

بررسی تجربی تاثیر درصد وزنی نانو ذرات بر جذب انرژی نانوکامپوزیت های استوانه ای در بارگذاری محوری شبه استاتیکی

پریا عباسی^۱، حسین تقی پور^۲، محمد دامغانی نوری^{۳*}

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: پژوهشی	
دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۱۵	
بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۱۰	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۰۱	
واژگان کلیدی:	
جذب انرژی،	امروزه با پیشرفت های صورت گرفته، محققان به دنبال راهی برای پیشگیری از خسارات جانی و مالی ناشی از برخورد اجسام هستند. در این تحقیق به بررسی جذب انرژی سازه های نانوکامپوزیتی با درصد های مختلف نانو ذرات رس و نانوسیلیکا به همراه ماده دی اتیلن تری آمین (دتا) تحت بارگذاری محوری شبه استاتیکی پرداخته شده است. ضمن اینکه از ماده زمینه پلیمری رزین اپوکسی استفاده شده است. هدف از این تحقیق بررسی تاثیرگذاری متفاوت نانو ذرات و دتا و درصد های گوناگون آنها است. بررسی آماری بر روی پارامترها، توسط نرم افزار دیزاین اکسپرت و به روش باکس بنکن انجام شده است. محدوده تغییرات نانو ذرات بین ۰ الی ۰،۴ درصد بوده است و همچنین از ماده دی اتیلن تری آمین با درصد های وزنی ۱، ۳ و ۵٪ نیز استفاده شده است. نتایج حاکی از آن است که مواد به کار برده شده در ساخت نانوکامپوزیت، بر جذب انرژی و نحوه شکست سازه تاثیر مثبتی داشته است و نمونه بهینه از لحاظ عملکرد جذب انرژی با درصد های وزنی ۰،۴٪ نانورس، ۰،۴٪ نانوسیلیکا و ۳٪ دی اتیلن تری آمین بهترین عملکرد را از خود نشان داده است.

۱-مقدمه

اجزاء تشکیل دهنده سعی در بهبود خواص آن ها به منظور جذب انرژی حداکثری شده است. پلیمرهای تقویت شده به دلیل وزن سبک، هدایت عالی، استحکام مکانیکی خوب، کاربردهایی در هوافضا، نوابری و خودرو دارند [۱]. بر اساس آنچه محققان در این زمینه اظهار نظر داشته اند، استوانه های کامپوزیتی، جذب انرژی مناسبی دارند. همچنین تاکنون تحقیقات متعددی در رابطه با این زمینه پژوهشی انجام شده است که مختصراً به برخی از این پژوهش ها می پردازیم. سیلوا و همکاران [۲] تأثیر مواد پرکننده بر قابلیت جذب انرژی پلی آمید ۶ با شکل هندسی مخروط را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که کامپوزیت های دارای نانو سیلیکا نتایج خوبی در جذب انرژی داشته است. همچنین مود شکست با نیروی پیک اولیه و نیروی متوسط ارتباط

یکی از روش های مناسب برای تعیین مقاومت اجسام در برابر شکست، روش آزمون های فشاری دینامیکی و شبه استاتیکی است. که با توجه به نتایج حاصل از این آزمایش، می توان به ویژگی های مکانیکی از جمله ویژگی شکست و پارامترهای مربوطه اشاره کرد. پدیده شکست همواره در طول زمان یک مسئله مهم بوده که انسان ها از زمان ساخت ساده ترین ابزارها با آن مواجه بوده اند. برخلاف پیشرفت های قابل توجه در این موضوع، همچنان مجهولات زیادی دارد. درک چگونگی رفتار مواد در حین آسیب گامی بسیار مهم در جهت بهبود شرایط این مسئله می باشد. هدف از این بررسی، آزمون برای درک رفتار شکست کامپوزیت پلیمری در شرایط شبه استاتیکی است. با تغییر درصد های وزنی

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mnoori@semnan.ac.ir

۱. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

۲. استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ولایت

۳. دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

مستقیمی دارد. رفیق و همکاران [۳] مقاومت ضربه‌ای نانورس در کامپوزیت اپوکسی/شیشه را بررسی کردند. بارگذاری نانو با درصدهای ۱٫۵٪ و ۳٪ وزنی انجام شد و بهبود نیروی پیک و افزایش سختی در ۱٫۵٪ مشاهده شد. دامون و همکاران [۴] خواص مکانیکی اپوکسی را زمانی که نانورس مونت موریلونیت به آن اضافه شده را بررسی کردند که نتیجه آن افزایش ۳٪ در سختی و کاهش ۳۰٪ در استحکام کششی و کاهش میزان کرنش در ۵٪ وزنی بوده است که کاهش در استحکام کششی و کرنش به پراکندگی ضعیف نانورس نسبت داده شد. وانگ و همکاران [۵] خواص اپوکسی را با افزودن نانورس در حلال بررسی کردند و با حالت اپوکسی خالص مقایسه کردند. نتایج نشان داد با افزودن نانورس توسط حلال، افزایش خطی مدول الاستیسیته و استحکام کششی نهایی رخ داده است.

در تحقیقی دیگر، زاپالورتو و همکاران [۶] خواص مکانیکی اپوکسی-نانورس (Cloisite 30B) را بررسی کردند. مدول یانگ تأثیرپذیری بسیار کمی، در حدود ۱٫۵٪ با افزودن نانو کلی به کامپوزیت نشان داد. در حالی که استحکام کششی کاهش ۶٪ داشته است. لارنزی و همکاران [۷] تأثیر حضور نانو لوله‌های کربنی بر مکانیزم شکست کامپوزیت اپوکسی را بررسی کردند که مشخص شد استحکام شکست، مدول یانگ، عملکرد ماتریس پلیمر را از طریق مکانیزم‌های مختلف افزایش می‌دهد. مهدی و همکاران [۸]، به‌طور کلی اثبات کردند که افزایش در زاویه رأس مخروط موجب شده نمودار نیرو-جابجایی غیرمسطح را به همراه داشته باشد. همچنین ثابت شد که افت ناگهانی نیرو مربوط به زاویه رأس مخروطها است. کاتیرسان و همکاران [۹] رفتار خردشدگی و جذب انرژی مخروط‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی و پوسته مخروطی آلومینیومی را مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که توانایی جذب انرژی پوسته‌های مخروطی FLM بیشتر از آلومینیوم توخالی (پوسته) بوده است.

در پژوهشی توسط شاهی و همکاران [۱۰]، نتایج نشان داد که فوم نانو کامپوزیت پلی‌پورتان تقویت‌شده با نانو ذرات سیلیکا می‌تواند به‌عنوان جاذب انرژی در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گیرد. در مطالعه‌ای دیگر میراخورلو و همکاران [۱۱]، با استفاده از افزودن الیاف طبیعی به گچ توانستند پنل‌های گچی مقاوم‌تر و مستحکم‌تری را با افزودن گاه فراوری شده تولید کنند؛ همچنین دانسیته و مقاومت

خمشی نیز افزایش یافت.

مطالعاتی توسط موسوی زاده و همکاران [۱۲]، در بررسی تجربی جذب انرژی ورق‌های فولادی انحنادار تحت بارگذاری ضربه‌ای صورت گرفت. در پژوهش مذکور، نتایج به دست آمده نشان داد که مقدار انرژی جذب‌شده توسط ورق‌های تقویت‌شده اندکی کمتر از ورق‌های ساده است. در پژوهشی دیگر توسط رضوانی و همکاران [۱۳]، بررسی‌ها نشان داد میزان جذب انرژی ویژه در لوله‌ی استوانه‌ای پرشده از فوم پلی‌اورتان با آغازگر نسبت به حالت بدون آغازگر افزایش یافت. همچنین ماکزیمم نیروی لهیدگی در نمونه‌های با آغازگر کاهش‌یافته و در محدوده نسبتاً ثابتی باقی مانده است.

با توجه به پژوهش‌های انجام‌شده تاکنون، می‌توان تأثیر مثبت مواد پرکننده بر بهبود جذب انرژی سازه‌ها و برخی خواص مکانیکی را نتیجه گرفت. در این پژوهش با استفاده از درصد‌های مختلف دو ماده پرکننده نانورس و نانوسیلیکا و افزودن ماده دی اتیلن تری آمین سعی در بهبود شکنندگی سازه‌های استوانه‌ای و افزایش چقرمگی آن شده است. این مطالعه در مقایسه با دیگر مطالعات صورت گرفته تأثیرات همزمان مواد نانو و ماده شیمیایی دی اتیلن تری آمین (دتا) بر جذب انرژی و خواص مکانیکی سازه‌های پلیمری را مورد مطالعه قرار داده است. همچنین درصد‌های وزنی بکار گرفته شده به جهت عملکرد بهتر و صرفه اقتصادی در محدوده کمی در نظر گرفته شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد اولیه

رزین اپوکسی مورد استفاده، ام-ال-۵۰۶ و سخت‌کننده اپوکسی HA بر پایه رزین اپوکسی بیسفنول‌آ و سخت‌کننده پلی‌آمینی است که از شرکت مهندسی مواد مکر تهیه شده است. در ساختار این رزین از نوعی آلیفاتیک اپوکسی استفاده گردیده که موجب افزایش خواص چقرمگی و انعطاف‌پذیری محصول می‌گردد. با توجه به پایین بودن ویسکوزیته محصول امکان به‌کارگیری آن در کنار الیاف‌های تقویت‌کننده (شیشه و کربن ..) و پودرهای معدنی (سیلیس و...) وجود دارد. خصوصیات خوب مکانیکی، قابلیت کپی‌برداری، قابلیت ماشینکاری، این امکان را فراهم ساخته تا در جهت مدل‌سازی و کپی‌برداری از قطعات صنعتی استفاده نمود.

