

## بررسی اثرات شکل سر پرتابه و زاویه برخورد در ضربه سرعت بالا روی ۴ لایه‌های کامپوزیتی الیاف کربن و شیشه

مالک احمدی<sup>۱</sup>، سید محمدرضا خلیلی\*<sup>۲</sup>، رضا اسلامی فارسانی<sup>۳</sup>

۱- تهران - دانشگاه آزاد اسلامی تهران جنوب

۲و۳- تهران - دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ وصول: ۸۹/۱۰/۷، تاریخ پذیرش: ۹۰/۳/۲۱)

### چکیده

در این تحقیق، ۴ لایه کامپوزیتی از پارچه ساده الیاف کربن، پارچه ساده الیاف شیشه و پارچه های کربن- شیشه / کربن- شیشه- کربن - شیشه]، تحت ضربه سرعت بالا ( $118 m/s$ ) با پرتابه سر تخت یا سر نیم کروی در زاویه های برخورد ۰، ۳۰ و ۴۵ درجه نسبت به برخورد نرمال قرار گرفته و میزان خسارت وارده و همچنین حد بالستیک آنها تخمین زده شد. نتایج نشان داد که با افزایش زاویه برخورد در ضربه با پرتابه تخت در سرعت ۱۱۸ متر بر ثانیه روی ۴ لایه پارچه الیاف کربن و پارچه الیاف شیشه، حد بالستیک تا ۳۰٪ و میزان خسارت تا ۳۶٪ کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش زاویه برخورد در ضربه با پرتابه نیم کروی در سرعت ۱۱۸ متر بر ثانیه روی ۴ لایه پارچه الیاف کربن و پارچه الیاف شیشه، حد بالستیک تا ۲۵٪ افزایش و میزان خسارت تا ۴۰٪ کاهش می‌یابد. بیشترین خسارت و حد بالستیک در ۴ لایه پارچه الیاف شیشه و کمترین خسارت و حد بالستیک در ۴ لایه پارچه الیاف کربن مشاهده شده است که با ادغام این ۲ پارچه و ساخت ۴ لایه پارچه کربن - شیشه، حد بالستیک بالای پارچه الیاف شیشه و خسارت کم ۴ لایه پارچه کربن در ۴ لایه کربن- شیشه بدست آمده است.

واژه‌های کلیدی: زاویه برخورد، برخورد سرعت بالا، سر پرتابه، الیاف شیشه، الیاف کربن.

### ۱- مقدمه

نشان داده شده که با تغییر زاویه برخورد میزان خسارت و حد بالستیک به طرز چشمگیری تغییر می‌کند [۱]. در گزارشاتمی بدون در نظر گرفتن شکل پرتابه، میزان حد بالستیک در برخورد با زاویه ۶۰ درجه به میزان ۳۵ تا ۴۰ درصد بیشتر از حالت نرمال برآورد شده است [۲]. وابستگی میزان تغییرات حد بالستیک در برخورد با زاویه، به نوع شکل سر پرتابه نیز مورد بررسی قرار گرفته و پرتابه تخت عامل کاهنده و پرتابه نیم کروی عامل افزایشده حد بالستیک در زاویه بین ۰ تا ۴۵ درجه معرفی شده است [۳] و گزارش شده که میزان حد بالستیک در برخورد

در عهد باستان انسان‌ها از لایه های پارچه و الیاف بافته شده به عنوان لباس و پوشش محافظ در برابر حیوانات و برخورد با اجسام استفاده می‌کردند. امروزه چند لایه‌ها جایگاه بسیار مهمی در صنایع به خصوص نظامی و هوا فضا دارند. چند لایه های کامپوزیتی در سازه‌ها قرار می‌گیرند و میزان آسیب در اثر برخورد یا اعمال بار به سازه را کاهش می‌دهند. در تحقیقات گذشته برخورد را در حالت نرمال یعنی هنگامی که راستای حرکت گلوله نسبت به راستای هدف در حالت عمود باشد مورد بررسی قرار می‌دادند، ولی اخیراً

