



تأثیر نانورس بر روی خواص بالستیکی فلز/مواد مرکب شیشه اپوکسی - بررسی تجربی و عددی

عباس مسعودی¹، غلامحسین لیاقت^{2*}، محمد حسین پل³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

* تهران، صندوق پستی 123456789، ghlia530@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 30 دی 1392

پذیرش: 02 اسفند 1392

ارائه در سایت: 22 تیر 1393

کلید واژگان:

بالستیک

نانو فلز کامپوزیت

برخورد سرعت بالا

فلز/مواد مرکب شیشه اپوکسی

چکیده

این مقاله، به تاثیر نانو ذرات رسی بر روی خواص بالستیکی فلز/مواد مرکب شیشه اپوکسی به صورت تجربی و عددی می پردازد. فلز/مواد مرکب شیشه اپوکسی ساخته شده، از 2 رويه آلومینیومی 2024 و هسته نانوکامپوزیتی شیشه اپوکسی/نانورس تشکیل شده است. هسته نانوکامپوزیتی شامل الیاف شیشه تک جهته با وزن واحد سطح 409 گرم بر متر مربع، رزین CY 219، سخت کننده HY 5161 و نانو ذرات رسی کلوسیدی بی با درصدهای وزنی نسبت به ماتریس 0، 4، 7، 10 می باشد. نمونه های آزمایش با روش لایه چینی دستی و با کسر وزنی الیاف 60 درصد در قسمت کامپوزیتی ساخته شد. آزمایش های بالستیک با استفاده از دستگاه تفنگ گازی در سرعت های 205 و 225 متر بر ثانیه انجام گرفت. نتایج حاصل از آزمایش های بالستیکی نشان دهنده این است که میزان تغییرات جذب انرژی مخصوص در 4 درصد وزنی ناچیز بوده است و لیکن در 7 و 10 درصد وزنی، میزان جذب انرژی مخصوص افزایش می یابد. در واقع نانورس تحت برخورد بالستیک در درصد های بالا تاثیر گذار است. شبیه سازی نفوذ پرتابه با استفاده از نرم افزار LS-DYNA انجام گرفت. نتایج حاصل از آزمایش تجربی با شبیه سازی عددی همپوشانی قابل قبولی داشتند.

Effects of nanoclay on the ballistic behavior of GLARE - Experimental and numerical investigation

Abbas Masoudi¹, Gholam Hossein Liaghat^{2*}, Mohammad Hossein Pol³

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran

* P.O.B. 123456789 Tehran, Iran, ghlia530@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 20 January 2014
Accepted 22 February 2014
Available Online 13 July 2014

Keywords:

Ballistic
Nano Fiber Metal Laminate
High Velocity
Glare

ABSTRACT

This paper investigated experimentally and numerically the effect of nanoclay on ballistic impact behavior of GLARE. The prepared GLARE is made of two Aluminum 2024 facing sheets and E glass/epoxy/nanoclay as nano composite core. Nano composite section has been composed of unidirectional E glass 409 g/m², resin CY 219, hardner HY 5161 and nanoclay closite 30B dispersed into the epoxy system in a 0%, 4%, 7% and 10% ratio in weight with respect to the matrix. All panels fabricated using laid-up method in fiber weight fraction of 60%. Ballistic tests were conducted using Gas gun at the velocity of 205 and 225 m/s. The results of the ballistic impact experiments show that the amount of Specific energy absorption variations in 4% of nanoclay content is insignificant. However, in nanoclay contents of 7% and 10%, the Specific energy absorption increases. In other words, it be concluded that nanoclay has positive effect on higher percentage on the ballistic impact. The 3D Finite Element (FE) code, LS-DYNA, is used to model and validate the experimentally obtained results. A noticeable correlation was found between experimental and numerical results.

1- مقدمه

دارد. مقاومت بالای این ماده در مقابل خستگی و ضربه باعث شده است که کاربرد فراوانی در صنایع هوافضا داشته باشد. این چند لایه ها از روی هم- گذاری لایه های کامپوزیتی پیش ساخته با ورق های نازک آلومینیومی ساخته می شوند بنابراین چگالی کمتری نسبت به آلومینیوم خالص دارند. فلز/مواد مرکب شیشه اپوکسی به خاطر مقاومت کششی و فشاری بالا، فلز-کامپوزیت

فلز/مواد مرکب شیشه اپوکسی¹، نسل جدیدی از کامپوزیت های هیبریدی است که متشکل از صفحه های نازک آلومینیومی به همراه لایه های کامپوزیتی از جنس شیشه و اپوکسی می باشد که در سازه های پیشرفته هوافضایی کاربرد

1- GLARE

Please cite this article using:

A. Masoudi, Gh.H. Liaghat, M.H. Pol, Effects of nanoclay on the ballistic behavior of GLARE - Experimental and numerical investigation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 7, pp. 43-51, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مناسب‌تری برای استفاده در صنایع هواپیماسازی نسبت به سایر فلز کامپوزیت‌ها می‌باشد [1]. بررسی خستگی آن نسبت به آلومینیوم خالص و دیگر فلز-کامپوزیت‌ها نشان‌دهنده مقاومت بالای فلز/مواد مرکب شیشه اپوکسی در مقابل خستگی است [2]. به دلیل استفاده روز افزون کاربردهای این مواد در صنایع هوافضا و دفاعی، در سال‌های اخیر تحقیقات دامنه‌داری جهت بررسی خواص فلز/مواد مرکب صورت گرفته است احمدی و همکارانش [4,3] اثر تغییر ضخامت لایه‌های آلومینیومی را در فلز/مواد مرکب شیشه اپوکسی بررسی کردند. نتایج نشان داد که هرچه ضخامت ورق‌های آلومینیوم کمتر باشد انرژی مخصوص نفوذ (انرژی جنبشی متناظر با حد بالستیک بر چگالی سطحی) بیشتر می‌شود. همچنین آن‌ها بیان کردند در سرعت‌های نزدیک حد بالستیک میزان تاثیرگذاری آلومینیوم وسطی در آرایش 3/2 بیشتر از لایه‌های آلومینیوم رویی است. سید یعقوبی و لیو [5] در بررسی فلز/مواد مرکب شیشه اپوکسی نوع 5 به این نتیجه رسیدند که بیشترین نیروی تماسی وابسته به سرعت برخورد و حد بالستیک هدف است. اولین کار تحلیلی روی فلز/مواد مرکب شیشه اپوکسی را میشل هوفت و همکارانش [6] با استفاده از روش انرژی انجام دادند. آن‌ها میزان جذب انرژی در فلز/مواد مرکب شیشه اپوکسی را با استفاده از روش تحلیلی به دست آوردند. صبور و همکارانش [7] اثر لایه چینی را در فلز/مواد مرکب شیشه اپوکسی به صورت عددی و تجربی بررسی کرده و حد بالستیک را با استفاده از روش تجربی و عددی به دست آوردند.

