



مقایسه تحلیل فرآیند نفوذ روی کامپوزیت الاستومری دولایه با کامپوزیت ترموست با استفاده از معادلات جذب انرژی

سیده سمانه آسمانی، غلامحسین لیاقت*، حامد احمدی، یاور عنانی، امین خدادادی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۰۷
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۸/۱۲
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۱۳
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۸/۱۹

کلمات کلیدی:

تحلیل تئوری
جذب انرژی
لاستیک
پارچه کولار
کامپوزیت الاستومری.

خلاصه: هدف این مقاله ارائه مدل تحلیلی برای تحلیل فرآیند نفوذ پرتابه استوانه‌ای سر کروی بر روی کامپوزیت کولار/الاستومر ۲ لایه و مقایسه آن با کامپوزیت کولار/اپوکسی با بهره‌گیری از روش انرژی می‌باشد. بدین منظور، معادلات جذب انرژی برای مواد خطی و غیرخطی به‌عنوان معیاری برای عملکرد پارچه تقویت‌شده با ماتریس به‌طور تحلیلی بررسی می‌گردد. در این مدل پیش‌بینی شده، جذب انرژی لایه اول در جذب انرژی لایه دوم تأثیر محرز داشته که وابستگی رفتار بالستیک لایه اول نسبت به لایه دوم این کامپوزیت را در طول برخورد نشان می‌دهد. مؤلفه‌های جذب انرژی شامل تشکیل مخروط پشت هدف، انرژی جنبشی کشش در الیاف اولیه و در الیاف ثانویه، انرژی جذب‌شده ناشی از لایه‌لایه شستگی، انرژی جذب‌شده ناشی از ترک ماتریس و انرژی جذب‌شده ناشی از سوراخ برشی در نظر گرفته شده است و محاسبه انرژی جذب‌شده کل در طول مدت برخورد صورت می‌گیرد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان‌دهنده تأثیر مثبت استفاده از الاستومر نسبت به اپوکسی در جذب انرژی پانل کامپوزیتی می‌باشد. همچنین، به‌منظور بررسی صحت نتایج حاصل از این تحلیل با نتایج تجربی موجود در سایر پژوهش‌ها نیز مقایسه گردیده است که بیانگر مطابقت بالای نتایج تحلیلی با نتایج تجربی می‌باشد.

۱- مقدمه

می‌توان برای جذب زیاد انرژی در مکانیزم شکست کامپوزیت از آن استفاده نمود، در نتیجه تقویت الاستومر با پارچه کولار قابلیت جذب انرژی پرتابه را بیش‌ازپیش بالا خواهد برد. برای بررسی جذب انرژی این کامپوزیت‌ها نیاز به مدل تحلیلی می‌باشد که بتواند به‌روشنی رفتارهای بالستیک را بررسی کرده و نتایج تحلیلی را به نتایج تجربی نزدیک سازد.

نیک و شرارو [۳] نیز در چندین مقاله به بحث و بررسی درباره روش انرژی و مکانیزم‌های جذب انرژی پرداخته‌اند. کانگ و کیم [۴] جهت ارزیابی مکانیزم جذب انرژی کامپوزیت‌های کولار تحت ضربه یک مدل تحلیلی با استفاده از روش انرژی ارائه نمودند. آن‌ها کل انرژی جذب‌شده تحت ضربه با سرعت پایین و بالا را مورد مطالعه قرار داده و تطابق خوب مدل خود را با نتایج تجربی نشان دادند. آن‌ها برای فهم کامل حد بالستیکی کامپوزیت‌ها و آسیب‌های گوناگون یک مدل تحلیلی با استفاده از مکانیزم‌های جذب انرژی مورد اشاره در خلال ضربه بالستیکی دوبعدی در اهداف کامپوزیتی ارائه نمودند. این مدل‌ها از دقت خوبی برخوردارند و قابل بسط و گسترش می‌باشند.

یکی از کاربردهای مواد کامپوزیتی استفاده آن در زره‌های شخصی در صنایع نظامی است، زره‌های بدن نیاز به مقاومت در برابر ضربه دارند، همچنین برای انطباق با شکل بدن باید انعطاف‌پذیر باشند. اجزای ساختار کامپوزیت برای حمل بار باوجود جذب انرژی ضربه، طراحی شده‌اند. بنابراین استفاده از یک ماتریس که دارای ظرفیت جذب انرژی بالایی را داشته باشد، برای ساختن ساختار ضروری است [۱]. رزین اپوکسی به‌عنوان ماتریس کامپوزیت‌های پلیمری ترموستی پیشرفته به‌خوبی شناخته شده است و نشان‌دهنده‌ی یک سری خواص منحصر به فرد از خود می‌باشد که می‌تواند در محدوده‌ی وسیعی از کاربردها سازگار باشد [۲]. اما از آنجاکه در صنایع دفاعی مقاومت به ضربه مواد باید به نحو چشمگیری بالا باشد. بنابراین، رزین اپوکسی به‌عنوان ماتریس بکاررفته در ساختار کامپوزیت‌ها نمی‌تواند مقاومت به کشش بالایی را ارضا کند. از این رو ماده الاستومر نسبت به رزین اپوکسی نقش تعیین‌کننده‌ای در انتقال انرژی جنبشی پرتابه و موج شوک آن به دلیل انعطاف‌پذیری زیاد به هدف را دارا می‌باشد که

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ghlia530@modares.ac.ir



بین پرتابه و هدف می‌باشد. در مطالعات قبلی، مدل‌های تحلیلی برای رفتار و جذب انرژی تحت ضربه بالستیک در کامپوزیت‌های تک لایه پیش‌بینی شده بود. از این رو، این مدل‌ها برای کامپوزیت‌های چندلایه با توجه به فرض مستقل بودن لایه‌ها نسبت به هم مورد استفاده قرار می‌گرفتند. در نتیجه، انرژی جذب شده لایه‌ها نیز مستقل از یکدیگر محاسبه شده‌اند [۳، ۱۶]. چراکه ماتریس بکاررفته در کامپوزیت‌های مورد بررسی آن‌ها قابلیت انعطاف‌پذیری کافی و مؤثر را در لایه‌های کامپوزیت اجرا نکرده است. لذا، این امر باعث شکست و جدایش سریع لایه‌های کامپوزیت نسبت به یکدیگر شده و به تبع نمی‌تواند جذب انرژی پرتابه را کاهش دهد. بدین منظور، در پیش‌بینی‌های تحلیلی گذشته وابستگی لایه‌ها نسبت به هم لحاظ نشده است. همچنین، نتایج به دست آمده تفاوت چشمگیری با نتایج تجربی داشته‌اند. اما در مدل پیش‌بینی شده حاضر، لایه‌ها به یکدیگر وابسته در نظر گرفته می‌شوند که این امر باعث وابستگی جذب انرژی لایه‌ها نسبت به یکدیگر می‌شود. در نتیجه، مدل پیش‌بینی شده حاضر نسبت به مدل‌های قبلی با نتایج تجربی تطابق زیادی دارد.

۲- مکانیک محیط پیوسته

یک المان به طول dx با سطح مقطع A در یک فاصله از x از نقطه ضربه را در نظر بگیرید. اگر کرنش در المان به صورت $\varepsilon(x)$ داده می‌شود، سپس انرژی کرنشی ذخیره شده در المان توسط حجم المان با انتگرال‌گیری از منطقه‌ای تحت تنش-کرنش به صورت زیر داده می‌شود:

$$Energy\ absorbed = A dx \int_0^{\varepsilon} \sigma d\varepsilon \quad , \quad \sigma = \sigma(\varepsilon) = \sigma_{11}(\varepsilon) \quad (1)$$

برای تعیین انرژی جذب شده توسط اهداف (کامپوزیت الاستومری و کامپوزیت ترموستی) نیاز به تعیین تنش برای این مواد می‌باشد. از این رو با توجه به متفاوت بودن نوع ساختاری این مواد به طور جداگانه فرمول تنش‌های آن‌ها محاسبه می‌شود. در ادامه به بررسی آن‌ها پرداخته شده است.

۲-۱- مدل الاستیک (خطی)

تنش در حالت کشش اصلی تک‌محوره برای مواد الاستیک (خطی) بر اساس کرنش به صورت زیر است:

ایشیکاوا [۵] برای مدل‌سازی لاستیک تقویت شده با الیاف یک تابع انرژی معرفی نمود که بر اساس انرژی کرنشی لاستیک و انرژی کشش الیاف استخراج گردید. سپس با استفاده از روابط غیرالاستیک روابط ساختاری کامپوزیت الاستومری را ارائه نمود و تحلیل المان محدود خمش روی آن را انجام داد و با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی مقایسه نمود. پنگ [۶] نیز با ارائه یک تابع انرژی برای تایر، روابط ساختاری آن را استخراج نمود.

محمدی پور و همکاران [۷] به بررسی تحلیلی جذب انرژی و آسیب لایه‌لایه شدگی در صفحات نازک کامپوزیتی تقویت شده با نانو ذرات تحت برخورد با سرعت بالا پرداخته شده است. همچنین، میزان انرژی‌های جذب شده در حالت‌های مختلف شکست و تغییرات انرژی جنبشی پرتابه و هدف در بازه‌های زمانی کوچک، شعاع ناحیه آسیب و انرژی لایه‌لایه شدگی و سرعت خروجی پرتابه تخمین زده شده است. در نهایت نتایج حاصل از مدل تحلیلی با نتایج تجربی برخورد با سرعت بالا روی صفحات نانو کامپوزیت بررسی کردند. احمدی و همکاران [۸] به بررسی شبیه‌سازی رفتار یک ساندویچ پانل کامپوزیتی در برابر ضربه بالستیک با استفاده از مدل تحلیلی پرداخته‌اند. در هر مرحله از این مدل تحلیلی، تعادل انرژی بین انرژی جنبشی پرتابه و انرژی جذب شده توسط هدف در نظر گرفته شده است. همچنین، سرعت باقیمانده در طی برخورد بالستیک نیز محاسبه کردند.