\* E-mail: smrkhalili2005@gmail.com

۱- کارشناس ارشد

۲- استاد

۳- استادیار

شده از جنس‌های مختلف بزرگ‌تر یا مساوی میانگین حد بالستیک تک تک آن‌ها است [۱۵]. نشان داده شده است که در ترکیب بندی لایه‌ها باید لایه های با دانسیته بالا در انتهای لایه چینی قرار گیرد تا بالاترین حد بالستیک بدست آید [۱۶]. در چند لایه‌ها هر چقدر ضخامت هر یک از لایه‌ها کمتر باشد حد بالستیک چند لایه نهایی بیشتر است [۱۷]. با توجه به نتایج نشان داده شد که هرچقدر زاویه شکل سر پرتابه کمتر شود حد بالستیک افزایش می‌یابد یعنی هرچقدر نوک پرتابه تیزتر باشد حد بالستیک کاهش می‌یابد [۱۸].

در زمینه برخورد با زاویه، روی ۴ لایه کربن و ۴ لایه شیشه و تأثیرات ادغام این دو نوع پارچه و شکل سر پرتابه تا کنون فعالیتی صورت نگرفته است و هدف از این تحقیق بررسی اثرات زاویه در ضربه سرعت بالا روی میزان خسارت و حد بالستیک و همچنین فواید ادغام پارچه های کربن و پارچه های شیشه در تغییرات زاویه برخورد می‌باشد.

## ۲- بخش تجربی

### ۲-۱- مواد

با توجه به جدول ۱، در ساخت ۴ لایه های مورد آزمایش در این تحقیق که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند، از پارچه الیاف کربن و پارچه الیاف شیشه استفاده شده است، که دارای بافت ساده (۰ و ۹۰ درجه) می‌باشند. با توجه به جدول ۲، ۴ لایه‌ها در ۳ نوع، کربن، شیشه و کربن- شیشه، و در ابعاد ۱۸×۱۸ سانتی متر مربع می‌باشند که به شیوه لایه گذاری دستی<sup>۱</sup> ساخته شده‌اند. رزین<sup>۲</sup> مورد استفاده در فرآیند و هاردنر<sup>۳</sup> ساخت شرکت هانتسمن<sup>۴</sup> است.

جدول ۱- مشخصات پارچه های کربن و شیشه.

		پارچه کربن	پارچه شیشه
بافت		ساده	ساده
الیاف	تار	High strength carbon fiber-3k-T300 (TROY)	E-glass(EW200)
	پود	High strength carbon fiber-3k-T300 (TROY)	E-glass(EW200)
پرداخت		خیر	خیر

با پرتابه با سر نیم کروی در زاویه بین ۰ تا ۵۳ درجه، تا ۳۴ درصد افزایش می‌یابد [۴].

در یک پژوهش علمی، توزیع انرژی در واحد زمان در ضربه نرمال و زاویه دار بسیار شبیه به هم، اما تنش‌های وارده به هدف در حالت زاویه دار کمتر از حالت نرمال محاسبه گردیده است [۵]. با توجه به نتایج یک تحقیق علمی نشان داده شده است، میزان کمانه کردن پرتابه، که رابطه مستقیمی با میزان انرژی وارده به هدف دارد، به طول پرتابه وابسته است یعنی پرتابه طولی‌تر در برخورد با زاویه، اثر کمتری دارد [۶]. برخورد در زاویه منجر به تغییر شکل الاستیک در راستای الیاف نشان داده شده است [۷]. در یک تحقیق، فاصله بین لایه‌ها عامل افزایش حد بالستیک معرفی شده است [۸] و آزمایش پرتابه های مختلف از نظر طول نشان داد ویژگی‌های مقاومتی هدف در زاویه، رابطه مستقیم با طول پرتابه دارد یعنی پرتابه طولی‌تر نسبت به پرتابه کوتاه‌تر اما مساوی از نظر جرم، خسارت کمتری می‌زند [۹]. در یک پژوهش نشان داده شده است که در برخورد با زاویه شکل خسارت دارای کشیدگی بیشتری نسبت به حالت نرمال است [۱۰].