اپوکسی مورد استفاده در این پژوهش، دارای دانسیته ۱٫۱۱

مکانیکی به مدت ۱۰ دقیقه مخلوط شده تا به محلولی همگن تبدیل شود.

۳- ساخت سازه‌های نانوکامپوزیتی استوانه‌ای

پس از آنکه مواد ساخت نمونه‌ها با ماده زمینه پلیمر فراهم شد، تعداد ۱۳ نمونه استوانه‌ای با قطر خارجی ۳۹,۵ ساخته شد. در شکل (۱) تعدادی از نمونه‌ها نشان داده شده است.



شکل ۱- نمونه‌های نانوکامپوزیت استوانه‌ای

از هر نمونه تعداد سه عدد تهیه شد. نمونه‌ها با درصد‌های متفاوت ساخته شدند که در نماد آن‌ها، نمونه‌های استوانه‌ای با حروف CY که حروف ابتدای حرف لاتین استوانه است، مشخص شده‌اند و پس از آن حروف ابتدایی ماده سیلیکا (S)، رس (C)، و دی اتیلن تری آمین (D) و درصد‌های آن‌ها به ترتیب آورده شده است. همچنین، برای نتیجه بهتر و خارج کردن آسان‌تر نمونه‌ها از قالب از اسپری روان کننده در سطح قالب استفاده شده است. برای هواگیری ترکیب همگن به دست آمده، که شامل رزین اپوکسی، هاردنر، نانوذرات و دی اتیلن تری آمین است، از پمپ خلاء استفاده شد؛ تا از میزان حباب‌های ایجاد شده حین فرآیند کاسته شده و پس از آن در مراحل بعدی ترکیب درون قالب سیلیکونی ریخته و به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق قرار گرفتند تا پخته شوند. شایان ذکر است که آزمون انجام شده بر روی نمونه‌های با زمینه اپوکسی و تقویت شده توسط نانوسیلیکا و نانو رس و ماده دتا برای بررسی حالت بهینه پارامتر جذب انرژی آن‌ها بررسی شده است که این طراحی توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت به روش طراحی بانکس بنکن طراحی شده است.

۴- آزمون فشار شبه‌استاتیکی

به منظور بررسی خواص جذب انرژی سازه‌های ساخته شده و تأثیر درصد وزنی ذرات نانو، نمونه‌ها با استفاده از دستگاه سنتام مدل اس تی ام-۴۰۰ با سرعت ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه تحت آزمون فشار قرار گرفتند. لازم به ذکر است که در این دستگاه فک پایین ثابت و فک بالا متحرک بوده و قابلیت جابجایی با سرعت‌های بین ۰,۰۰۱-۲۵۰ میلی‌متر

گرم بر سانتی‌متر مکعب است که با نسبت ۱۰۰ واحد رزین به ۱۵ واحد سخت‌کننده ترکیب می‌شوند و مدول فشاری 9371 Kg/cm^2 طبق استاندارد ASTM D695M و دارای مقاومت ضربه $27,85 \text{ KJ/m}$ طبق استاندارد ASTM 256 است. نمونه‌های ساخته شده کامپوزیتی به منظور بررسی با استاندارد ASTM E09M تحت آزمون فشار قرار گرفتند تا بر اساس داده‌ها پارامترهای مربوط به خواص مکانیکی استخراج شود همچنین خواص مکانیکی ماده پلیمری توسط کارخانه سازنده در جدول ۱ آورده شده است. همچنین در ساخت نمونه‌ها از ذرات نانوسیلیکا ساخت شرکت الکم نروژ و نانورس ساخت شرکت راک وود آمریکا و ماده دی اتیلن تری آمین شرکت مرک آلمان استفاده شده است. در این پژوهش تعداد ۱۳ نمونه استوانه‌ای مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. نمونه‌ها از روش قالب‌گیری درست شده‌اند و طول آن‌ها ۷۵ میلی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر است.

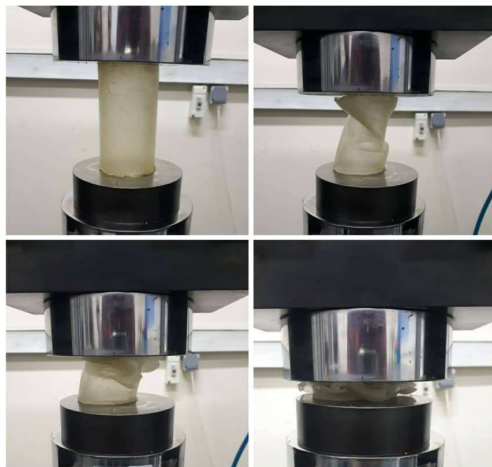
جدول ۱- خواص مکانیکی پلیمر

مقادیر	خصوصیات مکانیکی
974 Kg/cm^2	مقاومت فشاری
9371 Kg/cm^2	مدول فشاری
2960 Kg/cm	مقاومت خمشی
236454 Kg/cm	مدول خمشی
۸۲ shoreD	سختی
2548 Kg/cm	مقاومت چسبندگی
$27,85 \text{ KJ/m}$	مقاومت ضربه‌ای

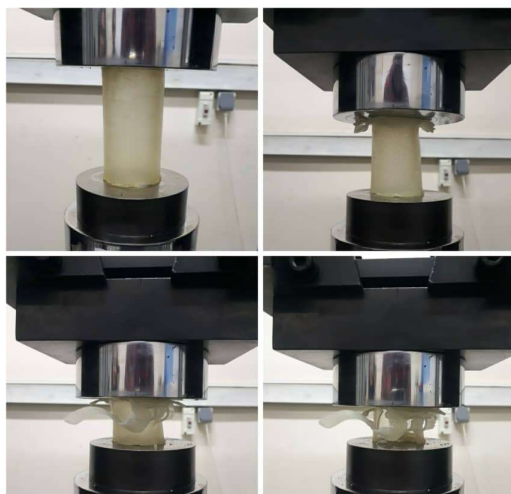
۲-۲- آماده‌سازی مواد برای ساخت سازه‌های

نانوکامپوزیت

برای ساخت نمونه‌های مورد نظر ابتدا می‌بایست قالب‌های مخصوصی جهت ساخت سازه‌ها تهیه کرد، که بدین منظور از چسب سیلیکونی سفید رنگ استفاده شده که با سخت‌کننده مخصوص خود استفاده شده است. همچنین برای ساخت قالب سیلیکونی از نمونه فلزی با مشخصات نمونه‌های آزمایش استفاده شده است. پس از ساخت قالب‌های سیلیکونی، مواد نانو با درصد‌های ۰,۲ و ۰,۴ درصد وزنی و ماده دتا (دی اتیلن تری آمین) توسط ترازوی دیجیتال با دقت یک‌هزارم اندازه‌گیری و سپس با رزین اپوکسی ترکیب کرده و سپس توسط دستگاه همگن‌ساز آلتراسونیک به مدت ۱۵ دقیقه همگن‌سازی شده است. پس از آن ماده سخت‌کننده را اضافه کرده و توسط همزن



شکل ۴- مراحل فروریزش نمونه CYSCD0.2,0.4,5



شکل ۵- مراحل فروریزش نمونه CYSCD0.2,0.2,3

۶- نتایج آزمایش و بحث

از قبل گفته شد که برخی پارامترها شامل پیک اولیه، نیروی میانگین، ظرفیت جذب انرژی و بازده نیروی فروریزش در سنجش خواص جاذب استفاده می‌شوند که در مطالعه جاذب‌های انرژی، از اهمیت بالایی برخوردارند. جدول ۲ نتایج محاسبه شده از آزمایش تجربی نمونه‌ها را جهت به دست آوردن این پارامترها به منظور بررسی خواص جاذب-های انرژی، نشان می‌دهد. در ادامه جدول ۲ نتایج نشان می‌دهد که افزودن ماده نانو به سازه‌های استوانه‌ای نسبت به حالتی که مواد نانو بکار نبرده‌ایم، توانسته افزایش ۲۲۳٪ در جذب انرژی مخصوص را موجب شود.

همچنین نمودارهای شکل (۶) و (۷) مقدار نیرو-جابجایی و انرژی به دست آمده نمونه‌ها با ۵٪ وزنی دی اتیلن تری آمین را نشان می‌دهند.

بر دقیقه را دارد. این آزمون و چگونگی فروریزش نمونه‌ها، مطابق شکل‌های (۲)، (۳)، (۴)، (۵) مشاهده می‌شوند.