خدادادی و همکاران [۹] به بررسی تجربی نفوذ پرتابه با سرعت بالا در کامپوزیت‌های ساخته شده از کولار/الاستومر و مقایسه آن با کامپوزیت‌های کولار/اپوکسی پرداخته‌اند. لیاقت و همکاران [۱۰] به بررسی عددی و تجربی نفوذ پرتابه با سرعت بالا در کامپوزیت‌های ساخته شده به روش پیچش الیاف پرداختند و مکانیزم‌های مختلف آسیب را بررسی کردند.

طاهرزاده و همکاران [۱۱] به بررسی تجربی و عددی نفوذ پرتابه کامپوزیت چندلایه دارای لایه فلزی همراه با یک لایه الاستومر پرداختند. نتایج نشان داد که مکان لایه الاستومری نزدیک برخورد پرتابه به دلیل پخش شدن بار، عملکرد جذب انرژی بهتری دارد. همچنین، شبیه‌سازی عددی فرآیند نفوذ با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA انجام شد. سرانجام، یک مطالعه پارامتری عددی برای ارزیابی تأثیر ضخامت الاستومر بر راندمان جذب انرژی کل ساختار انجام شد. مدل تحلیلی نشان داده شده در مطالعه حاضر بر اساس پیش‌بینی رفتار

می‌توان چگالی انرژی کرنشی را به صورت $W(I_1, I_2)$ استفاده نمود. و بنابراین تنش از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۲]:

$$\sigma = 2 \left[\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + I_1 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) B - \frac{\partial W}{\partial I_2} B^2 \right] - pI \quad (9)$$

در رابطه اخیر فشار هیدرواستاتیک p مجهول است که از طریق حل مسائل مرزی ($\sigma_{22} = \sigma_{33} = 0$) محاسبه می‌شود.

مواد جامد نئوهوکین یک مدل برای مواد غیرالاستیک است که شباهت زیادی با قانون هوک دارد و می‌تواند برای موادی که در آن‌ها تنش و کرنش رفتار غیرخطی با تغییر شکل‌های بزرگ دارند، مورد استفاده قرار گیرد. مدل نئوهوکین بر پایه زنجیره پلیمری با اتصال کراس-لینک^۱ بنا نهاده شده و قابل استفاده برای پلاستیک‌ها و مواد لاستیک است. پلیمرها با اتصال کراس-لینک در حالت نئوهوکین مورد بررسی قرار می‌گیرند، چون با اعمال تنش، زنجیره‌های پلیمری نسبتاً به سمت یکدیگر حرکت می‌کنند. این در حالی است که زنجیره‌های پلیمری در یک نقطه مشخص تا بیشترین حدی که پیوند کووالانسی کراس-لینک اجازه دهد دچار کشیدگی شده و این باعث افزایش شدید مدول الاستیک ماده می‌شود. مدل نئوهوکین برای حالت تنش دومحوره مناسب نبوده اما برای حالت کشش تک‌محوره بهترین گزینه می‌باشد [۱۸]. از آنجاکه در این تحقیق تنش اصلی برای مدل تحلیلی به صورت تنش تک‌محوره انتخاب شده است. بنابراین از این مدل برای مواد غیرالاستیک استفاده می‌گردد. تابع چگالی انرژی کرنشی برای یک ماده نئوهوکین غیرقابل تراکم به صورت زیر است:

$$W_{N,H} = C_1(I_1 - 3), \quad C_1 = \frac{\mu}{2} \quad (10)$$

C_1 ضریب مدل نئوهوکین است که از نمودار تنش-کرنش لاستیک در نرم‌افزار آباکوس به دست آمده است. بنابراین با استفاده از روابط (۹) و (۱۰)، تنش کوشی برای مواد غیرالاستیک (غیرخطی) به فرم کشش تک‌محوره به فرم زیر به دست می‌آید:

$$\sigma_{11} = 2C_1 \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \right) = 2C_1 \left(\varepsilon_{11}^2 + 2\varepsilon_{11} + 1 - \frac{1}{1 + \varepsilon_{11}} \right) \quad (11)$$

۳- مدل سازی تحلیلی

مکانیزم‌هایی که برای جذب انرژی در نظر گرفته شده است بر پایه

$$\sigma_{11} = E\varepsilon_{11} \quad (2)$$

۲-۲- مدل غیرالاستیک (غیرخطی)

برای تعیین روابط غیرالاستیک از تابع پتانسیل انرژی کرنشی که تابعی از ناوردهای تانسور گرادیان تغییر شکل، F است، استفاده می‌گردد. C و B به ترتیب تانسورهای تغییر شکل کوشی-گرین راست و چپ به صورت زیر تعریف می‌شوند [۱۲]:

$$C = F^T F \quad (3)$$

$$B = FF^T \quad (4)$$

در مواد غیرالاستیک تنش را می‌توان با استفاده از رابطه زیر و از تابع انرژی پتانسیل کرنشی به دست آورد [۱۲].

$$S = \frac{\partial W}{\partial E} \quad (5)$$

در رابطه فوق، S تانسور تنش دوم پیولا-کرشهوف است. تابع انرژی پتانسیل کرنشی بر اساس ناوردهای اصلی تانسور تغییر شکل کوشی-گرین راست در نظر گرفته می‌شود و در نتیجه رابطه (۵) به صورت زیر نیز بیان می‌گردد [۱۲]:

$$S = 2 \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \frac{\partial I_1}{\partial C} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \frac{\partial I_2}{\partial C} + \frac{\partial W}{\partial I_3} \frac{\partial I_3}{\partial C} \right) \quad (6)$$

که در آن I_1, I_2 و I_3 ناوردهای تانسور C هستند و ناوردهای اصلی تانسور تغییر شکل راست کوشی-گرین نام دارد که به صورت زیر تعریف می‌شوند [۱۲]:

$$I_1 = tr(C), \quad I_2 = \frac{1}{2}(I_1^2 - tr(C^2)), \quad I_3 = det(C) \quad (7)$$

با تبدیل تنش دوم پیولا-کیرشهوف به تانسور تنش کوشی داریم [۱۲]:

$$\sigma = \frac{FSF^T}{J} \quad (8)$$

اگر ماده تحت فشار هیدرواستاتیک قرار گیرد، حجم آن به اندازه مشخصی تغییر می‌کند. بیشتر لاستیک‌ها در مقابل تغییر حجم شدید از خود مقاومت نشان داده و در محاسبات دستی می‌توان تا حد بسیار خوبی به عنوان مواد تراکم‌ناپذیر در نظر گرفت. مدل ماده برای مواد تراکم‌ناپذیر به این صورت است که باید $J = 1$ را ارضا کند تا حجم تغییر نکند. بنابراین چگالی انرژی کرنشی تابعی از دو ثابت است و

تئوری نیک [۱۶] عبارتند از:

$$E_{Kp,0} = E_{Kp,i} + E_{L,i}, \quad E_{L,i} = E_{KE,i} + E_{Py,i} + E_{Sy,i} + E_{DI,i} + E_{Mc,i} + E_{Sp,i} \quad (12)$$

در معادله بالا $E_{Kp,0}$ انرژی جنبشی اولیه، $E_{Kp,i}$ انرژی جنبشی در هر فاصله زمانی بعد از برخورد، $E_{KE,i}$ انرژی جنبشی ایجاد شده در پشت صفحه کامپوزیتی تحت برخورد بالستیکی، $E_{Py,i}$ انرژی جذب شده در شکست کششی الیاف اولیه، $E_{Sy,i}$ انرژی جذب شده در تغییر شکل الاستیک الیاف ثانویه، $E_{DI,i}$ انرژی جذب شده ناشی از لایه لایه شدگی، $E_{Mc,i}$ انرژی جذب شده ناشی از ترک ماتریس و $E_{Sp,i}$ انرژی جذب شده ناشی از سوراخ برشی و تشکیل شدن پلاگ در صورت رخ دادن آن می باشد. در این مطالعه برای نوشتن تابع انرژی کرنشی ماتریس (الاستومر) از تابع انرژی نئوهوکین استفاده خواهد شد.

فرضیاتی که در مطالعه حاضر در نظر گرفته می شود، به صورت زیر می باشد.

- تغییرات کرنش در راستای ضخامت خطی فرض می شود.
- کرنش در طول الیاف اولیه در تمامی لایه ها به صورت نمایی تغییر می کند.
- کرنش خروجی الیاف اولیه در هر لایه، ورودی برای لایه بعدی می باشد.
- اختلاف کرنش های خروجی و ورودی در تمام لایه ها یکسان می باشد.
- کرنش در لایه بالایی حداکثر و در لایه پایینی حداقل بوده و یا شیب ثابت در طول ضخامت تغییر می کند.
- مولد ایجاد شده در پشت صفحه هدف خطی فرض می شود.
- رفتار انرژی جذب شده ناشی از شکست الیاف اولیه و تغییر شکل الیاف ثانویه به طور مستقل می باشد.
- سرعت امواج طولی و عرضی در تمام لایه ها یکسان می باشد.
- حرکت گلوله در خلال نفوذ در طول هر فاصله زمانی یکنواخت می باشد.
- گلوله در خلال رویداد برخورد بالستیکی با هدف در تماس می باشد.
- جابه جایی گلوله و ارتفاع مخروط تشکیل شده در هر فاصله

زمانی یکسان می باشد.

