیت و کربن‌نانوتیوب توسط اوسوریو و همکارانش [۹] صورت گرفت. نتایج آنها برای چقرمگی شکست نشان می‌دهد که بیشترین مقدار در ۰/۵ درصد وزنی از نانو ذرات هیدروکسی آپاتیت بدست آمده است و مقدار آن برابر $2/59 \text{ MPa.m}^{1/2}$ است و با افزودن نانو ذرات، کاهش این خاصیت بیان شده است؛ همچنین برای استحکام کششی، بیشترین مقدار در ۱ درصد وزنی از نانو ذرات بدست آمده است و مقدار آن ۲۵/۱۵ مگاپاسکال است که ۸۲ درصد افزایش یافته است. هانگ و همکاران [۱۰]، استحکام کششی، خمشی و مقاومت به ضربه کامپوزیت‌های پلی‌ال لاکتید/ هیدروکسی آپاتیت را مورد آزمایش قرار دادند. بیشترین مقدار استحکام کششی در ۴ درصد وزنی نانو ذرات هیدروکسی آپاتیت گزارش شده است و مقدار آن برابر ۷۵ مگاپاسکال است و با افزایش نانو ذرات، 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 نانو ذرات بدست آمده است؛ همچنین بیشترین مقدار مقاومت به ضربه در ۴ درصد وزنی نانو ذرات هیدروکسی آپاتیت گزارش شده است و مقدار آن $4/6 \text{ KJ/m}^2$ بیان شده است. نتایج بدست آمده از تحقیق مانو و همکاران [۱۱] نشان می‌دهد که افزودن گرافن اکساید تا ۰/۵ درصد وزنی به رزین اپوکسی، باعث افزایش استحکام فشاری نانوکامپوزیت می‌شود. وان و همکاران [۱۲]، تأثیر افزودن گرافن اکساید را بر

استاین گزارش شده است که مقدار آن 41 KJ/m^2 است. لو و همکاران [۱۵]، 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 $0/5$ درصد وزنی نانولوله‌های کربن و 15 درصد وزنی سرم آلومین بدست آمده است و مقدار آن برابر 14 مگاپاسکال است؛ همچنین آنها با کمک روش سطح پاسخ توانستند با خطای 8 درصد به مقدار $13/47$ مگاپاسکال دست یابند.

در این مقاله، یک بررسی تجربی و تحلیل عددی روی 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 پاسخ سطح خطی، مرتبه دو و شبکه عصبی مصنوعی مدل شده و مقایسه‌ای بین نتایج مدل‌ها صورت گرفته است و بهترین مدل با کمترین میانگین خطا ارایه شده است؛ همچنین مقدار بهینه 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 20 تا 100 نانومتر، با خلوص $99/9$ درصد و با چگالی $0/8 \text{ g/cm}^3$ مورد استفاده قرار گرفت. همچنین گرافن اکساید با درصد خلوص 99 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

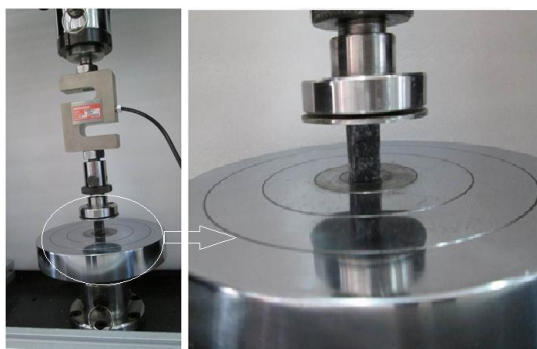
در این تحقیق، پلیمر ترموست بر پایه اپوکسی بیسفنول، با افزودن نانوذرات هیدروکسی‌آپاتیت تا 7 درصد وزنی و گرافن اکساید تا $0/5$ درصد وزنی، تقویت شده است. رزین اپوکسی از نوع RL-440 بوده، علت انتخاب این رزین، پایین بودن

اپوکسی بررسی کرده‌اند. گرافن اکساید تا سقف $0/2$ درصد وزنی به ماتریس اپوکسی اضافه شده است و نتایج آنها بیانگر آن است که افزودن گرافن اکساید به مقدار $0/25$ 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 57 درصد گزارش شده است. همچنین وان و همکاران گزارش کرده‌اند که تغییر طول در زمان شکست نمونه‌های تقویت شده با گرافن اکساید، بیشتر از نمونه‌های اپوکسی خالص است.

در زمینه 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. مورفی و همکاران [۱۳]، 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 4 درصد حجمی از نانوذرات بدست آمده است و مقدار آنها به ترتیب، $30/45$ مگاپاسکال و $89/75$ مگاپاسکال است. آنها همچنین به کمک روش‌های عصبی مصنوعی و سطح پاسخ، مقادیر بهینه خواص بالا را گزارش کردند. مقدار بهینه استحکام کششی، در 3 درصد حجمی نانو ذرات و مقدار بهینه استحکام پیچشی، در $3/17$ درصد حجمی نانو ذرات گزارش شد. در آزمایشی که توسط فریدون و همکاران [۱۴] صورت گرفت، خواص مکانیکی اپوکسی/ پلی‌استایرن/ کربن نانوتیوب، مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج آنها نشان داد که بیشترین مقدار استحکام خمشی، برابر $59/1$ مگاپاسکال است. در مورد مقاومت به ضربه نمونه‌ها نیز بیشترین مقدار، معادل KJ/m^2 $37/8$ 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 $3/6$ درصد وزنی بدست آمده است؛ اما افزایش مقدار پلی‌استایرن، تأثیر چندانی در نتایج مدل‌سازی نداشته است؛ همچنین مقدار بهینه استحکام خمشی در $0/8$ درصد وزنی از کربن نانوتیوب و $4/2$ درصد وزنی از پلی‌استایرن بدست آمده است و مقدار آن $5/2$ مگاپاسکال است. نتیجه مدلسازی برای مقاومت به ضربه نیز، در $1/3$ درصد از کربن نانوتیوب و $4/5$ درصد از پلی-

¹ Genetic Algorithm

استفاده در این آزمایش، $25/4 \times 12/7 \times 12/7$ میلی‌متر بود. کلیه آزمایشات بوسیله یک دستگاه SANTAM-STM 150 انجام شده است. این آزمون معمولاً برای بررسی مواد مختلف با ویژگی‌های متفاوت از قبیل، ترد بودن، فلزی و غیرفلزی بودن و نیز عمدتاً برای مواد سرامیکی، بتن و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به شکل ۱، نمونه ساخته شده بر اساس استاندارد، در قسمت مرکزی فک‌ها قرار می‌گیرد و توسط دو صفحه صلب با نرخ $0/5$ میلی‌متر بر دقیقه تحت فشار قرار می‌گیرد. سرعت انجام آزمایش با مطالعه بر پژوهش‌های انجام شده، انتخاب شده است [۱۷-۱۹]. سرعت انجام آزمایش انجام شده معمولاً برای اطمینان از نتایج بدست آمده، برای هر نمونه چهار تکرار در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که نمونه‌ها در حین آزمایش تا 60 درصد کوتاه شدن طول نمونه تحت بارگذاری قرار گرفته‌اند.



