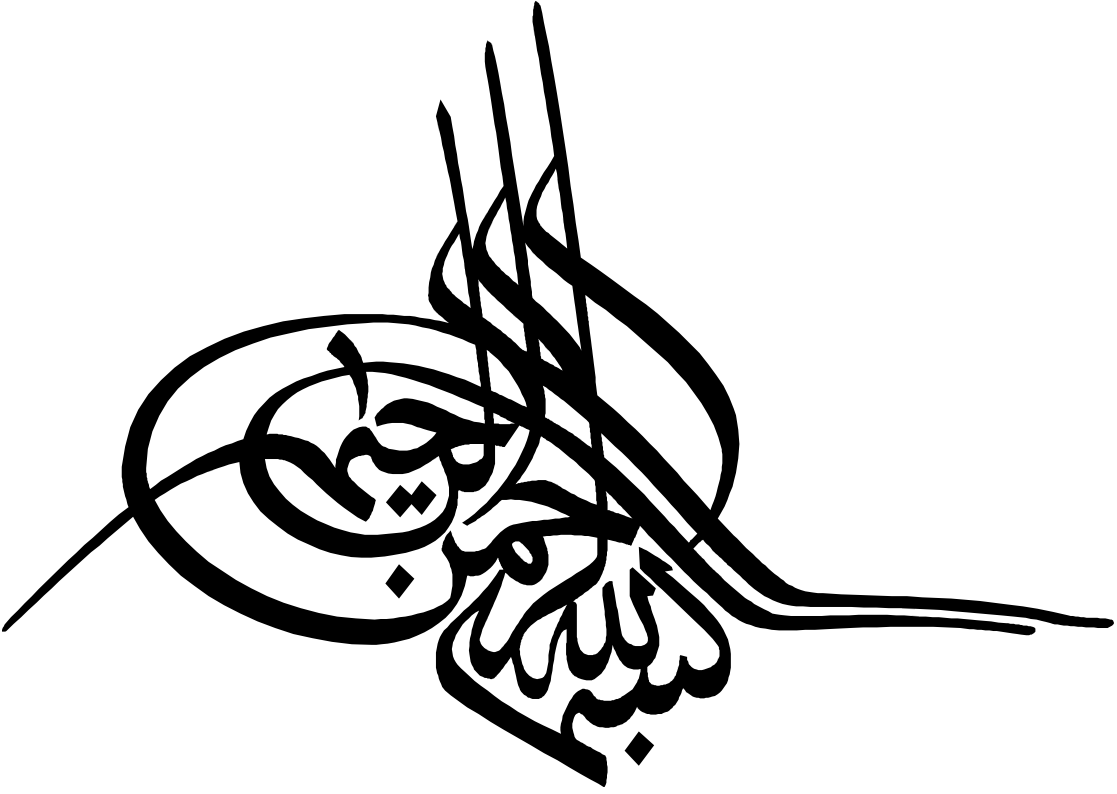






دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

گروه طراحی کاربردی

رساله دکتری

مطالعه تجربی و تحلیل رفتار مکانیکی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی / سیلیکا

علی دادرسی

اساتید راهنما:

دکتر محمود شریعتی

دکتر غلامعلی فرزی

شهریور ۱۳۹۴

دانشگاه صنعتی شاهرود

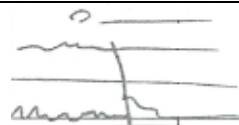
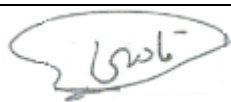
دانشکده : مکانیک

گروه : طراحی جامدات

رساله دکتری آقای علی دادرسی

تحت عنوان: مطالعه تجربی و تحلیل رفتار مکانیکی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی / سیلیکا در تاریخ ۱۳۹۴/۰۶/۲۶ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک رساله دکتری ارزیابی گردید و با درجه خوب مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی:		نام و نام خانوادگی: محمود شریعتی
	نام و نام خانوادگی:	غایب	نام و نام خانوادگی: غلامعلی فرزی

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی: محمد باقر نظری		نام و نام خانوادگی: سید یوسف احمدی بروغنی
			نام و نام خانوادگی: صاحبعلی منافی
			نام و نام خانوادگی: مجتبی قطعی
			نام و نام خانوادگی: هادی قادری

تقدیر و شکر

پاس خدای را که سخوران، در ستون او بماند و شمارندگان، شردن نعمت های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. و سلام و دور در خاتم الانبیاء، محمد مصطفی (ع)

و خاندان پاک و مطهر ایشان، هم آنان که وجودمان و مدار وجودشان است و نفرین پیوسته بر دشمنانمان تا روز تائید... .

بدون شک جایگاه و منزلت استاد، اجل از آن است که بتوان با زبان قاصد و قلم ناتوان بدان پرداخت. اما از آنجایی که تجلیل از استاد، پاس از انسانی است که هدف

و غایت آفرینش را تائید می کند و سلامت امانت باری را که به دستش سپرده اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب کلام زیبای ولی نعمتان، ثامن الحجج که فرمودند: "من لم

یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر الله عز وجل: "

از پدر و مادر عزیزم... این دو معلم بزرگوارم... که همواره بر کوتاهی و درستی من، قلم غشوئیده و گریانه از کنار غفلت بایم گذشته اند و در تمام عرصه های زندگی یار و یاور بی

چشم داشت برای من بوده اند؛ و دعای خیرشان، همواره تسهیل کننده نا بهواری های سیر زندگی ام بود.

از استاد با کمال و شایسته؛ جناب آقای دکتر شیرعتی که در کمال سه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از پنج گلی در این عرصه بر من درخ نمودند و زحمت راهبانی این رساله را بر

عمده گرفتند؛ همچنین از استاد عزیز و گرامی، جناب آقای دکتر فرزی، که بدون راهبانی های ارزشمند ایشان، این پروژه به نتیجه مطلوب نمی رسید؛

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را پاس گوید.

تعهد نامه

اینجانب علی دادرسی دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی مکانیک دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مطالعه تجربی و تحلیل رفتار مکانیکی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی / سیلیکا تحت راهنمایی دکتر محمود شریعتی و دکتر غلامعلی فرزی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو



مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

در این رساله، از نانوذرات کروی سیلیکا، با سه قطر متفاوت ۱۷ nm، ۲۵ nm و ۶۵ nm، برای تقویت رزین اپوکسی دی گلیسیدیل اتر بیسفنول A تا حداکثر ۶٪ وزنی استفاده شده است. هدف از این مطالعه، بررسی اثر اندازه ذرات، محتوای ذرات و استفاده ترکیبی از آنها بر مدول یانگ، چقرمگی و انرژی شکست و مقاومت به ضربه بوده و همچنین قابلیت جذب انرژی سازه‌های جدار نازک قوطی شکل و مخروطی شکل، به کمک آزمایش فروپاشی، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که با افزودن نانوذرات به اپوکسی و نیز با افزایش محتوای ذرات، بر مدول یانگ، چقرمگی و انرژی شکست و مقاومت به ضربه افزوده شده که این افزایش در برخی از پارامترها، در کامپوزیت‌های ترکیبی مشهودتر است. در سری‌های ترکیبی و در ۶٪ وزنی از نانوذرات، بیشترین افزایش نسبت به اپوکسی خالص، معادل ۱۳/۳٪ برای مدول یانگ، ۶۳/۱٪ برای چقرمگی شکست، ۱۳۸/۵٪ برای انرژی شکست و ۲۰/۱٪ برای مقاومت به ضربه است. همچنین نتایج نشان داد که اثر اندازه ذرات بر پارامترهای مذکور ناچیز است. با افزودن نانوذرات، مشخصات جذب انرژی سازه‌های جدار نازک دچار افت شده و با افزایش محتوای ذرات، مقدار افت تشدید شده است. مکانیزم‌های اثربخشی نانوذرات در هر آزمایش، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد مطالعه قرار گرفته و مشخص شد که مکانیزم‌های مؤثر، انحراف مسیر ترک، بستن و خم شدن نوک ترک، شکسته شدن پیوند و حفره زایی پلاستیک بودند. در ادامه، نتایج تجربی بدست آمده از رفتار مکانیکی نانوکامپوزیت‌های سیلیکا / اپوکسی به کمک روش شبکه عصبی مصنوعی و روش سطح پاسخ (خطی و مرتبه دو)، به صورت آماری مدل شده و "مدل منتخب" از میان مدل‌های مذکور شناسایی و گزارش شده است. همچنین بر اساس روش سطح پاسخ و الگوریتم ژنتیک، اندازه و محتوای بهینه نانوذره به ازای پارامترهای مختلف گزارش شده است.

کلمات کلیدی: کامپوزیت پایه پلیمری، نانوذرات سیلیس، اندازه ذرات، مدول یانگ، چقرمگی و انرژی شکست، مقاومت ضربه، قابلیت جذب انرژی، شبکه عصبی مصنوعی، روش سطح پاسخ، الگوریتم ژنتیک.

لیست مقالات مستخرج از رساله

- 1- Mechanical properties and energy absorption capability of thin-walled square columns of silica/epoxy nanocomposite, Construction and Building Materials, 78 (2015) 362–368. ISSN=0950-0618, IF=2.265, MIF=1.543.
- 2- An Experimental Study on Toughening Mechanisms of Fillers in Epoxy/ Silica Nanocomposites, International Journal of Nanoscience and Nanotechnology, Vol. 11, No. 3, Sept. 2015, pp. 193-199
- ۳- بررسی اثر اندازه ذرات پر کننده و ترکیبات مختلف آنها بر قابلیت جذب انرژی سازه های جدار نازک قوطی شکل ساخته شده از نانوکامپوزیت های اپوکسی/ سیلیکا - مجله نانومواد - سال ششم - شماره ۱۸ - تابستان ۹۳ - صفحه ۱ تا ۸. ISC و علمی-پژوهشی.
- ۴- تأثیر نانوذرات صلب سیلیس بر قابلیت جذب انرژی سازه های قوطی شکل جدار نازک (سیزدهمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران IAS2014: تهران: اسفند ۹۲)
- ۵- بررسی فروپاشی سازه های جدار نازک ساخته شده از نانوکامپوزیت های اپوکسی/ سیلیکا (بیست و دومین کنفرانس سالانه (بین المللی) مهندسی مکانیک ISME2014: اهواز: اردیبهشت ۹۳)
- ۶- مکانیزم سفت شوندگی نانوکامپوزیت های پایه اپوکسی تقویت شده با ترکیبات مختلف از نانوذرات سیلیکا (دومین همایش ملی نانو از تئوری تا کاربرد: اصفهان: اسفند ۹۲)

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه	۱۵
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ پلیمرها	۳
۳-۱ اپوکسی	۳
۱-۳-۱ کاربردهای اپوکسی	۴
۱-۳-۱-۱ پوشش‌ها	۴
۲-۳-۱-۲ چسب‌ها	۴
۳-۱-۳-۱ قالب‌های صنعتی	۵
۴-۱-۳-۱ صنایع هوافضا	۵
۵-۱-۳-۱ صنایع الکترونیک	۵
۴-۱ کامپوزیت‌ها	۶
۵-۱ خواص نانوذرات	۷
۶-۱ حالت پراکندگی	۸
۷-۱ برهمکنش پلیمر و پرکننده	۹
۸-۱ سیلیکا	۱۰
۹-۱ هدف از انجام این رساله	۱۱
۱۰-۱ مروری بر رساله	۱۱
فصل ۲: مروری بر تحقیقات انجام شده	۱۳
۱-۲ مقدمه	۱۴
۲-۲ مروری بر ادبیات موضوع	۱۵
فصل ۳: روش‌های مدل‌سازی ریاضی و بهینه‌سازی	۴۱

۴۲	۱-۳ مقدمه
۴۲	۲-۳ شبکه عصبی مصنوعی (ANN)
۴۴	۱-۲-۳ کاربردهای شبکه عصبی مصنوعی
۴۵	۲-۲-۳ فواید و معایب شبکه‌های عصبی مصنوعی
۴۵	۳-۲-۳ پیاده‌سازی شبکه
۴۵	۳-۳ روش سطح پاسخ (RSM)
۴۶	۱-۳-۳ تابع مشخصه
۴۷	۴-۳ الگوریتم ژنتیک
۴۸	۵-۳ بهینه‌سازی مبتنی بر سطح پاسخ
۴۸	۶-۳ معیار خطای مدل
۵۱	فصل ۴: ساخت نمونه‌ها و آزمایش‌های تجربی
۵۲	۱-۴ مواد
۵۴	۲-۴ طراحی آزمایش
۵۵	۳-۴ آماده‌سازی نمونه‌ها
۵۶	۴-۴ ساخت قالب سیلیکونی
۵۸	۵-۴ آزمایش کشش
۶۱	۶-۴ آزمایش چقرمگی شکست و انرژی شکست
۶۵	۷-۴ آزمایش ضربه
۶۸	۸-۴ آزمایش جذب انرژی
۷۳	فصل ۵: تحلیل نتایج
۷۴	۱-۵ نتایج تجربی
۷۴	۱-۱-۵ آزمایش کشش
۸۲	۱-۱-۱-۵ بررسی برخی از مدل‌های تحلیلی مدول یانگ
۸۴	۲-۱-۱-۵ مقایسه نتایج تجربی و پیش‌بینی مدل‌های تحلیلی

۸۵	۲-۱-۵ آزمایش چقرمگی شکست
۹۶	۳-۱-۵ آزمایش ضربه
۱۰۰	۴-۱-۵ آزمایش فروپاشی ستون‌های جدار نازک
۱۰۰	۱-۴-۱-۵ آزمایش فروپاشی سازه‌های قوطی شکل
۱۰۸	۲-۴-۱-۵ آزمایش فروپاشی سازه‌های مخروطی شکل
۱۱۲	۲-۵ نتایج مدل‌سازی ریاضی
۱۱۲	۱-۲-۵ مقدمه
۱۱۴	۲-۲-۵ مدول یانگ
۱۲۲	۳-۲-۵ چقرمگی شکست و انرژی شکست
۱۳۲	۴-۲-۵ جاذب‌های قوطی شکل
۱۳۲	۱-۴-۲-۵ جاذب‌های قوطی شکل با ارتفاع ۹۰ mm
۱۳۸	۲-۴-۲-۵ جاذب‌های قوطی شکل با ارتفاع ۶۰ mm
۱۴۳	۵-۲-۵ جاذب‌های جدار نازک مخروطی
۱۴۸	۶-۲-۵ مقاومت ضربه
۱۵۴	۷-۲-۵ بهینه‌سازی
۱۵۶	۸-۲-۵ اعتبار سنجی
۱۵۸	۹-۲-۵ جمع‌بندی
۱۵۹	فصل ۶: جمع‌بندی رساله و پیشنهادات
۱۶۰	۱-۶ مقدمه
۱۶۰	۲-۶ جمع‌بندی نتایج تجربی
۱۶۲	۳-۶ جمع‌بندی نتایج عددی
۱۶۳	۴-۶ پیشنهادات
۱۶۴	مراجع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: ساختار شیمیایی اپوکساید [۹]. ۳
- شکل ۱-۲: شیوه‌های مختلف توزیع و پراکندگی نانو ذرات درون کامپوزیت [۳۶]. ۷
- شکل ۱-۳: شماتیک نانو ذره: (a) یک بعدی، (b) دو بعدی، (c) سه بعدی [۴۵]. ۸
- شکل ۱-۴: نمودار تغییرات نیروهای واندرولس بر حسب فاصله ی بین ذرات [۴۸]. ۱۰
- شکل ۲-۱: تغییرات استحکام تسلیم با اندازه ذرات در نرخ‌های فشار مختلف. ۱۷
- شکل ۲-۲: تغییرات مدول فشاری با اندازه ذرات در نرخ‌های فشار مختلف. ۱۷
- شکل ۲-۳: تغییرات انرژی شکست و مدول یانگ با درصد وزنی نانوذرات سیلیکا برای کامپوزیت دوتایی و سه تایی [۶۸]. ۲۲
- شکل ۲-۴: تغییرات انرژی شکست و مدول یانگ با درصد وزنی نانوذرات لاستیک برای کامپوزیت دوتایی و سه تایی [۶۸]. ۲۲
- شکل ۲-۵: تغییرات مدول یانگ نانوکامپوزیت PLA بر حسب درصد وزنی سیلیکا [۷۰]. ۲۳
- شکل ۲-۶: تغییر طول تا نقطه شکست نانوکامپوزیت PLA بر حسب درصد وزنی سیلیکا [۷۰]. ۲۳
- شکل ۲-۷: تغییرات مقاومت به ضربه نانوکامپوزیت PLA بر حسب درصد وزنی سیلیکا [۷۰]. ۲۴
- شکل ۲-۸: نمودار تغییرات مدول یانگ برای تمام نمونه‌های کامپوزیتی [۷۲]. ۲۵
- شکل ۲-۹: نمودار تغییرات چقرمگی شکست برای تمام نمونه‌های کامپوزیتی [۷۲]. ۲۶
- شکل ۲-۱۰: مودهای فروپاشی دینامیکی. ۳۱
- شکل ۲-۱۱: مودهای فروپاشی شبه استاتیکی. ۳۱
- شکل ۲-۱۲: شماتیک مکانیزم انحراف مسیر ترک [۱۱۲]. ۳۶
- شکل ۲-۱۳: پدیده حفره زایی ذرات لاستیک در سطح شکست اپوکسی DGEBA تقویت شده با نانو ذرات لاستیک به قطر متوسط ۸۰ nm [۱۱۳]. ۳۷
- شکل ۲-۱۴: تصاویر SEM از سطح شکست DGEBA با ۱۰ درصد حجمی نانوذره سیلیکا. (A) ۱۷۰ nm، (B) ۷۴ nm، (C) ۲۳ nm. (ذراتی که پیوند آنها شکسته است، با دایره مشخص شده‌اند). ۳۸
- شکل ۲-۱۵: شماتیکی از پل زدن در نانو ذرات کروی [۱۱۷]. ۳۹
- شکل ۳-۱: ساختار اتصالات درونی شبکه‌های عصبی مصنوعی. ۴۳
- شکل ۴-۱: ساختار شیمیایی DGEBA [۹]. ۵۲
- شکل ۴-۲: ساختار شیمیایی عامل پخت آمینی (الف) DDM و (ب) DDS [۹]. ۵۳
- شکل ۴-۳: مکانیزم واکنش پخت آمین و اپوکساید [۹]. ۵۴
- شکل ۴-۴: طراحی پیشنهادی نرم افزار Design expert به روش Central Composite Design. ۵۵
- شکل ۴-۵: مراحل ۱ تا ۶ ساخت قالب سیلیکونی. ۵۷
- شکل ۴-۶: نقشه و ابعاد ساخت نمونه آزمایش کشش. ۵۸
- شکل ۴-۷: قالب تهیه نمونه آزمایش کشش بر اساس استاندارد ASTM D 638. ۵۹

- شکل ۴-۸: قالب سیلیکونی ساخت نمونه‌های آزمایش کشش ۵۹
- شکل ۴-۹: نمونه‌های تهیه شده برای آزمایش کشش ۶۰
- شکل ۴-۱۰: نمونه تحت آزمایش کشش توسط دستگاه سروهیدرولیک اینسترون (ب) بزرگمایی ... ۶۰
- شکل ۴-۱۱: نمونه‌های استاندارد آزمایش چقرمگی شکست [۱۴۱] ۶۲
- شکل ۴-۱۲: قالب سیلیکونی ساخت نمونه‌های آزمایش چقرمگی شکست ۶۳
- شکل ۴-۱۳: نمونه‌های آماده شده برای آزمایش چقرمگی شکست ۶۳
- شکل ۴-۱۴: نمونه تحت آزمایش چقرمگی شکست توسط دستگاه اینسترون ۸۸۰۲ ۶۴
- شکل ۴-۱۵: نمونه‌های آماده شده برای آزمایش چقرمگی شکست ۶۵
- شکل ۴-۱۶: دستگاه تست ضربه SIT-50 ۶۶
- شکل ۴-۱۷: الف) شماتیک اساس کار دستگاه آزمایش ضربه. ب) نحوه بستن نمونه به دستگاه و برخورد چکش ۶۷
- شکل ۴-۱۸: قالب سیلیکونی ساخت نمونه‌های آزمایش ضربه ۶۷
- شکل ۴-۱۹: نمونه‌های آماده شده برای آزمایش ضربه با هشت مرتبه تکرار ۶۸
- شکل ۴-۲۰: قالب آلومینیومی برای ساخت نمونه‌های جدار نازک قوطی شکل ۶۹
- شکل ۴-۲۱: قالب فولادی برای ساخت نمونه‌های جدار نازک قوطی شکل ۶۹
- شکل ۴-۲۲: نمونه نانوکامپوزیتی قوطی شکل با دو ارتفاع mm ۶۰ و ۹۰ ۷۰
- شکل ۴-۲۳: نمونه‌های کامپوزیتی مخروطی شکل ۷۱
- شکل ۴-۲۴: آزمایش جذب انرژی توسط دستگاه سروهیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ ۷۱
- شکل ۵-۱: چگونگی تشکیل پیوندهای شیمیایی عرضی بین زنجیره‌های پلیمری ۷۶
- شکل ۵-۲: نمودار تغییرات تنش-کرنش کامپوزیت‌های سری S در مقایسه با اپوکسی خالص ۷۸
- شکل ۵-۳: سطح شکست اپوکسی خالص پس از آزمایش کشش ۷۹
- شکل ۵-۴: نمودار تغییرات مدول ینگ برای تمام کامپوزیت‌های مورد بررسی ۷۹
- شکل ۵-۵: مقایسه مدول ینگ در کامپوزیت‌های تک ذره‌ای و دو ذره‌ای تقویت شده با ۴/۵ درصد وزنی از ترکیبات مختلف سیلیکا. ۸۱
- شکل ۵-۶: مقایسه مدول ینگ ترکیبات مختلف با مدل‌های هالپین-تسای و کرنر در محتوای متفاوت از نانوذرات سیلیکا ۸۴
- شکل ۵-۷: نمودار بار-جابجایی حاصل از آزمایش چقرمگی شکست کامپوزیت L ۶٪ ۸۶
- شکل ۵-۸: توپوگرافی سطح شکست اپوکسی خالص. اختلاف سطح بین بالاترین و پایین‌ترین نقطه در مسیر انتخابی نشان داده شده، $21/81 \mu m$ ۸۹
- شکل ۵-۹: توپوگرافی سطح شکست کامپوزیت S ۳٪. اختلاف سطح بین بالاترین و پایین‌ترین نقطه در مسیر انتخابی نشان داده شده، $92/53 \mu m$ ۸۹
- شکل ۵-۱۰: توپوگرافی سطح شکست کامپوزیت L ۳٪. اختلاف سطح بین بالاترین و پایین‌ترین نقطه در مسیر انتخابی نشان داده شده، $119/71 \mu m$ ۹۰

- شکل ۵- ۱۱: توپوگرافی سطح شکست کامپوزیت S ۳٪ - L ۱/۵٪. اختلاف سطح بین بالاترین و پایین‌ترین نقطه در مسیر انتخابی نشان داده شده، $132/27 \mu m$ ۹۰
- شکل ۵- ۱۲: تغییرات چقرمگی شکست بر حسب محتوای ذرات در اندازه ذرات و ترکیبات مختلف ۹۲
- شکل ۵- ۱۳: تغییرات انرژی شکست بر حسب محتوای ذرات در اندازه ذرات و ترکیبات مختلف ۹۲
- شکل ۵- ۱۴: چقرمگی شکست ترکیبات مختلف کامپوزیت‌ها در محتوای ذرات متفاوت ۹۳
- شکل ۵- ۱۵: انرژی شکست ترکیبات مختلف کامپوزیت‌ها در محتوا و ترکیبات متفاوت ذرات ۹۳
- شکل ۵- ۱۶: تصویر SEM گرفته شده از سطح شکست کامپوزیت S ۶٪ پس از آزمایش چقرمگی شکست. ۹۴
- شکل ۵- ۱۷: تصویر SEM گرفته شده از سطح شکست کامپوزیت M ۴/۵٪ - L ۱/۵٪ پس از آزمایش چقرمگی شکست. ۹۴
- شکل ۵- ۱۸: سطح شکست نمونه کامپوزیتی S ۴/۵٪ - L ۱/۵٪ پس از آزمایش چقرمگی شکست... ۹۵
- شکل ۵- ۱۹: تغییرات مقاومت ضربه با محتوای ذرات در اندازه ذرات و ترکیبات مختلف ۹۷
- شکل ۵- ۲۰: مقاومت ضربه ترکیبات مختلف کامپوزیت‌ها در محتوا و ترکیبات متفاوت ذرات ۹۸
- شکل ۵- ۲۱: مکانیزم بستن و خم شدن نوک ترک [۱۱۷]. ۹۹
- شکل ۵- ۲۲: نمودار بار-جابجایی سازه‌های قوطی شکل کامپوزیتی تقویت شده با نانوذرات سیلیس در سری S ۱۰۳
- شکل ۵- ۲۳: شکست ترد نمونه و ایجاد لبه‌های تیز بر اثر گسترش ترک‌های محوری و جدا شدن تکه‌های بزرگ. ۱۰۵
- شکل ۵- ۲۴: مقایسه نمودار بار-جابجایی قوطی‌های ۹۰ میلی‌متری ساخته شده از کامپوزیت‌های تقویت شده با ۳ درصد وزنی نانوسیلیکا با اندازه و ترکیب مختلف. ۱۰۶
- شکل ۵- ۲۵: شکست ترد نمونه بر اثر ترک‌های محوری ۱۰۸
- شکل ۵- ۲۶: جدا شدن تکه‌های بزرگ در راستای ارتفاع بر اثر رشد ترک‌های محوری. ۱۱۰
- شکل ۵- ۲۷: مکانیزم‌های شکسته شدن پیوند و حفره زایی پلاستیک در سطح شکست کامپوزیت M ۳٪ - L ۱/۵٪ ۱۱۱
- شکل ۵- ۲۸: الف) مقایسه روش‌های RSM linear, RSM quadratic و ANN برای مدول یانگ، ب) خطای هر مدل بر حسب درصد ۱۱۷
- شکل ۵- ۲۹: اعتبارسنجی مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل منتخب در مقایسه با مقادیر تجربی برای مدول یانگ توسط پارامتر R^2 ۱۱۹
- شکل ۵- ۳۰: نمودار سه بعدی تغییرات مدول یانگ بر حسب درصد وزنی نانوذرات سری S و L بر اساس مدل منتخب ۱۲۱
- شکل ۵- ۳۱: نمودار سه بعدی تغییرات مدول یانگ بر حسب درصد وزنی نانوذرات سری M و L بر اساس مدل منتخب ۱۲۱

- شکل ۵-۳۲: الف) مقایسه روش‌های RSM linear، RSM quadratic و ANN برای K_{IC} .
 (ب) خطای هر مدل بر حسب درصد ۱۲۴
- شکل ۵-۳۳: اعتبارسنجی مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل منتخب در مقایسه با مقادیر تجربی
 برای چقرمگی شکست توسط پارامتر R^2 ۱۲۶
- شکل ۵-۳۴: نمودار سه بعدی تغییرات چقرمگی شکست بر حسب درصد وزنی نانوذرات سری S و L
 بر اساس مدل منتخب. ۱۲۷
- شکل ۵-۳۵: نمودار سه بعدی تغییرات چقرمگی شکست بر حسب درصد وزنی نانوذرات سری S و L
 بر اساس مدل منتخب. ۱۲۷
- شکل ۵-۳۶: الف) مقایسه روش‌های RSM linear، RSM quadratic و ANN برای G_{IC} .
 (ب) خطای هر مدل بر حسب درصد ۱۲۹
- شکل ۵-۳۷: اعتبارسنجی مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل منتخب در مقایسه با مقادیر تجربی
 برای انرژی شکست توسط پارامتر R^2 ۱۳۰
- شکل ۵-۳۸: نمودار سه بعدی تغییرات انرژی شکست بر حسب درصد وزنی نانوذرات سری S و L
 بر اساس مدل منتخب. ۱۳۱
- شکل ۵-۳۹: نمودار سه بعدی تغییرات انرژی شکست بر حسب درصد وزنی نانوذرات سری S و L
 بر اساس مدل منتخب. ۱۳۱
- شکل ۵-۴۰: مقایسه روش‌های RSM linear، RSM quadratic و ANN برای بیشینه بار نمونه‌های
 قوطی شکل با ارتفاع ۹۰ میلی‌متر، (ب) خطای هر مدل بر حسب درصد ۱۳۴
- شکل ۵-۴۱: اعتبارسنجی مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل منتخب در مقایسه با مقادیر تجربی
 برای بیشینه بار قوطی‌های ۹۰ mm توسط پارامتر R^2 ۱۳۶
- شکل ۵-۴۲: نمودار سه بعدی تغییرات بیشینه بار بر حسب درصد وزنی نانوذرات سری S و L
 بر اساس مدل منتخب. ۱۳۷
- شکل ۵-۴۳: نمودار سه بعدی تغییرات بیشینه بار بر حسب درصد وزنی نانوذرات سری M و L بر
 اساس مدل منتخب. ۱۳۷
- شکل ۵-۴۴: الف) مقایسه روش‌های RSM linear، RSM quadratic و ANN برای بیشینه بار
 نمونه‌های قوطی شکل با ارتفاع ۶۰ میلی‌متر، (ب) خطای هر مدل بر حسب درصد ۱۳۹
- شکل ۵-۴۵: اعتبارسنجی مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل منتخب در مقایسه با مقادیر تجربی
 برای بیشینه بار جاذب‌های قوطی شکل ۶۰ mm توسط پارامتر R^2 ۱۴۱
- شکل ۵-۴۶: نمودار سه بعدی تغییرات بیشینه بار جاذب‌های قوطی شکل ۶۰ mm بر حسب درصد
 وزنی نانوذرات سری S و L بر اساس مدل منتخب. ۱۴۲
- شکل ۵-۴۷: نمودار سه بعدی تغییرات بیشینه بار جاذب‌های قوطی شکل ۶۰ mm بر حسب درصد
 وزنی نانوذرات سری M و L بر اساس مدل منتخب. ۱۴۲

- شکل ۵- ۴۸: الف) مقایسه روش‌های RSM linear, RSM quadratic و ANN برای پیشینه بار نمونه‌های مخروطی، ب) خطای هر مدل بر حسب درصد ۱۴۴
- شکل ۵- ۴۹: اعتبارسنجی مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل منتخب در مقایسه با مقادیر تجربی برای پیشینه بار جاذب‌های مخروطی توسط پارامتر R^2 ۱۴۶
- شکل ۵- ۵۰: نمودار سه بعدی تغییرات پیشینه بار جاذب‌های مخروطی بر حسب درصد وزنی نانو ذرات سری S و L بر اساس مدل منتخب ۱۴۷
- شکل ۵- ۵۱: نمودار سه بعدی تغییرات پیشینه بار جاذب‌های مخروطی بر حسب درصد وزنی نانو ذرات سری S و L بر اساس مدل منتخب ۱۴۷
- شکل ۵- ۵۲: الف) مقایسه روش‌های RSM linear, RSM quadratic و ANN برای مقاومت ضربه، ب) خطای هر مدل بر حسب درصد ۱۵۰
- شکل ۵- ۵۳: اعتبارسنجی مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل منتخب در مقایسه با مقادیر تجربی برای مقاومت ضربه توسط پارامتر R^2 ۱۵۲
- شکل ۵- ۵۴: نمودار سه بعدی تغییرات مقاومت ضربه بر حسب درصد وزنی نانوذرات سری S و L بر اساس مدل منتخب ۱۵۳
- شکل ۵- ۵۵: نمودار سه بعدی تغییرات مقاومت ضربه بر حسب درصد وزنی نانوذرات سری M و L بر اساس مدل منتخب ۱۵۳

فهرست جداول

جدول ۱-۲: تغییرات چقرمگی شکست با اندازه ذرات کروی شیشه [۵۲].....	۱۵
جدول ۲-۲: کسر حجمی میکروذرات و نانوذرات سیلیس در کامپوزیت‌های مختلف [۵۱].....	۲۰
جدول ۳-۲: ترکیبات کامپوزیت‌های ساخته شده [۹۱].....	۲۹
جدول ۴-۲: مشخصات فروپاشی نمونه‌ها تحت بارگذاری شبه استاتیکی [۹۱].....	۳۲
جدول ۵-۲: مشخصات فروپاشی نمونه‌ها تحت بارگذاری دینامیکی [۹۱].....	۳۲
جدول ۱-۵: مدول یانگ و استحکام شکست بدست آمده از آزمایش کشش.....	۷۵
جدول ۲-۵: چقرمگی شکست و انرژی شکست کامپوزیت‌های تقویت شده با درصد حجمی مختلف از نانوذرات سیلیکا.....	۸۷
جدول ۳-۵: مقاومت ضربه کامپوزیت‌های تقویت شده با درصد حجمی مختلف از نانوذرات سیلیکا.....	۹۶
جدول ۴-۵: مشخصات جذب انرژی نمونه‌های قوطی شکل با ارتفاع ۹۰ mm.....	۱۰۱
جدول ۵-۵: مشخصات جذب انرژی نمونه‌های قوطی شکل با ارتفاع ۶۰ mm.....	۱۰۲
جدول ۶-۵: مشخصات جذب انرژی نمونه‌های مخروطی شکل.....	۱۰۹
جدول ۷-۵: پارامترهای آماری مدل‌های RSM و ANN برای مدول یانگ.....	۱۱۵
جدول ۸-۵: مقایسه بین مدول یانگ بدست آمده از آزمایش کشش و مدل منتخب.....	۱۱۸
جدول ۹-۵: پارامترهای آماری مدل‌های RSM و ANN برای چقرمگی شکست.....	۱۲۳
جدول ۱۰-۵: پارامترهای آماری مدل‌های RSM و ANN برای انرژی شکست.....	۱۲۳
جدول ۱۱-۵: مقایسه بین مقادیر تجربی چقرمگی شکست و انرژی شکست کامپوزیت‌های مختلف با "مدل منتخب".....	۱۲۵
جدول ۱۲-۵: پارامترهای آماری مدل‌های RSM و ANN برای بیشینه بار در جاذب‌های قوطی شکل ۹۰ mm.....	۱۳۳
جدول ۱۳-۵: پارامتر بیشینه بار برای نمونه‌های قوطی شکل با ارتفاع ۹۰ mm.....	۱۳۵
جدول ۱۴-۵: پارامترهای آماری مدل‌های RSM و ANN برای بیشینه بار در جاذب‌های قوطی شکل ۶۰ mm.....	۱۳۸
جدول ۱۵-۵: مشخصات جذب انرژی نمونه‌های قوطی شکل با ارتفاع ۶۰ mm.....	۱۴۰
جدول ۱۶-۵: پارامترهای آماری مدل‌های RSM و ANN برای بیشینه بار در جاذب‌های جدار نازک مخروطی.....	۱۴۳
جدول ۱۷-۵: مشخصات جذب انرژی جاذب‌های مخروطی شکل.....	۱۴۵
جدول ۱۸-۵: پارامترهای آماری مدل‌های RSM و ANN برای مقاومت ضربه.....	۱۴۹
جدول ۱۹-۵: مقاومت ضربه کامپوزیت‌های تقویت شده با درصد حجمی مختلف از نانوذرات سیلیکا.....	۱۵۱

جدول ۵- ۲۰: درصد وزنی‌های بهینه حاصل از دو روش سطح پاسخ و الگوریتم ژنتیک برای	
پارامترهای مختلف.....	۱۵۵
جدول ۵- ۲۱: جدول پارامترهای آماری برای مدل سطح پاسخ مرتبه دو با ۱۲ داده آموزش و ۷	
داده آزمایش.....	۱۵۷

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه

پلیمرهای پایه اپوکسی به خاطر انعطاف‌پذیری و خواص مناسب، بطور گسترده در بسیاری از صنایع نظیر صنایع خودروسازی، صنایع هوایی، صنایع دریایی و غیره کاربرد دارند. اما برخی از خواص آنها نظیر شکنندگی، استحکام پایین و مقاومت کم در برابر رشد ترک، صنایع را به سمت تقویت این مواد به کمک پرکننده‌های آلی و غیر آلی سوق داده است.

محققین و دانشمندان علم مواد و فیزیک بر این باورند که بسیاری از خواص فیزیکی مواد، ارتباط تنگاتنگی با ریز ساختار ماده و علی‌الخصوص اندازه ذرات دارند. در ارتباط با نانومواد، تاکنون گزارش‌های متعددی از اثر تغییر اندازه ذرات بر خواص فیزیکی و مکانیکی ارائه شده است [۴-۱].

طبق تعریف، نانوذرات، ذراتی هستند که ابعاد آن در محدوده‌ی صفر تا ۱۰۰ نانومتر باشد. خواص این ذرات اغلب به اندازه‌ی آنها وابسته است. بعلاوه، با کاهش اندازه‌ی ذرات، نسبت سطح به حجم افزایش پیدا می‌کند. بنابراین هرچه ذرات کوچکتر باشند، خواص سطحی از اهمیت بیشتری برخوردار خواهند بود که بر خواص بین سطوح^۱، برهمکنش ذره با محیط پیرامون خود، نحوه کلوخه شدن^۲ و خواص فیزیکی ذرات تأثیر خواهند گذاشت [۵]. از جمله پارامترهای اساسی مؤثر بر خواص نانوکامپوزیت‌ها، توزیع، اندازه و کسر حجمی نانوذرات، خواص زمینه، اثرات موجود در فصل مشترک تقویت کننده و زمینه و پروسه ساخت است [۵-۳]. به دلیل خواص ناهمسانگرد و مورفولوژی نانوذرات، پیش‌بینی خواص نانوکامپوزیت‌ها آسان نیست؛ از این‌رو دیدگاه‌های مختلفی شامل دینامیک مولکولی^۳، مکانیک پیوسته^۴، تئوری پوسته الاستیک^۵ و تحلیل اجزای محدود توسعه یافته است. هرچند به خاطر محدودیت‌های تحلیل، روش‌های مدلسازی فوق‌الذکر هر کدام نقایصی دارند [۶].

¹ Interfacial properties

² Agglomeration behavior

³ Molecular dynamics

⁴ Continuum mechanics

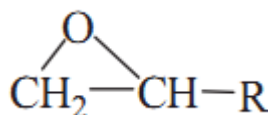
⁵ Elastic shell theory

۱-۲ پلیمرها

همانطور که گفته شد، پلیمرها به خاطر خواص یکتایی نظیر شکل پذیری خوب، چگالی کم و غالباً طبیعت انعطاف پذیری که دارند، نقش مهمی را در زندگی روزمره ایفا می کنند. بطور عمده می توان آنها را به دو دسته ی رزین های گرماسخت (ترموست) و گرمانرم (ترموپلاست) تقسیم بندی کرد. ترموست ها موادی هستند که در اثر واکنش شیمیایی با جزء دیگر و یا در اثر حرارت سخت شده، به شکل دائمی در می آیند و نمی توان آنها را مجدداً شکل دهی کرد؛ ولی ترموپلاست ها موادی هستند که با حرارت دادن می توان آنها را نرم و قالب گیری کرد و سپس با سرد کردن به قطعه مورد نظر دست یافت و البته این عملیات تکرار پذیر است [۸ و ۷].

۱-۳ اپوکسی

اپوکسی از جمله مواد گرماسخت است که خود از دو ماده شیمیایی مختلف با نام های رزین و سخت کننده^۱ (فعال ساز) تشکیل شده است. رزین از مونومرها (موادی که از مولکول های واحد تشکیل شده) یا پلیمرهایی (چند مونومر به هم پیوسته) با زنجیر کوتاه که در انتهایشان یک گروه اپوکساید قرار دارد تشکیل می شود. اپوکساید یک گروه عاملی در شیمی آلی می باشد که از یک گروه اتری در یک حلقه شامل دو اتم کربن و یک اتم اکسیژن تشکیل شده است. این ساختار تشکیل یک مثلث متساوی الاضلاع را می دهد. شکل ۱-۱، ساختار شیمیایی اپوکساید را نشان می دهد. ساختار شیمیایی اپوکسی ها این اجازه را می دهد که پلیمرهای گوناگونی با خواص بسیار متفاوت تولید شود [۹]. خواص رزین اپوکسی پخته شده، به نوع ترکیب رزین و سخت کننده بستگی دارد [۱۰-۱۳].



شکل ۱-۱: ساختار شیمیایی اپوکساید [۹].

¹ Hardner

۱-۳-۱ کاربردهای اپوکسی

به طور کلی اپوکسی‌ها را به خاطر خواص چسبندگی عالی به بسیاری از بسترها، مقاومت شیمیایی و گرمایی خوب، خواص مکانیکی خوب و مقاومت الکتریکی بسیار خوب آنها نسبت به اکثر رزین‌های دیگر می‌شناسند و لذا از آنها در طیف گسترده‌ای از زمینه‌ها نظیر ساخت رنگ‌ها و پوشش‌ها، چسب‌ها، قالب‌های صنعتی و کامپوزیت‌ها، سامانه‌های الکتریکی و الکترونیکی، مصارف خانگی، صنایع هوافضا، کفپوش‌های صنعتی، بیمارستانی و بهداشتی استفاده می‌کنند [۱۹-۱۴]. در ادامه به شرح برخی از آنها پرداخته شده است.

۱-۳-۱-۱ پوشش‌ها

به منظور جلوگیری از زنگ زدگی، ظروف و قوطی‌های فلزی، به خصوص برای بسته بندی مواد غذایی اسیدی نظیر گوجه فرنگی، اغلب با رزین‌های اپوکسی پوشش داده می‌شوند. همچنین رزین‌های اپوکسی در کفپوش‌های زینتی مانند موزاییک‌ها و کفپوش‌های متراکم رنگی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۰ و ۲۱].

۱-۳-۱-۲ چسب‌ها

چسب‌های اپوکسی کلاسی از چسب‌ها هستند که "چسب‌های ساختاری" نامیده می‌شوند. این چسب‌های با عملکرد بالا در ساخت هواپیماها، اتومبیل‌ها، دوچرخه‌ها، قایق‌ها، چوب دستی اسکی و سایر کاربردهایی دیگر که در آن پیوندهایی با مقاومت بالا مورد نیاز است، استفاده می‌شود. اپوکسی هنگامی که به عنوان چسب در کاربردهای برودتی استفاده می‌شود، بهینه‌سازی مقاومت برشی آن در هر دو دمای برودتی و دمای اتاق ضروری است. برای رسیدن به چقرمگی بهینه در چسب‌های اپوکسی تجاری، آنها را با یک فاز جدا نظیر ترموپلاستیک‌ها، ذرات لاستیک و یا ذرات معدنی صلب در ماده زمینه، ترکیب می‌کنند. به طور معمول، چسب‌ها در دمای بالا برای افزایش استحکام و فعالسازی پیوندهای شیمیایی-شان در فصل مشترک بستر و چسب، پخته می‌شوند. [۲۲-۲۵].

۳-۱-۳-۱ قالب‌های صنعتی

سیستم‌های اپوکسی در تولید بسیاری از قالب‌های صنعتی، مدل‌های اصلی، ورقه‌ها و ریخته‌گری‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. قالب‌های پلاستیکی جایگزین قالب‌های فلزی، چوبی و دیگر مواد سنتی شده و با کاهش هزینه‌های کلی و کوتاه شدن زمان قالب‌گیری برای استفاده‌های صنعتی، بهره‌وری تولید را بالا می‌برد [۲۶-۲۹].

۳-۱-۳-۲ صنایع هوافضا

رزین‌های اپوکسی، به خاطر خواص چسبندگی بالا و هزینه کم به طور گسترده‌ای در صنعت هوافضا استفاده می‌شوند. رزین‌های اپوکسی تقویت شده با شیشه‌های با استحکام بالا، کربن، کولار و یا الیاف بور، بیشترین کاربرد را در صنعت هوا و فضا دارند [۳۰ و ۳۱].

۳-۱-۳-۳ صنایع الکترونیک

فرمولاسیون مختلف رزین‌های اپوکسی در صنایع الکترونیک گوناگون نظیر موتورها، ژنراتورها، ترانسفورماتورها، تابلوها و عایق‌ها استفاده می‌شوند. رزین‌های اپوکسی پخته شده، عایق‌های الکتریکی بسیار عالی هستند و اجزای الکتریکی را از اتصال کوتاه، گرد و غبار و رطوبت محافظت می‌کنند. پلیمرهای تقویت شده با ذرات فلزی، به طور گسترده برای محافظت از تداخل الکترومغناطیسی استفاده می‌شوند. کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با پرکننده‌های کروی نظیر پودر شیشه و ذرات سیلیکا، کاربرد فراوانی در صنایع الکترونیک به عنوان ماده بستر دارند. [۳۲ و ۳۳].

همانطور که ملاحظه می‌شود، در برخی از موارد کاربرد اپوکسی‌ها نظیر ساخت قالب‌ها و صنایع هوافضا و صنایع خانگی و خودروسازی، نیاز مبرم به بالا بردن خصوصیات چقرمگی، چقرمگی شکست و مقاومت به ضربه است. از این‌رو، به سراغ پرکننده‌ها و ترکیباتی از پرکننده‌ها می‌رویم که در بحث کامپوزیت‌های پایه اپوکسی، خصوصیات مورد نظر را بهبود بخشد.

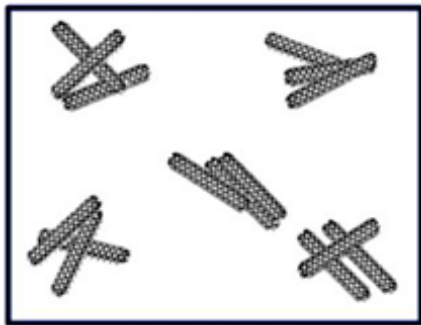
۴-۱ کامپوزیت‌ها

کامپوزیت ماده‌ای است که از دو یا چند ماده سازنده با خواص فیزیکی یا شیمیایی قابل توجه و مختلف تشکیل شده بطوریکه که پس از ترکیب، ماده حاصل دارای ویژگی‌هایی متفاوت از مواد اولیه است. همچنین اجزای تشکیل دهنده در ماده نهایی به صورت مجزا و متمایز از یکدیگر قابل تشخیص هستند [۳۴]. در واقع، هدف از ایجاد کامپوزیت، به دست آوردن ماده‌ای ترکیبی با خواص مورد انتظار می باشد. نانوکامپوزیت‌ها، کامپوزیت‌هایی هستند که حداقل یک بعد از یکی از اجزاء آنها، اندازه‌ای کمتر از ۱۰۰ nm دارد [۳۴]. نانوکامپوزیت‌ها نیز مانند کامپوزیت‌ها از دو یا چند فاز تشکیل شده‌اند. فاز اول در واقع فاز پایه یا مادی زمینه‌ی نانوکامپوزیت محسوب می شود و ممکن است از جنس سرامیک، پلیمر و یا فلز باشد؛ فاز دوم نیز ذراتی در مقیاس نانومتر می باشند که به عنوان تقویت کننده، به منظور اهداف خاص از قبیل استحکام، مقاومت، هدایت الکتریکی، خواص مغناطیسی و غیره در درون فاز اول (ماده زمینه) توزیع می شوند [۳۵].

حضور ذرات و الیاف در ساختار نانوکامپوزیت‌ها معمولاً باعث افزایش استحکام در ماده‌ی پایه می‌شود. در واقع هرچه ذرات و یا الیاف درون ماده‌ی زمینه بهتر توزیع^۱ شده و پراکنده^۲ گردند، نیروهای اعمال شده به کامپوزیت به طور یکنواخت‌تری به تقویت کننده‌ها منتقل می‌شود و در نتیجه با این توزیع مناسب مواد پرکننده درون ماده‌ی پایه، خصوصیات نظیر استحکام، سفتی، چقرمگی و انرژی شکست، هدایت الکتریکی، تخلخل و ... بهبود می‌یابد. الصالح [۳۶]، در تحقیقی که روی هدایت الکتریکی نانوکامپوزیت داشت، نشان داد که برای بدست آوردن بهترین شبکه‌ی هادی، لازم است که به یک توزیع و پخش مناسب از نانوذرات رسید و از کلوخه شدن آنها در داخل کامپوزیت ممانعت به عمل آورد. وی توزیع و پخش مناسب نانوذرات را به صورت شماتیک شکل ۱-۲ در نظر گرفت.

^۱ Distribution

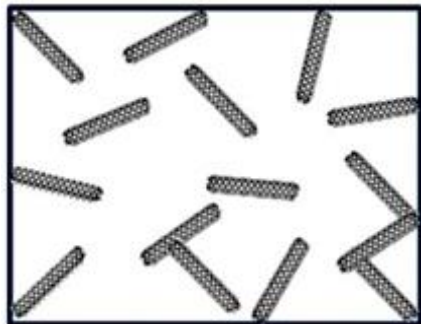
^۲ Dispersion



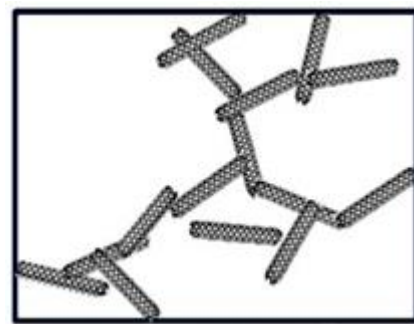
(ب) توزیع خوب و پراکندگی بد



(الف) توزیع بد و پراکندگی بد



(د) توزیع خوب و پراکندگی خوب



(ج) توزیع بد و پراکندگی خوب

شکل ۱-۲: شیوه های مختلف توزیع و پراکندگی نانو ذرات درون کامپوزیت [۳۶].

در بین نانوکامپوزیت‌ها توجه ویژه‌ای به نانوکامپوزیت‌های پایه پلیمری معطوف است و علت آن، خواص بی‌نظیر مکانیکی، شیمیایی و فیزیکی است. نانوکامپوزیت‌های پلیمری عموماً دارای استحکام بالا، وزن کم، پایداری حرارتی بالا، رسانایی الکتریکی و مقاومت شیمیایی بالایی هستند که تقویت آن‌ها با استفاده از مواد آلی و معدنی بسیار مرسوم می‌باشد. [۳۷-۳۹].

۵-۱ خواص نانوذرات

با کوچکتر شدن اندازه‌ی ذرات و گذر از محدوده‌ی میکرون به محدوده‌ی نانو، برخی از خواص فیزیکی تغییر می‌کند. دلیل این رفتار به خاطر افزایش سطح ویژه‌ی ذرات، یعنی مساحت به ازاء واحد جرم آن‌ها، و نیز افزایش نسبت اتم‌های موجود در سطح به کل اتم‌های موجود در ماده است. افزایش نسبت مساحت سطح به حجم که به تدریج با کاهش اندازه ذره رخ می‌دهد، باعث غلبه یافتن رفتار اتم‌های واقع در سطح ذره به رفتار اتم‌های درونی می‌شود. افزایش سطح، برهمکنش و واکنش پذیری نانوذرات را به شدت افزایش می‌دهد.

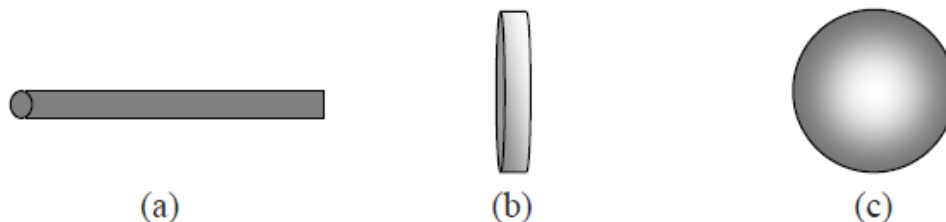
برای رسیدن به خصوصیت شیمیایی مورد نظر باید شکل و اندازه‌ی نانو ذره به خوبی کنترل شود. از این رو بررسی بر روی سنتز و اصلاح نانوذرات، مورد مطالعه محققین زیادی قرار گرفته است. از آنجایی که نانو ذرات استفاده‌های متعددی در امور پژوهشی دارند، خواص سطحی آنان تعیین کننده میزان سازگاری با محیط مورد نظر می‌باشد. لذا بایستی سطح نانو ذرات به گونه‌ای اصلاح شوند تا با محیط واکنش سازگاری داشته باشند. لذا انجام اصلاح سطح نانو ذرات برای ساخت برخی از نانوکامپوزیت‌ها اجتناب ناپذیر است. اصلاح سطح نانوذرات تاثیر زیادی در کارایی و کاربرد آنها دارد.

اصلاح سطح در واقع عملی است که برای ایجاد مشخصه‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک مختلف بر روی سطح مواد انجام می شود [۴۰-۴۲]. اصلاح سطح می‌تواند از کلوخه شدن نانوذرات جلوگیری کرده و آنها را با سایر فازها سازگار نماید. روش‌های مختلفی برای انجام فرایند اصلاح سطح وجود دارد، از جمله روش مکانیکی، عملیات حرارتی، واکنش شیمیایی و غیره [۴۳].

۱-۶ حالت پراکندگی

برای برخی از خواص، یک توزیع کاملاً همگن مورد نیاز است؛ در حالی که در موارد دیگر، مانند سیستم‌هایی که برای خاصیت رسانایی الکتریکی، با نانولوله های کربنی پر شده است، فقط یک شبکه نفوذ نیاز است، که می‌توان از طریق کنترل کلوخه شدن ذرات به آن دست یافت [۴۴].

هندسه‌ی پراکنده یک عامل کلیدی موثر در نحوه‌ی توزیع نانوذرات است [۴۵]. شکل ۱-۳، بصورت شماتیک، نانوذره یک، دو و سه بعدی را به صورت ایده آل نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳: شماتیک نانو ذره: (a) یک بعدی، (b) دو بعدی، (c) سه بعدی [۴۵].

عموماً پرکننده‌های کروی به نسبت پرکننده‌های دیگر، توزیع‌شان آسان‌تر است. این تفاوت ناشی از این واقعیت است که ذرات کروی و شبه کروی سه بعدی تنها تماس نقطه به نقطه با یکدیگر دارند، در حالیکه میله‌ها یا لوله‌های یک بعدی و یا ذرات دو بعدی می‌توانند در تمام طول سطحشان با ذرات دیگر در تماس باشند، که این امر اثر متقابل ذرات را افزایش می‌دهد. بنابراین، یکی از دلایل گرایش این تحقیق به نانوذره کروی سیلیکا، رسیدن به شرایط بهینه‌ی توزیع است [۴۷ و ۴۶].

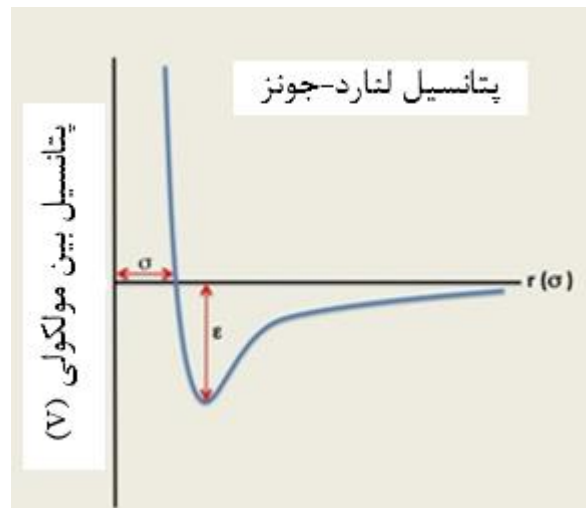
۱-۷ برهمکنش پلیمر و پرکننده

در یک نانوکامپوزیت، بخش قابل توجهی از زمینه پلیمری، به خاطر برهمکنش پلیمر و پرکننده، تحت تاثیر پرکننده قرار می‌گیرد. طبیعت برهمکنش بین پلیمر و سطح پرکننده را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد. بخش نخست، تعاملات موجود در سطوح مشترک پلیمر و ذرات است که عمدتاً نیروهای ضعیف و اندروالس بوده که اصطلاحاً گفته می‌شود پلیمر دارای جذب سطحی فیزیکی^۱ در فصل مشترک است که این نیروهای واندروالس اغلب با استفاده از رابطه‌ی لندارد-جونز مدل می‌شوند [۴۸]. نیروهای واندروالس، یک نیروی غیرخطی شامل دو ناحیه‌ی متمایز از جاذبه و دافعه است [۴۸]. (شکل ۱-۴). تعامل واندروالس، عملاً یک پیوند شیمیایی نیست، بلکه یک نیروی بین مولکولی است که با تغییر فاصله‌ی بین اتم‌ها تغییر می‌کند. محققین زیادی به روی مدلسازی فاز میانی بین زمینه و نانوذرات تحقیق کرده‌اند که وظیفه‌ی انتقال بار از زمینه به نانوذرات را به عهده دارد [۴۹].

بخش دوم، برهمکنش‌های قوی و خاص در فصل مشترک زمینه و نانوذرات است که اصطلاحاً گفته می‌شود پلیمر دارای جذب سطحی شیمیایی^۲ در فصل مشترک است [۵۰]. این حالت زمانی اتفاق می‌افتد که یا به صورت طبیعی تمایل به تشکیل پیوند شیمیایی بین زمینه و پرکننده وجود داشته باشد و یا به کمک عامل دار کردن ماده زمینه، شرایط ایجاد پیوند شیمیایی بین این دو فاز فراهم شود.

¹ Physisorption

² Chemisorption



شکل ۱-۴: نمودار تغییرات نیروهای واندرولس بر حسب فاصله ی بین ذرات [۴۸].

۸-۱ سیلیکا

سیلیکون دی اکساید که از آن تحت عنوان سیلیکا یاد می شود، یک ترکیب شیمیایی از اکسید سیلیکن با فرمول شیمیایی SiO_2 است. این ماده از قدیم بخاطر سفتی اش مورد توجه بوده است و در طبیعت بیشتر بصورت ماسه و کوارتز موجود است. سیلیکا برای تولید شیشه ی پنجره ها، شیشه ی نوشیدنی ها، فیبرهای نوری در صنعت ارتباطات و همچنین به عنوان ماده اولیه در تولید بسیاری از مواد نظیر سفال ها، سنگ نماها، ظروف چینی و حتی سیمان پرتلند بکار می رود. نانو سیلیس در سازه های بتنی و ترکیبات سیمانی، مقاومت محیطی بتن نهایی حاصل را افزایش می دهد. استفاده از این ماده باعث بهبود خواص سایشی، استحکام ترکیب و کاهش نفوذپذیری می شود. همچنین نانو سیلیس می تواند در صنعت لاستیک به عنوان پرکننده استفاده شده و استحکام و طول عمر لاستیک را افزایش دهد. این جایگزینی علاوه بر حذف مشکلات زیست محیطی دوده، میزان صدای ناشی از حرکت را کاهش می دهد. در صنایع رنگ نیز به عنوان مات کننده، افزایش دهنده غلظت و افزایش دهنده مقاومت محیطی و خواص سایشی استفاده می شود.

۹-۱ هدف از انجام این رساله

در کاربردهای صنعتی و مهندسی، بعضاً برای تقویت ماده زمینه، از دو یا چند پرکننده مختلف استفاده می‌شود و اثر هم‌افزایی^۱ استفاده ترکیبی از آن‌ها بر روی پارامترهای مختلف بررسی می‌شود. با توجه به مطالعه انجام شده در ادبیات موضوع، بررسی اثر افزودن یک پرکننده در اندازه‌های متفاوت کمتر انجام شده است. به عنوان مثال، دیتانت و پی‌یرسون [۵۱] اثر استفاده از سیلیس در دو مقیاس نانو و میکرون را بر مکانیزم سفت‌شوندگی بررسی کردند، که در بخش مروری بر ادبیات موضوع به آن پرداخته خواهد شد. تاکنون در حوزه کامپوزیت‌های پلیمری، مطالعه‌ای در خصوص تقویت پلیمر با استفاده از ترکیبی از اندازه ذرات مختلف در مقیاس نانو گزارش نشده است. لذا در این رساله اثر سه اندازه ذره مختلف با اندازه متوسط ۱۷ nm، ۲۵ nm و ۶۵ nm بر مدول یانگ کششی، استحکام شکست، چقرمگی شکست، انرژی شکست، مقاومت به ضربه، قابلیت جذب انرژی دو سری نمونه از جاذب‌های قوطی شکل و مخروطی شکل مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین علاوه بر بررسی اثر اندازه ذرات بر پارامترهای مذکور، اثر استفاده ترکیبی نانوذرات نیز تحقیق شده است. بدین معنی که سعی شد فضای بین نانوذرات بزرگتر ۶۵ nm با نانوذرات کوچکتر ۱۷ nm و ۲۵ nm تا حد امکان پر شود. پیش‌بینی می‌شد که با این روش به حد بهینه‌ای در سطح تعاملی ذرات و اپوکسی رسیده که بهترین نحوه انتقال بار از ماده زمینه به ذرات در آنها صورت گیرد و رفتار مکانیکی بهبود یابد. در نهایت برای هر پارامتر، مدلی ارائه شده و در مورد پارامترهایی که افزودن نانوذرات اثر مثبت بر آنها داشته، مقادیر بهینه گزارش شده است.

۱۰-۱ مروری بر رساله

در فصل اول این رساله، با آشنایی مقدماتی با پلیمرها و کامپوزیت‌های پلیمری و نانوذرات سیلیکا، اهداف تحقیق معین گردیده است. در فصل دوم، با مروری بر تحقیقاتی که تا کنون انجام شده، تأثیر برخی پرکننده‌ها (که عمدتاً تمرکز مطالعه بر روی پرکننده سیلیکا است)، بر برخی از خواص فیزیکی و مکانیکی زمینه‌های اپوکسی مختلف بررسی و مقایسه شده است. فصل سوم به توضیح مختصر تئوری

¹ Synergistic effect

برخی روش‌های مدل‌سازی و بهینه‌سازی نظیر روش شبکه عصبی مصنوعی^۱ و روش سطح پاسخ^۲ پرداخته و در ادامه برخی از روش‌های بهینه‌سازی نظیر الگوریتم ژنتیک و سطح پاسخ را، که مورد استفاده در این رساله قرار گرفته، ارائه کرده است. در فصل چهارم، نحوه ساخت نمونه‌ها و قالب‌ها، چگونگی آماده‌سازی کامپوزیت و چگونگی انجام آزمایش‌ها، بر حسب استاندارد مربوطه، جهت به دست آوردن هر یک از خواص مکانیکی کامپوزیت‌های مورد بررسی شرح داده شده است. فصل پنجم در دو بخش به بیان نتایج پرداخته و آنها را مورد بحث و تحلیل قرار داده است. بخش نخست، به گزارش و تحلیل نتایج بدست آمده از آزمایش‌های کشش، چقرمگی شکست، ضربه و فروپاشی جاذب‌های انرژی قوطی شکل و مخروطی شکل پرداخته و در مورد مکانیزم‌های اثربخشی مشاهده شده در نانوذرات سیلیس، نظیر بستن و خم‌شدن نوک ترک، انحراف مسیر ترک، شکسته شدن پیوند و رشد پلاستیک فضای خالی بحث کرده است. در بخش دوم، به کمک سه روش سطح پاسخ خطی، سطح پاسخ مرتبه دو و شبکه عصبی مصنوعی، نتایج بخش نخست را مدل کرده و پاسخ مدل در هر مرحله را با نتایج تجربی مقایسه کرده است. در ادامه این فصل، پاسخ‌های بدست آمده به کمک دو روش الگوریتم ژنتیک^۳ و سطح پاسخ، بهینه‌سازی شده، اندازه ذره و درصد وزنی بهینه نانوذرات، برای هر آزمایشی که امکان بهینه‌سازی آن وجود داشته، گزارش شده است. در فصل ششم، به جمع‌بندی نتایج پرداخته و پیشنهاداتی نیز ارائه شده است.

¹ Artificial Neural Network

² Response Surface Method

³ Genetic Algorithm

فصل ۲

مروری بر تحقیقات انجام شده

۲-۱ مقدمه

برای آشنایی بیشتر با بحث کامپوزیت‌های پلیمری، این فصل مروری خواهد داشت بر کارهای انجام شده توسط محققین که عمدتاً در دهه‌ی اخیر گزارش شده است. طبیعی است که در پژوهش‌های انجام شده برای ساخت کامپوزیت‌ها، از زمینه‌ها و پرکننده‌های متنوعی استفاده شده است و گزارشات ارائه شده در مورد رفتار این کامپوزیت‌ها در مورد فقط برخی از خواص فیزیکی و مکانیکی است. لذا از آنجا که گستره پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش نسبتاً زیاد است، در این مروری بر ادبیات موضوع، سعی شده است به سراغ گزارشاتی رفته که تا حد ممکن فصل مشترکاتی با کلید واژگان این رساله داشته باشند. کلید واژگان این رساله را می‌توان در موارد زیر دسته‌بندی کرد:

کلید واژگان مرتبط با مواد و فرایند ساخت:

ماتریس پایه پلیمری دی گلیسیدیل اتر بیسفنول A (DGEBA)، نانوذرات کروی سیلیس، اندازه ذرات، محتوای ذرات، هم‌افزایی ذرات.