- سرعت های گلوله و مخروط در هر فاصله زمانی یکسان، برابر می باشند.
 - گلوله در طول برخورد صلب است و بدون تغییر شکل باقی می ماند.
- در شکل ۱ تنش در تارهای اولیه در مجاورت نقطه برخورد حداکثر و در انتهای ناحیه تحت تنش واقع شده (شعاع موج پلاستیک) صفر است.

۳-۱- انرژی جذب شده دینامیکی از پرتابه به صفحه هدف

با در نظر گرفتن سرعت یکنواخت برای کل ناحیه مخروط ایجاد شده، V_0 ، برابر است با:

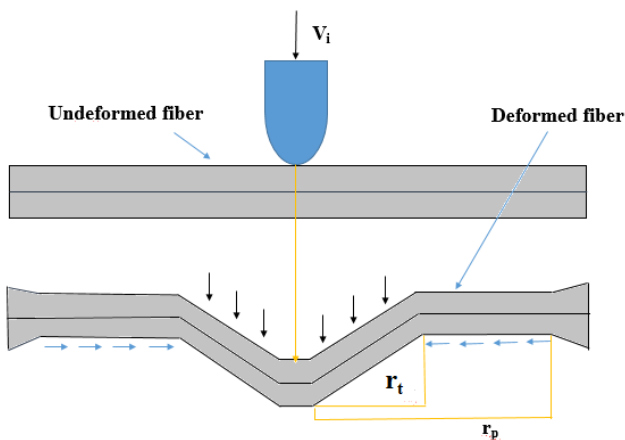
$$E_{Kp,0} = \frac{1}{2} m_p V_0^2, \quad m_p = \pi R_p^2 t \rho \quad (13)$$

از بررسی مکانیزم های جذب انرژی می توان سرعت خروج گلوله از هدف V_r و همچنین سرعت حد بالستیک V_0 را پیش بینی کرد. کاهش انرژی پرتابه بر اثر برخورد برابر است با:

$$E_L = \frac{1}{2} m_p (V_0^2 - V_r^2), \quad m_p = \pi R_p^2 t \rho \quad (14)$$

سرعت پرتابه در انتهای فاصله زمانی i برابر است با:

$$V_i = \sqrt{\frac{\frac{1}{2} m_p V_0^2 - E_{L,i}}{\frac{1}{2} (m_p + m_{c,i})}}, \quad m_p = \pi R_p^2 t \rho, \quad m_{c,i} = \pi R_t^2 \quad (15)$$



شکل ۱. تغییر شکل تار بر اثر برخورد عرضی پرتابه

Fig. 1. Deformation of the yarn/fiber due to the transverse impact of projectile

مساحت سطح مقطع به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$A = 4d_p h_1 \quad (20)$$

بنابراین، به دلیل موج عرضی در دو طرف پرتابه انتشار یافته و الیاف دارای بافت دوبعدی است، عبارت بالا باید در ضریب چهار ضرب گردد. همچنین، در معادله (۱۹) برای به دست آوردن انرژی مکانیزم شکست کششی الیاف (۲ لایه) برای مواد الاستیک، تنش از رابطه (۲) و برای مواد غیر الاستیک تنش از رابطه (۱۱) استفاده می‌گردد.

۳-۴- انرژی جذب شده در تغییر شکل الاستیک الیاف ثانویه

الیاف ثانویه، کرنش‌های متفاوتی، وابسته به موقعیت خود تحمل می‌کنند. نقاطی که نزدیک‌تر به نقطه برخورد هستند، به طور تجربی تنها مقدار کمی تا کرنش شکست فاصله دارند، در حالی که نقاطی که در فاصله دور از نقطه برخورد هستند هیچ کرنشی در آن‌ها دیده نمی‌شود. این شرایط باعث ایجاد شرایط مرزی بر اساس تغییر در کرنش ε با فاصله از نقطه برخورد می‌شود، که در $r = d/2$ برابر کرنش $\varepsilon = \varepsilon_0$ و در $r = r_{t,i}$ برابر $\varepsilon = 0$ می‌شود. ε_0 کرنش شکست کامپوزیت است. تارهای ثانویه متناسب با موقعیت خود کرنش متفاوتی را تحمل می‌کنند. در صورتی که تغییرات کرنش از نقطه A تا B خطی فرض شود، شرایط مرزی زیر را برای تغییرات کرنش با فاصله از محل برخورد در فاصله زمانی t خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{sy} &= \varepsilon_{py} \quad \text{at } r = \frac{d}{2}, \quad \text{i.e., at point } A, \\ \varepsilon_{sy} &= 0 \quad \text{at } r = r_{t,i}, \quad \text{i.e., at point } B, \\ \varepsilon_{sp} &= \varepsilon_0 b \frac{x}{a} \end{aligned} \quad (21)$$

با استفاده از تناسب خطی کرنش در سرتاسر منطقه مخروط ایجاد شده و درون الیاف ثانویه برابر است با:

$$\varepsilon_{sy,i} = \frac{2(r_i - r)}{(2r_i - d)} \varepsilon_{py,i} \quad (22)$$

همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، با در نظر گرفتن یک المان حلقه‌ای با شعاع داخلی و بیرونی r و $r + dr$ حجم dV برابر است با:

$$dV = h(2\pi r - 8r \sin^{-1} \frac{d}{2r}) dr \quad (23)$$

۳-۲- انرژی جنبشی ایجاد شده در پشت صفحه کامپوزیتی تحت برخورد بالستیکی

انرژی جذب شده به وسیله مکانیزم انتقال انرژی جنبشی از پرتابه به صفحه هدف انرژی جنبشی حرکت مخروط در زمان t با استفاده از معادله‌ی زیر به دست می‌آید.

$$E_{KE,i} = \sum_{i=0}^{i=n} \frac{1}{2} \pi R_{t,i}^2 h_1 \rho V_i^2 \quad (16)$$

V_i سرعت مخروط متحرک است.

۳-۳- انرژی جذب شده در شکست کششی الیاف اولیه

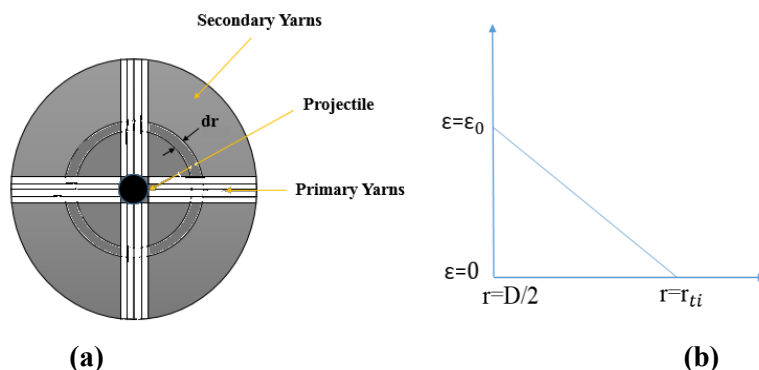
هنگامی که جبهه موج کرنشی از یک نقطه تار عبور می‌کند، ماده تار از خارج به سمت محل برخورد حرکت می‌کند (شکل ۱) و تار در پشت موج پلاستیک شبیه مخروط با رأسی در نقطه برخورد شکل داده می‌شود. قاعده این مخروط به سمت بیرون نقطه برخورد با سرعتی برابر با سرعت موج عرضی گسترش می‌یابد. در هر لایه تنش در نقطه برخورد حداکثر است و در طول تار کاهش می‌یابد. می‌توان تغییرات کرنش در طول تار اولیه را با یک تابع نمایی به صورت زیر تخمین زد [۳]:

$$\varepsilon_{py} = \varepsilon_0 b^{\frac{x}{a}} \quad (17)$$

که در آن b یک ثابت کوچک‌تر از ۱ و a عرض تار و ε_0 کرنش در موقعیت $x = 0$ است. بنابراین با استفاده از معادله بالا کل انرژی جذب شده به وسیله مکانیزم شکست کششی الیاف (۲ لایه) برابر است با:

$$E_{py} = E_{py,1} + E_{py,2} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} E_{py} &= \sum_{i=0}^{i=n} A \int_0^{r_{p,i}} \left(\int_0^{\varepsilon_1 = \varepsilon_0 b^{\frac{x}{a}}} \sigma_{11}(\varepsilon) d\varepsilon \right) dx + \\ & \sum_{i=0}^{i=n} A \int_0^{r_{p,i}} \left(\int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2 = 2\varepsilon_0 b^{\frac{x}{a}}} \sigma_{11}(\varepsilon) d\varepsilon \right) dx \end{aligned} \quad (19)$$



شکل ۲. تغییر شکل الیاف ثانویه هدف کامپوزیتی در نقطه برخورد. (ب) تغییرات کرنش در نقطه ضربه

Fig. 2. (a) Secondary yarns deformation of a composite target during ballistic impact; (b) Strain variation at the impact point

در آن اتفاق میافتد، درصد لایه لایه شدگی و G_{IIcd} نرخ افزایش انرژی کرنشی دینامیکی بحرانی در مود II می باشد.