شکل ۱- نمونه‌ی در حال آزمون فشار

۳- مدلسازی عددی^۴ و بهینه‌سازی^۵

۳-۱- شبکه عصبی مصنوعی^۶

شبکه عصبی مصنوعی ساختاری، متشکل از تعدادی واحد (نرون مصنوعی) است که بهم وصل شده‌اند. هر واحد دارای یک مشخصه ورودی/ خروجی است و محاسبه یا عملی منطقی را اجرا می‌کند. خروجی هر واحد با توجه به اتصالات درونی آن با سایر واحدها تعیین می‌شود. ANN خانواده‌ای متشکل از شبکه‌های گوناگون است. عملکرد کلی شبکه‌های

نسبی ویسکوزیته آن نسبت به سایر موارد موجود است که این امر به محققان این امکان را می‌دهد تا به راحتی بتوان از آن در سیستم‌های قالبگیری حساس و ظریف استفاده کنند، بدون آنکه در مدل بدست آمده، اشکال و ضعفی به جای بماند؛ همچنین با توجه به غلظت پایین محصول، امکان استفاده آن به همراه انواع پرکننده‌های معدنی فراهم است.

برای تهیه کامپوزیت، رزین و نانو ذرات هیدروکسی آپاتیت با درصد‌های وزنی مورد نظر، بوسیله یک همزن مکانیکی به مدت دو ساعت و با سرعت 1100 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 آمد. سپس برای از بین بردن حباب‌های ایجاد شده، ترکیب موجود به مدت 30 دقیقه در آون با دمای 80 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 نانو ذرات، از دستگاه همزنایزر^۱ کمک گرفته شد. ترکیب بدست آمده به مدت 15 دقیقه همگن‌سازی شد. در نهایت برای ایجاد یک فضای خلاء برای از بین بردن حباب‌های ایجاد شده از هم‌زدن ترکیب، از یک آون خلاء به مدت 20 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 5 ساعت و با دمای 80 درجه سانتی‌گراد پخته^۲ شدند و بعد از آن در دمای 110 درجه سانتی‌گراد، به مدت 1 ساعت پس‌پخت^۳ شدند.

۳-۲- آزمون استحکام فشاری

آزمایش فشار بر اساس استاندارد ASTM D695 [۱۶] انجام شده است. با توجه به استاندارد یاد شده، دو شکل (مکعب مستطیل - استوانه‌ای) و ابعاد متفاوت برای ساخت نمونه‌ها، مورد استفاده قرار می‌گیرد که با توجه شرایط آزمایشگاهی، یکی از اشکال را می‌توان استفاده کرد. ابعاد نمونه‌های مورد

⁴ Numerical Modeling

⁵ Optimization

⁶ Artificial Neural Network

¹ Homogenizer

² Cure

³ Post Cure

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

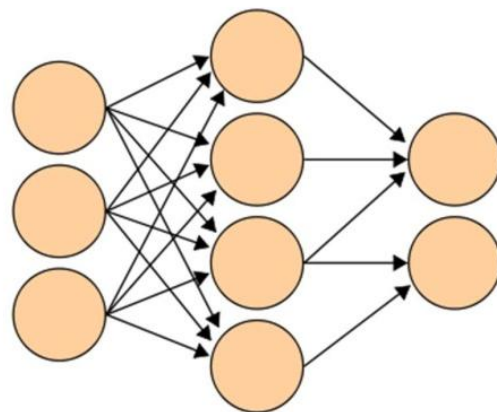
بطوری که $\hat{Y}(x)$ تقریب مبتنی بر مدل بوده و $Y(x)$ ، پاسخ بدست آمده از نتایج تجربی است؛ همچنین می توان از روش های تحلیل آماری ANOVA^۳، برای بررسی قابلیت مدل جهت تشخیص اثرات پارامترهای طراحی به روی پاسخ کمک گرفت [۲۲ و ۲۳]. یک معیار متداول دیگر، ضریب همبستگی پیرسون است که به عنوان معیار شباهت استفاده می شود و عکس آن معادل با معیار خطا خواهد بود. ضریب همبستگی پیرسون، عددی بین ۱ و -۱ است که $\langle 1 \rangle$ به معنی همبستگی مثبت کامل، $\langle 0 \rangle$ به معنی نبود همبستگی و $\langle -1 \rangle$ به معنی همبستگی منفی کامل است. رابطه (۲)، ضریب همبستگی پیرسون را نشان می دهد.

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

۳-۲- سطح پاسخ (RSM^۴)

روش سطح پاسخ یک مجموعه ای از تکنیک های آماری و ریاضیات کاربردی برای ساخت مدل های تجربی است. هدف در طرح های رویه پاسخ، بهینه سازی پاسخ (متغیر خروجی) است که متأثر از چندین متغیر مستقل (متغیرهای ورودی) است. یک آزمایش، یک سری از آزمون هاست که اجرا نامیده می شوند. در هر آزمایش، تغییرات در متغیرهای ورودی به منظور تعیین علل تغییرات در متغیر پاسخ ایجاد می شوند. در طرح های رویه پاسخ، ساخت مدل های رویه پاسخ یک فرآیند تکراری است. به محض اینکه یک مدل تقریبی بدست آمد، توسط روش نیکویی برازش مورد آزمون قرار می گیرد که آیا جواب رضایت بخش است یا خیر؛ اگر جواب تأیید نشود، فرآیند دو مرتبه آغاز می شود و آزمایش های بیشتری صورت می گیرد. در طراحی آزمایش ها هدف، شناسایی و تحلیل متغیرهای مؤثر بر خروجی ها با کمترین تعداد آزمایش است. اولین قدم در روش سطح پاسخ، پیدا کردن تقریب مناسب

عصبی مصنوعی، توسط توپولوژی شبکه، خصوصیات نرون منفرد و الگوریتم یادگیری و داده های آموزش معین می شود. شکل ۲ یک شبکه فرضی با مقیاس کوچک را نشان می دهد که در آن نرون ها به صورت مربع و اتصالات درونی به وسیله خطوطی نشان داده شده اند. باید توجه داشت که بعضی نرون ها به صورت مستقیم با دنیای بیرون در ارتباط هستند، در حالی که سایرین مخفی یا درونی هستند.