با توجه به نتایج یک تحقیق، الیاف شیشه دارای عملکرد مقاومتی بالایی در برخورد حالت نرمال هستند [۱۱]. چند لایه های ساخته شده از جنس‌های سخت در برخورد زاویه دار دارای عملکرد بالاتری نسبت به جنس‌های نرم‌تر هستند [۱۲]. محاسبه شده است که عمق نفوذ در برخورد با زاویه کمتر از برخورد نرمال است [۱۳]. عمق تخریب در برخورد زاویه دار همواره دارای زاویه ای نزدیک به زاویه سطح است و هرچه پرتابه سبک‌تر باشد این زاویه کمتر است [۱۴]. با توجه به گزارشات، حد بالستیک در چند لایه‌های تشکیل

1- Hand Lay up  
2- Resin Epoxy (LY564)  
3- Hardener (CH560)  
4- Huntsman. Co



شکل ۱- نمونه ۴ لایه های ساخته شده.

جدول ۲- مشخصات ۴ لایه ها.

نوع چند لایه	نوع بافت	تعداد لایه	اندازه $cm^2$	ضخامت (mm)	چگالی $kg/m^3$
کربن (CC)	ساده	۴	۳۲۴	۱/۲۰	۱۲۲۰
شیشه (GG)	ساده	۴	۳۲۴	۰/۹۶	۱۵۲۰
کربن - شیشه (CG)	ساده	۴	۳۲۴	۱/۰۷	۱۳۷۰

CC = چهار لایه پارچه الیاف کربن (کربن-کربن-کربن-کربن)

GG = چهار لایه پارچه الیاف شیشه (شیشه-شیشه-شیشه-شیشه)

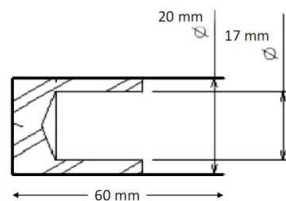
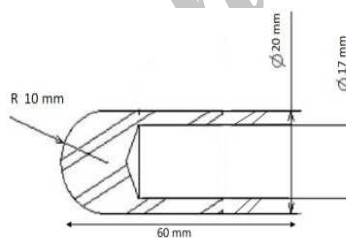
CG = چهار لایه پارچه الیاف کربن و پارچه الیاف شیشه (کربن-شیشه-کربن-شیشه)

جدول ۳- مشخصات پرتابه.

پرتابه	شکل نوک	قطر (میلی متر)	طول (میلی متر)	جرم (گرم)
تخت (F)	تخت	۲۰	۶۰	۲۵
نیم کروی (H)	کروی	۲۰	۶۰	۲۵

پرتابه تخت = Flat (F)

پرتابه نیم کروی = Hemispherical (H)



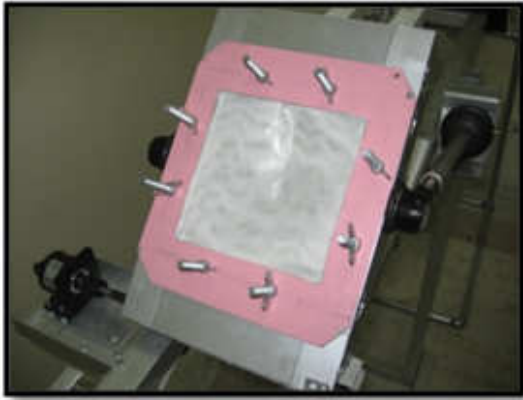
شکل ۲- پرتابه.