از طرفی یکی از روش‌هایی که امروزه مورد توجه محققان قرار گرفته، استفاده از نانو ذرات برای تقویت سازه‌ها است که در عین حال که در وزن سازه تغییر قابل توجهی ایجاد نمی‌کند خواص مکانیکی آن را بهبود می‌بخشد. بیشتر تحقیق‌های انجام شده در مورد نانورس به بررسی خواص مکانیکی رزین یا الیاف می‌پردازد. در این میان، نانو ذرات رسی به دلیل ارزانی و قابلیت خوب در بهبود خواص مکانیکی مورد توجه زیادی قرار گرفته است. زلفلی و همکارانش [8] به بررسی اثر کلوئیدی بی¹ بر روی اپوکسی پرداختند. نتایج حاصل از آزمایش مدول خمشی، درصد پهنه را 4 درصد وزنی نشان می‌داد. گودواری و همکارانش [9] به بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری با الیاف بافته شده کربن پرداختند. آن‌ها مونت موریلونیت معدنی اصلاح شده با درصدهای وزنی مختلف را به روش سونیکیت پخش کردند. حاصل مطالعه میکرو ساختاری به وسیله عکس برداری میکروسکوپ الکترونی نشان داد که خواص چسبندگی بین ماتریس و الیاف بهبود پیدا کرده است. برانر و همکارانش [10] چقرمگی شکست را در کامپوزیت‌ها مورد بررسی قرار دادند. حاصل کار آن‌ها نشان‌دهنده افزایش مد دوم برشی تا 20 درصد بود. نگو و همکارانش [11] به بررسی اثر کلوئیدی بی با دو نوع سخت‌کننده جف‌آمین دی 2000 و جف‌آمین دی 230 پرداختند. حاصل کار آن‌ها نشان‌دهنده بهبود خواص جف‌آمین دی 2000 نسبت به حالت بدون نانو بود. در حالی که جف‌آمین دی 230 تاثیر چندانی در بهبود خواص ایجاد نکرده بود. جماعت و همکارانش [12] اثر مونت موریلونیت را بر روی اپوکسی 828 در درصدهای وزنی 1، 3 و 5 درصد بررسی کردند. نتایج پراش اشعه ایکس² ساختار لایه‌ای را ایکس‌فولیت نشان می‌داد. خواص فشاری استاتیکی به‌منظور بررسی اثر نانورس انجام شد نتایج نشان می‌داد که خواص فشاری به میزان اینترکلیت در نانو ساختارها بستگی دارد و کاهش مقاومت فشاری در 1 و 3 درصد وزنی مشاهده شد. آن‌ها علت این کاهش را وجود ساختار اینترکلیت نانورس که باعث ایجاد تنش موضعی زیادی در ماتریس در

طول فشار می‌شود، بیان کردند. شارما و همکارانش [13] تاثیر کلوئیدی بی را بر روی لایه‌های کامپوزیتی از الیاف شیشه نوع ای تک جهت بررسی کردند. درصد نانو مورد آزمایش 1، 3 و 5 درصد وزنی بود. بررسی کریستالوگرافی پراش اشعه ایکس حاکی از ساختار اینترکلیت بود. همچنین نتایج آزمایش کشش نشان می‌داد بهترین درصد مقاومت کششی مربوط به 3 درصد وزنی است علت آن را ترد شدن ماتریس با افزایش نانورس می‌داند. همچنین آزمایش خمشی سه نقطه‌ای برای مقایسه مدول خمشی انجام شد که بیشترین مدول خمشی را 5 درصد وزنی اعلام کردند. در مورد مطالعه ضربه روی نانو کامپوزیت‌ها، تحقیقات خیلی محدودی انجام شده است. لین و همکارانش [14] اثرات کلوئیدی بی را بر روی خواص مکانیکی و مقاومت به ضربه ماتریس اپوکسی در ضربه سرعت پایین را بررسی کردند. برای کامپوزیت‌های تقویت شده با کلوئیدی بی مقادیر بالاتر از 5 درصد حجمی نانو ذرات یک تغییر رو به کاهش شدید در مقاومت کششی حاصل شد و دلیل آن کلوخه شدن و عدم پخش شدگی خوب ذرات در درصدهای بالاتر از 5 درصد حجمی به دلیل گسیختگی پیوند میان ذرات و رزین بیان گردید. همچنین با افزودن نانو رس، مقاومت به ضربه پاندولی در جهت الیاف کاهش و در جهت عمود بر الیاف افزایش می‌یابد. آویلا و همکارانش [15] تاثیر مونت موریلونیت نانو رس را در مقاومت به ضربه در سرعت پایین بررسی کردند. آزمایش پراش اشعه ایکس نشان می‌داد که پخش‌شدگی به صورت ایکس‌فولیت است. منطقه خرابی تا 5 درصد وزنی افزایش، سپس کاهش می‌یابد و میزان جذب انرژی در 5 درصد وزنی بیشتر از بقیه درصدها بود. اقبال و همکارانش [16] به بررسی اثر نانوکلی کامپوزیت‌های کربن-اپوکسی با استفاده از آزمایش سقوط وزنه پرداختند. نتایج نشان می‌داد که بیشترین میزان جذب انرژی مربوط به 3 درصد وزنی است و در انرژی بالاتر تاثیر نانو رس کمتر است. همچنین مساحت خرابی را نیز بررسی کردند حاصل کار نشان می‌داد که با افزایش نانو منطقه تخریب کم می‌شود. پل و همکارانش [17,18] تاثیر نانو ذرات کلوئیدی بی را بر روی خواص مکانیکی و بالستیکی مواد مرکب هیبریدی شیشه/اپوکسی بررسی کردند. حاصل کار آن‌ها نشان‌دهنده این است که درصد پهنه نانو ذرات وابسته به سرعت برخورد و حد بالستیک هدف است. تحقیق حاضر به بررسی تاثیر کلوئیدی بی بر مقاومت بالستیکی فلز/مواد مرکب شیشه اپوکسی به صورت تجربی و عددی می‌پردازد. برای به دست آوردن خواص مکانیکی لایه‌ها با افزودن نانورس، آزمایش کشش در راستای طولی و عرضی و برشی انجام شد. آزمایش بالستیک با استفاده از تفنگ گازی انجام شد و با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA شبیه‌سازی و مورد ارزیابی قرار گرفت.

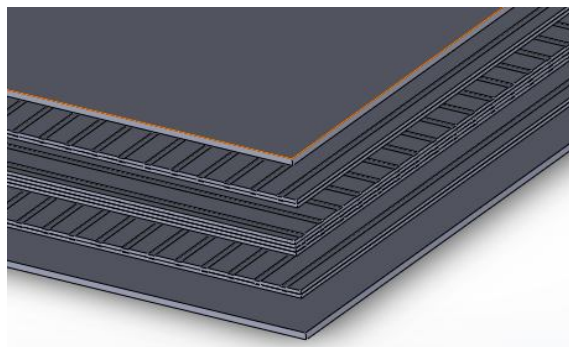
2- ساخت نمونه‌ها

2-1- مواد

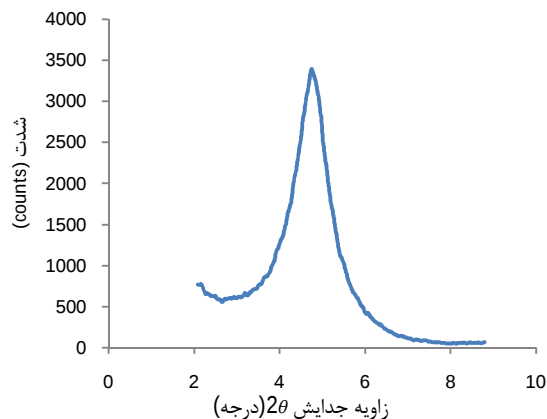
فلز/مواد مرکب شیشه اپوکسی ساخته شده، از دو رویه آلومینیومی و هسته نانو کامپوزیتی تشکیل شده است. رویه‌های آلومینیومی از جنس T3-2024 با ضخامت 1 میلی‌متر انتخاب شد. برای ساخت هسته نانو ماده مرکب هیبریدی، الیاف شیشه نوع E و به فرم پارچه تک جهت با وزن واحد سطح 409 گرم بر متر مربع انتخاب شد. در این پارچه‌ها الیاف تار به شکل دسته شده در یک جهت و تارهای ضعیف‌تر به عنوان پود با فواصل نسبتاً زیاد در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند (355 گرم در جهت طولی، 44 گرم در جهت عرضی و 10 گرم به صورت بافته شده پارچه‌ای).