شکل ۲- مدل شبکه عصبی مصنوعی پس از انتشار^۱
لایه ورودی لایه پنهان لایه خروجی

موضوع مهم دیگر در شبکه، الگوریتم یادگیری یا همان روش اصلاح الگوهای ارتباط عناصر درونی بر اساس تابعی از داده های آموزش است. هدف در مرحله آموزش شبکه، گسترش یک ساختار درونی است که شبکه را قادر سازد تا الگوهای جدید و مشابه داده های تجربی مرحله آموزش را به طرز صحیحی پیش بینی یا طبقه بندی کند [۲۱].

۳-۱-۱- معیار خطای مدل

خطای عددی در مدل می تواند به دلیل انتخاب توابع پایه، نقاط شبیه سازی و یا عوامل دیگر باشد. دقت مدل را می توان به کمک چندین معیار سنجید؛ به عنوان مثال، خطای نسبی (RE^۲)، یک نمونه از این دست است که با معادله (۱) بیان می شود.

³ Analysis of variance

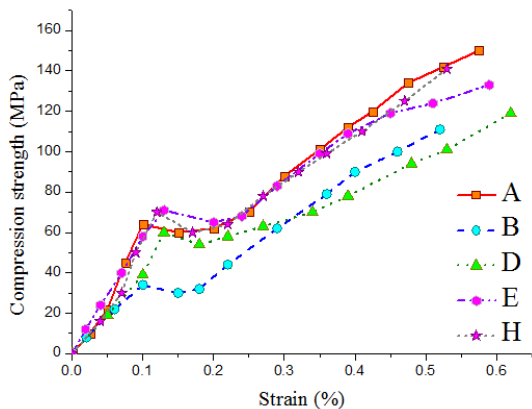
⁴ Response Surface Method

¹ After Propagation

² Relative Error

۴-۱- نتایج تجربی

با توجه به نتایج گزارش شده در جدول ۱، مقدار استحکام فشاری برای اپوکسی خالص ۱۳/۱۰۹ مگاپاسکال است. بیشترین مقدار بدست آمده نیز، در کامپوزیت تقویت شده با ۰/۲۵ درصد وزنی گرافن اکساید و عدم حضور نانو ذرات هیدروکسی آپاتیت (نمونه E) مشاهده می‌شود که ۶۶/۵۶ درصد رشد را نسبت به اپوکسی خالص نشان می‌دهد. همچنین در نتایج بدست آمده، افزایش این خاصیت را برای تمامی حالت‌ها به جز نمونه (G) شاهد هستیم. همانطور که بسیاری از محققان اشاره کرده‌اند، کسر حجمی و پخش مناسب نانو ذرات می‌تواند بر خواص مکانیکی تأثیرگذار باشد [۲۶ و ۲۷]. از آنجا که در نمونه (G)، بیشترین مقدار نانو ذرات هیدروکسی آپاتیت مورد استفاده قرار گرفته است، علت این کاهش را می‌توان کلوخه شدن نانو ذرات در ماده زمینه دانست. نمودار شکل ۳، رفتار تنش-کرنش برخی از نمونه‌های آزمایش شده در مقایسه با اپوکسی خالص را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳، مشخص است که افزودن نانو ذرات گرافن اکساید (۰/۲۵ درصدوزنی)، باعث افزایش حد نهایی فشار شده است.



شکل ۳- نمودار تغییرات تنش-کرنش حاصل از آزمون فشار

مقدار انرژی گزارش شده در جدول ۱ برای هر نمونه، از سطح زیر نمودار بار-جابجایی آن بدست آمده است. همان‌طور که مشخص است، مقدار انرژی برای اپوکسی خالص، J ۱۷/۶۶۶ است. با توجه به نتایج بدست آمده و افزودن نانو ذرات هیدروکسی آپاتیت و نانو لایه‌های گرافن اکساید، بیشترین مقدار انرژی بدست آمده در ترکیبی با ۰/۲۵ درصد

برای رابطه صحیح بین پاسخ و مجموعه متغیرهای مستقل است. برای پیدا کردن بهترین درجه مدل، معمولاً از چند جمله‌ای‌های مرتبه پایین استفاده می‌شود. اگر پاسخ بوسیله 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^۱ محسوب می‌شود [۲۴ و ۲۵].

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

۴-۲ نتایج و بحث

در این بخش، استحکام فشاری، تغییر طول و انرژی نمونه-های 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- استحکام فشاری، تغییر طول و انرژی کامپوزیت-های تقویت شده با درصدهای وزنی مختلف از هیدروکسی آپاتیت و گرافن اکساید

کد نمونه	پرکننده (درصد وزنی)	استحکام فشاری (Mpa)	انرژی (J)	تغییر طول (%)	پارامترها	
					گرافن (G)	هیدروکسی آپاتیت (HA)
A	۰	۱۳/۱۰۹	۱۷/۶۶۶	۱۸/۷۲۳	۰	۰
B	۰	۱۹/۷۵۶	۱۴/۵۷۵	۱۹/۷۵۱	۳/۵	۰
C	۰/۰۷	۱۶/۵۸۲	۱۸/۷۷۵	۱۷/۰۱	۱/۰۲	۰/۰۷
D	۰/۰۷	۱۳/۱۳۵	۱۵/۶۲۵	۱۳/۹۴	۵/۹۷	۰/۰۷
E	۰/۲۵	۲۱/۸۳۵	۳۵/۴۲۵	۲۴/۳۲۸	۰	۰/۲۵
F	۰/۲۵	۲۰/۱۱	۲۹/۱۲۵	۲۰/۳۹۹	۳/۵	۰/۲۵
G	۰/۲۵	۱۱/۱۱۶	۱۳/۶	۱۳/۴۵۳	۷	۰/۲۵
H	۰/۴۳	۱۵/۵۳۱	۱۵/۸۲۵	۱۲/۸۸۱	۱/۰۲	۰/۴۳
I	۰/۴۳	۱۶/۲۵۹	۲۱/۱۵	۱۶/۲۴۸	۵/۹۷	۰/۴۳
J	۰/۵	۱۸/۳۶۴	۱۷/۸	۱۹/۷۵۳	۳/۵	۰/۵