۳-۶- انرژی جذب شده ناشی از ترک ماتریس

مکانیزم دیگر جذب انرژی، مانند پدیده ورقه شدن در ابتدای خرابی اهداف ساخته شده از کامپوزیت ایجاد می شود و به تنهایی مقدار جذب انرژی آن بسیار کم بوده، ولیکن بر روی پدیده های دیگر خرابی دو مکانیزم های دیگر جذب انرژی مؤثر بوده و باعث کاهش مقاومت به ضربه هدف می شود ترک خوردگی ماتریس است. انرژی جذب شده ناشی از ترک خوردگی زمینه از معادله (۲۸) به دست می آید.

$$E_{Mc,i} = \sum_{i=0}^{i=n} P_m \pi A_{ql} h V_m r_{del,i}^2 E_{m,i} \quad p_m \quad (28)$$

درصد ترک خوردگی زمینه، A_{ql} درصدی از مساحت دایره های که شکست ماتریسی در آن اتفاق می افتد، ضخامت هدف کامپوزیتی و $E_{m,i}$ انرژی جذب شده توسط زمینه در واحد حجم می باشد.

۳-۷- انرژی جذب شده ناشی از سوراخ برشی

با برخورد گلوله به هدف استحکام برشی ماده کامپوزیتی هدف از سوراخ شدن آن ممانعت می کند، در نتیجه می بایست مقداری از انرژی گلوله صرف غلبه بر استحکام برشی هدف گردد. این انرژی پس از فائق آمدن بر استحکام برشی موجب سوراخ شدن هدف می شود. تشکیل سوراخ برشی برای کامپوزیت های تقویت شده با شیشه که کرنش گسیختگی بالایی در نرخ های بالای کرنش دارد مشاهده نشده است، ولی در کامپوزیت های تقویت شده با کربن یا کولار، ذات شکننده

بنابراین انرژی جذب شده در تغییر شکل الیاف ثانویه را می توان از معادله زیر به دست آورد:

$$E_{sy} = E_{sy,1} + E_{sy,2} \quad (24)$$

$$E_{sy} = \sum_{i=0}^{i=n} \int_{0.5d_p}^{x_{i,j}} \left(\int_0^{\epsilon_1} \sigma_{11}(\epsilon) d\epsilon \right) h_1 \{2\pi x - 4d_p\} dx + \sum_{i=0}^{i=n} \int_{0.5d_p}^{x_{i,j}} \left(\int_{\epsilon_1}^{\epsilon} \sigma_{11}(\epsilon) d\epsilon \right) h_1 \{2\pi x - 4d_p\} dx \quad (25)$$

بنابراین در معادله (۲۵) برای به دست آوردن انرژی مکانیزم شکست کششی الیاف (۲ لایه) برای مواد الاستیک، تنش از رابطه (۲) و برای مواد غیر الاستیک تنش از رابطه (۱۱) استفاده می گردد.

۳-۵- انرژی جذب شده ناشی از لایه لایه شدگی

بخشی از سطح مخروط لایه لایه شدگی و ترک خوردن زمینه را تحمل می کند. در نتیجه لایه لایه شدگی و ترک خوردگی زمینه، که در ناحیه مخروطی تحمل می شوند، به شکل شبه نواری است که A_{ql} مقداری از مساحت دایره در نظر گرفته شده را می گیرند.

$$A = \pi r_{Dl}^2 A_{ql} \quad (26)$$

انرژی جذب شده ناشی از لایه لایه شدگی از معادله زیر به دست می آید.

$$E_{Dl,i} = \sum_{i=0}^{i=n} P_d \pi r_{del,i}^2 A_{ql} G_{IIcd} \quad (27)$$

که در عبارت A_{ql} درصدی از مساحت دایره ای که لایه لایه شدگی

$$E_{Sp,i} = \sum_{i=0}^{i=n} h_{1,i} S_{Sp} \pi d_p h_1 \quad (33)$$

شکل ۳ روند نمای محاسباتی تئوری ارائه شده را نشان می‌دهد.

۴- بررسی نتایج تئوری مواد الاستیک و غیرالاستیک

در این قسمت به بررسی و مقایسه نتایج به دست آمده از مدل تحلیلی با نتایج به دست آمده از نتایج حاصل از آزمایش‌های مختلف برای کامپوزیت‌های کولار/الاستومر [۹]، پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که در همه‌ی مدل‌های مورد بررسی هدف کامپوزیتی ۱۰۰ میلی‌متر در ۱۰۰ میلی‌متر بوده و جرم، قطر و طول پرتابه به ترتیب ۹/۳۲ گرم، ۱۰ میلی‌متر و ۱۶/۷۵ میلی‌متر می‌باشد. خواص مکانیکی لایه‌های کامپوزیتی کولار/اپوکسی در جدول ۱، خواص مکانیکی و پارامترهای هندسی لایه‌های کامپوزیتی کولار/الاستومر در جدول ۲ و نمودار تنش-کرنش در شکل ۴ نشان داده شده است.

معمولاً در سرعت‌های بالاتر از حد بالستیک، به دلیل اینکه با افزایش سرعت اختلاف میان انرژی اولیه پرتابه و انرژی جذب شده با شیب تند افزایش می‌یابد [۱] و انرژی جذب شده کسر کمی از انرژی برخورد خواهد بود، دقت سرعت خروجی محاسبه شده نمی‌تواند گویای دقت تئوری ارائه شده باشد. به همین دلیل، مقایسه نتایج حاصل از تئوری ارائه شده و نتایج تجربی محققین دیگر در حد بالستیک که معمولاً بیشترین خطا را خواهد داشت، صورت می‌گیرد. به منظور صحت‌گذاری

کربن و کولار که اساس کامپوزیت است مسئول تغییر مکانیزم آسیب می‌باشد. بسته به نوع ماده کامپوزیتی هدف و مواد اولیه تشکیل دهنده آن، می‌توان به خصوصیات هدف پی برد، و با توجه به این که هدف ذات شکننده دارد یا خیر می‌توان درک کرد که آیا می‌توان از این مکانیزم صرف‌نظر کرد و یا آن را در جذب انرژی کل سهیم دانست.

$$E_{Sp,i} = \sum_{i=0}^{i=n} N \pi d_p h S_{Sp} h_{1,i} \quad (29)$$

که در معادله بالا S_{Sp} استحکام برش سوراخ، h ضخامت هر لایه، h_1 ضخامت کل هدف، N تعداد لایه‌ها و d_p قطر پرتابه می‌باشد. برای به دست آوردن استحکام برشی از روابط زیر استفاده می‌گردد.

$$S_{Sp} = \frac{F_1}{\pi d_p h_1} \quad (30)$$

که F_1 نیروی تماسی است که از معادله‌های زیر محاسبه می‌شود.

$$F_1 = F_{11} + F_{12} \quad (31)$$

$$F_{11} = \frac{1}{2} \rho A_p V_0^2, \quad F_{12} = \sigma_z A_p \quad (32)$$

که F_1 و F_2 به ترتیب نیروی جبری ناشی از سرعت اولیه و نیروی ناشی از تنش در راستای ضخامت می‌باشد. بنابراین رابطه زیر به دست می‌آید:



شکل ۳. روند نمای مدل تئوری

Fig. 3. Flow chart depicting the analytical model

بالستیکی در شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب برای کامپوزیت کولار/الاستومر و کولار/اپوکسی نشان داده شده است. این شکل‌ها برای موردی با ضخامت هدف $h=2\text{mm}$ ، جرم گلوله $m=9/23\text{g}$ ، قطر گلوله $d=10\text{mm}$ می‌باشد. در شکل ۵ نتایج برای سرعت خروجی گلوله از هدف کامپوزیتی کولار/الاستومر ۲ لایه، در سرعت برخورد ۷۴ افزایش ۲/۱ درصدی را نشان می‌دهد، در صورتی که در حالت برخورد با سرعت ۱۱۳ متر بر ثانیه، سرعت خروج گلوله با ۱۰/۱۳ درصد کاهش نسبت به سرعت برخورد اولیه، از هدف خارج می‌گردد.

از طرفی، در شکل ۶ سرعت خروجی گلوله از هدف کامپوزیتی کولار/اپوکسی ۲ لایه، در سرعت برخورد ۵۱ کاهش ۴/۴ درصدی را نشان می‌دهد، در صورتی که در حالت برخورد با سرعت ۱۱۱ متر بر ثانیه، سرعت خروج گلوله با ۲/۷ درصد کاهش نسبت به سرعت برخورد اولیه، از هدف خارج می‌گردد.

با دقت در نمودار سرعت باقیمانده در برابر سرعت رویداد برخورد بالستیک می‌توان پی برد، هنگامی که سرعت رویداد برخورد بالستیکی

جدول ۲. خواص مکانیکی و پارامترهای هندسی لازم پرتابه و هدف برای مدل تحلیلی کامپوزیت کولار/الاستومر [۹، ۱۹]

Table 2. Required mechanical properties and geometrical parameters for analytical predictions of fabric kevlar/elastomer composite [9, 19]

مشخصات پرتابه	
سر کروی	شکل
۹/۲۳gr	جرم
۱۰mm	قطر
مشخصات هدف	
کولار/الاستومر	جنس
۰/۵۴	درصد حجمی ماتریس (الاستومر)
۰/۴۶	درصد حجمی الیاف
۱۰۰	طول (mm)
۱۰۰	عرض (mm)
۰/۵	ضخامت (mm)
۲	تعداد لایه‌ها
۱۴۴۰	جرم حجمی الیاف (kg/m^3)
۹۵۰	جرم حجمی ماتریس (kg/m^3)
۱۱۷۵/۴	جرم حجمی کامپوزیت (kg/m^3)
۰/۴	انرژی ترک‌خوردگی رزین (MJ/m^3)
۳۸۵۰	نرخ آزادسازی انرژی کرنشی (J/m^2)
۰/۸۵	ضریب انتقال موج تنش
۰/۵۵	کرنش شکست
۰/۴۰	درصدی از مساحت شکست ماتریس
۱/۹۸	مدول برشی (MPa)
۰/۸	درصد مقاومت برشی
۰/۴	درصد لایه‌لایه شدگی
۰/۴	درصد ترک‌خوردگی ماتریس