۵- پارامترهای مهم در جذب انرژی

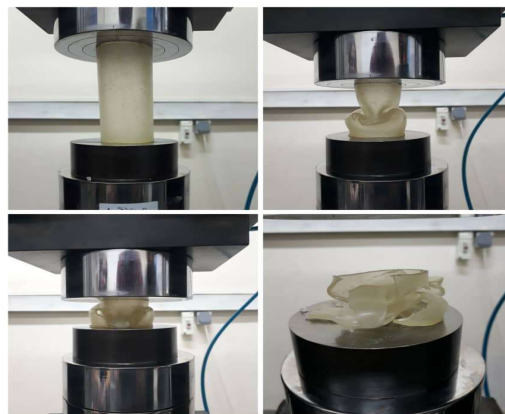
نیروی پیک اولیه، نیروی میانگین، ظرفیت جذب انرژی، بازده نیروی فرو ریزش و انرژی جذب شده بر واحد وزن، پارامترهایی هستند که برای سنجش خواص جاذب استفاده می‌شوند و در معادلات ۱ تا ۴ نشان داده شده‌اند. این پارامترها، در سیستم طراحی بسیار مهم‌اند. مقدار انرژی جذب شده، در واقع همان سطح زیر منحنی نیرو- جابه‌جایی است.

$$E_a = \int_0^{\delta_{max}} F(\delta) d\delta \quad (1)$$

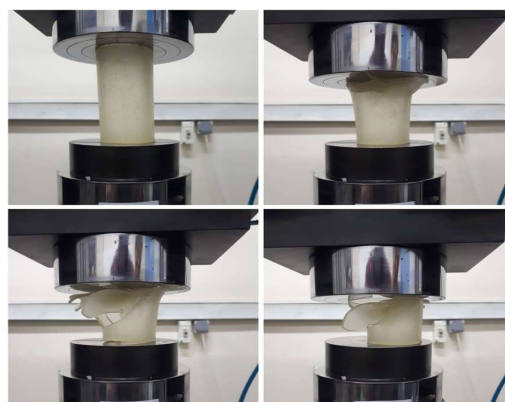
$$P_{mean} = \frac{1}{\delta_{max}} \int_0^{\delta_{max}} F(\delta) d\delta \quad (2)$$

$$\eta = \frac{P_{mean}}{P_{peak}} \quad (3)$$

$$SEA = \frac{E_a}{W_m} \quad (4)$$



شکل ۲- مراحل فروریزش نمونه CYSCD0,0,3

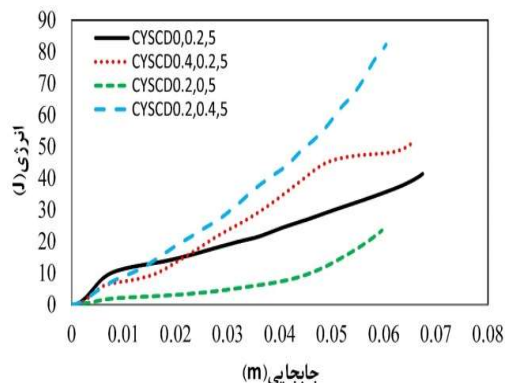


شکل ۳- مراحل فروریزش نمونه CYSCD0.2,0,1

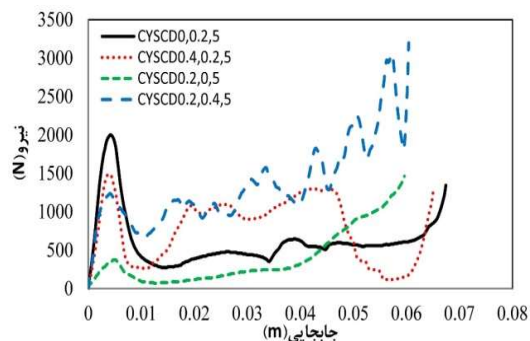
جدول ۲- نتایج محاسبه‌شده از آزمایش نمونه‌های استوانه‌ای

نمونه	W_m (gr)	SEA (J/gr)	η	$E_{a-total}$ (J)	P_{mean} (N)	P_{Peak} (N)
CYSCD0,0,2,5	18	2.29	0.306	41.34	613.32	2001
CYSCD0.4,0,2,5	18.2	2.78	0.522	50.69	778.47	1491
CYSCD0.2,0,5	18.1	1.2	1.05	23.46	395.13	373
CYSCD0.2,0,4,5	18.2	4.51	1.10	82.25	1362.09	1236
CYSCD0,0,3	18.1	1.47	0.31	20.68	1369.5	4316
CYSCD0.4,0,3	18	2.15	0.27	38.75	565.58	2031
CYSCD0,0,4,3	18.2	3.39	0.50	61.86	926.07	1844
CYSCD0.4,0,4,3	18	4.75	0.57	85.59	1381.72	2423
CYSCD0.2,0,2,3	18.3	3.73	0.18	68.41	1509.48	8113
CYSCD0,0,2,1	18	2.005	0.43	36.09	546.85	1942
CYSCD0.4,0,2,1	18	3.02	0.50	54.41	950.109	1874
CYSCD0.2,0,1	18	1.87	0.22	33.75	542.56	2384
CYSCD0.2,0,4,1	18.3	3.07	0.81	56.28	1260.70	1540

جذب نماید که مؤید مطالب گفته شده و برتری نانو رس در این آزمایش است. در ادامه نمودار انرژی جذب شده این سازه‌ها (دتا ۵٪) در نمودار شکل (۷) نشان داده شده است. در نمودار شکل (۸) میزان نیرو-جابجایی سازه‌های استوانه‌ای با دتا ۳٪ وزنی آورده شده است که با توجه به اعداد بدست آمده در جدول و مشاهده نمودار مربوطه، نمونه CYSCD0.4,0,4,3 دارای بیشترین سطح زیر نمودار و همچنین پیک اولیه و نیروی متوسط بالایی است. در دو نمونه با درصد‌های وزنی یکسان نانوسیلیکا و نانورس، گرچه نمونه CYSCD0.2,0,2,3 در ابتدا پیک اولیه زیادی داشته اما پس از آن با افت روبرو شده و در نتیجه نمونه CYSCD0.4,0,4,3 با نوسان بیشتر و کرنش بیشتر توانسته جذب انرژی را افزایش دهد. همچنین در ادامه نمودار شکل (۹) انرژی سازه‌ها با یکدیگر مقایسه شده است.

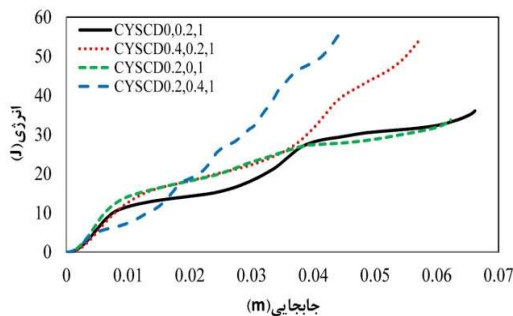


شکل ۷- انرژی حاصل از بارگذاری در نمونه‌های استوانه‌ای با درصد وزنی دتا ۵٪

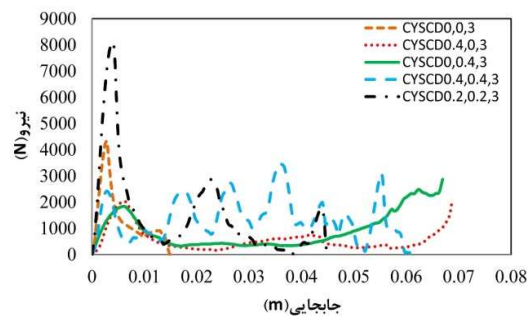


شکل ۸- نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های استوانه‌ای با دتا ۵٪

همانطور که از نمودار شکل (۶) مشخص می‌شود دو نمونه CYSCD0.2,0,4,5 و CYSCD0.4,0,2,5 در مقایسه با یکدیگر به وضوح مشخص است که سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی CYSCD0.2,0,4,5 بیشتر از نمونه دیگر است که موجب افزایش میزان جذب انرژی می‌شود و از اعداد به دست آمده در جدول گزارش شده نیز این بیان قابل تأیید است. یعنی در این مطالعه زمانی که درصد بکار رفته ماده نانورس دو برابر ماده نانوسیلیکا بوده، ماحصل آن افزایش سطح زیر نمودار و تعداد پیک‌های متعدد بوده که موجب شده میزان انرژی جذب شده در سازه بیشتر شود. بنابراین زمانیکه هر دو ماده نانو در سازه حضور داشتند، نانورس تاثیر بیشتری در افزایش جذب انرژی داشته است. همچنین در مقایسه دو نمونه CYSCD0.2,0,5 و CYSCD0,0,2,5 که در هر کدام تنها یک ماده نانو حضور داشته است، میزان سطح زیر نمودار نمونه با حضور نانورس بیشتر بوده و این سازه توانسته انرژی بیشتری را



شکل ۱۱- نمودار انرژی حاصل از بارگذاری در نمونه های استوانه ای با درصد وزنی دتا ۱٪



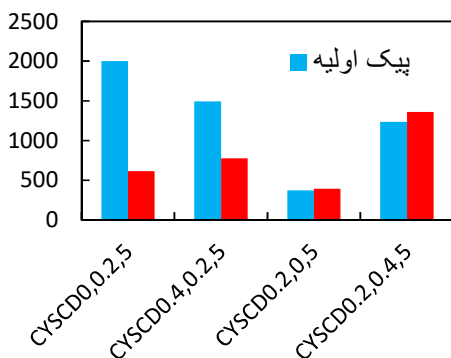
شکل ۸- نمودار نیرو-جابجایی حاصل از بارگذاری در نمونه های استوانه ای با درصد دتا ۳٪

۶-۲- مقایسه نیروی متوسط و پیک اولیه نمونه ها

در نمونه های آزمایش شده هرچه مقادیر نیروی متوسط و پیک اولیه بیشتر به دست آمده باشد، نتیجتاً سطح زیر نمودار افزایش و جذب انرژی بیشتری اتفاق افتاده است. همان طور که از نمودار نیرو-جابجایی استنباط می شود نمونه CYSCD0,2,0,4,5 با قله های متوالی و فواصل کم و به عبارتی نزدیک شدن پیک اولیه و نیروی متوسط توانسته جذب انرژی بیشتری از خود نشان بدهد. در نمونه های آزمایش شده با ۵٪ دی اتیلن تری آمین مقادیر نیروی متوسط و پیک اولیه در شکل (۱۲) آورده شده است.