^۱ Multiple Linear Regression

های برادران و همکاران [۳۵] نیز، تطابق مناسبی با نتایج بدست آمده از این تحقیق دارد، آنها با استفاده از نانو ذرات هیدروکسی آپاتیت بر پایه اکسید گرافن دریافتند که خواص مکانیکی چقرمگی شکست و مدول الاستیک افزایش می‌یابد. قاسمی و همکاران [۳۶]، خواص گرافن را مورد بررسی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که اگرچه افزودن گرافن بر استحکام نهایی در کشش نداشته است، اما باعث افزایش خواص مدول الاستیک و استحکام به ضربه شده است.

۴-۲- نتایج مدل‌سازی عددی 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 نقطه‌ی 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 انرژی با تغییر محتوای پرکننده‌ها تغییر می‌کند که نیازمند مدل‌سازی می‌باشد. در مدل‌سازی، معمولاً بین ۶۰ تا ۷۰ درصد نمونه‌ها برای آموزش مدل و بین ۳۰ تا ۴۰ درصد نمونه‌ها نیز برای بخش آزمایش آن مورد استفاده قرار می‌گیرند. در قسمت مدل‌سازی این پژوهش، برای نشان دادن اعتبار آن و بالا بردن میزان اعتبارسنجی مدل، ۶۰ درصد نمونه‌ها (۶ نمونه) به آموزش و ۴۰ درصد (۴ نمونه) به آزمایش اختصاص داده شد. در شکل ۴ (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 ۴ (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.

وزنی گرافن اکساید و عدم حضور نانو ذرات هیدروکسی آپاتیت (نمونه E) است که مقدار آن برابر $J ۳۵/۴۲۵$ است و حدود ۱۰۰ درصد افزایش را نسبت به اپوکسی خالص نشان می‌دهد؛ همچنین، با توجه به داده‌های گزارش شده در جدول ۱، مقدار تغییر طول برای اپوکسی خالص $۱۸/۷۳۳$ درصد بدست آمده است. بیشترین تغییر طول به طول اولیه در $۰/۲۵$ درصد وزنی گرافن اکساید و عدم حضور نانوذرات هیدروکسی آپاتیت (نمونه E) است که مقدار آن برابر $۲۴/۳۲۸$ درصد است. علت افزایش انرژی با افزودن نانوذرات هیدروکسی آپاتیت و نانو لایه‌های گرافن اکساید را می‌توان از دیدگاه پیوندهای موجود بررسی کرد. رزین اپوکسی، نوعی پلیمر گرماسخت بوده که از مونومرهایی با جرم مولکولی و فرمول شیمیایی مشخص، تشکیل شده است. هنگامی که هاردنر به پلیمر افزوده می‌شود، شبکه‌هایی سه بعدی از زنجیره‌های پلیمری تشکیل می‌شود که مجموعه‌ای سه بعدی و آمورف است [۲۷]. وجود فضاهای خالی در ساختار مولکولی پلیمرها، محل مناسبی برای قرار گرفتن نانو ذرات هیدروکسی آپاتیت و نانولایه‌های گرافن اکساید است. در حین بارگذاری فشاری، زنجیره‌ها به سمت نظم آرایبی مجددی‌هایت می‌شوند تا بتوانند نیروی وارده را منتقل کنند. وجود این تقویت کننده‌ها در فضای خالی بین این زنجیره‌ها از یک سو می‌تواند به انتقال بهتر نیرو کمک کرده، در نتیجه باعث افزایش جذب انرژی شود و از طرف دیگر، می‌تواند باعث به وجود آمدن قفل‌های مکانیکی شده و تحرک زنجیره‌ها را کم کند [۲۸]. در حقیقت، این ذرات با قرارگیری در فضای بین زنجیره‌ها هنگام بارگذاری، باعث کندی حرکت زنجیره‌ها می‌شوند و زنجیره‌ها نمی‌توانند به راحتی رفتار خود را بر حسب نیروی اعمالی تطبیق دهند. لذا بعضاً وجود تقویت کننده‌ها، می‌تواند باعث کاهش تغییر طول نمونه شود [۲۹-۳۳].

نتایج تجربی بدست آمده بیانگر آن است که افزودن نانوذرات هیدروکسی آپاتیت و گرافن اکساید، باعث افزایش خواص مکانیکی گردیده است؛ همان‌طور که در تحقیقات متعددی به بیان این موضوع اشاره شده است؛ لی و همکاران [۳۴]، با استفاده از درصد‌های وزنی مختلف نانو ذرات هیدروکسی آپاتیت، افزایش استحکام کششی و مدول الاستیک را گزارش کرده‌اند. نتایج بدست آمده از آزمایش-

جدول ۲- مقایسه نتایج انرژی و مدل منتخب

کد نمونه	پرکننده (درصدوزنی)		انرژی (J)	
	HA	G	تجربی	مدل منتخب
A	۰	۰	۱۷/۶۶۶	۲۱/۹۴۸
B	۳/۵	۰	۱۴/۵۷۵	۱۵/۹۶۷
C	۱/۰۲	۰/۰۷	۱۸/۷۷۵	۲۲/۵۸۶
D	۵/۹۷	۰/۰۷	۱۵/۶۲۵	۱۵/۳۹۳
E	۰	۰/۲۵	۳۵/۴۲۵	۳۴/۲۴۷
F	۳/۵	۰/۲۵	۲۹/۱۲۵	۲۹/۱۲۵
G	۷	۰/۲۵	۱۳/۶	۱۴/۵۶۵
H	۱/۰۲	۰/۴۳	۱۵/۸۲۵	۲۱/۰۹
I	۵/۹۷	۰/۴۳	۲۱/۱۵	۱۹/۵۱۷
J	۳/۵	۰/۵	۱۷/۸	۱۷/۷۹۱