رزین مورد استفاده از خانواده اپوکسی و ساخت شرکت هانستمن با نام تجاری CY 219 و با سخت‌کننده HY 5161 انتخاب گردید. واکنش شیمیایی و پخت این رزین طبق پیشنهاد شرکت سازنده در دمای 25 درجه سانتیگراد

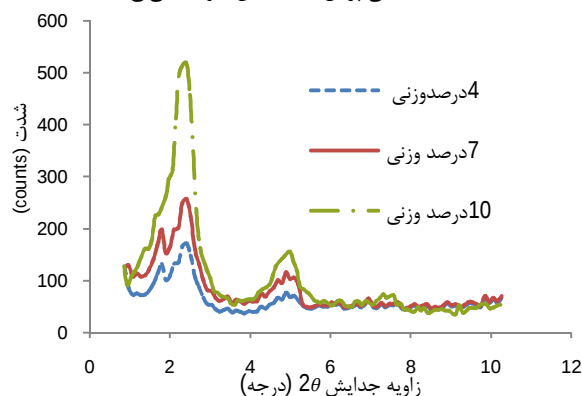
1- Closite 30B
2- XRD



شکل 1 شکل شماتیک لایه چینی در فلز/مواد مرکب شیشه اپوکسی ساخته شده

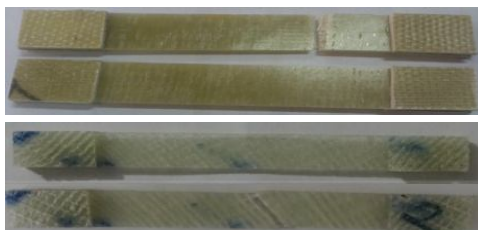


الف) منحنی پراش اشعه ایکس کلوسیدسی بی



ب) منحنی پراش اشعه ایکس رزین اپوکسی

شکل 2 منحنی پراش اشعه ایکس الف) کلوسیدسی بی، ب) اپوکسی-نانورس



شکل 3 نمونه آزمایش کشش الیاف عرضی و تنش برشی

جدول 1 زاویه جدایش و فاصله d نانورزین در درصد های مختلف نانورس

درصد	2θ (درجه)	$d(A)$
0	4/75	18/61
4	2/77	42/84
7	2/50	42/31
10	2/86	41/65

انجام می گردد. نسبت سخت کننده به رزین، یک به دو در مقیاس وزنی بوده و پس از ساخت نمونه ها، پخت در دمای 25 درجه سانتیگراد به مدت هفت روز انجام گردید. همچنین در این تحقیق از یک نانورس معدنی اصلاح شده با نام تجاری کلوسیدسی بی (مونت موریلایت اصلاح شده با نمک آمونیوم) تولید شده توسط راکوود آمریکا استفاده شد.

2-2- ساخت نمونه های نانو مواد اپوکسی

به منظور خشک کردن نانورس، ابتدا نانو ذرات رسی به مدت 24 ساعت در آون خلاء در دمای 80 درجه سانتیگراد قرار داده شده و سپس به رزین CY 219 اضافه شده و با سرعت 3000 دور بر دقیقه هم زده شد. پس از آن محلول حاصل به مدت نیم ساعت سونیکیت شده و در آخر مجدداً یک ساعت با دور 3000 دور بر دقیقه هم زده شد.

2-3- ساخت فلز/مواد مرکب شیشه اپوکسی

میان 6 نوع فلز/مواد مرکب شیشه اپوکسی که به صورت تجاری وجود دارد، فلز/مواد مرکب شیشه اپوکسی نوع 5 با لایه چینی $(0_2, 90_2, 90_2, 2/1)$ یعنی 8 عدد لایه کامپوزیتی (2 عدد لایه صفر درجه، 4 عدد لایه 90 درجه و در آخر 2 عدد لایه صفر درجه) که در بالا و پایین آن دو لایه آلومینیومی وجود دارد (شکل 1)، انتخاب گردید. برای ساخت نمونه های فلز/مواد مرکب شیشه اپوکسی، ورق های آلومینیومی به همراه لایه های شیشه اپوکسی در لایه چینی ذکر شده به صورت دستی بر روی هم قرار گرفته و در دمای 25 درجه سانتیگراد و فشار 4 بار به مدت یک هفته در اتوکلاو قرار گرفت.

2-4- مشخصات نانو مواد مرکب هیبریدی

اولین مشخصه برای هر نانو مواد، ساختار کریستالی آن می باشد. نتایج به دست آمده از آزمایش پراش اشعه ایکس برای نانورس خالص و رزین اپوکسی نشان می دهد (شکل 2 و جدول 1) نانو ذرات درون رزین اپوکسی به شکل در میان لایه رفته¹ هستند. در این نوع نانو کامپوزیت ها، نانو ذرات رس صرف نظر از درصد خاک رس از طریق جا دادن پلیمر در فضای بین لایه های شان، به صورت ساختمان لایه ای منظم با ارتفاع بین لایه ای بیشتر نسبت به حالت بدون پلیمر، پراکنده می شوند.

3- آزمایش ها

3-1- آزمایش های بالستیک

آزمایش های بالستیک در دانشگاه تربیت مدرس با استفاده از یک تفنگ گازی که قابلیت اندازه گیری سرعت ورودی و خروجی را داشت انجام شد. سرعت آزمایش در دو سرعت یکی بسیار نزدیک حد بالستیک، 205 متر بر ثانیه، و دیگری در سرعتی بالاتر از آن، 225 متر بر ثانیه، در نظر گرفته شد. ابعاد فلز/مواد مرکب شیشه اپوکسی ساخته شده 12 در 12 سانتیمتر و تعداد تکرار آزمایش های صحیح برای هر درصد نانو حداقل 4 عدد انجام شد. پرتابه از جنس فولاد به قطر 10 میلیمتر به طول قسمت استوانه ای 15 میلیمتر و طول کل 122/5 میلیمتر با زاویه مخروط 62 درجه و سختی 46 راکول انتخاب شد.

3-2- آزمایش های کشش و برش

برای آزمایش کشش در جهت طولی، نمونه های 3 لایه ای با ابعاد 15 در 250 میلیمتر و جهت انجام آزمایش در راستای عرضی نمونه هایی 6 لایه ای با ابعاد 20 در 175 میلیمتر طبق استاندارد ایزو 3039 ساخته شد [19].

1- Interlaced

مدل رفتار ماده به علت فشار بالای حاصل از ضربه نیاز به یک معادله حالت دارد معادله حالت، بیان کننده تغییرات فشار نسبت به تغییرات دانسیته است. معادله حالتی که برای مدل جانسون-کوک استفاده می شود معادله گرونایزش⁵ می باشد.

$$P = \frac{\rho C_0^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + a\mu) E_0 \leftrightarrow \mu > 0 \quad (7)$$

$$P = \rho C_0^2 \mu + (\gamma_0 + a\mu) E_0 \leftrightarrow \mu < 0 \quad (8)$$

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (9)$$

که در آن C_0 ، a ، S_1 ، S_2 ، S_3 و γ_0 ضرایب ثابت و E_0 انرژی اولیه جسم است. مقادیر و ضرایب روابط برای آلومینیوم در جدول 2 آورده شده است [22,21]. برای مدل سازی لایه های کامپوزیتی از مدل ارتوتروپیک غیرخطی⁶ استفاده شد که پارامترهای مورد نیاز برای آن شامل چگالی، مدول الاستیسیته، مدول برشی و راستای الیاف در هر لایه می باشد. در اینجا از AOPT برای مشخص کردن نوع روش انتخابی برای تعیین جهت الیاف و از LCIDA، LCIDB برای تعریف منحنی تنش- کرنش نسبت به محور B₀ استفاده می شود (جدول 3). برای حذف قسمت کامپوزیتی از الگوریتم فرسایش⁷ استفاده شد. شرط تخریب نیز کرنش نهایی برشی در نظر گرفته شد.