جدول ۱. خواص مکانیکی و پارامترهای هندسی لازم پرتابه و هدف برای مدل تحلیلی کامپوزیت کولار/اپوکسی [۱۳-۱۵]

Table 1. Required mechanical properties and geometrical parameters for analytical predictions of fabric kevlar/epoxy composite [13-15]

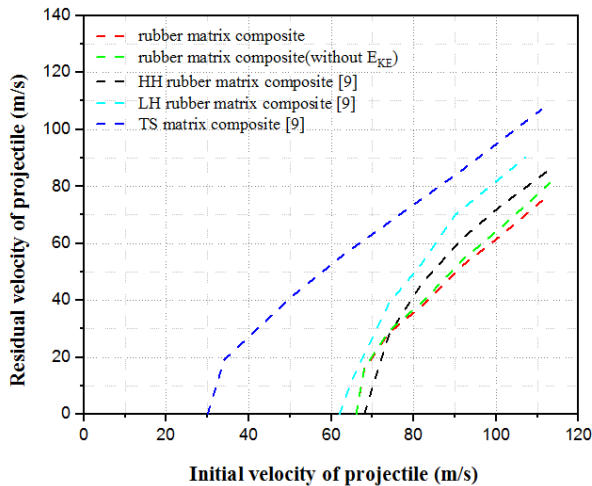
مشخصات پرتابه	
سر کروی	شکل
۹/۲۳gr	جرم
۱۰mm	قطر
مشخصات هدف	
کولار/اپوکسی	جنس
۰/۵۴	درصد حجمی ماتریس (اپوکسی)
۰/۴۶	درصد حجمی الیاف
۱۰۰	طول (mm)
۱۰۰	عرض (mm)
۰/۵	ضخامت (mm)
۲	تعداد لایه‌ها
۱۴۴۰	جرم حجمی الیاف (kg/m^3)
۱۰۵۱	جرم حجمی ماتریس (kg/m^3)
۱۲۳۰	جرم حجمی کامپوزیت (kg/m^3)
۰/۹	انرژی ترک‌خوردگی رزین (MJ/m^3)
۲۸۵۶	نرخ آزادسازی انرژی کرنشی (J/m^2)
۲۰/۴۱	مدول یانگ (GPa)
۰/۸۵	ضریب انتقال موج تنش
۰/۱۶۸	کرنش شکست
۰/۹۰	درصدی از مساحت شکست ماتریس
۹	مدول برشی (MPa)
۰/۹	درصد لایه‌لایه شدگی
۰/۹	درصد ترک‌خوردگی ماتریس

بر مدل تحلیلی نتایج این مدل در محاسبه سرعت حد بالستیک کامپوزیت کولار/الاستومر و کولار/اپوکسی برای پرتابه سرکروی در جدول ۳ ارائه و با داده‌های تجربی مرجع [۹] مقایسه شده است. این نتایج برای پانل دارای لایه‌های کامپوزیتی با ضخامت‌های مختلف و پرتابه فولادی به قطر ۱۰ میلی‌متر ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۳ مشخص است، مدل ارائه شده با دقت خوبی سرعت حد بالستیک را پیش‌بینی می‌کند.

با استفاده از مدل تحلیلی ارائه شده در این تحقیق، حد بالستیک برای کامپوزیت کولار/الاستومر ۲ لایه مطابق جدول ۳ به ترتیب ۶۶/۰۶ به دست آمده است. همچنین حد بالستیک حاصل از مدل تحلیلی برای کامپوزیت کولار/اپوکسی با نتایج تجربی مرجع [۹] مقایسه و ارزیابی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مطابقت خوبی بین داده‌های تجربی و نتایج مدل وجود دارد.

۴-۱- بررسی تغییرات سرعت خروجی

سرعت باقیمانده (V_R) گلوله به صورت تابعی از سرعت رویداد برخورد

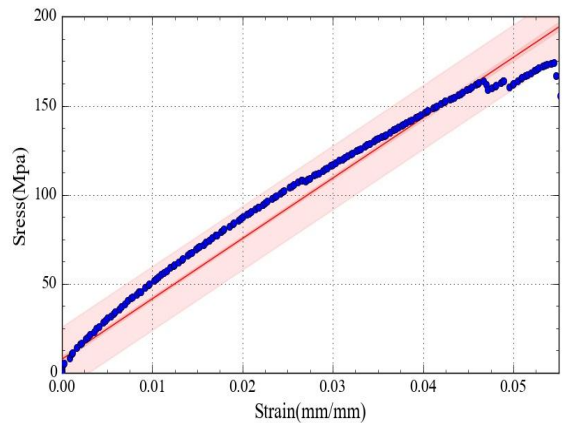


شکل ۵. مقایسه سرعت‌های باقی‌مانده مدل تحلیلی و تجربی بر روی هدف کامپوزیتی کولار/الاستومر با ضخامت ۱ میلی‌متر

Fig. 5. Comparison of residual velocities between analytical and experimental model on the kevlar/elastomer composite with a thickness of 1 mm

یعنی تغییر در ارتفاع مخروط (Z_i) و شعاع عرضی مخروط (r_{ii}) در هر زمان معین می‌شود.

با مقایسه سرعت‌های به‌دست‌آمده از مدل پیشنهادی تحلیلی که در جدول (۴) و (۵) اشاره شده است، می‌توان دریافت که این مدل برای کامپوزیت کولار/الاستومر با ضخامت‌های مختلف جواب مناسبی دارد و خطای مدل در پیش‌بینی سرعت خروجی گلوله در برخورد به هدف کامپوزیتی کولار/الاستومر ۲ لایه با سرعت‌های مختلف ۱۰۱،۹۲، ۸۲، ۷۴ و ۱۱۳ متر بر ثانیه در مقایسه با نتایج تجربی به ترتیب برابر ۲/۱٪، ۱۷/۳۶٪، ۱۵/۴۱٪، ۱۴/۳۲٪ و ۱۰/۱۳٪ می‌شود که قابل قبول می‌باشد. همچنین، خطای مدل در پیش‌بینی سرعت خروجی گلوله در برخورد به هدف کامپوزیتی کولار/ترموست ۲ لایه با سرعت‌های مختلف ۵۱، ۶۳، ۹۲ و ۱۱۱ متر بر ثانیه در مقایسه با نتایج تجربی به ترتیب برابر ۴/۴٪، ۳/۵٪، ۲/۳٪ و ۲/۷٪



شکل ۴. منحنی تنش-کرنش کامپوزیت کولار/الاستومر [۹]

Fig. 4. Tensile stress-strain plot of fabric kevlar/elastomer composite [9]

بالاتر از حد بالستیکی افزایش می‌یابد، به‌طور مشابه سرعت باقی‌مانده گلوله نیز افزایش می‌یابد؛ اما این افزایش خیلی شیب تندتری از حد بالستیکی فوق‌الذکر را دارد. برای مثال اگر فرض شود که عمل سوراخ کردن با سرعت رویداد برخورد بالستیکی ۱۵۸ متر بر ثانیه رخ نمی‌دهد اما با سرعت برخورد بالستیکی ۱۵۹ متر بر ثانیه، ایجاد سوراخ کامل با سرعت باقیمانده ۵۴ متر بر ثانیه رخ می‌دهد [۱۷]. این امر نظر به جابجایی گلوله و افزایش شعاع سطحی مخروط، در خلال رویداد برخورد بالستیکی می‌تواند توضیح داده شود. در سرعت رویداد برخورد بالستیکی معین، لایه‌های بالایی گسسته خواهد شد، درحالی‌که ممکن است لایه‌های پایینی گسسته نشوند. کرنش در لایه‌های پایینی در ابتدا افزایش می‌یابد و سپس شروع به کاهش می‌کند. این کار به هندسه مخروط تشکیل شده که با جابجایی گلوله، تغییر در ارتفاع مخروط و شعاع سطحی مخروط که در هر زمان معین می‌شود، بستگی دارد. در ایجاد سوراخ کامل، اگر کرنش تحمیل شده از کرنش مجاز، قبل از اینکه شروع به کاهش نماید تجاوز کند، هندسه مخروط تشکیل شده و در نتیجه، کرنش تحمیل شده با جابجایی گلوله،

جدول ۳. نتایج سرعت حد بالستیک برای کامپوزیت کولار/الاستومر

Table 3. Ballistic limit impact test results for kevlar/elastomer composite

ملاحظات	شعاع عرضی مخروط (mm)	شعاع خرابی عرضی (mm)	ضخامت هدف (mm)	قطر پرتابه (سرکروی) (mm)	جرم پرتابه (gf)	حد بالستیک تجربی [۹] (m/s)	حد بالستیک تحلیلی (m/s)	خطا (%)
کولار/الاستومر ۲ لایه	۱۰	۴/۷	۱۶/۷۵	۱۰	۹/۳۲	۶۸	۶۶/۰۶	۲/۸
کولار/اپوکسی ۲ لایه	۱۲	۲/۸۵	۱۶/۷۵	۱۰	۹/۳۲	۳۰	۲۷/۲۰	۹/۳۰

جدول ۴. مقایسه سرعت خروجی از کامپوزیت کولار/الاستومر با ضخامت ۱ میلی‌متر با سرعت‌های برخورد مختلف در خلال برخورد بالستیکی