## ۲-۲- تجهیزات

در این تحقیق می‌باشد که از نوع تفنگ بادی است و قابلیت انجام ضربه در زوایای ۰ تا ۴۵ درجه از موقعیت برخورد نرمال را دارا است، محدوده سرعت پرتاب تا ۱۵۰ متر بر ثانیه می‌باشد و سرعت قبل و بعد از برخورد به وسیله سنسورهای مادون قرمز محاسبه می‌شود زاویه نگه‌دارنده هدف مورد آزمایش در شکل ۴ توسط یک انکودر<sup>۱</sup> نمایش داده می‌شود.

با توجه به جدول ۳، پرتابه‌ها (شکل ۲) دارای وزن ۲۵ گرم و سر تخت و نیم کروی، به صورت استوانه ای و از جنس آلومینیوم سخت کاری شده سری ۷۰۰۰ می‌باشند. شکل ۳ نشان دهنده دستگاه آزمایش ضربه (دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی) مورد استفاده

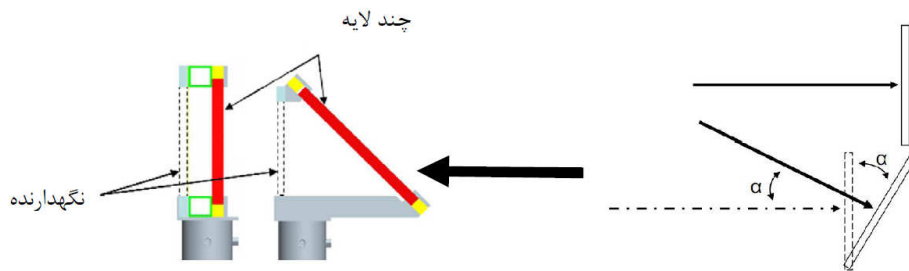
1- Encoder



شکل ۴- نگه دارنده ۴ لایه.



شکل ۳- دستگاه آزمایش ضربه.



شکل ۵- شماتیک زاویه  $\alpha$ .

### ۳-۲- زاویه برخورد

زاویه برخورد  $\alpha$  نشان داده شده در شکل ۵، نشانگر میزان شیب نگه‌دارنده قطعه هدف نسبت به حالت اولیه خود یعنی خط عمود است.

### ۴-۲- فرمول محاسباتی

در این تحقیق نتایج بر اساس حد بالستیک<sup>۱</sup> و میزان خسارت بررسی شده و انرژی برخورد و حد بالستیک از فرمول‌های زیر محاسبه می‌گردند.

$$E_i = \frac{1}{2} M_p (v_i^2) \quad (1) \text{ انرژی برخورد}^2$$

$$E_R = \frac{1}{2} M_p (v_R^2) \quad (2) \text{ انرژی پسماند}^3$$

$$E_a = E_i - E_R \quad (3) \text{ انرژی جذب شده هنگام عبور}^4$$

$$E_a \cong \frac{1}{2} M_p (v_{BL}^2) \quad \& \quad E_a = \frac{1}{2} M_p (v_i^2 - v_R^2)$$

### ۵-۲- روش آزمایش

حد بالستیک، عبارت است از کمترین میزان سرعت لازم که باید به پرتابه داد تا بتواند از هدف عبور کند و به عبارتی بیشترین میزان سرعتی که باید به پرتابه داد تا در آستانه عبور از هدف قرار گیرد. برای محاسبه حد بالستیک ۳ مرحله اجرا شده است.

$$v_{BL}^2 \cong v_i^2 - v_R^2$$

(۵) حد بالستیک<sup>۱</sup>

حد بالستیک =  $v_{BL}$

سرعت برخورد =  $v_i$

سرعت پسماند =  $v_R$

جرم پرتابه =  $M_p$

- 1- Ballistic limit
- 2- Impact Energy
- 3- Residual Energy
- 4- Absorbed Energy