برای تعریف تماس میان گلوله و هر یک از لایه های هدف از الگوریتم فرسایش بین گلوله و هدف⁸ استفاده شد. گلوله پس از تماس با لایه های مختلف هدف، اقدام به برش و یا حذف آن خواهد کرد. لایه های مختلف هدف به یکدیگر اتصال یافته اند، اگر تنش بین لایه ای (نرمال یا برشی) میان دو لایه مجاور از استحکام نرمال یا برشی اتصال بیشتر باشد، اتصال بین لایه ای تخریب می شود. برای بیان مفهوم و اتصال و تماس میان دو لایه مجاور، از الگوریتم تماس برشی بین لایه ها⁹ استفاده گردید. هنگام تعریف این نوع تماس مقادیر استحکام کششی و برشی بین لایه ای اتصال نیز می بایست در نظر گرفته شود. برای استحکام کششی بین لایه ای 9 MPa و برای استحکام برشی بین لایه ای 20 MPa در نظر گرفته شد [6,5]. الگوریتم تماس اتوماتیک بین سطوح¹⁰ برای جلوگیری از در هم فرو رفتن لایه های غیر مجاور مورد استفاده قرار می گیرد. سرعت اولیه گلوله به عنوان شرط اولیه منظور گردید. تمامی المان های تشکیل شده گلوله انتخاب شده و سرعت اولیه به گره ها اعمال می گردد. همچنین درجه آزادی انتقالی و جابه جایی اطراف صفحات هدف بسته می شود. برای بررسی نفوذ کامل می بایست زمان حل عددی بیشتر از زمان عبور گلوله در نظر گرفته شود. زمان در نظر گرفته شده برای حل این مساله 600 میکرو ثانیه در نظر گرفته شد.

مرکز صفحه مش ریز زده شد و با حرکت به سمت لبه ها اندازه مش درشت تر انتخاب شد. برای مستقل بودن جواب از نوع مش بندی باید اندازه مش را آنقدر ریز کرد تا همگرا شود و با افزایش تدریجی تعداد المان ها و ریزتر شدن مش ها، پاسخ دقیق تری به دست آید و در نتایج به دست آمده، همگرایی دیده شود. فرم نهایی مش بندی طبق شکل 4 با تقسیم بندی 3×60×60 انتخاب گردید.

در اغلب مواد، خواص مکانیکی تابع سرعت بارگذاری می باشد. پژوهش های گسترده ای در زمینه وابستگی خواص مکانیکی کامپوزیت شیشه/اپوکسی به نرخ کرنش انجام شده است. شکریه و همکارانش [23] اثر نرخ کرنش را بر روی الیاف شیشه اپوکسی تا نرخ کرنش 100 S⁻¹ بررسی کرده است حاصل نتایج نشان دهنده افزایش استحکام تا 66 درصد نسبت به حالت شبه استاتیکی است.

جدول 2 داده های مورد نیاز برای تعریف لایه های آلومینیوم [22,21]

$\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$	$E = 73 \text{ GPa}$	$\nu = 0/33$
$A = 369 \text{ MPa}$	$B = 684 \text{ MPa}$	$n = 0/73$
$C = 0/0083$	$m = 1/7$	$T_{\text{room}} = 294 \text{ K}$
$T_{\text{melt}} = 775 \text{ K}$	$C_p = 875 \text{ J/kg-K}$	$D_1 = 0/112$
$D_2 = 0/123$	$D_3 = -1/5$	$D_4 = 0/007$
$D_5 = 0$	$C = 5330 \text{ m/s}$	$S_1 = 1/338$
$S_2 = 0$	$S_3 = 0$	$GAMA = 2$
$a = 0/48$		

جدول 3 داده های مورد نیاز برای تعریف لایه های کامپوزیتی

$\rho = 1858 \text{ kg/m}^3$	$E_A = 33 \text{ GPa}$	$E_B = 6/4 \text{ GPa}$
$E_C = 6/4 \text{ GPa}$	$\nu_{BA} = 0/25$	$\nu_{CA} = 0/32$
$\nu_{CA} = 0/25$	$G_{AB} = 2/6 \text{ GPa}$	$G_{BC} = 2/6 \text{ GPa}$
$G_{CA} = 2/6 \text{ GPa}$	$AOPT = 2$	

نرخ بارگذاری این نمونه ها طبق استاندارد 2 میلیمتر بر دقیقه در نظر گرفته شد همچنین آزمایش برش طبق استاندارد ایزو 3518 انجام گرفت [20]. شکل 3 نمونه آزمایش کشش الیاف عرضی و تنش برشی را نشان می دهد.

4- شبیه سازی عددی

نرم افزار ال/اس داین¹ یکی از نرم افزارهای قدرتمند و پیشرفته در زمینه مهندسی است. این نرم افزار، کد رایانه ای المان محدود قوی برای تغییر شکل های بزرگ دینامیکی با سرعت بالا ارائه می دهد. مهم ترین قسمت در شبیه سازی به کمک این نرم افزار، انتخاب نوع ماده است. برای مدل سازی ابتدا با استفاده از نرم افزار انسیس² جسم مدل سازی و مش بندی شد و سپس مرحله تکمیلی در نرم افزار ال/اس داین انجام گرفت. مدل سازی شامل دو قسمت مدل سازی پرتابه و هدف می باشد.

پرتابه به صورت استوانه ای که هیچ تغییر شکلی نمی پذیرد انتخاب گردید. بنابراین از مدل ماده صلب³ برای آن استفاده گردید. خواص مورد نیاز برای این ماده سه ثابت چگالی 7823 kg/m³، مدول الاستیسیته 200 GPa و ضریب پواسان 0/33 است. چون ماده صلب است معیاری برای تخریب در نظر گرفته نمی شود.

برای توصیف رفتار آلومینیوم از مدل جانسون-کوک استفاده شد. در این مدل تنش توسط رابطه شماره 1 تعریف می شود.

$$\sigma_{\text{yield}} = [A + B(\epsilon^p)^n] + [1 + C \ln \epsilon^*][1 - (T^*)^m] \quad (1)$$

$$\epsilon^* = \frac{\epsilon^p}{\epsilon_0} \quad (2)$$

$$\epsilon_0 = 1.0 \text{ S}^{-1} \quad (3)$$

$$T^* = \frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}} \quad (4)$$

که در آن n ، A ، B ، C ، m ضرایب ثابت، ϵ^p کرنش پلاستیک، T_{melt} و T_{room} به ترتیب دمای محیط آزمایش و دمای ذوب می باشد [21]. علاوه بر معادله فوق، معادله دیگری برای تعیین کرنش شکست ماده توسط جانسون-کوک⁴ به صورت معادله شماره 5 ارائه گردید.

$$\epsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)][1 + D_4 \ln \epsilon^*(1 + D_5 T^*)] \quad (5)$$