کلید واژگان مرتبط با رفتار مکانیکی:

مدول یانگ، استحکام شکست، چقرمگی شکست، انرژی شکست، مقاومت به ضربه، قابلیت جذب انرژی، جاذب‌های مخروطی شکل، جاذب‌های قوطی شکل.

کلید واژگان مرتبط با مدل‌سازی:

روش شبکه عصبی مصنوعی، روش سطح پاسخ (خطی و مرتبه دو)، مدل منتخب، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک.

سایر کلید واژگان:

مکانیزم‌های اثربخشی، ریخت شناسی سطح شکست، میکروسکوپ الکترونی روبشی. در ادامه، به برخی از گزارشاتی که اخیراً توسط محققین منتشر شده، اشاره‌ای شده است.

۲-۲ مروری بر ادبیات موضوع

همانطور که قبلاً بیان شد، رفتار فیزیکی و مکانیکی یک ماده کامپوزیتی به عوامل مختلفی از جمله خواص فیزیکی هر یک از اجزاء تشکیل دهنده وابسته است. یکی از این خواص فیزیکی، اندازه ذرات پرکننده است. در دهه اخیر، محققین زیادی این پارامتر را بررسی کرده‌اند. کیتی و تیپور [۵۲] اثر اندازه ذرات را در نانوکامپوزیت‌های پایه اپوکسی تقویت شده با ذرات کروی شیشه، بر روی رفتار شکست دینامیکی بررسی کردند. ذرات مورد بررسی آنها اندازه‌ای بین $7\ \mu\text{m}$ تا $203\ \mu\text{m}$ داشته و با محتوای ثابت ۱۰ درصد وزنی مورد استفاده قرار گرفتند. آنها گزارش کردند که اندازه ذرات تأثیری بر مدول یانگ و استحکام تسلیم نداشته اما با افزودن میکرو ذرات، چقرمگی شکست افزایش یافته و بیشترین افزایش، با توجه به جدول ۱-۲، مربوط به قطر ذره $35\ \mu\text{m}$ بوده است. آنها علت این موضوع را به مکانیزم‌های تشکیل پیوند ذرات کروی شیشه، در ریز ساختار مرتبط دانسته‌اند.

جدول ۱-۲: تغییرات چقرمگی شکست با اندازه ذرات کروی شیشه [۵۲]

چقرمگی شکست ($\text{MPa}\sqrt{m}$)	اندازه ذرات (μm)
۱/۵	اپوکسی خالص
۱/۸۷	۷
۱/۹۶	۱۱
۲/۳۱	۳۵
۱/۹۲	۷۱
۱/۶۷	۲۰۳

یان فو و همکاران [۵۳] در یک مقاله مروری اثر اندازه ذرات، محتوای ذرات و تعامل بین ذرات و زمینه را بر خواص مکانیکی مختلف در نانوکامپوزیت‌های متعدد با تقویت کننده‌های متفاوت، بررسی کردند. به عنوان مثال آنها در اشاره‌ای به مقاله ناکامورا و همکاران [۵۴] ادعان کرده‌اند که اندازه ذرات کروی و نامنظم سیلیکا، بین $2\ \mu\text{m}$ تا $30\ \mu\text{m}$ ، تأثیری بر مدول یانگ ندارد.

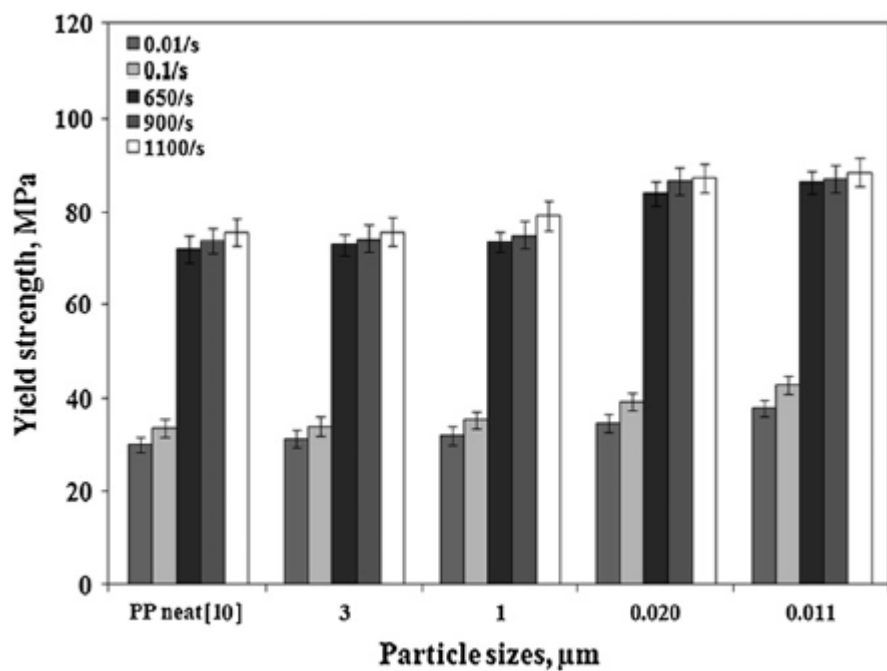
ناجی و همکاران [۵۵] اثر اندازه ذرات ۱۵ nm و ۸۰ nm سیلیس را بر برخی خواص مکانیکی بتن‌های تقویت شده با اندازه ذرات ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد وزنی بررسی کردند. آنها بتن‌ها را به ترتیب پس از یک هفته، یک ماه و سه ماه آزمایش کردند و گزارش کردند که بتن‌های تقویت شده با ذرات ۱۵ نانومتری تا یک ماه اول بسیار محکم‌تر از بتن‌های تقویت شده با ذرات ۸۰ نانومتری بوده ولی بعد از سه ماه این جریان برعکس شده است. همچنین، ناجی و همکاران [۵۶] در مطالعه‌ای دیگر، اثر دو نوع نانوذره سیلیکا با اندازه متوسط ۱۵ نانومتر ولی رفتار سطحی متفاوت و با همان درصد وزنی‌های قبلی را روی بتن در ترکیب با آب و سنگ آهک بررسی کردند.

فیرداس و همکاران [۵۷] اثر افزودن ۳ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا، با چهار اندازه متفاوت ۱ μm، ۳ μm، ۱۱ nm و ۲۰ nm، به پلی‌پروپیلن را بررسی کردند. آنها نمونه‌های ساخته شده را تحت آزمون فشار استاتیکی و دینامیکی، با پنج نرخ متفاوت، مورد بررسی قرار داده و گزارش کردند که در تمام نرخ‌های آزمایش، نمونه‌های ساخته شده با نانوذرات، خواص فشاری بهتری، شامل مدول یانگ و استحکام تسلیم، نسبت به نمونه‌های ساخته شده با میکروذرات نشان دادند. این موضوع را می‌توان در شکل‌های ۱-۲ و ۲-۲ مشاهده کرد.

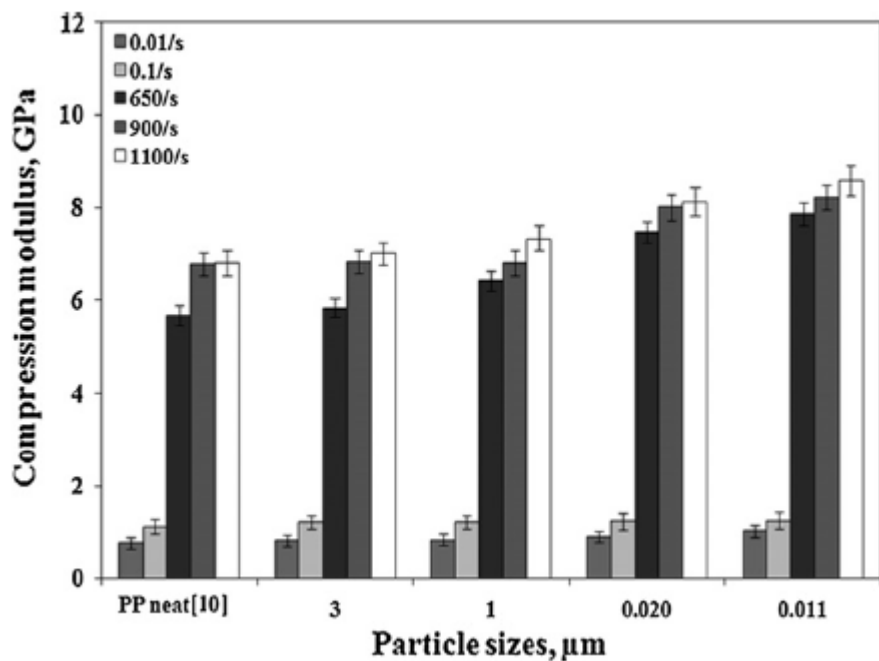
همچنین ملاحظه شد که در بارگذاری دینامیکی علاوه بر پدیده بشکه‌ای شدن، شکست نیز در نمونه اتفاق می‌افتد؛ ولی در بارگذاری شبه استاتیکی فقط پدیده بشکه‌ای شدن دیده می‌شود. بررسی سطح شکست نمونه‌های ساخته شده با میکروذرات نشان داد که در بارگذاری دینامیکی، عامل اصلی شکست، عمدتاً بیرون زدن میکروذرات از سطح نمونه بوده و این بخاطر تشکیل برهمکنش ضعیف‌تر نسبت به نمونه‌های ساخته شده با نانوذرات است که با مشاهده حفره‌های بزرگ در سطح شکست قابل توجه است.

گو و همکاران [۵۸] اثر فاز میانی را در افزودن نانوذرات سیلیکا به پلی‌آمید بررسی کردند. آنها از دو نوع نانوذره سیلیکا با دو رفتار سطحی متفاوت بهره بردند. پس از بررسی رفتار کششی استاتیکی و دینامیکی نانوکامپوزیت‌های ساخته شده، با دو نرخ کرنش به ترتیب ۰/۰۰۱ و ۰/۰۳ بر ثانیه، به این

نتیجه رسیدند که رفتار مکانیکی این نانوکامپوزیت‌ها به برهمکنش بین نانوذرات و زمینه (فاز میانی) و همچنین به نرخ کشش بستگی دارد. آنها نشان دادند که در نانوذراتی که اصلاح سطح در آنها انجام شده، مدول یانگ بالاتر است.



شکل ۲-۱: تغییرات استحکام تسلیم با اندازه ذرات در نرخ‌های فشار مختلف (استاتیکی و دینامیکی) [۵۷]



شکل ۲-۲: تغییرات مدول فشاری با اندازه ذرات در نرخ‌های فشار مختلف (استاتیکی و دینامیکی) [۵۷]

دوراما و همکاران [۵۹] اثر افزودن و محتوای نانوذرات سیلیکا را به اپوکسی 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٪ افزایش می‌یابد.

دیتانت و پی‌یرسون [۶۰] اثر افزودن نانوذرات سیلیکا با اندازه ذرات ۲۳ nm، ۷۴ nm و ۱۷۰ nm نانومتر را به رزین اپوکسی دی‌گلیسیدیل اتر بیسفنول A (DGEBA) بررسی کرده و تأثیر محتوا و اندازه‌ی ذره‌ی سیلیکا را روی پارامترهایی چون دمای انتقال شیشه (T_g)، ضریب انبساط حرارتی^۱ (CTE)، مدول یانگ (E)، تنش تسلیم (σ_y)، چقرمگی شکست (K_{IC}) و انرژی شکست (GIC) مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تجربی آنها نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات سیلیکا تأثیر بسزایی روی T_g و یا تنش تسلیم رزین اپوکسی ندارد؛ یعنی صرف نظر از اندازه‌ی ذرات سیلیکا، T_g و تنش تسلیم ثابت باقی می‌ماند، که این نتیجه با ادبیات این موضوع سازگار است [۶۱-۶۳]. دمای انتقال شیشه، دمایی است که در آن هنگام گرم کردن، رفتار شیشه از حالت الاستیک به حالت ویسکوالاستیک تبدیل می‌شود. این دما با تغییر ناگهانی در ضریب انبساط حرارتی ماده مشخص می‌شود [۴۰].

در ادامه باید به این نکته اشاره کرد که با توجه به رفتار تنش تسلیم اپوکسی با وجود ذرات در ابعاد میکرون، تفاوت‌هایی در نتایج تحقیق پژوهشگران وجود دارد. برای مثال، در مقایسه‌ی یک سیستم اپوکسی مشابه با کار [۶۰]، کاواکوچی و پی‌یرسون [۶۴] در افزودن ذرات سیلیکا با قطر ۴۲ μm ، افزایش تنش تسلیم را مشاهده کردند. برای توضیح این مشاهدات، استحکام بین سطحی یا چسبندگی بین ذرات و اپوکسی باید در نظر گرفته شود. برای سیستم‌هایی با برهمکنش ضعیف بین زمینه و ذرات، ذرات قادر به تحمل بار خارجی نخواهند بود و استحکام کامپوزیت از استحکام پلیمر خالص کمتر خواهد بود.

^۱ Coefficient of Thermal Expansion

همانطور که انتظار می‌رفت، دیتانت و پی‌یرسون [۶۰] گزارش کردند که افزودن نانوذرات سیلیکا تأثیر قابل توجهی در CTE، مدول یانگ و چقرمگی شکست دارد. مقدار CTE کامپوزیت نانوسیلیکا/اپوکسی با افزایش مقدار نانوذرات سیلیکا کاهش یافت، که می‌توان این موضوع را به CTE بسیار پایین‌تر نانوذرات سیلیکا نسبت داد و هرچه بر محتوای ذرات افزوده می‌شد، مقدار CTE کاهش بیشتری می‌یافت. جالب اینجاست که کاهش CTE، وابستگی شدیدی به اندازه ذرات را نشان می‌دهد و هرچه ذرات بزرگتر باشند، CTE کمتر افت می‌کند. آنها همچنین نشان دادند که مدول یانگ به وضوح با افزایش محتوای نانوذرات افزایش می‌یابد که این امر به خاطر بالاتر بودن مدول سیلیکا در مقایسه با مدول اپوکسی، انتظار می‌رفت [۶۵]. همچنین آنها نشان دادند که با تغییر اندازه‌ی نانوذرات، تأثیر چندانی در مدول یانگ ملاحظه نمی‌شود. کمی اثر اندازه ذرات سیلیکا روی مدول یانگ، با کم اثر بودن ذرات پرکننده‌ی دیگری که در رزین اپوکسی بکار رفته است، سازگار است [۶۴-۶۲]. همچنین، آنها با توجه به مروری که بر تحقیقات انجام شده داشتند این گونه نتیجه گرفتند که برای اپوکسی تقویت شده با ذرات کروی در مقیاس میکرون، با افزایش اندازه ذرات، چقرمگی شکست افزایش یافته ولی این نتیجه برای اندازه ذرات در مقیاس نانو صادق نیست و اندازه‌ی نانوذرات سیلیکا تأثیر عمده‌ای روی چقرمگی شکست اپوکسی حاوی نانوذرات سیلیس با قطرهای بین ۲۰ nm تا ۱۷۰ nm ندارد.

دیتانت و پی‌یرسون [۵۱] در تحقیق مشابه دیگری، اثرات هم‌افزایی استفاده ترکیبی از ذرات سیلیکا با دو اندازه ذره در مقیاس میکرو و نانو را بررسی کردند. آنها کسر حجمی سیلیکای موجود در کامپوزیت را روی ۱۰٪ ثابت نگه داشته و در حالات مختلف، مقدار میکروذرات و نانوذرات را به ترتیب جدول ۲-۲ طوری تغییر دادند که مجموع کسر حجمی سیلیکا ۱۰ درصد باشد. لازم به ذکر است که میکروذرات مورد استفاده دارای اندازه ثابت $42\text{ }\mu\text{m}$ بوده که از آن در ترکیب با نانوذراتی با اندازه‌های ۲۳ nm، ۷۴ nm و ۱۷۰ nm مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۲-۲: کسر حجمی میکروذرات و نانوذرات سیلیس در کامپوزیت‌های مختلف [۵۱]

کسر حجمی کل سیلیکا	کسر حجمی میکروذرات	کسر حجمی نانوذرات
۱۰٪	۱۰	۰
۱۰٪	۷/۵	۲/۵
۱۰٪	۵/۰	۵/۰
۱۰٪	۲/۵	۷/۵
۱۰٪	۰	۱۰

به وضوح با افزودن ۱۰٪ درصد حجمی سیلیکا به ترکیب، مدول یانگ، چقرمگی شکست و انرژی شکست افزایش یافته ولی به علت استفاده از ذرات با دو مقیاس متفاوت، روند افزایش خواص منظم نیست و در هر مورد متفاوت است؛ لذا باید در مورد هر ترکیب بصورت جداگانه بحث کرد.

ناکامورا و یagamوچی [۶۶] نیز اثر اندازه‌ی ذرات روی رفتار شکست اپوکسی پر شده با ۵ نوع ذره سیلیکای کروی با محدوده‌ی قطر بین ۶ μm تا ۴۲ μm را بررسی کردند. در پژوهش ناکامورا بر خلاف نتایج دیتانت [۶۰]، چقرمگی شکست و انرژی شکست با افزایش اندازه ذرات، افزایش یافته‌اند. بررسی ناکامورا در توافق خوبی با تحقیق لانگ و رادفورد [۶۷] می باشد که اثر اندازه ذرات را روی چقرمگی شکست اپوکسی با ذرات تری هیدرات آلومنیوم (ATH) بررسی کردند. این محققین دریافتند که چقرمگی شکست با افزایش اندازه ذرات افزایش می یابد.

لیو و همکاران [۶۸] یک مطالعه‌ی سیستمی منظم درباره‌ی تأثیر نانوذرات لاستیک و سیلیکا به روی چقرمگی شکست اپوکسی دی گلیسیدیل اتر بیسفنول A (DGEBA) انجام دادند و انرژی شکست را برای دوتایی های سیلیکا/اپوکسی، لاستیک/اپوکسی و سه تایی سیلیکا/لاستیک/اپوکسی با درصد وزنی های مختلف بدست آوردند.

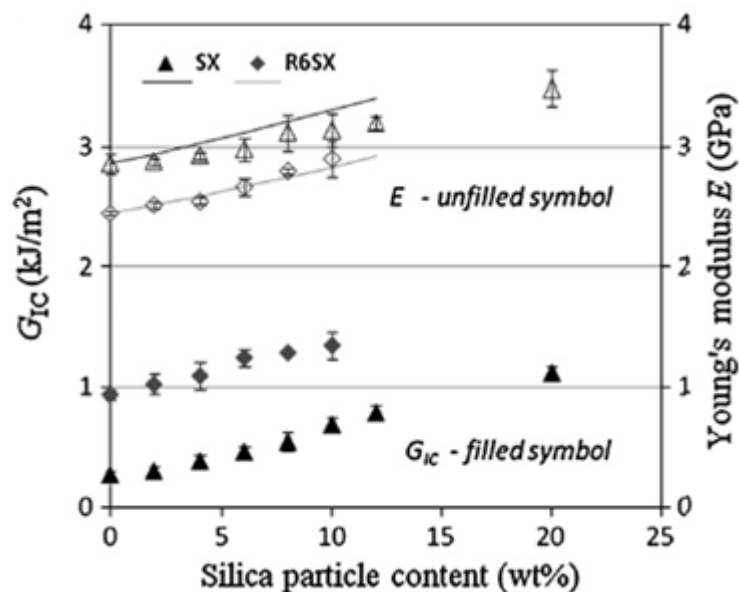
برای مطالعه‌ی اثر هیبرید، مدول یانگ و انرژی شکست دوتایی اپوکسی/سیلیکا با سه تایی با ۶ درصد وزنی ثابتِ لاستیک و درصدهای مختلف سیلیکا، در شکل ۲-۳ مقایسه شده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می شود، افزودن نانوذرات سیلیکا باعث افزایش مدول یانگ و انرژی شکست شده

و همچنین، مدول یانگ سیستم سه تایی همواره کمتر از سیستم دوتایی است و این به دلیل پایین تر بودن مدول ذرات لاستیک است. هرچند که این دو منحنی با افزایش ذرات سیلیکا بهم نزدیک می شوند. در همین شکل مشاهده می شود که منحنی G_{IC} کامپوزیت سه تایی موازی کامپوزیت دوتایی بوده و اختلاف آنها برابر مقدار ثابت 0.7 kJ/mol است.

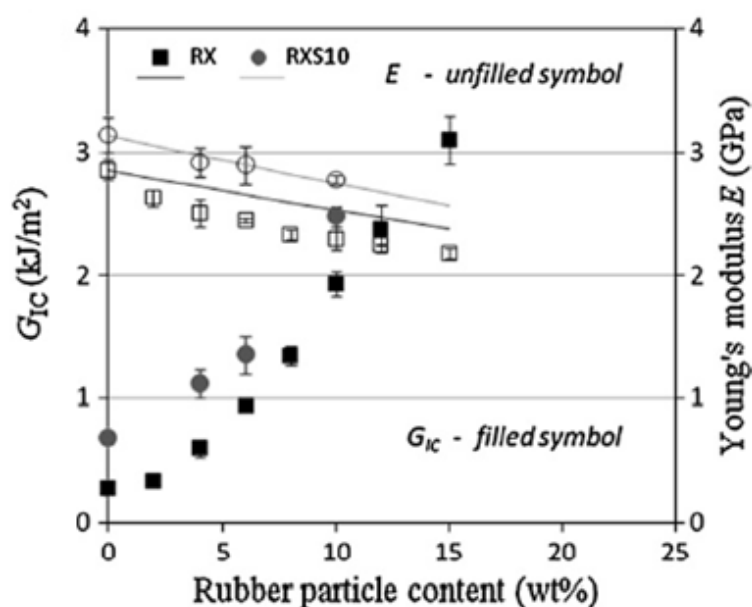
آنها همچنین در شکل ۲-۴، اثر هیبرید را در کامپوزیت دوتایی اپوکسی/سیلیکا و نیز کامپوزیت سه تایی اپوکسی/لاستیک/سیلیکا، با ۱۰ درصد وزنی ثابت سیلیکا و تغییرات درصد وزنی لاستیک، بررسی کردند. همانطور که مشاهده می شود، بر خلاف نانوذرات سیلیکا، افزودن ذرات لاستیک به سیلیکا باعث افت مدول یانگ در هر دو سری کامپوزیت ها شده اما افزودن ذرات لاستیک و همچنین افزایش محتوای ذرات آن باعث رشد بیشتری در انرژی شکست هر دو سری کامپوزیت نسبت به ذرات سیلیکا شده است. همچنین، مشاهده می شود که E و G_{IC} کامپوزیت سه تایی، تا ۱۰ درصد وزنی لاستیک، با اختلاف ثابت 0.42 kJ/mol بیشتر است.

چنانچه شکل های ۲-۳ و ۲-۴، بجای G_{IC} ، برای K_{IC} ترسیم شود، به نتایج مشابهی می رسیم؛ همچنین، K_{IC} سیستم سه تایی و دوتایی با یکدیگر موازی شده و به ترتیب دارای اختلاف ثابت $0.62 \text{ MPa}\sqrt{m}$ و $0.67 \text{ MPa}\sqrt{m}$ خواهد بود. نتایج آنها نشان داد که کامپوزیت سه تایی، حالت بهینه تعادل را بین مدول و نرخ آزادسازی انرژی دارد.

تانگ و ژانگ [۶۹]، بررسی مشابهی انجام دادند و اثر افزودن نانوذرات سیلیس و لاستیک به زمینه اپوکسی DGEBA را در کامپوزیت های دوتایی و سه تایی بررسی کردند. در یک گزارش کلی آنها اعلام کردند که خواصی چون مدول یانگ، چقرمگی شکست و انرژی شکست در کامپوزیت های سه تایی، که هم شامل ذرات صلب سیلیس و هم ذرات نرم لاستیک است، از کامپوزیت های دوتایی بهتر است.



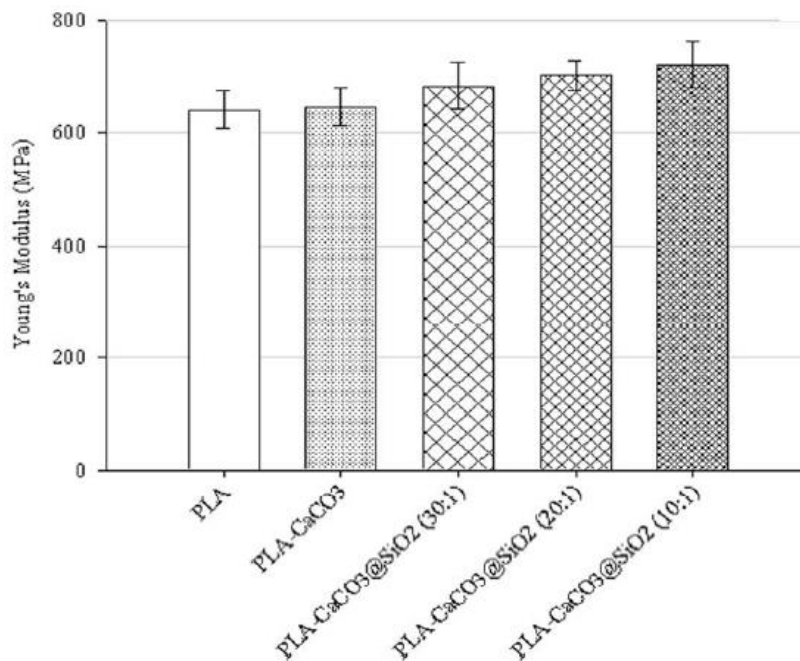
شکل ۲-۳: تغییرات انرژی شکست و مدول یانگ با درصد وزنی نانوذرات سیلیکا برای کامپوزیت دوتایی و سه تایی [۶۸].



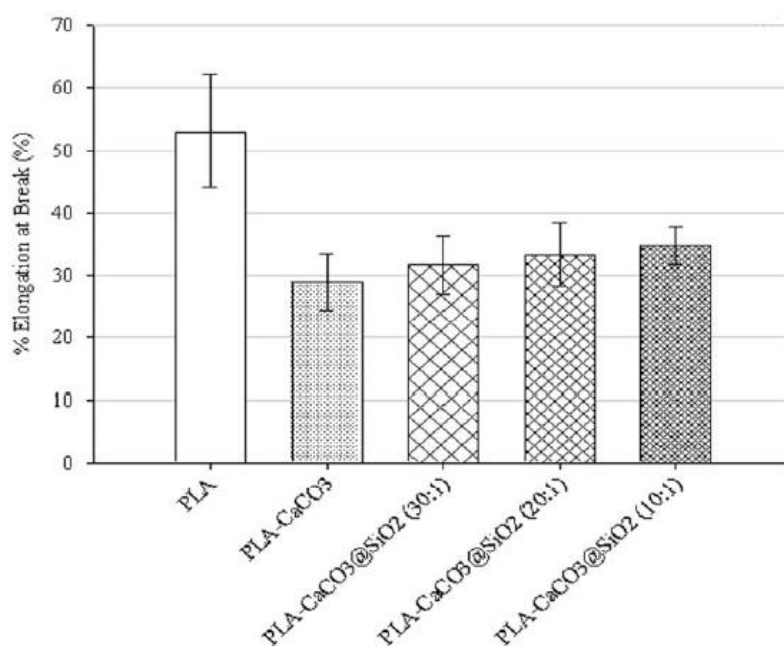
شکل ۲-۴: تغییرات انرژی شکست و مدول یانگ با درصد وزنی نانوذرات لاستیک برای کامپوزیت دوتایی و سه تایی [۶۸].

نخامانوراک و همکاران [۷۰]، سطح نانوذرات $CaCO_3$ را با استفاده از نانوذرات سیلیس از طریق فرآیند سل ژل اصلاح کرده و تأثیر SiO_2 و $CaCO_3$ را روی خواص مکانیکی و رفتار شکست نانوکامپوزیت با پایه پلی لاکتیک اسید (PLA) بررسی کردند. آنها دریافتند که با افزایش محتوای

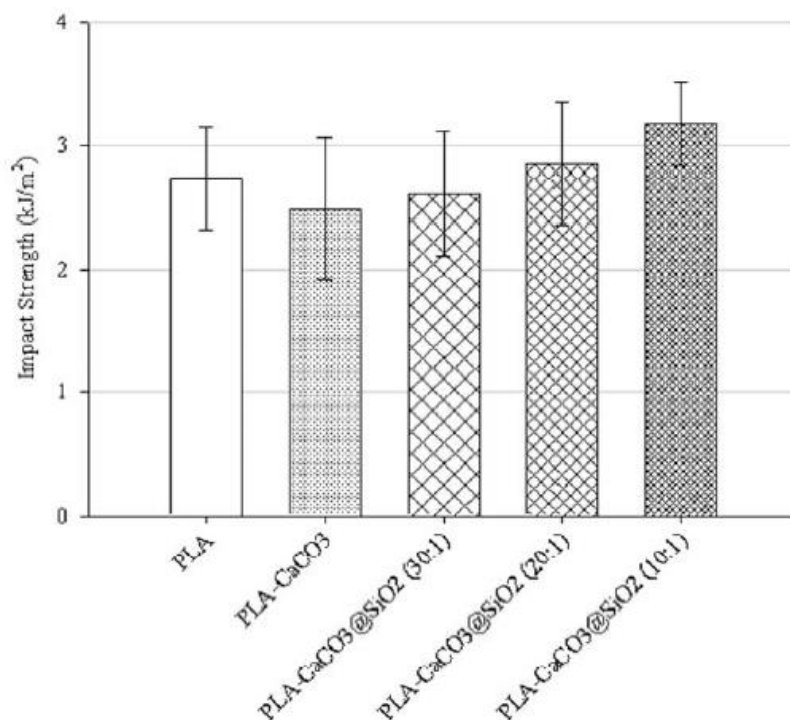
SiO₂ در سطح CaCO₃، تغییر طول تا نقطه‌ی شکست، مقاومت به ضربه و مدول الاستیک افزایش یافته است. در شکل‌های ۲-۵ تا ۲-۷، به ترتیب تغییرات مدول یانگ، تغییر طول تا نقطه‌ی شکست و مقاومت به ضربه بر حسب درصد وزنی‌های مختلف سیلیس ارائه شده است.



شکل ۲-۵: تغییرات مدول یانگ نانوکامپوزیت PLA بر حسب درصد وزنی سیلیکا [۷۰].



شکل ۲-۶: تغییر طول تا نقطه شکست نانوکامپوزیت PLA بر حسب درصد وزنی سیلیکا [۷۰].



شکل ۲-۷: تغییرات مقاومت به ضربه نانوکامپوزیت PLA بر حسب درصد وزنی سیلیکا [۷۰].

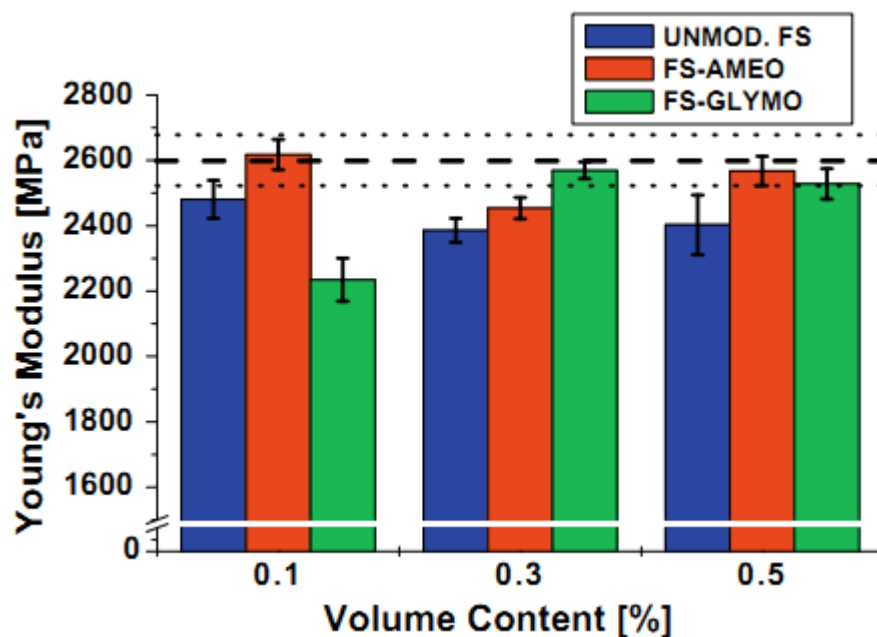
همچنین آنها نشان دادند که بعد از اصلاح سطح ارتباط بهتری بین زمینه PLA و نانوتقویت کننده‌ها بوجود آمده که همین امر موجب تقویت خواص مذکور شده است. علوی و همکارانش [۷۱] اثر افزودن نانوذرات سیلیکا به اپوکسی، به روش پلیمریزاسیون درجا، را بررسی کردند. آنها برای توزیع مناسب نانوذراتشان از یک همزن مکانیکی با سرعت ۲۰۰۰ rpm استفاده کرده و سپس آن را به مدت نیم ساعت تحت نوسانات مکانیکی به وسیله امواج فراصوتی^۱ قرار دادند. آنها نشان دادند که با افزایش محتوای نانوذرات سیلیکا، استحکام کششی و تغییر طول تا نقطه شکست افزایش می‌یابد.

باتیستلا و همکاران [۷۲] اثر افزودن نانوذرات سیلیکا را به زمینه اپوکسی بیسفنول A بررسی کردند. آنها سیلیکا را در سه حالت بدون اصلاح سطح، با اصلاح سطح AMEO و با اصلاح سطح GLYMO و با درصد حجمی‌های ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ مورد بررسی قرار دادند. تصاویر SEM و TEM

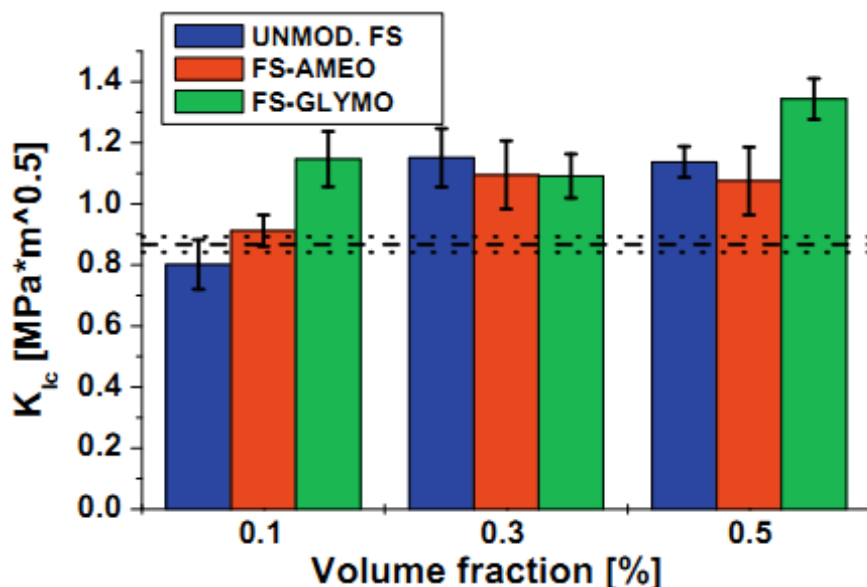
^۱ Ultrasonic

نشان داد که بهترین توزیع ذرات در کامپوزیت‌های حاوی نانوذرات با اصلاح سطح GLYMO اتفاق افتاده است.

شکل‌های ۸-۲ و ۹-۲، تغییرات مدول یانگ و چقرمگی شکست را برای این نانوکامپوزیت‌ها بهتر نشان می‌دهد. خط‌چین در هر نمودار، مقادیر مربوط به اپوکسی خالص را نشان می‌دهد. با افزودن هر سه نوع نانوذره، مدول یانگ تغییرات چندانی را به خود نمی‌بیند و حتی به جز در یک مورد (کامپوزیت حاوی ۰/۱ درصد حجمی نانوذرات با اصلاح سطح AMEO) افت را نشان می‌دهد. اما چقرمگی شکست با افزودن نانوذرات، افزایش یافته و بیشترین افزایش در چقرمگی شکست، در ۰/۵ درصد حجمی نانوذرات با اصلاح سطح GLYMO اتفاق افتاده که ۵۴٪ رشد را نسبت به چقرمگی شکست اپوکسی خالص نشان می‌دهد.



شکل ۸-۲: نمودار تغییرات مدول یانگ برای تمام نمونه‌های کامپوزیتی [۷۲]



شکل ۲-۹: نمودار تغییرات چقرمگی شکست برای تمام نمونه‌های کامپوزیتی [۷۲]

مقالاتی که تا اینجا مروری بر آنها شد، عمدتاً تمرکز بر اثر پارامترهایی نظیر اندازه، محتوا، رفتار سطحی و برهمکنش بین ذرات متعدد با محوریت سیلیس، بر زمینه‌های مختلف داشت که اثر تغییر برخی از این پارامترها به روی بعضی از خواص مکانیکی نظیر استحکام تسلیم، مدول یانگ، چقرمگی شکست، انرژی شکست، دمای انتقال شیشه، ضریب انبساط حرارتی و غیره مورد بررسی قرار گرفت. اما همانطور که مشهود است، امروزه سازه‌های پوسته‌ای بطور گسترده در بسیاری از صنایع نظیر خطوط لوله‌ها، صنایع هوافضا، مخازن بزرگ و برج‌های خنک کننده بکار می‌روند [۷۳-۷۵]. در میان این سازه‌ها، جاذب‌های انرژی طوری طراحی می‌شوند که در برخوردها، در یک حالت کنترل شده، انرژی برخورد را پیش از انتقال به قسمت‌هایی که محافظت آنها را بر عهده دارند، جذب می‌کنند [۷۶]. عمدتاً فلزات پرکاربردترین مواد در سازه‌های جاذب انرژی هستند، و این بخاطر مشخصه‌های تغییر شکل پلاستیک‌شان است که آنها را قادر به جذب انرژی در حالات کنترل شده می‌کند [۷۷ و ۷۸]. در میان سازه‌های جذب انرژی فلزی، به علت سهولت ساخت نمونه‌ها، آزمایش فروپاشی لوله بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [۷۹ و ۸۰].

علوی‌نیا و حداد [۸۱] قابلیت جذب انرژی لوله‌های جدار نازک آلومینیومی با شکل مقطع‌های متفاوت (دایروی، مربعی، مستطیلی، شش وجهی، مثلثی، هرمی و مخروطی) را به صورت تجربی و عددی بررسی کردند. این جاذب‌ها همگی دارای حجم، وزن، میانگین سطح مقطع، ضخامت و جنس یکسان بوده و تحت بارگذاری شبه استاتیکی قرار گرفته بودند. نتایج نشان داد که شبیه‌سازی عددی در توافق خوبی با نتایج تجربی بوده و هندسه مقطع تأثیر بسزایی در قابلیت جذب انرژی دارد. آنها همچنین نشان دادند که لوله با مقطع دایروی بیشترین قابلیت جذب انرژی و بیشترین نیروی متوسط را داشته است؛ اما از آنجا که بیشترین نیرو در حوادث نقش مهمی دارد، جاذب‌های مخروطی و هرمی در این تحقیق توصیه شده‌اند.

علوی‌نیا و پارساپور [۸۲]، در تحقیق مشابه دیگر، همان مقاطع را به چند قسمت تقسیم کردند و با همان شرایط قبلی آزمایش‌های خود را انجام دادند. آنها گزارش کردند که قابلیت جذب انرژی مقاطع چند قسمتی، بیشتر از مقاطع یک قسمتی بوده و همچنین مقاطع چند قسمتی شش وجهی و هشت وجهی، مقدار انرژی بیشتری در واحد جرم را، نسبت به سایر هندسه‌ها، جذب می‌کنند. همانطور که اشاره شد، اپوکسی‌ها بخاطر قیمت مناسب و خواص خوب مکانیکی، در بسیاری از صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما کاربرد آنها در بسیاری از موارد نظیر ساخت سازه‌هایی به منظور جذب انرژی و یا سازه‌هایی مقاوم در برابر ضربه، به تنهایی جوابگوی نیاز صنایع نیست؛ لذا می‌بایست آنها را توسط تقویت کننده‌هایی در مقیاس میکرو و نانو جهت مصارف مورد نظر ارتقاء داد. چنانچه بتوان اپوکسی‌ها را به گونه‌ای مناسب تقویت کرد، می‌توانند مقادیر زیادی از انرژی برخورد را از طریق خرد شدن و یا لایه لایه شدن جذب کنند [۸۳].

در مورد جاذب‌های انرژی ساخته شده از نانوکامپوزیت‌ها، تحقیقات کمی وجود دارد و این امر عمدتاً می‌تواند به دلیل مشکل بودن تولید اینگونه از جاذب‌ها باشد. به همین خاطر است که ارتباط بین خواص مکانیکی یک نانوکامپوزیت با قابلیت‌های جذب انرژی آن، هنوز به طور کامل شناخته نشده است.

پرامانیک و ماننتا [۸۴]، تأثیر افزودن نانورس و صفحات گرافن را در قابلیت جذب انرژی پیل‌های ساندویچی، در سرعت‌های برخورد بالا و پایین مورد بررسی قرار دادند. روی و همکاران [۸۵]، اثر افزودن اشکال مختلف کربن نظیر نانوتیوپ، نانوفیبر، گرافن و فلورن را بر خواص مختلف فیزیکی و مکانیکی نانوکامپوزیت‌های پایه اپوکسی بررسی کردند. بالگاسن و همکاران [۸۵]، قابلیت جذب انرژی صفحات ساخته شده از کامپوزیت اپوکسی را که با ذرات شیشه تقویت شده و در ضخامت‌های مختلف ساخته شده بودند را تحت بارگذاری ضربه‌ای مورد بررسی قرار دادند. در ضمن تأثیر افزودن نانوذرات رس را نیز به آنها بررسی کردند.

کائو و همکاران [۸۷] رفتار جذب انرژی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با ZnO را تحت آزمایش فشار محوری، بصورت استاتیکی و دینامیکی، بررسی کردند. آنها در نتایج خود اذعان کردند که خواص فشاری کامپوزیت‌ها به شدت به نرخ کرنش وابسته است. همچنین آنها گزارش کردند که با افزودن ZnO، ماکزیمم تنش در نمودار تنش-کرنش افزایش یافته ولی ماکزیمم کرنش کاهش یافته است.

توانایی سازه‌های کامپوزیتی برای جذب انرژی، به مود شکست بستگی دارد. موادی که بصورت پیش‌رونده دچار فروپاشی شده و در حین شکست دچار پارگی و تکه تکه شدن می‌شوند، انرژی بیشتری را نسبت به مواد ترد و شکننده، جذب می‌کنند [۹۰-۸۸].

سیلوا و همکاران [۹۱] قابلیت جذب انرژی سازه‌های مخروطی کامپوزیتی که از سه فاز پلیمر ترمو پلاستیک، الیاف شیشه و نانو ذرات ساخته شد بود را، تحت فروپاشی محوری دینامیکی و شبه استاتیکی مورد بررسی قرار دادند. آنها از دو نوع زمینه مختلف، پلی پروپیلن (PP) و پلی آمید-۶ (PA-6)، در پژوهش خود استفاده کرده و اثر ماده زمینه را نیز بررسی کردند. در همه ترکیبات، ماده زمینه را که شامل رزین و ۳۰ درصد وزنی الیاف شیشه (GF) بود را ثابت نگه داشته و از نانوذرات سیلیس (SiO_2)، شیشه‌های کروی^۱ و مونت موریلونیت (MMT) به عنوان تقویت‌کننده دوم و با

¹ Glass Sphere

درصد وزنی‌های مختلف استفاده کردند. جدول ۳-۲، ترکیبات هشت نمونه متفاوت مورد بررسی در این پژوهش را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۲: ترکیبات کامپوزیت‌های ساخته شده [۹۱]

Name	PP/GF	PP/GF/GS	PP/GF/SiO ₂	PP/GF/MMT
<i>PP composites</i>				
Matrix	PP	PP	PP	PP
1st filler (wt.%)	GF [30%]	GF [30%]	GF [30%]	GF [30%]
2nd filler (wt.%)	-	GS [12%]	SiO ₂ [2%]	MMT [2%]
<i>PA6 composites</i>				
Matrix	PA	PA	PA	PA
1st filler (wt.%)	GF [30%]	GF [30%]	GF [30%]	GF [30%]
2nd filler (wt.%)	-	GS [12%]	SiO ₂ [2%]	MMT [2%]

آزمایش فشار شبه استاتیکی مخروط‌ها توسط یک دستگاه اینسترون ۵۵۰۰ و با نرخ ۰/۱ mm/s و همچنین، آزمایش ضربه (فشار دینامیکی) توسط یک برج سقوط آزاد با ظرفیت بالا، از ارتفاع ۲ متری و با سرعت ۶ m/s، انجام شده است. آنها گزارش کردند که با توجه به مقایسه بصری نحوه فروپاشی نمونه‌ها (شکل‌های ۱۰-۲ و ۱۱-۲) و مشاهدات میکروسکوپی سطح شکست، مودهای شکست زیر قابل شناسایی و طبقه‌بندی است:

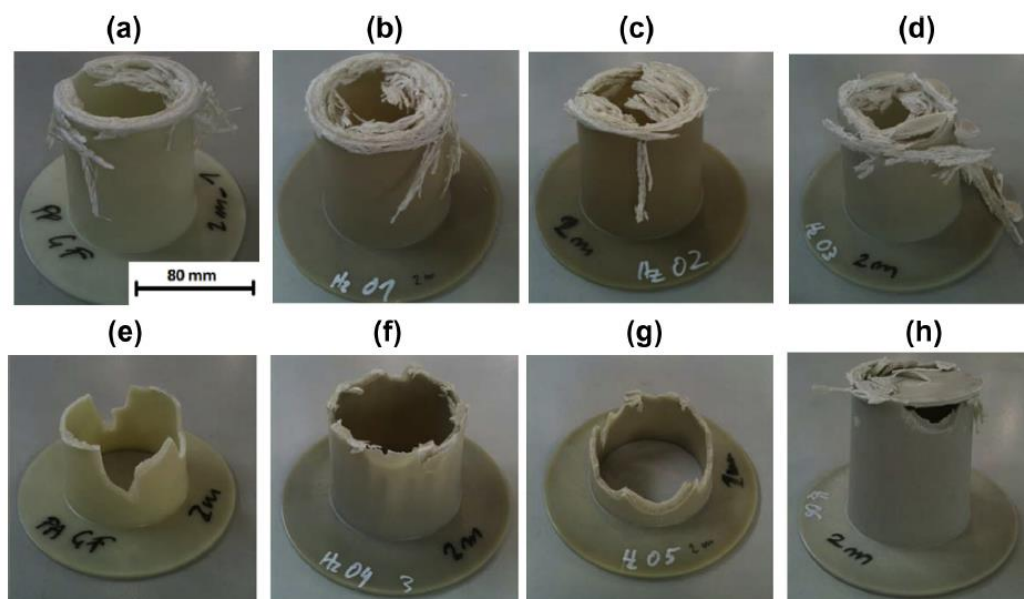
مود ۱: فروپاشی پیش‌رونده با تکه تکه شدن و لایه لایه شدن‌هایی در مقیاس میکرو، تحت بار دینامیکی. این مود شکست منطبق با چین خوردگی پیش‌رونده و پایدار دیواره‌هاست. انرژی از طریق لایه‌لایه شدن گسترده و شکستن پیوند الیاف هدر می‌رود. ترک‌های محلی در منطقه فروپاشی شکل گرفته و تکه‌های کوچکی از نمونه در اطراف آن می‌ریزد. این مود در تمام نمونه‌هایی که رزین آنها پلی پروپیلن (PP) بود، دیده می‌شود (شکل ۱۰-۲ تا d) و قابلیت جذب انرژی خوبی را نشان می‌دهد.

مود ۲: شکست ترد با جدا شدن تکه‌های بزرگ از نمونه، تحت بار دینامیکی. این مود شکست منطبق بر شکستی ناپایدار و فاجعه آمیز است. از ویژگی‌های این مود شکست، جدا شدن تکه‌های بزرگ به خاطر گسترش ترک‌های محوری است. این ترک‌ها در مراحل ابتدایی بارگذاری دینامیکی شکل گرفته

و استحکام در برابر شکست را به شدت کاهش می‌دهند. مود ۲، یک حالت ضعیف از جذب انرژی را نشان می‌دهد که این مود در کامپوزیت‌های PA/GF، PA/GF/MMT (شکل ۲-۱۰ e و g) تحت بارگذاری دینامیکی مشاهده شد.

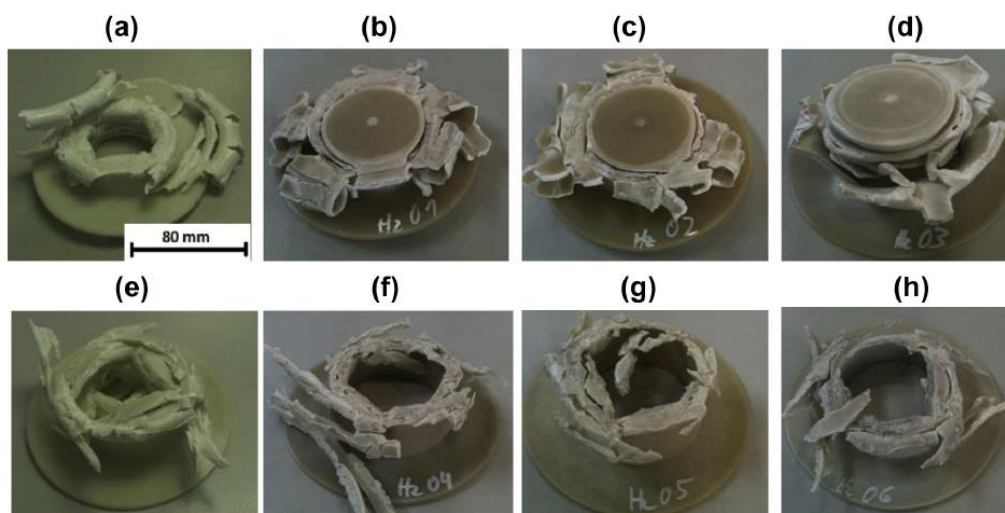
مود ۳: شکست ترد با فروپاشی پیش رونده و جدا شدن تکه‌های متوسط از نمونه. در این مود، گسترش ترک‌های محوری که در همان مراحل اولیه ضربه بوجود آمده‌اند، بلافاصله بعد از شکل‌گیری، متوقف می‌شود؛ بنابراین اندازه تکه‌های جدا شده در این مود به مراتب کوچکتر از اندازه تکه‌های جدا شده در مود ۲ است. بعلاوه، اثرات لایه‌لایه شدن نیز مشاهده می‌شود. بنابراین در این مود، شکست فاجعه‌بار رخ نمی‌دهد و یک مود شکست مناسب در مقایسه با مود ۲ است. این مود در کامپوزیت‌های PA/GF/SiO₂ و PA/GF/GS که تحت بار دینامیکی آزمایش شده‌اند، (شکل ۲-۱۰ f و h) و همینطور در تمام کامپوزیت‌هایی که زمینه آنها PA بوده و کامپوزیت PP/GF تحت بار استاتیکی (شکل ۲-۱۱ e تا h و a) مشاهده شده است.

مود ۴: چین‌خوردگی پیش‌رونده با اثرات قارچ‌گونه. در این مود شکست، ترکیبی از تغییر شکل پلاستیک و فروپاشی پیش رونده ملاحظه می‌شود. در مراحل ابتدایی فروپاشی، سازه تحت تغییر شکل پلاستیک قرار گرفته؛ بطوریکه اثر آن بصورت تغییر شکل قارچ‌گونه‌ای قابل مشاهده است. بعد از شکل‌گیری چین‌خوردگی ثانویه، ترک‌های محوری به وجود آمده، منجر به شکافته شدن دیواره نمونه می‌شود. این مود در تمام نمونه‌های با پایه PP که دارای تقویت‌کننده ثانویه بوده و تحت بارگذاری شبه استاتیکی قرار گرفته‌اند، مشاهده شده است. (شکل ۲-۱۱ b تا d).



شکل ۲-۱۰: مودهای فروپاشی دینامیکی در:

(a) PP/GF, (b) PP/GF/SiO₂, (c) PP/GF/MMT, (d) PP/GF/GS,
(e) PA/GF, (f) PA/GF/SiO₂, (g) PA/GF/MMT, (h) PA/GF/GS [۹۱].



شکل ۲-۱۱: مودهای فروپاشی شبه استاتیکی در:

(a) PP/GF, (b) PP/GF/SiO₂, (c) PP/GF/MMT, (d) PP/GF/GS,
(e) PA/GF, (f) PA/GF/SiO₂, (g) PA/GF/MMT, (h) PA/GF/GS [۹۱].

سیلوا و همکارانش برای ارزیابی قابلیت جذب انرژی نمونه‌های مختلف، پارامترهای انرژی کل

جذب شده (E)، جذب انرژی ویژه^۱ (SEA)، بار فروپاشی متوسط و مقدار قله اولیه در نمودار بار-

¹ Specific Energy Absorption

جایابی را با یکدیگر مقایسه و مشخصات جذب انرژی همه نمونه‌های آزمایش شده را در جداول ۴-۲ و ۵-۲ ارائه کردند.

جدول ۴-۲: مشخصات فروپاشی نمونه‌ها تحت بارگذاری شبه استاتیکی [۹۱]

Material	Crash length (mm)	Collapse mode	Initial peak (kN)	Mean crashing load (kN)	Energy absorbed (kJ)	SEA (kJ/kg)	Change in SEA (%)
PPGF	86	III	29.74	34.75	2.99	49.4	-
PPGF/SiO ₂	86	IV	26.59	17.86	1.48	24.4	-50.7
PPGF/MMT	86	IV	24.75	15.39	1.29	21.2	-57.0
PPGF/GS	86	IV	22.06	17.66	1.65	26.3	-46.9
PAGF	86	III	47.66	50.44	4.33	58.1	-
PAGF/SiO ₂	86	III	44.61	45.66	4.15	54.5	-6.1
PAGF/MMT	86	III	54.59	40.65	3.23	42.9	-26.2
PAGF/GS	86	III	55.10	45.74	4.11	51.7	-11.0

جدول ۵-۲: مشخصات فروپاشی نمونه‌ها تحت بارگذاری دینامیکی [۹۱]

Material	Crash length (mm)	Collapse mode	Initial peak (kN)	Mean crashing load (kN)	Energy absorbed (kJ)	SEA (kJ/kg)	Change in SEA (%)
PPGF	29.79	I	22.99	14.19	0.36	23.6	-
PPGF/SiO ₂	31.4	I	25.72	15.41	0.37	22.6	-4.2
PPGF/MMT	36.02	I	20.02	12.86	0.40	20.5	-13.0
PPGF/GS	35.03	I	26.28	13.52	0.40	20.7	-12.3
PAGF	60.5	II	19.99	5.64	0.35	7.7	-
PAGF/SiO ₂	57.56	III	26.51	8.98	0.43	9.8	27.0
PAGF/MMT	62.61	II	38.82	4.48	0.37	7.7	0
PAGF/GS	22.03	III	40.42	15.58	0.32	22.3	188.5

با توجه به چهار مودی که بحث شد و همچنین گزارشات جداول ۴-۲ و ۵-۲، ملاحظه می‌شود، موادی که در حالت پیش‌رونده و همراه با ترک‌های محلی ریز دچار فروپاشی می‌شوند (مود ۱ و ۳)، قادر به جذب انرژی بیشتری نسبت به نمونه‌هایی با ترک‌های پیوسته (مود ۲ و ۴) هستند. این اثر ناشی از این حقیقت است که مود شکست تأثیر مستقیم بر پارامترهای فروپاشی نظیر طول فروپاشی، اندازه بیشینه بار و بار فروپاشی متوسط دارد [۹۱].

مطالعات قبلی [۸۷-۸۹] نیز در مورد مواد کامپوزیتی مختلف که در آزمایش‌های مشابهی مورد بررسی قرار گرفتند، نشان می‌دهد، موادی که با لایه‌لایه شدن و تکه تکه شدن گسترده دچار فروپاشی می‌شوند، قادر به جذب انرژی بیشتری نسبت به موادی هستند که به صورت ترد دچار شکست می‌شوند. از نتایج جداول ۴-۲ و ۵-۲ مشاهده می‌شود که افزودن تقویت کننده دوم باعث افت SEA در کامپوزیت‌های با زمینه PP، در هر دو نوع بارگذاری شبه استاتیکی و دینامیکی شده است. محققین

یک دلیل این موضوع را به توزیع بد تقویت کننده دوم درون ماده زمینه مرتبط دانسته‌اند که باعث افت استحکام فاز میانی شده است. این نتایج در انطباق با سایر مطالعاتی است که گزارش افزایش تردی را پس از افزودن نانومواد داده‌اند [۹۲ و ۹۳]. همینطور، در برخی از گزارشات [۶۲ و ۹۲] آمده است که با افزایش محتوای پرکننده‌ها، اثر منفی افزودن برخی پرکننده‌ها تشدید می‌شود که علت این موضوع، نواحی تمرکز تنش بوجود آمده در مجاورت پرکننده‌ها، بر اثر کاهش فواصل بین پرکننده‌ها و یا بوجود آمدن کلوخه‌ها خواهد بود [۹۴]. بنابراین هرچه فواصل بین ذره‌ای بیشتر و اندازه ذرات کوچکتر باشد، چقرمگی کامپوزیت بالاتر خواهد بود.

با توجه به داده‌های جداول ۲-۴ و ۲-۵، در کامپوزیت‌های پایه PP ملاحظه می‌شود که با افزودن پرکننده دوم، قابلیت جذب انرژی ویژه دچار افت می‌شود؛ اما با تأمل بیشتر در این دو جدول، مشهود است که این افت در بارگذاری استاتیکی بسیار بیشتر از بارگذاری دینامیکی است. در کامپوزیت‌های پایه PA، در بارگذاری استاتیکی، افت اندکی مشاهده شده است، ولی در بارگذاری دینامیکی افزایش مشاهده می‌گردد. مؤلفین علت این اختلافات را حساسیت مواد پلیمری به نرخ کرنش دانسته‌اند. در نرخ کرنش پایین، یک پلیمر معمولاً خیلی ترد، خشک و با سفتی پایین است؛ درحالی‌که اگر نرخ بارگذاری بالاتر باشد، رفتار پلیمر اندکی نرمتر و منعطفتر خواهد بود [۹۵ و ۹۱]. تقویت کننده‌های تردی مثل الیاف شیشه و سیلیکا عموماً به سرعت بارگذاری حساس نیستند [۹۶]. چقرمگی شکست پایین و نرمی زمینه ارتباط مستقیمی با ترک‌های محوری ایجاد شده در دیواره پوسته‌های جدار نازک داشته و قابلیت جذب انرژی را کاهش می‌دهد.

اما در میان محققین، برخی علاوه بر بررسی اثر پارامترهای مختلف بر خواص مکانیکی و فیزیکی، به کمک روش‌های مدل‌سازی، مدلی برای پیش‌بینی خواص مورد بررسی ارائه کرده و مقادیر بهینه هر پارامتر را نیز به کمک روش‌های بهینه‌سازی مرسوم، یافته و گزارش کرده‌اند [۹۷-۹۹].

لیو [۱۰۰] مدلی را جهت پیش‌بینی قابلیت جذب انرژی ویژه ستون‌های جدار نازک شش وجهی و هشت وجهی به کمک روش سطح پاسخ ارائه داد. وی متغیرهای طراحی خود را طول ضلع و

ضخامت لحاظ کرده و تابع هدف خود را بیشینه بار قرارداد. ورودی مدل را خروجی روش اجزای محدود قرار داده و برای مدل سطح پاسخ خود از چندجمله‌ای‌های مرتبه دو، سه و چهار استفاده کرد و در نهایت مقادیر بهینه برای طول ضلع و ضخامت را گزارش کرد.

شریعتی و همکاران [۱۰۱] به کمک روش سطح پاسخ، قابلیت جذب انرژی ستون‌های مربعی ساخته شده به وسیله نقطه جوش را که به وسیله تزریق فوم تقویت شده بودند، بررسی و مدل کردند. ورودی مدل آنها، حل عددی اجزای محدود به کمک نرم‌افزار آباکوس بوده و متغیرهای طراحی بهینه شده را طول ضلع ستون، ضخامت، چگالی فوم و تعداد نقطه جوش‌ها انتخاب کردند. در نهایت به کمک روش سطح پاسخ و با استفاده از دو الگوریتم بهینه سازی مختلف، مقادیر بهینه را گزارش کردند.

جنینگ و همکاران [۱۰۲] به وسیله طراحی آزمایش به بررسی اثر پارامترهای طراحی و شرایط آزمایشگاهی به روی خواص مکانیکی و فیزیکی کامپوزیت‌های اپوکسی/الیاف پرداختند. آنها پارامترهای طراحی را تعداد الیاف و دمای اتاق به هنگام انجام آزمایش کشش و برش انتخاب کردند. در نهایت به کمک روش سطح پاسخ مدلی برای هر یک از خواص مکانیکی ارائه کردند. همچنین آنها گزارش کردند که شکسته شدن پیوند الیاف در دمای بالا بر اثر نرم شدن زمینه، عامل اصلی گسستگی نمونه‌ها بوده است.

فریدون و همکاران [۱۰۳]، با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی، مدلی برای داده‌های تجربی بدست آمده برای برخی خواص مکانیکی کامپوزیت سه‌تایی اپوکسی/^۱HIPS/^۲MWCNT ارائه کردند و نتایج خود را به روش الگوریتم ژنتیک بهینه کردند. آنها گزارش کردند که ترکیب سه‌تایی مذکور به ترتیب باعث افزایش ۵۲٪، ۴۳٪ و ۳۳۴٪ ویژگی‌های کششی، فشاری و ضربه نسبت به اپوکسی خالص می‌شود، ولی تأثیری بر استحکام خمشی ندارد.

^۱ High Impact Polystyrene

^۲ Multiwall Carbon Nanotubes

رستمیان و همکاران [۱۰۴] اثر افزودن نانو رس و HIPS را به رزین اپوکسی دی گلیسیدیل اتر بیسفنول A بر خواص کششی، فشاری، خمشی و استحکام ضربه بررسی کرده و برای نتایج تجربی خود، مدلی با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی ارائه کردند که متغیرهای ورودی آن درصد وزنی نانو رس، HIPS و هاردنر بود. در نهایت به کمک روش الگوریتم ژنتیک مقادیر بهینه هر یک از پارامترهای فوق را گزارش کردند.

همچنین، رستمیان و همکاران [۱۰۵] در تحقیق دیگری اثر درصد وزنی HIPS، نانوذرات سیلیکا و هاردنر را بر خواص دمپینگ کامپوزیت‌های اپوکسی/SiO₂/HIPS بررسی کردند. آنها به کمک روش طراحی ترکیبی^۱، مدلی ریاضی برای پیش‌بینی مود دمپینگ اول و دوم ارائه کردند. آنها نتایج خود را توسط نرم‌افزار MINITAB بهینه کرده و گزارش کردند که بهترین نتایج در مقادیر HIPS=۰، SiO₂=۰/۳۷ و هاردنر=۰/۶۲، اتفاق می‌افتد.

اما چگونگی اثربخشی یک تقویت کننده در یک آزمایش، به عواملی نظیر هندسه تقویت کننده، طبیعت ماده زمینه و تقویت کننده، پیوندهای بین ماده زمینه و تقویت کننده، نحوه بارگذاری، نرخ بارگذاری و دمای انجام آزمایش بستگی دارد. مکانیزم‌های مختلفی وجود دارد که توضیحی را برای افزایش پارامترهای مورد بررسی در کامپوزیت‌های تقویت شده با ذراتی در اندازه میکرون و نانو ارائه می‌دهد. پژوهشگران بسیاری مشاهده کردند که افزودن نانوذرات به مواد شکننده باعث افزایش انرژی شکست می‌شود. هانگ و کینلوچ [۱۰۶] ادعا کردند که انرژی شکست پلیمر تقویت شده با نانو ذرات را می‌توان با عبارت زیر بیان کرد:

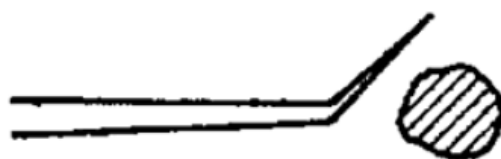
$$G_{IC} = G_{ICU} + \Psi \quad (۱-۲)$$

که G_{ICU} انرژی شکست اپوکسی خالص و Ψ توزیع انرژی شکست حاصل از افزودن تقویت کننده‌ها به اپوکسی است. این توزیع می‌تواند به دو دسته فرایندهای درون صفحه‌ای نظیر بستن و خم شدن

¹ Mixture Design

نوک ترک^۱ [۶۷ و ۱۰۷] و انحراف ترک^۲ [۱۰۸] و نیز فرآیندهای خارج از صفحه نظیر شکسته شدن پیوند^۳ و حفره زایی پلاستیک^۴ [۱۰۹] تقسیم شود که در ادامه به اختصار به برخی از آنها اشاره شده است.