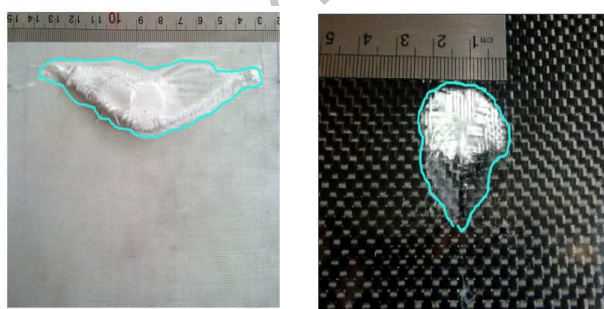
جدول ۴- آزمایش اولیه جهت بدست آوردن نتایج.

سرعت پسماند $V_R$ (m/s)	سرعت برخورد $V_i$ (m/s)	زاویه برخورد ( $\alpha$ )	نوع پرتابه	نوع ۴ لایه
۱۱۱	۱۱۸	۰	نیم کروی	۴ لایه کربن

جدول ۵- بدست آوردن نتایج دقیق حد بالستیک با پرتابه نیم کروی.

نتیجه	عبور	سرعت برخورد m/s	زاویه برخورد	نوع پرتابه	نوع چند لایه
عبور	بله	۴۱	۰	نیم کروی	۴ لایه کربنی
حد بالستیک تخمینی	بله	۴۰	۰	نیم کروی	۴ لایه کربنی
عبور	بله	۳۹	۰	نیم کروی	۴ لایه کربنی
حد بالستیک واقعی	بله	۳۸	۰	نیم کروی	۴ لایه کربنی
عدم عبور	خیر	۳۷	۰	نیم کروی	۴ لایه کربنی

محدوده حد بالستیک تخمینی است تا میزان دقیق حد بالستیک بدست آید. همان طور که از جدول ۵ مشاهده می‌شود، حد بالستیک تخمینی مورد آزمایش قرار گرفت و حد بالستیک واقعی در  $38 \text{ m/s}$  مشخص شد، چون اولین سرعتی است که پرتابه از ۴ لایه عبور می‌کند. با توجه به شکل ۶ در این تحقیق میزان خسارت به صورت محاسبه با رویت آسیب به وسیله چشم و اندازه گیری به وسیله خط کش و لوازم محاسبه صورت گرفته است. از هر نمونه ۲ بار آزمایش ضربه به عمل آمده است. در چند لایه کربن-شیشه، ضربه از جهت کربن اعمال شد و از هر نمونه پس از آزمایش ضربه، عکس برداری و میزان خسارت در واحد سانتی متر مربع و حد بالستیک در واحد متر بر ثانیه تعیین شد. در جدول ۶، نتایج آزمایش ضربه برای هر ۳ نوع ۴ لایه آورده شده است.



شکل ۶- نحوه محاسبه خسارت چند لایه در آزمایش ضربه.

۲-۵-۱- مرحله اول: با توجه به جدول ۴، در این مرحله یک آزمایش با سرعت  $118 \text{ m/s}$  بر روی هدف انجام می‌گیرد و سرعت برخورد و سرعت پسماند (بعد از برخورد) محاسبه می‌شود.

۲-۵-۲- مرحله دوم: با استفاده از فرمول انرژی جذب شده  $E_a = \frac{1}{2} M p (V_i^2 - V_R^2)$  میزان انرژی جذب شده از پرتابه توسط ۴ لایه در هنگام نفوذ بدست می‌آید. از این میزان و با استفاده از فرمول  $E = \frac{1}{2} M V^2$ ، سرعتی را که در آن گلوله به اندازه انرژی جذب شده در فرمول قبل انرژی دارد، محاسبه می‌شود، این میزان، همان حد بالستیک تخمینی است.