$$\sigma^* = \frac{p}{\sigma^{**}} \quad (6)$$

که در آن D_1 تا D_5 ضرایب ثابت، p فشار و σ^{**} تنش فون مایز می باشد [21]. این

5- Mi-Gruneison

6- MAT NONLINEAR ORHOTROPIC

7- MAT_ADD_EROSION

8- CONTACT_erosing_surface_to_surface

9- CONTACT_tiebreak_surface_to_surface

10- CONTACT_automatic_surface_to_surface

1- LS-DYNA

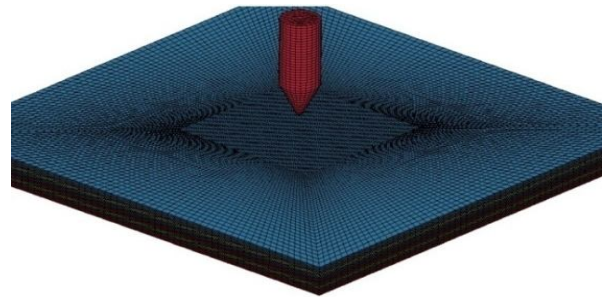
2- ANSYS

3- MAT_RIGID

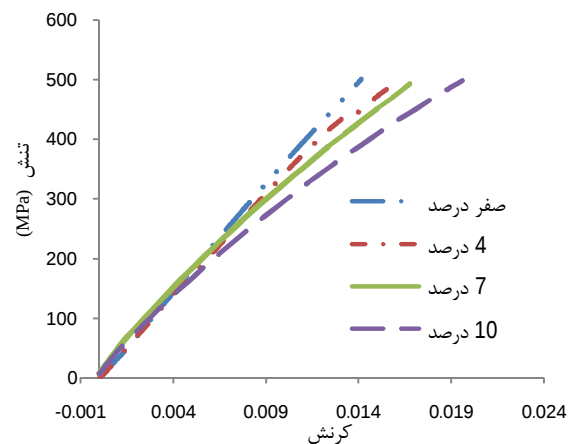
4- MAT JOHNSON-COOK

جدول 6 نتایج حاصل از کشش الیاف عرضی

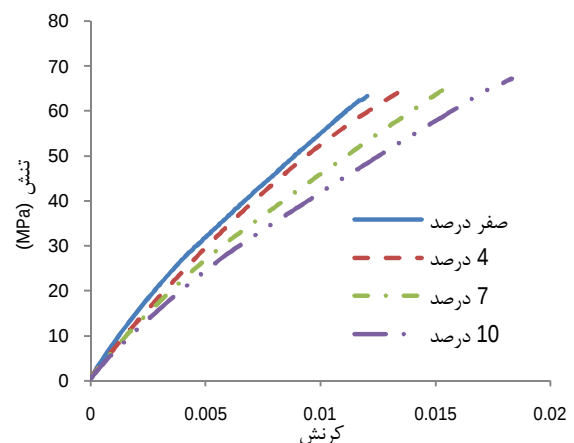
درصد	مدول الاستیسیته (GPa)	کرنش شکست	چقرمگی (MPa)
بدون نانو	6/4	0/012	0/367
4	5/6	0/014	0/38
7	5/1	0/016	0/41
10	4/8	0/018	0/43



شکل 4 نوع مش‌بندی پرتابه و هدف



شکل 6 نمودار تنش-کرنش برای الیاف طولی



شکل 7 نمودار تنش-کرنش در کشش الیاف عرضی

جدول 4 انواع تقسیم‌بندی‌ها در مش‌بندی

تعداد تقسیم‌بندی مرکز و لبه‌های خارجی	سرعت ورودی (m/s)	سرعت خروجی (m/s)	زمان حل (دقیقه)
40×40×3	225	145/47	660
50×50×3	225	147/6	705
60×60×3	225	148/39	720
80×80×3	225	148/5	840

جدول 5 نتایج حاصل از تست کشش الیاف طولی

درصد	تنش نهایی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	کرنش شکست	چقرمگی (MPa)
بدون نانو	495	34	0/014	3/53
4	465	33/3	0/016	3/61
7	490	33/1	0/018	4/11
10	475	29/3	0/020	4/43

نایک [24] الیاف شیشه نوع E را در نرخ کرنش بین 140 تا 400 S⁻¹ مورد بررسی قرار می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد استحکام در جهت طولی 69 تا 89 درصد، در جهت عرضی 63 تا 88 درصد و در جهت ضخامت 75 تا 93 درصد افزایش پیدا کرده است. نتایج تحقیقات آرمناکاس و سیامارلا [25]، بیابگر افزایش در حدود 50 درصد در مدول و استحکام کامپوزیت شیشه اپوکسی نسبت به مقادیر متناظر استاتیکی در نرخ کرنش 500 S⁻¹ می‌باشد. نرخ کرنش در این تحقیق بین 500 تا 1000 S⁻¹ است و برای در نظر گیری اثر نرخ کرنش، مقادیر استاتیکی به میزان 50 درصد افزایش خواهد یافت [5-7]. همچنین براساس تحقیق انجام شده توسط نایک و همکاران [26] استحکام برشی بین لایه‌ای کامپوزیت شیشه اپوکسی در نرخ کرنش‌هایی در حدود 575، 850 و 1000 S⁻¹ به ترتیب در حدود 15، 45 و 60 درصد نسبت به مقدار استاتیکی افزایش می‌یابد. در نتیجه در تحقیق حاضر، به منظور در نظر گیری اثر نرخ کرنش در استحکام برشی بین لایه‌ای، استحکام برشی بین لایه‌ای به میزان گفته شده افزوده شد.

5- نتایج و بحث

5-1- نتایج آزمایش‌های کشش و برش

برای تحلیل نتایج آزمایش بالستیک در فلز/مواد مرکب شیشه اپوکسی و همچنین برای دادن مشخصات لایه‌ها در جهت طولی در شبیه‌سازی عددی، تأثیر نانورس را بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت در راستای طولی بررسی شد. نانورس بیشترین تأثیر را روی شکست قسمت کامپوزیتی دارد. به همین دلیل بررسی میزان جذب انرژی در قسمت کامپوزیتی اهمیت ویژه‌ای دارد. با این فرض که نرخ تغییرات شرایط استاتیکی به دینامیکی در همه درصدهای نانورس یکسان باشد، نتایج کشش الیاف طولی در شکل 6 نشان داده شده است. با افزودن نانورس مدول الاستیسیته تا 7 درصد وزنی تغییر چندانی نمی‌کند. در 10 درصد وزنی مدول کاهش می‌یابد اما کرنش شکست در همه درصدهای وزنی افزایش می‌یابد و تغییرات تنش نهایی نامحسوس است (شکل 6، جدول 5). این علت می‌تواند به خاطر تأثیر نانو بین الیاف و رزین و همچنین تغییر در خاصیت خود رزین ایجاد شود.

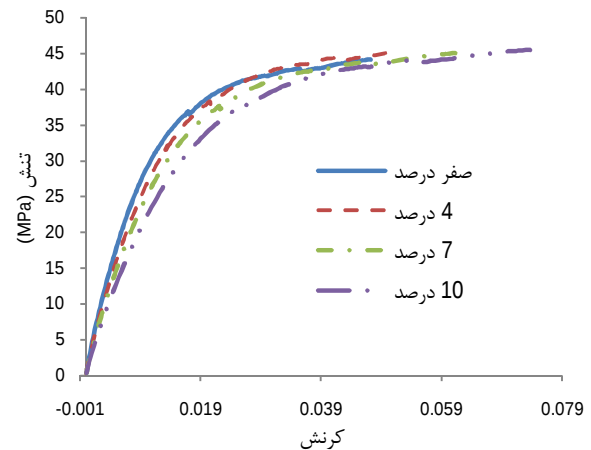
مقداری از انرژی پرتابه را الیاف عرضی تحمل می‌کند. بنابراین باید تأثیر افزودن نانورس بر الیاف عرضی را نیز بررسی کرد. همچنین در شبیه‌سازی عددی نیز به مشخصات الیاف عرضی نیازمند است. نتایج کشش عرضی (شکل 7) نشان‌دهنده این است که با افزودن نانورس مدول الاستیسیته در همه درصدهای وزنی کاهش و کرنش شکست افزایش می‌یابد. چون در جهت عرضی تعداد الیاف کمی وجود دارد (44 گرم بر متر مربع) و نسبت رزین به الیاف در جهت عرضی بیشتر از طولی است، میزان تغییرات آن نسبت به الیاف طولی بیشتر است با محاسبه مساحت زیر نمودار تنش-کرنش برای الیاف عرضی، دیده می‌شود که با افزودن نانورس میزان جذب انرژی مخصوص، به صورت جزئی افزایش می‌یابد (جدول 6).

از طرفی با توجه به اینکه معیار تخریب در شبیه‌سازی عددی، کرنش برشی در نظر گرفته شده است، میزان تغییرات آن، تأثیر زیادی بر نتایج نهایی

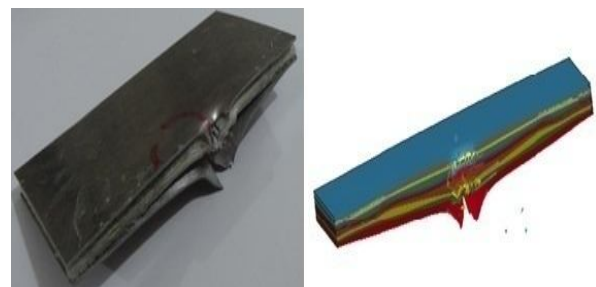
خواهد داشت. کمترین کرنش برشی مربوط به حالتی است که نانو وجود ندارد (شکل 8 و جدول 7).