در توصیف پدیده انحراف ترک می‌توان گفت، هنگامی که ترک به یک نانوذره صلب مثل سیلیس برخورد می‌کند، به اجبار مسیر خود را عوض کرده و حول آن دور می‌زند [۱۱۰ و ۱۱۱]. این امر باعث افزایش سطح شکست شده و بنابراین انرژی بیشتری را جذب می‌کند. همانطور که از شکل ۱۲-۲ پیداست، در این پدیده، ترک به علت برخورد با نانوذره صلب در حال تغییر مسیر است، پس سطح شکست نانوکامپوزیت تقویت شده با نانو ذرات، نسبت به سطح شکست اپوکسی خالص می‌بایست زبرتر باشد. یک روش مناسب برای بررسی وجود پدیده‌ی انحراف مسیر ترک، اندازه گیری زبری متوسط سطح شکست است.



شکل ۱۲-۲: شماتیک مکانیزم انحراف مسیر ترک [۱۱۲].

محققین در بررسی سطح شکست برخی از نانوکامپوزیت‌ها دریافتند که برخی از نانوذرات دچار شکستگی پیوند شده‌اند. این شکستگی پیوند در نانوذرات مختلف به شکل‌های گوناگونی اتفاق می‌افتد. به عنوان مثال در ذرات نرمی مثل لاستیک، این ذرات بعضاً در حین شکست پیوند دچار حفره زایی می‌شوند و در نتیجه فضاهای خالی در سطح شکست از خود بجای می‌گذارند. لیانگ و پی‌یرسون [۱۱۳] در تصاویری از سطح شکست اپوکسی DGEBA که با نانو ذرات لاستیک تقویت شده بود، این موضوع را بررسی کردند. همانطور که در شکل ۱۳-۲ مشاهده می‌شود، در سطح شکست نمونه‌ها، پدیده‌ی

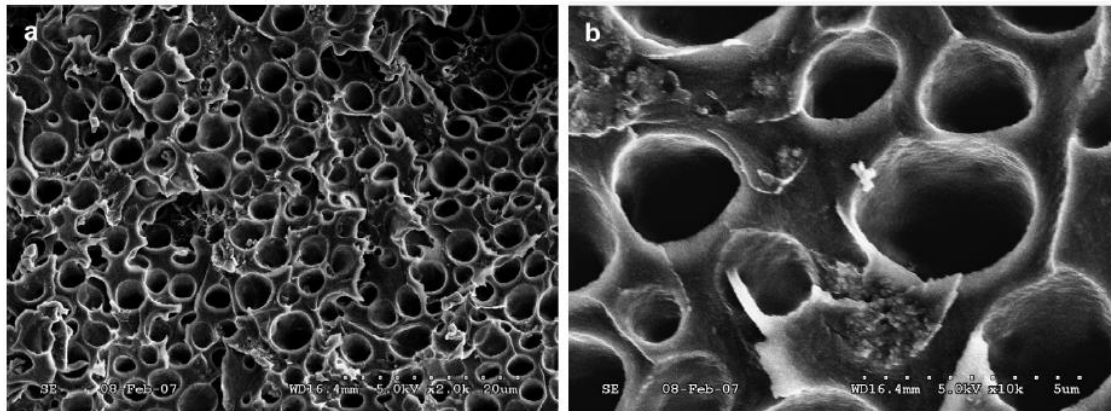
¹ Crack-tip pinning and bowing

² Crack path deflection

³ Debonding

⁴ Plastic void growth

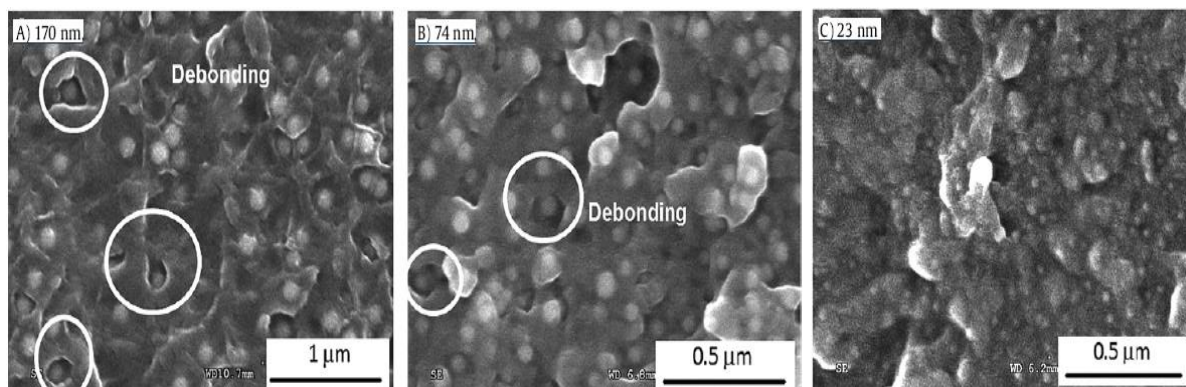
حفره‌زایی ذرات لاستیک^۱ اتفاق افتاده است. علت این موضوع نرم بودن ذرات لاستیک است که به ترک اجازه می‌دهد از درون آنها عبور کرده و منجر به تلاشی آنها شود؛ این در حالی است که ترک در برخورد با نانوذرات صلبی مثل سیلیس، یا آنها را دور می‌زنند و یا از فضای بین آنها عبور می‌کند.



شکل ۲-۱۳: پدیده حفره‌زایی ذرات لاستیک در سطح شکست اپوکسی DGEBA تقویت شده با نانو ذرات لاستیک به قطر متوسط ۸۰ nm [۱۱۳].

همچنین دیتانت و پی‌یرسون [۶۰] تصاویری از سطح شکست کامپوزیت تقویت شده با ۱۰ درصد وزنی از نانوذرات سیلیکا با اندازه ۲۳ nm، ۷۴ nm و ۱۷۰ nm منتشر کردند که در شکل ۲-۱۴ نشان داده شده است. شکل ۲-۱۴ (A و B) فضاهای خالی اطراف برخی نانوذرات را نشان می‌دهد که با دایره سفید مشخص شده است و بدین معناست که پیوند شکسته شده است. نتایج نشان می‌دهد که فقط بخش کوچکی از نانوذرات در طی شکست، پیوندشان از بین می‌رود. مشاهدات مشابهی از شکستن پیوند نانوذرات سیلیکا در تحقیقات دیگران نیز گزارش شده است [۱۱۴]. دیتانت و پی‌یرسون گزارش کردند که قطر متوسط فضای خالی ایجاد شده به وسیله نانو ذرات ۱۷۰ nm و ۷۴ nm، به ترتیب، ۲۴۲ nm و ۱۱۰ nm است و اندازه‌ی فضای خالی نانوذره ۲۳ nm را نتوانسته‌اند اندازه‌گیری کنند. مشهود است که شکست پیوند به اندازه‌ی ذرات وابسته است. هرچه اندازه‌ی ذرات کاهش می‌یابد، تعداد ذراتی که دچار شکستگی پیوند می‌شوند نیز کمتر می‌شود. در نتیجه منجر به کاهش اندکی چقرمگی شکست با توجه به کوچکتر شدن اندازه‌ی نانوذره می‌شود [۶۰].

^۱ Rubber cavitation



شکل ۲-۱۴: تصاویر SEM از سطح شکست DGEBA با ۱۰ درصد حجمی نانوذره سیلیکا. (A) ۱۷۰ nm، (B) ۷۴ nm، (C) ۲۳ nm. (ذراتی که پیوند آنها شکسته است، با دایره مشخص شده‌اند) [۶۰].

در ادامه یک رابطه‌ی تجربی مطابق معادله‌ی ۲-۲ برای تنش جدایش اتصالات و اینکه این تنش رابطه‌ی عکس با قطر نانو ذره دارد، ارائه شده است که به درک بهتر مطلب کمک می‌کند [۱۱۵ و ۱۱۶].

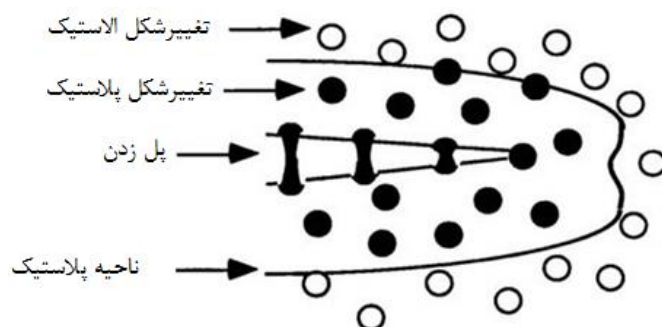
$$\sigma_{db} = \frac{1}{3(1-\nu_m)} \sqrt{\frac{16\gamma_d E_m (1+\nu_m)}{r_p}} \quad (2-2)$$

بطوریکه در آن γ_d انرژی شکست پیوند ویژه بر واحد سطح پیوند، E_m مدول یانگ کامپوزیت، r_p شعاع نانوذره و ν_m ضریب پواسن زمینه است. این معادله، تنش شکست پیوند (σ_{db}) را بصورت تابعی از اندازه ذره (r_p) بیان می‌کند. وقتی که ذرات درون زمینه قرار می‌گیرند، پیوندی در مجاورت ذرات بوجود می‌آید که برای شکستن این پیوند از زمینه، نیاز به تنش خارجی است که بر انرژی شکست پیوند (σ_{db}) غلبه کند [۶۰]. مطابق این مفهوم، تنش لازم برای شکست پیوند با کاهش اندازه‌ی ذرات، افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، پیوند ذرات با اندازه بزرگتر آسانتر از ذرات با اندازه کوچکتر خواهد شکست. در مورد شکسته شدن پیوند، حالت‌های مختلف دیگری نظیر پل زدن نانوذره^۱، بیرون زدن^۲ تقویت کننده و یا گسیختگی^۳ آن وجود دارد که برخی از آنها نظیر پل زدن و گسیختگی، کمتر برای ذرات کروی صلبی نظیر سیلیس اتفاق می‌افتد؛ ولی ممکن است در برخی از نانو ذرات نرم و الاستیک، مشابه آنچه که در شکل ۲-۱۵ دیده می‌شود، رخ دهد.

¹ Particle bridging

² Pull out

³ Rupture



شکل ۲-۱۵: شماتیکی از پل زدن در نانو ذرات کروی [۱۱۷].

انتظار می‌رود اندازه‌ی نانوذرات نیز نقش اساسی در نوع مکانیزم عمل کننده در نانوکامپوزیت‌های پایه اپوکسی ایفا کنند. برای مثال، مطالعه‌ی انجام شده توسط یانگ نشان می‌دهد که نانوذرات کوچکتر خواص کامپوزیت‌ها را بخاطر افزایش سطح مشترک بین سطح ذرات سیلیکا و زمینه پلیمری، بهبود می‌بخشند [۱۱۸]. هرچند که تحقیقی از لیانگ [۶۱] درباره تأثیر اندازه ذرات در بازه ۲۰ nm تا ۸۰ nm به روی مکانیزم مؤثر نشان می‌دهد که این امر، نه بروی چقرمگی شکست و نه بروی مدول یانگ تأثیری ندارد. این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که تأثیر اندازه ذرات پرکننده، به ویژه در مقیاس نانو، هنوز خوب شناخته نشده است. بنابراین، تحقیقات بیشتری نیاز است تا نقش اندازه ذرات روی مکانیزم‌های مؤثر در نانوکامپوزیت‌های پلیمری مشخص شود. همچنین، نتایج تحقیقات پژوهشگران نشان می‌دهد که توافق و تفاهم اندکی در مورد تأثیر اندازه ذرات روی مکانیزم‌های مؤثر سیستم‌های اپوکسی پر شده با نانو سیلیکا وجود دارد.

با توجه به مروری که بر ادبیات موضوع شد، ملاحظه می‌شود که تاکنون تحقیقی بر روی اثر تقویت یک ماده زمینه با ترکیبی از اندازه ذرات مختلف از یک پرکننده در مقیاس نانو انجام نشده است. لذا در این رساله، نانوذرات سیلیس با سه اندازه متوسط ۱۷ nm، ۲۵ nm و ۶۵ nm، در ترکیبات مختلف، برای تقویت رزین اپوکسی دی گلیسیدیل اتر بیسفنول A مورد استفاده قرار گرفته و اثر این ترکیبات مختلف بر رفتار مکانیکی این کامپوزیت‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که بازه اندازه ذرات با قطر متوسط ۱۷ nm، ۲۵ nm و ۶۵ nm، به ترتیب، ۱۵-۲۰ nm، ۲۰-۳۰ و نهایتاً ۶۰-۷۰ nm است.

فصل ۳

روش‌های مدل‌سازی ریاضی

و

بهینه‌سازی

۳-۱ مقدمه

در چند دهه اخیر با پیشرفت کامپیوتر و علوم محاسباتی شاهد حرکتی مستمر از تحقیقات صرفاً آزمایشگاهی به تحقیقات شبیه سازی کاربردی، بخصوص در زمینه هایی بوده ایم که هزینه های پیاده سازی نسبتاً بالایی داشته و یا به راحتی قابل پیاده سازی نیستند. با توجه به این موضوع، علاقه فزاینده ای به مدل سازی در توسعه تئوریک سیستم هایی که مبتنی بر داده های تجربی هستند ایجاد شده است. روش شبکه عصبی مصنوعی^۱ با بهره گیری از ساختار مغز بشر بوجود آمده و روش سطح پاسخ^۲ مبنایی کاملاً ریاضی- آماری دارد. مدل سازی به تنهایی هدف نیست و معمولاً پس از طراحی آن، سعی در بهینه سازی پارامترهای فرآیند ساخت یا تولید و یا محصول خروجی مدل است. بهینه سازی خود روش های بسیار متنوعی دارد که می توان در یک جمع بندی کلی به روش های هوش مصنوعی و روش های ریاضی اشاره کرد. الگوریتم ژنتیک، از روش های هوش مصنوعی و بهینه سازی سطح پاسخ، از روش های ریاضی مورد استفاده قرار گرفته در این رساله هستند.

۳-۲ شبکه عصبی مصنوعی (ANN)

مغز انسان، از واحدهای پایه و کوچکی به نام نرون^۳ تشکیل شده و تقریباً دارای 10^{10} نرون است و هر نرون تقریباً به 10^4 نرون دیگر اتصال دارد. نرون عنصر اصلی مغز است که به تنهایی مانند یک واحد پردازش منطقی عمل می کند. هر نرون پذیرای ورودی های متعددی است که با یکدیگر جمع می شوند. اگر در یک لحظه، ورودی های نرون به حد کفایت برسد، نرون فعال می شود؛ در غیر این صورت نرون به صورت غیر فعال و آرام باقی می ماند.

شبکه عصبی مصنوعی، ساختاری متشکل از تعدادی واحد (نرون مصنوعی) است که به هم وصل شده اند. هر واحد دارای یک مشخصه ورودی/خروجی می باشد و محاسبه یا عملی منطقی را اجرا می کند.

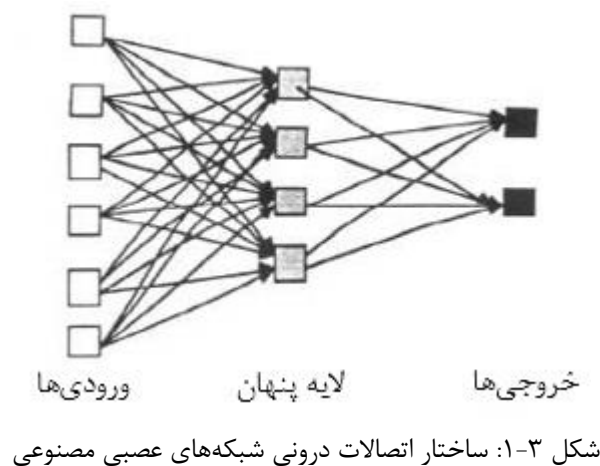
¹ Artificial Neural Network

² Response Surface Method

³ Neuron

خروجی هر واحد با توجه به پارامترهایی نظیر مشخصه ذاتی واحد، اتصالات درونی آن به سایر واحدها و ورودی‌های خارجی تعیین می‌گردد. ANN خانواده‌ای متشکل از شبکه‌های گوناگون می‌باشد. عملکرد کلی شبکه‌های عصبی مصنوعی، توسط ساختار اتصالات درونی شبکه، خصوصیات نرون منفرد و الگوریتم یادگیری و داده‌های آموزش معین می‌شود.

مدل کلی محاسبات شامل اتصالات درونی قابل تغییر بین نرون‌هاست. شکل ۱-۳، یک شبکه فرضی با مقیاس کوچک را نشان می‌دهد که در آن نرون‌ها به صورت مربع و اتصالات درونی به وسیله خطوط نشان داده شده‌اند. باید توجه داشت که در شکل ۱-۳ بعضی نرون‌ها به صورت مستقیم با دنیای بیرون در ارتباطند، در حالی که سایرین مخفی یا درونی هستند.



پارامتر مهم دیگر در شبکه، الگوریتم یادگیری است. به عبارت دیگر، آموزش سیستم به صورت اعداد یا وزن در اتصالات داخلی شبکه ذخیره می‌گردد. یک سیستم عصبی برای کاربردی بودن، باید توانایی ذخیره اطلاعات را داشته باشد؛ به این مفهوم که وزن‌های بدست آمده در آموزش باید قابل ذخیره باشد تا بعداً در زمانی که الگوی جدیدی به منظور تشخیص یا طبقه‌بندی به آنها عرضه شد، همواره رفتاری صحیح ارائه دهند.

بنابراین، هدف در مرحله آموزش شبکه، گسترش یک ساختار درونی است که شبکه را قادر سازد تا الگوهای جدید و مشابه داده‌های تجربی مرحله آموزش را به طرز صحیحی پیش‌بینی یا طبقه‌بندی کند.

۳-۲-۱ کاربردهای شبکه عصبی مصنوعی

نگاهی جامع به همه کاربردهای شبکه‌های عصبی مصنوعی در تحقیقات انجام شده غیر ممکن است اما در یک نگاه گذرا برخی از این کاربردها عبارتند از:

پردازش تصویر و تصاویر رایانه‌ای: شامل مقایسه تصاویر، پیش پردازش، تحلیل تصاویر رایانه‌ای،

فشرده سازی تصویر، بینایی سه بعدی، پردازش و درک تصاویر متغیر با زمان.

پردازش سیگنال: شامل تحلیل سیگنال‌های مختلف اعم از حیاتی یا الکترونیکی مخابراتی.

تشخیص الگو: شامل استخراج طرح، طبقه بندی و تحلیل سیگنال رادار، شناسایی و تشخیص صدا،

شناسایی اثر انگشت، تشخیص شاخص (حرف یا عدد) و تحلیل دستخط [۱۱۹].

پزشکی: شامل تحلیل سیگنال الکتروکاردیوگراف و فهم و تشخیص بیماری‌های گوناگون و پردازش

تصاویر پزشکی [۱۲۰].

سیستم‌های نظامی: شامل تشخیص مین در زیر دریا، طبقه بندی اغتشاشات رادار و تشخیص مکالمات

رمزی.

سیستم‌های مالی: شامل بررسی سهام بازار، تعیین قیمت واقعی موجودی، صدور کارت اعتباری و

امنیت تجارت [۱۲۱].

هوش مصنوعی: شامل سیستم‌های قیاسی و پیاده‌سازی سیستم‌های خبره [۱۲۲].

سیستم‌های انتقال و توزیع برق: شامل پیش‌بینی وضعیت سیستم، تشخیص حالت‌های گذرا و طبقه

بندی، شناسایی و رفع خطا، پیش‌بینی بار و تشخیص ایمنی.

مدل‌سازی: شامل پیش‌بینی خروجی از روی تعدادی از پارامترهای ورودی که ممکن است عددی یا

کیفی باشند.

۳-۲-۲ فواید و معایب شبکه‌های عصبی مصنوعی

از آنجا که شبکه‌های عصبی مصنوعی، الگوهای محاسباتی نسبتاً جدیدی هستند، می‌توان گفت که فواید، کاربردها و روابط آنها با محاسبات مرسوم هنوز کاملاً شناخته نشده است. عنوان این مطلب که شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توانند همهٔ مسائل، یا حتی تمامی مسائل نگاشت را به صورت استدلال خودکار حل کنند، غیر واقعی است. معایب شبکه‌های عصبی را می‌توان به صورت زیر عنوان کرد:

- عدم وجود قواعد صریح یا راهنمایی‌های طراحی برای کاربرد مورد نظر
- عدم بدست آوردن یک فرمول صریح یا رابطه ریاضی مشخص
- عدم وجود روشی عمومی برای آموزش شبکه
- آموزش ممکن است در برخی موارد مشکل یا حتی غیرممکن باشد

۳-۲-۳ پیاده‌سازی شبکه

در کاربردهای واقعی، طراحی سیستم ANN، کاری مشکل و معمولاً همراه با تکرار و سعی و خطا است. پارامترهای طراحی ANN به صورت معمول عبارتند از:

- ۱- ساختار اتصالات درونی
- ۲- خصوصیات یک واحد یا همان نرون (واحدهای مختلف ممکن است در درون شبکه و بین قسمت‌های فرعی شبکه مانند لایه‌ها، متفاوت باشند).
- ۳- الگوریتم آموزش.
- ۴- مجموعه‌های آزمایش و آموزش.
- ۵- نمایش(های) ورودی/خروجی و پیش و پس پردازش.

۳-۳ روش سطح پاسخ (RSM)

روش سطح پاسخ، مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی و آماری است که در ساخت مدل‌های ریاضی از اطلاعات تجربی استفاده می‌کند. در صورتیکه روال آزمایش‌ها درست و با دقت طراحی شده باشد و

خروجی‌های هر آزمایش به صورت دقیق گرفته شود، می‌توان مدلی ریاضی ساخت که با تعیین ضرایب آن حداقل خطا بین خروجی مدل ریاضی و نتایج آزمایشگاهی وجود داشته باشد. این روش نخستین بار توسط باکس و دراپر [۱۲۳] تعریف شد و سپس به دلیل کاربردهای مختلف آن به سرعت گسترش یافت. ونتر و همکاران [۱۲۴] نیز امتیازات RSM را برای طراحی بهینه نقاط و فرآیند آزمایش نشان دادند. بیان ریاضی روش سطح پاسخ به ترتیب زیر است:

$$\hat{y}_{(x)} = \sum_{i=1}^N B_i \phi_i(x) \quad (۱-۳)$$

$$L = \sum_{i=1}^m \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^m \left[y_i - \sum_{j=1}^N B_j \phi_j(x) \right]^2 \quad (۲-۳)$$

$\hat{y}_{(x)}$ مقدار خروجی فرمول ریاضی مورد نظر به ازاء بردار ورودی x است. $\phi_i(x)$ توابع مشخصه مدل است که در اینجا معلوم فرض شده و در حالت کلی هر تابع ریاضی می‌تواند باشد. B_i ضرایب هر تابع است که به کمک رابطه $\frac{\partial L}{\partial B_i} = 0$ محاسبه می‌شود. B_i ها را به نام ضرایب رگرسیون نیز می‌شناسند. L پارامتری است که مجموع خطای سیستم را نشان می‌دهد و معمولاً مجموع توان دوم کل خطاها برای آن در نظر گرفته می‌شود. ε_i خطای بین نتایج تجربی (y_i) در نقاط طراحی و تقریب مدل RSM است. در نهایت رابطه ۲-۳ بیان می‌کند که مجموعه‌ای از B_i قابل قبول است که به ازاء آنها L حداقل مقدار ممکن شود. N تعداد توابع پایه و M تعداد نمونه‌های آزمایش است.

۳-۳-۱ تابع مشخصه

یکی از مهمترین و درعین حال سخت‌ترین مراحل در روش سطح پاسخ، حدس یا تقریب زدن توابع ϕ_i در معادله ۱-۳ است. در بسیاری از موارد برای سهولت کار و با توجه به اینکه توابع مشخصه عموماً باید توابع خوش رفتار واقعی باشند و این چنین توابعی دارای مشتقات در همه نقاط و البته پیوستگی هستند، از توابع خطی درجه یک و دو کمک گرفته می‌شود. در چنین حالتی ϕ_i در معادله ۱-۳، ترکیب توان‌های خطی متغیرهای موجود در بردار x با درجات مختلف می‌باشند. بدیهی است هر چه

تابع پیچیده‌تر باشد درجه انتخابی برای ترکیب متغیرها نیز بیشتر خواهد بود. برای نمونه در حالت ۳ متغیره که مورد استفاده ما در این رساله بوده، در درجات ۱ و ۲ خواهیم داشت:

$$N = 1 \rightarrow y = \sum_{i=1}^3 B_i X_i^1(x) + b \quad 3-3$$

$$N = 2 \rightarrow y = \sum_{i=1}^3 B_{i1} X_i^1 + \sum_{i=1}^3 B_{i2} X_i^2 + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i+1}^3 B_{i,j} X_i X_j + b \quad 4-3$$

که رابطه ۳-۳ بیانگر سطح پاسخ خطی و رابطه ۴-۳، سطح پاسخ مربعی است. لازم به ذکر است که متغیرهای مورد استفاده در بحث مدل‌سازی در این رساله، X_1 ، X_2 و X_3 بوده که به ترتیب معرف درصد وزنی نانوذرات ۱۷ nm، ۲۵ nm و ۶۵ nm است و به تفصیل در فصل ۵ به آن پرداخته شده است.

۴-۳ الگوریتم ژنتیک

به دنبال پیشرفت سریع علوم مختلف در قرن بیستم، توابع غیرخطی و غیرتحلیلی مختلفی از معادلات ریاضی که توصیف‌کننده پدیده‌های مختلف در طبیعت بود، ابداع شدند که برای طراحی‌های مختلف مهندسی نیاز به حل آنها و یافتن پاسخ بود. به تدریج معادلات توصیف‌کننده سیستم‌های طبیعی کامل‌تر شدند و این موجب افزایش درجات آزادی و پارامترهای مختلف موجود در سیستم شد. از سوی دیگر نیاز به بهینه‌سازی هر ساختار موجب می‌شد که در یک فضای نمونه گسترده و براساس دقت مورد نظر طراح، تابع مربوطه یا سیستم خاص مورد بحث، بارها مورد تحلیل عددی یا تجربی قرار گیرد که این امر از نظر زمانی و اقتصادی بسیار غیر بهینه بود. در حدود ۶۰ سال پیش اولین ایده‌های الگوریتم ژنتیک با بهره‌گیری و الهام از ساختارهای طبیعی بوجود آمد. در روش‌های معمول آنالیز ریاضی بر اساس نوع سیستم و دقت مورد نظر طراح، سیستم باید با تعدادی تکرار در مقادیر پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار گیرد که این امر در بسیاری از سیستم‌های با پیچیدگی بالا، زمان‌بر، غیر اقتصادی و مردود می‌باشد. از سوی دیگر روش حل نیز بر اساس مسأله مورد بحث تغییر می‌یابد که این امر برای کسانی که فقط نیازمند حل مسأله خود هستند و بعضاً تسلط کافی به آنالیز ریاضی ندارند مشکل‌ساز می‌باشد.

الگوریتم ژنتیک به عنوان روشی نسبتاً بهینه، پربازده و موثر با قابلیت بکارگیری در طیف بسیار گسترده-ای از مسائل به عنوان روشی بسیار کارا برای اکثر محققین و طراحان علوم مختلف قابل استفاده است [۱۲۵-۱۳۰].

۳-۵ بهینه‌سازی مبتنی بر سطح پاسخ

الگوریتم‌های ریاضی مختلفی برای مینیمم کردن توابع چند متغیره با قبول قیود خطی وجود دارد که این قیود می‌تواند شامل بیشینه و کمینه برای هر متغیر و یا جمع و تفریق خطی تعدادی از متغیرها باشد [۱۳۱-۱۳۵]. پایه این روش‌ها در نرم افزار مطلب، دستور fmincon است.

۳-۶ معیار خطای مدل

خطای عددی در مدل اعم از شبکه عصبی یا RSM می‌تواند بخاطر انتخاب توابع پایه، نقاط طراحی و یا روش حداقل مربعات باشد. دقت مدل را می‌توان به کمک چندین معیار سنجید. به عنوان مثال، خطای نسبی^۱ (RE) با معادله

$$RE = \frac{[\hat{y}(x) - y(x)]}{y(x)} \quad (3-5)$$

بیان می‌شود، بطوریکه $\hat{y}(x)$ تقریب مبتنی بر مدل بوده و $y(x)$ پاسخ بدست آمده از نتایج تجربی است.

ضمناً می‌توان از روش‌های تحلیل آماری نظیر ANOVA^۲ [۱۳۶ و ۱۳۷] برای بررسی قابلیت مدل جهت تشخیص اثرات پارامترهای طراحی روی پاسخ کمک گرفت. همچنین می‌توان از برخی پارامترهای آماری دیگر که در زیر به تعدادی از آنها اشاره شده است، جهت تخمین خطا استفاده کرد [۱۰۱].

$$SSE = \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3-6)$$

^۱ Relative error

^۲ Analysis of variance

$$SST = \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (۷-۳)$$

$$MSE = \frac{SST}{m} \quad (۸-۳)$$

که $\bar{y}_i$ میانگین مقادیر تجربی y_i ها می باشد. توانایی مدل توسط پارامترهای زیر بررسی می شود:

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (۹-۳)$$

$$R_{adj}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{m-1}{m-p-1} \quad (۱۰-۳)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{SSE}{m-p-1}} \quad (۱۱-۳)$$

P تعداد ضرایب محاسبه شده در مدل و m تعداد مقادیر تجربی اندازه گیری شده در سری های مختلف

است. هر چه مقدار R^2 و R_{adj}^2 بیشتر و $RMSE^1$ کمتر باشد جواب دقیق تر است [۱۳۷ و ۱۳۵].

¹ Root mean square error

فصل ۴

ساخت نمونه‌ها

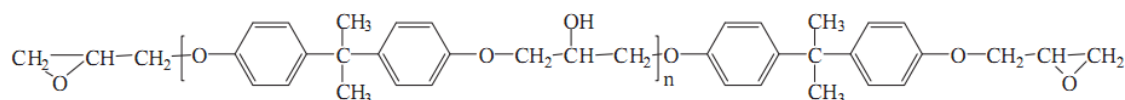
و

آزمایش‌های تجربی

۴-۱ مواد

در این پژوهش، پلیمر ترموست بر پایه‌ی بیسفنول A و از نوع دی گلیسیدیل اتر بیسفنول A (DGEBA)، با افزودن نانوذرات کروی SiO_2 تا ۶ درصد وزنی، تقویت شده است. رزین اپوکسی با نام تجاری ML-504، با وزن مخصوص 1.19 g/mol و چگالی 1.11 gr/cm^3 بوده که از شرکت مواد مهندسی مکرر، تهران، تهیه شد. علت انتخاب این رزین، پایین بودن نسبی ویسکوزیته آن نسبت به سایر موارد موجود است که این امر به محققین این امکان را داد تا به راحتی بتوانند از آن در سیستم‌های قالبگیری حساس و ظریف استفاده نموده بدون آنکه در مدل بدست آمده ایراد و نقصی به جای بماند. این نوع از رزین‌ها معمولاً مقاومت خوبی نسبت به مواد شیمیایی (اسیدها، بازها، چربی‌ها) دارند، لذا یکی از کاربردهای ویژه آنها در پوشش‌های مختلف است. از طرف دیگر، این رزین مقاومت بسیار خوبی نسبت به آب و رطوبت دارد. همچنین در زمان پخت، رزین اپوکسی بر پایه بیسفنول A، جمع شدگی حجمی^۱ کمی نسبت به سایر پایه‌های اپوکسی داشته و نیز حساسیت کمی نسبت به دمای محیط از خود نشان می‌دهد.

دی گلیسیدیل اتر بیسفنول A از واکنش اپی‌کلروهیدرین^۲ با بیسفنول A در حضور کاتالیزورهای پایه تولید می‌شود [۹]. شکل ۴-۱ ساختار شیمیایی DGEBA را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱: ساختار شیمیایی DGEBA [۹].

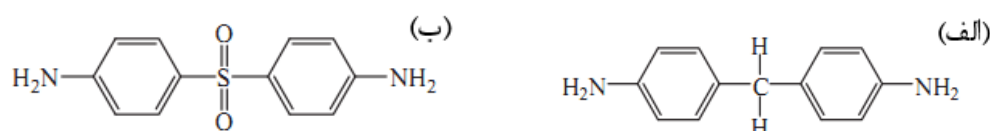
خاصیت رزین DGEBA به تعداد واحدهای تکرار شونده آن بستگی دارد. مولکول‌های با وزن مولکولی پایین تمایل به مایع بودن داشته و مولکول‌های با وزن مولکولی بالا، تمایل به جامد بودن و یا مایع بودن با ویسکوزیته بالا را دارند [۱۹].

¹ Shrinkage

² Epichlorohydrin

عامل پخت پلی آمینی بکار رفته با نام تجاری HA-12 نیز از شرکت مواد مهندسی مکر، تهران، تهیه شد. عامل پخت، واکنش‌های پخت رزین اپوکسی را توزیع و کنترل می‌کند. در حین فرآیند پخت، تغییرات برگشت‌ناپذیری در رزین اپوکسی رخ می‌دهد. دمای انتقال شیشه رزین اپوکسی پخته شده، به ساختار مولکولی عامل پخت بستگی دارد [۱۳۸]. عوامل پخت بر مبنای ترکیب شیمیایی به انواع آمینی^۱، آلکالی^۲، انیدریدی^۳ و کاتالیستی^۴ تقسیم می‌شوند. از آنجا که عامل پخت مورد استفاده در این رساله از نوع آمینی است، لذا به اختصار توضیحاتی راجع به این گونه ارائه شده است.

عوامل پخت آمینی یکی از عوامل پخت پایه برای رزین‌های اپوکسی هستند که به سه دسته آلفاتیک^۵، آروماتیک^۶ و سیکلو آلفاتیک^۷ تقسیم می‌شوند. عامل پخت آمینی با حلقه اپوکسایدی که در انتهای مونومرها و یا زنجیره‌های پلیمری وجود دارد، وارد واکنش می‌شود. شکل ۴-۲، ساختار شیمیایی دو نوع عامل پخت آمینی (الف) DDM و (ب) DDS را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲: ساختار شیمیایی عامل پخت آمینی (الف) DDM و (ب) DDS [۹].

سیستم پخت رزین اپوکسی شامل یک سری از واکنش‌های شیمیایی گروه‌های اپوکساید در رزین اپوکسی است که از طریق ایجاد پیوندهای عرضی^۸ فراوان باعث شکل‌گیری شبکه‌های سه بعدی می‌شوند. شکل ۴-۳ مکانیزم واکنش پخت آمین و اپوکساید را نشان می‌دهد [۹].

¹ Amine

² Alkali

³ Anhydrides

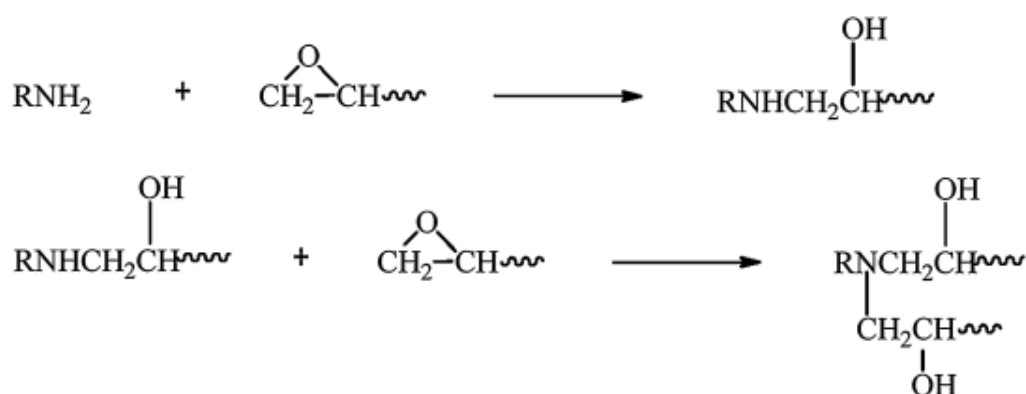
⁴ Catalytic

⁵ Aliphatic

⁶ Aromatic

⁷ Cycloaliphatic

⁸ Crosslink



شکل ۴-۳: مکانیزم واکنش پخت آمین و اپوکساید [۹].

با توجه به غلظت پایین رزین انتخابی، امکان استفاده‌ی آن به همراه انواع پرکننده‌های معدنی فراهم است. از این‌رو، نانوذرات کروی با قطر متوسط ۱۷ nm، ۲۵ nm و ۶۵ nm و با خلوص ۹۹/۵٪ از شرکت US-NANO، آمریکا، تهیه شده که دارای ساختار آمورف هستند. چگالی نانوذرات مورد استفاده ۲/۴ gr/cm³ است.

۲-۴ طراحی آزمایش

هدف از این طراحی این است که تأثیر ۳ متغیر مختلف از اندازه ذره با کدهای S، M و L، بر خواص مکانیکی مختلف نانو کامپوزیت بررسی گردد. محدودیت درصد وزنی نانو ذرات جهت تقویت کامپوزیت، بر اساس نتایج حاصل از آزمایشات اولیه، ۶٪ بدست آمد. لذا با فرض ۵ سطح متفاوت، شامل سطوح ۰، ۱/۵، ۳، ۴/۵ و ۶ برای هر سه متغیر و ترکیبات آنها، توسط نرم افزار Design expert به روش CCD Central Composite Design (CCD) یک روند آزمایش طراحی شده است. لازم به توضیح است که به علت نزدیکی قطر ذرات S و M، حالت ترکیبی این دو ذره از طراحی حذف شد که این موضوع به صورت یک قید به نرم افزار داده شد. در روش CCD، با تعیین ۳ متغیر در جایگاه متغیرها و نیز با قرار دادن پارامتر alpha برابر با ۲ و محدوده ۰ تا ۶ برای ۳ متغیر، میزان ۱۹ طرح آزمایشی بدست آمد که ساخت نمونه‌ها بر این مبنا انجام شد. در شکل ۴-۴ این طراحی آورده شده است.

File Edit View Display Options Design Tools Help						
Notes for MyDesign.dx7						
Design (Actual)	Std	Run	Block	Factor 1 A:S	Factor 2 B:L	Factor 3 C:M
Summary	13	1	Block 1	0.00	0.00	0.00
Graph Columns	5	2	Block 1	1.50	0.00	0.00
Evaluation	15	3	Block 1	3.00	0.00	0.00
Analysis	19	4	Block 1	4.50	0.00	0.00
R1 (Analyzed)	16	5	Block 1	6.00	0.00	0.00
Optimization	4	6	Block 1	0.00	1.50	0.00
Numerical	1	7	Block 1	0.00	3.00	0.00
Graphical	11	8	Block 1	0.00	4.50	0.00
Point Prediction	7	9	Block 1	0.00	6.00	0.00
	17	10	Block 1	0.00	0.00	1.50
	12	11	Block 1	0.00	0.00	3.00
	8	12	Block 1	0.00	0.00	4.50
	2	13	Block 1	0.00	0.00	6.00
	3	14	Block 1	1.50	1.50	0.00
	10	15	Block 1	1.50	3.00	0.00
	6	16	Block 1	1.50	4.50	0.00
	14	17	Block 1	0.00	1.50	1.50
	18	18	Block 1	0.00	3.00	1.50
	9	19	Block 1	0.00	4.50	1.50

شکل ۴-۴: طراحی پیشنهادی نرم افزار Design expert به روش Central Composite Design.

۳-۴ آماده سازی نمونه ها

جهت تهیه نانوکامپوزیت، رزین و نانوذرات سیلیکا با درصد وزنی مورد نظر، توسط یک همزن مکانیکی، به مدت حدوداً یک ساعت، در دمای محیط و با سرعت ۱۰۰۰ rpm، با یکدیگر ترکیب شدند. در ضمن ترکیب مواد، جهت توزیع بهتر ذرات در زمینه پلیمری، از سویالسیتین^۱ به عنوان عامل توزیع به میزان یک درصد وزنی نانوذرات استفاده شد. سویالسیتین ضمن اینکه در ترکیبات شیمیایی وارد نمی شود، با باردار کردن سطح ذرات، باعث می شود که ذرات به یکدیگر نچسبند. سپس ترکیب به مدت دو ساعت

¹ Soya Lecithin

درون پمپ خلاء دسیکاتور قرار گرفته تا گازهای احتمالی که در مرحله هم‌زدن مواد وارد ترکیب شده، خارج گردد. در ادامه، هاردنر پلی آمینی HA-12 را به ترکیب اضافه کرده و اجازه داده شد تا ترکیب بصورت مکانیکی تحت خلأ به مدت پنج دقیقه هم زده شود. سرانجام، ترکیب در قالب‌های از پیش ساخته شده که واکس قالب نیز به عنوان عامل رهاساز به آن زده شده بود، قالب‌گیری شد. مدت زمان پخت اولیه نمونه‌ها در دمای محیط ۲۴ ساعت است که بعد از آن می‌توان آنها را از قالب خارج کرده و جهت پخت نهایی محصول، می‌بایست به آنها هفت روز فرصت داد.

۴-۴ ساخت قالب سیلیکونی

در این پژوهش، ابتدا ساخت قالب‌های فلزی در دستور کار قرار گرفت ولی علی‌رغم دقت بالایی که نمونه‌های ساخته شده توسط این قالب‌ها داشت، با توجه به سختی خارج کردن نمونه‌ها پس از هر بار قالب‌گیری (نمونه‌ها باید طوری از قالب خارج شوند که هیچ‌گونه تنش پسماندی در آنها نماند) و تمیز کردن قالب‌ها برای قالب‌گیری نمونه‌های سری بعد، قالب‌های سیلیکونی جایگزین شدند.

نحوه ساخت قالب سیلیکونی در شکل ۴-۵ و در طی ۶ مرحله نشان داده شده است. برای ساخت این قالب‌ها، ابتدا باید رزین سیلیکونی که مایعی شیری رنگ است به مدت حدوداً یک ساعت توسط همزن مکانیکی هم زده شود. بعد از آن باید هاردنر را به رزین اضافه کرد. در زمستان باید میزان هاردنر ۵ درصد وزنی و در تابستان بین ۳ تا ۳/۵ درصد وزنی رزین سیلیکونی باشد. بعد از اضافه شدن هاردنر به رزین، جهت یکنواخت شدن ترکیب، لازم است که حدود ۵ دقیقه هم زده شود؛ باید توجه داشت که اگر ترکیب زیاد هم زده شود، سفت خواهد شد (مرحله ۱). در ادامه ترکیب را به مدت ۵ دقیقه داخل پمپ خلأ دسیکاتور گذاشته تا حباب‌هایی که در زمان هم‌زدن وارد ترکیب شده‌اند، خارج شوند (مرحله ۲). پس از آن نمونه‌های از پیش آماده شده، که ممکن است از جنس فلز تراشیده شده باشند را روی یک شیشه تمیز چسبانده (مرحله ۳) و دور آن را با یک قاب چوبی محصور کرده و با خمیر بازی آنرا از زیر نشت بندی می‌کنیم (مرحله ۴). در ادامه ترکیب آماده شده را داخل این محفظه می‌ریزیم؛ به اندازه ای که حداقل ۵ mm بالاتر از سطح نمونه‌های چسبانده شده را بپوشاند (مرحله ۵).

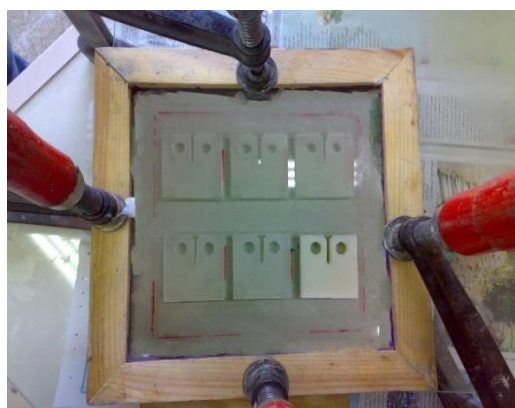
حال به مدت ۲۴ ساعت اجازه داده می‌شود تا ترکیب خود را کاملاً بگیرد. پس از این مدت، قالب چوبی را باز کرده و قالب از روی شیشه جدا می‌شود (مرحله ۶). اکنون قالب با دقت مناسبی آماده ساخت نمونه است.



۲



۱



۴



۳



۶



۵

شکل ۴-۵: مراحل ۱ تا ۶ ساخت قالب سیلیکونی

۴-۵ آزمایش کشش

آزمایش کشش یکی از آزمایش‌ها در حوزه تعیین رفتار مکانیکی مواد است که در آن یک نمونه تحت اثر کشش تک محوری تا حد شکست مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از آزمون به طور معمول برای انتخاب یک ماده به منظور کنترل کیفیت و پیش بینی اینکه یک ماده تحت بارگذاری چه واکنشی از خود نشان می‌دهد به کار می‌رود. از این آزمایش خواصی نظیر مدول یانگ، استحکام تسلیم، مقاومت کششی نهایی، استحکام شکست و غیره بدست می‌آید.

در این پژوهش، آزمایش کشش بر اساس استاندارد ASTM D638 [۱۳۹] و توسط یک دستگاه سروویدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ انجام شد. تمام نمونه‌ها به شکل استخوان سگ^۱ و در ابعاد $185 \times 19 \times 3$ mm تهیه شدند که نقشه آنها در شکل ۴-۶ ارائه شده است.



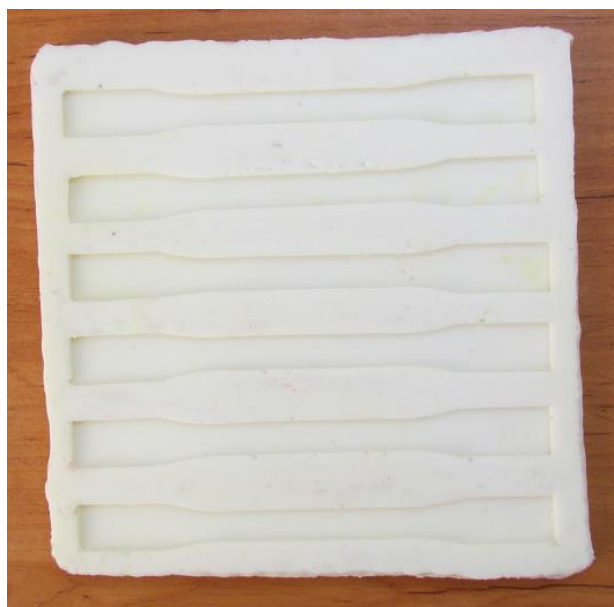
شکل ۴-۶: نقشه و ابعاد ساخت نمونه آزمایش کشش

در این پژوهش دو نوع قالب برای ساخت نمونه‌های آزمایش کشش مورد استفاده قرار گرفت. قالب نخست، یک قالب فلزی دو تکه بود که توسط وایرکات ساخته و سنگ‌زنی شده بود که تصویر آن را می‌توان در شکل ۴-۷ مشاهده کرد. در ابتدا این قالب برای ساخت نمونه‌ها مورد استفاده قرار می‌گرفت ولی همانطور که پیشتر ذکر شد، علی‌رغم دقت بالایی که نمونه‌های ساخته شده توسط این قالب داشت، با توجه به سختی خارج کردن نمونه‌ها پس از هر بار قالبگیری و تنش‌های پسماند احتمالی باقیمانده در نمونه‌ها، ساخت قالب‌های سیلیکونی در دستور کار قرار گرفت که شرح ساخت آنها به تفصیل در بخش ۴-۳ ارائه شد. شکل ۴-۸، قالب‌های سیلیکونی مورد استفاده را می‌دهد.

¹ Dog-bone Shape



شکل ۴-۷: قالب تهیه نمونه آزمایش کشش بر اساس استاندارد ASTM D 638



شکل ۴-۸: قالب سیلیکونی ساخت نمونه‌های آزمایش کشش

به منظور اطمینان از تکرارپذیری آزمایش، برای هر ترکیبی از مواد، حداقل چهار نمونه مورد آزمایش قرار گرفته است. آزمایش‌ها در دمای محیط و با نرخ 5 mm/min انجام شده است. کرنش سنج طولی مورد استفاده دارای طول سنجه^۱ 50 mm بوده است. بر طبق استاندارد، مدول یانگ هر نمونه که نشان دهنده سفتی یک ماده است، از شیب قسمت خطی نمودار تنش-کرنش در تنش‌های پایین بدست آمده است. شکل ۴-۹، کلیه نمونه‌های تهیه شده برای آزمایش کشش را نشان می‌دهد.

¹ Gage



شکل ۴-۹: نمونه‌های تهیه شده برای آزمایش کشش

شکل ۴-۱۰، دستگاه سروهیدرولیک اینسترون و نحوه بستن نمونه به دستگاه را در حال انجام آزمایش کشش نشان می‌دهد. دستگاه دارای ظرفیت 250 kN است، که برای بهبود دقت، از نیروسنج کوچک‌تر با ظرفیت 25 kN و دقت $\pm 1 \text{ N}$ استفاده شده است. شکل ۴-۱۰ ب، نحوه بستن طول‌سنج^۱ به نمونه را با بزرگنمایی بهتری نشان می‌دهد.

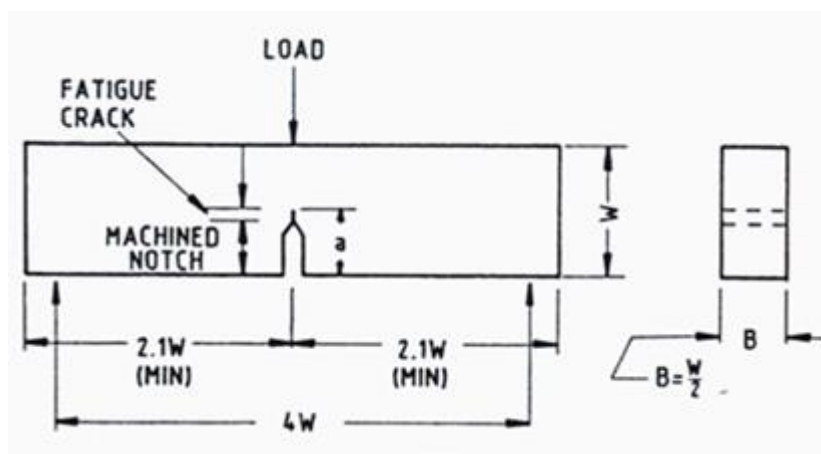


شکل ۴-۱۰: الف) نمونه تحت آزمایش کشش توسط دستگاه سروهیدرولیک اینسترون ب) بزرگنمایی

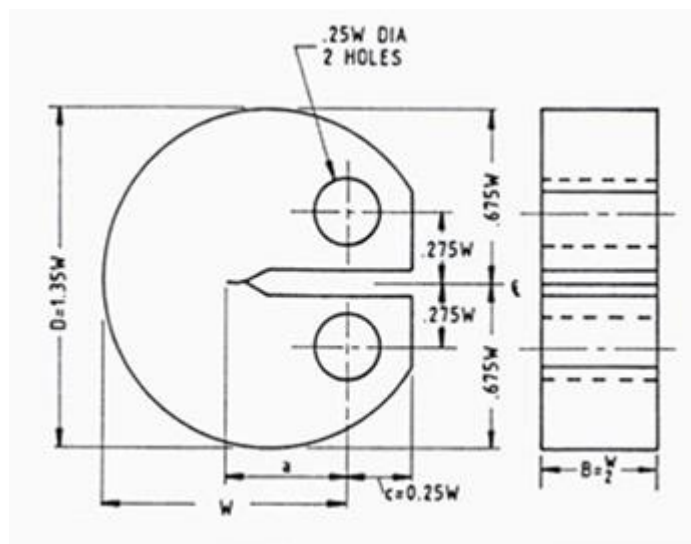
¹ Extensometer

۴-۶ آزمایش چقرمگی شکست و انرژی شکست

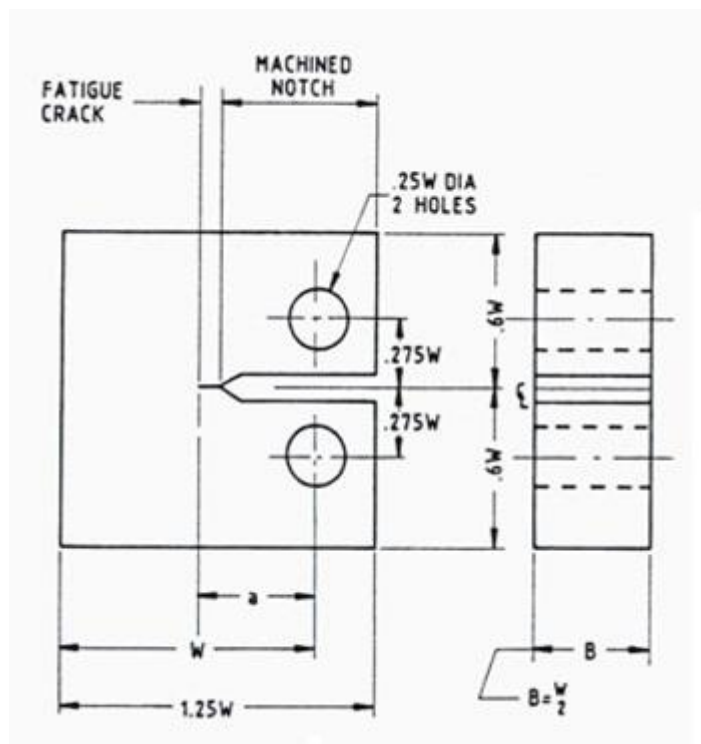
چقرمگی خاصیتی است که مقاومت ماده را در برابر رشد ترک، هنگامیکه تحت تنش قرار می‌گیرد، نشان می‌دهد. آزمایش چقرمگی شکست بر اساس استاندارد ASTM D5045 [۱۴۰] و توسط یک دستگاه سروهیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ انجام شده است. بر اساس این استاندارد، از نمونه‌هایی با چهار هندسه متفاوت که در شکل ۴-۱۱، الف تا د، نشان داده شده، می‌توان استفاده کرد که در این پژوهش از نمونه استاندارد کشش-فشار (شکل ۴-۱۱ ج) استفاده شده است.



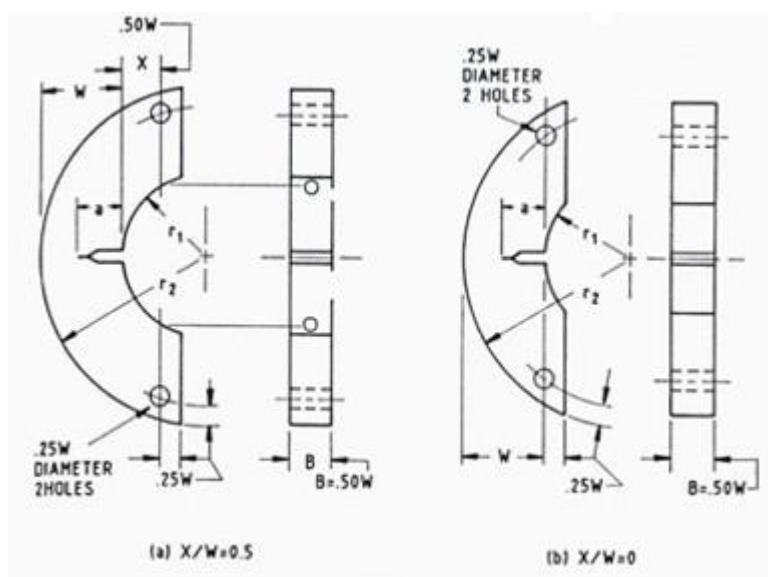
(الف) نمونه دارای شکاف تک از پهلوی (SENB)



(ب) نمونه فشرده کششی دیسکی



(ج) نمونه کشش-فشار



(د) نمونه قوسی شکل

شکل ۴- ۱۱: نمونه‌های استاندارد آزمایش چقرمگی شکست [۱۴۱]

کلیه نمونه‌ها با ضخامت $B=9 \text{ mm}$ و $W=49 \text{ mm}$ قالب گیری شده اند. البته لازم بذکر است که ابعاد انتخابی با توجه به شرایط مذکور در استاندارد ASTM D5045 و همچنین مروری بر ادبیات موضوع، طوری انتخاب شده‌اند که آزمایش در حالت کرنش صفحه‌ای باشد؛ در غیر اینصورت

آزمایش فاقد اعتبار خواهد بود. البته نحوه اعتبار سنجی مقادیر بدست آمده به گونه‌ای است که باید

معادلات

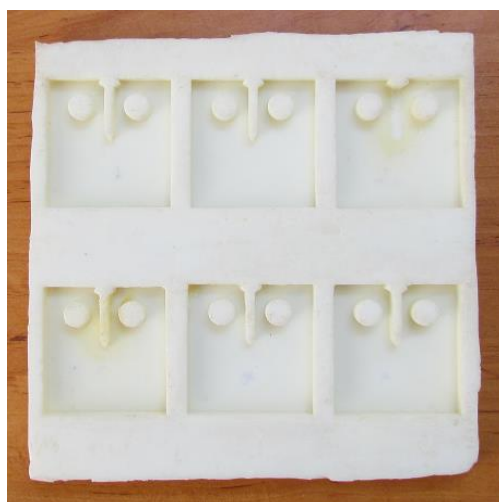
$$a \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2$$

$$B \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2$$

$$W \geq 5.0 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2$$

ارضاء گردد [۱۴۱]. در شکل ۴-۱۲، قالب سیلیکونی ساخته شده برای تهیه نمونه‌های آزمایش

چقرمگی شکست و در شکل ۴-۱۳، نمونه‌های تهیه شده توسط این قالب نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۲: قالب سیلیکونی ساخت نمونه‌های آزمایش چقرمگی شکست



شکل ۴-۱۳: نمونه‌های آماده شده برای آزمایش چقرمگی شکست

شکل ۴-۱۴، دستگاه سروهیدرولیک اینسترون و نحوه بستن نمونه به دستگاه را در حال انجام آزمایش چقرمگی شکست نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل ملاحظه می‌شود،^۱ CTOD گنج، برای ثبت هر لحظه‌ی باز شدن دهانه ترک، بدان متصل شده است.



شکل ۴-۱۴: نمونه تحت آزمایش چقرمگی شکست توسط دستگاه اینسترون ۸۸۰۲

آزمایش‌ها در دمای محیط و با نرخ ۱ mm/min انجام شده است. لازم به ذکر است که پیش از آنکه نمونه‌ها برای آزمایش به دستگاه بسته شوند، ترک نوک تیزی به طول a به اندازه‌ی $0.45W \leq a \leq 0.55W$ توسط یک تیغ تیز صورت تراشی با زدن ضربات آهسته به نوک ترک، ایجاد شده است [۱۴۰].

شکل ۴-۱۵، کلیه نمونه‌های آماده شده برای آزمایش چقرمگی شکست را نشان می‌دهد. برای هر ترکیب، شش نمونه ساخته شده و با توجه به اینکه در برخی از نمونه‌ها ترک مناسبی ایجاد نشده و آن نمونه مناسب آزمایش نبود، برای هر ترکیب، حداقل چهار نمونه مورد آزمایش قرار گرفت.

^۱ Crack Tip Opening Displacement



شکل ۴-۱۵: نمونه‌های آماده شده برای آزمایش چقرمگی شکست

انرژی شکست (G_{IC}) که معادل انرژی هدر رفته در حین شکست بر واحد سطح جدید ایجاد شده است، از معادله

$$G_{IC} = \frac{K_{IC}^2}{E} (1 - \nu^2) \quad (۴-۱)$$

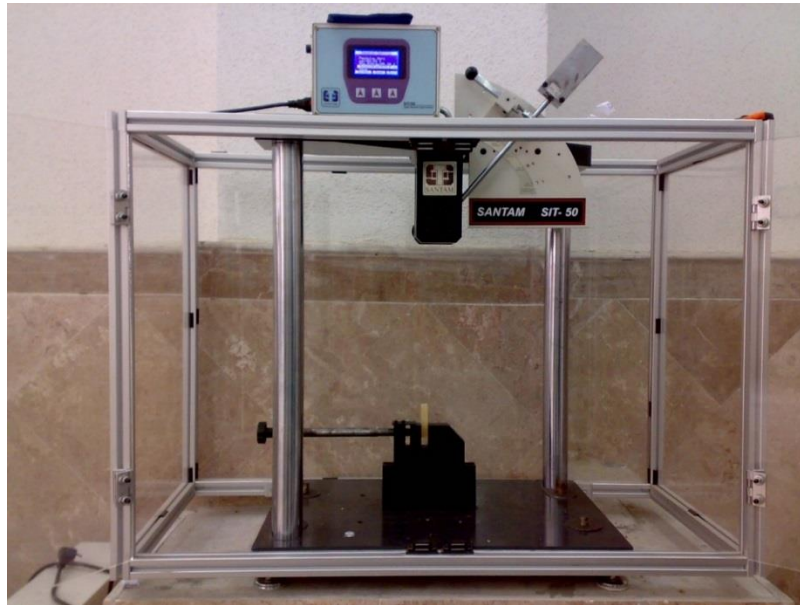
محاسبه می‌شود [۱۴۱] که E مدول یانگ کامپوزیت و ν ضریب پواسن اپوکسی است که ۰/۳۹ در نظر گرفته شده است [۵۱، ۶۰ و ۶۵].

۴-۷ آزمایش ضربه

ضربه نیرویی است که بصورت یک بار دینامیکی در مدت زمان کوتاهی به جسم وارد می‌گردد. یکی از مسائل مهم در صنعت که باعث خسارات زیادی می‌شود، شکستن قطعات بر اثر تردی جنس آنها می‌باشد. هر چه انرژی لازم برای شکستن یک قطعه زیادتر باشد، نمونه نرم‌تر و یا به اصطلاح چقرمه‌تر بوده و برعکس هر چه انرژی لازم کمتر باشد، نمونه تردتر است.

آزمون ضربه، یکی از روش‌های استاندارد برای تعیین انرژی شکست مواد است. به منظور تعیین استحکام ضربه، نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM D256 [۱۴۲] ساخته شده و آزمایش‌ها به کمک

یک دستگاه آزمایش ضربه آیزود SIT-50، ساخت شرکت سنتام ایران، انجام شده است. این دستگاه به همراه یک نمونه تحت آزمایش در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است.

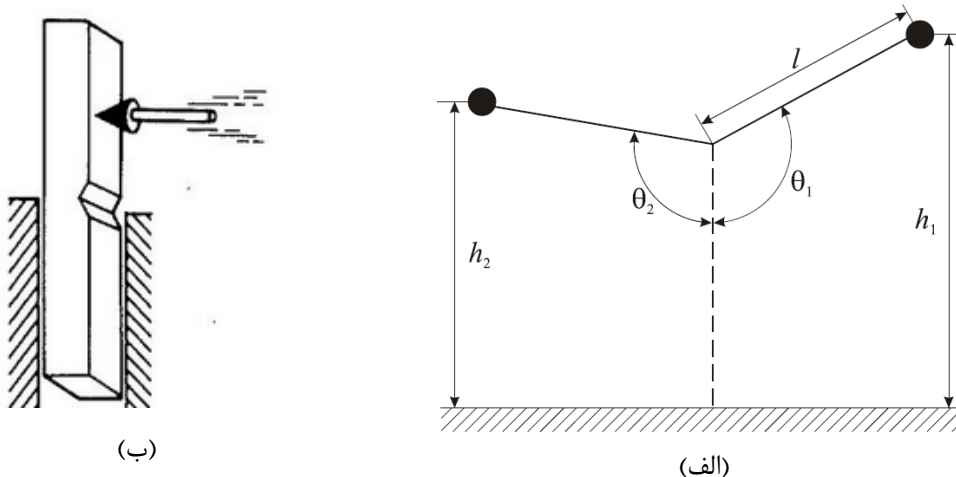


شکل ۴-۱۶: دستگاه تست ضربه SIT-50

اساس کار این دستگاه، همانطور که در شکل ۴-۱۷ مشاهده می‌شود، به این ترتیب است که چکشی با وزن معلوم و از یک ارتفاع اولیه مشخص به صورت پاندولی رها شده و به نمونه آزمایشی اصابت می‌کند و بعد از شکستن نمونه تا ارتفاع ثانویه بالا می‌رود. مقدار انرژی جذب شده در هنگام شکست توسط نمونه، از میزان اختلاف ارتفاع اولیه و ثانویه آونگ بدست می‌آید؛ بدین ترتیب که انرژی جذب شده، طبق معادله ۴-۲، برابر است با حاصلضرب وزن پاندول در اختلاف ارتفاع مرکز ثقل پاندول:

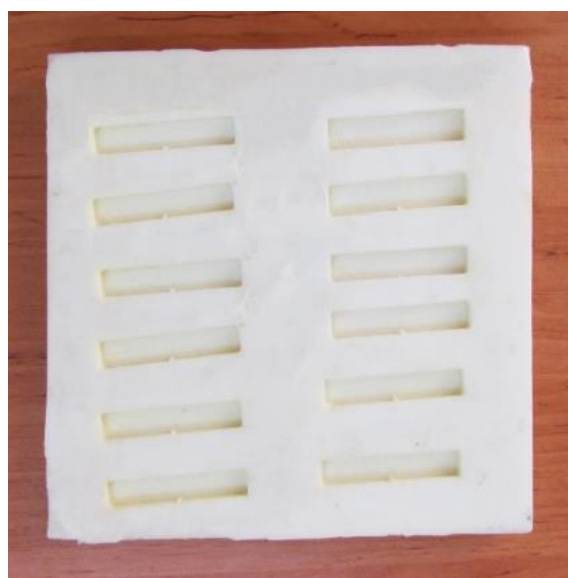
$$E = E_1 - E_2 = Mg(h_1 - h_2) \quad (۴-۲)$$

که در این رابطه، M جرم پاندول (بر حسب کیلوگرم)، g شتاب گرانش زمین (m/s^2) و h فاصله مرکز جرم پاندول تا پایین ترین وضعیت پاندول (حالت افقی) و بر حسب متر است. نتیجه آزمایش ضربه به صورت انرژی جذب شده در واحد سطح، در صفحه نمایش دستگاه، بصورت دیجیتالی، نمایش داده می‌شود که متداول ترین واحد آن کیلوژول بر مترمربع (kJ/m^2) است.