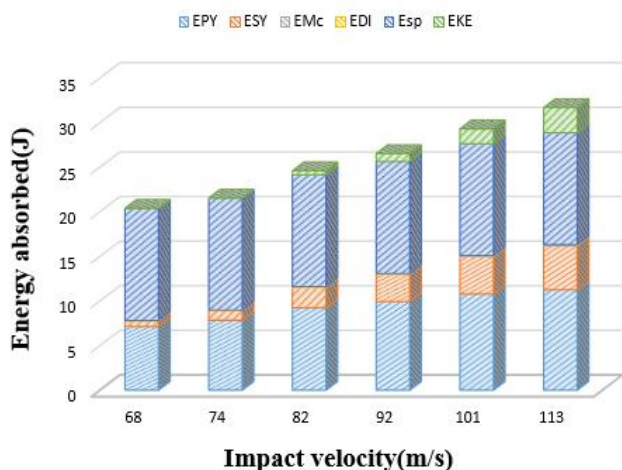
Table 4. Compare of residual velocities during ballistic impact with different velocities on the target of the kevlar / elastomer composite with a thickness of 1 mm

ضخامت هدف (mm)	قطر گلوله (mm)	جرم گلوله (g)	مقدار شعاع خرابی (mm)	مقدار شعاع عرضی (mm)	درصد خطا (%)	سرعت نهایی برخورد تحلیل تئوری (بدون E_{KE}) (m/s)	درصد خطا (%)	سرعت نهایی برخورد تحلیل تئوری (m/s)	سرعت نهایی برخورد تحلیل تجربی [۹] (m/s)	سرعت اولیه برخورد (m/s)
۱	۱۰	۹/۳۲	۴/۷	۱۰	-	۱۶/۰۹	-	۱۵/۷۸	۰	۶۸
۱	۱۰	۹/۳۲	۵	۱۱	۴/۵۷	۲۹/۲۸	۲/۱	۲۸/۶۱	۲۸	۷۴
۱	۱۰	۹/۳۲	۵/۴	۱۳	۱۴/۶۲	۳۹/۲۶	۱۷/۳۶	۳۸/۰۱	۴۶	۸۲
۱	۱۰	۹/۳۲	۵/۹	۱۴	۱۲/۱۹	۵۴/۴۴	۱۵/۴۱	۵۲/۴۴	۶۲	۹۲
۱	۱۰	۹/۳۲	۶/۳۵	۱۵/۲۵	۱۰/۴۷	۶۵/۳۵	۱۴/۳۲	۶۲/۵۴	۷۳	۱۰۱
۱	۱۰	۹/۳۲	۶/۹۵	۱۶	۵/۶۹	۸۱/۱۰	۱۰/۱۳	۷۷/۲۸	۸۶	۱۱۳

جدول ۵. مقایسه سرعت خروجی از کامپوزیت کولار / ترموست با ضخامت ۱ میلی‌متر با سرعت‌های برخورد مختلف در خلال برخورد بالستیکی

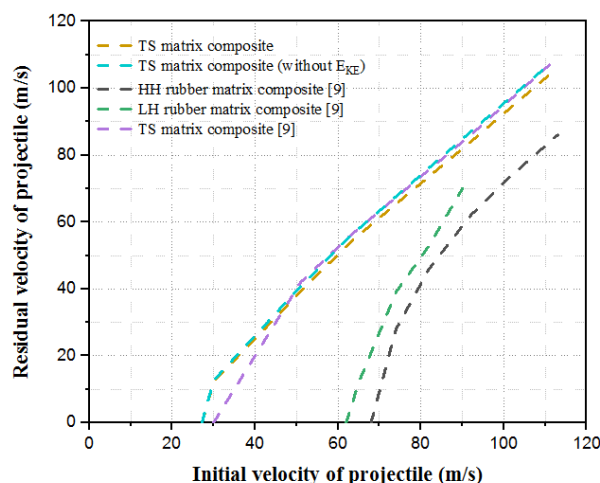
Table 5. Compare of residual velocities during ballistic impact with different velocities on the target of the kevlar / epoxy composite with a thickness of 1 mm

ضخامت هدف (mm)	قطر گلوله (mm)	جرم گلوله (g)	مقدار شعاع خرابی (mm)	مقدار شعاع عرضی (mm)	درصد خطا (%)	سرعت نهایی برخورد تحلیل تئوری (بدون E_{KE}) (m/s)	درصد خطا (%)	سرعت نهایی برخورد تحلیل تئوری (m/s)	سرعت نهایی برخورد تحلیل تجربی [۹] (m/s)	سرعت اولیه برخورد (m/s)
۱	۱۰	۹/۳۲	۲/۸۵	۱۲	-	۱۲/۶۳	-	۱۲/۲۷	۰	۳۰
۱	۱۰	۹/۳۲	۳	۱۴	۰/۶	۴۰/۷۵	۴/۴	۳۹/۱۹	۴۱	۵۱
۱	۱۰	۹/۳۲	۳/۷۵	۱۳	۰/۲۸	۵۵/۸۴	۳/۵	۵۳/۹۹	۵۶	۶۳
۱	۱۰	۹/۳۲	۵	۱۳/۲۵	۱/۱	۸۷/۰۱	۲/۳	۸۴	۸۶	۹۲
۱	۱۰	۹/۳۲	۶/۲۵	۱۲/۲۵	۰/۲۱	۱۰۷/۲۳	۲/۷	۱۰۴/۰۴	۱۰۷	۱۱۱



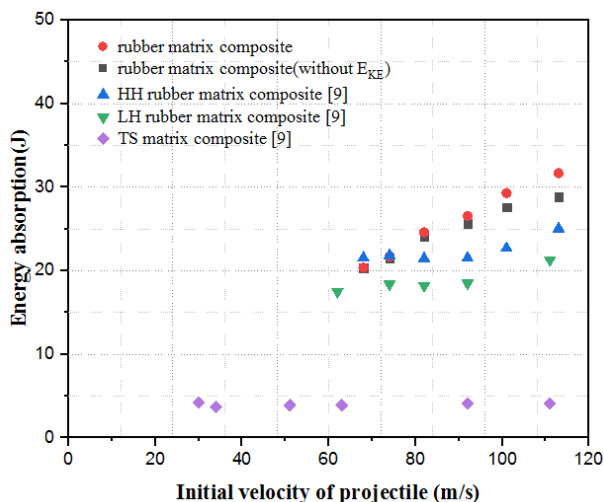
شکل ۷. مقایسه مکانیزم‌های گوناگون جذب انرژی مدل پیشنهادی در خلال برخورد بالستیکی سرعت‌های گوناگون بر روی هدف کامپوزیتی کولار/الاستومر با ضخامت ۱ میلی‌متر

Fig. 7. Comparison of the various mechanisms of energy absorption of analytical model during ballistic impact with different velocities on the target of kevlar/elastomer composite with a thickness of 1 mm



شکل ۶. مقایسه سرعت‌های باقی‌مانده مدل تحلیلی و تجربی بر روی هدف کامپوزیتی کولار/اپوکسی با ضخامت ۱ میلی‌متر

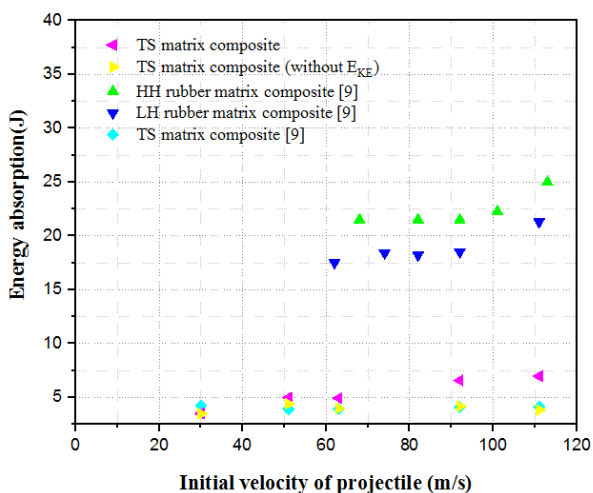
Fig. 6. Comparison of residual velocities between analytical and experimental model on the kevlar/epoxy composite with a thickness of 1 mm



شکل ۹. مقایسه جذب انرژی مدل پیشنهادی با نتایج تجربی در خلال برخورد بالستیکی سرعت‌های گوناگون بر روی هدف کامپوزیتی کولار/الاستومر با ضخامت ۱ میلی‌متر

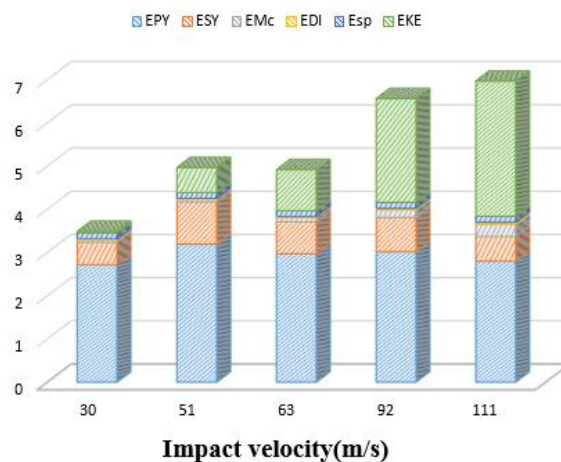
Fig. 9. Comparison of energy absorption between the analytical and experimental model during ballistic impact with different velocities on the target of kevlar/elastomer composite with a thickness of 1 mm

انرژی جذب شده کل توسط مکانیزم‌های مختلف در سرعت‌های مختلف برای کامپوزیت‌های کولار/الاستومر ۲ لایه و همچنین برای کامپوزیت کولار/ترموست ۲ لایه با استفاده از مدل تحلیلی به دست آمده و با نتایج حاصل از مدل تجربی [۹] در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. مقایسه نتایج تطابق خوبی را نشان می‌دهد انرژی جذب شده کل توسط مکانیزم‌های مختلف در سرعت‌های



شکل ۱۰. مقایسه جذب انرژی مدل پیشنهادی با نتایج تجربی در خلال برخورد بالستیکی سرعت‌های گوناگون بر روی هدف کامپوزیتی کولار/ترموست ۲ لایه با ضخامت ۱ میلی‌متر

Fig. 10. Comparison of energy absorption between the analytical and experimental model during ballistic impact with different velocities on the target of kevlar/elastomer composite with a thickness of 1 mm



شکل ۸. مقایسه مکانیزم‌های گوناگون جذب انرژی مدل پیشنهادی در خلال برخورد بالستیکی سرعت‌های گوناگون بر روی هدف کامپوزیتی کولار/اپوکسی ضخامت ۱ میلی‌متر

Fig. 8. Comparison of the various mechanisms of energy absorption of analytical model during ballistic impact with different velocities on the target of kevlar/epoxy composite with a thickness of 1 mm

می‌شود که قابل قبول می‌باشد.