2-5- مقایسه بین نتایج تجربی و شبیه سازی عددی

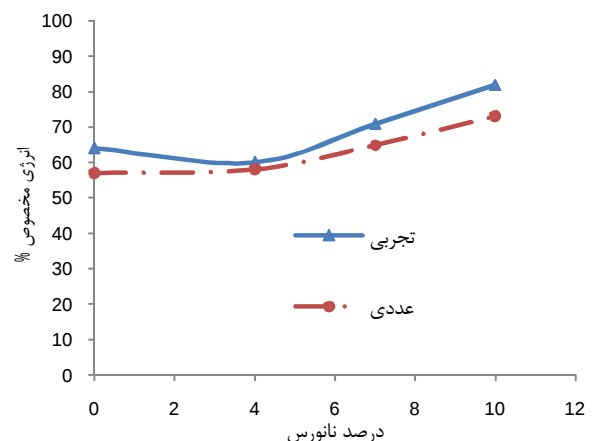
مقایسه بین نتایج تجربی و عددی هم به شکل ظاهری و هم از طریق تحلیل داده ها انجام گرفت (شکل 9). جدول 8 مقایسه بین نتایج تجربی و عددی را نشان می دهد.



شکل 8 نمودار تنش برشی-کرنش برشی



شکل 9 نمای برش خورده جسم در حالت تجربی و عددی



شکل 10 نمودار انرژی مخصوص-درصد نانورس در حالت تجربی و عددی

جدول 7 نتایج حاصل از آزمایش تنش برشی

درصد	کرنش شکست	مدول برشی (GPa)
بدون نانو	0/05	2/6
4	0/055	2/44
7	0/067	2/22
10	0/08	2/18

جدول 8 مقایسه بین نتایج روش تجربی و عددی

درصد	نوع تحلیل	سرعت خروجی (m/s)	سرعت ورودی (m/s)	درصد جذب انرژی مخصوص	اختلاف بین نتایج
0	تجربی	135	225	64	7
	عددی	148	225	57	
4	تجربی	142	225	60	2
	عددی	146	225	58	
5	تجربی	99	205	77	5
	عددی	110	205	71	
7	تجربی	121	225	71	5
	عددی	128	225	67	
10	تجربی	80	205	80	5
	عددی	98	205	75	
10	تجربی	99	225	82	9
	عددی	115	225	73	
3	تجربی	7	205	100	3
	عددی	29	205	97	

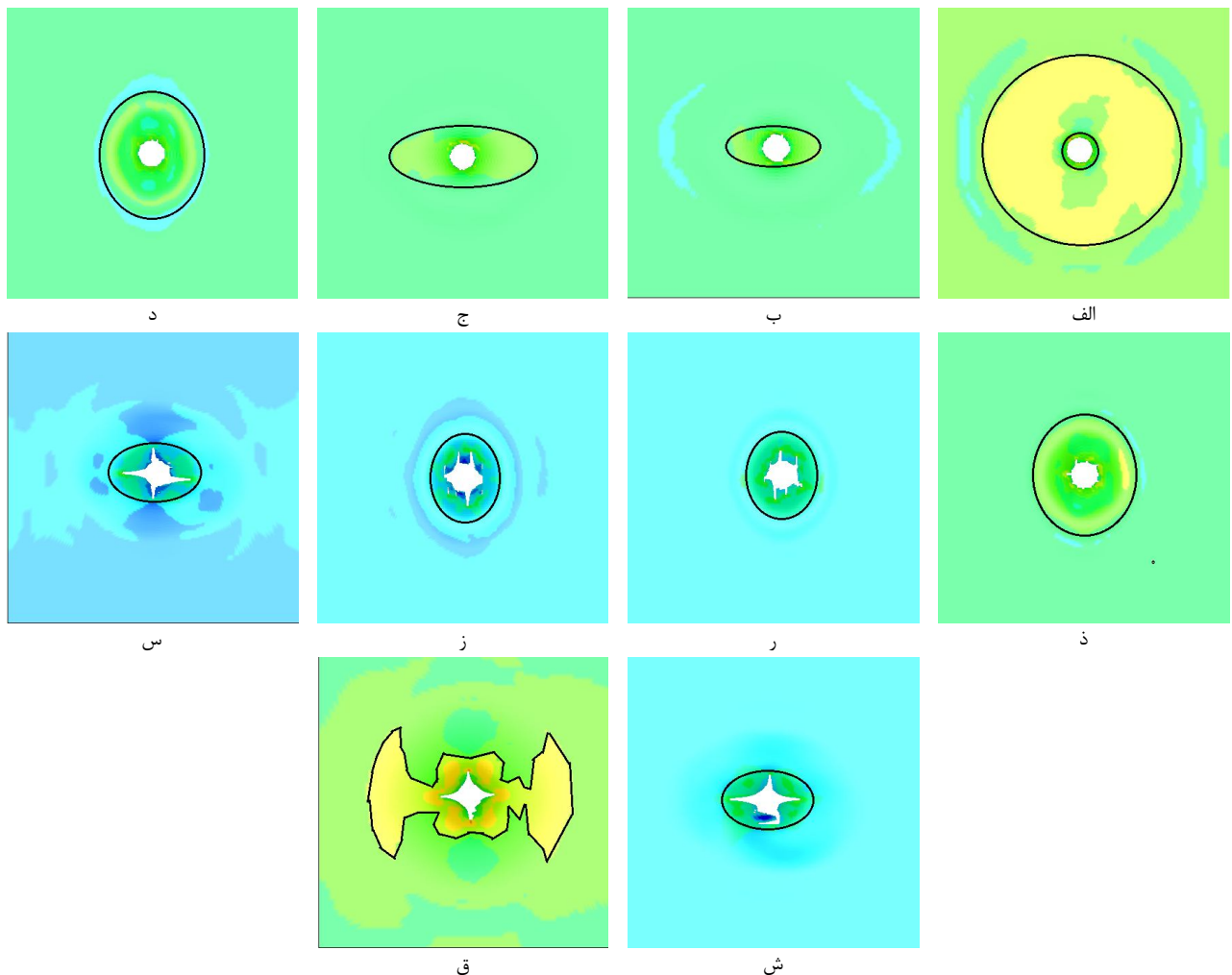
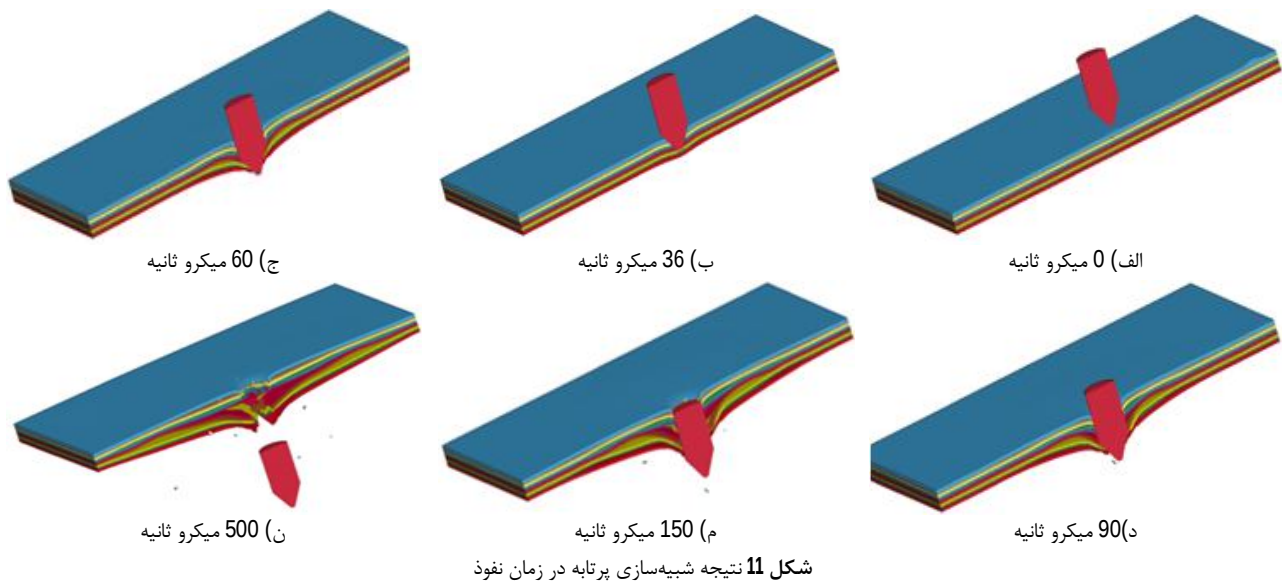
اختلاف بین نتایج تجربی و عددی بین 2 تا 9 درصد می باشد. این اختلاف بیان کننده اختلاف میان فرض ها انجام شده و واقعیت های حاکم بر نفوذ و خطاهای اندازه گیری می باشد. خطاهای شامل به دست آوردن خواص مکانیکی، خطای دستگاه تفنگ گازی، خطای محاسبه نرخ کرنش دینامیکی را می توان از جمله این خطاها حساب کرد.