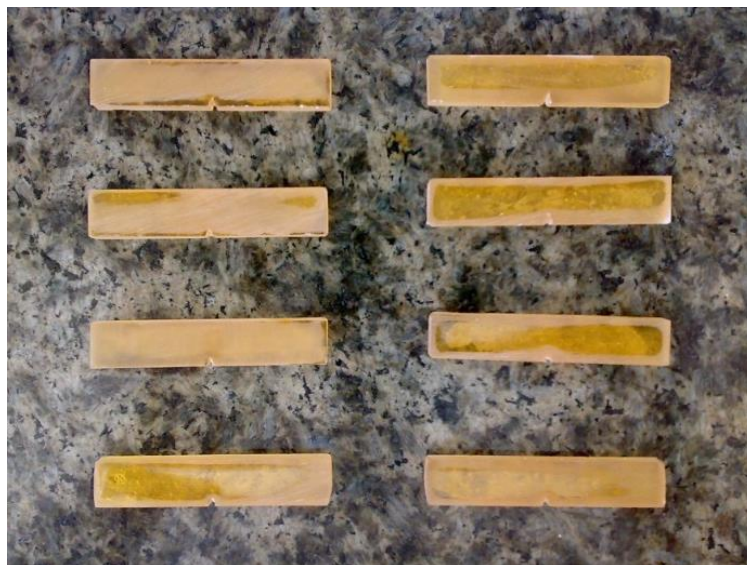


شکل ۴-۱۷: (الف) شماتیک اساس کار دستگاه آزمایش ضربه. (ب) نحوه بستن نمونه به دستگاه و برخورد چکش

مقطع نمونه‌های ساخته شده به شکل مربع با طول ضلع ۱۰ mm و طول آنها ۶۰ mm در نظر گرفته شد. در شکل ۴-۱۸ قالب سیلیکونی ساخته شده برای تهیه نمونه‌های آزمایش ضربه نشان داده شده است. همچنین در این نمونه‌ها، یک شیار V شکل به عمق ۲ mm و با زاویه های ۹۰ درجه وجود دارد. ممکن است نتایج آزمون‌های ضربه دارای پراکندگی زیادی باشد، لذا توصیه می‌شود میانگین نتایج شش تا ده آزمایش گزارش شوند. در این تحقیق هشت نمونه برای هر سری مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۴-۱۹ تعدادی از این نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۸: قالب سیلیکونی ساخت نمونه‌های آزمایش ضربه



شکل ۴-۱۹: نمونه‌های آماده شده برای آزمایش ضربه با هشت مرتبه تکرار

۴-۸ آزمایش جذب انرژی

جهت بررسی میزان جذب انرژی در سازه‌های کامپوزیتی، آزمایش فروپاشی لوله بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. تحقیقات متعددی در مورد قابلیت جذب انرژی پوسته‌هایی با مقطع مربع انجام شده است ولی در مورد جاذب‌های انرژی ساخته شده از نانوکامپوزیت‌ها، تحقیقات کمی وجود دارد و این امر عمدتاً به دلیل مشکل بودن تولید اینگونه از جاذب‌ها است. بنابراین با توجه به مطالعه‌ای که انجام شده است، این تحقیق، اولین گزارش را در مورد قابلیت جذب انرژی سازه‌های جدارنازک ساخته شده از نانوکامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با نانوذرات سیلیس ارائه می‌دهد.

در این رساله، قابلیت جذب انرژی سازه‌های جدار نازک با دو هندسه قوطی و مخروط ناقص مورد بررسی قرار گرفته است. برای ساخت نمونه‌های قوطی شکل، قالب سه تکه آلومینیومی ریخته‌گری شده و به صورتی که در شکل ۴-۲۰ ملاحظه می‌شود، تراشیده شده است.



شکل ۴-۲۰: قالب آلومینیومی برای ساخت نمونه‌های جدار نازک قوطی شکل

همچنین برای ساخت نمونه‌های مخروطی شکل، قالب دو تکه فولادی ساخته شد که تصویر آن را در شکل ۴-۲۱ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۱: قالب فولادی برای ساخت نمونه‌های جدار نازک قوطی شکل

نمونه‌های قوطی شکل دارای ضلع داخلی مقطع به طول ۲۰ mm و ضخامت پوسته ۳ mm می‌باشند. همچنین لازم به ذکر است که نمونه‌ها در دو ارتفاع ۶۰ mm و ۹۰ mm ساخته شده و تأثیر ارتفاع نیز در قابلیت جذب انرژی نمونه‌های قوطی شکل بررسی شده است.

همچنین، نمونه‌های مخروطی ساخته شده همگی دارای مشخصات ارتفاع ۱۰۹ mm، قطر داخلی کوچک ۴۴ mm، قطر داخلی بزرگ ۶۰ mm و ضخامت پوسته ۲/۵ mm هستند.

در شکل ۴-۲۲ یک سری نمونه کامپوزیتی قوطی شکل و در شکل ۴-۲۳ یک سری نمونه کامپوزیتی مخروطی شکل نشان داده شده است. تکرار برای هر نمونه چهار مرتبه است. آزمایش‌های جذب انرژی توسط یک دستگاه سروهیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ انجام شده است. نمونه‌ها همانطور که در شکل ۴-۲۴ نشان داده شده‌اند، بین دو صفحه فولادی قرار گرفته و با نرخ ۵ mm/min تحت فشار شبه استاتیکی قرار گرفته‌اند.



شکل ۴-۲۲: نمونه نانوکامپوزیتی قوطی شکل با دو ارتفاع ۶۰ و ۹۰ mm.



شکل ۴-۲۳: نمونه‌های کامپوزیتی مخروطی شکل



(ب) نمونه مخروطی



(الف) نمونه قوطی شکل

شکل ۴-۲۴: آزمایش جذب انرژی توسط دستگاه سروهیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲

فصل ۵

تحليل نتائج

۵-۱ نتایج تجربی

۵-۱-۱ آزمایش کشش

در آغاز بررسی نتایج، لازم به ذکر است که در تمام آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، کدگذاری نمونه‌ها به این ترتیب است که در کامپوزیت‌های تقویت شده با یک اندازه ذره، کامپوزیت‌های حاوی نانوذرات با اندازه متوسط ۱۷ nm، با حرف S، کامپوزیت‌های حاوی نانوذرات با اندازه متوسط ۲۵ nm، با حرف M و کامپوزیت‌های حاوی نانوذرات با اندازه متوسط ۶۵ nm، با حرف L نشان داده شده‌اند. همچنین در کامپوزیت‌های تقویت شده با دو اندازه ذره متفاوت، کلیه کامپوزیت‌ها دارای ۱/۵ درصد وزنی از نانوذرات ۶۵ nm بوده که سعی شده فضای بین آنها با درصدهای مختلفی از نانوذرات کوچکتر (۱۷ nm و ۲۵ nm) و در مجموع تا ۶ درصد وزنی، پر شود. در یک سری از این نانوکامپوزیت‌ها از حروف L و S و در سری دیگر از حروف L و M، که بیانگر دو اندازه ذره موجود می‌باشد، استفاده شده است. همچنین، عدد نشان داده شده در پشت هر حرف، مبین درصد وزنی نانوذرات سیلیکا بکار رفته در ترکیب است. کد NE نیز معرف اپوکسی خالص است.

در گزارش نتایج این فصل، مقدار کسر حجمی نانوذرات بکار رفته در هر ترکیب نیز گزارش شده است.

کسر حجمی نانوذرات از روی درصد وزنی آنها و به کمک رابطه ۵-۱ به دست می‌آید [۶۸]:

$$Vol\% = \frac{100x}{x + (100 - x)\left(\frac{\rho_f}{\rho_m}\right)} \quad (۵-۱)$$

که در آن X درصد وزنی نانوذرات و ρ_f و ρ_m به ترتیب چگالی نانوذرات و رزین اپوکسی می‌باشد. با توجه به رابطه فوق، مقدار کسر حجمی معادل با درصد وزنی‌های ۱/۵، ۳، ۴/۵ و ۶ به ترتیب برابر با ۰/۶۹، ۱/۴۱، ۲/۱۳ و ۲/۸۶ خواهد بود.

مقادیر مدول یانگ و استحکام شکست بدست آمده از آزمایش کشش برای تمام نمونه‌ها که بر اساس استاندارد ASTM D638 انجام شده است، در جدول ۵-۱ نشان داده شده است. همانطور که در بخش ۴-۱ نیز اشاره شده، بر طبق استاندارد مذکور، مدول یانگ از شیب خط مماس بر نمودار

تنش-کرنش در تنش‌های پایین بدست آمده است. مقدار مدول یانگ بدست آمده برای نمونه اپوکسی خالص، ۱۵۲۱ MPa است و همانطور که از نتایج این جدول برمی‌آید، با افزودن نانوذرات سیلیکا به اپوکسی، مدول یانگ افزایش یافته است. همچنین از نتایج این جدول ملاحظه می‌شود که با افزودن محتوای ذرات نیز بر مقدار مدول یانگ افزوده شده است. اما ملاحظه می‌شود که اندازه ذرات تأثیر قابل توجهی بر مدول یانگ ندارد. پیشتر نیز توسط سایر محققین، نتایج مشابهی از تأثیر ناچیز اندازه ذرات بر مدول یانگ گزارش شده است [۶۲ و ۶۴]. اعداد نشان داده شده در پرانتز انحراف معیار است.

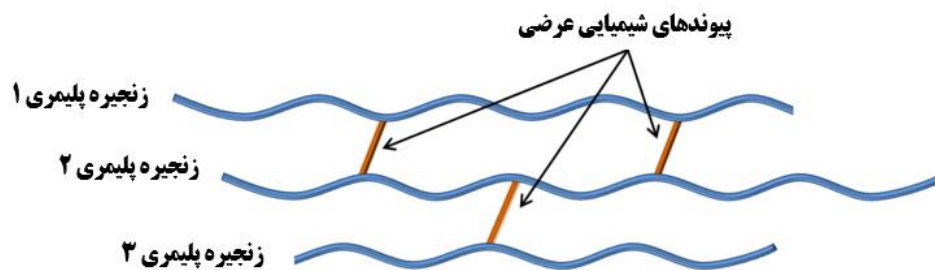
جدول ۵-۱: مدول یانگ و استحکام شکست بدست آمده از آزمایش کشش

شماره نمونه	کد نمونه	کسر حجمی (Vol%)	مدول یانگ (MPa)	استحکام شکست، σ_y (MPa)
۱	NE	۰	۱۵۲۱(۳۳/۵۹)	۲۰/۳(۰/۳۴)
۲	۱/۵ % S	۰/۶۹۹	۱۵۴۷(۴۶/۶۶)	۱۹/۶(۰/۲۹)
۳	۳/۰ % S	۱/۴۱	۱۵۸۹(۱۶/۱۲)	۱۹/۹(۰/۳۴)
۴	۴/۵ % S	۲/۱۳	۱۶۰۵(۲۲/۷۰)	۱۹/۲(۰/۴۲)
۵	۶/۰ % S	۲/۸۶	۱۷۱۲(۴۱/۸۷)	۱۹/۷(۰/۴۱)
۶	۱/۵ % M	۰/۶۹۹	۱۵۵۵(۳۲/۵۳)	۱۹/۵(۰/۲۰)
۷	۳/۰ % M	۱/۴۱	۱۵۸۱(۴۳/۲۲)	۱۹/۹(۰/۵۱)
۸	۴/۵ % M	۲/۱۳	۱۵۹۹(۳۶/۷۰)	۱۹/۷(۰/۳۰)
۹	۶/۰ % M	۲/۸۶	۱۷۰۸(۵۰/۰۱)	۱۹/۶(۰/۷۸)
۱۰	۱/۵ % L	۰/۶۹۹	۱۵۳۵(۴۳/۱۷)	۲۰/۱(۰/۳۹)
۱۱	۳/۰ % L	۱/۴۱	۱۵۷۲(۵۱/۲۲)	۱۹/۵(۰/۴۰)
۱۲	۴/۵ % L	۲/۱۳	۱۵۹۱(۳۷/۲۸)	۲۰/۴(۰/۷۹)
۱۳	۶/۰ % L	۲/۸۶	۱۶۸۴(۶۰/۱۶)	۲۰/۲(۰/۳۴)
۱۴	۱/۵% L-۱/۵%S	۱/۴۱	۱۵۶۵(۳۵/۵۸)	۱۹/۸(۰/۴۴)
۱۵	۱/۵% L-۳%S	۲/۱۳	۱۶۳۳(۳۷/۰۵)	۲۰/۳(۰/۷۸)
۱۶	۱/۵% L-۴/۵%S	۲/۸۶	۱۷۲۳(۷۴/۸۳)	۱۹/۱(۰/۵۰)
۱۷	۱/۵% L-۱/۵%M	۱/۴۱	۱۵۶۸(۳۲/۲۵)	۱۹/۵(۰/۹۴)
۱۸	۱/۵% L-۳%M	۲/۱۳	۱۶۲۶(۲۱/۹۲)	۱۹/۸(۰/۴۰)
۱۹	۱/۵% L-۴/۵%M	۲/۸۶	۱۶۹۷(۵۲/۶۶)	۱۹/۴(۰/۳۸)

علت افزایش مدول ینگ با افزودن نانوذرات سیلیس و همینطور با افزایش محتوای ذرات را می‌توان از دیدگاه پیوندهای موجود بررسی کرد.

همانطور که پیشتر ذکر شد، خانواده رزین اپوکسی، نوعی از پلیمرهای گرماسخت هستند که از مونومرهایی با جرم های مولکولی و فرمول های شیمیایی متفاوت تشکیل شده‌اند که نقطه مشترک آنها وجود گروه شیمیایی در انتهای زنجیره‌های آنهاست. مونومرها بر حسب جرم مولکولی خود دارای طول زنجیر متفاوتی از یکدیگر هستند. پیش از ترکیب شدن با هاردنر (جزء سخت کننده)، پیوندی بین زنجیره‌های مونومری وجود ندارد. به عبارت دیگر، اجزاء اولیه و تشکیل دهنده اپوکسی‌ها، مولکول‌هایی هستند که می‌توانند با تشکیل پیوندهای شیمیایی، زنجیره‌های پلیمری را به صورت شبکه‌های سه بعدی به وجود آورند که طول این زنجیره‌ها به تعداد واحدهای تکرار شونده آنها بستگی دارد.

پس از افزوده شدن هاردنر، که عامل پخت می‌باشد، این جزء با حلقه اپوکسایدی که در انتهای مونومرها و یا زنجیره‌های پلیمری وجود دارد، وارد واکنش می‌شود و در نتیجه پیوندهای شیمیایی بین این زنجیره‌های پلیمری ایجاد می‌گردد که به صورت پیوندهای عرضی^۱ بوده و از جنس پیوندهای کووالانسی هستند. شکل ۵-۱ شماتیک این موضوع را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، پس از افزوده شدن هاردنر، رزین اپوکسی پخته می‌شود و به شکل جامد در می‌آید.



شکل ۵-۱: چگونگی تشکیل پیوندهای شیمیایی عرضی بین زنجیره‌های پلیمری

¹ Cross-link

هنگامی که یک نمونه ساخته شده از اپوکسی خالص، تحت بار کششی قرار می‌گیرد، زنجیره‌ها با حرکت کردن، سعی می‌کنند که خود را در راستای نیروی اعمالی قرار داده و به نظم‌آرایی^۱ جدیدی برسند. به بیانی ساده تر، شبکه سه بعدی تشکیل شده اپوکسی، مانند تورهای دو بعدی هستند که در بعضی نقاط به یکدیگر اتصال دارند و یک مجموعه‌ی سه بعدی و آمورف را به وجود می‌آورند. با اعمال نیروی کششی در هنگام بارگذاری، زنجیره‌های مولکولی سعی می‌کنند که در راستای بارگذاری قرار گیرند.

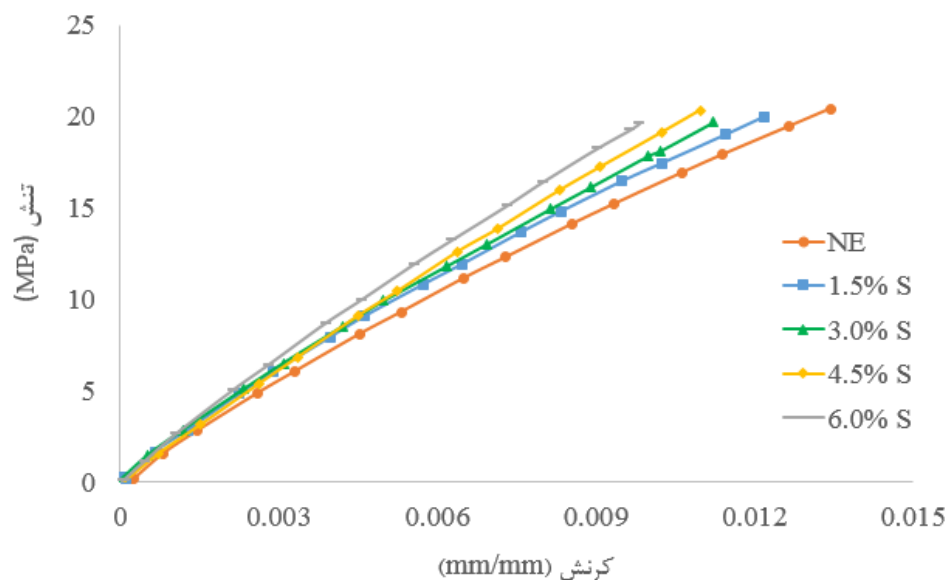
وجود حجم های خالی^۲ در ساختار مولکولی پلیمرها، محل مناسبی برای قرار گرفتن نانوذرات می باشد؛ اگر چه مولکول پلیمرها در هنگام تشکیل، می‌توانند اطراف نانوذرات را نیز احاطه کنند. لازم به ذکر است که با توجه به این که سیلیس به کار رفته در این تحقیق دارای گروه عاملی نبوده، میل به ترکیب شیمیایی با پلیمر اپوکسی را ندارد و لذا پیوند شیمیایی بین آنها به وجود نخواهد آمد و اختلاط تنها از نوع فیزیکی است. به این ترتیب، تنها دو حالت می‌توان برای نانوذرات متصور شد که یا نانوذره در فضای خالی پلیمر قرار می‌گیرد و یا به صورت ذرات تقویت کننده که پلیمر در اطراف آن وجود دارد، در داخل زمینه پلیمری توزیع می‌شود.

در حین بارگذاری و در شرایطی که فضای خالی بین این زنجیره‌ها با ذرات صلبی مثل نانوذرات سیلیس پر شده است، این ذرات صلب تحرک زنجیره‌ها را کم می‌کنند و اصطلاحاً باعث به وجود آمدن قفل‌های مکانیکی می‌شوند. در حقیقت، این ذرات، روی این پیوندها و در فضای بین زنجیره‌ها قرار می‌گیرند و در هنگام بارگذاری باعث کندی حرکت زنجیره‌ها می‌شوند و زنجیره‌ها نمی‌توانند به راحتی خود را در راستای نیرو قرار دهند. بنابراین نانوذرات کمتر اجازه می‌دهند که زنجیره‌ها در راستای نیرو قرار گیرند و لذا پیوندها بر اثر فشاری که نانوذرات می‌آورند و همچنین افزایش شدید نیرو، می‌شکند.

¹ Orientation

² Free Volume

این پدیده همچنین باعث می‌شود که کشیدگی^۱ نمونه کم شده و به عبارتی موجب افزایش صلیبت ماده می‌شود. حال هر چه بر محتوای ذرات افزوده می‌شود، در هنگام بارگذاری، زنجیره‌ها کمتر می‌توانند خود را در راستای نیرو قرار دهند و بنابراین باز هم کشیدگی نمونه کمتر شده و مدول یانگ افزایش می‌یابد. به عنوان نمونه، نمودار تغییرات تنش-کرنش کامپوزیت‌های سری S در مقایسه با اپوکسی خالص در شکل ۵-۲ نشان داده شده است. همانطور که از این شکل پیداست، رفتار نمونه‌ها کاملاً ترد و شکننده است و انعطاف‌پذیری خاصی در نمونه‌ها مشاهده نمی‌شود. از طرف دیگر، مشاهده می‌شود که با افزوده شدن محتوای ذرات، مقدار کشش نمونه‌ها کم شده است.

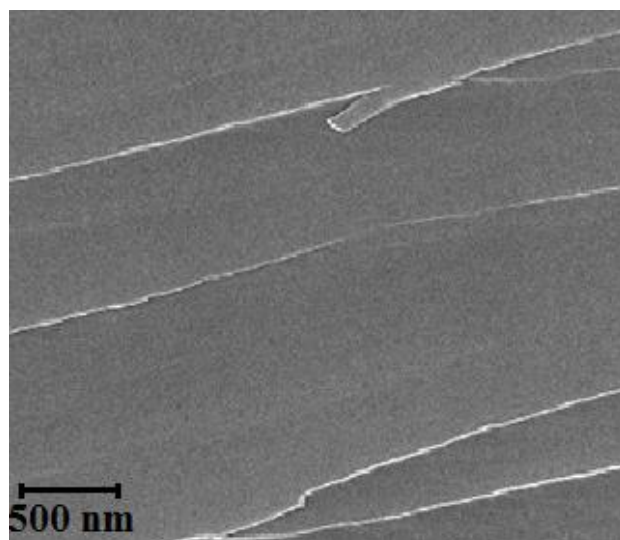


شکل ۵-۲: نمودار تغییرات تنش-کرنش کامپوزیت‌های سری S در مقایسه با اپوکسی خالص

سطح شکست نمونه‌ها توسط یک میکروسکوپ الکترونی روبشی (Scanning Electron Microscopy) به نام VEGA3 TESCAN، مورد بررسی قرار گرفته است. تمام نمونه‌ها پیش از تحلیل توسط یک لایه نازک طلا به ضخامت حدوداً ۵ nm، روکش داده شده‌اند تا امکان تصویربرداری بهتر فراهم شود. ولتاژ به کار رفته ۳۰ kV است. شکل ۵-۳، سطح شکست اپوکسی خالص را پس از آزمایش کشش

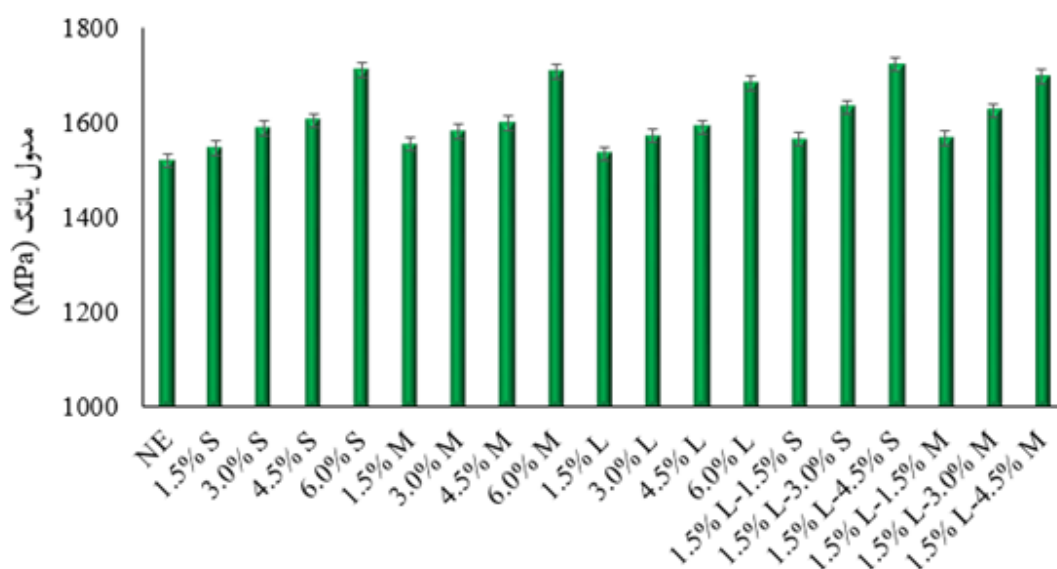
¹ Elongation

نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، سطح شکست در هر مقطع نسبتاً صاف بوده و نمونه‌ای از پلیمر ترموست شکننده را نشان می‌دهد و بیانگر این است که در حین شکست، تغییر شکل پلاستیک در مقیاس وسیع روی نداده است.



شکل ۵-۳: سطح شکست اپوکسی خالص پس از آزمایش کشش

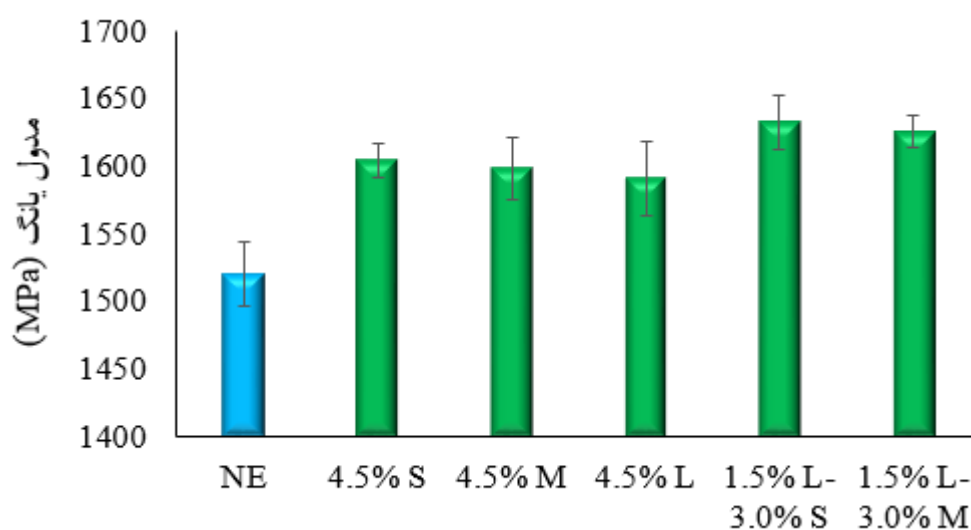
شکل ۵-۴، جهت مقایسه بهتر، روند تغییرات مدول ینگ را برای هر یک از کامپوزیت‌های مورد بررسی نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در تمام سری‌های مورد بررسی، با افزایش محتوای ذرات، مدول ینگ زیاد شده است.



شکل ۵-۴: نمودار تغییرات مدول ینگ برای تمام کامپوزیت‌های مورد بررسی

با دقت در جدول ۵-۱، ملاحظه می‌شود که اندازه ذرات تأثیر زیادی در مدول یانگ ندارد. این موضوع را می‌توان به این علت دانست که عامل اصلی کاهش تحرک زنجیره‌های پلیمری در هنگام بارگذاری، محتوای ذراتی است که در بین زنجیره‌ها قرار می‌گیرند و بنابراین در یک محتوای ثابت ذرات، میزان کاهش تحرک زنجیره‌ها، به میزان زیادی به اندازه ذرات وابسته نیست [۵۱].

اما برای بررسی دقیق‌تر اثر ترکیب تقویت‌کننده‌ها در محتوای ذرات یکسان، در شکل ۵-۵، مقایسه‌ای مابین مدول یانگ نمونه اپوکسی خالص و مدول یانگ کامپوزیت‌های تک ذره‌ای و دو ذره‌ای تقویت شده با ۴/۵ درصد وزنی از ترکیبات مختلف نانوذرات سیلیکا نشان داده شده است. همانطور که از شکل ۵-۵ ملاحظه می‌شود، در بین کامپوزیت‌های تک ذره‌ای، مدول یانگ در کامپوزیت تقویت شده با ذرات ۱۷ nm، اندکی از مدول یانگ کامپوزیت تقویت شده با ذرات ۲۵ nm بیشتر و مدول یانگ کامپوزیت اخیر نیز از مدول یانگ کامپوزیت تقویت شده با ذرات ۶۵ nm اندکی بیشتر است. همچنین در بین کامپوزیت‌های دو ذره‌ای، کامپوزیتی که فضای بین ذرات ۶۵ nm آن با ذرات ۱۷ nm پر شده است، مدول یانگ بالاتری نسبت به کامپوزیتی دارد که فضای بین ذرات ۶۵ nm آن با ذرات ۲۵ nm پر شده است. این موضوع، از یک سو به خاطر سطح تعاملی بیشتر ذرات کوچکتر نسبت به ذرات بزرگتر است که باعث می‌شود تعداد پیوند بیشتری برقرار شود و از سوی دیگر به علت انتقال بهتر بار از زمینه به ذرات کوچکتر است که نتیجه آن افزایش نسبی مدول یانگ است. همچنین از شکل ۵-۵ ملاحظه می‌شود که در یک درصد وزنی یکسان، مدول یانگ کامپوزیت‌های ترکیبی، اندکی از مدول یانگ کامپوزیت‌های تک ذره‌ای بیشتر است. این موضوع نیز نشان می‌دهد، انتقال بار از ماده زمینه به نانوذرات در کامپوزیت‌های ترکیبی بهتر از کامپوزیت‌های تقویت شده با یک نوع نانوذرات انجام می‌شود. در بخش مدلسازی نیز نشان داده خواهد شد که در یک درصد وزنی یکسان، مدول یانگ کامپوزیت‌های ترکیبی بهتر از مدول یانگ کامپوزیت‌های تک ذره خواهد بود و البته این موضوع با افزایش محتوای ذرات مشهودتر خواهد بود.



شکل ۵-۵: مقایسه مدول یانگ در کامپوزیت‌های تک ذره‌ای و دو ذره‌ای تقویت شده با ۴/۵ درصد وزنی از ترکیبات مختلف سیلیکا.

همچنین، با دقت در جدول ۵-۱، ملاحظه می‌شود که در تمام کامپوزیت‌های مورد بررسی، استحکام شکست نه با افزودن نانوذرات سیلیس به اپوکسی و نه با تغییر محتوای آنها، تغییر قابل ملاحظه‌ای از خود نشان نمی‌دهد.

استحکام شکست، تنشی است که در آن نمونه دچار شکست می‌شود [۱۴۳]. از آنجا که ماده مورد بررسی ترد بوده و تغییر شکل پلاستیک قابل توجهی از خود نشان نمی‌دهد، لذا آخرین نقطه در نمودار تنش-کرنش به عنوان نقطه شکست نمونه‌ها گزارش شده است. علت عدم تغییر قابل ملاحظه استحکام شکست با افزودن نانوذرات این است که این پارامتر تابع میزان پیوندهای شیمیایی موجود در ترکیب محصول نهایی است که این پیوندها از جنس پیوندهای کووالانسی هستند. اما از آنجا که با افزودن نانوذرات سیلیس پیوند کووالانسی ایجاد نمی‌شود و کلیه پیوندهای نانوذرات با اپوکسی از جنس پیوندهای ضعیف واندروالس هستند، لذا با افزوده شدن نانوذرات سیلیس و نیز با افزایش محتوای آنها، استحکام تسلیم، تغییر قابل توجهی نمی‌کند.

۵-۱-۱-۱ بررسی برخی از مدل‌های تحلیلی مدول یانگ

مدل‌های تحلیلی زیادی برای پیش‌بینی خواص پلیمرهایی که با نانوذرات خاصی پر شده‌اند، ارائه شده است [۱۴۴-۱۴۸]. در این رساله، مدل‌های تحلیلی هالپین-تسای [۱۴۸] و مدل کرنر [۱۴۵] برای پیش‌بینی مدول نانوکامپوزیت‌ها، مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند؛ زیرا این دو مدل مرسوم‌ترین مدل‌ها برای پلیمرهای پر شده با نانوذرات هستند [۵۱]. این مدل‌ها در ابتدا با مطالعه در مدول الاستیک اپوکسی‌های تقویت شده با نانو ذرات سیلیکا، ارزیابی شدند؛ بطوریکه زمینه و ذرات بصورت الاستیک خطی و ایزوتروپیک فرض می‌شوند.

۵-۱-۱-۱-۱ مدل هالپین-تسای

مدل هالپین-تسای [۵۷] که یکی از مدل‌های مرسوم بکار گرفته شده برای پیش‌بینی مدول یانگ است، با معادله

$$\frac{E_C}{E_m} = \frac{1 + \zeta \eta \nu_f}{1 - \eta \nu_f} \quad (۲-۵)$$

بیان می‌شود، بطوریکه E_C و E_m ، به ترتیب، مدول یانگ کامپوزیت و زمینه پلیمری و ν_f کسر حجمی ذرات کروی است. η با معادله

$$\eta = \frac{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) - 1}{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) + \zeta} \quad (۳-۵)$$

بیان می‌شود، بطوریکه E_f ، مدول یانگ پرکننده و ζ فاکتور شکل است که بصورت $\zeta = 2a$ تعریف می‌شود (a نسبت اضلاع است که برای ذرات کروی برابر یک است). این مدل، مدول یانگ کامپوزیت را بصورت تابعی از مدول و محتوای پرکننده، مدول زمینه و نسبت اضلاع پرکننده در نظر می‌گیرد. بنابراین، این پارامترها، مدل هالپین-تسای را تبدیل به یک مدل تطبیق‌پذیر و فراگیر، به خصوص برای نانوتیوپ‌های کربنی، نانورس‌ها و ذرات کروی سیلیکا [۱۴۹]، می‌کند. از آنجا که مدل مذکور تابع اندازه ذره نیست، لذا مقادیر محاسبه شده مدول یانگ بر طبق این مدل و برای محتوای ذرات ۱/۵، ۳،

۴/۵ و ۶ درصد وزنی (معادل با ۰/۶۹۹، ۱/۴۱، ۲/۱۳ و ۲/۸۶ درصد حجمی)، به ترتیب برابر MPa ۱۵۵۰، ۱۵۸۲ MPa، ۱۶۱۳ MPa و ۱۶۴۶ MPa خواهد بود. برای مقایسه بهتر، پیش‌بینی‌های این مدل و نتایج تجربی در نمودار شکل ۵-۶ ترسیم شده است.

۵-۱-۱-۱-۲ مدل کرنر

مدل مرسوم و معتبر دیگری که برای تخمین مدول یانگ کامپوزیت تقویت شده با نانوذرات کروی به کار می‌رود، مدل کرنر است که با معادله

$$\frac{E_c}{E_m} = \frac{1 + AB\nu_f}{1 - B\nu_f} \quad (۴-۵)$$

ارائه می‌شود که در آن، A ثابتی است که وابسته به هندسه پرکننده و ضریب پواسون ماده زمینه بوده و از معادله $A = \frac{7 - 5\nu_m}{8 - 10\nu_m}$ محاسبه می‌شود و B ثابتی است که به صورت تابعی از مدول نسبی بین

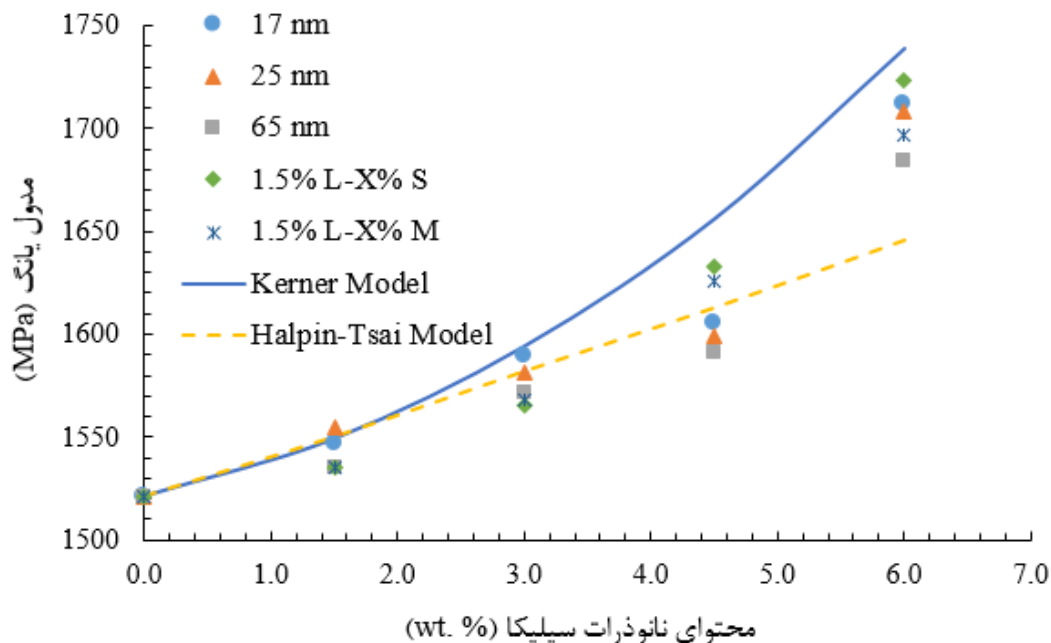
پرکننده و زمینه محاسبه شده و از معادله $B = \frac{(\frac{E_f}{E_m}) - 1}{(\frac{E_f}{E_m}) + A}$ قابل استخراج است. همچنین ψ پارامتری

است که می‌توان آن را از معادله

$$\psi = 1 + \frac{1 - V_m}{V_m^2} \nu_f \quad (۵-۵)$$

محاسبه کرد، که V_m ثابتی است مربوط به هندسه پرکننده که برای نانو ذره کروی سیلیکا برابر ۰/۶۳۷ است [۶۰]. V_m و ν_f ، به ترتیب کسر حجمی ماده زمینه و پرکننده است. با در نظر گرفتن ضریب پواسون معادل ۰/۳۹ [۶۵]، ثابت A برابر عدد ۱/۲۳ خواهد شد. همچنین با توجه به مدول یانگ سیلیکا که برابر ۷۰ GPa [۶۵] و همچنین مقدار مدول یانگ اپوکسی خالص که از آزمایش کشش معادل ۱/۵۲۱ GPa به دست آمد، ثابت B برابر عدد ۰/۹۵ خواهد شد. لذا با توجه به معادله ۵-۳ و دانستن مقدار درصد حجمی نانوذرات بکار رفته، می‌توان مقادیر مدول یانگ را پیش‌بینی کرد. از این‌رو، برای محتوای ذرات ۱/۵، ۳، ۴/۵ و ۶ درصد وزنی (معادل با ۰/۶۹۹، ۱/۴۱، ۲/۱۳ و ۲/۸۶

درصد حجمی)، مقادیر مدول یانگ به ترتیب برابر ۱۵۴۹ MPa، ۱۵۹۶ MPa، ۱۶۵۶ MPa و ۱۷۳۹ MPa خواهد بود. برای مقایسه بهتر، پیش‌بینی‌های این مدل نیز در کنار پیش‌بینی مدل هالپین-تسای و نتایج تجربی، در نمودار شکل ۵-۶ ترسیم شده است.



شکل ۵-۶: مقایسه مدول یانگ ترکیبات مختلف با مدل‌های هالپین-تسای و کرنر در محتوای متفاوت از نانوذرات سیلیکا

۵-۱-۱-۲ مقایسه نتایج تجربی و پیش‌بینی مدل‌های تحلیلی

با توجه به شکل ۵-۶ ملاحظه می‌شود که مدل هالپین-تسای تا ۴/۵ درصد وزنی نانوذرات، پیش‌بینی منطقی‌تری را نسبت به مدل کرنر ارائه می‌دهد و لو اینکه مدول یانگ کامپوزیت را در ۶ درصد وزنی، کمتر پیش‌بینی می‌کند. مطالعه ادبیات موضوع نیز نشان می‌دهد که این مدل در کسر حجمی‌های پایین‌تر پیش‌بینی‌های بهتری را ارائه می‌دهد [۶۰] و با افزایش محتوای ذرات، فراتر پیش‌بینی می‌کند. علت این موضوع به خاطر فرضیات مدل هالپین-تسای است. این مدل فرض می‌کند که فقط دو فاز زمینه و تقویت‌کننده وجود دارد و در نتیجه وجود فاز میانی بین زمینه و پرکننده را در نظر نمی‌گیرد. بنابراین این مدل، فاکتوری در مورد اثر اندازه ذرات و ساختار فاز میانی سیلیکا و اپوکسی، که در حجم بالای ذرات پارامترهای تأثیرگذاری هستند، ندارد. بنابراین، با افزایش محتوای ذرات، بر مقدار فاز میانی

افزوده شده و در نتیجه پیش‌بینی‌های این مدل کمتر از مقادیر تجربی خواهد شد. برخی محققین با اضافه کردن عباراتی، مدل هالپین-تسای را برای تطابق بهتر با داده‌های تجربی اصلاح کردند [۱۴۹ و ۱۵۰] اما این مدل‌های اصلاحی هنوز محدود هستند به کلوخه شدن در حجم بالای پرکننده‌ها، و به طور کل، اعتبار این مدل‌ها هنوز اثبات نشده است.

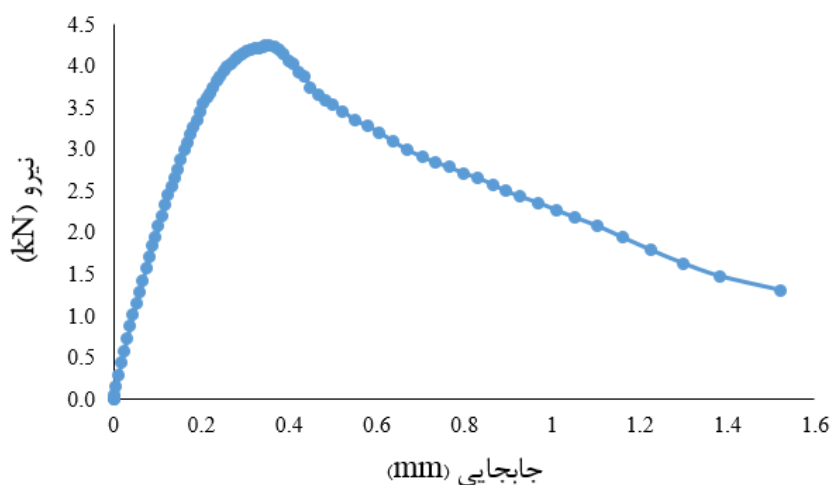
مدل کرنر از ۳ درصد وزنی به بالا نتایج را کمی بالاتر از نتایج تجربی پیش‌بینی کرده است؛ اما از آنجا که این مدل علاوه بر دو فاز زمینه و تقویت‌کننده، فاز میانی را نیز لحاظ کرده است، با افزایش محتوای ذرات پیش‌بینی این مدل به نتایج تجربی نزدیک‌تر خواهد بود. این روند در توافق خوبی با تحقیقات مشابه انجام شده است [۶۱ و ۶۳].

۵-۱-۲ آزمایش چقرمگی شکست

همانطور که در بخش ۴-۲ نیز بیان شد، آزمایش چقرمگی شکست بر اساس استاندارد ASTM D5045 انجام شده است. در این آزمایش دستگاه سروهیدرولیک اینسترون برای هر نمونه CT، یک منحنی نیرو-جابجایی بدست می‌آورد. اگر ماده مورد آزمایش کاملاً رفتار ارتجاعی خطی داشته باشد، منحنی نیرو-جابجایی باید تا موقع شکست یک خط مستقیم باشد؛ اما حتی مواد خیلی ترد نیز قدری رفتار غیرخطی داشته و منحنی نیرو-جابجایی آنها از حالت خطی خارج می‌شود [۱۴۱].

آزمایش تعیین K_{IC} وقتی معتبر است که نمونه آزمایش در حالت کرنش مسطح قرار داشته باشد؛ یعنی ابعاد نمونه به گونه‌ای باشد که معادلات ۴-۱ برقرار باشد؛ ولیکن قبل از محاسبه K_{IC} ، بدون استفاده از نتایج آزمایش، مشخص نمی‌گردد که نمونه در حالت کرنش مسطح قرار داشته است یا خیر. لذا ضریب شدت تنش که توسط نتایج آزمایش بدست آمده را "ضریب شدت تنش مشروط" نامیده و آن را با K_Q نشان می‌دهند. حال آن را در معادلات ۴-۱ قرار داده و چنانچه این معادلات را اغناء نماید، فاکتور شدت تنش مشروط را می‌توان برابر K_{IC} در نظر گرفت و اگر شرایط معادلات مذکور اغناء نگردد، این فاکتور شدت تنش معتبر نبوده و برابر K_{IC} نخواهد بود؛ ولی می‌توان از آن برای تقریب K_{IC} و طراحی مجدد ابعاد نمونه برای دستیابی به نتیجه مطلوب استفاده نمود.

در این آزمایش نرم افزار دستگاه سروویدرولیک اینسترون، تمام مشخصات هندسی نمونه و ترک را به عنوان ورودی از کاربر دریافت نموده و با توجه به شرایط آزمایش در گزارش نهایی خود، مقدار K_Q را اعلام می کند. با توجه به آزمایش های انجام شده و بدست آوردن مقادیر K_Q و قرار دادن آن در معادلات ۱-۴ و همچنین صادق بودن این معادلات، فاکتور شدت تنش مشروط به عنوان فاکتور شدت تنش در حالت کرنش مسطح، K_{IC} ، گزارش می شود. شکل ۵-۷ نمودار بار-جابجایی حاصل از آزمایش چقرمگی شکست کامپوزیت ۶٪ L را نشان می دهد.



شکل ۵-۷: نمودار بار-جابجایی حاصل از آزمایش چقرمگی شکست کامپوزیت ۶٪ L

نتایج مربوط به چقرمگی شکست، K_{IC} ، و انرژی شکست، G_{IC} ، در جدول ۵-۲ ارائه شده است. نتایج نشان می دهد که چقرمگی شکست، در هر دو سری از کامپوزیت های تک ذره ای و دو ذره ای، با افزودن نانوذرات سیلیکا به طرز چشمگیری افزایش یافته و مشخصاً تابعی از محتوای ذرات سیلیکا است. چقرمگی شکست از مقدار $0.38 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ برای اپوکسی خالص آغاز شده و تا $0.61 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ برای کامپوزیت S ۶٪، افزایش می یابد؛ که بیشترین افزایش را برای سیستم های تک ذره ای و رشدی معادل ۶۰/۵٪ را نشان می دهد. همچنین بیشترین افزایش در سیستم های دود ذره ای مربوط به کامپوزیت M ۴/۵٪ - L ۱/۵٪ بوده که برابر $0.62 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ بوده و رشدی معادل ۶۳/۱۵ درصد را نشان می دهد. همچنین مشاهده می شود که انرژی شکست، که از رابطه ۱-۴ محاسبه می شود، به

صورت قابل ملاحظه با افزودن نانوذرات سیلیکا افزایش یافته و با افزایش محتوای ذرات نیز بر مقدار آن افزوده می‌گردد. از طرف دیگر، انرژی شکست از مقدار $80/5 \text{ J/m}^2$ برای اپوکسی خالص آغاز شده و تا $184/29 \text{ J/m}^2$ برای کامپوزیت S ۶٪ افزایش می‌یابد؛ که بیشترین افزایش را برای سیستم‌های تک‌ذره‌ای و رشدی معادل ۱۲۸/۹۳٪ را نشان می‌دهد. همچنین بیشترین افزایش در سیستم‌های دوزده‌ای مربوط به کامپوزیت L ۱/۵٪ - ۴/۵٪ M است که برابر $192/06 \text{ J/m}^2$ بوده و رشدی معادل ۱۳۸/۵۸٪ را نشان می‌دهد.

جدول ۵-۲: چقرمگی شکست و انرژی شکست کامپوزیت‌های تقویت شده با درصد حجمی مختلف از نانوذرات سیلیکا

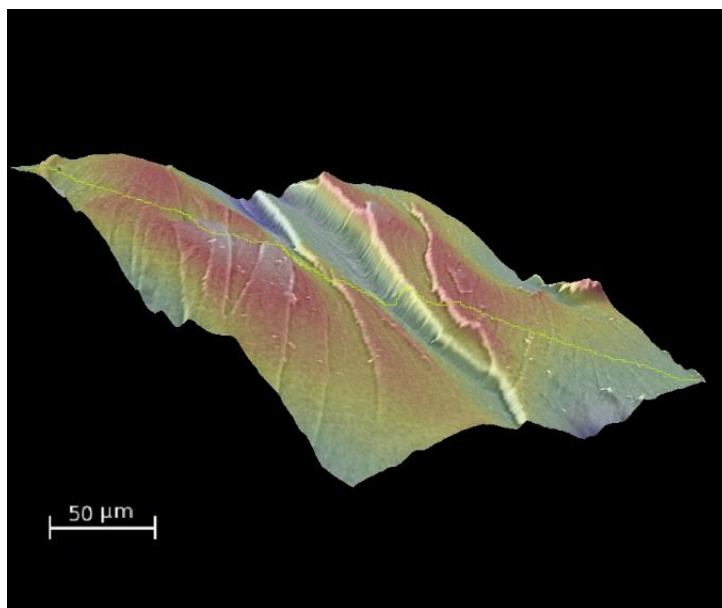
شماره نمونه	کد نمونه	کسر حجمی (Vol%)	چقرمگی شکست، K_{IC} (MPa $\sqrt{m}$)	انرژی شکست، G_{IC} (J/m 2)
۱	NE	۰	۰/۳۸(۰/۰۰۵۲)	۸۰/۵۰(۱/۲۸)
۲	۱/۵٪ S	۰/۶۹۹	۰/۴۹(۰/۰۰۷۶)	۱۳۱/۶۰(۱/۵۹)
۳	۳/۰٪ S	۱/۴۱	۰/۵۱(۰/۰۰۷۷)	۱۳۸/۷۹(۳/۷۱)
۴	۴/۵٪ S	۲/۱۳	۰/۵۶(۰/۰۰۷۳)	۱۶۵/۶۷(۴/۲۴)
۵	۶/۰٪ S	۲/۸۶	۰/۶۱(۰/۰۱۲۰)	۱۸۴/۲۹(۴/۹۸)
۶	۱/۵٪ M	۰/۶۹۹	۰/۴۸(۰/۰۰۱۲)	۱۲۵/۶۳(۲/۸۱)
۷	۳/۰٪ M	۱/۴۱	۰/۵۱(۰/۰۱۳۲)	۱۳۹/۴۹(۱/۶۴)
۸	۴/۵٪ M	۲/۱۳	۰/۵۷(۰/۰۱۸۳)	۱۷۲/۲۸(۱/۷۶)
۹	۶/۰٪ M	۲/۸۶	۰/۵۹(۰/۰۱۳۵)	۱۷۲/۸۱(۰/۶۷)
۱۰	۱/۵٪ L	۰/۶۹۹	۰/۵۰(۰/۰۱۵۲)	۱۳۸/۰۹(۴/۹۳)
۱۱	۳/۰٪ L	۱/۴۱	۰/۵۲(۰/۰۱۳۸)	۱۴۵/۸۵(۱/۸۰)
۱۲	۴/۵٪ L	۲/۱۳	۰/۵۸(۰/۰۱۲۰)	۱۷۹/۲۸(۶/۹۹)
۱۳	۶/۰٪ L	۲/۸۶	۰/۶(۰/۰۰۶۰)	۱۸۱/۲۶(۴/۶۲)
۱۴	۱/۵٪ L-۱/۵٪ S	۱/۴۱	۰/۵۳(۰/۰۰۶۷)	۱۵۲/۱۹(۳/۲۴)
۱۵	۱/۵٪ L-۳٪ S	۲/۱۳	۰/۵۹(۰/۰۰۹۷)	۱۸۰/۷۴(۲/۷۹)
۱۶	۱/۵٪ L-۴/۵٪ S	۲/۸۶	۰/۶۱(۰/۰۰۸۷)	۱۸۳/۱۱(۱/۸۰)
۱۷	۱/۵٪ L-۱/۵٪ M	۱/۴۱	۰/۵۲(۰/۰۱۵۳)	۱۴۶/۲۲(۴/۲۴)
۱۸	۱/۵٪ L-۳٪ M	۲/۱۳	۰/۵۷(۰/۰۱۱۷)	۱۶۹/۴۲(۷/۰۰)
۱۹	۱/۵٪ L-۴/۵٪ M	۲/۸۶	۰/۶۲(۰/۰۱۵۴)	۱۹۲/۰۶(۹/۰۴)

در آزمایش چقرمگی شکست، با توجه به هندسه نمونه، نحوه بارگذاری و ایجاد پیش ترک در نمونه، ترک آرام آرام رشد کرده و بنابراین فرصت کافی برای رشد را داشته و به راحتی فازهای سخت را دور می‌زند. برای دانستن علت افزایش چقرمگی و انرژی شکست در یک کامپوزیت با افزودن تقویت کننده، لازم به شناخت مکانیزم‌های اثربخشی فاز تقویت کننده است. به عبارت دیگر، کارایی یک تقویت کننده در هر آزمایش، مربوط به نوع مکانیزم تأثیرگذاری آن تقویت کننده در آزمایش مورد نظر است.

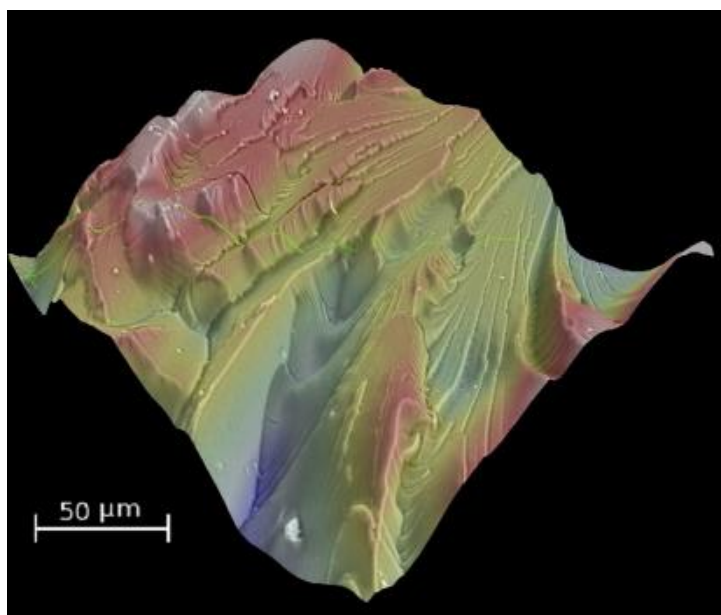
پس از آشنایی با مکانیزم‌های مذکور، حال می‌توان یکی از علل اصلی افزایش چقرمگی و انرژی شکست را در کامپوزیت‌های مورد بررسی، مکانیزم انحراف مسیر ترک دانست. در آزمایش چقرمگی شکست، ترک به آرامی رشد کرده و فرصت کافی برای دور زدن فازهای سختی چون نانوذرات سیلیس را دارد، لذا هرگاه پیشانی ترک به ذرات سیلیس برخورد می‌کند، مسیر خود را تغییر می‌دهد که این امر موجب طولانی شدن مسیر ترک شده و در نتیجه چقرمگی شکست و به موازات آن انرژی شکست را افزایش می‌دهد. همچنین این تغییر دائمی مسیر ترک موجب افزایش زبری سطح شکست می‌شود که این موضوع در تصاویر گرفته شده از سطح شکست به خوبی مشهود است.

سطح شکست برخی نمونه‌ها توسط یک میکروسکوپ الکترونی روبشی Phenom pro X ساخت کشور هلند، ۲۰۱۳، مورد بررسی قرار گرفته است. شکل‌های ۵-۸ تا ۵-۱۱، به ترتیب توپوگرافی سه بعدی سطوح اپوکسی خالص، نانوکامپوزیت $S \ 3\%$ ، نانوکامپوزیت $L \ 3\%$ و نانوکامپوزیت $S \ 3\% - L \ 1/5\%$ را نشان می‌دهد. یکی از قابلیت‌های دستگاه نامبرده این است که با انتخاب دو نقطه دلخواه از سطح، خطی را بین این دو نقطه ترسیم کرده و زبری مسیر مشخص شده را با محاسبه اختلاف ارتفاع بین بالاترین و پایین‌ترین نقطه مسیر گزارش می‌دهد. برای بررسی نحوه تأثیر گذاری محتوای ذرات، در سطح شکست هر نمونه مورد بررسی، حداقل ۵ مسیر به دلخواه انتخاب شده و زبری آنها بدست آمد و در نهایت مسیری که بیشترین زبری را نشان می‌داد روی تصویر ثبت شده و زبری آن گزارش شد. به عنوان نمونه، زبری بدست آمده در مسیر سبز رنگ و در نمونه اپوکسی خالص،

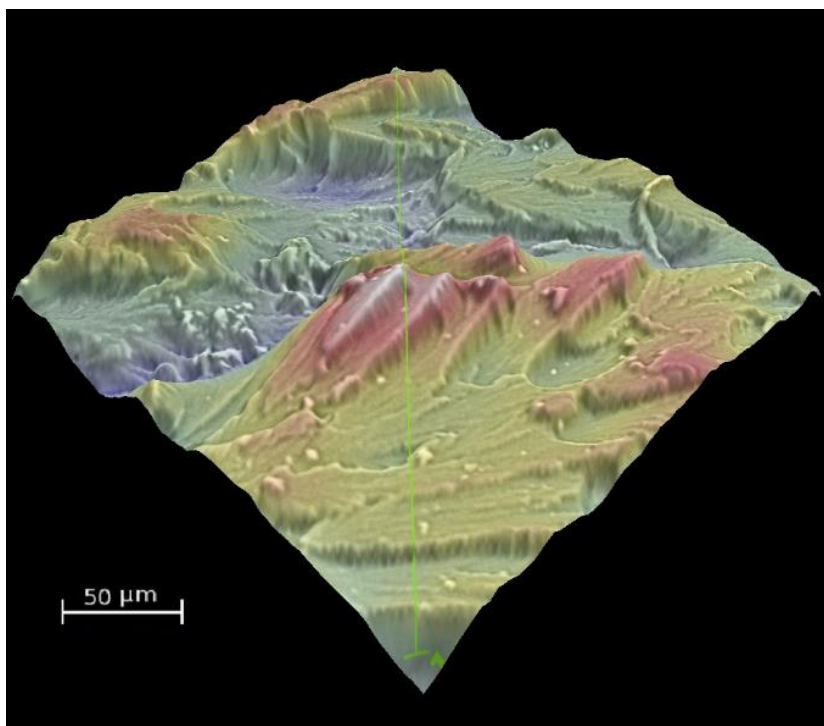
$21/81 \mu m$ در نانوکامپوزیت S ۳٪، به مقدار $92/53 \mu m$ در نانوکامپوزیت L ۳٪ برابر μm ۱۱۹/۷۱ و در نانوکامپوزیت S ۳٪ - L ۱/۵٪، برابر $132/27 \mu m$ است. سطح شکست نمونه‌ها نشان می‌دهد که هرچه محتوای نانوذرات افزایش می‌یابد، بر زبری سطح افزوده شده که علت اصلی، همان برخورد پیشانی ترک با نانوذرات و انحراف مسیر ترک است.



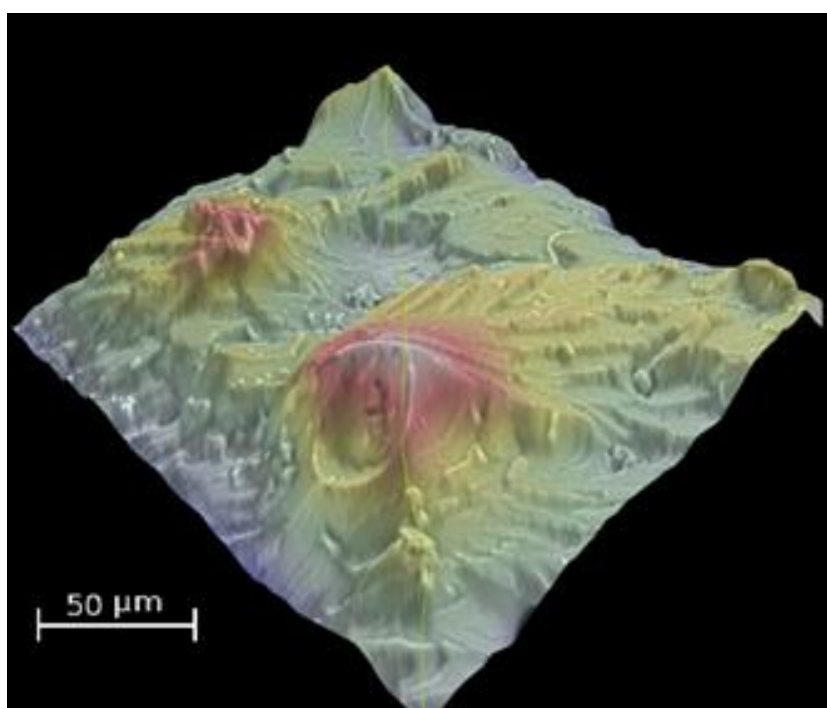
شکل ۵-۸: توپوگرافی سطح شکست اپوکسی خالص. اختلاف سطح بین بالاترین و پایین‌ترین نقطه در مسیر انتخابی نشان داده شده، $21/81 \mu m$.



شکل ۵-۹: توپوگرافی سطح شکست کامپوزیت S ۳٪. اختلاف سطح بین بالاترین و پایین‌ترین نقطه در مسیر انتخابی نشان داده شده، $92/53 \mu m$.



شکل ۵-۱۰: توپوگرافی سطح شکست کامپوزیت L. ۳٪. اختلاف سطح بین بالاترین و پایین‌ترین نقطه در مسیر انتخابی نشان داده شده، $119/71 \mu m$.

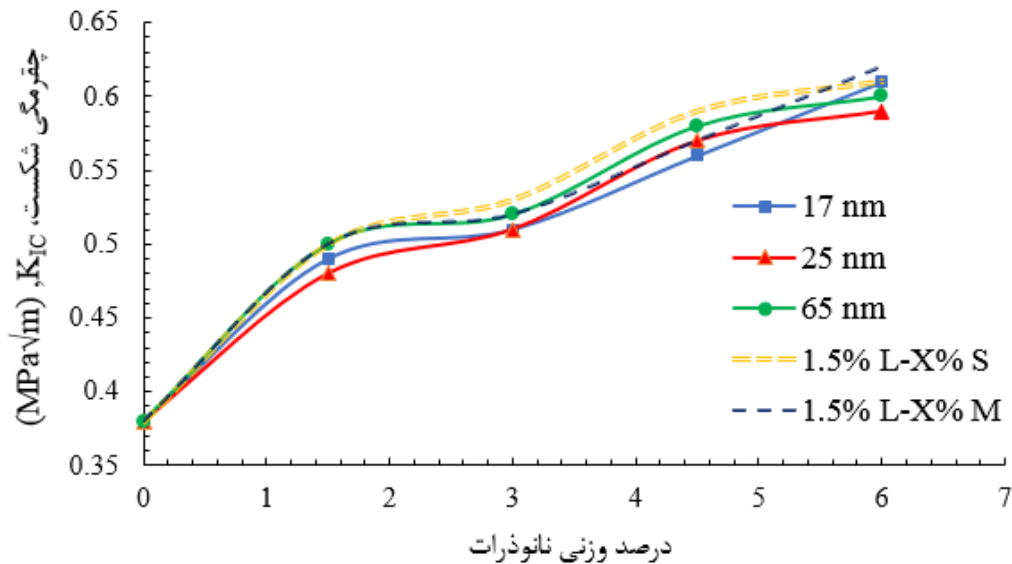


شکل ۵-۱۱: توپوگرافی سطح شکست کامپوزیت S. ۳٪ - L. ۱/۵٪. اختلاف سطح بین بالاترین و پایین‌ترین نقطه در مسیر انتخابی نشان داده شده، $132/27 \mu m$.