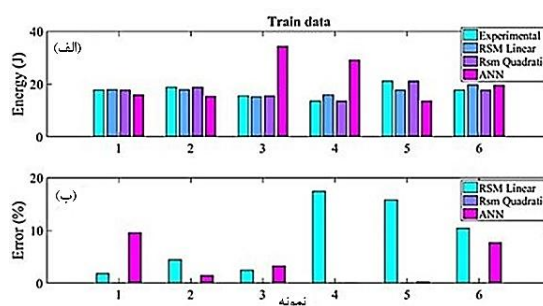
در این بخش بهینه‌سازی انرژی با استفاده از الگوریتم ژنتیک بر داده‌های بدست آمده از مدل منتخب صورت گرفته است. پارامترهای فرض شده به شرح زیر است؛ الگوریتم از نوع باینری بوده و برای هر متغیر، ۱۰ بیت اختصاص داده شده است. به این ترتیب تعداد بیت هر کروموزوم، ۲۰ بیت است. نقاط شروع اولیه به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند. تعداد نقاط هم‌پوشانی با توجه به طول کروموزوم، ۵ نقطه و احتمال جهش، برابر ۰/۰۱ فرض شده است [۳۷ و ۳۸]. 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 ۰/۵ مشخص شده است. با فرض بیشینه کردن هر پارامتر، جواب‌های زیر بدست آمده است؛

الگوریتم ژنتیک باینری به سیستم‌های طبیعی نزدیک‌تر است و دقت بالاتری دارد؛ به همین دلیل از الگوریتم ژنتیک باینری استفاده شده است. نحوه انتخاب جمعیت اولیه کاملاً به صورت تصادفی بوده است. در رابطه با تعداد نمونه اولیه نیز، در مجموع ۱۲۸ نمونه اولیه استفاده شده است. تابع هزینه کمینه کردن میانگین مربعات خطا بین خروجی مدل و نتایج آزمایشگاهی بوده است؛ که این عمل با انتخاب صحیح ضرایب نمونه‌های آموزش انجام شده است و این انتخاب در نمونه‌های آزمایش، مورد آزمون قرار گرفته و جواب را گزارش کرده است.

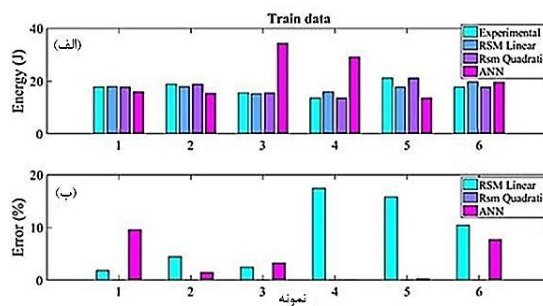
در شکل ۶ نمودار سه بعدی تغییرات انرژی بر حسب دو متغیر درصد وزنی نانوذرات به کمک روش شبکه عصبی

شکل ۵ (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 ۱۰/۸ درصد برای آموزش و ۴/۹۸ درصد برای آزمایش، دارای کمترین میانگین خطا بوده و به عنوان مدل منتخب برگزیده شد.

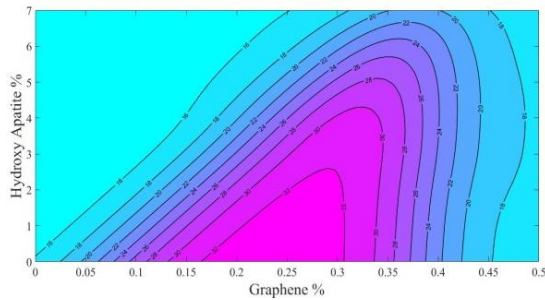
جدول ۲ مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل منتخب (شبکه عصبی مصنوعی) را برای انرژی نشان می‌دهد. با توجه به نتایج بدست آمده، ملاحظه می‌شود که در تمامی نقاط، پیش‌بینی‌های مدل بسیار نزدیک به مقادیر تجربی است.



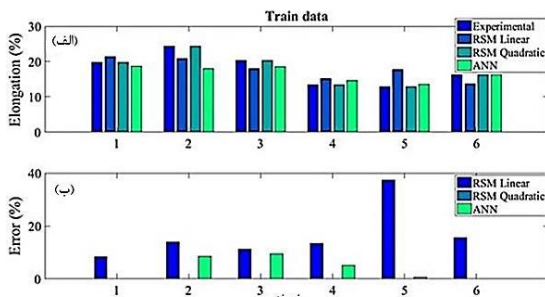
شکل ۴- الف) مقایسه روش‌های مدلسازی و نتایج تجربی برای آموزش و ب) خطای هر مدل بر حسب درصد



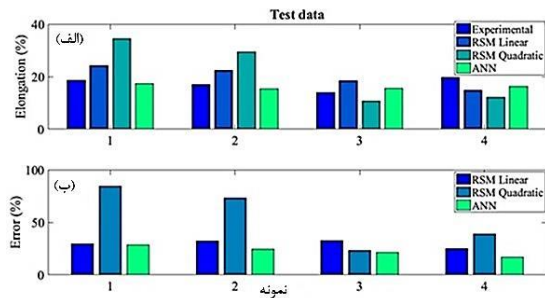
شکل ۵- الف) مقایسه روش‌های مدلسازی و نتایج تجربی برای آزمایش و ب) خطای هر مدل بر حسب درصد



شکل ۷- نمودار دو بعدی بر حسب درصدهای وزنی نانوذرات



شکل ۸- الف) مقایسه روش‌های مدل‌سازی و نتایج تجربی برای آموزش و ب) خطای هر مدل بر حسب درصد



شکل ۹- الف) مقایسه روش‌های مدل‌سازی و نتایج تجربی برای آزمایش و ب) خطای هر مدل بر حسب درصد

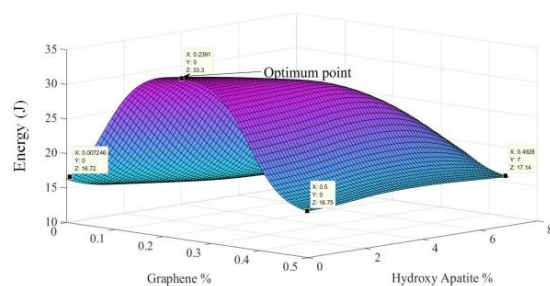
در جدول ۳، نتایج مدل منتخب در مقایسه با نتایج تجربی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج مدل منتخب از تطابق قابل ملاحظه‌ای با نتایج تجربی برخوردار است.