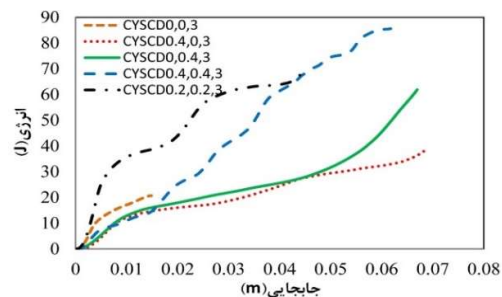
۶-۳- عملکرد سازه ها در حضور نانو مواد

نتایج بدست آمده از آزمایش فشار شبه استاتیکی که بر روی نمونه های استوانه ای شکل انجام شده است حاکی از آن است که نمونه با درصد وزنی CYSCD0,4,0,4,3 نسبت به بقیه نمونه ها جذب انرژی مخصوص بیشتری دارد و با توجه به مقایسه نتایج، افزودن مواد نانو به نمونه ها نیز موجب بهبود عملکرد سازه در جذب انرژی شده است. این نشان می دهد در این محدوده (۰-۴۰٪) افزودن مواد نانو موجب بهبود عملکرد جاذب شده است.

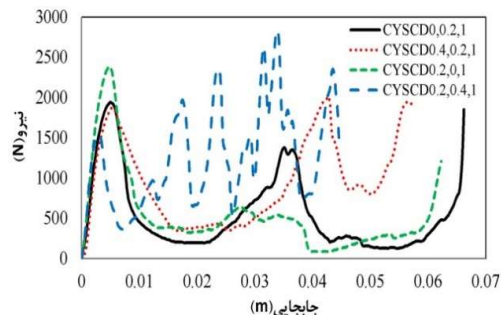


شکل ۱۲- مقایسه نتایج بدست آمده از نیروی پیک اولیه و متوسط نمونه ها با ۵٪ دتا

در ادامه آزمایش های انجام شده نمونه های با یک درصد وزنی ماده دتا هستند که مشابه نمونه های قبل نمودار نیرو-جابجایی و انرژی آن ها به دست آورده شده است. در نمودار شکل (۱۰)، نمونه CYSCD0,0,2,1 با ۰,۲ درصد نانورس در مقایسه با نمونه دارای ۰,۲ درصد نانوسیلیکا یعنی CYSCD0,2,0,1، دارای سطح زیر نمودار و جذب انرژی بالاتری نسبت به نمونه دیگر است. همچنین در نمونه CYSCD0,2,0,4,1 که در آن میزان نانورس دو برابر نانو سیلیکا بوده نمودار دارای پیک های بیشتری است و در نتیجه انرژی بیشتری را جذب کرده است. انرژی به دست آمده برای نمونه ها با درصد وزنی ۱٪ دتا در نمودار شکل (۱۱) آورده شده است.

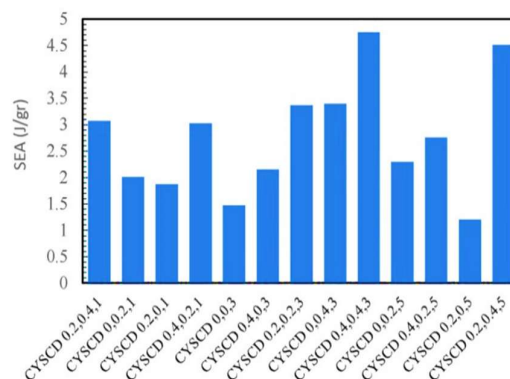


شکل ۹- نمودار انرژی حاصل از بارگذاری در نمونه های استوانه ای با درصد دتا ۳٪



شکل ۱۰- نمودار نیرو-جابجایی حاصل از بارگذاری در نمونه های استوانه ای با درصد دتا ۱٪

در ادامه در شکل (۱۳) میزان جذب انرژی مخصوص نمونه‌های استوانه‌ای آورده شده است.



شکل ۱۳- جذب انرژی مخصوص نمونه‌های استوانه‌ای نانوکامپوزیت

می‌توان گفت که دلیل افزایش انرژی جذب‌شده در این محدوده مواد به افزایش مقاومت به ضربه مربوط می‌شود، که با افزودن مواد نانو موجب می‌شود مکانیزم بسته شدن و قوس ترک اتفاق بیفتد. این مکانیزم در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با ذرات به ابعاد نانومتر و ذرات با ابعاد میکرومتر [۱۴، ۱۵] مشاهده شده است، به شکلی است که از طریق ذرات، مانع رشد ترک می‌شود [۱۶]. در کامپوزیت‌های تقویت‌شده، زمانیکه ترک ایجاد می‌شود و این ترک به ماده تقویت‌کننده برخورد می‌کند به‌جای تغییر مسیر، بین ذرات خم می‌شود و کمانش می‌کند. در این مکانیزم پیشانی ترک پس از برخورد به ذره دچار انقطاع می‌شود و سپس با عبور از آن به هم می‌رسند. بنابراین مسیری بیشتر می‌پیماید، چون انرژی ترک با طول ترک در تناسب است، بنابراین برای رشد نیازمند انرژی بیشتری است. پس سازه در برابر ضربه مقاوم‌تر می‌شود. تفاوت در جذب انرژی سازه‌ها را می‌توان به مکانیزم رشد ترک مرتبط دانست. به‌طور کلی شروع و تداوم رشد ترک بستگی به عوامل مختلفی همچون هندسه سازه، هندسه ترک، شرایط محیطی، میزان بار اعمال‌شده دارد. با شروع رشد ترک و انتقال انرژی به نوک ترک در صورتیکه این انرژی بیشتر و یا برابر با مقدار چقرمگی شکست ماده باشد، ترک رشد کرده و موجب تخریب سازه می‌شوند. مکانیزم رشد و گسترش ترک‌های ایجادشده در سازه‌ها به مود شکست پیش‌آمده نیز بستگی دارد. بطور کلی سه حالت شکست مطرح می‌شوند. (الف) اولین حالت شکست یا حالت بازشونده، که در آن تنش کششی عمود بر صفحه ترک اعمال می‌شود. (ب) دومین

حالت شکست، حالت لغزشی است که در آن تنش برشی به‌موازات صفحه ترک و عمود بر پیشانی ترک اعمال می‌شود. (ج) سومین حالت شکست، حالت گسیختگی است که در آن تنش برشی به‌موازات صفحه ترک و موازی با پیشانی ترک اعمال می‌شود که حالت‌های شکست در نمونه‌ها با مشاهده تصاویر شکست نمونه و عکس میکروسکوپی سطح شکست قابل تشخیص است [۱۷]. حالت یا مود فروپاشی پیش‌رونده با ایجاد ترک‌های ریز و لایه‌لایه شدن در بیشتر نمونه‌ها قابل مشاهده است. در این مود، چین‌خوردگی پیش‌رونده و پایدار در نمونه‌ها اتفاق می‌افتد و شکست نرم در سازه مشاهده می‌شود. شکل ۱۴ قسمت الف نشان می‌دهد که انرژی از طریق ایجاد لایه لایه شدن و شکسته شدن پیوندهای موجود هدر رفته و ترک‌های ریز و محلی در ناحیه در حال فروپاشی اتفاق می‌افتد و تکه‌های کوچکی از سازه در هر مرحله از آن جدا می‌شود. همچنین در اثر رخداد لولای پلاستیک نمونه دچار چین‌خوردگی شده و معمولاً نمودار نیرو-جابجایی دارای قله‌ها و دره‌های بیشتری خواهد بود. همچنین سرعت رشد ترک آهسته‌تر و تغییر شکل زیادی صورت گرفت و سطح شکست به شکل زبر و ناهموار مشاهده شد. همچنین جذب انرژی در این نمونه نسبت به نمونه اپوکسی خالص افزایش یافته است [۱۸]. مود دیگری از شکست که ترد و شکننده و در نتیجه خطرناک‌تر است در شکل (۱۴-ب) دیده می‌شود. به سبب آن تکه‌های بزرگ در فروپاشی مشاهده شده است. این حالت، شکستی ناپایدار است که حین بارگذاری به شکل ناگهانی در مراحل اولیه، ترک شکل می‌گیرد و تکه‌های بزرگی از سازه جدا شده و به شکل قابل توجهی استحکام و جذب انرژی در سازه کاهش می‌یابد. همچنین سرعت رشد ترک زیاد به همراه تغییر شکل محدود و سطح شکست هموار مشاهده شد. نمونه‌های شکل (۱۴) بیانگر این مودهای ذکر شده است که در شکل (۱۴) آورده شده است.

در شکل (۱۵) تصویر میکروسکوپی SEM که از سطح شکست نمونه کامپوزیتی CYSCD0,0,3 پس از آزمایش گرفته شده است، نشان می‌دهد که شکستگی در لایه‌های کامپوزیت با لبه‌های تیز و شکننده همراه بوده است و شکست ترد در حالت ناپایدار اتفاق افتاده است. سطح شکست به‌صورت صاف و بدون زبری مشاهده شد و تغییر شکل چندانی در سطح دیده نشد. همچنین چند صفحه

جاذبه متقابل در ذرات نانو رس، تجمع آن‌ها را به درون مجموعه ماتریس اپوکسی می‌کشاند، حتی پس از اینکه ماده نانو با ماتریس همگن شده باشد [۱۹]. شکل (۱۷) تصویر SEM نمونه CYSCD0,4,0,2,5 نشان می‌دهد در نمونه با حضور ۰,۴٪ نانوسیلیکا، ۰,۲٪ نانورس، ۰,۵٪ دتا، چین‌خوردگی پلیمر و تغییر شکل در سطح نمونه ایجاد شده است و به دلیل کاهش نیروی واندروالسی بین ذره‌ای، آگلومره شدن مواد (کلوخه‌ای شدن) دیده نمی‌شود و پراکندگی مناسب مواد نانو و همچنین لغزش لایه‌های کامپوزیت بر روی یکدیگر و ایجاد سطح ناصاف بدون تشکیل حفره مشهود است.