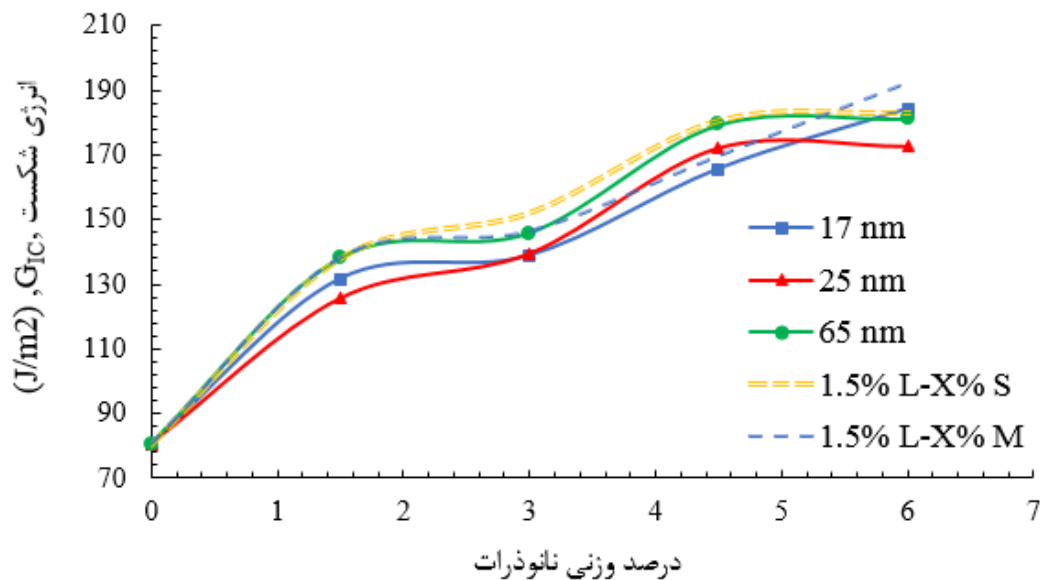
همچنین، برای درک و تحلیل بهتر داده‌های جدول ۵-۲، تغییرات چقرمگی شکست و انرژی شکست با اندازه و محتوای ذرات، به ترتیب در شکل‌های ۵-۱۲ و ۵-۱۳ نشان داده شده است. همانطور که از شکل‌ها پیداست، در یک کسر حجمی یکسان، اندازه‌ی ذرات تأثیر چندانی روی چقرمگی شکست و انرژی شکست ندارد، اما در کامپوزیت‌های تک‌ذره‌ای، سری L اندکی از سایر سری‌ها بالاتر است که این نشان می‌دهد ذرات بزرگتر بیشتر باعث انحراف مسیر ترک می‌شوند. این موضوع با گزارشات برخی از محققین تطابق دارد [۶۰]. علت این موضوع نیز همانطور که قبلاً بیان شد این است که ذرات کوچکتر بخاطر سطح تعاملی بیشتری که نسبت به ذرات بزرگتر دارند، پیوندهای محکمتری برقرار می‌کنند لذا در هنگام رشد ترک امکان شکست پیوند ذرات بزرگتر بیشتر است و این موضوع باعث بالا رفتن چقرمگی و انرژی شکست می‌شود.

اما نکته‌ای که باید به آن توجه کرد این است که به علت متفاوت بودن ساختار، ابعاد و شرایط آماده‌سازی مواد مورد آزمایش، نتایج تجربی همواره روند یکسانی ندارد. به عنوان مثال، نتایج چقرمگی شکست بدست آمده در این پژوهش، در توافق خوبی با نتایج حاصل از بررسی لیانگ و پی‌یرسون [۶۱]، است. آنها نیز گزارش کردند که اندازه ذرات بین ۲۰ nm تا ۸۰ nm، تأثیر چندانی در چقرمگی شکست نداشته است. اما ناکامورا و همکاران [۶۶] که اثر اندازه ذرات روی رفتار شکست اپوکسی پر شده با ۵ نوع ذره سیلیکای کروی با محدوده‌ی قطر بین ۶ μm تا ۴۲ μm را بررسی می‌کردند، نشان دادند که چقرمگی شکست و انرژی شکست با افزایش اندازه ذرات، افزایش یافته است. همچنین، نتایج ناکامورا در توافق خوبی با تحقیق گروه رادفورد [۶۷] می‌باشد که اثر اندازه ذرات را روی چقرمگی شکست اپوکسی با میکروذرات تری‌هیدرات آلومینیوم بررسی کردند. این محققین دریافتند که چقرمگی شکست با افزایش اندازه ذرات، افزایش می‌یابد. می‌توان نتیجه گرفت که برای اپوکسی با ذرات کروی در مقیاس میکرون، با افزایش اندازه ذرات، چقرمگی شکست و به تبع آن انرژی شکست، افزایش یافته ولی این نتیجه برای اندازه ذرات در مقیاس نانو صادق نیست. علت این موضوع را می‌توان تفاوت در مکانیزم‌های اثربخشی میکروذرات و نانوذرات دانست. با توجه به بررسی انجام گرفته در رساله، نتیجه

می‌شود که اندازه‌ی نانوذرات سیلیکا تأثیر عمده‌ای روی چقرمگی شکست و انرژی شکست اپوکسی حاوی نانوذرات سیلیس، با قطرهای بین ۱۷ nm تا ۶۵ nm، ندارد.



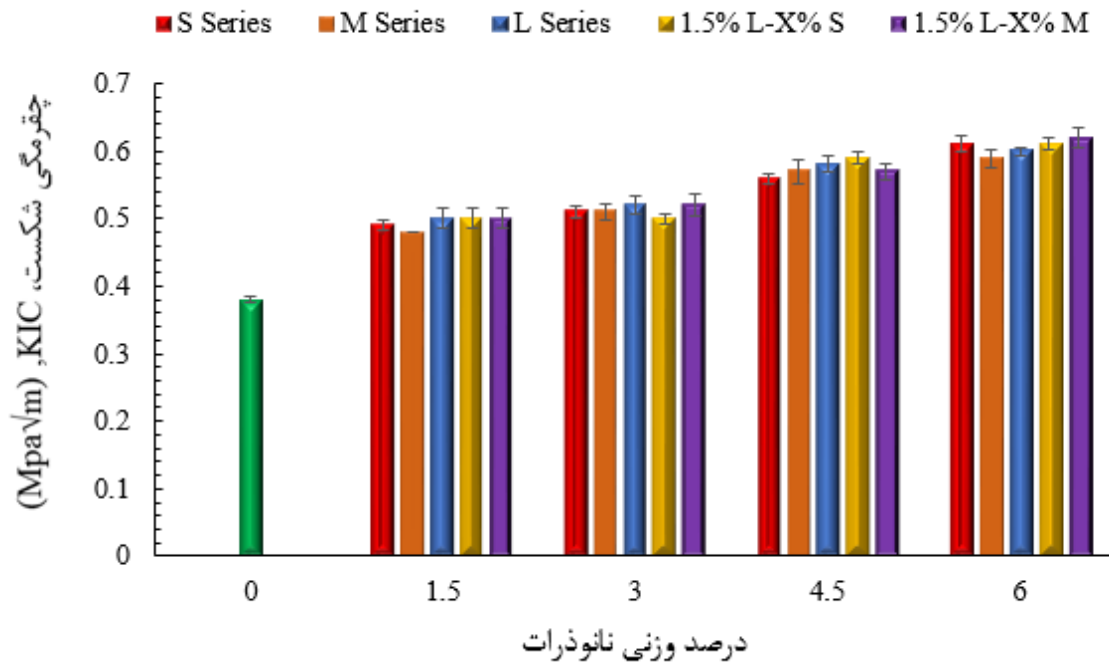
شکل ۵-۱۲: تغییرات چقرمگی شکست بر حسب محتوای ذرات در اندازه ذرات و ترکیبات مختلف



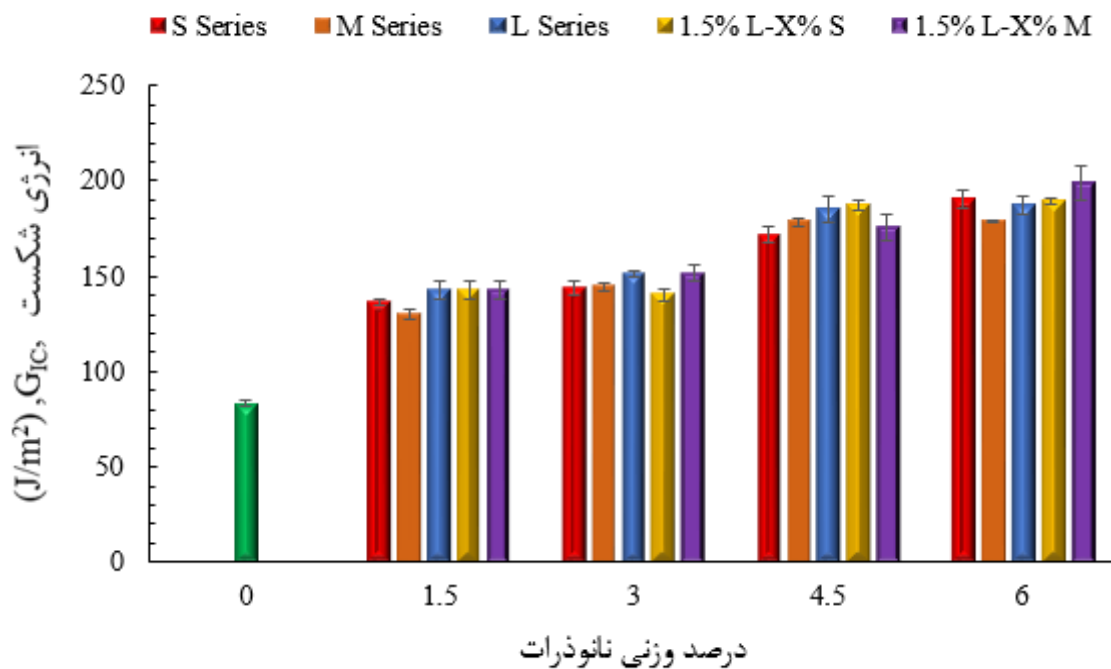
شکل ۵-۱۳: تغییرات انرژی شکست بر حسب محتوای ذرات در اندازه ذرات و ترکیبات مختلف

همچنین برای بررسی تأثیر نوع ترکیب کامپوزیت‌ها، چقرمگی شکست و انرژی شکست تمام نمونه‌های تقویت شده، در نمودارهای میله‌ای، به ترتیب در شکل‌های ۵-۱۴ و ۵-۱۵ مقایسه شده‌اند. ملاحظه

می‌شود که چقرمگی شکست و انرژی شکست، چندان متأثر از ترکیب ذرات سیلیس بکار رفته نیست و بیشتر وابسته به محتوای ذرات است. این موضوع در بخش مدلسازی نیز مورد تأیید قرار می‌گیرد.

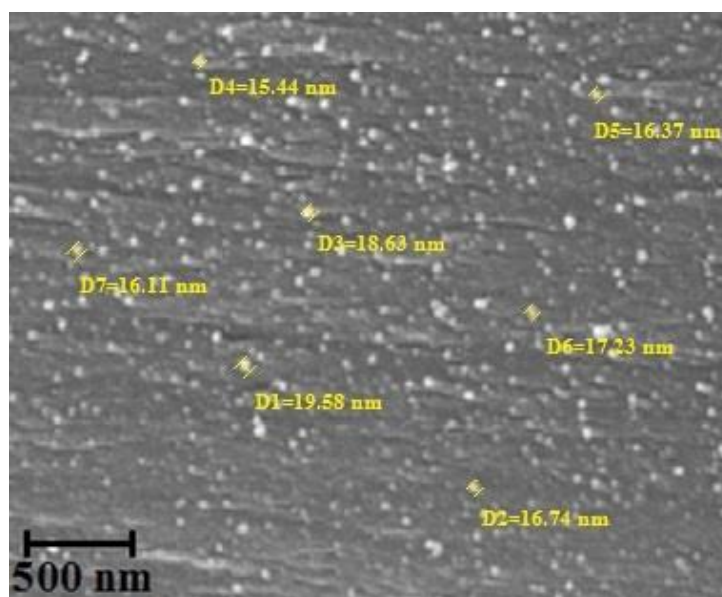


شکل ۵-۱۴: چقرمگی شکست ترکیبات مختلف کامپوزیت‌ها در محتوای ذرات متفاوت

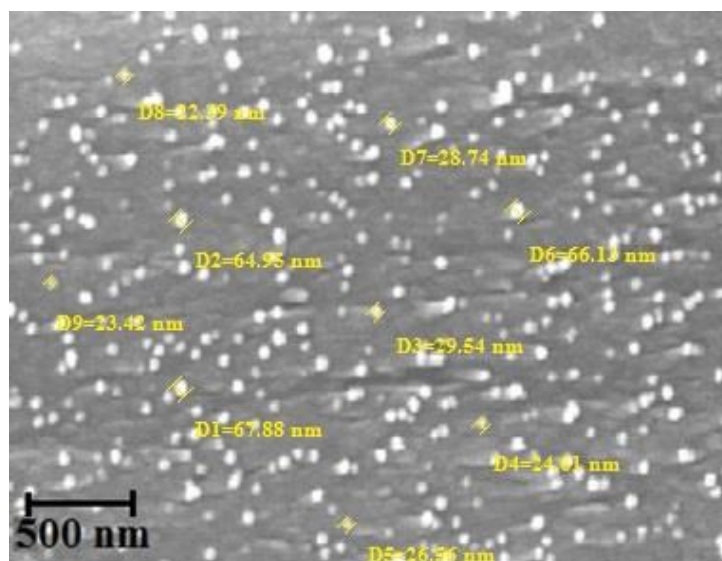


شکل ۵-۱۵: انرژی شکست ترکیبات مختلف کامپوزیت‌ها در محتوا و ترکیبات متفاوت ذرات

شکل‌های ۵-۱۶ و ۵-۱۷، به ترتیب سطح شکست کامپوزیت‌های S ۶٪ و M ۴/۵٪-L ۱/۵٪ را پس از آزمایش چقرمگی شکست نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، در هر دو نمونه توزیع مناسبی را در ۶ درصد وزنی شاهد هستیم. برای اطمینان از کلوخه نبودن ذرات، اندازه برخی از آنها در شکل مشخص شده است و از آنجا که اندازه ذرات مشخص شده، در بازه‌های گزارش شده از نانوذرات قرار دارند، لذا با اطمینان قابل قبولی می‌توان گفت که ذرات کلوخه نشده‌اند.

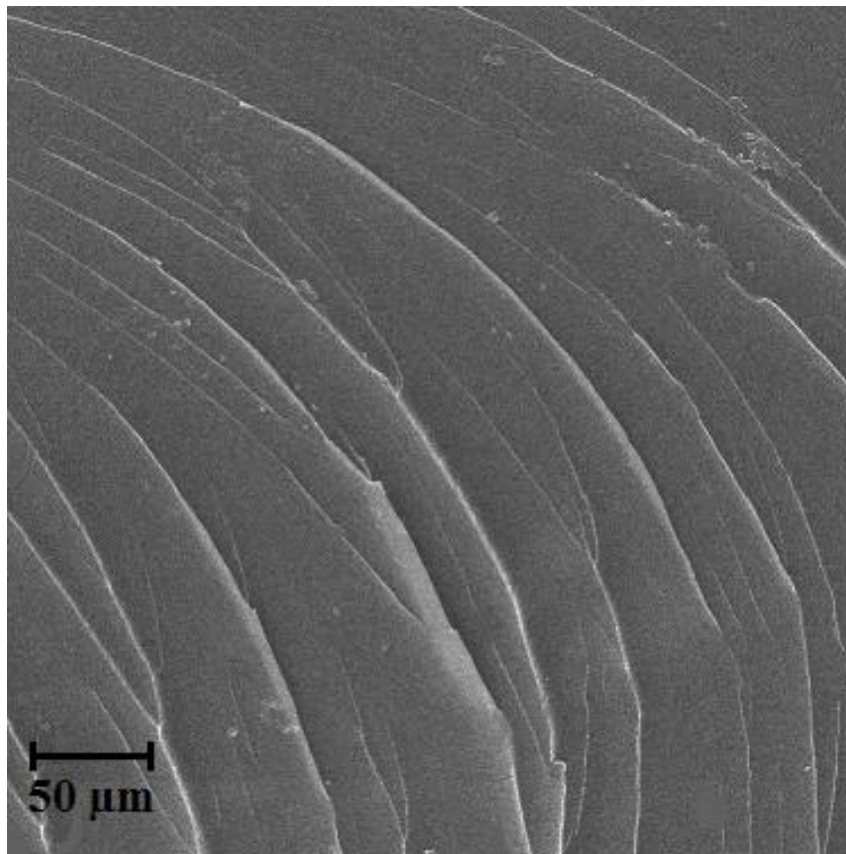


شکل ۵-۱۶: تصویر SEM گرفته شده از سطح شکست کامپوزیت S ۶٪ پس از آزمایش چقرمگی شکست.



شکل ۵-۱۷: تصویر SEM گرفته شده از سطح شکست کامپوزیت M ۴/۵٪-L ۱/۵٪ پس از آزمایش چقرمگی شکست.

شکل ۵-۱۸، که از سطح شکست نمونه کامپوزیتی S-۴/۵٪ L-۱/۵٪ پس از آزمایش چقرمگی شکست گرفته شده، نشان می‌دهد که در آزمایش چقرمگی شکست، جبهه ترک به صورت هلالی پیشروی می‌کند. از طرف دیگر، مشاهده می‌شود که از برخی از این لایه‌ها، لایه‌هایی دیگری منشعب شده که این پدیده در سطح شکست نانوکامپوزیت‌ها واضح‌تر است. دلیل این موضوع چند شاخه شدن ترک^۱ به خاطر انرژی اضافی موجود در حین رشد ترک است. تکرار چند شاخه شدن ترک و طبیعت چند صفحه‌ای سطح ترک، راه‌هایی برای جذب انرژی در مواد شکننده هستند [۱۴۳].



شکل ۵-۱۸: سطح شکست نمونه کامپوزیتی S-۴/۵٪ L-۱/۵٪ پس از آزمایش چقرمگی شکست.

^۱ Crack Forking

۵-۱-۳ آزمایش ضربه

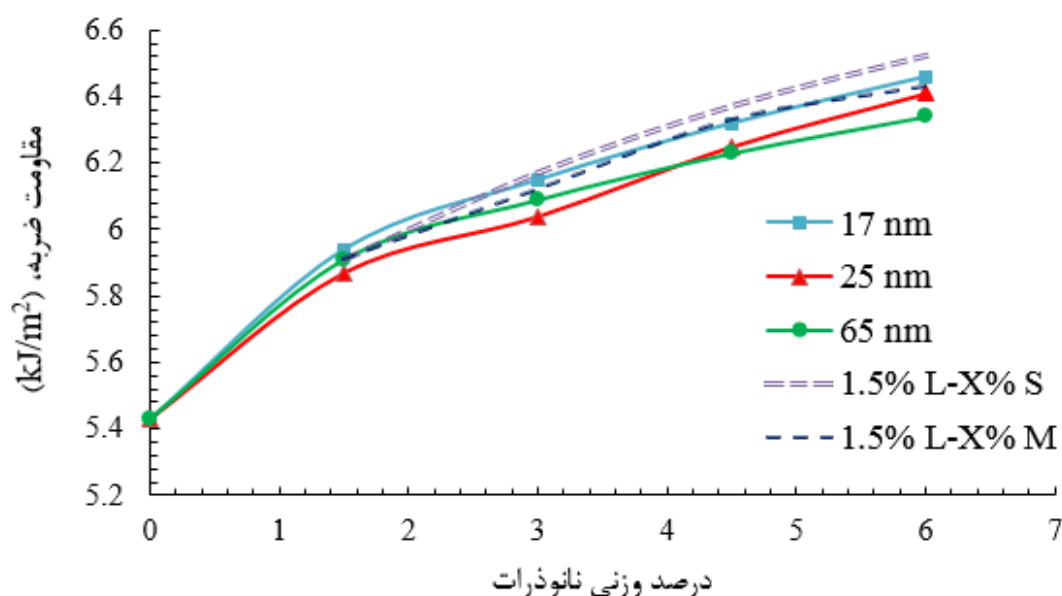
نتایج مربوط به آزمایش ضربه که بر اساس استاندارد ASTM D256 انجام شده است، در جدول ۵-۳ ارائه شده است. همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، نتایج آزمون‌های ضربه دارای پراکندگی زیادی هستند لذا استاندارد توصیه می‌کند که میانگین نتایج شش تا ده آزمایش گزارش شود. در این تحقیق برای هر نمونه هشت آزمایش انجام شده و میانگین نتایج گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزودن نانوذرات به اپوکسی و نیز با افزایش محتوای ذرات، بر مقاومت ضربه افزوده می‌شود.

جدول ۵-۳: مقاومت ضربه کامپوزیت‌های تقویت شده با درصد حجمی مختلف از نانوذرات سیلیکا

شماره نمونه	کد نمونه	کسر حجمی (Vol%)	مقاومت به ضربه، (kJ/m ²)
۱	NE	۰	۵/۴۳(۰/۲۵)
۲	۱/۵ % S	۰/۶۹۹	۵/۹۴(۰/۲۱)
۳	۳/۰ % S	۱/۴۱	۶/۱۵(۰/۳۶)
۴	۴/۵ % S	۲/۱۳	۶/۳۲(۰/۶۷)
۵	۶/۰ % S	۲/۸۶	۶/۴۶(۰/۱۸)
۶	۱/۵ % M	۰/۶۹۹	۵/۸۷(۰/۲۶)
۷	۳/۰ % M	۱/۴۱	۶/۰۴(۰/۲۷)
۸	۴/۵ % M	۲/۱۳	۶/۲۵(۰/۲۸)
۹	۶/۰ % M	۲/۸۶	۶/۴۱(۰/۳۴)
۱۰	۱/۵ % L	۰/۶۹۹	۵/۹۱(۰/۴۹)
۱۱	۳/۰ % L	۱/۴۱	۶/۰۹(۰/۳۴)
۱۲	۴/۵ % L	۲/۱۳	۶/۲۳(۰/۲۱)
۱۳	۶/۰ % L	۲/۸۶	۶/۳۴(۰/۵۵)
۱۴	۱/۵% L-۱/۵%S	۱/۴۱	۶/۱۷(۰/۳۳)
۱۵	۱/۵% L-۳/۰%S	۲/۱۳	۶/۳۷(۰/۵۲)
۱۶	۱/۵% L-۴/۵%S	۲/۸۶	۶/۵۲(۰/۲۰)
۱۷	۱/۵% L-۱/۵%M	۱/۴۱	۶/۱۲(۰/۰۹)
۱۸	۱/۵% L-۳/۰%M	۲/۱۳	۶/۳۳(۰/۴۴)
۱۹	۱/۵% L-۴/۵%M	۲/۸۶	۶/۴۳(۰/۲۴)

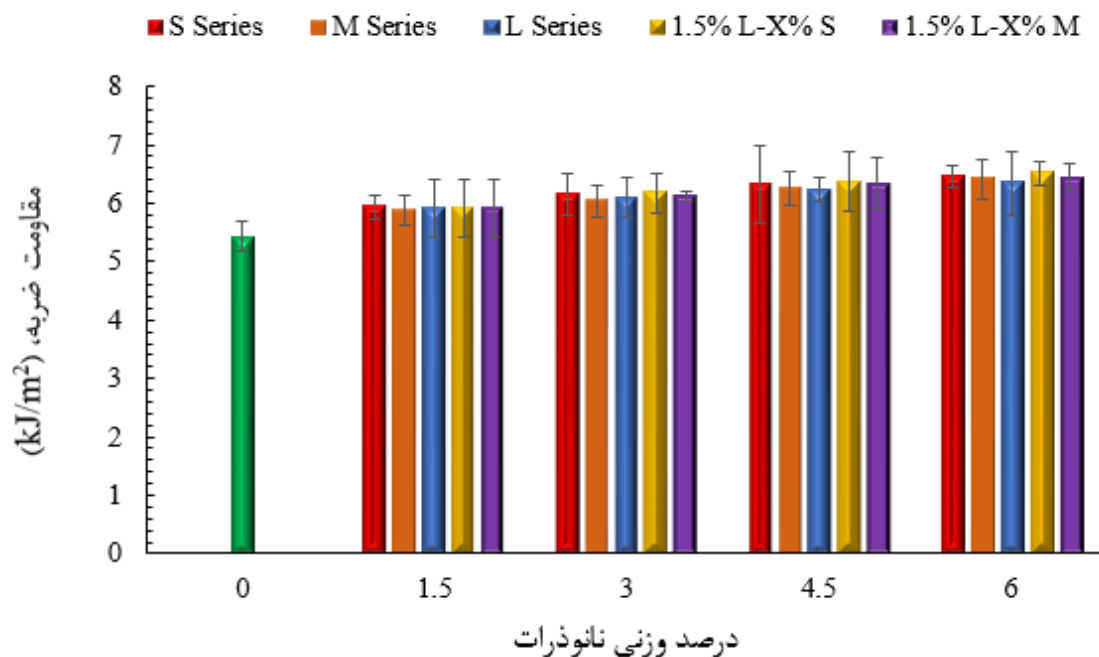
مقاومت ضربه از مقدار $5/43 \text{ kJ/m}^2$ برای اپوکسی خالص آغاز شده و تا $6/46 \text{ kJ/m}^2$ برای کامپوزیت S ۶٪، افزایش می‌یابد؛ که بیشترین افزایش را برای سیستم‌های تک‌ذره‌ای و رشدی معادل ۱۸/۹۶٪ را نشان می‌دهد. همچنین بیشترین افزایش در سیستم‌های دودره‌ای مربوط به کامپوزیت S-۴/۵٪ L است که برابر $6/52 \text{ kJ/m}^2$ بوده و رشدی معادل ۲۰/۰۷ درصد را نشان می‌دهد.

برای درک و تحلیل بهتر داده‌های جدول ۵-۳، تغییرات مقاومت ضربه با اندازه و محتوای ذرات، در شکل ۵-۱۹ نشان داده شده است. همانطور که از این شکل پیداست، با افزایش نانوذرات در تمام کامپوزیت‌های تک‌ذره‌ای و دو ذره‌ای، مقاومت ضربه افزایش یافته و مقدار این پارامتر در کامپوزیت‌های دو ذره‌ای اندکی بیشتر از کامپوزیت‌های تک‌ذره‌ای است. به علاوه، در بین کامپوزیت‌های دو ذره‌ای نیز، کامپوزیت‌هایی که فضای بین نانوذرات سری L آنها با نانوذرات کوچکتر سری S پر شده، از مقاومت ضربه بالاتری نسبت به کامپوزیت‌هایی که فضای بین نانوذرات سری L آنها با نانوذرات سری M پر شده، برخوردارند.



شکل ۵-۱۹: تغییرات مقاومت ضربه با محتوای ذرات در اندازه ذرات و ترکیبات مختلف

همچنین برای اینکه بتوان اثر ترکیبات مختلف کامپوزیت‌ها را در یک کسر حجمی یکسان به روی مقاومت ضربه بررسی کرد، داده‌های جدول ۳-۵، به صورت یک نمودار میله‌ای در شکل ۵-۲۰ آورده شده‌اند.

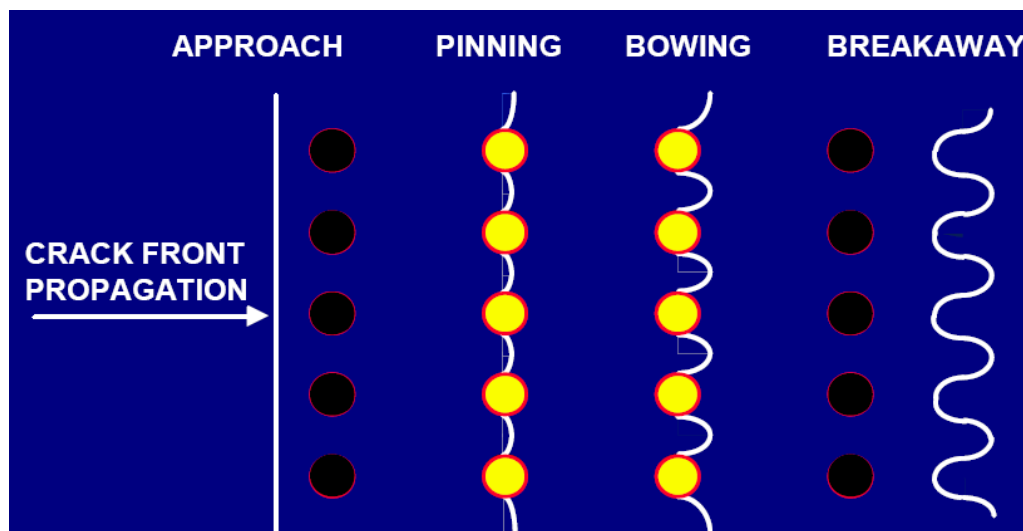


شکل ۵-۲۰: مقاومت ضربه ترکیبات مختلف کامپوزیت‌ها در محتوا و ترکیبات متفاوت ذرات

برای آشنایی با علت افزایش مقاومت به ضربه، با افزودن نانوذرات سیلیس و نیز با افزایش محتوای ذرات، می‌بایست با مکانیزم بسته شدن و قوس کردن نوک ترک آشنا شد. این مکانیزم که هم در کامپوزیت‌های تقویت شده با ذرات در حد میکرومتر [۶۷، ۱۱۰ و ۱۵۱] و هم در کامپوزیت‌های تقویت شده با ذرات در حد نانومتر [۶۲] مشاهده شده است، به گونه‌ای عمل می‌کند که از طریق ذرات، جلو رشد ترک را می‌گیرد [۱۱۲]. در کامپوزیت‌های تقویت شده با میکروذرات، ترک پس از برخورد با ذرات، به جای اینکه مسیر خود را عوض کند، بین ذرات دچار خم می‌شود و کمانه می‌کند. در این مکانیزم، پیشانی ترک با برخورد به ذره، دچار انقطاع شده و مجدداً پس از عبور از آن به هم می‌رسد و در نتیجه مسیر بیشتری را طی می‌کند و از آنجا که انرژی ترک متناسب با طول آن است، بنابراین برای رشد به انرژی

بیشتری نیاز دارند. این موضوع را می‌توان به صورت شماتیک در شکل ۵-۲۱ مشاهده کرد. اما در کامپوزیت‌های تقویت شده با نانوذرات، چنانچه نرخ کرنش پایین باشد، ترک فرصت کافی برای دور زدن نانوذرات را دارد ولی در نرخ‌های کرنش بالا ترک زمان لازم برای دور زدن نانوذرات را نداشته و با کمانه کردن، از بین ذرات عبور می‌کند. البته مشهود است که کاهش فضای بین ذرات و اندازه‌ی آنها باعث افزایش اثر بخشی نانوذرات خواهد شد [۱۵۲].

بنابراین با توجه به توضیحات فوق و نمودار ۵-۲۴، می‌توان دریافت که در کامپوزیت‌های تک-ذره‌ای و در یک محتوای ذرات ثابت، هر چه اندازه ذرات کوچکتر باشد، تعداد ذرات بیشتر خواهد بود که این موضوع باعث می‌شود نوک ترک به تعداد دفعات بیشتری بین ذرات کمانه کند و طبیعتاً مسیر ترک طولانی‌تر شده و منجر به افزایش مقاومت ضربه خواهد شد. این موضوع، در کامپوزیت‌های ترکیبی نیز مشهود است. بدین ترتیب که مقاومت به ضربه در کامپوزیت‌های تقویت شده با ذرات سری L و S از کامپوزیت‌های تقویت شده با ذرات سری L و M بالاتر است. همچنین ملاحظه می‌شود که در یک محتوای ذرات یکسان، مقاومت به ضربه کامپوزیت‌های تقویت شده با ذرات سری L و S از کامپوزیت‌های تقویت شده با اندازه ذرات سری S بالاتر است. این موضوع نشان می‌دهد که انتقال بار که به صورت نیروی برشی اعمال می‌شود، در کامپوزیت‌های ترکیبی بهتر از کامپوزیت‌های تک‌ذره‌ای انجام می‌شود.



شکل ۵-۲۱: مکانیزم بستن و خم شدن نوک ترک [۱۱۷].

۵-۱-۴ آزمایش فروپاشی ستون‌های جدار نازک

۵-۱-۴-۱ آزمایش فروپاشی سازه‌های قوطی شکل

همانطور که در بخش ۴-۴ بیان شد، این آزمایش توسط یک دستگاه سروهیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ انجام شده است؛ بدین ترتیب که نمونه‌های قوطی شکل بین دو صفحه فولادی قرار گرفته و با نرخ 5 mm/min تحت فشار شبه استاتیکی قرار گرفته‌اند. نمونه‌ها دارای ضلع داخلی مقطع، 20 mm و ضخامت پوسته 3 mm هستند. همچنین لازم به ذکر است که چون در جذب انرژی، ارتفاع جاذب یک پارامتر مهم است، نمونه‌ها در دو ارتفاع 60 mm و 90 mm ساخته شده و تأثیر ارتفاع نیز در قابلیت جذب انرژی نمونه‌های قوطی شکل بررسی شده است. تکرار برای هر نمونه چهار مرتبه است.

برای بررسی قابلیت جذب انرژی سازه‌ها، پارامترهای مختلفی وجود دارد که در این رساله به بررسی بیشینه بار و سطح زیر نمودار بار-جابجایی پرداخته شده است. در جداول ۴-۵ و ۵-۵، مشخصات جذب انرژی مذکور، برای نمونه‌های قوطی شکل به ترتیب با ارتفاع‌های 90 mm و 60 mm آورده شده است. همچنین تأثیر اندازه ذرات، محتوای ذرات و ترکیبات مختلف از نانوذرات سیلیکا با اندازه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

همانطور که از جداول ۴-۵ و ۵-۵ ملاحظه می‌شود، بیشینه بار و به تناسب آن مساحت زیر نمودار بار-جابجایی مربوط به نمونه تهیه شده از اپوکسی خالص بیش از سایر سازه‌های کامپوزیتی تقویت شده با ذرات سیلیس است و هر چه بر محتوای ذرات افزوده می‌شود، بر صلبیت سازه نیز افزوده شده و پیوندها شکننده‌تر می‌شوند و در نتیجه مشخصه‌های جذب انرژی بیشتر افت می‌کند.

جدول ۵-۴: مشخصات جذب انرژی نمونه‌های قوطی شکل با ارتفاع ۹۰ mm

شماره نمونه	کد نمونه	بیشینه بار (kN)	سطح زیر نمودار بار-جابجایی، (J)
۱	NE	۱۶/۰۹ (۰/۳۷)	۴۸/۹۲ (۰/۷۴)
۲	۱/۵ % S	۱۴/۷۳ (۰/۲۳)	۴۴/۵۹ (۱/۰۱)
۳	۳/۰ % S	۱۳/۸۶ (۰/۳۳)	۳۶/۸۳ (۱/۵۷)
۴	۴/۵ % S	۱۳/۰۲ (۰/۴۴)	۲۹/۱۲ (۰/۶)
۵	۶/۰ % S	۱۲/۳۵ (۰/۲۴)	۲۳/۶۹ (۰/۱۷)
۶	۱/۵ % M	۱۴/۴۷ (۰/۱۸)	۴۱/۹۳ (۰/۵۳)
۷	۳/۰ % M	۱۳/۳۵ (۰/۲۹)	۳۵/۲۵ (۰/۷۸)
۸	۴/۵ % M	۱۲/۵۱ (۰/۴۲)	۲۷/۰۹ (۱/۱۷)
۹	۶/۰ % M	۱۲/۱۷ (۰/۳۱)	۲۳/۰۵ (۰/۶۳)
۱۰	۱/۵ % L	۱۴/۰۹ (۰/۲۴)	۴۰/۲۶ (۰/۹۶)
۱۱	۳/۰ % L	۱۳/۳۷ (۰/۵۲)	۳۳/۱۶ (۰/۶۶)
۱۲	۴/۵ % L	۱۲/۸۳ (۰/۵۲)	۲۶/۸۳ (۰/۱۶)
۱۳	۶/۰ % L	۱۱/۸۳ (۰/۴۱)	۲۱/۴۸ (۰/۷۲)
۱۴	۱/۵% L-۱/۵% S	۱۴/۳۷ (۰/۱۵)	۳۷/۹۵ (۱/۲۵)
۱۵	۱/۵% L-۳% S	۱۳/۴۵ (۰/۵۳)	۳۰/۶۴ (۰/۳۱)
۱۶	۱/۵% L-۴/۵% S	۱۲/۸۳ (۰/۳۰)	۲۳/۹۵ (۰/۲۰)
۱۷	۱/۵% L-۱/۵% M	۱۳/۹۵ (۰/۲۷)	۳۶/۲۴ (۰/۸۵)
۱۸	۱/۵% L-۳% M	۱۳/۱۷ (۰/۴۶)	۲۹/۴۵ (۰/۳۷)
۱۹	۱/۵% L-۴/۵% M	۱۲/۰۵ (۰/۳۵)	۲۲/۸۳ (۰/۵۳)

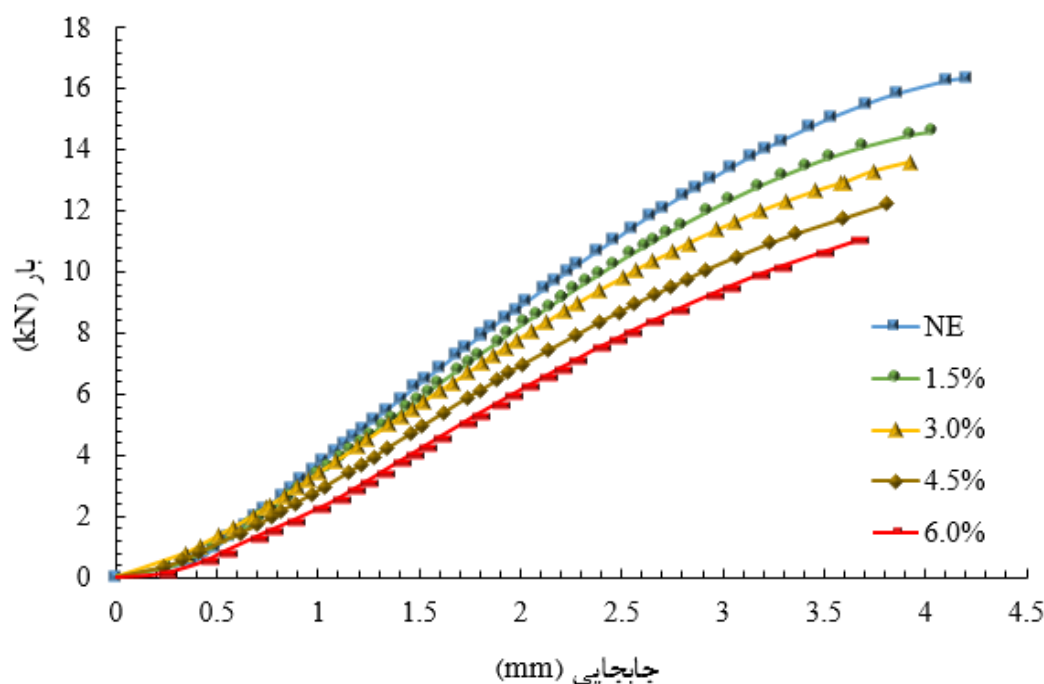
لازم به ذکر است که رفتار فشاری در پلیمرهای گرماسخت با رفتار کششی آنها اندکی متفاوت است. عموماً در اینگونه پلیمرها، میزان استحکام فشاری بیشتر از استحکام کششی است. یکی از علل مهم این پدیده، ماهیت نوع پیوندهای موجود در ساختار است. در هنگام بارگذاری فشاری بر خلاف بارگذاری کششی، اتم‌ها بیشتر به یکدیگر نزدیک می‌شوند. به عبارت دیگر، در حالت کششی پیوندها راحت‌تر می‌شکنند. علت این موضوع این است که در حالت فشاری، عیوبی نظیر تخلخل‌ها که در حالت کششی می‌تواند منجر به ایجاد ترک داخلی شوند، با انقباض روبرو شده و علاوه بر این‌ها فضای

خالی بین پلیمرها می‌توانند پر شوند. تمامی این پدیده‌ها عموماً باعث افزایش بیشتر جابجایی در حالت فشاری نسبت به کششی می‌شود.

جدول ۵-۵: مشخصات جذب انرژی نمونه‌های قوطی شکل با ارتفاع ۶۰ mm

شماره نمونه	کد نمونه	بیشینه بار (kN)	سطح زیر نمودار بار-جابجایی، (J)
۱	NE	۱۶/۶۰ (۰/۵۱)	۴۰/۸۵ (۱/۴۷)
۲	۱/۵٪ S	۱۵/۰۲ (۰/۵۱)	۳۵/۰۴ (۰/۸۵)
۳	۳/۰٪ S	۱۴/۴۳ (۰/۵۷)	۲۹/۶۳ (۰/۸۹)
۴	۴/۵٪ S	۱۳/۷۳ (۰/۵۳)	۲۴/۸۳ (۰/۸۴)
۵	۶/۰٪ S	۱۳/۱۲ (۰/۴۷)	۲۰/۴۲ (۰/۵۶)
۶	۱/۵٪ M	۱۴/۷۵ (۰/۴۳)	۳۱/۸۷ (۰/۲۶)
۷	۳/۰٪ M	۱۳/۹۶ (۰/۳۵)	۲۷/۴۹ (۰/۷۱)
۸	۴/۵٪ M	۱۳/۲۷ (۰/۵۲)	۲۲/۷۹ (۰/۶۴)
۹	۶/۰٪ M	۱۲/۸۴ (۰/۲۸)	۱۹/۱۶ (۰/۳۸)
۱۰	۱/۵٪ L	۱۴/۲۴ (۰/۱۳)	۲۹/۴۹ (۱/۴۳)
۱۱	۳/۰٪ L	۱۳/۵۳ (۰/۲۷)	۲۵/۱۲ (۰/۳۲)
۱۲	۴/۵٪ L	۱۳/۰۳ (۰/۳۴)	۲۱/۷۴ (۰/۲۵)
۱۳	۶/۰٪ L	۱۲/۹۳ (۰/۰۵)	۱۹/۷۴ (۰/۱۲)
۱۴	۱/۵٪ L-۱/۵٪ S	۱۴/۸۳ (۰/۵۰)	۳۱/۹۲ (۰/۹۳)
۱۵	۱/۵٪ L-۳٪ S	۱۴/۰۹ (۰/۲۹)	۲۵/۱۳ (۰/۶۹)
۱۶	۱/۵٪ L-۴/۵٪ S	۱۳/۲۴ (۰/۴۶)	۲۱/۱۱ (۰/۵۱)
۱۷	۱/۵٪ L-۱/۵٪ M	۱۴/۵۶ (۰/۳۹)	۳۰/۱۵ (۰/۲۵)
۱۸	۱/۵٪ L-۳٪ M	۱۳/۵۶ (۰/۲۳)	۲۴/۶۶ (۱/۱۷)
۱۹	۱/۵٪ L-۴/۵٪ M	۱۲/۸۹ (۰/۵۶)	۱۹/۸۵ (۰/۷۴)

جهت درک بهتر تأثیر نانوذرات، در شکل ۵-۲۲ مقایسه‌ای بین نمودار بار-جابجایی اپوکسی خالص و قوطی‌های تقویت شده با درصد‌های وزنی مختلف از نانوذرات در سری S، برای نمونه‌هایی با ارتفاع ۹۰ mm، نشان داده شده است.



شکل ۵-۲۲: نمودار بار-جابجایی سازه‌های قوطی شکل کامپوزیتی تقویت شده با نانوذرات سیلیس در سری S (ارتفاع نمونه‌ها ۹۰ mm).

در بیان علت افت مشخصه‌های جذب انرژی با افزودن نانوذرات و همچنین با افزایش محتوای آنها، به دلایل مختلفی می‌توان اشاره کرد:

از یک دیدگاه، مشابه بحثی که در آزمایش کشش ارائه شد، هنگامیکه یک نمونه تحت بارگذاری فشاری قرار می‌گیرد، زنجیره‌های پلیمری سعی می‌کنند با حرکت کردن، خود را در راستای نیروی اعمالی قرار داده و به نظم‌آرایی جدیدی برسند.

زمانیکه اپوکسی خالص با نانوذرات سیلیس تقویت می‌شود، این ذرات، روی زنجیره‌های پلیمری و نیز در فضای بین زنجیره‌ها قرار می‌گیرند. هنگامیکه به ماده نیرو وارد می‌شود، با حرکت زنجیره‌ها، ذرات سیلیس به مانند مانعی بین آنها قرار گرفته و با ایجاد قفل‌های مکانیکی باعث کندی حرکت آنها می‌شوند و در نتیجه پیوندها بر اثر فشاری که نانوذرات می‌آورند و همچنین افزایش شدید نیرو، می‌شکند. این پدیده باعث می‌شود که میزان کوتاه شدگی نمونه پیش از فروپاشی کم شده و در نتیجه

قابلیت تراکم‌پذیری نمونه نیز کاهش یابد. از این‌رو، هرچه بر محتوای ذرات افزوده می‌شود، نمونه تردتر شده و بیشینه بار قابل تحمل کاهش می‌یابد.

بنابراین با کم شدن میزان کوتاه شدگی نمونه و کاهش بیشینه بار، سطح زیر نمودار بار-جابجایی کاهش یافته و در نتیجه از میزان قابلیت جذب انرژی نمونه‌ها نیز کاسته می‌شود.

از دیدگاهی دیگر، علت افت مشخصه‌های جذب انرژی را می‌توان به مکانیزم رشد ترک موجود مرتبط دانست. مکانیزم رشد و گسترش ترک، به مود شکستی که به سازه القاء می‌شود نیز بستگی دارد. مودهای مختلف شکست در نمونه‌های مختلف، با مشاهده نحوه شکست نمونه و تصاویر میکروسکوپی گرفته شده از سطح شکست قابل تشخیص است. با این توضیح، مودهای شکست زیر قابل بیان است [۶۶]:

مود ۱: مود فروپاشی پیش‌رونده^۱ با ایجاد ترک‌های ریز و لایه لایه شدن^۲ اندک است. این مود شکست منطبق بر چین‌خوردگی پیش‌رونده^۳ و پایدار دیواره نمونه‌هاست که در این مود، انرژی از طریق لایه لایه شدن گسترده و شکسته شدن پیوندهای موجود هدر می‌رود و در نتیجه باعث بوجود آمدن ترک‌های محلی و ریز در ناحیه در حال فروپاشی شده و باعث می‌شود تکه‌های کوچکی از سازه در هر مرحله از آن جدا شود و به اطراف بریزد. بنابراین مود مذکور، یک حالت مناسب برای جذب انرژی در سازه‌های ساخته شده از کامپوزیت‌های پلیمری است. در این مود، نمونه بر اثر ایجاد لولاهای پلاستیک دچار چین‌خوردگی شده، نمودار بار-جابجایی نمونه‌ها دیگر یکنواخت نبوده و دارای قله و دره‌های متعدد خواهد بود و لذا میزان جذب انرژی کامپوزیت نسبت به نمونه اپوکسی خالص، افزایش خواهد یافت [۹۱ و ۱۰۹].

مود ۲: مود شکست ترد و ایجاد تکه‌های بزرگ است. این شکست منطبق بر یک حالت ناپایدار و خطرناک از شکست است. در این حالت بر اثر ایجاد ترک در مراحل اولیه بارگذاری بصورت ناگهانی

^۱ Progressive Failure Mode

^۲ Delamination

^۳ Progressive Folding

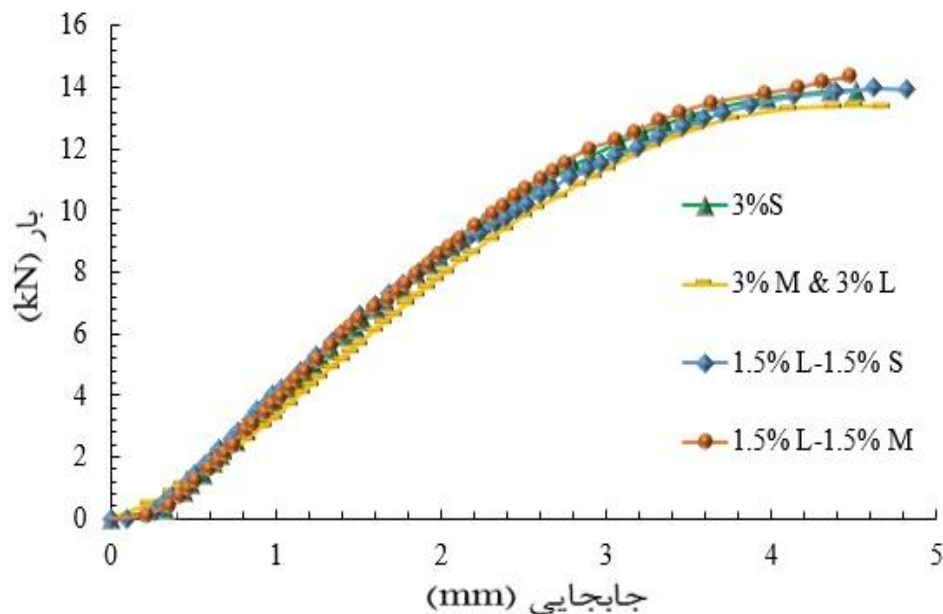
تکه‌های بزرگی از سازه جدا شده و به طرز چشمگیری استحکام و قابلیت جذب انرژی سازه را کاهش می‌دهد. همچنین مود ۲، همان مود یست که در نمونه‌های مورد بررسی ملاحظه شده است. در شکل ۵-۲۳، نمونه‌ای مشاهده می‌شود که بر اثر رشد ترک‌های محوری دچار فروپاشی شده است. در این شکل یک ترک محوری با بیضی سفید رنگ مشخص شده است. در این مود، به علت رشد سریع ترک‌ها، پیوندها بصورت ناگهانی شکسته شده و صدای ناهنجار ترکیدن و از هم پاشیدن سازه به گوش می‌رسد. بنابراین باید این آزمایش با رعایت جوانب احتیاط انجام شود، زیرا تکه‌های سازه که بصورت ترکش از آن جدا می‌شوند لبه‌هایی بسیار تیز دارند که با نیروی زیادی به اطراف پرتاب می‌شوند. در چنین سازه‌هایی که تحت بارگذاری فشاری قرار می‌گیرند، وجود یک عیب مکانیکی کوچک نظیر ذرات کلوخه شده، می‌تواند منشأ ایجاد یک ترک باشد و از آنجا که هیچ کنترلی روی این ترک‌ها وجود ندارد، لذا ترک به سرعت رشد می‌کند [۲۸ و ۳۳].

همچنین، یکی دیگر از دلایل رشد ترک را می‌توان به پیوندهای میان تقویت کننده و زمینه ربط داد. فصل مشترک قوی مقاومت بیشتری در برابر شکسته شدن پیوندها بر اثر نیروهای وارده از خود نشان می‌دهد. حال آنکه پیوند بین ذرات سیلیس و زمینه اپوکسی از جنس پیوندهای ضعیف واندروالسی است که در برابر نیروهای اعمالی مقاومت چندانی ندارند.



شکل ۵-۲۳: شکست ترد نمونه و ایجاد لبه های تیز بر اثر گسترش ترک‌های محوری و جدا شدن تکه‌های بزرگ.

شکل ۵-۲۴، مقایسه‌ای بین نمودار بار-جابجایی قوطی‌های ساخته شده از کامپوزیت‌های تقویت شده با ۳ درصد وزنی نانوسیلیکا را با اندازه و ترکیبات مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۵-۲۴: مقایسه نمودار بار-جابجایی قوطی‌های ۹۰ میلیمتری ساخته شده از کامپوزیت‌های تقویت شده با ۳ درصد وزنی نانوسیلیکا با اندازه و ترکیب مختلف.

با توجه به شکل ۵-۲۴ و استفاده از داده‌های جدول ۵-۴ که مقادیر بیشینه بار برای کامپوزیت‌های ۳ S، ۳ M، ۳ L، ۱/۵٪ L-۱/۵٪ S و ۱/۵٪ M-۱/۵٪ L را به ترتیب ۱۳/۳۵ kN، ۱۳/۸۶ kN، ۱۳/۳۷ kN و ۱۴/۳۷ kN و ۱۳/۹۵ kN گزارش کرده است، ملاحظه می‌شود که اندازه نانوذرات (در کامپوزیت‌های تک ذره‌ای) تأثیر قابل ملاحظه‌ای در قابلیت جذب انرژی نداشته، ولی در مقایسه‌ای دیگر مشخص می‌شود که در نمونه‌های دو ذره‌ای، مشخصه‌های جذب انرژی اندکی از نمونه‌های تک ذره‌ای بیشتر است که یک علت این موضوع می‌تواند برقراری میزان پیوندهای واندروالس بهتر، بین ذرات با اندازه‌های مختلف و زمینه باشد. البته ملاحظه می‌شود که در کامپوزیت ۱/۵٪ L-۱/۵٪ S، مقدار بیشینه بار اندکی بیش از کامپوزیت ۱/۵٪ L-۱/۵٪ M است که این موضوع نیز نشان می‌دهد در حالتی که فضای بین نانوذرات ۶۵ nm با ذرات کوچکتر ۱۷ nm پر شده باشد، انتقال بار از زمینه به

ذرات، نسبت به حالتی که این فضا با ذرات بزرگتر ۲۵ nm پر شده، بهتر انجام شده است. در کامپوزیت‌های تقویت شده با ۳ درصد وزنی نانوسیلیکا با اندازه و ترکیبات مختلف، تفاوت بین بیشترین و کمترین مقدار در بیشینه بار مربوط به نمونه‌های M ۳٪ و S ۱/۵٪-L ۱/۵٪ است که ۷/۶ درصد اختلاف را نشان می‌دهد. همچنین در کامپوزیت‌های تقویت شده با ۴/۵ درصد وزنی تفاوت بین بیشترین و کمترین مقدار در بیشینه بار مربوط به نمونه‌های M ۴/۵٪ و S ۳٪-L ۱/۵٪، به ترتیب با مقادیر ۱۲/۵۱ kN و ۱۳/۴۵ kN، است که ۷/۵ درصد اختلاف را نشان می‌دهد. و نهایتاً در کامپوزیت‌های تقویت شده با ۶ درصد وزنی تفاوت بین بیشترین و کمترین مقدار در بیشینه بار مربوط به نمونه‌های L ۶٪ و S ۴/۵٪-L ۱/۵٪، به ترتیب با مقادیر ۱۱/۸۳ kN و ۱۲/۸۳ kN، است که ۸/۴۵ درصد اختلاف را نشان می‌دهد.

با نگاهی به جدول ۵-۵، چنانچه بخواهیم چنین بررسی را برای نمونه‌های کوتاه‌تر ۶۰ mm انجام دهیم، به روند مشابهی خواهیم رسید؛ بدین معنا که با افزودن نانوذرات به رزین اپوکسی و همچنین با افزایش محتوای آنها، مشخصه‌های جذب انرژی دچار افت می‌شود. همچنین، بیشترین مقادیر بیشینه بار در ۱/۵، ۳، ۴/۵ و ۶ درصد وزنی به ترتیب در نمونه‌های S ۱/۵٪، S ۱/۵٪-L ۱/۵٪، S ۱/۵٪-L ۱/۵٪ و S ۱/۵٪-L ۱/۵٪ است.

همچنین ملاحظه می‌شود که اندازه ذرات تأثیر قابل توجهی در جذب انرژی ندارند و علت اینکه در کامپوزیت‌های تک‌ذره‌ای و در محتوای ذرات یکسان، بیشینه بار در سری S اندکی از دو سری دیگر بیشتر است، به این خاطر است که ذرات ریزتر، به خاطر سطح تعاملی بیشتر، پیوند بهتری با زمینه برقرار می‌کنند و در نتیجه عمل انتقال بار بهتر انجام می‌شود. [۵، ۴۹، ۵۸ و ۹۲].

اگر به صورت مورد به مورد، در هر ترکیب خاص، مقادیر جداول ۴-۵ و ۵-۵ با یکدیگر مقایسه شود، ملاحظه خواهد شد که مشخصه‌های جذب انرژی در نمونه‌های ۶۰ mm بیشتر از مشخصه‌های نمونه‌های ۹۰ mm است. لذا با توجه به اینکه نمونه‌های کوتاه‌تر مشخصه‌های جذب انرژی بالاتری داشته و مواد مصرفی کمتری در ساخت آنها بکار رفته است، در اولویت انتخاب هستند.

۵-۱-۴-۲ آزمایش فروپاشی سازه‌های مخروطی شکل

همانطور که در بخش ۴-۴ بیان شد، این آزمایش توسط یک دستگاه سروهیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ انجام شده است؛ بدین ترتیب که نمونه‌های مخروطی شکل با مشخصات: ارتفاع ۱۰۹ mm، قطر کوچک داخلی ۴۴ mm، قطر بزرگ داخلی ۶۰ mm، ضخامت پوسته ۲/۵ mm، بین دو صفحه فولادی قرار گرفته و با نرخ ۵ mm/min تحت فشار شبه استاتیکی قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است که تکرار برای هر نمونه چهار مرتبه است. در جدول ۵-۶، مشخصات جذب انرژی برای نمونه‌های مخروطی شکل آورده شده است. با توجه به داده‌های جدول ۵-۶، ملاحظه می‌شود که در جاذب مخروطی نیز با افزودن نانوذرات به رزین اپوکسی و همچنین با افزایش محتوای آنها، مشخصه‌های جذب انرژی دچار افت می‌شود.

مشابه بحثی که در مورد جاذب‌های قوطی شکل مطرح شد، ترک‌های محوری عامل شکست زود هنگام سازه شده و قابلیت جذب انرژی را کاهش می‌دهد. در شکل ۵-۲۵، نمونه‌ای مشاهده می‌شود که بر اثر رشد ترک‌های محوری دچار فروپاشی شده است. در این شکل ترک‌های محوری با بیضی سفید رنگ مشخص شده‌اند.



شکل ۵-۲۵: شکست ترد نمونه بر اثر ترک‌های محوری

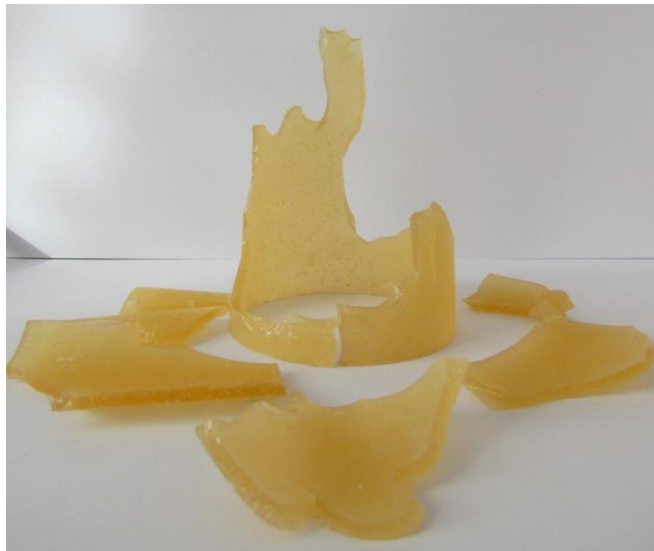
جدول ۵-۶: مشخصات جذب انرژی نمونه‌های مخروطی شکل

شماره نمونه	کد نمونه	بیشینه بار (kN)	سطح زیر نمودار بار-جابجایی، (J)
۱	NE	۱۵/۴۸(۰/۴۶)	۲۸/۷۱(۱/۱۳)
۲	۱/۵ % S	۱۳/۹۷(۰/۳۹)	۲۵/۰۷(۰/۹۳)
۳	۳/۰ % S	۱۳/۲۲(۰/۴۸)	۲۴/۷۸(۰/۸۵)
۴	۴/۵ % S	۱۲/۰۶(۰/۴۱)	۲۲/۵۴(۰/۷۱)
۵	۶/۰ % S	۱۱/۲۶(۰/۳۵)	۲۱/۴۷(۰/۸۹)
۶	۱/۵ % M	۱۳/۵۵(۰/۲۲)	۲۵/۱۹(۰/۴۴)
۷	۳/۰ % M	۱۲/۸۵(۰/۴۴)	۲۴/۱۳(۰/۵۷)
۸	۴/۵ % M	۱۱/۹۶(۰/۱۷)	۲۲/۹۶(۰/۹۳)
۹	۶/۰ % M	۱۱/۴۴(۰/۳۲)	۲۱/۳۳(۰/۷۱)
۱۰	۱/۵ % L	۱۴/۰۹(۰/۴۹)	۲۵/۴۳(۰/۶۵)
۱۱	۳/۰ % L	۱۳/۳۱(۰/۱۱)	۲۴/۴۹(۰/۴۹)
۱۲	۴/۵ % L	۱۲/۱۴(۰/۲۶)	۲۲/۶۱(۰/۷۲)
۱۳	۶/۰ % L	۱۱/۲۳(۰/۳۳)	۲۱/۶۰(۰/۵۴)
۱۴	۱/۵% L-۱/۵%S	۱۳/۶۳(۰/۰۹)	۲۵/۱۱(۰/۳۹)
۱۵	۱/۵% L-۳%S	۱۳/۱۶(۰/۱۹)	۲۳/۲۹(۰/۸۶)
۱۶	۱/۵% L-۴/۵%S	۱۲/۲۳(۰/۳۱)	۲۱/۹۱(۰/۲۱)
۱۷	۱/۵% L-۱/۵%M	۱۳/۰۸(۰/۴۷)	۲۴/۷۳(۰/۱۴)
۱۸	۱/۵% L-۳%M	۱۱/۳۶(۰/۱۶)	۲۲/۷۳(۰/۷۵)
۱۹	۱/۵% L-۴/۵%M	۱۱/۷۹(۰/۳۵)	۲۱/۸۰(۰/۴۹)

در بارگذاری محوری این نوع سازه‌ها، به علت رشد سریع ترک‌ها در امتداد ارتفاع، پیوندها بصورت ناگهانی شکسته شده و صدای ناهنجار ترکیدن و از هم پاشیدن سازه به گوش می‌رسد. شکل ۵-۲۶ تکه‌های بزرگ و تیز جدا شده از یک نمونه مخروطی را پس از فروپاشی نشان می‌دهد.

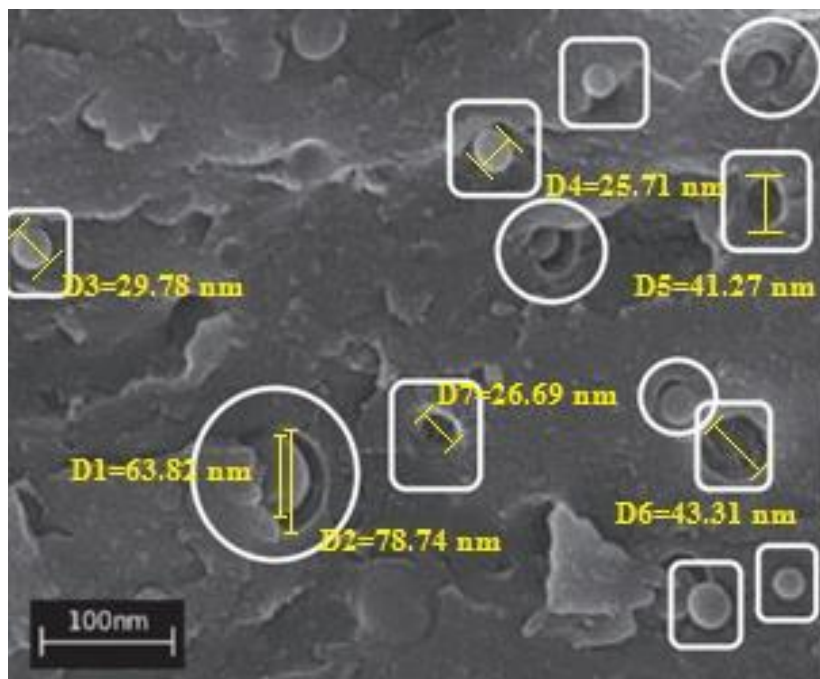
نکته‌ای که باید به آن توجه داشت، توزیع نانوذرات داخل رزین است. چنانچه این توزیع به گونه‌ای باشد که ذرات در بعضی نقاط انباشته شوند، این نقاط به عنوان یک عیب مکانیکی، زمینه را برای رشد سریع ترک فراهم کرده و به موازات آن قابلیت جذب انرژی را کاهش می‌دهد [۱۱۷]. پیشتر

نیز توسط محققین گزارش شده است که با افزایش محتوای نانوذرات به رزین، برخی خواص دچار افت شده است که این موضوع را می‌توان به تمرکز تنش در مجاورت نانوذرات بر اثر کاهش فاصله‌ی ذرات و یا افزایش کلوخه‌ها مرتبط دانست [۵۳ و ۵۸].



شکل ۵-۲۶: جدا شدن تکه‌های بزرگ در راستای ارتفاع بر اثر رشد ترک‌های محوری.