۴-۲- بررسی انرژی جذب شده

در شکل ۷ و ۸ برای دو کامپوزیت کولار/الاستومر و کولار/اپوکسی ۲ لایه سهم هر مکانیزم از فرآیند جذب انرژی را در سرعت‌های متفاوت می‌توان مشاهده کرد. این نتایج نشان می‌دهد در سرعت‌های برخورد بالا، مثلاً در سرعت برخورد ۱۱۳ متر بر ثانیه در کامپوزیت کولار/الاستومر ۲ لایه، مکانیزم‌هایی که بیشترین میزان جذب انرژی را دارند، به ترتیب، انرژی جنبشی ایجاد شده در اثر برش سوراخ ($E_{Sp,i}$) با ۳۹ درصد، انرژی ناشی از انرژی جذب شده توسط تارهای اولیه ($E_{Py,i}$) با ۳۵ درصد، انرژی ناشی از انرژی جذب شده توسط تارهای ثانویه ($E_{Sy,i}$) با ۱۵ درصد و انرژی جنبشی ایجاد شده در پشت صفحه کامپوزیتی با ۸/۹ درصد می‌باشد و از سایر مکانیزم‌ها می‌توان صرف نظر کرد؛ اما در سرعت‌های برخورد بالا برای کامپوزیت کولار/اپوکسی ۲ لایه در سرعت برخورد ۱۱۱ متر بر ثانیه، مکانیزم‌هایی که بیشترین میزان جذب انرژی را دارند، به ترتیب، انرژی جنبشی ایجاد شده در پشت صفحه کامپوزیتی ۴۴ درصد، انرژی ناشی از انرژی جذب شده توسط تارهای اولیه ($E_{Py,i}$) با ۴۰ درصد، انرژی ناشی از انرژی جذب شده توسط تارهای ثانویه ($E_{Sy,i}$) با ۸ درصد و انرژی جنبشی ایجاد شده در اثر برش سوراخ ($E_{Sp,i}$) با ۲ درصد می‌باشد و از سایر مکانیزم‌ها می‌توان صرف نظر کرد.

جدول ۶. مقادیر جذب انرژی در خلال برخورد بالستیکی سرعت‌های گوناگون کامپوزیت‌های کولار/الاستومر با ضخامت یک میلی‌متر

Table 6. The amounts of energy absorbed during ballistic impact with different velocities on the target of kevlar /elastomer composite with a thickness of 1 mm

سرعت اولیه برخورد (m/s)	مقدار شعاع عرضی (mm)	مقدار شعاع خرابی (mm)	مقدار انرژی جذب شده تجربی [۹] (J)	مقدار انرژی جذب شده تحلیلی (J)	درصد خطا (%)	مقدار انرژی جذب شده تحلیلی (بدون E _{KKE}) (J)	درصد خطا (%)
۶۸	۱۰	۴/۷	۲۱/۵	۲۰/۳۸	۵/۸	۲۰/۳۴	۵/۲
۷۴	۱۱	۵	۲۱/۵	۲۱/۷	۰/۰۹۳	۲۱/۵۲	۰/۹۳
۸۲	۱۳	۵/۴	۲۱/۵	۲۴/۵۹	۱۲/۲۷	۲۴/۱۴	۱۴/۳۷
۹۲	۱۴	۵/۹	۲۱/۵	۲۶/۵۳	۱۹/۲۰	۲۵/۶۳	۲۳/۲۹
۱۰۱	۱۵/۲۵	۶/۳۵	۲۲/۲۷	۲۹/۳۰	۲۴/۰۶	۲۷/۶۳	۳۱/۵۶
۱۱۳	۱۶	۶/۹۵	۲۵	۳۱/۶۷	۱۵/۴۰	۲۸/۸۵	۲۶/۶۸

جدول ۷. مقادیر جذب انرژی در خلال برخورد بالستیکی سرعت‌های گوناگون کامپوزیت‌های کولار/اپوکسی با ضخامت یک میلی‌متر

Table 7. The amounts of energy absorbed during ballistic impact with different velocities on the target of kevlar /epoxy composite with a thickness of 1 mm

سرعت اولیه برخورد (m/s)	مقدار شعاع عرضی (mm)	مقدار شعاع خرابی (mm)	مقدار انرژی جذب شده تجربی [۹] (J)	مقدار انرژی جذب شده تحلیلی (J)	درصد خطا (%)	مقدار انرژی جذب شده تحلیلی (بدون E _{KKE}) (J)	درصد خطا (%)
۳۰	۱۲	۲/۸۵	۴/۲	۳/۴۹	۱۷/۸۵	۳/۴۵	۱۶/۹۰
۵۱	۱۴	۳	۳/۹	۴/۹۶	۱۲/۳۰	۴/۳۸	۲۷/۱۷
۶۳	۱۳	۳/۷۵	۳/۹	۴/۹۱	۱/۵	۳/۹۶	۲۵/۸۹
۹۲	۱۳/۲۵	۵	۴/۱	۶/۵۶	۱/۴	۴/۱۶	۵۹/۹۰
۱۱۱	۱۲/۲۵	۶/۲۵	۴/۱	۶/۹۶	۶/۵	۳/۸۳	۶۹/۷۰

تحلیل مقایسه جذب انرژی کامپوزیت‌های الاستومری و کامپوزیت ترموستی مکانیزم‌های جذب انرژی بررسی شده‌اند که این مکانیزم‌ها، شامل $E_{Kp,i}$ انرژی جنبشی ایجاد شده در پشت صفحه کامپوزیتی تحت برخورد بالستیکی، $E_{Py,i}$ انرژی جذب شده در شکست کششی الیاف اولیه، $E_{Sy,i}$ انرژی جذب شده در تغییر شکل الاستیک الیاف ثانویه، $E_{Dl,i}$ انرژی جذب شده ناشی از لایه‌لایه شدگی، $E_{Mc,i}$ انرژی جذب شده ناشی از ترک ماتریس و $E_{Sp,i}$ انرژی جذب شده ناشی از سوراخ برشی می‌باشد. در این مدل سعی گردیده است تا با طرح مکانیزم‌های جذب انرژی مهم و عمده مدلی ساده، کارآمد و درعین حال با دقت مناسب ارائه گردد تا علاوه بر سادگی تطابق خوبی با داده‌های تجربی [۹] موجود داشته باشد. همچنین در این مطالعه، سرعت باقیمانده پرتابه سرکروی در برخورد به کامپوزیت‌های کولار/الاستومر و کامپوزیت‌های کولار/اپوکسی ۲ لایه بررسی شده است.

مختلف برای کامپوزیت‌های کولار/الاستومر ۲ لایه با استفاده از مدل تحلیلی به دست آمده و با نتایج حاصل از مدل تجربی [۹] در جدول ۶ نشان داده شده است. همچنین نتایج حاصل از مدل تحلیلی کامپوزیت کولار/ترموست با نتایج مدل تجربی مرجع [۹] در جدول ۷ آورده شده است. مقایسه نتایج تطابق خوبی را نشان می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق، ابتدا برای تحلیل فرآیند نفوذ پرتابه‌های سرکروی در اهداف ساخته شده با کولار/الاستومر مدل تحلیلی بر پایه مدل غیرالاستیک ارائه شده و معادله‌های جذب انرژی برای رفتار غیرخطی مواد غیرالاستیک در تغییر شکل‌های بزرگ با پارامترهای مادی بر پایه مدل نیک [۱۶] ارائه گردید. همچنین برای اهداف ساخته شده با کولار/اپوکسی بر پایه مدل رفتار خطی در نظر گرفته شد. به منظور

ارائه شده به وسیله آزمایش تجربی صحت سنجی شده و سرعت اولیه لازم برای عبور از هدف، همان طور که در پیش بینی مدل مشخص شده بود، در آزمایش تجربی نیز همان سرعت اولیه منجر به خروج پرتابه از هدف شد. لذا، برای بررسی بیشتر بر روی سرعت های اولیه مختلف نیز انجام شد. نتایج به دست آمده نشان داد که انطباق قابل قبولی با یکدیگر دارند.