شدن سطح ترک که راهی برای جذب انرژی سازه می‌باشد و ایجاد حالت لغزشی صفحات در جابجایی آن‌ها، مشاهده شد. در شکل (۱۶) تصویر SEM از نمونه CYSCD0,0,2,5 نشان می‌دهد که نمونه با درصد وزنی ۰,۲٪ نانوسیلیکا، ۰,۲٪ نانورس و ۰,۵٪ دتا، چین‌خوردگی‌های کوچکی در سطح به وجود آمده است و تغییر شکل ایجاد شده است که موجب پایدار شدن شکست در سازه شده است و موجب فروپاشی در حالت بهتری می‌گردد. در قسمت‌هایی تجمع نانورس ایجاد شده که انتشار ترک به وسیله آن مسدود می‌شود و سطح نمونه زبر و ناصاف مشاهده شده است. همچنین نیروهای واندروالسی با ایجاد

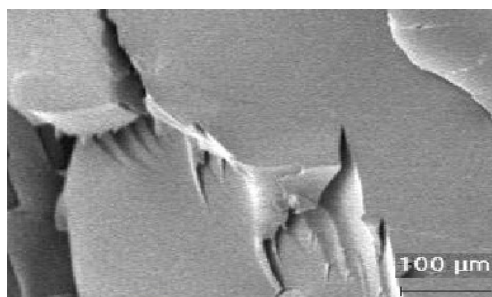


(الف)

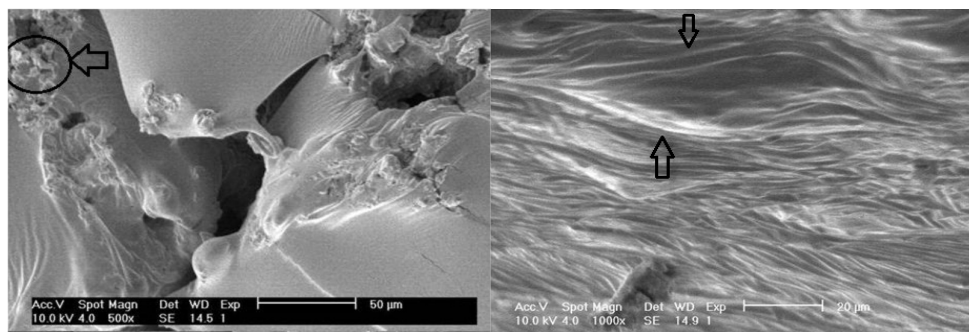


(ب)

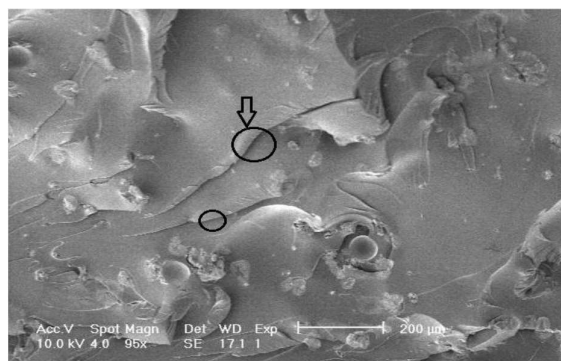
شکل ۱۴- الف) فروپاشی نمونه همراه با لایه‌لایه شدن و ایجاد لولای پلاستیک ب) شکست ترد نمونه و ایجاد لبه‌های تیز بر اثر گسترش ترک‌های محوری



شکل ۱۵- تصویر SEM از سطح شکست نمونه CYSCD0,0,3 پس از آزمایش



شکل ۱۶- تصاویر SEM نمونه CYSCD0,0,2,5



شکل ۱۷- تصویر SEM نمونه CYSCD0.4,0.2,5

۴-۶- آنالیز واریانس (ANOVA)

مقدار P-value بدست آمده کمتر از ۰/۰۵ باشد تا بتوان گفت که آن پارامتر بر روی جذب انرژی و استحکام نهایی پلیمر تأثیرگذار است. در جدول ۱ مؤلفه‌هایی از مدل مرتبه دوم، که شرط معنادار بودن را ارضا نکرده‌اند (P -value کوچک‌تر از ۰/۰۵)، از معادله نهایی جذب انرژی و نیروی بیشینه حذف شده‌اند. علاوه بر این، مقادیر دو مؤلفه دیگر یعنی ضریب تبیین (R^2) و ضریب تبیین اصلاح شده ($adj-R^2$) در جدول ۳ و ۴ به ترتیب برای نیروی بیشینه و جذب انرژی ویژه آورده شده است.

در این مطالعه از آنالیز واریانس به منظور پی بردن به تأثیر درصد نانو ذرات سیلیکا و رس و مقادیر دتا بکار رفته در رزین بر میزان استحکام و جذب انرژی ویژه استفاده شده است. در اینجا آنالیز واریانس به صورت جداگانه برای تمامی پاسخ‌ها به کار گرفته شده است. به این صورت که جمع انحراف مربعات از میانگین کل پاسخ‌های در نظر گرفته شده اندازه‌گیری شود تا بتوان سهم هر یک از پارامترهای هندسی و خطای آن‌ها مشخص بشود. برای پارامترهای مدل در جدول ۱، باید

جدول ۳- آنالیز واریانس (ANOVA) نیروی بیشینه

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	1.018E+12	7	1.454E+11	120.05	< 0.0001	significant
A-silica	4.433E+09	1	4.433E+09	3.66	0.0973	
B-clay	4.819E+09	1	4.819E+09	3.98	0.0863	
C-deta	2.657E+09	1	2.657E+09	2.19	0.1821	
AB	1.347E+10	1	1.347E+10	11.12	0.0125	
A ²	2.955E+11	1	2.955E+11	243.93	< 0.0001	
B ²	3.423E+11	1	3.423E+11	282.55	< 0.0001	
C ²	5.039E+11	1	5.039E+11	415.92	< 0.0001	
Residual	8.480E+09	7	1.211E+09			
Lack of Fit	8.480E+09	5	1.696E+09			
Pure Error	0.0000	2	0.0000			
Cor Total	1.027E+12	14				
			Std. Dev.	34805.64	R²	0.9917
			Mean	2.205E+05	Adjusted R²	0.9835
			C.V. %	15.79	Predicted R²	0.9392
					Adeq Precision	28.1941

جدول ۴- آنالیز واریانس (ANOVA) جذب انرژی

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	1.47	8	0.1834	231.16	< 0.0001	significant
A-silica	0.1426	1	0.1426	179.75	< 0.0001	
B-clay	0.9486	1	0.9486	1195.95	< 0.0001	
C-deta	0.0020	1	0.0020	2.51	0.1639	
AC	0.0070	1	0.0070	8.87	0.0247	
BC	0.1035	1	0.1035	130.54	< 0.0001	
A ²	0.0612	1	0.0612	77.20	0.0001	
B ²	0.0602	1	0.0602	75.91	0.0001	
C ²	0.1770	1	0.1770	223.13	< 0.0001	
Residual	0.0048	6	0.0008			
Lack of Fit	0.0048	4	0.0012			
Pure Error	0.0000	2	0.0000			
Cor Total	1.47	14				
			Std. Dev.	0.0282	R²	0.9968
			Mean	1.68	Adjusted R²	0.9925
			C.V. %	1.68	Predicted R²	0.9722
					Adeq Precision	48.4730

۶-۵- تحلیل واریانس پاسخ نیروی بیشینه

برای پاسخ نیروی بیشینه، نتایج مدلی مرتبه دوم با برهمکنش دوتایی بین دو پارامتر درصد نانو ذرات سیلیکا و نانو رس را نشان می‌دهد. علاوه بر این به منظور بالا بردن دقت پیش‌بینی مدل خروجی آن را به وسیله تابع انتقال به توان ۱,۵ رسانده، که این امر باعث شده تا مقادیر R^2 و R_{adj}^2 به یکدیگر نزدیک بشوند چراکه نزدیک بودن این مقادیر به هم و نیز نزدیک بودن مقدار آن‌ها به عدد ۱، مبین تعیین رفتاری مطلوب از مدل می‌باشد. همچنین می‌بایست خاطر نشان کرد که مقدار بالای R^2 ، نشان از تأثیر مستقل هر پارامتر در مدل بوده که تغییرات موجود در پاسخ‌ها را تعیین می‌نماید و مقدار R_{adj}^2 ، نشان از تأثیر واقعی پارامترهای مدل بر پاسخ‌ها است که بالا بودن آن و نزدیک بودن به مقدار R^2 ، نشان‌دهنده پیش‌بینی خوب مدل خروجی است. مقادیر مربوط به R^2 و R_{adj}^2 به ترتیب ۰,۹۹۱۷ و ۰,۹۸۳۵ بدست آمده که نشان از قابلیت مدل خروجی برای پیش‌بینی رفتار پاسخ بوده است.

معادله بدست آمده برای پاسخ نیروی بیشینه در رابطه

زیر آورده شده است.