یکی از مکانیزم‌های اثر بخشی نانوذرات که کم و بیش در همه آزمایشات مورد بررسی در این رساله نقش اساسی داشته است، شکسته شدن پیوند و حفره زایی پلاستیک است. شکل ۵-۲۷ سطح شکست کامپوزیت M-۳٪ L-۱/۵٪ را نشان می‌دهد. دایره‌های سفید، نانوذراتی را نشان می‌دهند که فقط قسمتی از پیوندهای آنان دچار گسیختگی شده است. در حالیکه مربع‌های سفید، بیانگر نانوذراتی هستند که پیوندهای آنها در طی فرآیند شکست، از یک سطح شکست بطور کامل گسیخته شده و در روی سطح دیگر باقی مانده‌اند. مربع‌هایی که درون آنها نانوذره قرار دارد، مبین این است که نانوذره از سطح شکست دیگر بطور کامل گسیخته شده و در سطح شکست نشان داده شده باقی مانده است و مربع‌های خالی مبین این نکته است که نانوذرات روی سطح دیگر شکست باقی مانده‌اند. بنابراین ملاحظه می‌شود که یکی از مکانیزم‌های اصلی اثر بخشی نانوذرات، شکسته شدن پیوند آنهاست.



شکل ۵-۲۷: مکانیزم‌های شکسته شدن پیوند و حفره زایی پلاستیک در سطح شکست کامپوزیت
۱/۵ % L - ۳ % M

برای اطمینان از اینکه حفره‌های موجود در شکل ۵-۲۷، حباب نبوده، اندازه برخی از ذرات و جاهای خالی، مشخص شده است که نشان می‌دهد ابعاد جاهای خالی فقط اندکی بزرگتر از ابعاد نانوذرات است. این موضوع مبین این مطلب است که نانوذره دچار شکستگی پیوند شده و محل آن خالی شده است و اینکه اندازه این محل‌های خالی اندکی از اندازه نانوذرات بیشتر است، به خاطر پدیده حفره‌زایی پلاستیک است. با کمی دقت در دایره‌های سفید رنگ ملاحظه می‌شود که یک مکانیزم اثر بخشی مهم دیگر، حفره زایی پلاستیک است. پیش از شکسته شدن پیوند ذرات با زمینه اپوکسی، فاز میانی در مقابل نیروی وارد شده مقاومت می‌کند و در نتیجه دچار اندکی تغییر شکل پلاستیک می‌شود. هنگامیکه پیوندهای یک نانوذره از یک سمت شروع به شکسته شدن می‌کند، فضای خالی به وجود می‌آید که مبین این است که فاز میانی پیش از گسیختگی کامل دچار اندکی تغییر شکل پلاستیک شده که به این پدیده حفره زایی پلاستیک می‌گویند [۶۰، ۱۱۳ و ۱۴۹].

همچنین برای اطمینان بیشتر می‌توان این سطح شکست را با تصویری از سطح شکست اپوکسی خالص (شکل ۵-۳) مقایسه کرد و چنانچه در سطح شکست اپوکسی خالص حفره‌ای نبود می‌توان تا حدی استناد کرد که سوراخ‌های موجود در سطح شکست نانوکامپوزیت مذکور، محل خالی شده‌ی نانوذرات است. لذا با مقایسه شکل ۵-۲۷ و ۵-۳ ملاحظه می‌شود که در سطح شکست اپوکسی خالص، حفره‌ای دیده نمی‌شود و می‌توان با دقت قابل قبولی این دو تصویر را به لحاظ وجود یا عدم وجود حفره مقایسه کرد.

۵-۲ نتایج مدل‌سازی ریاضی

۵-۲-۱ مقدمه

بر اساس توضیحات داده شده در فصل چهارم، آزمایش‌های تجربی بر اساس تغییرات درصد وزنی نانوذرات در سه سری S، M و L انجام و نتایج برای هر آزمایش با تکرار مناسب اندازه‌گیری شد. برای تأیید نتایج بدست آمده، پیش‌بینی مناسب بودن روند تغییرات و در نهایت بهینه‌سازی یا رسیدن به نقطه خاص که هدف نهایی هر آزمایش و طراحی مهندسی است؛ در هر اندازه‌گیری تجربی، به خصوص در مواردی که هزینه هر آزمایش بالا و آزمایش مربوطه زمان‌بر باشد، کارهای مدل‌سازی با هدف کاستن از هزینه آزمایش‌ها و تسریع در روند بهینه‌سازی بسیار مرسوم و متعارف است.

کلیه روش‌های مدل‌سازی استفاده شده در این رساله با استفاده از نرم افزار متلب پیاده‌سازی شده‌اند. بر این اساس و با توجه به مطالب موجود در این زمینه که پیشتر به برخی از آنها اشاره شد، روش‌های متعارف مدل‌سازی ریاضی در حوزه نانوذرات در رشته مکانیک بررسی و از بین روش‌های مدل‌سازی موجود، روش‌های سطح پاسخ و شبکه‌های عصبی مصنوعی به عنوان روش‌های بهتر، مرسوم‌تر و با دقتی بالاتر، انتخاب شدند. لازم به ذکر است که اصول دو روش فوق متفاوت می‌باشد، اما محققین بسیاری [۱۵۳ و ۱۵۴] این دو روش را به صورت همزمان استفاده و بر اساس دقت خروجی، دو روش را با هم مقایسه کرده‌اند که کاری بسیار متعارف می‌باشد.

بر این اساس، در این بخش، ابتدا پارامترهایی که نیاز به مدل‌سازی دارند، با سه روش سطح پاسخ خطی، سطح پاسخ مربعی و شبکه عصبی مدل شده و در نهایت پس از انجام مدل‌سازی، پارامترهای آماری و خطای سه روش با یکدیگر مقایسه و بهترین روش به عنوان "مدل منتخب" برگزیده شده‌اند. لازم به ذکر است که در ادامه، آزمایش‌ها و بهینه‌سازی‌هایی در صورت لزوم بر روی "مدل منتخب" صورت خواهد گرفت.

با توجه به تئوری توضیح داده شده در فصل قبل، روش‌های سطح پاسخ خطی و سطح پاسخ مربعی، پارامتر متغیر خاصی ندارد و بصورت کاملاً استاندارد و ریاضیاتی استفاده شده‌اند؛ اما شبکه‌های عصبی مصنوعی با توجه به انعطاف پذیری و پارامترهای متغیر، در مجموعه‌ای از حالات، آزمایش شده و در نهایت بهترین پارامترها برای هر متغیر شبکه، انتخاب و شبکه عصبی با آن پارامترها پیاده‌سازی و نتایج با روش‌های سطح پاسخ خطی و مربعی مقایسه خواهد شد. شبکه عصبی منتخب، از نوع تغذیه رو به جلو^۱ با الگوریتم آموزش از نوع پس انتشار خطا^۲ و روش آموزش گرادیان نزولی است. تعداد لایه‌های شبکه سه عدد بوده که شامل لایه ورودی (با سه ورودی)، لایه مخفی و لایه خروجی (با یک خروجی) می‌باشد. تعداد نرون‌های لایه مخفی بر اساس بهترین پاسخ (یعنی کمترین خطا) در هر مرحله انتخاب شده است.

لازم به ذکر است که ضریب یادگیری و ممنتوم در نرم افزار متلب به صورت پیش فرض مقدار دهی و در پروسه آموزش بهینه می‌شوند. بنابراین در پیاده‌سازی صورت گرفته از مقادیر پیش فرض و تنظیمات اولیه نرم افزار متلب استفاده شده و به هیچ وجه این دو پارامتر به صورت دستی مقدار دهی اولیه و یا تغییر داده نشدند. در صورتیکه شبکه واگرا شود، می‌توان به صورت دستی اقدام به تغییر در این مقادیر کرد؛ که با توجه به جواب بسیار مناسب خروجی نیازی به این امر احساس نشد.

¹ Feed forward net

² Back propagation error

درصد اطلاعات، آموزش و آزمایش در کلیه شبکه‌های عصبی پیاده سازی شده، برابر ۷۰ درصد آموزش و ۳۰ درصد آزمایش انتخاب شده است. به عبارت دیگر از ۱۹ نمونه آزمایش شده، تعداد ۱۳ نمونه برای آموزش و باقی برای ارزیابی مدل استفاده شده است.

۵-۲-۲ مدول یانگ

بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایش کشش، برای پارامتر استحکام شکست، می‌توان ابراز داشت که با توجه به ثابت بودن نسبی این پارامتر به موازات تغییر پارامترهای مربوط به نانوذرات، این پارامتر نیاز به مدل‌سازی خاصی نداشته و می‌توان با تقریب قابل قبولی آن را بین اعداد ۱۹ MPa تا ۲۰ MPa تقریباً ثابت فرض کرد.

اما با توجه به اینکه مقادیر مدول یانگ، با تغییر محتوای نانوذرات تغییر می‌کند، نیاز به مدل‌سازی دارد. فرمول‌های بدست آمده برای مدول یانگ توسط مدل‌های سطح پاسخ خطی و سطح پاسخ مربعی به ترتیب در روابط ۵-۶ و ۵-۷، آورده شده است. در بحث مدل‌سازی متغیرهای X_1 ، X_2 و X_3 به ترتیب درصد وزنی نانوذرات سری‌های S، M و L هستند. لازم به ذکر است که شبکه عصبی، فرمول ریاضی صریحی به عنوان خروجی به ما نمی‌دهد و لذا رابطه‌ای برای آن در هیچ کدام از شبیه سازی‌ها، آورده نشده است.

$$E_{RSM-Line} = 1488.07 + 35.09x_1 + 33.11x_2 + 29.21x_3 \quad (۵-۶)$$

$$E_{RSM-Quad} = 1535.09 - 3.52x_1 - 1.71x_2 - 8.63x_3 + 5.31x_1^2 + 4.77x_2^2 + 5.43x_3^2 +$$

$$0.0x_1x_2 + 13.89x_1x_3 + 11.26x_2x_3$$

در جدول ۵-۷، پارامترهای آماری مربوط به پیش‌بینی هر سه مدل برای مدول یانگ، به ترتیب شامل خطای نسبی^۱ (RE)، مجموع مربعات رگرسیون^۲ (SS_{reg})، میانگین مربعات خطا^۳ (MSE)، R^2 ^۴، R^2_{adj} ^۵ و جذر میانگین مربعات خطا^۶ (RMSE) گزارش شده است.

از داده‌های جدول ۵-۷ ملاحظه می‌شود که روش سطح پاسخ مربعی نسبت به دو روش دیگر خطای نسبی و میانگین مربعات خطای کمتری دارد. علاوه بر آن در سایر پارامترها نیز نسبت به دو روش دیگر بهتر بوده و یا حداقل با آنها برابری می‌کند. بنابراین در روند مدل‌سازی مربوط به مدول یانگ، از مدل سطح پاسخ مربعی به عنوان "مدل منتخب" استفاده خواهد شد.

جدول ۵-۷: پارامترهای آماری مدل‌های RSM و ANN برای مدول یانگ

Model	RE	SS_{reg}	MSE	R^2	R^2_{adj}	RMSE
RSM linear	۱/۰۷۱	۶۵۶۷۰/۶	۴۴۶/۲	۰/۸۸۶	۰/۸۵۳	۷۲/۷۷۴
RSM quadratic	۰/۵۷۰	۷۱۶۲۸/۸	۱۳۲/۵	۰/۹۶۶	۰/۹۲۴	۹۶/۲۷۲
ANN	۰/۶۷۲	۷۸۸۴۶/۵	۲۰۴/۱	۰/۹۴۸	۰/۸۸۲	۹۶/۲۷۲

به منظور تأیید نتایج بدست آمده در جدول ۵-۷، جواب تجربی و جواب سه مدل، در شکل ۵-۲۸ آورده شده است. در نمودار میله‌ای "الف"، ستون‌های آبی مبین عدد اندازه‌گیری شده تجربی، ستون‌های قرمز، سبز و زرد، به ترتیب، مربوط به روش شبکه عصبی، سطح پاسخ خطی و سطح پاسخ مربعی است. در نمودار میله‌ای "ب"، خطای هر یک از مدل‌ها بر حسب درصد آورده شده تا مقایسه مقدار خطای مدل‌ها راحت‌تر صورت گیرد. با توجه به نمودار خطاها، ملاحظه می‌شود که روش سطح پاسخ خطی دارای بیشترین خطا بوده و روش‌های سطح پاسخ مربعی و شبکه عصبی هر دو خطای نسبتاً کمی دارند.

¹ Relative Error

² Sum of Squares of the Regression

³ Mean Squared Error

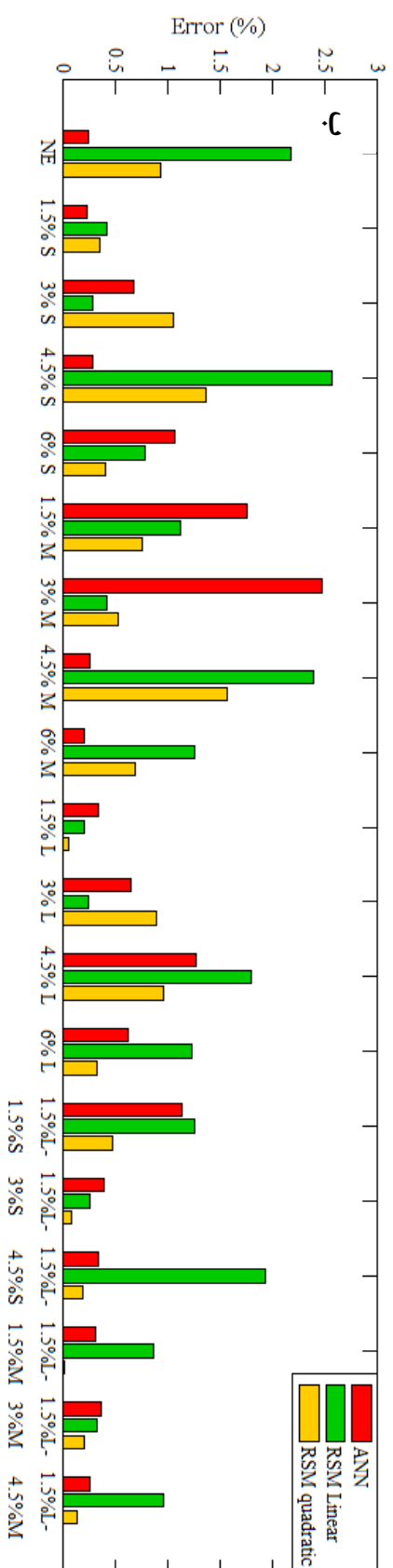
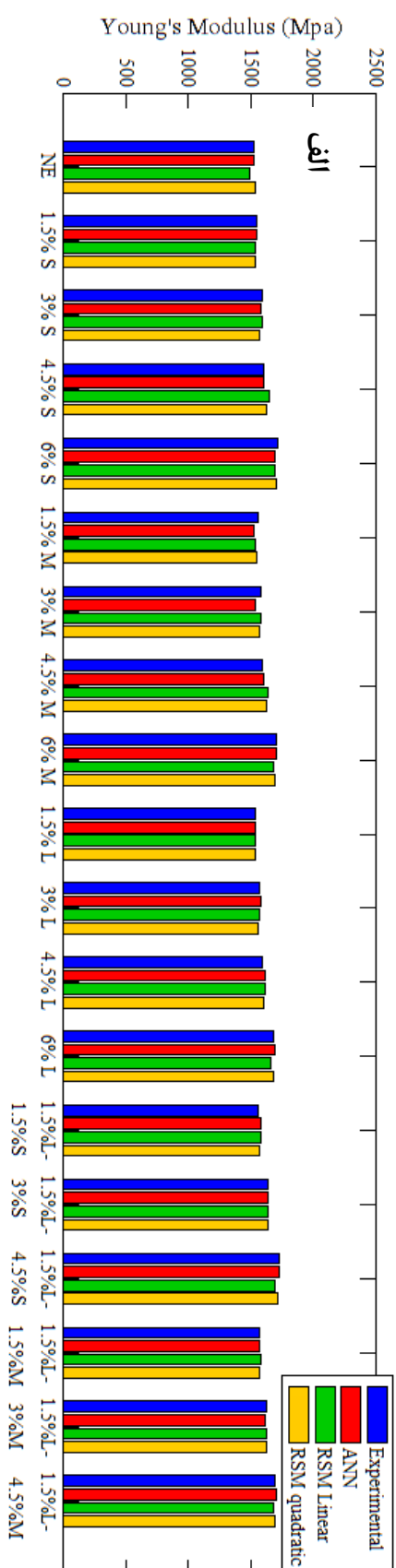
⁴ Coefficient of Determination

⁵ Adjusted R^2

⁶ Root Mean Squared Error

بنابراین با توجه به یکنواختی بیشتر خطاها در روش سطح پاسخ مربعی (واریانس کمتر) و همچنین میانگین نسبتاً کمتر خطا در این روش (که در جدول پارامترهای آماری مقدار عددی آن آورده شده است)، با قاطعیت بیشتری می‌توان ابراز کرد که برای مدول یانگ، روش سطح پاسخ مربعی نسبت به دو روش دیگر مدل‌سازی ارجحیت دارد.

جهت مقایسه بهتر، پس از مشخص شدن مدل سطح پاسخ مربعی به عنوان "مدل منتخب"، اطلاعات تجربی به همراه اطلاعات حاصل از مدل منتخب، در جدول ۵-۸ آورده شده است. این مقایسه، خطای نسبتاً کم بین نقاط اندازه‌گیری شده و نقاط بدست آمده توسط "مدل منتخب" را بهتر آشکار کرده و همانگونه که از نتایج پیداست، در تمام نقاط، مدل انطباق بسیار خوبی با مقادیر تجربی دارد.



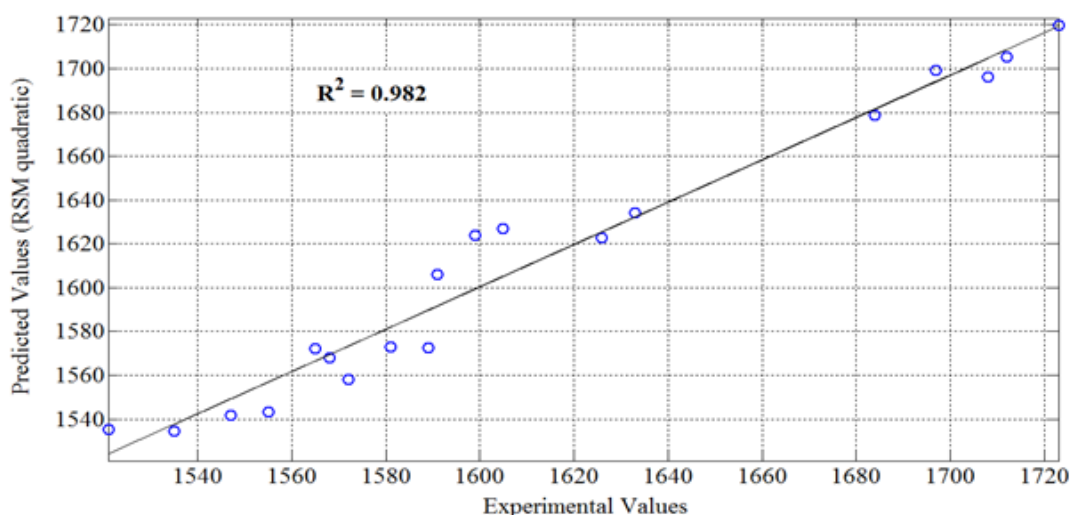
شکل ۵- ۲۸: الف) مقایسه روش‌های RSM quadratic، RSM linear و ANN برای مدول یانگ، ب) خطای هر مدل بر حسب درصد

جدول ۵- ۸: مقایسه بین مدول یانگ بدست آمده از آزمایش کشش و مدول منتخب

شماره نمونه	کد نمونه	کسر حجمی (Vol%)	مدول یانگ (MPa)	
			مدل منتخب	تجربی
۱	NE	۰	۱۵۲۱	۱۵۲۱
۲	۱/۵ % S	۰/۶۹۹	۱۵۴۲	۱۵۴۷
۳	۳/۰ % S	۱/۴۱	۱۵۷۲	۱۵۸۹
۴	۴/۵ % S	۲/۱۳	۱۶۲۷	۱۶۰۵
۵	۶/۰ % S	۲/۸۶	۱۷۰۵	۱۷۱۲
۶	۱/۵ % M	۰/۶۹۹	۱۵۴۳	۱۵۵۵
۷	۳/۰ % M	۱/۴۱	۱۵۷۳	۱۵۸۱
۸	۴/۵ % M	۲/۱۳	۱۶۲۴	۱۵۹۹
۹	۶/۰ % M	۲/۸۶	۱۶۹۴	۱۷۰۸
۱۰	۱/۵ % L	۰/۶۹۹	۱۵۳۴	۱۵۳۵
۱۱	۳/۰ % L	۱/۴۱	۱۵۵۸	۱۵۷۲
۱۲	۴/۵ % L	۲/۱۳	۱۶۰۶	۱۵۹۱
۱۳	۶/۰ % L	۲/۸۶	۱۶۷۹	۱۶۸۴
۱۴	۱/۵% L-۱/۵% S	۱/۴۱	۱۵۷۲	۱۵۶۵
۱۵	۱/۵% L-۳% S	۲/۱۳	۱۶۳۴	۱۶۳۳
۱۶	۱/۵% L-۴/۵% S	۲/۸۶	۱۷۲۰	۱۷۲۳
۱۷	۱/۵% L-۱/۵% M	۱/۴۱	۱۵۶۸	۱۵۶۸
۱۸	۱/۵% L-۳% M	۲/۱۳	۱۶۲۳	۱۶۲۶
۱۹	۱/۵% L-۴/۵% M	۲/۸۶	۱۶۹۹	۱۶۹۷

لازم به توضیح است که روش‌های سطح پاسخ مربعی و خطی نیاز به داده آزمایش و آموزش نداشته و به صورت مستقیم با همه اطلاعات آموزش داده می‌شوند؛ در صورتی که نقطه‌ای پرت یا خارج از بازه قابل قبول پیش‌بینی قرار داشته باشد، در همان ابتدا، در خطا و نتایج خود را نشان می‌دهد و بنابراین در این دو مدل مشابه روش‌هایی چون شبکه عصبی، نیاز به دسته بندی اطلاعات به آموزش و آزمایش نیست.

برای اثبات نزدیکی و اعتبار مدل سطح پاسخ مربعی، مقدار پارامتر R^2 برای اطلاعات پیش‌بینی شده توسط روش سطح پاسخ مربعی و همچنین برای مقادیر تجربی در شکل ۵-۲۹ آورده شده است. توجه شود که قرار داشتن نقاط در دو طرف خط رسم شده با ضریب زاویه‌ی یک، حاکی از اعتبار مدل و درصد R^2 بسیار بالا، نشانگر دقت بسیار مناسب نتایج مدل با اطلاعات تجربی دارد. لازم به ذکر است که R^2 در حالت ایده‌آل برابر عدد یک و در کاربردهای متعارف مهندسی بالای ۰/۹ قابل قبول است. بنابراین مقدار R^2 برابر ۰/۹۸۲ برای مدل سطح پاسخ مربعی، بیانگر انطباق بسیار مناسب اطلاعات مدل و اطلاعات تجربی است.



شکل ۵-۲۹: اعتبارسنجی مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل منتخب در مقایسه با مقادیر تجربی برای مدول یانگ توسط پارامتر R^2 .

پس از مشخص شدن انطباق خوب مدل منتخب با نتایج تجربی، برای نشان دادن نحوه تغییر مدول یانگ با درصد وزنی ذرات، به سراغ منحنی‌های سه بعدی می‌رویم.

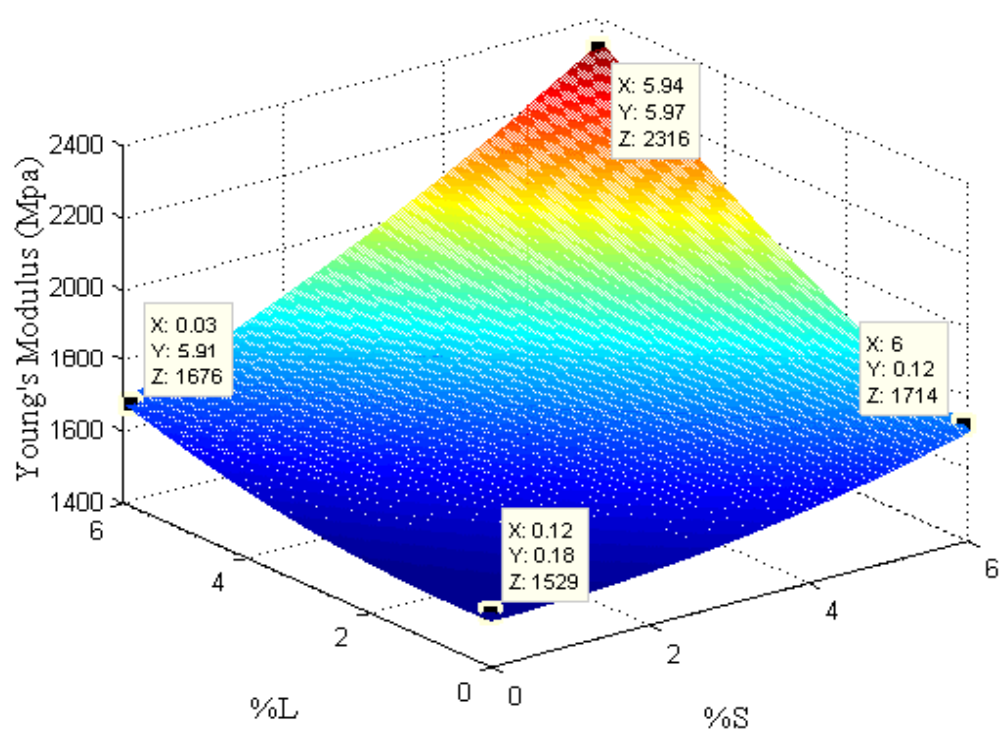
با توجه به ترکیب کامپوزیت‌هایی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است، دو دسته نمودار برای هر پارامتر قابل ارائه است؛ دسته اول نمودارهایی هستند که تغییرات پارامتر مورد نظر را بر حسب تغییر محتوای نانوذرات دو سری L و S نشان می‌دهند و دسته دوم نمودارهایی هستند که

تغییرات پارامتر مورد نظر را بر حسب تغییر محتوای نانوذرات دو سری L و M نشان می‌دهند. بدین ترتیب، تغییرات مدول یانگ بر حسب تغییر درصد وزنی نانوذرات دو سری L و S و نیز تغییر محتوای نانوذرات دو سری L و M، به ترتیب در شکل‌های ۵-۳۰ و ۵-۳۱ نشان داده شده است. همانطور که از این دو منحنی سه بعدی پیداست، مدول یانگ هم با افزایش نانوذرات سری L و هم با افزایش نانوذرات سری S یا M افزایش یافته و همچنین استفاده ترکیبی از این دو نانوذره نیز هم‌افزایی ویژه‌ای را نشان می‌دهد؛ بطوریکه با حرکت به سمت انتهای منحنی، مقدار مدول یانگ، حالت افزایشی داشته و به صورت کاملاً مشخص با افزایش درصد وزنی افزایش بیشتری می‌یابد. به عنوان مثال، در کامپوزیتی که دارای ۶ درصد وزنی از هر کدام از نانوذرات سری S و L است، مدول یانگ ۲۳۱۹ MPa و در کامپوزیتی که دارای ۶ درصد وزنی از هر کدام از نانوذرات سری M و L است، مدول یانگ ۲۲۲۰ MPa پیش‌بینی شده که نسبت به مقدار مدول یانگ اپوکسی خالص (۱۵۲۱ MPa) به ترتیب ۵۲/۴۶٪ و ۴۵/۹۵٪ افزایش را نشان می‌دهد.

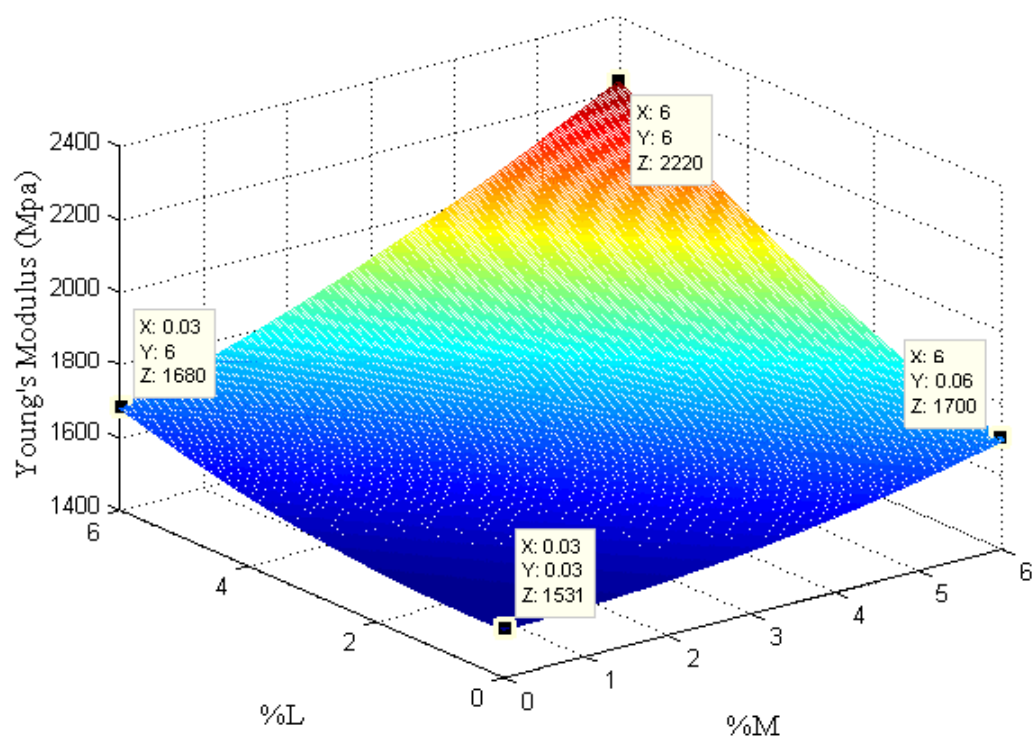
در ادامه، معادلات ۵-۸ و ۵-۹، مستخرج از مدل منتخب، برای بررسی تغییر مدول یانگ بر حسب درصد وزنی نانوذرات سری S و L و همچنین نانوذرات سری M و L، ارائه شده است:

$$E_{(x_1=S, x_3=L)} = 1529.63 - 0.51x_1 - 5.86x_3 + 4.95x_1^2 + 5.11x_3^2 + 13.19x_1x_3 \quad (۵-۸)$$

$$E_{(x_2=M, x_3=L)} = 1531.09 + 0.29x_2 - 5.10x_3 + 4.54x_2^2 + 4.92x_3^2 + 10.47x_2x_3 \quad (۵-۹)$$



شکل ۵-۳۰: نمودار سه بعدی تغییرات مدول یانگ برحسب درصد وزنی نانوذرات سری S و L بر اساس مدل منتخب



شکل ۵-۳۱: نمودار سه بعدی تغییرات مدول یانگ برحسب درصد وزنی نانوذرات سری M و L بر اساس مدل منتخب

۵-۲-۳ چقرمگی شکست و انرژی شکست

در مرحله‌ی دوم مدل‌سازی، پارامترهای چقرمگی شکست (K_{IC}) و انرژی شکست (G_{IC}) با استفاده از سه روش سطح پاسخ خطی، سطح پاسخ مربعی و شبکه عصبی مصنوعی، مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به سه روش اشاره شده، فرمول‌های بدست آمده در روش سطح پاسخ برای K_{IC} و G_{IC} در روابط ۵-۱۰ تا ۵-۱۳ آورده شده است. در جداول ۵-۹ و ۵-۱۰، پارامترهای آماری هر سه روش برای دو متغیر چقرمگی شکست و انرژی شکست ارائه شده است. همانطور که مشخص است از نظر میانگین مربعات خطا، روش سطح پاسخ مربعی بهتر و از نظر خطای نسبی نیز دارای شرایط مناسبی می‌باشد. گرچه در این دو معیار روش شبکه عصبی نیز پاسخ قابل قبولی داشته و از نظر مقادیر به سطح پاسخ بسیار نزدیک می‌باشد، اما در ادامه توضیح داده خواهد شد که چرا مدل سطح پاسخی به عنوان "مدل منتخب" برگزیده شده است.

$$K_{IC-RSM-Line} = 0.425 + 0.031x_1 + 0.03x_2 + 0.033x_3 \quad (۵-۱۰)$$

$$K_{IC-RSM-Quad} = 0.4017 + 0.0477x_1 + 0.0454x_2 + 0.0554x_3 - 0.0024x_1^2 - 0.0022x_2^2 - 0.0037x_3^2 + 0.0x_1x_2 - 0.0041x_1x_3 - 0.0037x_2x_3 \quad (۵-۱۱)$$

$$G_{IC-RSM-Line} = 102.654 + 14.034x_1 + 13.543x_2 + 15.292x_3 \quad (۵-۱۲)$$

$$G_{IC-RSM-Quad} = 88.7909 + 23.9765x_1 + 22.5572x_2 + 28.6822x_3 - 1.4378x_1^2 - 1.2902x_2^2 - 2.1784x_3^2 + 0.0x_1x_2 - 2.7150x_1x_3 - 2.2042x_2x_3 \quad (۵-۱۳)$$

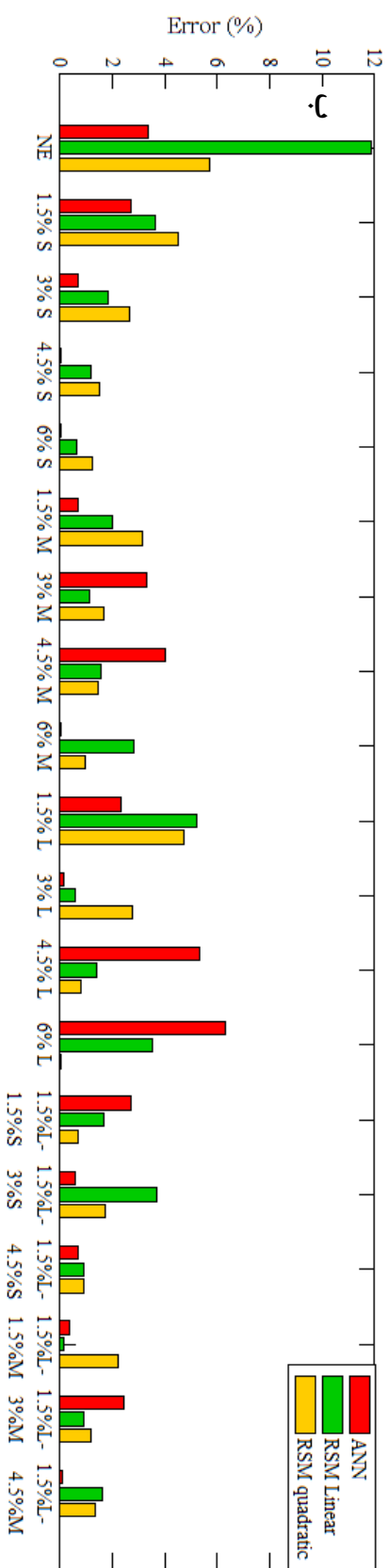
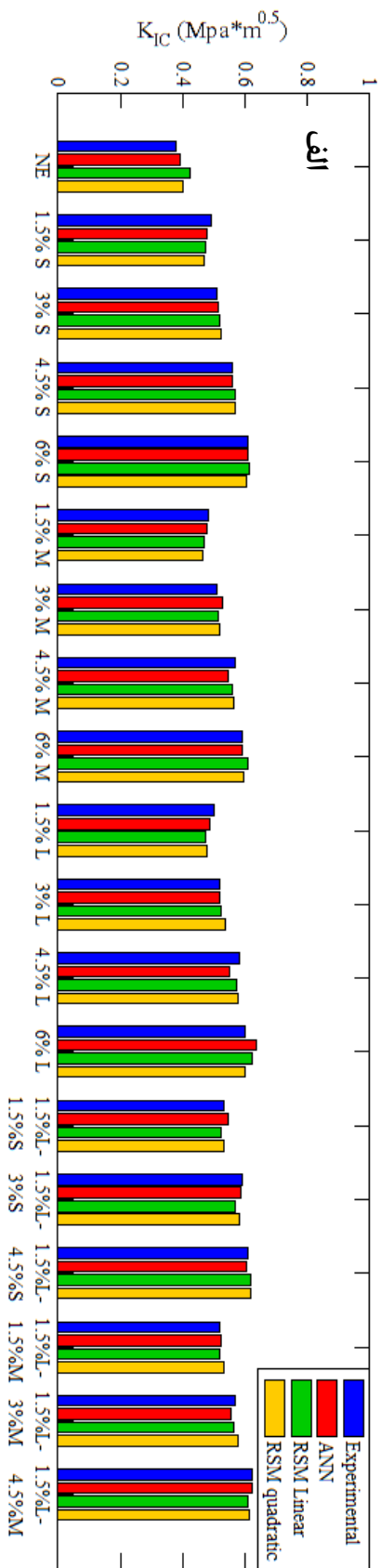
جدول ۵- ۹: پارامترهای آماری مدل‌های RSM و ANN برای چقرمگی شکست

Model	RE	SS _{reg}	MSE	R ²	R ² _{adj}	RMSE
RSM linear	۵/۳۷۴	۱۳۰۵۵/۲	۸۷/۹	۰/۸۷۹	۰/۸۴۴	۳۱/۳۴۷
RSM quadratic	۴/۲۲۶	۱۳۱۱۹/۷	۴۵/۶	۰/۹۳۷	۰/۸۵۸	۴۱/۴۶۹
ANN	۴/۰۱۵	۱۳۹۳۳/۰	۸۱/۶	۰/۸۸۷	۰/۷۴۷	۴۱/۴۶۹

جدول ۵- ۱۰: پارامترهای آماری مدل‌های RSM و ANN برای انرژی شکست

Model	RE	SS _{reg}	MSE	R ²	R ² _{adj}	RMSE
RSM linear	۲/۴۲۷	۰/۰۵۹	۰/۰۰۰۲۶	۰/۹۲۴	۰/۹۰۳	۰/۰۶۸
RSM quadratic	۲/۰۵۱	۰/۰۶۱	۰/۰۰۰۱۵	۰/۹۵۶	۰/۹۰۱	۰/۰۹۰
ANN	۱/۸۷۶	۰/۰۶۵	۰/۰۰۰۲۲	۰/۹۳۶	۰/۸۵۶	۰/۰۹۰

در نمودار میله‌ای شکل ۵-۳۲، نتایج هر سه مدل با مقدار تجربی مقایسه شده است که می‌توان خطای بسیار زیاد سطح پاسخ خطی را در حالتی که درصد وزنی نانو ذرات صفر است، مشاهده نمود. باز هم روش‌های شبکه عصبی و سطح پاسخ مربعی خطای بسیار کمتری نسبت به سطح پاسخ خطی دارند؛ اما با کمی دقت می‌توان مشاهده کرد که تغییرات سطح پاسخ مربعی نسبت به شبکه عصبی هموارتر و دارای یکنواختی بیشتر و بنابراین مناسب‌تر است. با توجه به انتخاب سطح پاسخ مربعی به عنوان "مدل منتخب"، در جدول ۵-۱۱، نتایج این مدل در مقایسه با نتایج تجربی برای دو پارامتر چقرمگی شکست و انرژی شکست آورده شده و همانطور که ملاحظه می‌شود، نتایج "مدل منتخب" از تطابق خوبی با نتایج تجربی برخوردار است.



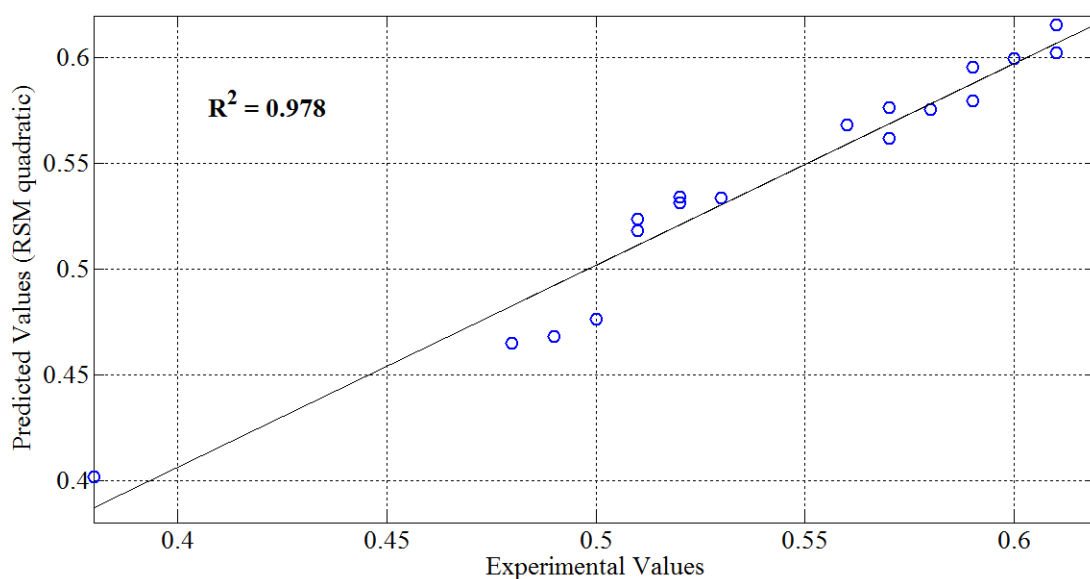
شکل ۵- ۳۲: الف) مقایسه روش‌های RSM quadratic, RSM linear و ANN برای K_{IC} , ب) خطای هر مدل بر حسب درصد

جدول ۵- ۱۱: مقایسه بین مقادیر تجربی چقرمگی شکست و انرژی شکست کامپوزیت‌های مختلف با "مدل منتخب"

شماره نمونه	کد نمونه	کسر حجمی (Vol%)	چقرمگی شکست، K_{IC} (MPa $\sqrt{m}$)		انرژی شکست، G_{IC} (J/m ²)	
			مدل تجربی	مدل	تجربی	مدل
۱	NE	۰	۰/۳۸	۰/۴۰	۸۰/۵۰	۸۹/۲۰
۲	۱/۵ % S	۰/۶۹۹	۰/۴۹	۰/۴۷	۱۳۱/۶۰	۱۲۰/۵۱
۳	۳/۰ % S	۱/۴۱	۰/۵۱	۰/۵۲	۱۳۸/۷۹	۱۴۷/۸۸
۴	۴/۵ % S	۲/۱۳	۰/۵۶	۰/۵۷	۱۶۵/۶۷	۱۶۸/۴۵
۵	۶/۰ % S	۲/۸۶	۰/۶۱	۰/۶۰	۱۸۴/۲۹	۱۸۰/۵۸
۶	۱/۵ % M	۰/۶۹۹	۰/۴۸	۰/۴۶	۱۲۵/۶۳	۱۱۸/۸۵
۷	۳/۰ % M	۱/۴۱	۰/۵۱	۰/۵۲	۱۳۹/۴۹	۱۴۴/۹۳
۸	۴/۵ % M	۲/۱۳	۰/۵۷	۰/۵۶	۱۷۲/۲۸	۱۶۴/۹۵
۹	۶/۰ % M	۲/۸۶	۰/۵۹	۰/۶۰	۱۷۲/۸۱	۱۷۷/۴۳
۱۰	۱/۵ % L	۰/۶۹۹	۰/۵۰	۰/۴۸	۱۳۸/۰۹	۱۲۵/۵۳
۱۱	۳/۰ % L	۱/۴۱	۰/۵۲	۰/۵۳	۱۴۵/۸۵	۱۵۵/۵۰
۱۲	۴/۵ % L	۲/۱۳	۰/۵۸	۰/۵۸	۱۷۹/۲۸	۱۷۴/۹۵
۱۳	۶/۰ % L	۲/۸۶	۰/۶	۰/۶۰	۱۸۱/۲۶	۱۸۱/۸۳
۱۴	۱/۵% L-۱/۵% S	۱/۴۱	۰/۵۳	۰/۵۳	۱۵۲/۱۹	۱۵۳/۶۰
۱۵	۱/۵% L-۳% S	۲/۱۳	۰/۵۹	۰/۵۸	۱۸۰/۷۴	۱۷۴/۵۸
۱۶	۱/۵% L-۴/۵% S	۲/۸۶	۰/۶۱	۰/۶۲	۱۸۳/۱۱	۱۸۶/۹۰
۱۷	۱/۵% L-۱/۵%M	۱/۴۱	۰/۵۲	۰/۵۳	۱۴۶/۲۲	۱۵۲/۸۱
۱۸	۱/۵% L-۳%M	۲/۱۳	۰/۵۷	۰/۵۸	۱۶۹/۴۲	۱۷۳/۷۷
۱۹	۱/۵% L-۴/۵%M	۲/۸۶	۰/۶۲	۰/۶۱	۱۹۲/۰۶	۱۸۶/۸۹

به منظور اعتبارسنجی مدل منتخب، مقدار پارامتر R^2 برای چقرمگی شکست در شکل ۵-۳۳ آورده

شده است که عدد بسیار مناسب ۰/۹۷۸ و یا ۹۷/۸ درصد انطباق را نشان می‌دهد.



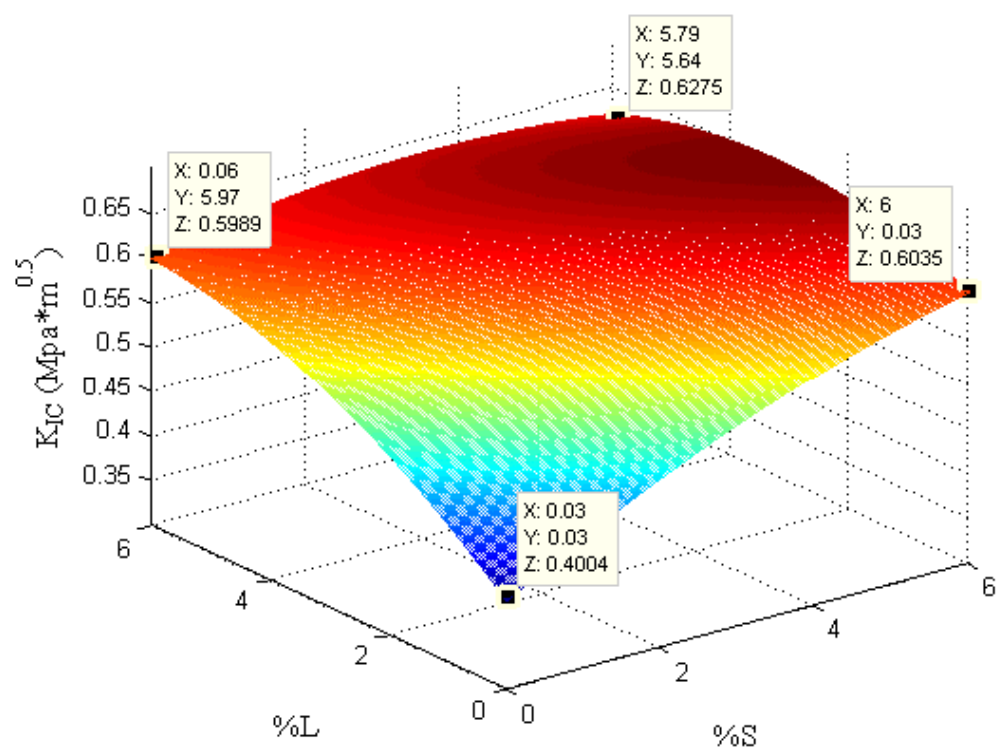
شکل ۵-۳۳: اعتبارسنجی مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل منتخب در مقایسه با مقادیر تجربی برای چقرمگی شکست توسط پارامتر R^2 .

در ادامه، معادلات ۵-۱۴ و ۵-۱۵، مستخرج از مدل منتخب، برای بررسی تغییرات چقرمگی شکست بر حسب درصد وزنی نانوذرات سری S و L و همچنین نانوذرات سری M و L، ارائه شده است.

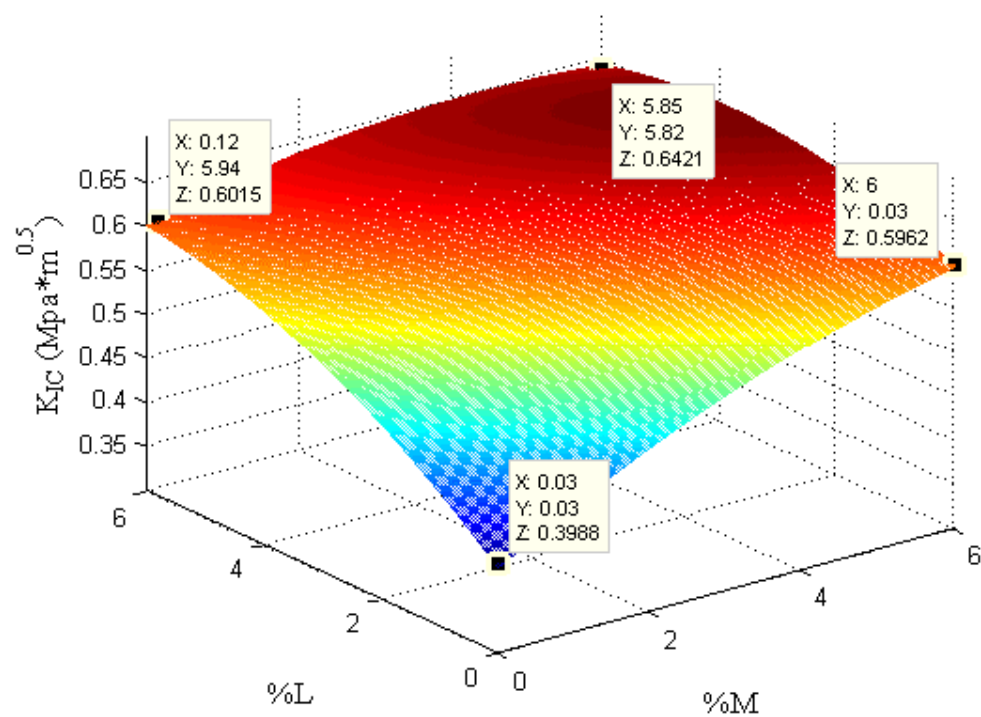
$$K_{IC-(x_1=S, x_3=L)} = 0.397 + 0.050x_1 + 0.060x_3 - 0.003x_1^2 - 0.004x_3^2 - 0.005x_1x_3 \quad (۱۴-۵)$$

$$K_{IC-(x_2=M, x_3=L)} = 0.396 + 0.049x_2 + 0.059x_3 - 0.003x_2^2 - 0.004x_3^2 - 0.004x_2x_3 \quad (۱۵-۵)$$

نمودارهای سه بعدی شکل‌های ۵-۳۴ و ۵-۳۵، تغییرات چقرمگی شکست را به ترتیب بر حسب درصد وزنی نانوذرات سری S و L و همچنین بر حسب درصد وزنی نانوذرات سری M و L، بر طبق روش سطح پاسخ مربعی نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، بر عکس مدول یانگ که همواره حالت افزایشی داشت، چقرمگی شکست ابتدا با افزایش نانو ذرات حالت افزایشی دارد؛ اما پس از مدتی به حالت نسبتاً ثابتی رسیده و در نقاط انتهایی نمودار حالت نزولی پیدا می‌کند که اندکی هم‌افزایی معکوس نانوذرات را در درصد وزنی بالای هر دو نانوذره نشان می‌دهد.



شکل ۵-۳۴: نمودار سه بعدی تغییرات چقرمگی شکست برحسب درصد وزنی نانوذرات سری S و L بر اساس مدل منتخب.



شکل ۵-۳۵: نمودار سه بعدی تغییرات چقرمگی شکست برحسب درصد وزنی نانوذرات سری S و L بر اساس مدل منتخب.

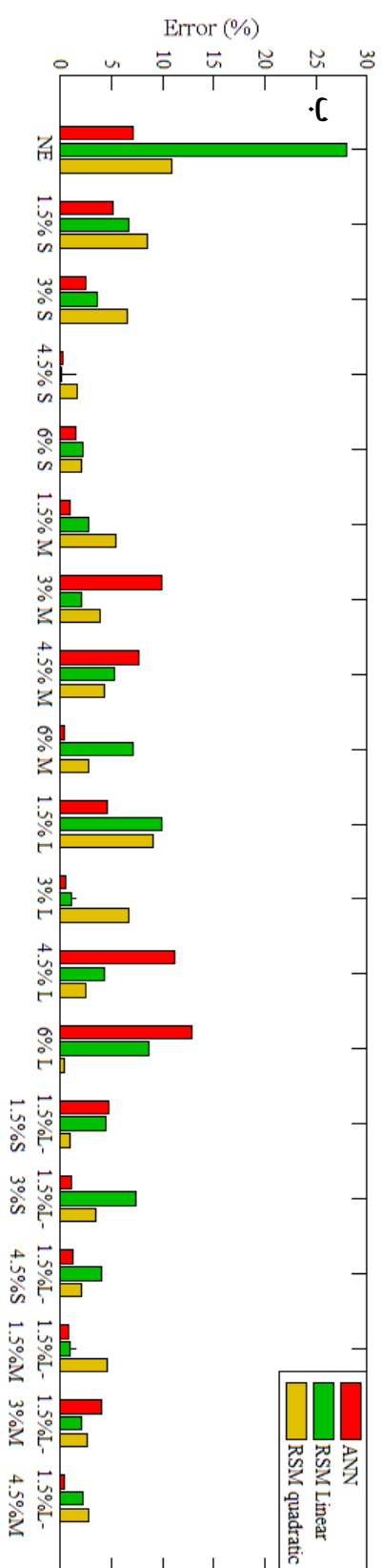
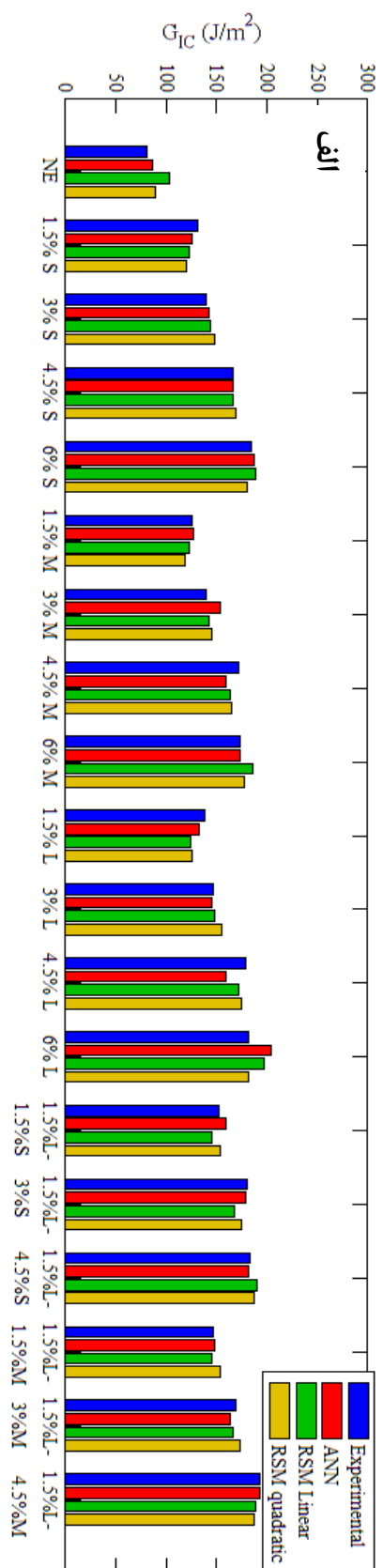
مشابه بحث چقرمگی شکست، نمودارهای مربوط به انرژی شکست، در ادامه آورده شده است. در نمودار میله‌ای شکل ۵-۳۶، نتایج هر سه مدل با مقدار تجربی مقایسه شده است. از روی نمودار میله‌ای خطاها می‌توان به خطای بسیار زیاد سطح پاسخ خطی در حالتی که درصد وزنی نانو ذرات صفر است اشاره کرد. باز هم روش‌های شبکه عصبی و سطح پاسخ مربعی خطای بسیار کمتری نسبت به سطح پاسخ خطی دارند که البته تغییرات سطح پاسخ مربعی نسبت به شبکه عصبی هموارتر و دارای یکنواختی بیشتر است. بنابراین مدل سطح پاسخ مربعی باز هم به عنوان "مدل منتخب" مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین برای اعتبارسنجی مدل منتخب، مقدار پارامتر R^2 برای انرژی شکست در شکل ۵-۳۷ آورده شده است که عدد بسیار مناسب ۰/۹۷ را نشان می‌دهد.

معادلات ۵-۱۶ و ۵-۱۷، مستخرج از مدل منتخب، برای بررسی تغییرات انرژی شکست بر حسب درصد وزنی نانوذرات سری S و L و همچنین نانوذرات سری M و L، ارائه شده است.

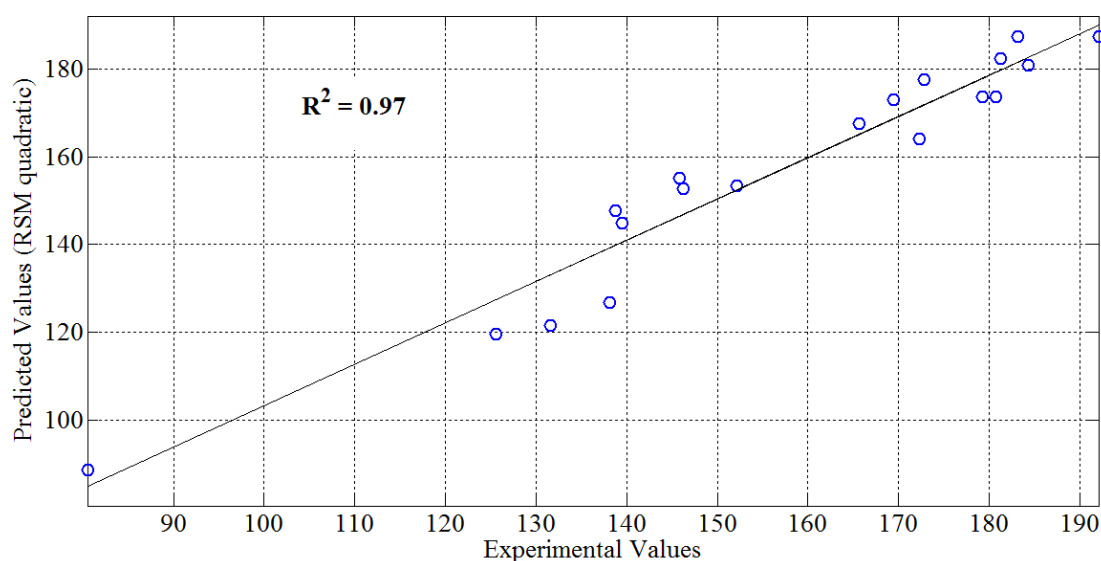
$$G_{IC-(x_1=S, x_3=L)} = 87.234 + 24.639 x_1 + 30.954 x_3 - 1.501 x_1^2 - 2.541 x_3^2 - 3.191 x_1 x_3 \quad (۵-۱۶)$$

$$G_{IC-(x_2=M, x_3=L)} = 86.435 + 23.887 x_2 + 29.643 x_3 - 1.451 x_2^2 - 2.272 x_3^2 - 2.461 x_2 x_3 \quad (۵-۱۷)$$

نمودارهای سه بعدی شکل‌های ۵-۳۸ و ۵-۳۹، تغییرات انرژی شکست را به ترتیب بر حسب درصد وزنی نانوذرات سری S و L و همچنین بر حسب درصد وزنی نانوذرات سری M و L، بر اساس مدل سطح پاسخ مربعی نشان می‌دهد. همانطور که از این نمودارها مشاهده می‌شود، کاملاً مشابه روند چقرمگی شکست، ابتدا با افزایش نانو ذرات، انرژی شکست نیز افزایش یافته و پس از مدتی به حالت نسبتاً ثابتی رسیده است اما در نقاط انتهایی، نمودار حالت نزولی بیشتری نسبت به چقرمگی شکست پیدا کرده که اثر هم‌افزایی معکوس نانوذرات را در درصد وزنی بالای هر دو نانوذره نشان می‌دهد.



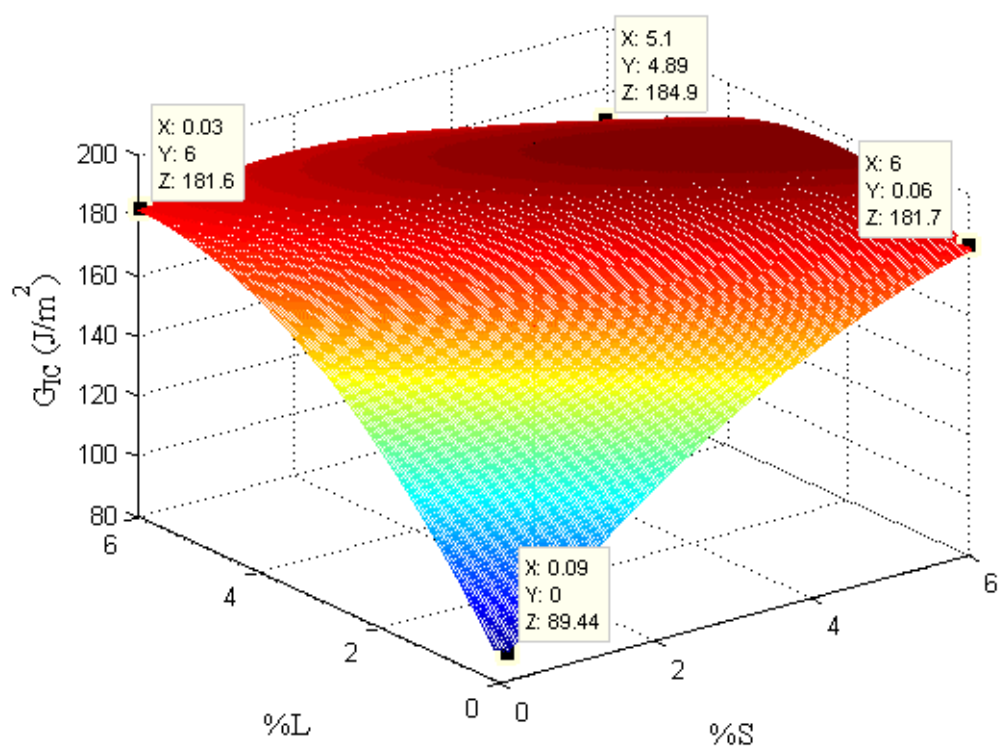
شکل ۵-۳۶: الف) مقایسه روش‌های RSM linear، RSM quadratic، ANN برای G_{IC} ، ب) خطای هر مدل بر حسب درصد



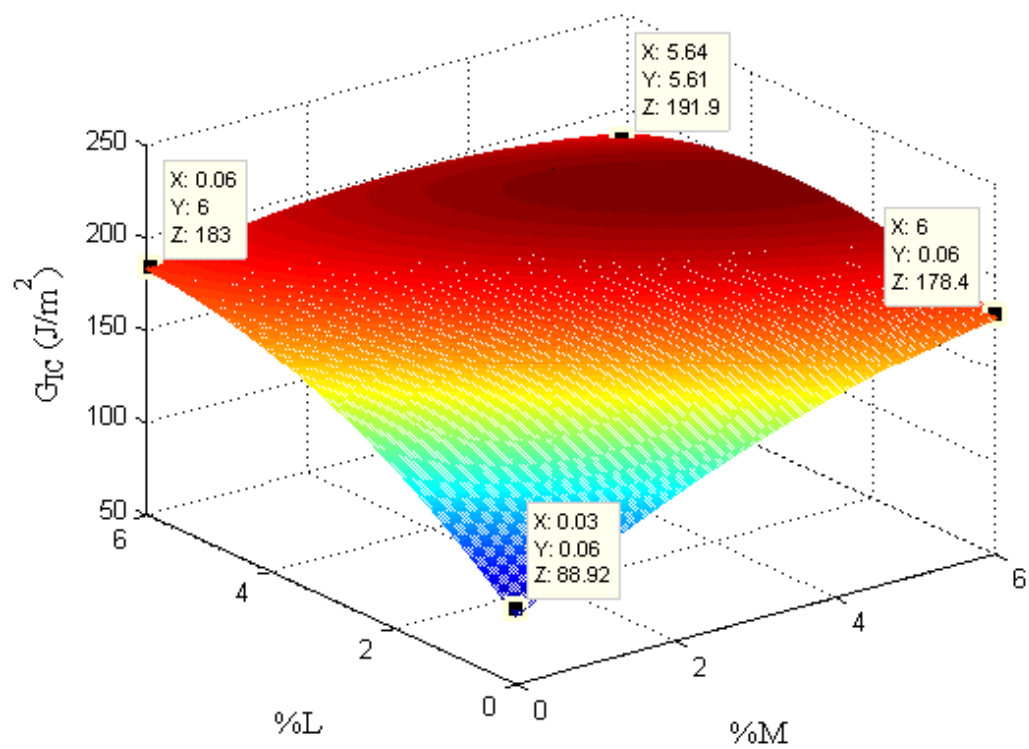
شکل ۵-۳۷: اعتبارسنجی مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل منتخب در مقایسه با مقادیر تجربی برای انرژی شکست توسط پارامتر R^2 .