شکل 10 میزان جذب انرژی مخصوص در درصدهای مختلف نانورس را در حالت عددی و تجربی در سرعت برخورد 225 متر بر ثانیه نشان می دهد. این نمودار نشان دهنده این است که در 4 درصد وزنی تغییرات جذب انرژی مخصوص ناچیز، و در 7 و 10 درصد افزایش می یابد. در واقع به این نتیجه گیری کلی می توان رسید که نانورس با این نوع رزین و سخت کننده در درصدهای وزنی بالا تاثیر مثبت دارد. همچنین نتایج تحلیل عددی و تجربی همپوشانی خوبی با هم دارند.

3-5- نتایج شبیه سازی عددی

مدل سه بعدی ساخته شده به روش اجزا محدود، قابلیت شبیه سازی لحظه به لحظه نفوذ گلوله در هدف های چند لایه را دارد. با گذشت زمان برخورد گلوله به هدف، لایه ها به تدریج شروع به تخریب می کنند. لایه های آلومینیومی جلوی هدف به فرم پلاگ بریده شده و گلوله شروع به تخریب تدریجی سایر لایه های کامپوزیتی می نماید. با گذشت زمان و نفوذ بیشتر گلوله در هدف، میزان لایه شدگی بیشتر می گردد. در نهایت لایه آلومینیومی پشتی نیز بریده می شود و برش این لایه به فرم پتال است. شکل 11 میزان تخریب و تغییر فرم مقطع میانی هدف در زمان نفوذ را نشان می دهد بدین ترتیب در نتایج مدل اجزا محدود تهیه شده، توانایی شبیه سازی پدیده جدایش بین لایه های و لایه شدگی را نیز دارا می باشد.

شکل 12 گسترش تنش و تغییر فرم هر یک از لایه ها در یک زمان 132 میکرو ثانیه به ترتیب از اولین تا آخرین لایه نشان می دهد. اولین برش لایه آلومینیومی به شکل پلاگ است (شکل 10-الف). پس از لایه آلومینیومی، عدد 2 لایه کامپوزیتی در جهت صفر درجه وجود دارد که نشان می دهد تنش در جهت طولی بیشتر گسترش یافته است (شکل 10-ب، ج). پس از آن، 4 عدد لایه 90 درجه وجود دارد که مشاهده می شود که تنش در جهت عرضی بیشتر گسترش یافته است (شکل 10-د، ز، ح).



شکل 12 گسترش تنش در لایه های فلز/مواد مرکب شیشه اپوکسی در زمان 132 میکرو ثانیه

برای بررسی تأثیر نانورس بر فلز/مواد مرکب شیشه اپوکسی، میزان سرعت خروجی پرتابه در درصدهای مختلف نانورس بررسی شد. سرعت خروجی از هدف می تواند نماینده رفتار ماده مورد مطالعه قرار گیرد بدین صورت که هر مقدار سرعت خروجی از هدف کمتر باشد، نشان دهنده جذب انرژی بیشتر توسط هدف بوده است.

آخرین لایه ها در قسمت کامپوزیتی 2 عدد لایه صفر درجه است که باز تنش در جهت طولی بیشتر از عرضی گسترش یافته است. لایه های آخر کامپوزیتی بیشتر از نوک پرتابه تأثیر می گیرد و تغییر شکل آن بیشتر شبیه لایه آلومینیوم انتهایی است (شکل 10-س، ش) و در نهایت برش لایه آلومینیوم انتهایی به شکل پتال می باشد (شکل 10-ق).

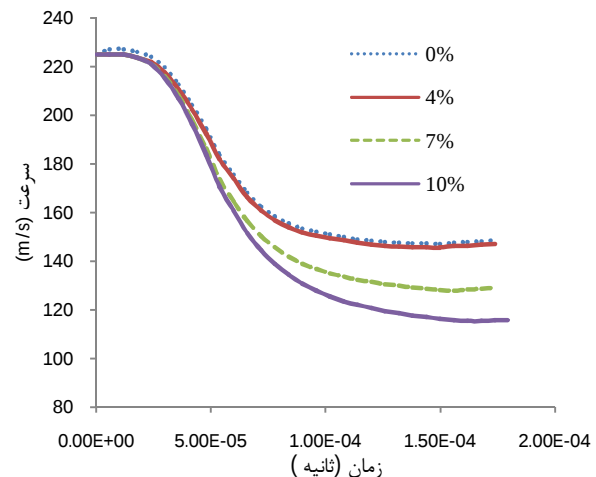
6- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر اثرات نانورس کلوسیدسی بی بر روی قابلیت جذب انرژی بالستیکی فلز/مواد مرکب شیشه اپوکسی با استفاده از آزمایش های بالستیکی بررسی گردید. نتایج نشان دهنده این است که میزان جذب انرژی در 4 درصد وزنی و بدون نانو تغییر زیادی نکرده است. در 7 و 10 درصد وزنی میزان جذب انرژی مخصوص افزایش یافته و بیشترین میزان جذب انرژی مربوط به 10 درصد وزنی می باشد.

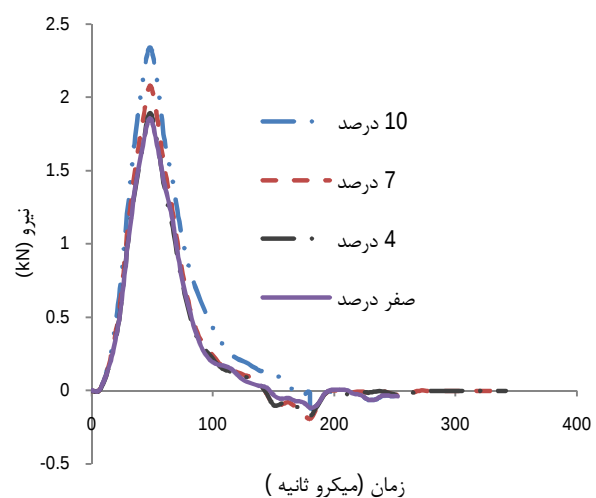
مدل سه بعدی ساخته شده به روش اجزا محدود، قابلیت شبیه سازی لحظه به لحظه نفوذ گلوله در هدف های چند لایه را دارا می باشد و می توان تخریب تدریجی قسمت های مختلف در اثر نفوذ گلوله را بررسی نمود. این مدل، توانایی شبیه سازی پدیده جدایش بین لایه های و لایه شدگی را نیز دارا می باشد. با افزایش درصد نانورس سرعت حد بالستیک افزایش می یابد به تبع آن میزان نیروی تماسی پرتابه نیز افزایش می یابد. نتایج به دست آمده از دو روش تجربی و عددی، همپوشانی خوبی با هم دارند.