شکل ۱۰ نمودار سه بعدی تغییر طول را بر اساس دو متغیر درصد وزنی نانو ذرات نشان می‌دهد. در این نمودار، مقدار بهینه خاصیت تغییر طول که به کمک الگوریتم ژنتیک بدست آمده، برابر ۲۳/۹۸ درصد است که در ۰/۲۲۴ درصد

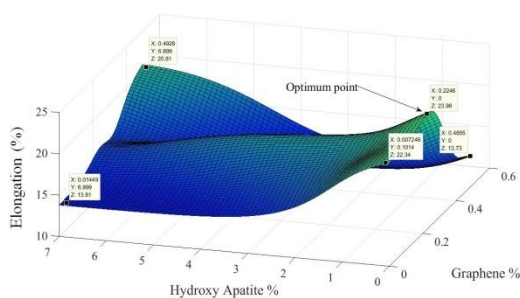
مصنوعی ترسیم شده است. مقدار بهینه گزارش شده در عدم حضور هیدروکسی آپاتیت و ۰/۲۳۹ درصد وزنی از گرافن اکساید بدست آمده است و مقدار بهینه انرژی J ۳۳/۳ است. همچنین اثر درصد وزنی نانو ذرات بر روی انرژی در شکل ۷ نشان داده است. در نواحی با رنگ یکسان، مقدار پارامتر مورد بررسی، تقریباً ثابت است. با توجه به این نمودار دو بعدی، بیشترین مقدار انرژی در بازه ۰ تا ۲/۸ نانو ذرات هیدروکسی آپاتیت و ۰/۱۶ تا ۰/۳۱ درصد وزنی گرافن اکساید بدست آمده است. این بازه‌ها به طراح کمک می‌کند تا با انتخاب درصد وزنی‌های مناسب پرکننده‌ها، بیشترین مقدار جذب انرژی را بدست آورد.

در ادامه، مدل‌سازی تغییر طول با استفاده از روش‌های یاد شده، مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۸ الف)، مقایسه‌ای از مقادیر بدست آمده از روش‌های مختلف مدل‌سازی با نتایج تجربی برای بخش آموزش مدل‌ها برای ۶ نمونه و در قسمت ب)، خطای هر مدل بر حسب درصد نشان داده شده است.

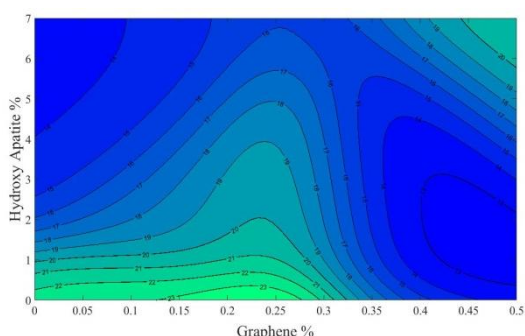
همان‌طور که ملاحظه می‌شود، روش سطح پاسخ مرتبه یک بیشترین خطا و روش سطح پاسخ مرتبه‌ی دو، کمترین خطا را نشان می‌دهد؛ همچنین، شکل ۹ الف)، مقایسه‌ای از مقادیر بدست آمده از روش‌های مختلف مدل‌سازی با نتایج تجربی برای بخش_آزمایش مدل‌ها (۴ نمونه) و در قسمت ب)، خطای هر مدل بر حسب درصد را نشان می‌دهد. با بررسی میانگین خطای بخش آموزش و آزمایش برای هر سه روش مدل‌سازی، مشخص شد که برای پارامتر تغییر طول نیز، روش شبکه عصبی مصنوعی به دلیل دارا بودن کمترین خطا (۲/۷۲ درصد برای آموزش و ۲۱/۲۶ درصد برای آزمایش) به عنوان مدل منتخب برگزیده شده است.



شکل ۶- گراف سه بعدی انرژی بازای درصدهای وزنی مختلف



شکل ۱۰- گراف سه بعدی تغییر طول با درصدهای وزنی مختلف



شکل ۱۱- نمودار دو بعدی بر حسب درصدهای وزنی نانوذرات

جدول ۳- مقایسه نتایج تغییر طول و مدل منتخب

کد نمونه	محتوای ذرات (درصدوزنی)		تغییر طول (%)	
	HA	G	تجربی	مدل منتخب
A	۰	۰	۱۸/۷۳۳	۱۸/۷۳۳
B	۳/۵	۰	۱۹/۷۵۱	۱۸/۰۵۹
C	۱/۰۲	۰/۰۷	۱۷/۰۱	۱۸/۶۲۶
D	۵/۹۷	۰/۰۷	۱۳/۹۴	۱۴/۶۵۵
E	۰	۰/۲۵	۲۴/۳۲۸	۱۷/۳۴۴
F	۳/۵	۰/۲۵	۲۰/۳۹۹	۱۵/۳۹
G	۷	۰/۲۵	۱۳/۴۵۳	۱۳/۵۳۶
H	۱/۰۲	۰/۴۳	۱۲/۸۸۱	۱۵/۶۱
I	۵/۹۷	۰/۴۳	۱۶/۲۴۸	۱۶/۲۵
J	۳/۵	۰/۵	۱۹/۷۵۳	۱۶/۳۹۵

داشته 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

وزنی از گرافن اکساید و در عدم حضور نانوذرات هیدروکسی آپاتیت بدست آمده است.