با توجه به روابط ۵-۱۶ و ۵-۱۷ و همچنین شکل‌های ۵-۳۸ و ۵-۳۹ می‌توان دریافت که افزودن نانوذرات سری S و L و همچنین افزودن نانوذرات سری M و L، روند تأثیری مشابهی بر انرژی شکست داشته؛ با ذکر این نکته که ضریب بالاتر X_3 نسبت به X_1 و X_2 نشان از تأثیر بیشتر درصد وزنی نانوذره سری L نسبت به نانوذره دیگر در مقدار انرژی شکست دارد. جالب اینجاست که تأثیر بالاتر X_3 نسبت به X_1 و X_2 در توان ۲ نیز خود را در معادله نشان داده است. نکته قابل توجه دیگر، اثر هم‌افزایی منفی نانوذرات در درصدهای وزنی بالای هر دو سری است که این موضوع در هر دو معادله نیز با یک ضریب منفی برای X_1X_3 و X_2X_3 خود را نشان داده است.

نکته لازم به ذکر دیگر، تأثیر نسبتاً بیشتر پارامتر S در معادله انرژی شکست نسبت به پارامتر M می‌باشد، که این موضوع را می‌توان با مقایسه معادلات ۵-۱۶ و ۵-۱۷ و توجه به این نکته که در معادله ۵-۱۶ ضریب X_1 معادل ۲۴/۶۳ و در معادله ۵-۱۷ ضریب X_2 معادل ۲۳/۸۸ است، دریافت.



شکل ۵-۳۸: نمودار سه بعدی تغییرات انرژی شکست بر حسب درصد وزنی نانوذرات سری S و L بر اساس مدل منتخب



شکل ۵-۳۹: نمودار سه بعدی تغییرات انرژی شکست بر حسب درصد وزنی نانوذرات سری S و L بر اساس مدل منتخب

۵-۲-۴ جاذب‌های قوطی شکل

۵-۲-۴-۱ جاذب‌های قوطی شکل با ارتفاع ۹۰ mm

مدل‌سازی جاذب‌های قوطی شکل کاملاً مشابه قسمت‌های قبل صورت گرفته و پارامترهای شبکه عصبی و سطح پاسخ خطی و مربعی هیچ تفاوتی نکرده است. فرمول‌های مربوط به سطح پاسخ خطی و سطح پاسخ مربعی برای بیشینه بار قابل تحمل در معادلات ۵-۱۸ و ۵-۱۹ آورده شده است.

$$F_{max-RSM-Line} = 15.48 - 0.481x_1 - 0.585x_2 - 0.586x_3 \quad (۵-۱۸)$$

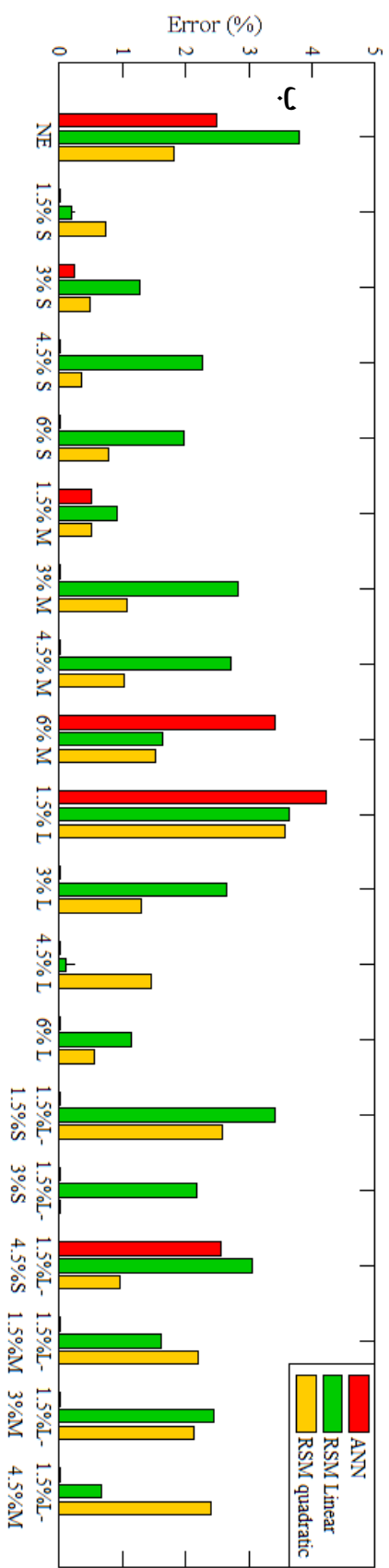
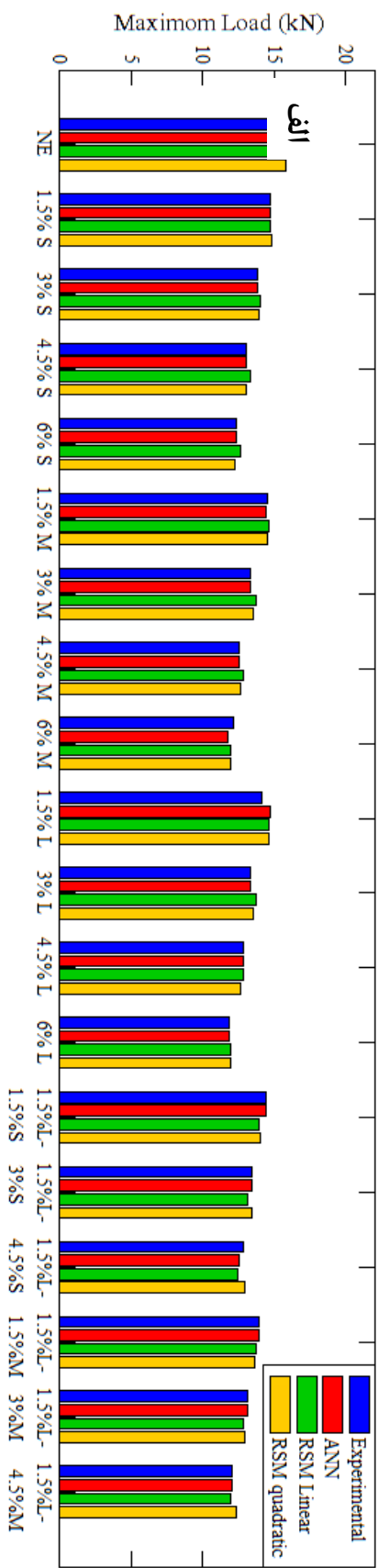
$$F_{max-RSM-Quad} = 15.80 - 0.65x_1 - 0.9x_2 - 0.85x_3 + 0.01x_1^2 + 0.04x_2^2 + 0.03x_3^2 + 0.0x_1x_2 + 0.16x_1x_3 + 0.13x_2x_3 \quad (۵-۱۹)$$

جدول ۵-۱۲ پارامترهای آماری را برای متغیر بیشینه بار نشان می‌دهد. همانگونه که از این جدول پیداست، در این مرحله نیز پارامترهای خطای نسبی و میانگین مربعات خطا مربوط به دو روش سطح پاسخ مربعی و شبکه عصبی، پاسخ‌هایی بسیار مناسب و با خطای بسیار اندک هستند. به عبارت دیگر، در دو روش سطح پاسخ مربعی و شبکه عصبی، هم در ستون خطای نسبی و هم در ستون میانگین مربعات خطا و هم در ستون مربوط به R^2 ، جواب‌ها بسیار نزدیک و نسبتاً مناسب محسوب می‌شوند. به همین دلیل، جهت یافتن "مدل منتخب" و پیاده‌سازی آن، به سراغ نمودار میله‌ای شکل ۵-۴۰ می‌رویم. همانطور که از نمودار میله‌ای خطاها در شکل ۵-۴۰ پیداست، در مقام مقایسه بین سطح پاسخ مربعی و شبکه عصبی، شبکه عصبی در بعضی نقاط جواب بسیار خوبی با خطای تقریباً صفر دارد؛ اما در برخی از نقاط نظیر M ۶٪ و L ۱/۵٪ دارای بیشترین خطا در بین سه مدل بوده و حتی بیشترین خطا در بین کل داده‌ها نیز در نقطه L ۱/۵٪ متعلق به روش شبکه عصبی است؛ این در حالی است که سطح پاسخ در همه نقاط یک خطای نسبتاً متعارف بین ۱ تا ۳ درصد را نشان می‌دهد. با توجه یکنواختی بیشتر خطا در روش سطح پاسخ مربعی نسبت به روش شبکه عصبی و میانگین تقریباً مساوی دو روش، باز هم

روش سطح پاسخ نسبت به شبکه عصبی مناسب‌تر تشخیص داده شد. لازم به توضیح است که واریانس خطا در نقاط مختلف یا به عبارت دیگر یکسان و یکنواخت بودن خطاها در یک مدل اعم از مثبت یا منفی بودن آن، یک پارامتر نسبتاً مناسب برای انتخاب در بین مدل‌های با میانگین خطای یکسان محسوب می‌شود. به عبارت ساده‌تر، مدلی را مطلوب‌تر می‌دانیم که خطای آن در نقاط مختلف نسبتاً همسان باشد، نه مدلی که در یک نقطه خطای نسبتاً پایین و در نقطه‌ای دیگر خطای بالا داشته باشد.

جدول ۵-۱۲: پارامترهای آماری مدل‌های RSM و ANN برای بیشینه بار در جاذب‌های قوطی شکل ۹۰ mm

Model	RE	SS _{reg}	MSE	R ²	R ² _{adj}	RMSE
RSM linear	۲/۰۲۵	۱۸/۷۱۸	۰/۱۰۰۵۲	۰/۹۰۷	۰/۸۸۱	۱/۲۱۴
RSM quadratic	۱/۳۴۰	۱۹/۷۰۶	۰/۰۴۱۵۳	۰/۹۵۵	۰/۸۹۹	۱/۶۰۶
ANN	۰/۷۰۷	۲۱/۳۰۲	۰/۰۴۲۱۲	۰/۹۶۱	۰/۹۱۳	۱/۶۰۶



شکل ۵-۴: مقایسه روش های RSM quadratic, RSM linear و ANN برای پیشینه بار نمونه های قوطی شکل با ارتفاع ۹۰ سانتیمتر، (ب) خطای هر مدل بر حسب درصد

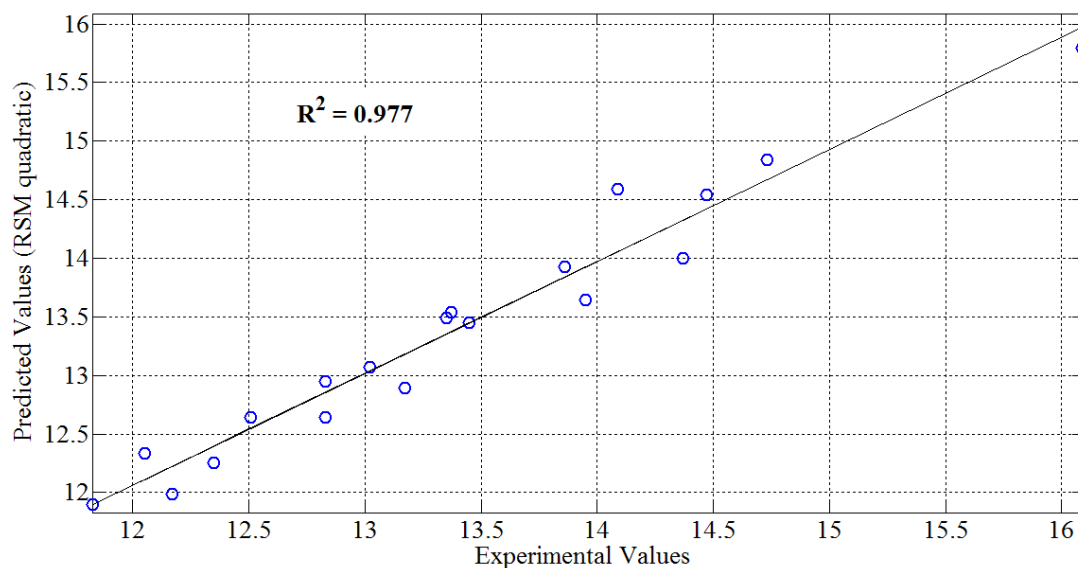
پس از انتخاب روش سطح پاسخ مربعی به عنوان "مدل منتخب"، مشابه پارامترهای قبل، نتایج "مدل منتخب" برای پارامتر بیشینه بار در کنار نتایج تجربی در جدول ۵-۱۳ آورده شده تا نتایج به راحتی قابل مقایسه باشد.

جدول ۵-۱۳: پارامتر بیشینه بار برای نمونه‌های قوطی شکل با ارتفاع ۹۰ mm

شماره نمونه	کد نمونه	بیشینه بار (kN)	
		تجربی	مدل
۱	NE	۱۶/۰۹	۱۵/۸۰
۲	۱/۵ % S	۱۴/۷۳	۱۴/۸۴
۳	۳/۰ % S	۱۳/۸۶	۱۳/۹۳
۴	۴/۵ % S	۱۳/۰۲	۱۳/۰۷
۵	۶/۰ % S	۱۲/۳۵	۱۲/۲۵
۶	۱/۵ % M	۱۴/۴۷	۱۴/۵۴
۷	۳/۰ % M	۱۳/۳۵	۱۳/۴۹
۸	۴/۵ % M	۱۲/۵۱	۱۲/۶۴
۹	۶/۰ % M	۱۲/۱۷	۱۱/۹۸
۱۰	۱/۵ % L	۱۴/۰۹	۱۴/۵۹
۱۱	۳/۰ % L	۱۳/۳۷	۱۳/۵۴
۱۲	۴/۵ % L	۱۲/۸۳	۱۲/۶۴
۱۳	۶/۰ % L	۱۱/۸۳	۱۱/۹۰
۱۴	۱/۵% L-۱/۵% S	۱۴/۳۷	۱۴/۰۰
۱۵	۱/۵% L-۳% S	۱۳/۴۵	۱۳/۴۵
۱۶	۱/۵% L-۴/۵% S	۱۲/۸۳	۱۲/۹۵
۱۷	۱/۵% L-۱/۵% M	۱۳/۹۵	۱۳/۶۴
۱۸	۱/۵% L-۳% M	۱۳/۱۷	۱۲/۸۹
۱۹	۱/۵% L-۴/۵% M	۱۲/۰۵	۱۲/۳۴

همچنین برای اعتبارسنجی مدل منتخب، مقدار پارامتر R^2 برای بیشینه بار در شکل ۵-۴۱

آورده شده است که عدد بسیار مناسب ۰/۹۷۷ را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۴۱: اعتبارسنجی مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل منتخب در مقایسه با مقادیر تجربی برای بیشینه بار قوطی‌های ۹۰ mm توسط پارامتر R^2 .

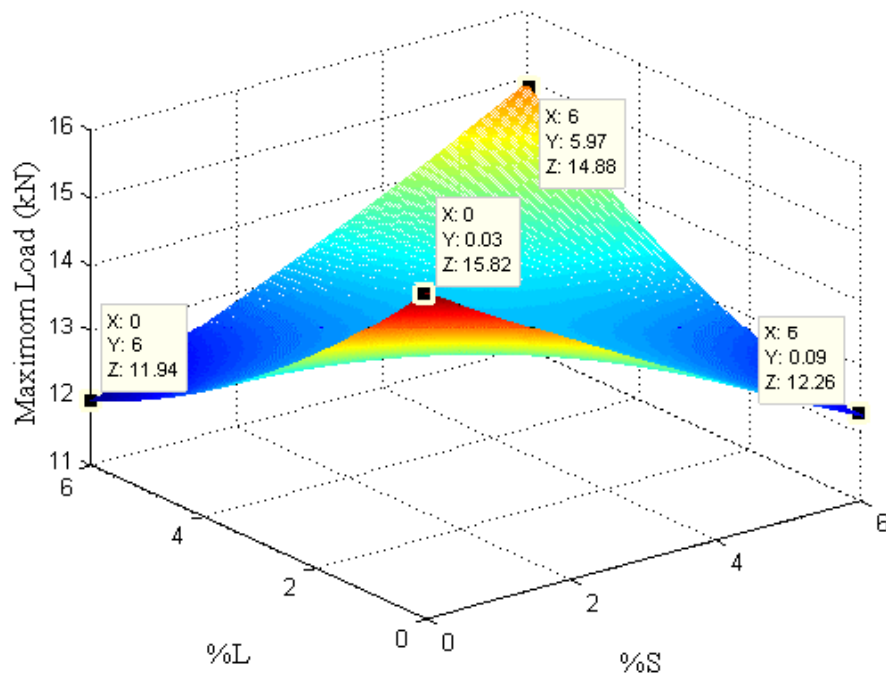
معادلات ۵-۲۰ و ۵-۲۱، مستخرج از مدل منتخب، برای بررسی تغییرات بیشینه بار بر حسب درصد وزنی نانوذرات سری S و L و همچنین نانوذرات سری M و L، ارائه شده است.

$$F_{Max-(x_1=S, x_3=L)} = 15.847 - 0.673x_1 - 0.955x_3 + 0.012x_1^2 + 0.051x_3^2 + 0.182x_1x_3 \quad (۵-۲۰)$$

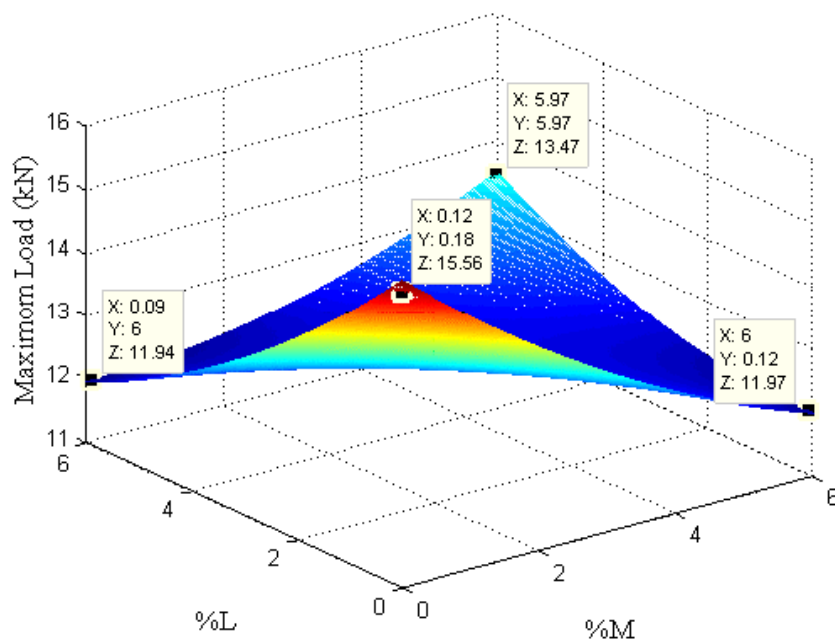
$$F_{Max-(x_1=M, x_2=L)} = 15.835 - 0.914x_1 - 0.936x_3 + 0.045x_1^2 + 0.048x_3^2 + 0.151x_1x_3 \quad (۵-۲۱)$$

نمودارهای سه بعدی شکل‌های ۵-۴۲ و ۵-۴۳، تغییرات بیشینه بار را به ترتیب بر حسب درصد وزنی نانوذرات سری S و L و همچنین بر حسب درصد وزنی نانوذرات سری M و L، بر اساس مدل منتخب نشان می‌دهند. همانطور که از این نمودارها برمی‌آید، افزایش نانوذرات باعث افت بیشینه بار شده ولی با توجه به نمودارها و نیز روابط ۵-۲۰ و ۵-۲۱، نانو ذره S نسبت به M کمتر باعث افت شده است. این موضوع را می‌توان از روی ضرایب فرمول‌های مذکور نیز بررسی کرد؛ بدین معنا که به دلیل ضریب منفی قسمت خطی و مقدار بالای آن (توجه شود که ضرایب متغیرهای مرتبه دو ناچیز است)، الزاماً با افزایش نانو ذرات، در بیشینه بار افت داریم که این ضریب برای سری S معادل $-۰/۶۷۳$ و برای سری M معادل $-۰/۹۱۴$ است. اما ضریب مثبت هم افزایی در صورتی که دو نانو ذره درصد وزنی متقارن

نزدیک به هم داشته باشند، یک قسمت از افت خطی را جبران کرده و در صورتی که دو نانو ذره درصد وزنی متفاوت داشته و درصد وزنی یکی نزدیک به صفر باشد، این افت خطی بسیار مشهودتر خواهد بود و قسمت هم افزایی قادر به جبران آن نخواهد بود.



شکل ۵-۴۲: نمودار سه بعدی تغییرات بیشینه بار بر حسب درصد وزنی نانوذرات سری S و L بر اساس مدل منتخب.



شکل ۵-۴۳: نمودار سه بعدی تغییرات بیشینه بار بر حسب درصد وزنی نانوذرات سری M و L بر اساس مدل منتخب.

۵-۲-۴-۲ جاذب‌های قوطی شکل با ارتفاع ۶۰ mm

فرمول‌های مربوط به سطح پاسخ خطی و سطح پاسخ مربعی برای بیشینه بار قابل تحمل، برای جاذب‌های جدار نازک قوطی شکل ۶۰ mm در معادلات ۵-۲۲ و ۵-۲۳ آورده شده است.

$$F_{max-RSM-Line} = 15.725 - 0.404x_1 - 0.494x_2 - 0.521x_3 \quad (5-22)$$

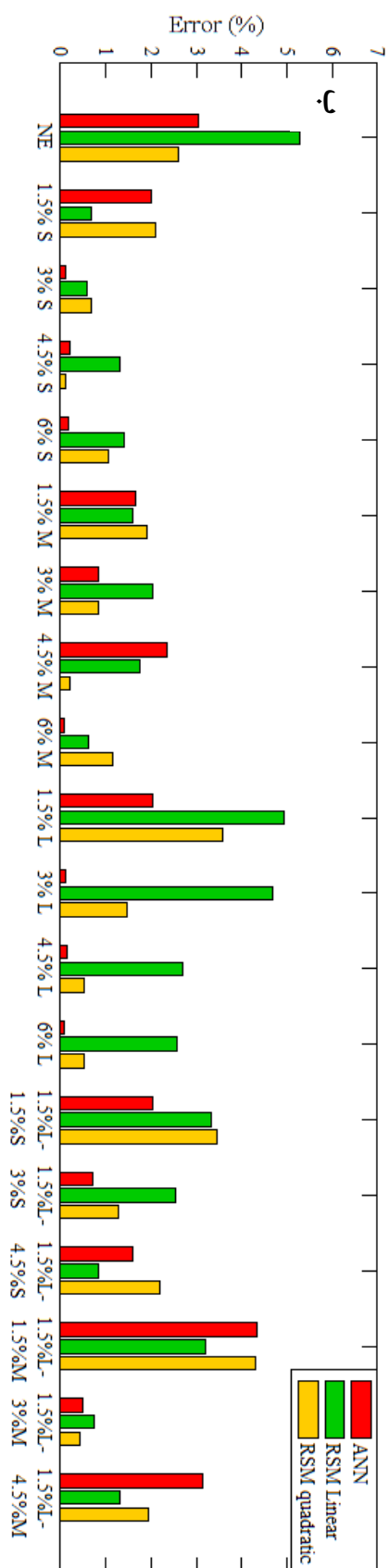
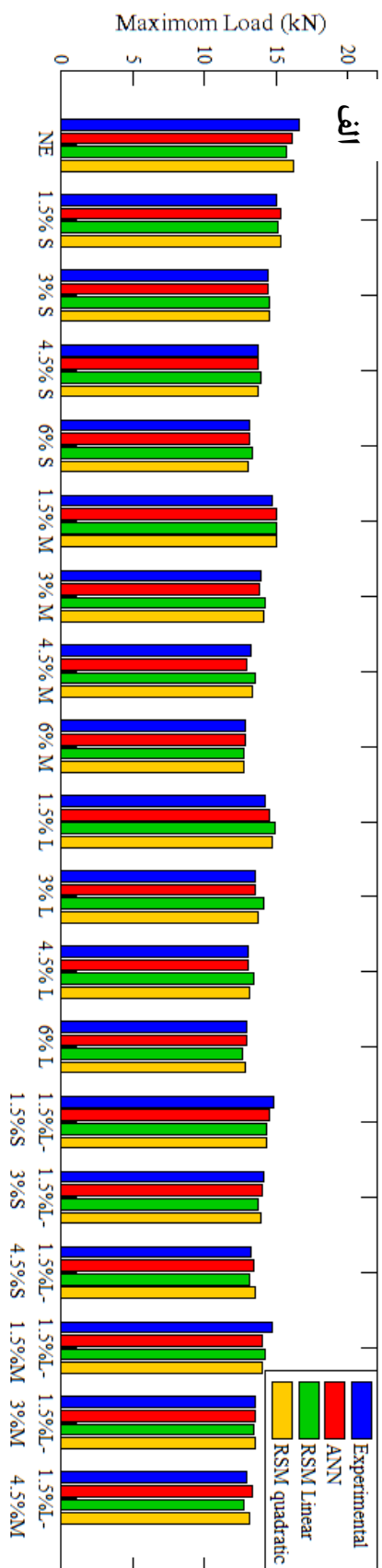
$$F_{max-RSM-Quad} = 16.16 - 0.56x_1 - 0.81x_2 - 1.07x_3 + 0.005x_1^2 + 0.039x_2^2 + 0.087x_3^2 + 0.0x_1x_2 + 0.178x_1x_3 + 0.187x_2x_3 \quad (5-23)$$

معادلات فوق نشان می‌دهد که ضریب هر سه متغیر خطی منفی بوده و افزودن هر کدام از آنها به تنهایی نیز باعث افت بیشینه بار جاذب‌ها خواهد شد؛ اما با توجه به ضرایب ملاحظه می‌شود که بیشترین تأثیر مربوط به سری L است. جدول ۵-۱۴، پارامترهای آماری را برای بیشینه بار نشان می‌دهد.

جدول ۵-۱۴: پارامترهای آماری مدل‌های RSM و ANN برای بیشینه بار در جاذب‌های قوطی شکل ۶۰ mm

Model	RE	SS _{reg}	MSE	R ²	R ² _{adj}	RMSE
RSM linear	۲/۲۱۱	۱۳/۸۹۵	۰/۱۴۷۸۵	۰/۸۳۲	۰/۷۸۴	۱/۰۹۲
RSM quadratic	۱/۵۹۴	۱۵/۱۲۱	۰/۰۸۳۳۱	۰/۹۰۵	۰/۷۸۷	۱/۴۴۵
ANN	۱/۳۲۴	۱۴/۴۱۲	۰/۰۶۹۷۲	۰/۹۲۱	۰/۸۲۲	۱/۴۴۵

همانطور که انتظار می‌رود نتایج مربوط به بیشینه بار در جاذب‌های قوطی شکل ۶۰ mm، شباهت بسیار زیادی به نتایج بدست آمده در جاذب‌های قوطی شکل ۹۰ mm دارد. باز هم بر اساس پارامترهای آماری جدول ۵-۱۴ و نیز نمودارهای میله‌ای نشان داده شده در شکل ۵-۴۴، روش سطح پاسخ مربعی نسبت به روش‌های دیگر بهتر و دقت پیش‌بینی آن بسیار بالاست و تقریباً در تمامی نقاط دقت روش سطح پاسخ از ۹۶ درصد بیشتر و حداکثر خطای رخ داده ۴ درصد است.



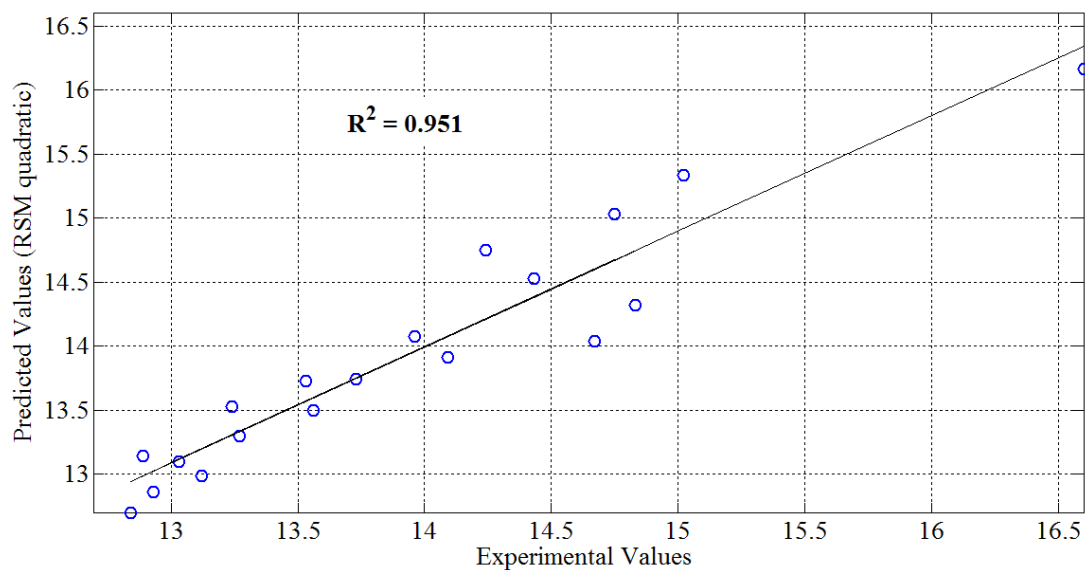
شکل ۵ الف: مقایسه روش‌های RSM linear و RSM quadratic برای پیشینه بار نمونه‌های قوطی شکل با ارتفاع ۶۰ میلیمتر، ب) خطای هر مدل بر حسب درصد

پس از انتخاب روش سطح پاسخ مربعی به عنوان "مدل منتخب"، مشابه پارامترهای قبل نتایج مدل منتخب برای بیشینه بار، در کنار نتایج تجربی در جدول ۵-۱۵ آورده شده تا نتایج به راحتی قابل مقایسه باشند.

جدول ۵-۱۵: مشخصات جذب انرژی نمونه‌های قوطی شکل با ارتفاع ۶۰ mm

شماره نمونه	کد نمونه	بیشینه بار (kN)	
		تجربی	مدل
۱	NE	۱۶/۶۰	۱۶/۱۷
۲	۱/۵ % S	۱۵/۰۲	۱۵/۳۴
۳	۳/۰ % S	۱۴/۴۳	۱۴/۵۳
۴	۴/۵ % S	۱۳/۷۳	۱۳/۷۴
۵	۶/۰ % S	۱۳/۱۲	۱۲/۹۸
۶	۱/۵ % M	۱۴/۷۵	۱۵/۰۳
۷	۳/۰ % M	۱۳/۹۶	۱۴/۰۸
۸	۴/۵ % M	۱۳/۲۷	۱۳/۳۰
۹	۶/۰ % M	۱۲/۸۴	۱۲/۶۹
۱۰	۱/۵ % L	۱۴/۲۴	۱۴/۷۵
۱۱	۳/۰ % L	۱۳/۵۳	۱۳/۷۳
۱۲	۴/۵ % L	۱۳/۰۳	۱۳/۱۰
۱۳	۶/۰ % L	۱۲/۹۳	۱۲/۸۶
۱۴	۱/۵% L-۱/۵% S	۱۴/۸۳	۱۴/۳۲
۱۵	۱/۵% L-۳% S	۱۴/۰۹	۱۳/۹۱
۱۶	۱/۵% L-۴/۵% S	۱۳/۲۴	۱۳/۵۳
۱۷	۱/۵% L-۱/۵% M	۱۴/۶۷	۱۴/۰۴
۱۸	۱/۵% L-۳% M	۱۳/۵۶	۱۳/۵۰
۱۹	۱/۵% L-۴/۵% M	۱۲/۸۹	۱۳/۱۴

همچنین برای اعتبارسنجی مدل منتخب، مقدار پارامتر R^2 برای بیشینه بار در شکل ۵-۴۵ آورده شده است که عدد مناسب ۰/۹۵۱ را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۴۵: اعتبارسنجی مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل منتخب در مقایسه با مقادیر تجربی برای بیشینه بار جاذب‌های قوطی شکل ۶۰ mm توسط پارامتر R^2 .

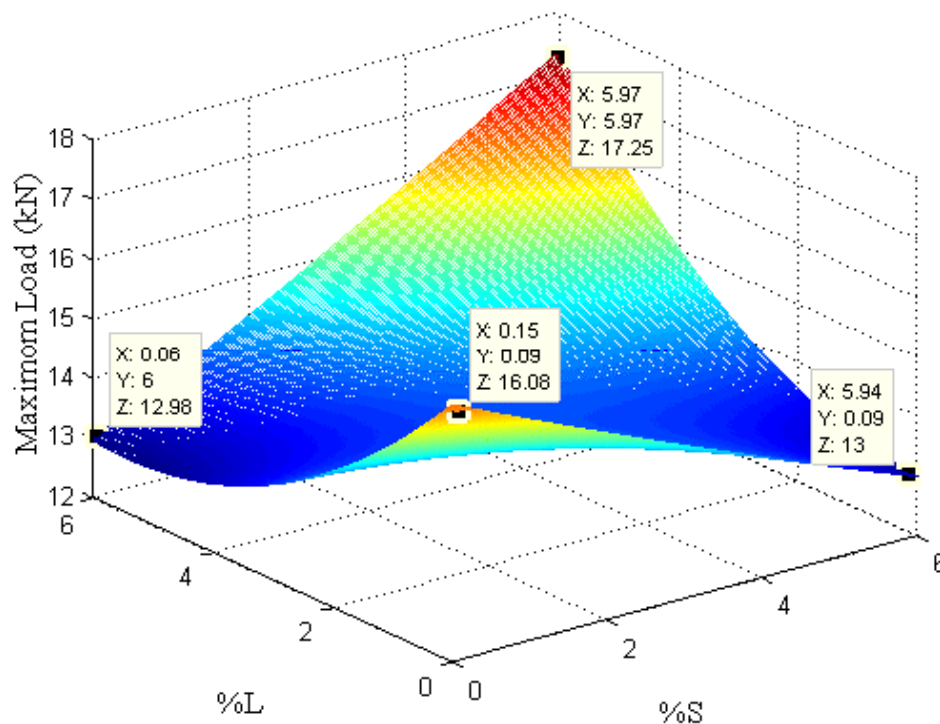
معادلات ۲۴-۵ و ۲۵-۵، مستخرج از مدل منتخب، بررسی تغییرات بیشینه بار قوطی‌های ۶۰ mm را برحسب درصد وزنی نانوذرات سری S و L و نیز نانوذرات سری M و L، نشان می‌دهد.

$$F_{Max-(x_1=S, x_3=L)} = 16.275 - 0.606 x_1 - 1.246 x_3 + 0.009 x_1^2 + 0.115 x_3^2 + 0.213 x_1 x_3 \quad (24-5)$$

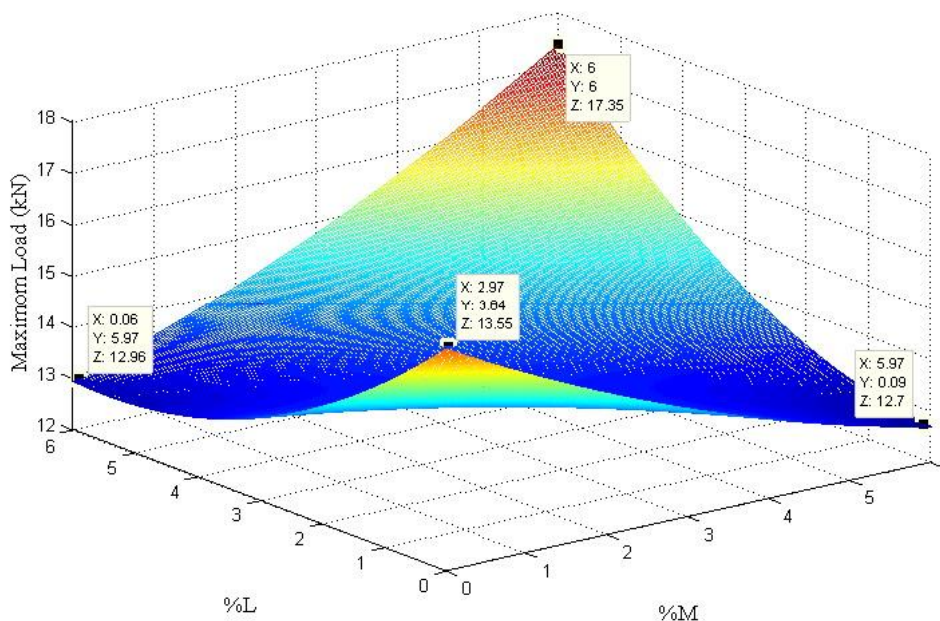
$$F_{Max-(x_2=M, x_3=L)} = 16.295 - 0.872 x_2 - 1.246 x_3 + 0.045 x_2^2 + 0.114 x_3^2 + 0.223 x_2 x_3 \quad (25-5)$$

نمودارهای سه بعدی شکل‌های ۴۶-۵ و ۴۷-۵، تغییرات بیشینه بار قوطی‌های ۶۰ mm را به ترتیب بر حسب درصد وزنی نانوذرات سری S و L و همچنین بر حسب درصد وزنی نانوذرات سری M و L، بر اساس مدل منتخب نشان می‌دهند. همانطور که از این نمودارها برمی‌آید، مطابق روندی که در مورد قوطی‌های جدار نازک ۹۰ mm داشتیم، افزایش نانوذرات باعث افت بیشینه بار شده و با توجه به نمودار و نیز روابط ۲۴-۵ و ۲۵-۵، نانو ذره S نسبت به M کمتر باعث افت شده است. این موضوع را می‌توان از روی ضرایب روابط مذکور نیز بررسی کرد؛ بدین معنا که متغیرها در حالت خطی ضرایب منفی دارند که بیانگر کاهش بیشینه بار با افزودن این نانوذرات به اپوکسی می‌باشد که دلیل آن به صورت کامل در

قسمت تجربی مورد بحث قرار گرفته است. اما باز هم ضریب مثبت هم افزایی در قسمت سه بعدی به وضوح خود را نشان داده و بیانگر خنثی کردن تأثیر افت بیشینه بار توسط این جمله مثبت می باشد.



شکل ۴۶-۵: نمودار سه بعدی تغییرات بیشینه بار جاذب های قوطی شکل ۶۰ mm بر حسب درصد وزنی نانوذرات سری S و L بر اساس مدل منتخب.



شکل ۴۷-۵: نمودار سه بعدی تغییرات بیشینه بار جاذب های قوطی شکل ۶۰ mm بر حسب درصد وزنی نانوذرات سری M و L بر اساس مدل منتخب

۵-۲-۵ جاذب‌های جدار نازک مخروطی

روابط مربوط به روش‌های سطح پاسخ خطی و سطح پاسخ مربعی برای بیشینه بار قابل تحمل جاذب‌های جدار نازک مخروطی شکل در معادلات ۵-۲۶ و ۵-۲۷ آورده شده است.

$$F_{max-RSM-Line} = 14.923 - 0.535x_1 - 0.629x_2 - 0.574x_3 \quad (۵-۲۶)$$

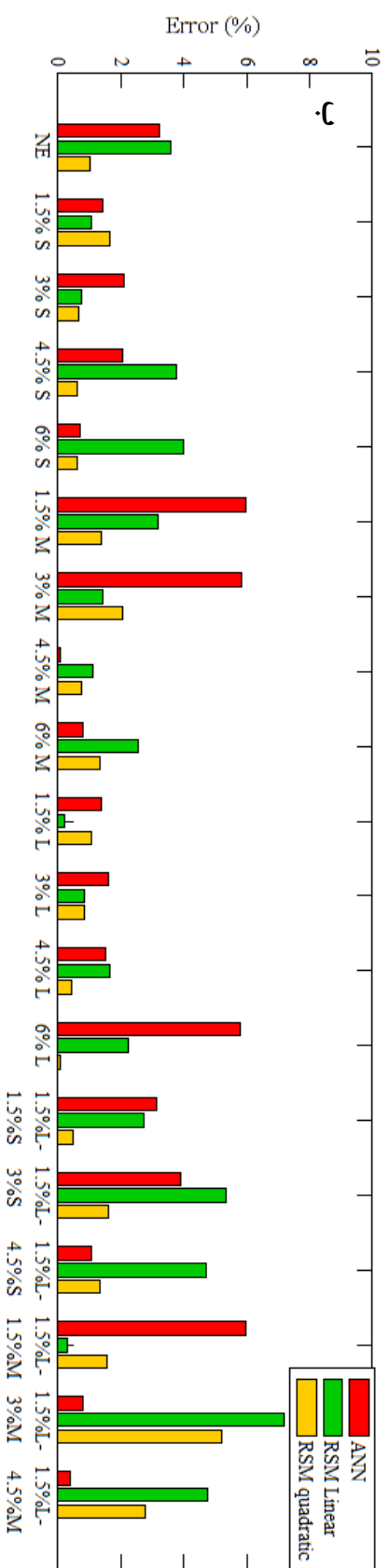
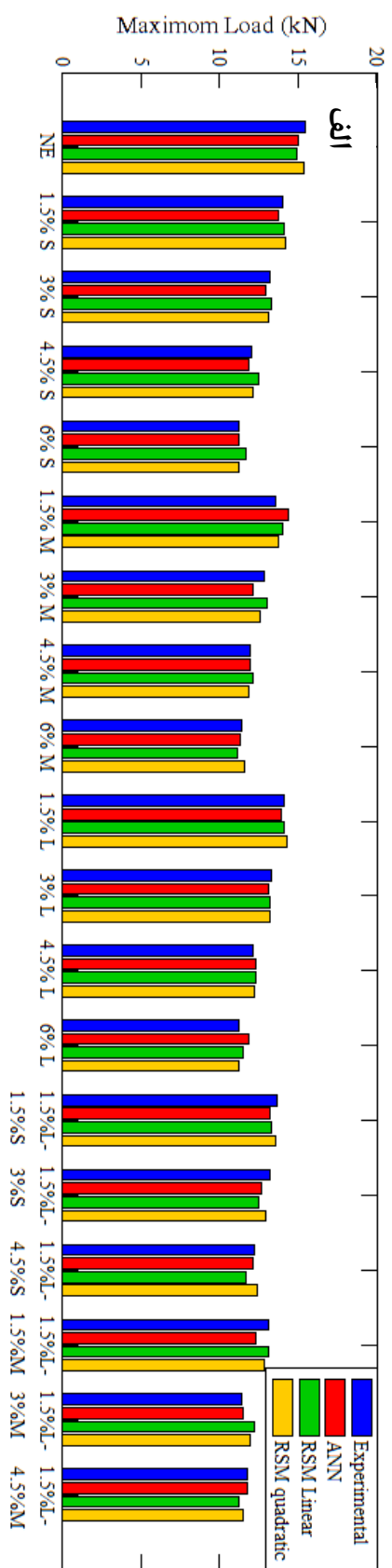
$$F_{max-RSM-Quad} = 15.32 - 0.77x_1 - 1.20x_2 - 0.733x_3 + 0.014x_1^2 + 0.097x_2^2 + 0.008x_3^2 + 0.0x_1x_2 + 0.199x_1x_3 + 0.099x_2x_3 \quad (۵-۲۷)$$

معادلات فوق نشان می‌دهد که ضریب هر سه متغیر خطی منفی بوده و افزودن هر کدام از آنها به تنهایی نیز باعث افت بیشینه بار جاذب‌های مخروطی خواهد شد؛ اما با توجه به ضرایب ملاحظه می‌شود که بیشترین تأثیر مربوط به سری M است. جدول ۵-۱۶ پارامترهای آماری بیشینه بار را برای جاذب‌های مخروطی نشان می‌دهد.

جدول ۵-۱۶: پارامترهای آماری مدل‌های RSM و ANN برای بیشینه بار در جاذب‌های جدار نازک مخروطی

Model	RE	SS _{reg}	MSE	R ²	R ² _{adj}	RMSE
RSM linear	۲/۷۰۱	۲۰/۶۷۴	۰/۱۶۴۸۱۳	۰/۸۶۸	۰/۸۳۱	۱/۳۰۴
RSM quadratic	۱/۳۳۷	۲۲/۹۶۳	۰/۰۴۴۳۶۲	۰/۹۶۵	۰/۹۲۰	۱/۷۲۵
ANN	۲/۵۰۵	۲۰/۸۰۵	۰/۱۷۲۰۳۴	۰/۸۶۳	۰/۶۹۱	۱/۷۲۵

بر اساس پارامترهای آماری جدول ۵-۱۶ و نیز نمودارهای میله‌ای نشان داده شده در شکل ۵-۴۸، روش سطح پاسخ مربعی به خاطر میانگین مربعات خطای کمتر و همچنین یکنواختی مقدار خطاها (واریانس کمتر) نسبت به روش‌های دیگر بهتر بوده و حداکثر خطای موجود آن نیز کمتر از ۴ درصد است. بنابراین باز هم مدل ارائه شده توسط روش سطح پاسخ مربعی، به عنوان "مدل منتخب" برگزیده می‌شود.

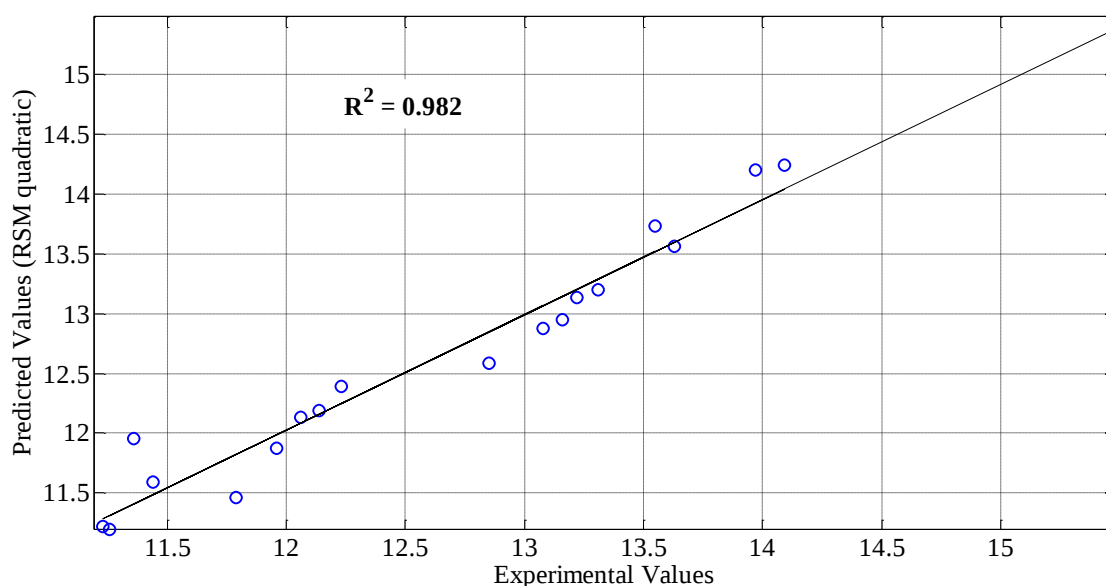


شکل ۵-۴۸: الف) مقایسه روش‌های RSM linear و ANN برای پیشینه بار نمونه‌های مخروطی، ب) خطای هر مدل بر حسب درصد

جهت مقایسه نتایج "مدل منتخب" برای یشینه بار، نتایج تجربی و مدل در جدول ۵-۱۷ آورده شده تا به راحتی قابل مقایسه باشند. همچنین در شکل ۵-۴۹، معیار R^2 جهت اعتبارسنجی "مدل منتخب" نشان داده شده که این مقدار برابر ۰/۹۸۲ بوده و مؤید مناسب بودن این مدل است.

جدول ۵-۱۷: مشخصات جذب انرژی جاذب‌های مخروطی شکل

شماره نمونه	کد نمونه	یشینه بار (kN)	
		تجربی	مدل
۱	NE	۱۵/۴۸	۱۵/۳۲
۲	۱/۵ % S	۱۳/۹۷	۱۴/۲۰
۳	۳/۰ % S	۱۳/۲۲	۱۳/۱۳
۴	۴/۵ % S	۱۲/۰۶	۱۲/۱۳
۵	۶/۰ % S	۱۱/۲۶	۱۱/۱۹
۶	۱/۵ % M	۱۳/۵۵	۱۳/۷۳
۷	۳/۰ % M	۱۲/۸۵	۱۲/۵۸
۸	۴/۵ % M	۱۱/۹۶	۱۱/۸۷
۹	۶/۰ % M	۱۱/۴۴	۱۱/۵۹
۱۰	۱/۵ % L	۱۴/۰۹	۱۴/۲۴
۱۱	۳/۰ % L	۱۳/۳۱	۱۳/۲۰
۱۲	۴/۵ % L	۱۲/۱۴	۱۲/۱۹
۱۳	۶/۰ % L	۱۱/۲۳	۱۱/۲۲
۱۴	۱/۵% L-۱/۵% S	۱۳/۶۳	۱۳/۵۶
۱۵	۱/۵% L-۳% S	۱۳/۱۶	۱۲/۹۵
۱۶	۱/۵% L-۴/۵% S	۱۲/۲۳	۱۲/۳۹
۱۷	۱/۵% L-۱/۵% M	۱۳/۰۸	۱۲/۸۸
۱۸	۱/۵% L-۳% M	۱۱/۳۶	۱۱/۹۵
۱۹	۱/۵% L-۴/۵% M	۱۱/۷۹	۱۱/۴۶



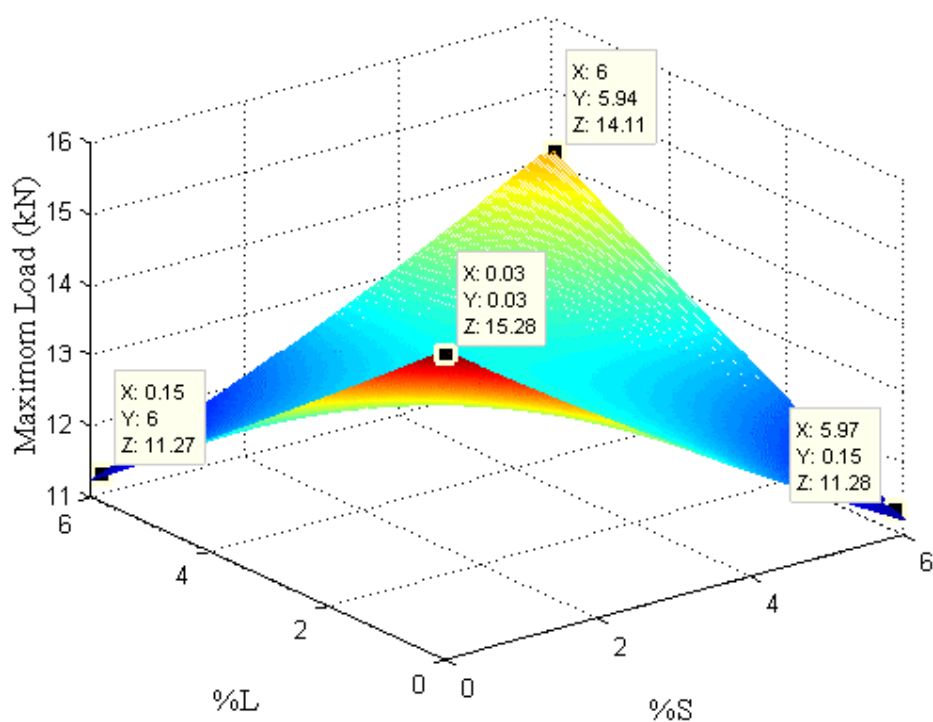
شکل ۵-۴۹: اعتبارسنجی مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل منتخب در مقایسه با مقادیر تجربی برای بیشینه بار جاذب‌های مخروطی توسط پارامتر R^2 .

معادلات ۵-۲۸ و ۵-۲۹، مستخرج از مدل منتخب، برای بررسی تغییرات بیشینه بار جاذب‌های مخروطی، برحسب درصد وزنی نانوذرات سری S و L و نیز نانوذرات سری M و L، ارائه شده است.

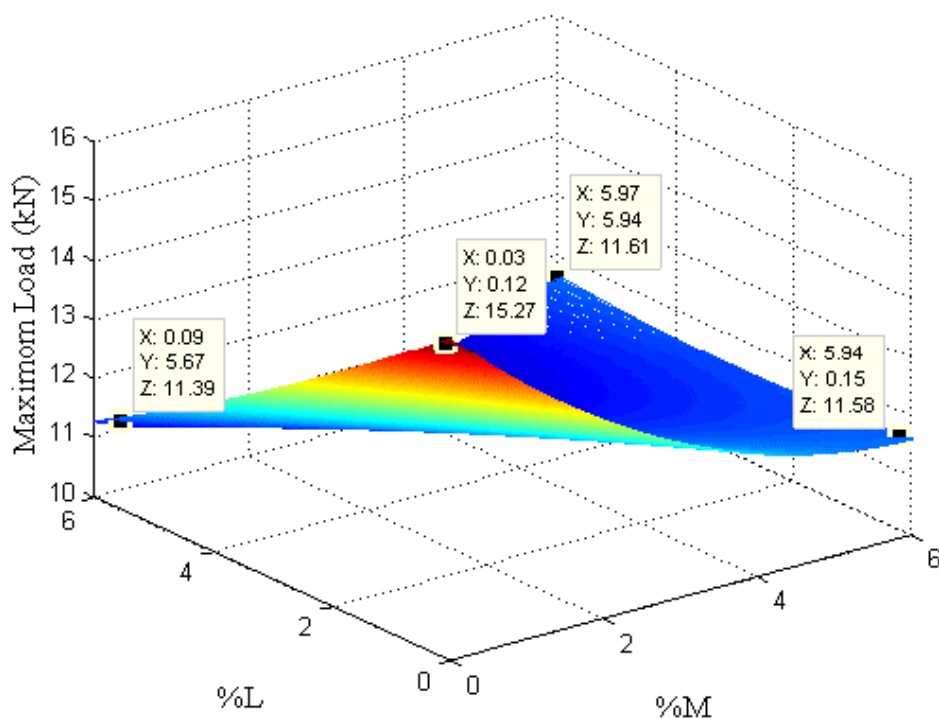
$$F_{Max-(x_1=S, x_3=L)} = 15.323 - 0.773x_1 - 0.718x_3 + 0.014x_1^2 + 0.006x_3^2 + 0.196x_1x_3 \quad (5-28)$$

$$F_{Max-(x_2=M, x_3=L)} = 15.406 - 1.246x_2 - 0.809x_3 + 0.102x_2^2 + 0.019x_3^2 + 0.117x_2x_3 \quad (5-29)$$

همانطور که از معادلات ۵-۲۸ و ۵-۲۹ مشاهده می‌شود، مشابه جاذب‌های قوطی شکل، ضرایب متغیرهای خطی X_1 و X_2 منفی است که این موضوع بیانگر اثر کاهشی افزودن نانوذره به اپوکسی است که کاملاً با نتایج تجربی و تحقیقات صورت گرفته مطابقت دارد و آن را تأیید می‌کند. همچنین، اثر هم‌افزایی نانوذرات در هر دو سری ترکیبی S و L و همچنین سری M و L، برای بیشینه بار مثبت است که این موضوع به خوبی در شکل‌های ۵-۵۰ و ۵-۵۱ مشهود است.



شکل ۵-۵: نمودار سه بعدی تغییرات بیشینه بار جاذب‌های مخروطی بر حسب درصد وزنی نانوذرات سری S و L بر اساس مدل منتخب



شکل ۵-۶: نمودار سه بعدی تغییرات بیشینه بار جاذب‌های مخروطی بر حسب درصد وزنی نانوذرات سری S و L بر اساس مدل منتخب.

۵-۲-۶ مقاومت ضربه

روابط مربوط به سطح پاسخ خطی و سطح پاسخ مربعی برای مقاومت ضربه به ترتیب در معادلات ۵-۳۰ و ۵-۳۱ آورده شده است.

$$Im\ pact - Strength = 5.664 + 0.147 x_1 + 0.131 x_2 + 0.129 x_3 \quad (۵-۳۰)$$

$$Im\ pact - Strength = 5.502 + 0.284 x_1 + 0.234 x_2 + 0.269 x_3 - 0.021 x_1^2 - 0.014 x_2^2 - 0.022 x_3^2 + 0.0 x_1 x_2 - 0.029 x_1 x_3 - 0.026 x_2 x_3 \quad (۵-۳۱)$$

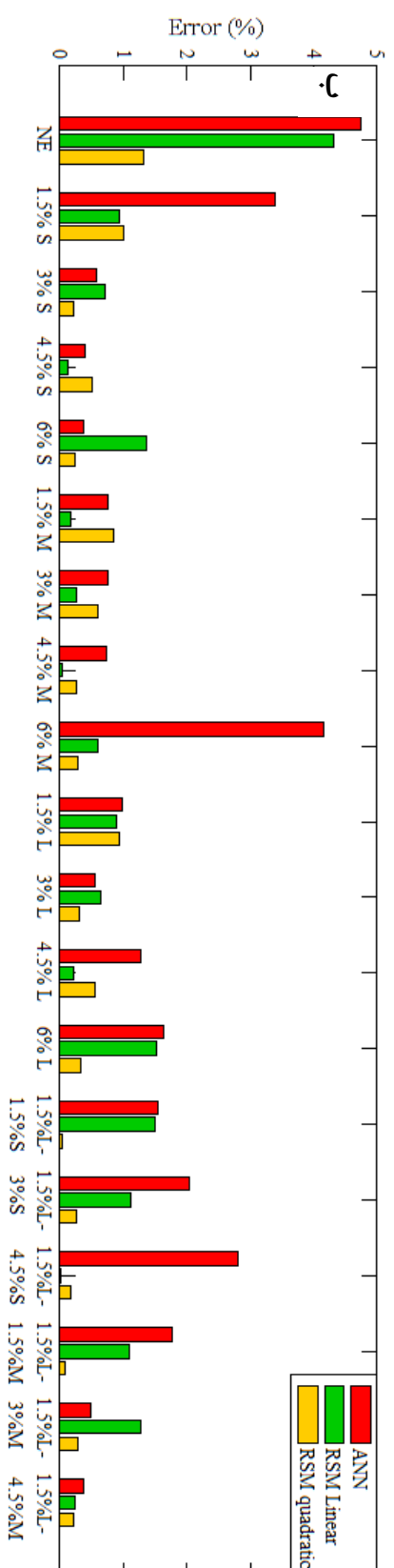
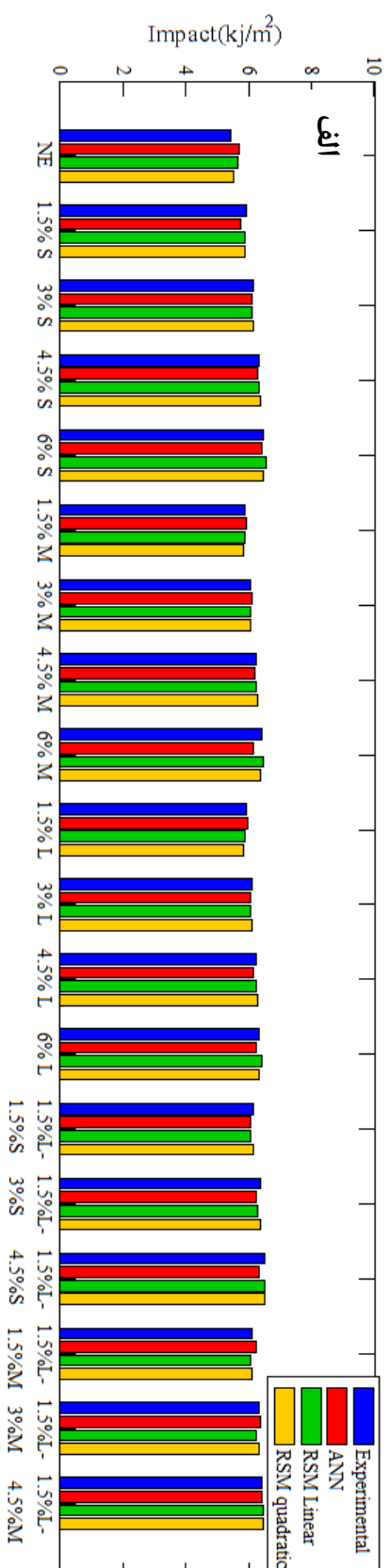
معادلات فوق نشان می‌دهد که ضریب هر سه متغیر خطی مثبت بوده و افزودن هر کدام از آنها به تنهایی نیز باعث افزایش مقاومت ضربه خواهد شد؛ اما با توجه به ضرایب ملاحظه می‌شود که بیشترین تأثیر به ترتیب مربوط به سری S، سری M و نهایتاً سری L است. البته با کمی دقت بیشتر ملاحظه می‌گردد که به علت نزدیک بودن ضرایب، اندازه نانو ذره تأثیر چندانی بر مقاومت ضربه ندارد. همچنین، نتایج بدست آمده در مدل سطح پاسخ خطی به وضوح در مدل سطح پاسخ مربعی نیز قابل مشاهده است، بدین معنا که ضرایب متغیرهای خطی در هر دو مدل سطح پاسخ خطی و مربعی در سه نانو ذره بسیار به هم نزدیک می‌باشد که این حاکی از رفتار کاملاً یکسان سه نوع نانو ذره بر روی مقاومت ضربه است. و در نهایت ملاحظه می‌شود که تأثیر هم‌افزایی نانوذرات ناچیز است.

جدول ۵-۱۸، پارامترهای آماری را برای مقاومت ضربه نشان می‌دهد. با توجه به این جدول، ملاحظه می‌شود که در تمام موارد، به خصوص در خطای نسبی و میانگین مربعات خطا، روش سطح پاسخ مربعی نسبت به دو روش دیگر شرایط بهتری دارد. لذا باز هم شبیه پارامترهای قبل، این مدل به عنوان "مدل منتخب" برگزیده شده است.

جدول ۵-۱۸: پارامترهای آماری مدل‌های RSM و ANN برای مقاومت ضربه

Model	RE	SS _{reg}	MSE	R ²	R ² _{adj}	RMSE
RSM linear	۰/۸۹۵	۱/۱۳۴	۰/۰۰۵۷	۰/۹۱۳	۰/۸۸۸	۰/۲۹۸
RSM quadratic	۰/۴۴۱	۱/۲۲۲	۰/۰۰۱۱	۰/۹۸۴	۰/۹۶۳	۰/۳۹۴
ANN	۱/۵۴۲	۰/۷۹۰	۰/۰۱۴۷	۰/۷۷۵	۰/۴۹۳	۰/۳۹۴

در شکل ۵-۵۲، نمودار میله‌ای مقایسه نتایج سه مدل با مقادیر تجربی و همچنین درصد خطای هر یک از مدل‌ها نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، دو روش سطح پاسخ خطی و شبکه عصبی در برخی از نقاط خطای بالایی دارند؛ اما روش سطح پاسخ مربعی در همه نقاط پاسخی با خطای زیر ۲ درصد داشته و البته علاوه بر پایین بودن میانگین خطای این روش، از واریانس کمی نیز برخوردار است که همه این موارد نشان می‌دهد که روش سطح پاسخ مربعی به درستی به عنوان "مدل منتخب" برگزیده شده است.

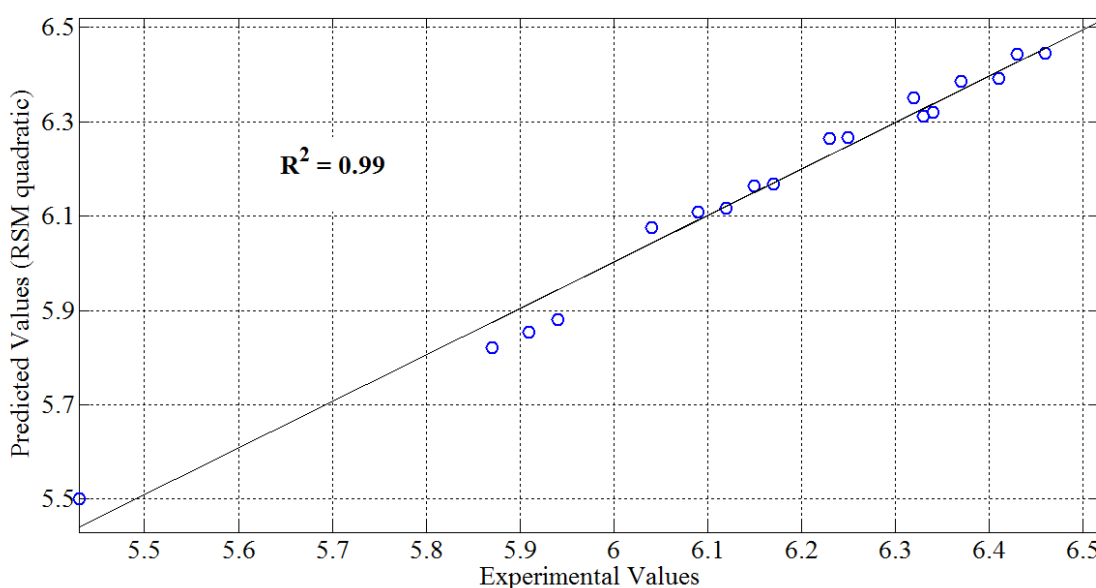


شکل ۵-۲: الف) مقایسه روش‌های RSM linear, RSM quadratic, RSM و ANN برای مقاومت ضربه، ب) خطای هر مدل بر حسب درصد

جهت مقایسه نتایج "مدل منتخب" برای مقاومت ضربه، نتایج تجربی و مدل در جدول ۵-۱۹ آورده شده تا نتایج به راحتی قابل مقایسه باشند. همچنین شکل ۵-۵۳ معیار R^2 را برای مدل منتخب نشان می‌دهد که این مقدار برابر ۰/۹۹ بوده و مؤید پیش‌بینی‌های مناسب این مدل است.