$(Peak\ force)^{1.5}$

$$\begin{aligned}
 &= -5.54342 \times 10^5 \\
 &+ 2.42117 \times 10^6 \times \text{silica} \\
 &+ 2.63190 \times 10^6 \times \text{clay} \\
 &+ 5.45001 \times 10^5 \times \text{deta} \\
 &+ 1.45062 \times 10^6 \times \text{silica} \\
 &\times \text{clay} - 7.07250 \times 10^6 \\
 &\times \text{silica}^2 - 7.61184 \times 10^6 \\
 &\times \text{clay}^2 - 92352.23752 \\
 &\times \text{deta}^2
 \end{aligned}$$

۶-۶- تحلیل واریانس پاسخ جذب انرژی

نتایج بدست آمده از تحلیل رگرسیونی برای پاسخ نیروی جذب‌شده، مدلی مرتبه دوم با برهمکنش دو به دو بین پارامترهای مورد استفاده را حاصل شده است. مقادیر مربوط به R^2 و R_{adj}^2 به ترتیب ۰,۹۹۶۸ و ۰,۹۹۲۵ بدست آمده که نشان از قابلیت مدل خروجی برای پیش‌بینی رفتار پاسخ بوده است. در اینجا با توجه به شرط P-value کمتر از ۰/۰۵ برای معنادار بودن پارامترهای درصد نانو ذرات و مقدار دتا در معادله ۲، ترم مرتبه دوم برای پارامتر درصد نانو ذرات سیلیکا و رس و همچنین

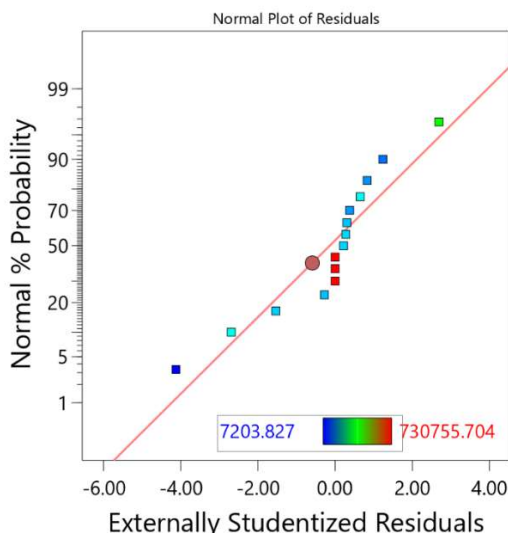
مقادیر باقی‌مانده در شکل (۱۸) آورده شده است. پراکندگی نقاط آزمایش در اطراف خط مورب، پیروی نتایج طراحی آزمایش صورت گرفته از مدل توزیع نرمال را نشان می‌دهد. نمودار مقادیر باقی‌مانده در برابر نقاط برازش یافته نیز در شکل (۱۹) مشخص شده است. پراکندگی نقاط طراحی و عدم وجود یک ساختار منظم در نقاط این نمودار نشان‌دهنده ثابت بودن واریانس است. این دو شکل صحت فرض‌های تحلیل واریانس را تأیید می‌نمایند. نمودارهای توزیع مقادیر واقعی حاصل از آزمون تجربی به مقادیر پیش‌بینی شده که به وسیله‌ی مدل نهایی بدست آمده برای پاسخ‌های جذب انرژی ویژه و نیروی بیشینه حاصل شده در نمودارهای شکل (۲۰) نشان داده شده است. همان‌طور که از این نمودارها مشاهده می‌شود توزیع مقادیر در نزدیکی خط مورب حاکی از توانایی مدل‌های به‌دست‌آمده برای پیش‌بینی رفتار جذب انرژی و نیروی بیشینه در نمونه‌ها تحت نیروی فشاری شبه استاتیکی است.

مقدار دتا دیده می‌شود. همچنین برهمکنش دوتایی بین درصد نانو ذره سیلیکا و مقدار دتا، "silica × deta"، و درصد نانو ذره رس و مقدار دتا، "clay × deta"، وجود دارد. همچنین در اینجا به منظور بالا بردن دقت مدل خروجی، پاسخ به توان ۰.۵ رسیده است. رابطه نهایی به صورت رابطه زیر حاصل شده است.

$$\begin{aligned} & \text{(Energy absorption)}^{0.5} \\ & = +0.859118 + 2.26990 \\ & \times \text{silica} + 1.79204 \times \text{clay} \\ & + 0.276828 \times \text{deta} \\ & - 0.104860 \times \text{silica} \times \text{deta} \\ & + 0.402231 \times \text{clay} \times \text{deta} \\ & - 3.21955 \times \text{silica}^2 \\ & - 3.19242 \times \text{clay}^2 \\ & - 0.054735 \times \text{deta}^2 \end{aligned}$$

۶-۷- صحت سنجی مدل‌های خروجی پاسخ‌ها

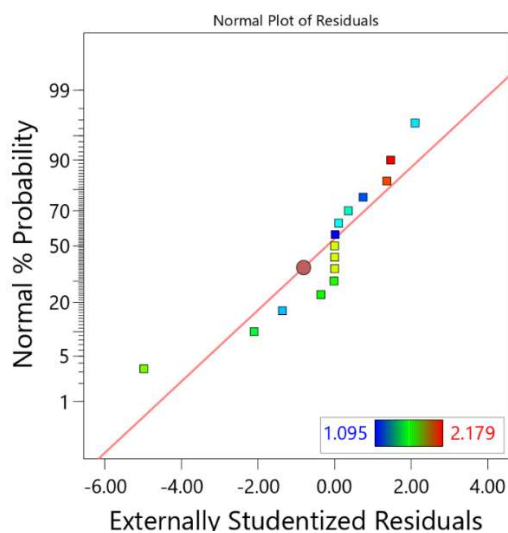
نتیجه‌گیری قطعی از نتایج ارائه‌شده در بخش نتایج آماری مستلزم تأیید اثرات نشان داده‌شده پارامترها با استفاده از تحلیل واریانس است. نمودار احتمال نرمال



(ب)

شکل ۱۸- نمودارهای احتمال نرمال مقادیر باقی‌مانده؛ (الف) پاسخ جذب انرژی ویژه، (ب) پاسخ نیروی بیشینه

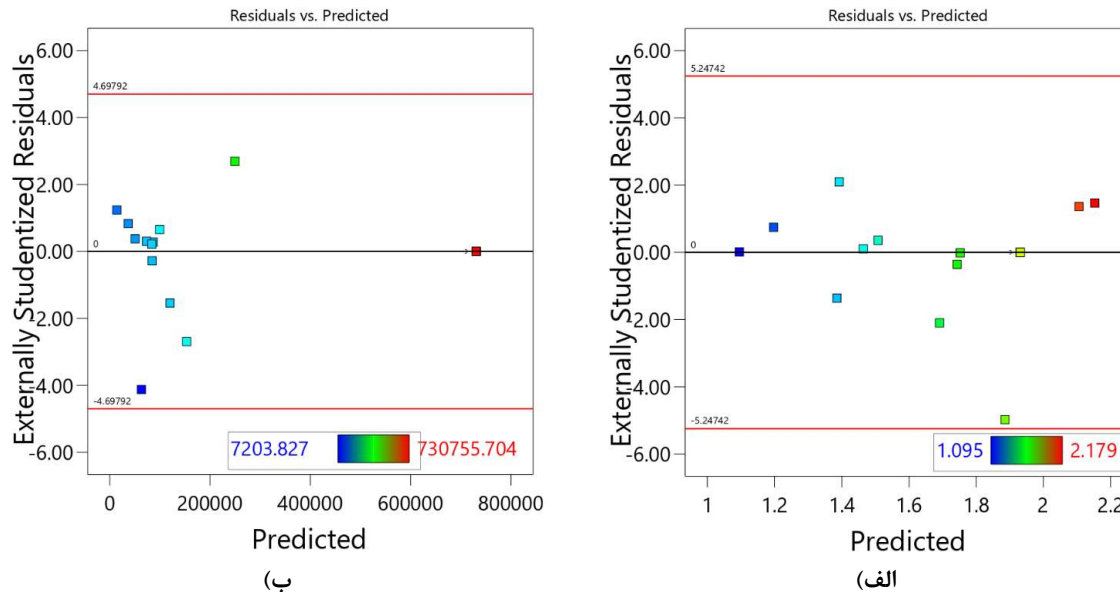
این سه پارامتر مستقل دیده می‌شود که افزایش درصد وزنی مقادیر دتا در رزین، ابتدا باعث افزایش میزان جذب انرژی مخصوص و نیروی بیشینه می‌شود ولی با رسیدن به مقدار بیشینه در ادامه با افزایش مقدار دتا در رزین شاهد کاهش مقادیر پاسخ‌ها هستیم.



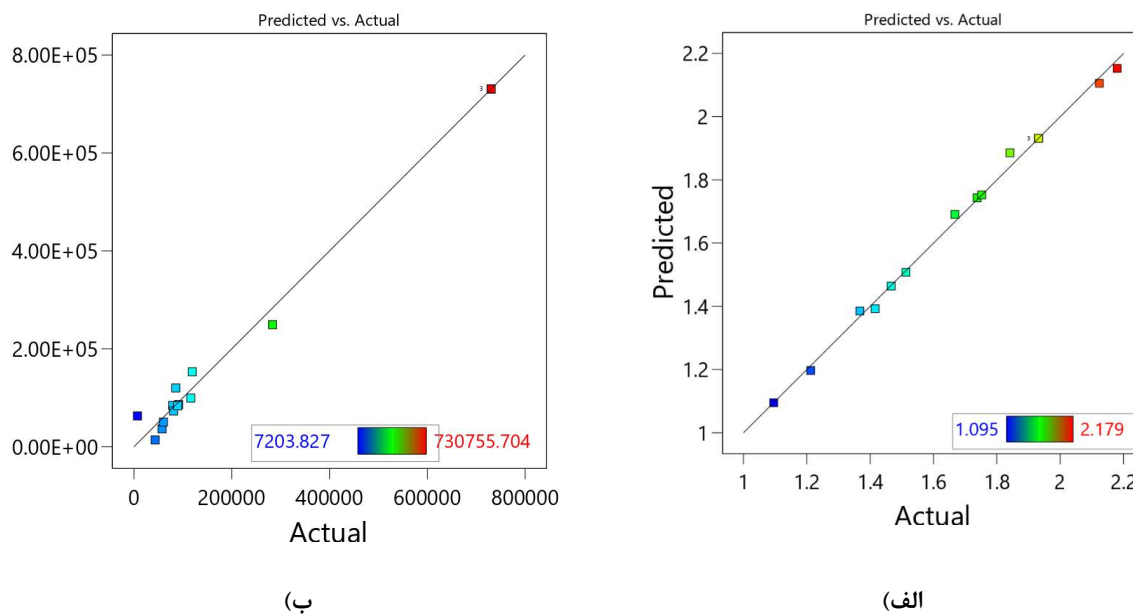
(الف)