شکل ۱۱، نمودار دو بعدی تغییر طول بر حسب دو پارامتر محتوای ذرات هیدروکسی آپاتیت و گرافن را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که بیشترین مقدار تغییر طول در بازه‌ی ۰ تا ۰/۲۵ درصد وزنی هیدروکسی آپاتیت و ۰/۱۵ تا ۰/۲۷۵ درصد وزنی گرافن اکساید نمایش داده شده است که این مقدار هر چه به ۰/۲۵ درصد وزنی هیدروکسی آپاتیت نزدیک‌تر می‌شود، مقدار بیشتر تغییر طول حاصل خواهد شد. همچنین در مورد استحکام فشاری با بررسی میانگین خطاهای داده‌های آموزش و آزمایش برای هر سه روش، ملاحظه شد که روش شبکه عصبی مصنوعی با میانگین خطای ۵ درصد برای آموزش و ۱۲ درصد برای آزمایش، دارای کمترین میانگین خطا بوده، به عنوان مدل منتخب برگزیده شد. در نهایت با توجه به بهینه‌سازی انجام شده توسط الگوریتم ژنتیک، مشخص شد که مقدار بهینه این خاصیت در ۷ درصد وزنی هیدروکسی آپاتیت و ۰/۲۸۹ درصد وزنی گرافن بدست آمده است و مقدار آن برابر ۲۳/۹۵ مگاپاسکال است.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر نانوذرات هیدروکسی آپاتیت و گرافن اکساید بر پایه‌ی اپوکسی، به روی مشخصاتی نظیر استحکام فشاری، انرژی و تغییر طول، مورد بررسی قرار گرفت. درصدهای وزنی نانو ذرات به کمک طراحی آزمایش و به روش کامپوزیت مرکزی بدست آمد.

نتایج تجربی برای استحکام فشاری نشان داد که بیشترین مقدار این خاصیت در ۰/۲۵ درصد وزنی گرافن اکساید بدست آمده است و مقدار آن معادل ۲۱/۸۳۵ مگاپاسکال است که نسبت به اپوکسی خالص ۶۶/۵۶ درصد رشد داشته است. انرژی سطح زیر نمودار بار-جابجایی نانوکامپوزیت تقویت شده با ۰/۲۵ درصد وزنی گرافن اکساید نیز، معادل ۳۵/۴۲۵ گزارش شده است که ۶۴/۸۶ درصد نسبت به اپوکسی خالص افزایش داشته است. در مورد تغییر طول نسبت به طول اولیه نیز، بیشترین مقدار معادل ۲۴/۳۲۸ درصد و در ۰/۲۵ درصد وزنی گرافن اکساید بدست آمده است و در مقایسه با اپوکسی خالص، ۲۹/۸۶ درصد رشد

- microstructure of hydroxyapatite reinforced with carbon nanotubes. *Rev Adv Mater Sci*, 27: 58-63.
- [10] Hong Z, Zhang P, He C, Qiu X, Liu A, Chen L, Chen X, Jing X (2005) Nano-composite of poly (L-lactide) and surface grafted hydroxyapatite: Mechanical properties and biocompatibility. *Biomater*, 26 (32): 6296-6304.
- [11] Mannov E, Schmutzler H, Chandrasekaran S, Viets C, Buschhorn S, Tolle F, Mulhaupt R, Schulte K (2013) Improvement of compressive strength after impact in fibre reinforced polymer composites by matrix modification with thermally reduced graphene oxide. *Compos Sci Technol*, 87: 36-41.
- [12] Wan Y J, Tang L C, Yan D, Zhao L, Li Y B, Wu L B, Jiang J X, Lai G Q (2013) Improved dispersion and interface in the graphene/epoxy composites via a facile surfactant-assisted process. *Compos Sci Technol*, 82: 60-68.
- [13] Sathiyamurthy S, Thaheer A S, Jayabal S, (2013) Prediction and optimization of mechanical properties of patricles filled coir-polyester composites using ANN and RSM algorithms. *Indian J Fiber & Text*, 38: 81-86.
- [14] Fereidoon A, Mashhadzadeh A H, Rostamiyan Y, (2013) Experimental, modeling and optimization study on the mechanical properties of epoxy/highimpact polystyrene/multi-walled carbon nanotube ternary nanocomposite using artificial neural network and genetic algorithm. *Sci Eng Compos Mater* 20 (3): 265-276.
- [15] Low K L, Tan S H, Sharif Zein S H, McPhail D S, Boccaccini A R (2011) Optimization of the mechanical properties of calcium phosphate/multi-walled carbon nanotubes/bovine serum albumin composites using response surface methodology. *Mater Design* 32 (6): 3312-3319 .
- [16] ASTM D695-02, Standard test method for tensile properties of plastics, (2002).
- [۱۷] احمدی ج، لیاقت غ ج، شکریه م م (۱۳۹۳) تحلیل تجربی تأثیر پارامترهای ساخت بر خواص مکانیکی فوم‌های ترکیبی اپوکسی/ میکروبالن سرامیکی. ماهنامه علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس ۲.
- [18] Zebarjad S, Sajjadi A, Sadrabadi T, Yaghmaei A, B (2011) A Study on Mechanical Properties of PMMA/Hydroxyapatite Nanocomposites. *Eng*, 3 (8): 795-801 .
- [19] Rostamiyan Y, Hamed Mashhadzadeh A, Salmankhani A (2013) Optimization of mechanical properties of epoxy-based hybrid nanocomposite: Effect of using nano silica and high-impact polystyrene by mixture design approach *Mater Design* 56 (3): 1068-1077 .
- [20] Ciresan D, Meier U, Masci J, Schmidhuber J (2012) Multi-column deep neural network for شده است. مقدار بهینه استحکام فشاری در ۷ درصد وزنی نانو ذرات هیدروکسی آپاتیت و ۰/۲۹۸ درصد وزنی گرافن اکساید گزارش شده است و مقدار آن معادل ۲۳/۹۵ بدست آمده است. مقدار بهینه‌ی انرژی برابر J ۳۳/۳ در ۰/۲۳۹ گرافن اکساید ارائه شده است. همچنین مقدار بهینه تغییر طول در ۰/۲۲۴ درصد وزنی گرافن اکساید و در عدم حضور نانو ذرات هیدروکسی آپاتیت مشخص شده است که مقدار آن، ۲۳/۹۸ درصد بدست آمده است.
- ### ۶- مراجع
- [1] Gong L, Zhao L, Tang L, Liu H, Mai Y (2015) Balanced electrical thermal and mechanical properties of epoxy composites filled with chemically reduced graphene oxide and rubber nanoparticles. *Compos Sci Technol* 121 (9): 104-114.
- [۲] خلینا م، بهشتی مح (۱۳۹۲) رزین‌های اپوکسی-بررسی مورفولوژی و خواص ریزساختارهای آمیزه‌های اپوکسی. مطالعه‌ی ویژه دوره دکتری مهندسی پلیمر.
- [3] Lee J J, Shin D K (1989) Design and evaluation of a fault-tolerant multiprocessor using hardware recovery blocks. *IEEE Trans Comput* 38 (9): 1336 – 1337.
- [4] Huang G, Wang S, Song P, Wu C, Chen S, Wang X (2014) Combination effect of carbon nanotubes with graphene on intumescent flame-retardant polyethylene nanocomposites. *Compos Part A-APPL S* 59: 18-24.
- [5] Wang X, Yang H, Song L, Hu Y, Xing W, Lu H (2011) Morphology, mechanical and thermal properties of graphene-reinforced poly(butylene succinate) nanocomposites. *Compos Sci Technol* 72(1): 1-6.
- [6] Wang C, Lan Y, Yu W, Li X, Qian Y, Liu H (2016) Preparation of amino-functionalized graphene oxide/ polyimide composite films with improved mechanical, thermal and hydrophobic properties, *Appl Surf Sci*, 362: 11-19.
- [7] J. Li, Y. F. Zheng (2008) Effect of surface modified hydroxyapatite on the tensile property improvement of HA/PLA composite. *Appl Surf Sci*, 255 (2): 494-497.
- [8] Zebarjad S M, Sajjadi S A, Sadrabadi T E, Yaghmaei A, Naderi B (2011) A Study on Mechanical Properties of PMMA/Hydroxyapatite Nanocomposite, *Eng*, 3: 795-801.
- [9] Osorio A G, Dos santos L A, Bergmann C P (2011) Evaluation of the mechanical properties and