جدول ۵-۱۹: مقاومت ضربه کامپوزیت‌های تقویت شده با درصد حجمی مختلف از نانوذرات سیلیکا

شماره نمونه	کد نمونه	کسر حجمی (Vol%)	مقاومت ضربه، (kJ/m^2)	
			تجربی	مدل
۱	NE	۰	۵/۴۳	۵/۵۰
۲	۱/۵ % S	۰/۶۹۹	۵/۹۴	۵/۸۸
۳	۳/۰ % S	۱/۴۱	۶/۱۵	۶/۱۶
۴	۴/۵ % S	۲/۱۳	۶/۳۲	۶/۳۵
۵	۶/۰ % S	۲/۸۶	۶/۴۶	۶/۴۴
۶	۱/۵ % M	۰/۶۹۹	۵/۸۷	۵/۸۲
۷	۳/۰ % M	۱/۴۱	۶/۰۴	۶/۰۸
۸	۴/۵ % M	۲/۱۳	۶/۲۵	۶/۲۷
۹	۶/۰ % M	۲/۸۶	۶/۴۱	۶/۳۹
۱۰	۱/۵ % L	۰/۶۹۹	۵/۹۱	۵/۸۵
۱۱	۳/۰ % L	۱/۴۱	۶/۰۹	۶/۱۱
۱۲	۴/۵ % L	۲/۱۳	۶/۲۳	۶/۲۶
۱۳	۶/۰ % L	۲/۸۶	۶/۳۴	۶/۳۲
۱۴	۱/۵% L-۱/۵% S	۱/۴۱	۶/۱۷	۶/۱۷
۱۵	۱/۵% L-۳% S	۲/۱۳	۶/۳۷	۶/۳۹
۱۶	۱/۵% L-۴/۵% S	۲/۸۶	۶/۵۲	۶/۵۱
۱۷	۱/۵% L-۱/۵% M	۱/۴۱	۶/۱۲	۶/۱۲
۱۸	۱/۵% L-۳% M	۲/۱۳	۶/۳۳	۶/۳۱
۱۹	۱/۵% L-۴/۵% M	۲/۸۶	۶/۴۳	۶/۴۴



شکل ۵-۵۳: اعتبارسنجی مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل منتخب در مقایسه با مقادیر تجربی برای مقاومت ضربه توسط پارامتر R^2

معادلات ۵-۳۲ و ۵-۳۳، مستخرج از مدل منتخب، برای بررسی تغییرات مقاومت ضربه، برحسب درصد وزنی نانوذرات سری S و L و همچنین نانوذرات سری M و L، ارائه شده است.

$$Im\ pact - Strength_{(x_1=S, x_3=L)} = 5.488 + 0.292 x_1 + 0.274 x_3 - \quad (۳۲-۵)$$

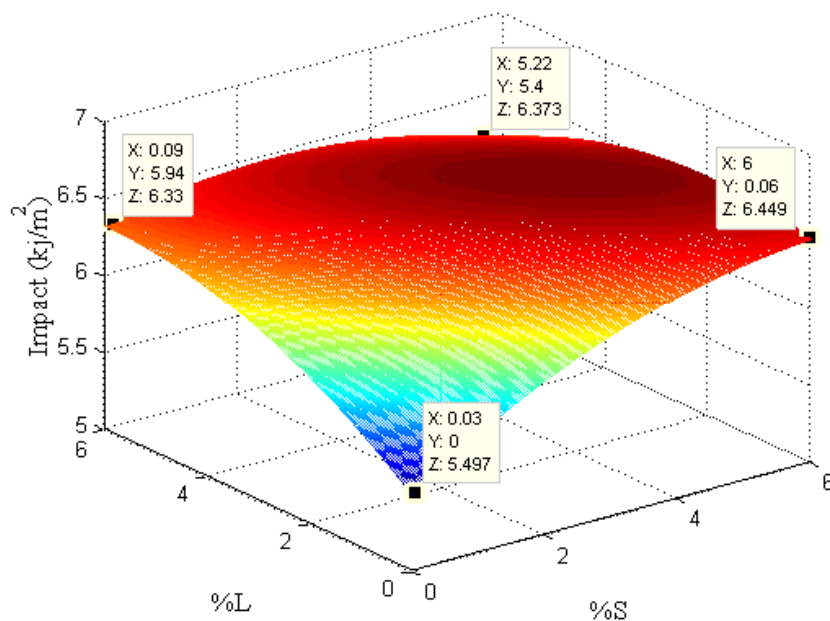
$$0.022 x_1^2 - 0.023 x_3^2 - 0.030 x_1 x_3$$

$$Im\ pact - Strength_{(x_2=M, x_3=L)} = 5.479 + 0.246 x_2 + 0.282 x_3 - \quad (۳۳-۵)$$

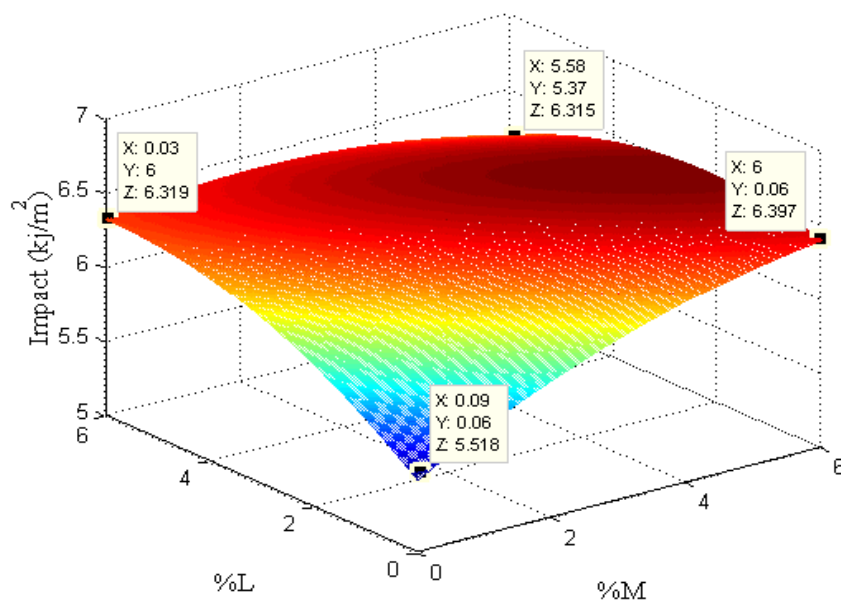
$$0.016 x_2^2 - 0.024 x_3^2 - 0.029 x_2 x_3$$

با توجه به روابط ۵-۳۲ و ۵-۳۳، باز هم مشاهده می‌شود که ضریب متغیر خطی X_1 ، در رابطه ۵-۳۲ اندکی بیشتر از ضریب متغیر خطی X_2 در رابطه ۵-۳۳ است که این بیانگر اندکی تأثیر بیشتر نانوذرات سری S نسبت به نانوذرات سری M در نانوکامپوزیت‌های ترکیبی است. همچنین از روابط واضح است که مدل‌ها بسیار به هم نزدیک و ضرایب خطی و مرتبه دوم هر دو نانو ذره نیز با دقت بسیار بالایی از نظر مقدار عددی به یکدیگر شباهت دارند. این دو رابطه نیز تأیید دیگری بر این اصل است که نوع نانو ذره در زمینه مقاومت ضربه پارامتر مهمی محسوب نمی‌شود. همچنین ملاحظه

می‌شود که ضریب هم‌افزایی دو نانوذره در هر دو رابطه منفی بوده و اثر این موضوع در نمودار سه بعدی شکل‌های ۵-۵۴ و ۵-۵۵، که به ترتیب بیانگر تغییرات مقاومت به ضربه در دو نوع نانوکامپوزیت تقویت شده با نانوذرات سری S و L و همچنین نانوذرات سری M و L است، کاملاً مشهود می‌باشد.



شکل ۵-۵۴: نمودار سه بعدی تغییرات مقاومت ضربه برحسب درصد وزنی نانوذرات سری S و L بر اساس مدل منتخب



شکل ۵-۵۵: نمودار سه بعدی تغییرات مقاومت ضربه برحسب درصد وزنی نانوذرات سری M و L بر اساس مدل منتخب

با توجه به توضیحات فوق، در تمام پارامترهای اندازه‌گیری شده، مدل سطح پاسخ مربعی به عنوان "مدل منتخب" ارزیابی شد و تمامی نتایج مدل‌سازی با نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها، انطباق بسیار نزدیکی داشت. در قسمت انتهایی بخش مدل‌سازی، برای چهار پارامتر مدول یانگ، چقرمگی شکست، انرژی شکست و مقاومت ضربه که تغییرات مثبت نسبت به افزایش نانو ذره از خود نشان دادند، عمل بهینه‌سازی صورت گرفته و با پارامترهای توضیح داده شده در قسمت بعد، درصدهای وزنی بهینه برای رسیدن به بیشترین مقدار در هر یک از پارامترهای فوق محاسبه شده است.

۵-۲-۷ بهینه سازی

بر اساس توضیح داده شده در قسمت مدل‌سازی، در این بخش برای چهار پارامتر مدول یانگ، چقرمگی شکست، انرژی شکست و مقاومت ضربه، با هدف پیدا کردن بیشینه مقدار پارامتر مورد نظر، عمل بهینه سازی انجام گرفته است. بهینه سازی با استفاده از دو روش الگوریتم ژنتیک از روش‌های هوشمند و روش سطح پاسخ از روش‌های ریاضی صورت گرفته و نتایج با یکدیگر مقایسه شده تا بهینه بودن شبیه سازی تأیید شود.

تعداد متغیر با توجه به درصد وزنی، بدین ترتیب که برای هر سه درصد وزنی، مقادیر بین صفر تا ۶ درصد فرض شده اند و همچنین مجموع درصد وزنی سه نانو ذره به دلیل مشکلات ساخت که در قسمت تجربی توضیح داده شد، الزاماً باید کمتر از ۶ درصد باشد. به عبارت دیگر مجموع سه متغیر X_1 ، X_2 و X_3 ، یعنی به ترتیب درصد وزنی نانو ذرات S، M و L، کمتر یا مساوی ۶ انتخاب شده است. پارامترهای دیگر الگوریتم ژنتیک به این ترتیب انتخاب شده است که تعداد نقاط اولیه، ۳۲ نقطه بوده و انتخاب نمونه‌ها در هر نسل به صورت ایده‌آل انجام شده است. ساختار الگوریتم ژنتیک مورد استفاده از نوع باینری با دقت جواب ۰/۰۰۱ در مبنای ده بوده است. بر اساس این دقت، تعداد بیت هر کروموزوم (متغیر)، ۱۳ بیت و با توجه به وجود سه کروموزوم، طول ژن برابر ۳۹ بیت می شود.

نوع همپوشانی^۱، همپوشانی چند نقطه ای تصادفی با تعداد نقاط ۵ نقطه و در نهایت احتمال جهش ۰/۰۵ بوده است.

لازم به ذکر است که در نظر گرفتن سه متغیر با دقت ۰/۰۰۱ از ۰ تا شش در بهینه سازی عادی و بدون استفاده از الگوریتم ژنتیک، نیاز به چک کردن 6000^3 حالت دارد که برابر ۲۱۶ میلیارد محاسبه خواهد بود. این در حالی است که استفاده از الگوریتم ژنتیک و یا روش پاسخ سطح، با هدف رسیدن به یک جواب نسبتاً بهینه با تعداد تکرار و محاسبه بسیار کم در این مورد کاملاً توجیه پذیر است. برای نمونه در پیاده سازی انجام شده در مورد مدول یانگ در ۱۸ تکرار با تعداد ۳۲ نمونه اولیه، به جواب بهینه رسیدیم که برابر $304 = 16 \times 17 + 32$ محاسبه خواهد بود که بسیار کمتر از ۲۱۶ میلیارد محاسبه است.

درصد وزنی‌های بهینه حاصل از دو روش سطح پاسخ و الگوریتم ژنتیک برای چهار پارامتر مدول یانگ، چقرمگی شکست، انرژی شکست و مقاومت ضربه، در جدول ۵-۲۰ آورده شده است.

جدول ۵-۲۰: درصد وزنی‌های بهینه حاصل از دو روش سطح پاسخ و الگوریتم ژنتیک برای پارامترهای مختلف

پارامتر	الگوریتم ژنتیک			سطح پاسخ		
	% S	% M	% L	% S	% M	% L
مدول یانگ	۳/۶۹	۰/۰۰	۲/۳۱	۳/۷۰	۰/۰۰	۲/۳۰
چقرمگی شکست	۳/۱۴	۲/۸۳	۰/۰۳	۳/۲۳	۲/۷۷	۰/۰۰
انرژی شکست	۳/۰۸	۲/۹۲	۰/۰۰	۳/۱۰	۲/۹۰	۰/۰۰
مقاومت ضربه	۳/۱۳	۲/۸۷	۰/۰۰	۳/۱۲	۲/۸۸	۰/۰۰

همانطور که در جواب‌ها و نقاط بدست آمده واضح است، هر دو روش جواب های بسیار نزدیک به هم دارند که حاکی از پیاده سازی درست هر دو روش و دقت بالای جواب بدست آمده می باشد. لذا با توجه به مقادیر جدول ۵-۲۰، جواب بهینه برای هر یک از پارامترهای مذکور به قرار زیر است:

¹ Cross Over

❖ جواب بهینه در مدول یانگ: $1721/89 \text{ MPa}$

❖ جواب بهینه در چقرمگی شکست: $0/64 \text{ MPa}\sqrt{m}$

❖ جواب بهینه در انرژی شکست: $203/88 \text{ J/m}^2$

❖ جواب بهینه در مقاومت ضربه: $6/74 \text{ kJ/m}^2$

نکته قابل توجه در هر چهار پارامتر، لزوم صفر بودن یکی از دو نوع نانو ذره M و L در نقطه بهینه می‌باشد؛ به عبارت دیگر در حالت بهینه در کامپوزیت تولید شده، فقط دو نانو ذره وجود دارد که یکی از آنها لزوماً نانوذره نوع S بوده که بیانگر اهمیت و تأثیر بیشتر نانوذره نوع S در جواب بهینه است و یکی از نانو ذرات نوع M و L بسته به نوع پارامتر، درصد وزنی صفر خواهند داشت.

۵-۲-۱۸ اعتبار سنجی

برای نشان دادن اعتبار مدل و دقت بالای آن در انطباق نتایج درونیابی با نتایج تجربی و نیز نظر به اینکه نقطه بهینه یک نقطه درون بازه‌ای می‌باشد، در ده حالت مختلف در مدل سطح پاسخ مرتبه دو، به صورت تصادفی از ۱۹ آزمایش موجود، ۷ آزمایش حذف شده (حدود ۴۰٪ از داده‌ها) و مدل با ۱۲ نقطه آموزش داده شد. به عبارت دیگر ۱۲ نقطه برای آموزش و ۷ نقطه برای اعتبارسنجی در نظر گرفته شد. اگر مدل RSM مدل مناسبی نباشد، با این تعداد نقطه مطمئناً جواب مناسبی در اعتبارسنجی نخواهد داشت. این کار برای ده بار و با نقاط مختلف تکرار شد. نتایج در جدول ۵-۲۱ آورده شده است. همانطور که از این جدول مشخص است ماکزیمم خطای آزمایش به ۲/۹۳٪ رسیده که حاکی از دقت بسیار بالای مدل دارد. علاوه بر آن R^2 هیچگاه از ۰/۹۸۸ کمتر نشده که بیانگر پایداری بسیار عالی مدل است. با توجه به این موضوع منطقی است که جواب بهینه مستخرج از مدل دارای دقت بالایی بوده و نیازی به ساخت نمونه در نقطه بهینه احساس نمی‌گردد.

جدول ۵-۲۱: جدول پارامترهای آماری برای مدل سطح پاسخ مرتبه دو با ۱۲ داده آموزش و ۷ داده آزمایش

شماره اجرا	خطای میانگین آموزش	خطای آزمایش	R^2
۱	۰/۵۶	۰/۸۱	۰/۹۹۶۶
۲	۰/۳۳	۲/۹۳	۰/۹۸۸۰
۳	۰/۳۶	۲/۲۴	۰/۹۹۲۷
۴	۰/۵۵	۱/۱۶	۰/۹۹۵۶
۵	۰/۴۰	۱/۸۶	۰/۹۹۳۶
۶	۰/۲۷	۱/۵۶	۰/۹۹۶۵
۷	۰/۶۷	۲/۱۳	۰/۹۹۲۲
۸	۰/۶۷	۰/۶۶	۰/۹۹۶۵
۹	۰/۴۷	۱/۱۶	۰/۹۹۶۵
۱۰	۰/۴۰	۱/۸۶	۰/۹۹۳۶

این در حالیست که با استفاده از همه نقاط در روند مدلسازی سطح پاسخ مرتبه دو (همه ۱۹ نقطه برای آموزش استفاده شود)، خطای میانگین به ۰/۶٪ رسیده و معیار R^2 برابر ۰/۹۹۶۷ بدست آمده است.

همچنین برای اثبات اعتبار مدل در حالت برونابی، با حذف ۳ نقطه از نقاط بیرون بازه در آزمایش با دو نمونه S و L (که با توجه به ۱۲ نقطه این آزمایش دو سطحی، می شود ۲۵٪ کل نقاط) یعنی نقاط NE، L-۳٪S و L-۴٪S، به بررسی این موضوع پرداخته شده است. در این حالت درصد های زیر برای آموزش و آزمایش به دست آمد. خطای آموزش برای نه نقطه درون بازه معادل ۰/۵۸۱۸٪ و خطای آزمایش برای سه نقطه بیرون بازه (برونابی) معادل ۱/۵۷۸۸٪ و مقدار R^2 معادل ۰/۹۷۱۷ بوده است. این اعداد در صورت استفاده کردن از کل نمونه ها (تمام نمونه ها برای آموزش) برابر با ۰/۵۸۶۷٪ خطای یادگیری و R^2 معادل ۰/۹۸۵۱ بوده که توانایی روش انجام شده در بحث برونابی مورد بررسی را تأیید می کند. بنابراین، با توجه به اعتبارسنجی انجام شده و حذف ۲۵٪

نقاط بیرون بازه و باز هم باقی ماندن خطای مدل در بازه قابل قبول، معتبر بودن مدل RSM مشخص است.

البته، لازم به ذکر است که مدل های ارائه شده از روی داده های تجربی در یک بازه مشخص بدست آمده و به دلیل در نظر نگرفتن های فیزیکی خاص، شاید در خارج از بازه های مورد بررسی قابل استناد نباشد.

۵-۲-۹ جمع بندی

در بخش مدل سازی، برای کلیه پارامترهای اندازه گیری شده تجربی، مدل های متعددی بیان شد و بر اساس نتایج بدست آمده از مدل و مقایسه آن با نتایج تجربی، روش سطح پاسخ مرتبه دو به عنوان "مدل منتخب" برای پیش بینی انتخاب گردید. کلیه مدل های بدست آمده که دارای دقت بالای ۹۰ درصد بودند، در حالت دو بعدی و سه بعدی پیاده سازی شده و نتایج بدست آمده از مدل با نتایج بدست آمده از آزمایش های تجربی انطباق کامل داشت. علاوه بر آن تأثیر افزودن نانو ذرات مختلف که در قسمت تجربی مورد بحث قرار گرفته بود، با اعداد بدست آمده در مدل های ریاضی تأیید و صحت استدلالات انجام شده نشان داده شد. در نهایت، در مورد پارامترهایی که افزودن نانو ذرات اثر مثبت بر آنها داشت (مدول یانگ، چقرمگی شکست، انرژی شکست و مقاومت ضربه)، عمل بهینه سازی به کمک دو روش الگوریتم ژنتیک و سطح پاسخ صورت گرفت که نقاط بهینه به صورت درصد وزنی نانو ذرات بدست آمد. نتایج بهینه سازی با استفاده از هر دو روش کاملاً اعتبار سنجی شد و نشان داده شد که بهینه سازی صورت گرفته از دقت کافی برخوردار بوده است.

فصل ۶

جمع‌بندی رساله و پیشنهادات

۶-۱ مقدمه

هدف این رساله، تقویت پلیمر ترموست دی گلیسیدیل اتر بیسفنول A با افزودن نانوذرات کروی سیلیس و بررسی خواص مکانیکی متعددی نظیر مدول یانگ، تنش تسلیم، چقرمگی شکست، انرژی شکست، مقاومت به ضربه و نیز بررسی قابلیت جذب انرژی سازه‌های جدار نازک مخروطی و قوطی شکل بود. در این پژوهش، با وجود اینکه اثر اندازه ذرات و محتوای ذرات مورد توجه بود؛ لیکن رویکرد اصلی در استفاده ترکیبی از دو نانوذره با اندازه‌های مختلف برای تقویت زمینه و بررسی اثر هم‌افزایی ترکیب-های مختلف بر پارامترهای مذکور بود. از این‌رو، نمونه‌ی شاهد در کامپوزیت‌های دوتایی، رزین اپوکسی تقویت شده با ۱/۵ درصد وزنی سیلیس به قطر متوسط ۶۵ nm انتخاب شد که فضای خالی بین این ذرات با نانوذرات سیلیس کوچکتر به قطرهای ۱۷ nm و ۲۵ nm، تا ۶/۰ درصد وزنی، پر شد.

۶-۲ جمع‌بندی نتایج تجربی

- ❖ نتایج تجربی نشان می‌دهد که با افزودن نانوذرات سیلیس به اپوکسی و همچنین با افزایش محتوای ذرات، مدول یانگ افزایش می‌یابد. اما ملاحظه می‌شود که تأثیر اندازه ذرات بر مدول یانگ اندک است؛ بدین معنا که هرچه اندازه ذرات ریزتر است، به علت بالاتر بودن فصل مشترک بین ماده زمینه و ماده تقویت کننده، نسبت سطح به حجم افزایش یافته و اندکی مدول یانگ را افزایش می‌دهد. همچنین نتایج نشان داد که در یک درصد وزنی یکسان، مدول یانگ کامپوزیت‌های دو ذره‌ای، اندکی از مدول یانگ کامپوزیت‌های تک ذره‌ای بیشتر است.
- ❖ با افزودن نانوذرات سیلیس به اپوکسی و همچنین با تغییر محتوای آنها، تغییر قابل ملاحظه‌ای در استحکام تسلیم ملاحظه نشد و البته بدیهی است که اندازه ذرات تقویت کننده و استفاده ترکیبی از آنها نیز بر این پارامتر مؤثر نبود.
- ❖ در این رساله، مدل‌های تحلیلی هالپین-تسای و مدل کرنر برای پیش‌بینی مدول یانگ نانوکامپوزیت‌ها، مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. مدل هالپین-تسای تا ۴/۵ درصد وزنی نانوذرات، پیش‌بینی منطقی‌تری را نسبت به مدل کرنر ارائه می‌دهد ولو اینکه مدول یانگ کامپوزیت را

در ۶ درصد کسر حجمی، کمتر پیش بینی می‌کند. مدل کرنر نیز از ۳ درصد وزنی به بالا، نتایج را کمی بالاتر از نتایج تجربی پیش بینی کرده است.

❖ نتایج نشان می‌دهد که چقرمگی شکست، K_{IC} و به تبع آن انرژی شکست، G_{IC} ، در هر دو سری از کامپوزیت‌های تک‌ذره‌ای و دو ذره‌ای، با افزودن نانوذرات سیلیکا به طرز چشمگیری افزایش یافته و مشخصاً تابعی از محتوای ذرات سیلیکا است. اما در یک کسر حجمی یکسان، اندازه‌ی ذرات و ترکیب ذرات تأثیر چندانی روی این دو پارامتر ندارد.

❖ نتایج نشان می‌دهد که با افزودن نانوذرات در تمام کامپوزیت‌های تک‌ذره‌ای و دو ذره‌ای، مقاومت ضربه افزایش یافته و به موازات افزایش محتوای ذرات نیز بر مقدار مقاومت ضربه افزوده می‌شود. مقدار این پارامتر در کامپوزیت‌های دو ذره‌ای اندکی بیشتر از کامپوزیت‌های تک‌ذره‌ای است. به علاوه، در بین کامپوزیت‌های دو ذره‌ای نیز، کامپوزیت‌هایی که فضای بین نانوذرات سری L آنها با نانوذرات کوچکتر سری S پر شده، از مقاومت ضربه بالاتری نسبت به کامپوزیت‌هایی که فضای بین نانوذرات سری L آنها با نانوذرات سری M پر شده، برخوردارند.

❖ قابلیت جذب انرژی سازه‌های جدار نازک قوطی شکل، با دو ارتفاع ۶۰ mm و ۹۰ mm، تحت بارگذاری شبه استاتیکی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزودن نانوذرات سیلیس، بر صلبیت سازه افزوده شده و پیوندها شکننده‌تر می‌شوند و در نتیجه بیشینه بار و به تناسب آن انرژی جذب شده دچار افت شده که این موضوع با افزایش محتوای ذرات تشدید می‌شود.

❖ بررسی مشابهی برای قابلیت جذب انرژی سازه‌های جدار نازک مخروطی شکل انجام شد که روند نتایج شبیه روند سازه‌های جدار نازک قوطی شکل بود. عامل فروپاشی این گونه سازه‌ها، ایجاد ترک در مراحل اولیه بارگذاری و گسترش آن در امتداد ارتفاع سازه بود.

۳-۶ جمع‌بندی نتایج عددی

- ❖ کلیه نتایج تجربی به کمک سه روش سطح پاسخ خطی، سطح پاسخ مربعی و شبکه عصبی مدل شده و در نهایت پس از انجام مدل‌سازی، پارامترهای آماری و خطای سه روش با یکدیگر مقایسه شده و "مدل سطح پاسخ مربعی" به عنوان "مدل منتخب" گزارش شد.
- ❖ برای کلیه پارامترها، توسط روش‌های سطح پاسخ خطی و مربعی، فرمول‌هایی ارائه شد که در همه آنها، متغیرهای X_1 ، X_2 و X_3 ، که به عنوان متغیرهای طراحی هستند، به ترتیب، درصد وزنی نانوذرات سری‌های S، M و L انتخاب شدند.
- ❖ با کمک پارامترهای آماری، دقت "مدل منتخب" اعتبارسنجی شده و ملاحظه شد که نتایج مدل‌سازی تطابق خوبی با نتایج تجربی دارد.
- ❖ پس از مشخص شدن انطباق خوب "مدل منتخب" با نتایج تجربی، برای نشان دادن نحوه تغییر هر یک از پارامترها با درصد وزنی ذرات در نانوکامپوزیت‌های ترکیبی، به سراغ منحنی‌های سه بعدی رفتیم. این منحنی‌ها، تغییرات هر پارامتر را بر حسب تغییرات نانوذرات سری L و S و نیز بر حسب تغییرات نانوذرات سری L و M نشان داده و پیش‌بینی مناسبی را از کامپوزیت‌های ترکیبی با ترکیبات مختلف ارائه می‌دهد.
- ❖ برای چهار پارامتر مدول یانگ، چقرمگی شکست، انرژی شکست و مقاومت ضربه، که افزودن نانوذرات اثر مثبت روی این پارامترها داشت، عمل بهینه‌سازی انجام گرفت. بهینه‌سازی با استفاده از دو روش الگوریتم ژنتیک و سطح پاسخ صورت گرفته و نتایج با یکدیگر مقایسه شدند و نهایتاً درصد وزنی‌های بهینه حاصل از دو روش برای پارامترهای مذکور گزارش شد.

۴-۶ پیشنهادات

- ❖ ترکیبات کامپوزیتی پیشنهاد شده در این رساله را می‌توان برای بررسی خواص مکانیکی دیگری نظیر خزش، سختی، خمش سه نقطه، استحکام فشاری و غیره بررسی کرد. همچنین می‌توان نرخ بارگذاری را نیز در آزمون‌های مرتبط مدنظر قرار داد.
- ❖ در مورد پارامترهایی نظیر مدول یانگ، چقرمگی شکست، انرژی شکست و مقاومت ضربه، که افزودن نانوذرات اثر مثبت روی آنها داشته، چنانچه بتوان از نانوذراتی با رفتار سطحی بهتر استفاده کرد (مثلاً با انجام اصلاح سطح)، می‌توان مقادیر بیشتری از نانوذرات را به رزین اپوکسی افزود که قطعاً موجب حصول نتایج بهتری خواهد شد.
- ❖ بحث سازه‌های جاذب انرژی کامپوزیتی و به کارگیری پرکننده‌هایی در مقیاس نانو، موضوعاتی است که در آن کمتر پژوهش‌های بنیادی انجام شده است؛ لذا می‌توان اثر افزودن پرکننده‌های مختلف به رزین‌های متنوع را برای بررسی قابلیت جذب انرژی مورد توجه قرار داد. همچنین در این پژوهش، قالب‌های ساخت جاذب‌های مخروطی شکل و قوطی شکل ساخته شد و می‌توان در پژوهش‌های بعدی به سراغ ساخت قالب‌های دیگری جهت تولید سازه‌های نیمه کروی، هرمی، شش ضلعی، هشت ضلعی و غیره رفت.
- ❖ یکی از پارامترهای مورد توجه محققین، ماده زمینه است. لذا می‌توان پژوهش انجام شده را در مورد رزین‌های مرسوم دیگری نظیر پلی پرتان (PV)، پلی استر، اپوکسی با پایه سایر بیسفنول‌ها نظیر دی گلیسیدیل اتر بیسفنول F (DGEF) و غیره که هر کدام ترکیبات مختلفی دارند را مورد بررسی قرار داده و نتایج را با نتایج این پژوهش مقایسه کرد.
- ❖ مدل‌سازی مدول یانگ نشان داد که حالت ترکیبی نانوذرات (به خصوص نانوذرات سری L و S) در محتوای ذرات بالا، هم‌افزایی چشمگیری از خود نشان می‌دهد. لذا می‌توان با غلبه بر مشکلات ساخت (مثلاً با اصلاح سطح) و برای تأیید اعتبار بیشتر مدل مذکور، یکی از این نمونه‌ها را ساخته و مدول یانگ آن را اندازه گرفت.

مراجع

1. Al-Turaif H. A. (2010) "Effect of nano TiO₂ particle size on mechanical properties of cured epoxy resin" **Prog. Org. Coat.**, 69, 3, pp 241.
2. Choi J. T., Kim D. H., Ryu K. S., Lee H., Jeong H. M., Shin C. M, Kim J. H., and Kim B. K. (2011) "Functionalized Graphene Sheet/Polyurethane Nanocomposites: Effect of Particle Size on Physical Properties" **Macromol. Res.**, 19, 8, pp 809.
3. Vinayak A., Dhumale P., Shah V., Rishi B., Sharma B., and Katsuaki T. (2012) "Effects of particle size and surrounding media on optical radiation efficiencies of spherical plasmonic metal nanoparticles" **Bull. Mater. Sci.**, 35, 2, pp 143.
4. Gajewska M., Dutkiewicz J., and Morgiel J. (2014) "Effect of reinforcement particle size on microstructure and mechanical properties of AlZnMgCu/AlN nanocomposites produced using mechanical alloying" **Alloys Compd.**, 586, 7, PP 423.
5. Hualong Y., Zhe L., Bing J., Michael P., Craig B., Wing K., and Jane W. (2015) "Determination of the viscoelastic interfacial properties between silica and SNR-based materials via a semi-empirical approach" **Mech. Mater.**, 80, 5, pp 1.
6. Bartczak Z., Argon A. S., Cohen R. E., and Weinberg M. (1999) "Toughness mechanism in semicrystalline polymer blends: II high-density polyethylene toughened with calcium carbonate filler particles" **Polym J.**, 40, 9, pp 2347.
7. Henghua J., Mangun C. L., Stradley D. S., Moore J. S., Sottos N. R., and White S. R. (2011) "Self-healing thermoset using encapsulated epoxy-amine healing chemistry" **Polym J.**, 53,2, pp 1.
8. Odegard G. M., and Bandyopadhyay A. (2011) "Physical Aging of Epoxy Polymers and Their Composites" **Polym. Sci. Part B: Polym. Phys.**, 49, 24, pp 1695.
9. Jin F. L., Li X. and Park S. J. (2015) "Synthesis and application of epoxy resins: A review" **J. Ind. Eng. Chem.**, 29, pp 1.
10. Jeon H. R., Park J. H. and Shon M. Y. (2013) "Corrosion protection by epoxy coating containing multi-walled carbon nanotubes" **J. Ind. Eng. Chem.**, 19, 3, pp 849.
11. Lee S. B., Lee H. J. and Hong I. K. (2012) "Diluent filler particle size effect for thermal stability of epoxy type resin" **J. Ind. Eng. Chem.**, 18, 2, pp 635.

12. Kumar K. S., Biju R. and Nair C. P. R. (2013) "Progress in shape memory epoxy resins" **React. Funct. Polym.** 73, 2, pp 421.
13. Mohammed I. A., Ali M. F. and Daud W. R. (2012) "New class of liquid crystalline epoxy resins: Synthesis and properties" **J. Ind. Eng. Chem.**, 18, 1, pp 364.
14. Pham V. H., Ha Y.W., Kim S.H., Jeong H.T., Jung M.Y., Ko B.S., Hwang Y.J. and Chun J.S. (2014) "Synthesis of epoxy encapsulated organoclay nanocomposite latex via phase inversion emulsification and its gas barrier property" **J. Ind. Eng. Chem.** 20, 1, pp 108.
15. Li Y., Badrinarayana P. and Kessler M. R. (2013) "Liquid crystalline epoxy resin based on biphenyl mesogen: Thermal characterization" **Polym.** 54, 12, pp 3017.
16. Ha S. R., Ryu S. H., Park S. J. and Rhee K. Y. (2007) "Effect of clay surface modification and concentration on the tensile performance of clay/epoxy nanocomposites" **Mater. Sci. Eng. A.** 448, 1-2, pp 264.
17. Mousavifard S. M., Nouri P. M., Attar M. M. and Ramezanzadeh B. (2013) "The effects of zinc aluminum phosphate (ZPA) and zinc aluminum polyphosphate (ZAPP) mixtures on corrosion inhibition performance of epoxy/polyamide coating" **J. Ind. Eng. Chem.** 19, 3, pp 1031.
18. Na T., Shao K., Zhu J., Sun H., Xu D., Zhang Z., Lew C. M. and Zhang G. (2013) "Composite membranes based on fully sulfonated poly(aryl ether ketone)/epoxy resin/different curing agents for direct methanol fuel cells" **J. Power Source**, 230 pp 290.
19. Jin F. L. and Park S. J. (2013) "Recent Advances in Carbon-Nanotube-Based Epoxy Composites" **Carbon Let t.** 14, 1, pp 1.
20. Hao Y., Liu F. and Han E. H. (2013) "Protection of epoxy coatings containing polyaniline modified ultra-short glass fibers" **Prog. Org. Coat.** 76, 4, pp 571.
21. Katariya M. N., Jana A. K. and Parikh P. A. (2013) "Corrosion inhibition effectiveness of zeolite ZSM-5 coating on mild steel against various organic acids and its antimicrobial activity" **J. Ind. Eng. Chem.** 19, 25, pp 286.
22. Nguyen H. V., Andreassen E., Kristiansen H., Johannessen R., Hoivik N. and Aasmundtveit E. (2013) "Rheological characterization of a novel isotropic conductive adhesive – Epoxy filled with metal-coated polymer spheres", **Mater. Des.** 46, pp 784.

23. Park C. H., Lee S. W., Park J. W., Kim H. J., (2013) "Preparation and characterization of dual curable adhesives containing epoxy and acrylate functionalities" **React. Funct. Polym.** 73, 4, pp 641.
24. Liu Y., Yang G., Xiao H. M., Feng Q. P. and Fu S. Y. (2013) "Effect of Wheat Flour on the Viscosity of Urea-formaldehyde Adhesive" **Int. J. Adhes. Adhes.** 41 pp 1.
25. Kaboorani A. and Riedl B. (2012) "Nano-aluminum oxide as a reinforcing material for thermoplastic adhesives" **J. Ind. Eng. Chem.** 18, 3, pp 1076.
26. Shamsuddoha M., Islam M. M., Aravinthan T., Manalo A. and Lau K. (2013) "Characterisation of mechanical and thermal properties of epoxy grouts for composite repair of steel pipelines" **Mater. Des.** 52, pp 315.
27. Ahmed K., Nizami S. S. and Raza N. Z. (2013) "Characteristics of natural rubber hybrid composites based on marble sludge/carbon black and marble sludge/rice husk derived silica" **J. Ind. Eng. Chem.** 19, 4, pp 1169.
28. Dao D. Q., Luche J., Richard F., Rogaume T., Bourhy-Weber C. and Ruban S. (2013) "Determination of characteristic parameters for the thermal decomposition of epoxy resin/carbon fibre composites in cone calorimeter" **In Hydrogen Energy** 38, 19, pp 8167.
29. Ayad M. M., El-Nasr A. A. and Stejskal J. (2012) "Kinetics and isotherm studies of methylene blue adsorption onto polyaniline nanotubes base/silica composite" **J. Ind. Eng. Chem.** 18, pp 1964.
30. Azeez A. A., Rhee K. Y., Park S. J. and Hui D. (2013) "Epoxy clay nanocomposites – processing, properties and applications: A review" **Composites B** 45, 1, pp 308.
31. Kandare E., Kandola B. K. and Myler P. (2013) "Evaluating the influence of varied fire-retardant surface coatings on post-heat flexural properties of glass/epoxy composites" **Fire Saf. J.** 58, pp 112.
32. Suh S. W., Kim J. J., Kim S. H. and Park B. K. (2012) "Effect of PI film surface on printing of Pd(II) catalytic ink for electroless copper plating in the printed electronics" **J. Ind. Eng. Chem.** 18, 1, pp 290.
33. Teh P. L., Jaafar M., Akil H. M., Seetharamu K. N., Wagiman A. N. R. and Beh K. S. (2008) "Thermal and mechanical properties of particulate fillers filled epoxy

- composites for electronic packaging application” **Polym. Adv. Technol.** 19, 4, pp 308.
34. Krummenacker M., and Lewis J., (1995) “**Prospects in Nanotechnology toward Molecular Manufacturing**” John Wiley & Sons: New York, USA.
 35. Dastjerdi R. and Montazer M. (2010) “A review on the application of inorganic nano-structured materials in the modification of textiles: Focus on anti-microbial properties” **Colloids Surf. B.**, 79, 1, pp 5.
 36. Al-Saleh M. H. and Sundararaj U. (2009) “A review of vapor grown carbon nanofiber/polymer conductive composites” **Carbon.**, 47, 1, pp 2.
 37. Kang Gao., Kae-Long Lin., DeYing Wang., Chao-Lung Hwang., Hau-Shing Shiu., Yu-Min Chang., and Ta-Wui Cheng. (2014) “Effects SiO₂/Na₂O molar ratio on mechanical properties and the microstructure of nano-SiO₂ metakaolin-based geopolymers” **Const. Build. Mater.** 53, 28, pp 503.
 38. Mohamed Amin., and Khaled Abu el-hassan. (2015) “Effect of using different types of nano materials on mechanical properties of high strength concrete” **Const. Build. Mater.**, 80, pp 116.
 39. Abdollahi M., Rezaei M., and Farzi G. A. (2012) “A novel active bionanocomposite film incorporating rosemary essential oil and nanoclay into chitosan” **Food Eng.**, 111, pp 343.
 40. Ozin G. A. (1992) “Nanotechnology: Synthesis in Diminishing Dimensions” **Adv. Mater.**, 4, pp 612.
 41. Low K. O., and Wong K, J. (2011) “Tribological effects of polymer surface modification through plastic deformation” **Bull. Mater. Sci.**, 34, 7, pp 1549.
 42. Pilliar R. M. (2015) “Sol–gel surface modification of biomaterials” **Surf Coat Modi.**, pp 185.
 43. Wang Y., Eli W., Zhang L., Gao H., Liu Y., and Li P. (2010) “A new method for surface modification of nano-CaCO₃ and nano-Al₂O₃ at room temperature” **Adv. Powder Technol.**, 21, 2, pp 203.
 44. Deng H., Skipa T., Bilotti E., Zhang R., Lellinger D., Mezzo L., Fu Q., Alig I., and Peijs T. (2010) “Preparation of high-performance conductive polymer fibers through morphological control of networks formed by nanofillers” **Adv. Funct. Mat.**, 20, pp 1424.

45. Akcora P., Liu H., Kumar S. K., Moll J., Li Y., Benicewicz B. C., Schadler L. S., Acehan D., Panagiotopoulos A. Z., Pryamitsyn V., Ganesan V., Ilavsky J., Thiyagarajan P., Colby R. H., and Douglas J. F. (2009) "Anisotropic Self-Assembly of Spherical Polymer-Grafted Nanoparticles" **Nat. Mat.**, 8, pp 354.
46. Pukánszky B., and Fekete E. (1998) "Aggregation Tendency of Particulate Fillers: Determination and Consequences" **E. Polym. Polym. Compos.** 6, pp 313.
47. Švehlova V., and Polouček E. (1987) "About the influence of filler particle size on toughness of filled polypropylene, Angew. Makro" **Chem.**, 153, pp 197.
48. Kalamkarov A. L., Georgiades A. V., Rokkam S. K., Veedu V. P., and Ghasemi-Nejhad M. N. (2006) "Analytical and numerical techniques to predict carbon nanotubes properties" **Int J Solids Struct.**, 43,22, pp 6832.
49. Shokrieh M. M., and Rafiee R. (2010) "On the tensile behavior of an embedded carbon nanotube in polymer matrix with non-bonded interphase region" **Compos. Struct.** 92, 3, pp 647.
50. Shaffer J. S., and Chakraborty A. K. (1993) "Dynamics of poly (methyl methacrylate) chains adsorbed on aluminum surfaces Macromolecules" **Macromol.**, 26, 5, pp 1120.
51. Dittanet P., and Pearson R. A. (2013) "Effect of bimodal particle size distributions on the toughening mechanisms in silica nanoparticle filled epoxy resin" **Polym J.**, 54, 7, pp 1832.
52. Kitey R., Tippur H. V. (2005) "Role of particle size and filler–matrix adhesion on dynamic fracture of glass-filled epoxy I. Macromolecular measurements" **Acta Mater.**, 53, 4, pp 1153.
53. Fu S. Y., Feng X. Q., Liu B. L., and Mai Y. W. (2008) "Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate–polymer composites" **Composites Part B.**, 39, 6, pp 933.
54. Nakamura Y., Yamaguchi M., Okubo M., and Matsumoto T. (1992) "Effect of particle size on mechanical properties of epoxy resin filled with angular-shaped silica" **J Appl Polym Sci.**, 44, 1, pp 151.
55. Naji Givi A., Abdul Rashid S., Nora F., Aziz A. and Mohd Salleh M. A. (2010) "Experimental investigation of the size effects of SiO₂ nano-particles on the mechanical properties of binary blended concrete" **Composites: Part B.**, 41, 8, pp 673.

56. Naji Givi A., Khaloo A., Irajizad A., and Abdul Rashid S. (2013) "Investigating the effects of using different types of SiO₂ nanoparticles on the mechanical properties of binary blended concrete" **Composites: Part B.**, 54, pp 52.
57. Mohd F. O., Hazizan M. A. and Zainal A. A. (2013) "Particle size – Dependent on the static and dynamic compression properties of polypropylene/silica composites" **Mater. Des.** 45, pp 539.
58. Haiwen G., Yangbo G., Siew Yee W., Chaobin H., Xu L., Shim V. P. W. (2013) "Effect of interphase and strain-rate on the tensile properties of polyamide 6 reinforced with functionalized silica nanoparticles" **Compos. Sci. Technol.** 75, 11, pp 62.
59. Isala D., Chanchira J., Tsutomu T. and Sarawut R. (2014) "High thermal and mechanical properties enhancement obtained in highly filled polybenzoxazine nanocomposites with fumed silica" **Composites: Part B.**, 56, pp 197.
60. Dittanet P., and Pearson R. A. (2012) "Effect of silica nanoparticle size on toughening mechanisms of filled epoxy" **Polym J.**, 53, 9, pp 1890.
61. Liang Y. L., and Pearson R. A. (2009) "Toughening mechanisms in epoxy-silica nanocomposites (ESNs)" **Polym J.**, 50, 20, pp 4895.
62. Zhang H., Zhang Z., Friedrich K., and Eger C. (2006) "Property improvements of in situ epoxy nanocomposites with reduced interparticle distance at high nanosilica content" **Acta Mater.**, 54, 7, pp 1833.
63. Sun Y., Zhang Z., and Wong C. P. (2005) "Study on mono-dispersed nano-size silica by surface modification for underfill applications" **J. Colloid Interface Sci.**, 292, 2, pp 436.
64. Kawaguchi T., and Pearson R. A. (2003) "The effect of particle–matrix adhesion on the mechanical behavior of glass filled epoxies" Part 2: A study on fracture toughness, **Polym J.**, 44, 15, pp 4239.
65. Kinloch A., Mohammed R., Taylor A., Eger C., Sprenger S., and Egan D. (2005) "The effect of silica nano particles and rubber particles on the toughness of multiphase thermosetting epoxy polymers" **J. Mater. Sci.**, 40, 18, pp 5083.

66. Nakamura Y., and Yamaguchi M. (1992) "Effect of particle size on the fracture toughness of epoxy resin filled with spherical silica" **Polym J.**, 33, 16, pp 3415.
67. Lange F. F., and Radford K. C. (1971) "Fracture Energy and Strength Behavior of a Sodium Borosilicate Glass-Al₂O₃ Composite System" **J. Mater. Sci.**, 6, 9, pp 1197.
68. Liu H. Y., Wang G. T., Mai Y. W., and Zeng Y. (2011) "On fracture toughness of nano-particle modified epoxy" **Composites: Part B.**, 42, 8, pp 2170.
69. Tang L., Zhang H., Sprenger S., Ye L., and Zhang Z. (2012) "Fracture mechanisms of epoxy-based ternary composites filled with rigid-soft particles" **Compos. Sci. Technol.**, 72, 5, pp 558.
70. Nekhamanurak B., Patanathabutr P., and Hongsriphan N. (2012) "Mechanical Properties of Hydrophilicity Modified CaCO₃-Poly (Lactic Acid) Nanocomposite" **Int. J. App. Phys. Math.**, 2, pp 98.
71. Alavi Nikjea M. M., Khanmohammadi M. R., Bagheri Garmarudi A., and Haghshenas M. (2012) "Nanosilica reinforced epoxy floor coating composites: preparation and thermophysical characterization" **Curr. Chem. Lett.**, 1, pp 13.
72. Battistella M., Cascione M., Fiedler B., Wichmann M. H. G., Quaresimin M., and Schulte K. (2008) "Fracture behaviour of fumed silica/epoxy nanocomposites" **Composites: Part A.**, 39, pp 1851.
73. Farshad M. (1992) "**Design and analysis of shell structures**", Dordrecht, Kluwer.
74. Polenta V., Garvey S. D., Chronopoulos D., Long A. C., and Morvan H. P. (2015) "Optimal internal pressurisation of cylindrical shells for maximising their critical bending load, **Thin-Walled Struct.**, 87, pp 133.
75. Adam J., Sadowski., and Michael Rotter J. (2014) "Modelling and behaviour of cylindrical shell structures with helical features, **Comput. Struct.**, 133, pp 90.
76. Njuguna J. (2011) "The application of energy-absorbing structures on side impact protection systems" **Int J Comput Appl Technol.**, 40, 4, pp 280.

77. Gupta P. K., and Gupta N. K. (2009) "A study of axial compression of metallic hemispherical domes" **J. Mater. Process. Technol.**, 209, 4, pp 2175.
78. Shariati M., and Hatami H. (2012) "Experimental study of SS304L cylindrical shell with/without cutout under cyclic axial loading" **Theor. Appl. Fract. Mech.**, 58, 1, 35.
79. Yang Z., Yan H., Huang C., Diao X., Wu X., Wang Sh., Lu L., Liao L., and Y. Wei. (2014) "Experimental and numerical study of circular, stainless thin tube energy absorber under axial impact by a control rod" **Thin. Struct.**, 82, pp 24.
80. Zhang X., Zhang H., and Wen Z. (2015) "Axial crushing of tapered circular tubes with graded thickness" **Int. J. Mech. Sci.**, 92, pp 12.
81. Alavi Nia A., and Haddad Hamedani J. (2010) "Comparative analysis of energy absorption and deformations of thin walled tubes with various section geometries" **Thin. Struct.**, 48, 12, pp 946.
82. Alavi Nia A., and Parsapour M. (2015) "Comparative analysis of energy absorption capacity of simple and multi-cell thin-walled tubes with triangular, square, hexagonal and octagonal sections" **INT. J. MECH. SCI.**, 92, pp 12.
83. Ramakrishna S. (1997) "Microstructural design of composite materials for crashworthy structural applications" **Mater Des.**, 18, 3, pp 167.
84. Pramanik B., and Mantena R (2012) "Energy Absorption of Nano-Reinforced and Sandwich Composites in Ballistic and Low-Velocity Punch-Shear" **J. Compos. Mater.**, 2, 3, pp 87.
85. Roy N., Sengupta R., and Bhowmick A. K. (2012) "Modifications of carbon for polymer composites and nanocomposites" **Prog. Polym. Sci.**, 37, 6, pp 781.
86. Velmurugan G. R., Srinivasan M., Gupta N. K., and Kanny K. (2014) "Energy absorption and ballistic limit of nanocomposite laminates subjected to impact loading" **Int. J. Impact. Eng.**, 74, pp 57.
87. Cao M., Song W. L., Zhou W., Wang D., Rong J. L., Yuan J. and Agathopoulos S. (2010) "Dynamic compressive response and failure

behavior of fiber polymer composites embedded with tetra-needle-like ZnO nanowhiskers” **Compos. Struct.**, 92, pp 2984.

88. Farley G. L. (1991) “The effects of crushing speed on the energy–absorption capability of composite tubes” **J Compos Mater.**, 25, 10, pp 1314.
89. Farley G. L. (1987) “Energy absorption in composite materials for crashworthy structures” Sixth international conference on composite materials and second European conference on composite materials (ICCM & ECCM)., 17, 3, pp 267.
90. Mamalis A., Manolakos D., and Ioannidis M. Papapostolou D. (2005) “On the response of thin-walled CFRP composite tubular components subjected to static and dynamic axial compressive loading: experimental” **Compos. Struct.**, 69, 4, pp 407.
91. Silva F., Njuguna J., Sachse S., Pielichowski K., Leszczynska A., and Giacomelli M. (2013) “The influence of multiscale fillers reinforcement into impact resistance and energy absorption properties of polyamide 6 and polypropylene nanocomposite structures” **Mater. Des.** 50, pp 244.
92. Fu S. Y. Feng X. Q., Lauke B., and Mai Y. W. (2008) “Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate” polymer composites. **Compos Part B: Eng.**, 39, 6, pp 933.
93. Han J., and Cho K. (2006) “Nanoparticle-induced enhancement in fracture toughness of highly loaded epoxy composites over a wide temperature range” **J Mater Sci.**, 41, 13, pp 4239.
94. Njuguna J., Silva F., and Sachse S. (2011) “Nanocomposites for vehicle structural applications. In: Lin T, (editor). Nanofibers – production, properties and functional applications, InTech, pp 401.
95. Goble D. and Wolff E. (1993) “Strain-rate sensitivity index of thermoplastics” **J Mater Sci.**, 28, 22, pp 5986.
96. Mamalis A., Manolakos D., Demosthenous G. and Ioannidis M. (1994) “Axial collapse of thinwalled fibreglass composite tubular components at elevated strain rates” **Compos Eng.**, 4, 6, pp 653.

97. Rouhi M., Rais-Rohani M., and Najafi A. (2013) "Probabilistic analysis and optimization of energy absorbing components made of nanofiber enhanced composite materials" **Compos. Struct.**, 100, pp 144.
98. Esmaeili R., and Dashtbayazi M. R. (2014) "Modeling and optimization for microstructural properties of Al/SiC nanocomposite by artificial neural network and genetic algorithm" **Expert Syst. Appl.** 41, 13, pp 5817.
99. Rostamiyan Y., Fereidoon A., Hamed Mashhadzadeh A., Rezaei Ashtiyani M., and Salmankhani A. (2015) "Using response surface methodology for modeling and optimizing tensile and impact strength properties of fiber orientated quaternary hybrid nano composite" **Composites: Part B.**, 69, pp 304.
100. Liu Y. (2008) "Crashworthiness design of multi-corner thin-walled columns" **Thin-Walled Struct.** 46, 12, pp 1329.
101. Shariati M., Allahbakhsh H. R., Saemi J., and Sedighi M. (2010) "Optimization of foam filled spot-welded column for the crashworthiness design" **MECHANIKA.** 3, 83, pp 10.
102. Gning P. B., Liang S., Guillaumat L., and Pui W. J. (2011) "Influence of process and test parameters on the mechanical properties of flax/epoxy composites using response surface methodology" **J Mater Sci.**, 46, 16, pp 6801.
103. Fereidoon A., Mashhadzadeh A. H., and Rostamiyan Y. (2013) "Experimental, modeling and optimization study on the mechanical properties of epoxy/high-impact polystyrene/multi-walled carbon nanotube ternary nanocomposite using artificial neural network and genetic algorithm" **Sci Eng Compos Mater.**, 20, 3, pp 265.
104. Rostamiyan Y., Fereidoon A., Mashhadzadeh A. H., and Khalili M. A. Khalili, (2013) "Augmenting epoxy toughness by combination of both thermoplastic and nanolayered materials and using artificial intelligence techniques for modeling and optimization" **J Polym Res.**, 20, pp 135.
105. Rostamiyan Y., Fereidoon A., Ghasemi Ghalebahman A., Mashhadzadeh A. H., and Salmankhani A. (2015) "Experimental study and optimization of damping properties of epoxy-based nanocomposite: Effect of using nanosilica and high-impact polystyrene by mixture design approach" **Mater. Des.**, 65, pp 1236.

106. Huang Y., and Kinloch A. J. (1992) "Modelling of the toughening mechanisms in rubber modified epoxy polymers" **J Mater Sci.**, 27, 10, pp 2763.
107. Lange F. F. (1970) "The Interaction of a Crack Front with a Second-Phase Dispersion" **Philos. Mag.**, 22, 179, pp 983.
108. Faber K. T. and Evans A. G. (1983) "Crack Deflection Processes" **Acta Mater.**, 31, pp 565.
109. Rose L. R. F. (1987) "Effective Spring Constant for Planar Arrays of Circular Cracks" **Mater. Lett.**, 40, 1, pp 103.
110. Spanoudakis J. and Young R. J. (1984) "Propagation in a glass particle-filled epoxy resin" Part 2: Effect of particle–matrix adhesion" **J Mater Sci.**, 19, 2, pp 473.
111. Kinloch A. J, and Taylor A. C. (2002) "The Toughening of Cyanate-ester Polymers Part I – Physical Modification using Particles, Fibres and Woven-mats" **J Mater Sci.**, 37, 3, pp 433.
112. Caddell R. M. (1980) "Deformation and fracture of solids" Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.
113. Liang Y. L., and Pearson R. A. (2010) "The toughening mechanism in hybrid epoxy-silica-rubber nanocomposites (HESRNs)" **Polym J.**, 51, pp 4880.
114. Halpin J.C., (1969) Characterization of Orthotropic (Fiber-Reinforced) Polymeric solids, Doctoral Dissertation, University of Akron.
115. Gent A. N. (1980) "Detachment of an Elastic Matrix from a Rigid Spherical Inclusion" **Mater. Sci.**, 15, pp 2884.
116. Lauke B. (2008) "On the effect of particle size on fracture toughness of polymer composites" **Compos. Sci. Technol.**, 68, 15, pp 3365.
117. Argon A. S. (1972) "Fracture of Composites, Treatise of Material Science and Technology" **Compos. Mater.**, Academic Press, New York,. 1.
118. Young R. J., and Beaumont P. W. R. (1975) "Fracture Behavior of Polymers" **J. Mater. Sci.**, 10, pp 1343.
119. Sauer N. W., and Stone M. G. (1989) "Preemptive scheduling of interval orders is polynomial" Kluwer Academic Publisher, Printed in the Netherlands, 5, 4, pp 345.

120. Hall B., Pearce N., Gurley K., and Dorsch S. (1990) "Specific unresponsiveness in rats with prolonged cardiac allograft survival after treatment with cyclosporine. III. Further characterization of the CD4+ suppressor cell and its mechanism of action" **J. Exp. Med.**, 171, pp 141.

۱۲۱. منهای م ب، (۱۳۹۱) "مبانی شبکه های عصبی"، جلد اول، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

۱۲۲. راسل ا و نوریگ پ، (۱۳۹۲) "هوش مصنوعی (رهیافتی نوین)"، جلد اول، عین الله جعفرنژاد قمی، نشر علوم رایانه، تهران.

123. Box G. E. P., and Draper N. R. (1987) "**Empirical model-building and response surfaces**" New York: John Wiley & Sons.

124. Venter G., Haftka R. T., and Starnes J. H. (1996) "Construction of response surfaces for design optimization applications" AIAA paper 96-4040-CP, Proceedings of 6th AIAA/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization., Bellevue WA, Part 2, pp 548.

125. Myers R. H., and Montgomery D. C. (1995) "**Response surface methodology: process and product optimization using design of experiments**" John Wiley & Sons, New York.

126. Montgomery D. C. (2001) "**Design and Analysis of Experiments**" 5th ed., Wiley, New York, John Wiley & Sons.

127. Herrera F., and Lozano M. (1997) "Heterogeneous Distributed Genetic Algorithms Based on the Crossover Operator, Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications" Conference Publication No. 446-IEE., pp 203.

128. Orero S. O., and Irving M. R. (1996) "Economic dispatch of generators with prohibited operating zones: a genetic algorithm approach" **IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.**, 143, 6, pp 529.

129. Gaspar A., and Collard P. (1997) "**Time Dependent Optimization with a Folding Genetic Algorithm**" IEEE.

130. Bright M. S., and Arslan T. (1997) "A Genetic Algorithm for the High-Level Synthesis of DSP Systems for Low Power, Genetic Algorithms in

- Engineering Systems: Innovations and Applications" IEE Conference Publication., 446, pp 174.
131. Bodenhofer U., (2003) "**Genetic Algorithms: Theory and Applications**", 3rd edition, lecture notes, Fuzzy logic laboratorium Linz, Hagenberg.
 132. Coley D. A. (1999) "**An Introduction to Genetic Algorithm for Scientist and Engineers**", World Scientific, Singapore.
 133. Melanie M. (1999) "**An Introduction to Genetic Algorithms**", MIT Press, Fifth printing.
 134. Marra M. A., and Walcott B. L. (1996) "Stability And Optimality In Genetic Algorithm Controllers" Proceedings of the 1996 IEEE International Symposium on Intelligent Control, pp 492.
 135. Binmore K., and Joan D. (2007). "**Calculus Concepts and Methods**" Cambridge University Press, pp 190.
 136. Fang H., Rais-Rohani M., Liu Z., and Horstemeyer M. F. (2005) "A comparative study of metamodeling methods for multiobjective crashworthiness optimization" **Comput and Struct.**, 83, 25, pp 2121.
 137. Lindman H. R. (1992) "**Analysis of Variance in Experimental Design**" Springer., New York.
 138. Xu H. J., Jin F.L., Park S.J. (2009) "Synthesis of a Novel Phosphorus-containing Flame Retardant for Epoxy Resins" **Bull. Korean Chem. Soc.** 30 2643 pp 157.
 139. ASTM D638-02. (2002) Standard test method for tensile properties of plastics.
 140. ASTM D5045-99. (1999) Standard test methods for plane-strain fracture toughness and stain energy release rate of plastic materials.
 ۱۴۱. جاوید راد ف، (۱۳۸۳) "مکانیک شکست و کاربرد آن در مهندسی"، انتشارات صنایع هوافضا، تهران.
 142. ASTM D256-10. (2001) Standard test methods for determining the Izod pendulum impact resistance of plastics.

143. Andrews E. H. (1968) "**Fracture in polymers**". 1st ed. Edinburgh: Oliver & Boyd.
144. Ahmed S., and Jones F. R. (1990) "A review of particulate reinforcement theories for polymer composites" **Mater. Sci.**, 25, pp 4933.
145. Kerner E. H. (1956) "The Elastic and Thermo-elastic Properties of Composite Media" *Proc. Phys. Soc.*, 69, 8, pp 808.
146. Shin D. K., and Lee J. J. (1998) *IEE Transactions on Components, Packaging and Manufacture*; 21, pp 413.
147. Sudduth R. D. (2006) "Analysis of the Maximum Tensile Strength of a Composite with Spherical Particulates" **Compos. Mater**, 40, 4, pp 301.
148. Halpin J. C. (1969) "Characterization of Orthotropic (Fiber-Reinforced) Polymeric solids, Doctoral Dissertation" University of Akron.
149. Johnsen B. B., Kinloch A. J., Mohammed R. D., Taylor A. C., and Sprenger S. (2007) "Toughening mechanisms of nanoparticle-modified epoxy polymers" **Polym.**, 48, 2, pp 530.
150. M. VANES. (2000) "**in Proceedings of Nanocomposites**", Brussels, Belgium.
151. Kinloch A. J., Maxwell D. L., and Young R. J. (1985) "The fracture of hybrid particulate composites" **J. Mater. Sci.**, 20, 11, pp 4169-4184.
152. Pascoe K. J. (1978) "**An introduction to the properties of engineering materials**". 3rd ed. London: Van Nostrand Reinhold.
153. Pilkington J. L., Preston Ch. and Gomes R. L., (2014) Comparison of response surface methodology (RSM) and artificial neural networks (ANN) towards efficient extraction of artemisinin from *Artemisia annua*, **Ind. Crop. Prod.**, 58, 11, pp 15.
154. Desai K. M., Survase Sh. A., Saudagar P. S., Lele S.S. and Singhal R. S., (2008) 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, pp 266.

Abstract

In this thesis, a diglycidyl ether of bisphenol A epoxy (DGEBA) is reinforced by spherical silica nanoparticles of three different diameters of 17 nm, 25 nm and 65 nm up to 6 wt.%. The aim of this study was to investigate the effect of particle size, particle content and combined use of them on Young's modulus, fracture toughness, fracture energy, impact strength and energy absorption capability of thin-walled square columns and frusta. Experimental results showed that the addition of nanoparticles to epoxy resin and also increasing the particle content increased the Young's modulus, fracture toughness, fracture energy and impact resistance so that this increasing was so clear in the hybrid composite. In the hybrid series and in 6 wt% of the nanoparticles, the largest increase compared to pure epoxy was equivalent 13.3% for Young's modulus, 63.1% for fracture toughness, 138.5% for the fracture energy and 20.1% for impact strength. The results revealed that the effect of particle size on mentioned parameters was negligible. With addition of the nanoparticles, the energy absorption characteristics of thin-walled structures suffered and by increasing the particle content, the reduction was intensified. In each experiment the effectiveness mechanisms of nanoparticles has been studied by scanning electron microscopy (SEM) and it was found that the dominant mechanisms were crack path deflection, crack tip pinning and bowing, debonding and plastic void growth. Finally, the experimental results modeled by artificial neural network and response surface methodology (linear and quadratic) and "the selected model" was identified and reported. According to response surface methodology and genetic algorithms, optimal nanoparticle size and content for various parameters have been reported.

Keywords: Polymer composites, Silica nanoparticles, Particle size, Young's modulus, Fracture toughness, Fracture energy, Impact strength, Energy absorption capability, Neural network, Response surface method, Genetic algorithms.



Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering
Department of Solid Mechanics

An Experimental Study and Analysis of Mechanical Behaviour of Epoxy/Silica Nanocomposites

Ali Dadrasi

Supervisors:

Mahmoud Shariati, Ph.D.

Gholamali Farzi, Ph.D.

September 2015