۶-۸- تأثیر پارامترهای درصد وزنی نانو مواد بر روی جذب انرژی و نیروی بیشینه

حساسیت درصد وزنی نانو ذرات سیلیکا و رس و مقادیر دتا، بر خواص نیروی بیشینه و جذب انرژی ویژه به ترتیب در شکل‌های (۲۱) و (۲۲) نشان داده شده است. با بررسی



شکل ۱۹- نمودار مقادیر برازش یافته به مقادیر باقی مانده ها (الف) پاسخ جذب انرژی ویژه، (ب) پاسخ نیروی بیشینه



شکل ۲۰- نمودارهای مقادیر برازش شده به مقادیر واقعی ؛ (الف) پراکندگی پاسخ جذب انرژی ویژه، (ب) پراکندگی پاسخ نیروی بیشینه

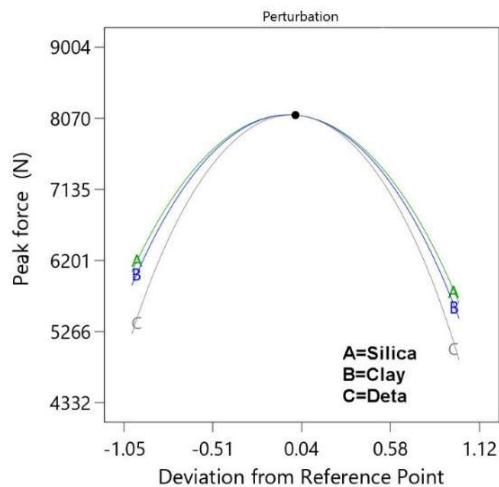
حساسیت به درصد تغییرات نانو رس و نانو سیلیکا به ترتیب در جایگاه های بعدی قرار می گیرد.

در شکل (۲۱) دیده می شود که با افزایش درصد وزنی نانوذره رس در رزین، میزان جذب انرژی ویژه به صورت خطی و با شیب تند افزایش می یابد و بیشترین حساسیت جذب انرژی ویژه مربوط به تغییرات نانو رس در رزین است. با افزایش درصد نانو سیلیکا در رزین در ابتدا، با شیب تند،

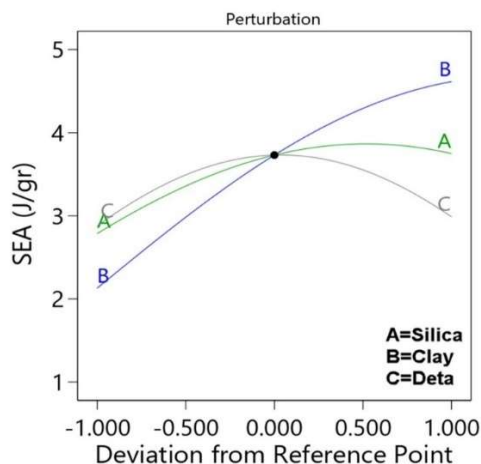
در شکل (۲۱) دیده می شود که نانو ذرات سیلیکا و نانو رس به صورت غیرخطی در رفتار نیروی بیشینه عمل می کند و همانند مقادیر دتا بعد از رسیدن به مقدار بیشینه در پاسخ، افزایش درصد نانو ذرات در رزین باعث کاهش نیروی بیشینه اولیه می گردد. در این شکل دیده می شود که بیشترین حساسیت نیروی بیشینه اولیه به تغییرات مقادیر دتا بوده که نمودار با شیب تندتری تغییر می کند و

مقادیر دتا روند نزولی پیدا کرده و میزان جذب انرژی کاهش می‌یابد. شکل‌های (۲۲) و (۲۳) تأثیر هم‌زمان دوتایی پارامترها را به ترتیب برای نیروی بیشینه اولیه و جذب انرژی ویژه، به صورت سه‌بعدی نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۲۲) دیده می‌شود در مقادیر میانی درصد پارامترها شاهد بیشترین مقدار در میزان نیروی بیشینه اولیه هستیم.

جذب انرژی ویژه افزایش پیدا کرده ولی در قسمت‌های پایانی شیب کم می‌شود و حتی در قسمت‌های پایانی روند نزولی نیز دیده می‌شود. حساسیت میزان جذب انرژی به مقادیر دتا به صورت غیرخطی در ابتدا با افزایش درصد وزنی دتا افزایش پیدا کرده و بعد از رسیدن به میزان بیشینه جذب انرژی ویژه در رزین، مجدداً دیده می‌شود که با افزایش



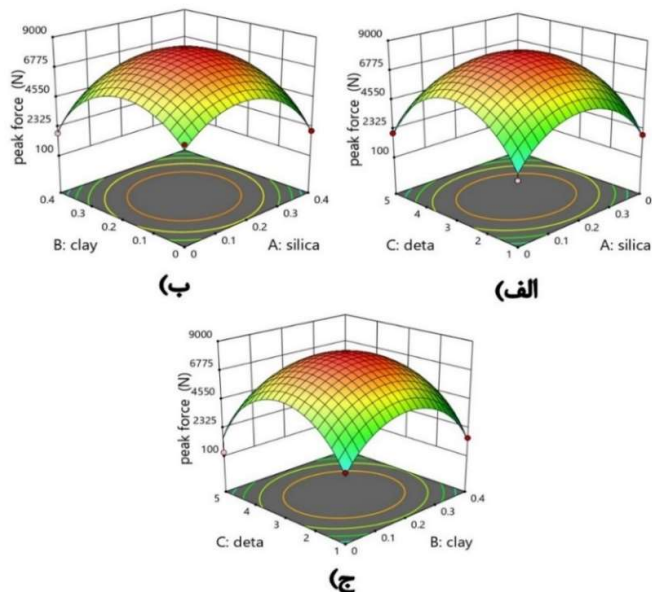
شکل ۲۱- نمودار حساسیت به تغییرات پارامترهای درصد نانو ذرات سیلیکا، رس و مقادیر دتا در میزان نیروی بیشینه



شکل ۲۲- نمودار حساسیت به تغییرات پارامترهای درصد نانو ذرات سیلیکا، رس و مقادیر دتا در میزان جذب انرژی ویژه

درصد وزنی نانو ذرات سیلیکا و نانو رس بیشترین مقدار را دارد. در شکل (۲۴-ج) می‌توان گفت در درصدهای بالای ذرات نانو رس (۴۰٪) دامنه‌ی تغییرات جذب انرژی ویژه با تغییرات درصد وزنی دتا در رزین بیشتر از درصدهای پایین است به عبارتی دیگر می‌توان گفت در درصدهای پایین ذرات نانو رس (۰٪) حساسیت جذب انرژی ویژه به درصد وزنی دتا کاهش می‌یابد.

در شکل (۲۴-الف) دیده می‌شود که برهم‌کنش درصد وزنی نانو سیلیکا و دتا در رزین برای جذب انرژی ویژه نسبت به سایر پارامترها کمتر است؛ به طوریکه دامنه تغییرات جذب انرژی ویژه نسبت به سایر نمودارها کمتر است. در شکل (۲۴-ب) دیده می‌شود که برهم‌کنش هم‌زمان حضور نانو ذرات سیلیکا و نانو رس در رزین برای پاسخ جذب انرژی ویژه نشان داده شده است. در این شکل دیده می‌شود که بیشترین مقدار جذب انرژی برای حالتی اتفاق می‌افتد که

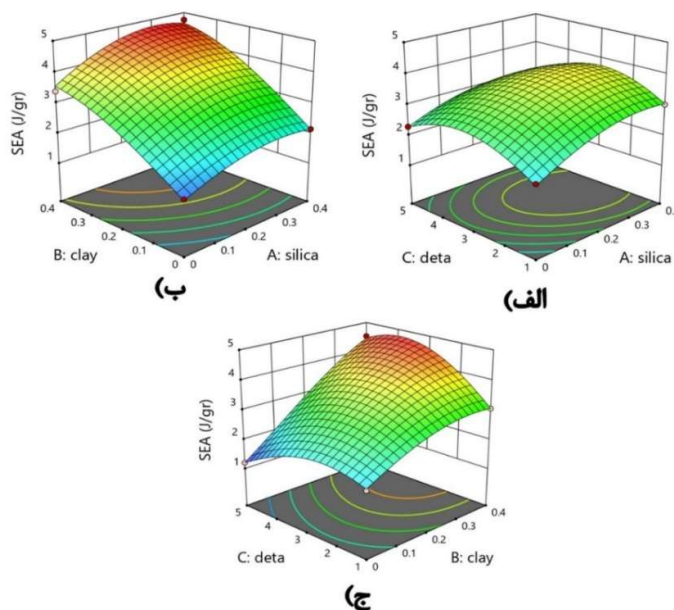


شکل ۲۳- نمودار سه بعدی تأثیر هم‌زمان پارامترهای، (الف) درصد نانو ذرات سیلیکا و مقادیر دتا، (ب) درصد نانو ذرات سیلیکا و رس، (ج) درصد نانو ذرات رس و مقادیر دتا بر میزان نیروی بیشینه اولیه

انرژی ویژه و نیروی بیشینه به ترتیب برابر $2,1541 \text{ J/gr}$ و $7194,73 \text{ N}$ با ضریب مطلوبیت $98,8\%$ بدست آمده است که در جدول ۵ حد بالا و پایین پارامترها و پاسخهای مورد بررسی نمایش داده شده است. همچنین نحوه توزیع بهینه مقادیر پارامترها به همراه مقدار بیشینه جذب انرژی ویژه و نیروی بیشینه در شکل (۲۵) نشان داده شده است.