7- مراجع

- [1] T. Sinmazçelik, E. Avcu, M. Ö. Bora, and O. Çoban, A review: fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods, *Materials & Design*, Vol. 32, No. 7, pp. 3671-3685, 2011.
- [2] R. Alderliesten, J. Homan, Fatigue and damage tolerance issues of Glare in aircraft structures, *International Journal of Fatigue*, Vol. 28, No. 10, pp. 1116-1123, 2006.
- [3] H. Ahmadi, H. Sabouri, G. Liaghat, and E. Bidkhorri, Experimental and Numerical Investigation on the High Velocity Impact Response of GLARE with Different Thickness Ratio, *Procedia Engineering*, Vol. 10, pp. 869-874, 2011.
- [4] H. Ahmadi, G. Liaghat, H. Sabouri, and E. Bidkhourri, Investigation on the high velocity impact properties of glass-reinforced fiber metal laminates, *Journal of Composite Materials*, Vol. 47, No. 13, pp. 1605-1615, 2013.
- [5] A. Seyed Yaghoubi, and B. Liaw, Thickness influence on ballistic impact behaviors of GLARE 5 fiber-metal laminated beams: Experimental and numerical studies, *Composite Structures*, Vol 94., No. 8, pp. 2585-2598, 2012.
- [6] M. S. Hoo Fatt, C. Lin, D. M. Revilock Jr, and D. A. Hopkins, Ballistic impact of GLARE™ fiber-metal laminates, *Composite structures*, Vol. 61, No. 1, pp. 73-88, 2003.
- [7] H. Sabouri, H. Ahmadi, and G. Liaghat, Ballistic Impact Perforation into GLARE Targets: Experiment, Numerical Modelling and Investigation of Aluminium Stacking Sequence, *International Journal of Vehicle Structures & Systems*, Vol. 3, No. 1, pp. 178-183, 2011.
- [8] M. Zulfi, W. Chow, Mechanical and thermal behaviours of glass fiber reinforced epoxy hybrid composites containing organo-montmorillonite clay, *Malaysian Polymer Journal*, Vol. 7, No. 1, pp. 8-15, 2012.
- [9] F. Chowdhury, M. Hosur, S. Jeelani, Studies on the flexural and thermomechanical properties of woven carbon/nanoclay-epoxy laminates, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 421, No. 1, pp. 298-306, 2006.
- [10] A. Brunner, A. Necola, M. Rees, P. Gasser, X. Kornmann, R. Thomann, and M. Barbezat, The influence of silicate-based nano-filler on the fracture toughness of epoxy resin, *Engineering fracture mechanics*, Vol. 73, No. 16, pp. 2336-2345, 2006.
- [11] T. D. Ngo, M. T. Ton-That, S. Hoa, and K. Cole, Reinforcing effect of organoclay in rubbery and glassy epoxy resins, part 1: Dispersion and properties, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 107, No. 2, pp. 1154-1162, 2008.
- [12] A. Jumahat, C. Soutis, J. Mahmud, and N. Ahmad, Compressive Properties of Nanoclay/ Epoxy Nanocomposites, *Procedia Engineering*, Vol. 41, pp. 1607-1613, 2012.
- [13] B. Sharma, S. Mahajan, R. Chhibber, and R. Mehta, Glass Fiber Reinforced Polymer-Clay Nanocomposites: Processing, Structure and Hygrothermal Effects on Mechanical Properties, *Procedia Chemistry*, Vol. 4, pp. 39-46, 2012.
- [14] J. C. Lin, L. Chang, M. Nien, and H. Ho, Mechanical behavior of various nanoparticle filled composites at low-velocity impact, *Composite Structures*, Vol. 74, No. 1, pp. 30-36, 2006.
- [15] A. F. Avila, M. I. Soares, and A. Silva Neto, A study on nanostructured laminated plates behavior under low-velocity impact loadings, *International journal of impact engineering*, Vol. 34, No. 1, pp. 28-41, 2007.



شکل 13 تغییرات سرعت-زمان در شبیه سازی عددی



شکل 14 تغییرات نیرو-زمان در شبیه سازی عددی

با تغییر هر کدام از پارامترهای مشخصات مواد، مساله دوباره باید حل شود. شکل 13 سرعت خروجی از هدف به ازای درصدهای مختلف از نانورس را در سرعت پرتابه 225 متر بر ثانیه نشان می دهد. همان طور که از شکل 13 می توان متوجه شد با افزودن نانورس ابتدا تغییرات سرعت خروجی ناچیز و سپس این تغییرات کاهشی، شدت می یابد.

شکل 14 تغییرات نیروی تماسی پرتابه نسبت به زمان نفوذ را در سرعت برخورد 225 متر بر ثانیه نشان می دهد. با افزایش درصد نانورس نیروی تماسی پرتابه افزایش می یابد. دلیل آن این است که با افزایش درصد نانو حد سرعت بالستیک افزایش می یابد. مکانیزم تخریب در یک ضخامت معین در بالا و پایین سرعت بالستیک فرق می کند. در سرعت نزدیک بالستیک پرتابه ای که می خواهد هدف را سوراخ کند مواد جلوی خود را فشار می دهد تا زمانی که تقریباً متوقف شود در نتیجه مقدار زمان بیشتری را برای تخریب در اختیار دارد. به عبارت دیگر یکپارچگی نمونه شرایط را بهینه خواهد کرد تا جایی که سرعت خروجی صفر شود. جایی که سرعت بالاتر از حد بالستیک باشد (0 و 4 درصد) مکانیزم تخریب فرق می کند، چون زمان کافی برای صدمه زدن وجود ندارد و در نتیجه تخریب آن نسبت به سرعت نزدیک حد بالستیک بیشتر موضعی بوده و همچنین مواد اطراف محیط پرتابه را تحت فشار قرار می دهد. از این رو نیروی مقاومتی نفوذ در مقایسه با حالت اول کاهش می یابد.

- [22] M. Buyuk, S. Kan, M. J. Loikkanen, Explicit finite-element analysis of 2024-T3/T351 aluminum material under impact loading for airplane engine containment and fragment shielding, *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 22, No. 3, pp. 287-295, 2009.
- [23] M. M. Shokrieh, and M. J. Omid, Investigating the transverse behavior of Glass-Epoxy composites under intermediate strain rates," *Composite Structures*, Vol. 93, No. 2, pp. 690-696, 2011.
- [24] N. Naik, P. Yernamma, N. Thoram, R. Gadipatri, V. Kavala, High strain rate tensile behavior of woven fabric E-glass/epoxy composite, *Polymer testing*, Vol. 29, No. 1, pp. 14 20010.
- [25] A. Armenakas, C. Sciammarella, Response of glass-fiber-reinforced epoxy specimens to high rates of tensile loading, *Experimental Mechanics*, Vol. 13, No. 10, pp. 433-440, 1973.
- [26] N. Naik, A. Asmelash, V. R. Kavala, and V. Ch, Interlaminar shear properties of polymer matrix composites: Strain rate effect, *Mechanics of Materials*, Vol. 39, No. 12, pp. 1043-1052, 2007.
- [16] K. Iqbal, S. U. Khan, A. Munir, and J. K. Kim, Impact damage resistance of CFRP with nanoclay-filled epoxy matrix, *Composites Science and Technology*, Vol. 69, No. 11, pp. 1949-1957, 2009.
- [17] M. H. Pol, G. Liaghat, F. Hajiarazi, Effect of nanoclay on ballistic behavior of woven fabric composites: Experimental investigation, *Journal of Composite Materials*, Vol. 47, No. 13, pp. 1563-1573, 2013.
- [18] M. Pol, G. Liaght, F. Hajiarazi, Experimental investigation of effect of nanoclay on ballistic properties of composites, *Modares mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 1, pp. 11-20, 2012 (In Persian).
- [19] D. D. M. 00, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, 2006.
- [20] D. D. M. 94, Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of $\pm 45^\circ$ Laminate, 2001.
- [21] G. Kay, Failure modeling of titanium-61-4V and 2024-T3 aluminum with the Johnson-Cook material model, Technical Rep., *Lawrence Livermore National Laboratory*, Livermore, CA, 2002.