- [30] Shariati M, Farzi G A, Dadraasi A (2015) Mechanical properties and energy absorption capability of thin-walled square columns of silica/epoxy nanocomposite. *Const Build Mater*, 78 (5): 362-368.
- [31] Argon A S (1972) *Fracture of Composites, Treatise of Material Science and Technology*. Compos Mater, Academic Press, New York, 1.
- [32] Dai J F, Li B (2010) Synthesis, thermal degradation, and flame retardance of novel triazine ring-containing macromolecules for intumescent flame retardant polypropylene, *J Appl Polym Sci*, 116 (4): 2157-2165 .
- [۳۳] آل بویه ع (۱۳۹۵) تحلیل عددی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های متخلخل مزوپروس سیلیکا و هیدروکسی آپاتیت، پلی پروپیلن. مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها، ۶ (۳): ۲۹۹-۳۰۹.
- [34] Li J, Liu X, Zheng Y F, (2008) Effect of surface modified hydroxyapatite on the tensile property improvement of HA/PLA composite. *Appl Surf Sci*, 255 (2): 494-497.
- [35] Baradaran S, Moghaddam E, Basirun W J, Mehrali M, Sookhajian M, Hamdi M, Nakhaei Moghaddam M R, Alias Y (2013) Mechanical properties and biomedical applications of a nanotube hydroxyapatite-reduced graphene oxide composite, *Carbon*, 69 (5): 32-45.
- [۳۶] آشنای قاسمی ف، قاسمی ا، بصیری م (۱۳۹۴) تحلیل تجربی خواص مکانیکی پلی پروپیلن در حضور نانوصفحات گرافن و پلی اولفین الاستومر در زمان‌های ساخت متفاوت. ماهنامه علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، ۱۱ (۵): ۱۷۸-۱۸۹.
- [37] Kiran M, Shrikant A, Survase P, Saudagar S, Rekha S (2014) Comparison of artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM) in fermentation media optimization: Case study of fermentative production of scleroglucan. *BioChem Eng J*, 41 (3): 266-273.
- [38] Ahmad Z, Bahadori A, Zhang J (2017) Prediction of Combustion Efficiency using Multiple Neural Networks. *Chem Eng Trans*, 56 (3): 85-91.
- traffic sign classification. *Neur Net* 32 (5): 333-338.
- [21] Tabachnick G, Barbara F, Linda L (2007) *Using Multivariate Statistics* (5th ed.), Boston: Pearson International Edition.
- [22] Box G E P (1954) Some Theorems on Quadratic Forms Applied in the Study of Analysis of Variance Problems, I. Effect of Inequality of Variance in the One-Way Classification. *Ann Math Stat*, 25 (2): 290-302.
- [23] Venter G, Haftka R T, Starnes J H (1996) Construction of response surfaces for design optimization applications, *AIAA*, 96: 4040-4052.
- [۲۴] جبروتی ع، غفرانی ع ا (۱۳۹۴) معرفی روش شناسی سطح پاسخ، چهارمین همایش فن‌آوری‌های نوین شیمی و مهندسی شیمی.
- [25] Belli R, Kreppel S, Petschelt A, Hornberger H, Boccaccini AR, Lohbauer U (2014) Strengthening of dental adhesives via particle reinforcement. *J Mech Behav Biomed Mater*. 37 (5): 100-108.
- [26] Taheri M M, Kabir M R A, Shokuhfar T, Hamlekhan A, Shirdar M R, Naghizadeh F (2015) Fluoridated hydroxyapatite nanorods as novel fillers for improving mechanical properties of dental composite: Synthesis and application. *Mater Design*, 82 (7): 119-125 .
- [۲۷] نجفی م، انصاری ر، درویشه ا (۱۳۹۶) بررسی تجربی تأثیر روش اختلاط نانورس بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری و چند لایه‌های الیافی فلزی. مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها، ۷ (۲): ۶۳-۸۰.
- [28] Zhang H, Zhang Z, Fredrich K, Egar C (2006) Property improvements of in situ epoxy nanocomposites with reduced interparticle distance at high nanosilica content. *Acta Mater*, 54 (7): 1833-1842.
- [29] Bindu M G G, Satapathy B K, Jaggi H S, Ray A R (2013) Size-scale effects of silica on bis-GMA/TEGDMA based nanohybrid dental restorative composites. *Compos. Part B Eng*, 53: 92-102.