۷- نتایج بهینه‌سازی

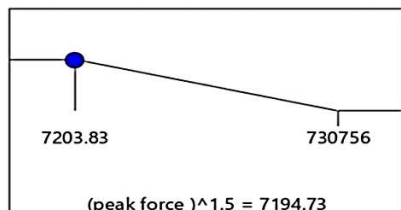
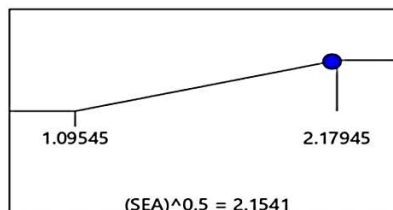
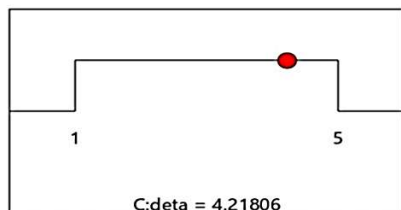
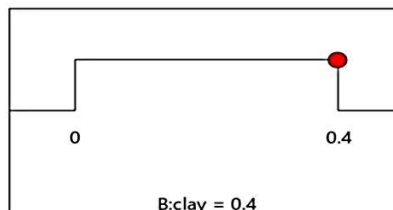
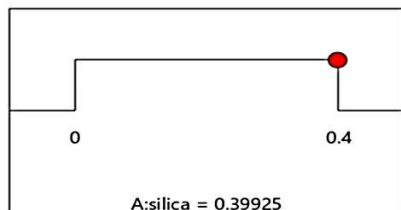
با توجه به نتایج بدست آمده از آنالیز واریانس و تحلیل صورت گرفته بر روی این سه پارامتر (درصد وزنی ذرات نانو سیلیکا و نانو رس، و مقادیر دتا)، بهینه‌سازی ظرفیت جذب انرژی ویژه و مقدار نیروی بیشینه انجام می‌شود. مقدار بهینه پارامترها که اهداف طراحی را برای ما برقرار می‌سازد مطابق جدول ۵ تعیین می‌گردد. مقادیر بیشینه برای جذب



شکل ۲۴- نمودار سه بعدی تأثیر هم‌زمان (الف) درصد نانو ذرات سیلیکا و مقادیر دتا (ب) درصد نانو ذرات سیلیکا و رس (ج) درصد نانو ذرات رس و مقادیر دتا بر میزان جذب انرژی ویژه

جدول ۵- مقادیر در نظر گرفته شده در بهینه سازی جذب انرژی- نیروی بیشینه

importance	weight	Upper limit	Lower limit	goal	unite	پارامتر
3	1	0.4	0	In range	%	silica
3	1	0.4	0	In range	%	clay
3	1	5	1	In range	%	deta
3	1	2.17945	1.09545	maximize	J/gr	Specific energy absorption
3	1	730756	7203.83	minimize	kN	Peak force



Desirability = 0.988
Solution 1 out of 91

شکل ۲۵- مقادیر بهینه پارامترها به همراه بیشینه میزان جذب انرژی مخصوص و نیروی بیشینه در نانو کامپوزیتها تحت فشار شبه استاتیکی

۸- نتیجه گیری

در این مطالعه، نمونه‌های نانو کامپوزیت ساخته شده از رزین اپوکسی ام-ال-۵۰۶ همراه با نانو ذرات سیلیکا و نانو رس، و حضور در اتیل تری آمین به عنوان ماده‌ی سوم جهت کم شدن تردی و افزایش چقرمگی رزین تحت آزمایش فشارشبه استاتیکی قرار گرفت و تأثیر درصد وزنی‌های متفاوت مواد نانو بر خاصیت جذب انرژی بررسی شد. با توجه به نتایج حاصل از آزمایش، نتایج زیر بیان می‌شود:

- افزودن نانو سیلیکا و نانو رس هر دو موجب افزایش جذب انرژی مخصوص گردید.

- با اضافه نمودن ماده نانو رس، جذب انرژی صعودی بوده در حالیکه با افزودن نانو سیلیکا پس از رسیدن به حد معینی از شدت افزایش جذب انرژی کاسته می‌شود.
- بهینه‌ترین حالت جذب انرژی ماده دی اتیلن تری آمین با بکار بردن ۳٪ وزنی این ماده در رزین است.
- افزودن مواد نانو با ایجاد مسیر طولانی در شکست سازه، موجب چقرمه شدن و در نتیجه افزایش جذب انرژی گردید.

مراجع

- [1] W. Kong *et al.*, "Materials & Design Polyaniline-decorated carbon fibers for enhanced mechanical and electromagnetic interference shielding performances of epoxy composites," *Mater. Des.*, vol. 217, 2022, pp. 110–658.
- [2] F. Silva, J. Njuguna, S. Sachse, K. Pielichowski, A. Leszczynska, and M. Giacomelli, "The influence of multiscale fillers reinforcement into impact resistance and energy absorption properties of polyamide 6 and polypropylene nanocomposite structures," *Mater. Des.*, vol. 50, 2013, pp. 244–252.
- [3] A. Rafiq, N. Merah, R. Boukhili, and M. Al-Qadhi, "Impact resistance of hybrid glass fiber reinforced epoxy/nanoclay composite," *Polym. Test.*, vol. 57, 2017, pp. 1–11.
- [4] N. Domun, H. Hadavinia, T. Zhang, T. Sainsbury, G. H. Liaghat, and S. Vahid, "Nanoscale of epoxy using nanomaterials – a review of the," *Nanoscale*, vol. 7, 2015, pp. 10294–10329.
- [5] L. Wang, "Preparation, morphology and thermal/mechanical properties of epoxy/nanoclay composite," vol. 37, 2006, pp. 1890–1896.
- [6] M. Zappalorto, M. Salviato, and M. Quaresimin, "Mixed mode (I + II) fracture toughness of polymer nanoclay nanocomposites," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 111, 2013, pp. 50–64.
- [7] S. Laurenzi, S. Botti, A. Ruffoloni, and M. G. Santonicola, "Fracture mechanisms in epoxy composites reinforced with carbon nanotubes," *Procedia Eng.*, vol. 88, 2014, pp. 157–164.
- [8] E. Mahdi, "Quasi-static crushing behaviour of hybrid and non-hybrid natural fibre composite solid cones," vol. 66, 2004, pp. 647–663.
- [9] M. Kathiresan, K. Manisekar, and V. Manikandan, "Performance analysis of fibre metal laminated thin conical frusta under axial compression," *Compos. Struct.*, vol. 94, no. 12, 2012, pp. 3510–3519.
- [۱۰] محمد جواد رضوانی، احسان برهانی، احسان الله شاهی، "ساخت فوم نانو کامپوزیت پلی یورتان سخت با استفاده از نانو ذرات SiC و بررسی خواص مکانیکی و جذب انرژی آن تحت بار دینامیکی" مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۳، ۱۳۹۷، صفحه ۷ تا ۱۷.
- [۱۱] فرزانه میراخوخلو، ابراهیم نجفی کانی، "بررسی و پیش بینی خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت کاه و گچ به کمک مدل شبکه استنتاج عصبی فازی تطبیقی"، مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۵۸، ۱۳۹۸، صفحه ۲۶۷–۲۷۸.
- [۱۲] سید امیر موسوی زاده، مجتبی حسینی، حسن حاتمی، "بررسی تجربی جذب انرژی ورق های فولادی انحنادار تحت بارگذاری ضربه ای و تاثیر لچکی روی تغییر شکل نمونه ها" مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۸، شماره ۶۳، ۱۳۹۹، صفحه ۲۷–۴۰.
- [۱۳] نگین نگهبان واشقانی، محمد جواد رضوانی، محمد دامغانی نوری، "بررسی تجربی و شبیه سازی عددی جذب انرژی در لوله استوانه ای پر شده از فوم پلی اورتان با استفاده از آغازگر"، مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۴، شماره ۴۴، ۱۳۹۵، صفحه ۶۹–۷۸.
- [14] Zhang H., Zhang Z., Friedrich K., "Property improvements of in situ epoxy nanocomposites with reduced interparticle distance at high nanosilica content," *Acta Mater*, 2006, pp. 7–54.
- [15] S. J. and Y. R. J., "Propagation in a glass particle-filled epoxy resin" Part 2: Effect of particle-matrix adhesion," *J Mater Sci*, pp. 19, 2, 1984, pp 47–73.
- [16] C. R. M., "Deformation and fracture of solids," *Englewood Cliffs, New Jersey Prentice-Hall*, 1980.
- [17] Y. Nakamura and M. Yamaguchi, "Effect of particle size on the fracture toughness of epoxy resin filled with spherical silica," vol. 33, no. 16, 1992.
- [18] R. L. R. F., "from the SAGE Social Science Collections . All Rights," *Mater. Lett*, 1987, pp. 40–103.
- [19] P. Ma, N. A. Siddiqui, G. Marom, and J. Kim, "Composites : Part A Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites : A review," *Compos. Part A*, vol. 41, no. 10, 2010, pp. 1345–1367.