۶- فهرست علائم

عرض تار	a
طول	L
سطح مقطع تار	A
ضریب انتقال موج تنش	b
قطر پرتابه	d_p
درصد حجمی ماتریس	V_m
درصد حجمی الیاف	V_f
انرژی جنبشی منتقل شده در پشت صفحه کامپوزیتی	E_{KE}
انرژی منتقل شده به مخروط در فاصله زمانی i	$E_{kp,i}$
انرژی جذب شده به دلیل ورقه های ورقه ای شدن در فاصله زمانی i	$E_{DL,i}$
مدول کششی کامپوزیت ترموست	E
انرژی ازدست رفته پرتابه	E_L
انرژی ازدست رفته پرتابه در انتهای فاصله زمانی i	E_{Li}
انرژی جذب شده به دلیل ترک خوردگی رزین بر واحد حجم	E_{Mc}
انرژی جذب شده به دلیل ترک خوردگی رزین در انتهای فاصله زمانی i	$E_{Mc,i}$
انرژی جذب شده توسط تارهای اولیه در انتهای فاصله زمانی i	$E_{Py,i}$
انرژی جذب شده توسط تارهای ثانویه در انتهای فاصله زمانی i	$E_{Sy,i}$
انرژی جذب شده توسط نیروی برش در انتهای فاصله زمانی i	$E_{Sp,i}$
نرخ آزادسازی انرژی کرنشی بحرانی	G_{II}
ضخامت کامپوزیت	h
ضخامت یک لایه	h_1

نتایج نشان می دهد کامپوزیت ساخته شده با پارچه کولار و ماتریس الاستومر ۲ لایه میزان جذب انرژی بالایی، به دلیل استحکام بالای پارچه که با خواص دمپینگ بالای لاستیک توأم شده است، در مقایسه با پارچه کولار و ماتریس ترموست دارد. با برخورد پرتابه به هدف امواج عرضی در راستای تاروپود منتشر شده و کل پارچه در دفع انرژی پرتابه سهیم می شود. لاستیک به دلیل استحکام و مقاومت به ضربه بالا تأثیر بسزایی در دفع انرژی پرتابه دارد. از آنجاکه الاستومر نیز نقش تعیین کننده ای در انتقال انرژی جنبشی پرتابه و موج شوک آن به هدف دارد؛ بنابراین می توان برای جذب زیاد انرژی در مکانیزم شکست کامپوزیت از آن استفاده نمود. کامپوزیت های ساخته شده با ماتریس الاستومری در این مطالعه به دلیل محدود نمودن تغییر شکل پارچه عملکرد مناسبی در برابر ضربه دارند چراکه حضور الاستومر مانع تغییر شکل پارچه در مقایسه با کامپوزیت های ترموست نمی شود و پارچه حداکثر کشش خود را برای جذب انرژی بیشتر تجربه می کند که این جذب انرژی حدود ۵ برابر جذب انرژی کامپوزیت هایی با ماتریس ترموست می باشد. همچنین با افزایش سرعت رویداد برخورد بالستیکی، بیشتر از حد بالستیکی، افزایش سرعت باقیمانده گلوله شیبی تندتر نسبت به سرعت برخورد دارد.

بنابراین، کشش ایجاد شده در الیاف تأثیر زیادی بر میزان جذب انرژی جنبشی پرتابه می باشد و استحکام کششی زیاد پانل، انرژی جنبشی پرتابه را به صورت محسوس کاهش می دهد. لذا، نفوذ ماتریس الاستومر در پارچه کولار برخلاف ماتریس ترموست باعث افزایش بیشتر استحکام کششی آن شده و باعث مهم ترین عامل در جذب انرژی جنبشی پرتابه توسط پارچه می شود. با افزایش کشیدگی نخ های الیاف در مسیر پیشروی پرتابه در پانل، سرعت گلوله کاهش بیشتری پیدا کرده و با سرعت کمتری از پانل خارج می گردد. همچنین، با توجه به مقاله حاضر و مقایسه آن با مرجع [۱۹]، می توان به این نتیجه رسید که افزایش تعداد لایه های کامپوزیت تهیه شده در میزان جذب انرژی مؤثر است و به تبع آن می توان از گلوله با سرعت بیشتری برای نفوذ در پانل استفاده کرد.

با بررسی مجموع انرژی های حاصل از مکانیزم های مورد مطالعه در این مدل و مقایسه آن با داده های تجربی صورت گرفته می توان به تطابق خوب آن ها پی برد. خطای مدل موجود در این مقایسه حدود ۱۰٪-۲۰٪ می باشد که برای محاسبات مهندسی مناسب است. مدل

- rubber composites, *Composites science and technology*, 78 (2013) 69-74.
- [7] R. Mohamadipoor, E. Zamani, M. H. Pol, Analytical investigation of energy absorption and damage in the composite plates reinforced with nanoparticles under high velocity impact, *Aerospace Knowledge and Technology Journal*, 7(2) (2018) 35–50. (In Persian).
- [8] H. Ahmadi, G. Liaghat, Analytical and experimental investigation of high velocity impact on foam core sandwich panel. *Polymer Composites*, 40 (6) (2019)2258-2272.
- [9] A. Khodadadi, G. Liaghat, A.R. Bahramian, H. Ahmadi, Y. Anani, S. Asemani, O. Razmkhah, High velocity impact behavior of Kevlar/rubber and Kevlar/epoxy composites: a comparative study, *Composite Structures*, 216 (2019) 159-167.
- [10] M. Hedayatian, G. Liaghat, G. Rahimi, M. H. Pol, Numerical and Experimental Analyses Projectile Penetration in Grid Cylindrical Composite Structures Under High Velocity Impact, *Modares Mechanical Engineering*, 14(9) (2014) 17–26. (In Persian).
- [11] A. Taherzadeh-Fard, G. Liaghat, H. Ahmadi, O. Razmkhah, S.C. Charandabi, M.A. Zarezadeh-mehrizi, A. Khodadadi, *Composite Structures*, (2020) 112264.
- [12] R. Ogden, *Elements of the theory of finite, Nonlinear Elasticity: Theory and Applications*, 283 (2001) 1.
- [13] L.B. Tan, K.M. Tse, H.P. Lee, V.B.C. Tan, S.P. Lim, Performance of an advanced combat helmet with different interior cushioning systems in ballistic impact: Experiments and finite element simulations, *International Journal of Impact Engineering*, 50 (2012) 99-112.
- [14] I. Taraghi, A. Fereidoon, A. Mohyeddin, The effect of MWCNTs on the mechanical properties of woven Kevlar/epoxy composites, *Steel and Composite Structures*, 17(6) (2014) 825-834.
- [15] J. Van Hoof, D. Cronin, M. Worswick, K. Williams, D. Nandlall, Numerical head and composite helmet models to predict blunt trauma, in: *Proceedings of 19th International Symposium on Ballistics*, Interlaken, Switzerland, 2001.
- [16] N. Naik, Analysis of woven fabric composites for ballistic protection, in: *Advanced Fibrous Composite Materials for Ballistic Protection*, Elsevier, 2016, pp. 217-262.
- [17] S. Morye, P. Hine, R. Duckett, D. Carr, I. Ward, Modelling of the energy absorption by polymer
- انرژی جنبشی پرتابه $E_{Kp,0}$
- جرم پرتابه m_p
- شعاع جدایش یک‌لایه در فاصله زمانی i r_{del}
- فاصله پیموده شده توسط موج پلاستیک تا فاصله زمانی i $r_{p,i}$
- فاصله پیموده شده توسط موج عرضی تا فاصله زمانی i $r_{t,i}$
- سرعت اولیه پرتابه V_0
- سرعت حد بالستیک V_b
- سرعت پرتابه در انتهای فاصله زمانی i V_i
- سرعت باقیمانده پرتابه V_r
- فاصله پیموده شده توسط پرتابه تا فاصله زمانی i Z_i
- کرنش ε
- کرنش حداکثر در یک تار ε_0
- کرنش حداکثر در یک‌لایه در فاصله زمانی i ε_i
- کرنش در تار اولیه ε_{Py}
- کرنش در تار ثانویه ε_{Sy}
- چگالی ρ

۷- مراجع

- [1] Khodadadi, A and Liaghat, G., 2012. ‘‘Experimental and numerical investigation of penetration into targets made of kevlar laminate with STF’’. MSc Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, (In Persian).
- [2] V.K. Srivastava, Modeling and mechanical performance of carbon nanotube/epoxy resin composites, *Materials & Design*, 39 (2012) 432-436.
- [3] N. Naik, P. Shirao, B. Reddy, Ballistic impact behavior of woven fabric composites: Formulation, *International Journal of Impact Engineering*, 32(9) (2006) 1521-1552.
- [4] T.J. Kang, C. Kim, Impact energy absorption mechanism of largely deformable composites with different reinforcing structures, *Fibers and Polymers*, 1(1) (2000) 45-54.
- [5] S. Ishikawa, A. Tokuda, H. Kotera, Numerical simulation for fibre reinforced rubber, *Journal of Computational Science and Technology*, 2(4) (2008) 587-596.
- [6] X. Peng, G. Guo, N. Zhao, An anisotropic hyperelastic constitutive model with shear interaction for cord-

Investigation of Ballistic Impact Analysis on Single Layer Kevlar / Elastomer Composite Using Energy equations of Hyperelastic Materials. 27th Annual International Conference of Iranian Society of Mechanical Engineering. Tehran, 2019 (In Persian).

composites upon ballistic impact, *Composites science and technology*, 60(14) (2000) 2631-2642.

18]] W. Mars, A. Fatemi, Factors that affect the fatigue life of rubber: a literature survey, *Rubber Chemistry and Technology*, 77(3) (2004) 391-412.

[19] S.S. Asemani, G. Liaghat, H. Ahmadi, Y. Anani,

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

S. S. Asemani, Gh. Liaghat , H. Ahmadi, Y. Anani, A. Khodadadi . *Comparison of penetration process of 2-layer elastomeric composite with thermoset composite using energy absorption equations* ,*Amirkabir J. Mech. Eng.*, 53(6)(2021) 3657-3672.

DOI: [10.22060/mej.2020.18500.6829](https://doi.org/10.22060/mej.2020.18500.6829)