$$E_a = \frac{1}{2} M p (V_i^2 - V_R^2) \quad (1)$$

$$E_a = \frac{1}{2} M p (V_{BL}^2) \quad (2)$$

$$V_{BL}^2 \cong V_i^2 - V_R^2$$

$$V_{BL} \cong \sqrt{118^2 - 111^2} = 40$$

بنابراین خواهیم داشت: با توجه به نتیجه محاسبات میزان حد بالستیک تخمینی برای ۴ لایه کربن در برخورد با پرتابه نیم کروی، در برخورد نرمال  $40 \text{ m/s}$  بدست آمده است چون این میزان با در نظر گرفتن خطاهای تست، تا حدودی از میزان واقعی دور است، پس باید میزان دقیق را مورد آزمایش قرار دهیم.

۲-۵-۳- مرحله سوم: در این مرحله در حوالی حد بالستیک تخمینی، چند آزمایش انجام داده می‌شود. جدول ۵ نشان دهنده نتایج آزمایش‌های

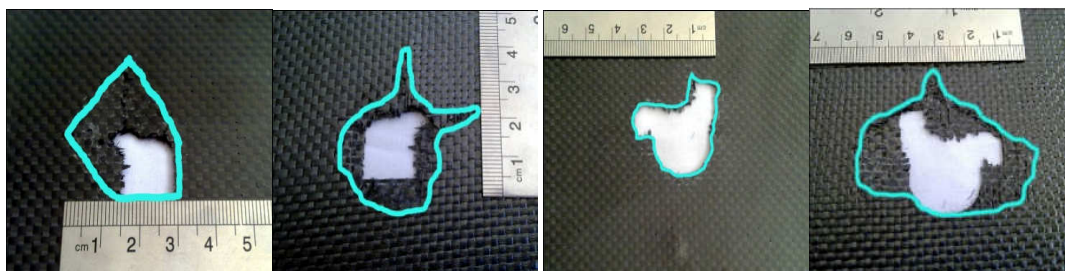
جدول ۶- نتایج آزمایش ضربه.

نوع چندلایه	شکل پرتابه	زاویه برخورد	سرعت اولیه	مساحت آسیب جلو	مساحت آسیب پشت	حد بالستیک
کربن	تخت	۰	۱۱۸	۱۰	۲۰	۴۰
کربن	تخت	۳۰	۱۱۸	۶/۹	۷۳	۲۵
کربن	تخت	۴۵	۱۱۸	۷	۷/۲	۳۰
کربن-شیشه	تخت	۰	۱۱۸	۲۰	۲۹	۷۴
کربن-شیشه	تخت	۳۰	۱۱۸	۶/۶	۱۸	۴۱
کربن-شیشه	تخت	۴۵	۱۱۸	۷	۱۸	۴۱
شیشه	تخت	۰	۱۱۸	۳۳	۳۳	۸۴
شیشه	تخت	۳۰	۱۱۸	۲۸	۳۶	۵۶
شیشه	تخت	۴۵	۱۱۸	۲۰	۳۷	۴۳
کربن	نیم کروی	۰	۱۱۸	۱۰/۱	۱۳	۳۸
کربن	نیم کروی	۳۰	۱۱۸	۵	۸/۷۵	۳۱
کربن	نیم کروی	۴۵	۱۱۸	۸	۹/۴	۳۷
کربن-شیشه	نیم کروی	۰	۱۱۸	۱۱	۳۴	۵۷
کربن-شیشه	نیم کروی	۳۰	۱۱۸	۱۰	۱۴	۵۴
کربن-شیشه	نیم کروی	۴۵	۱۱۸	۸	۲۱	۶۰
شیشه	نیم کروی	۰	۱۱۸	۳۵	۳۹	۶۶
شیشه	نیم کروی	۳۰	۱۱۸	۳۰	۴۱	۷۰
شیشه	نیم کروی	۴۵	۱۱۸	۸	۱۶	۷۴

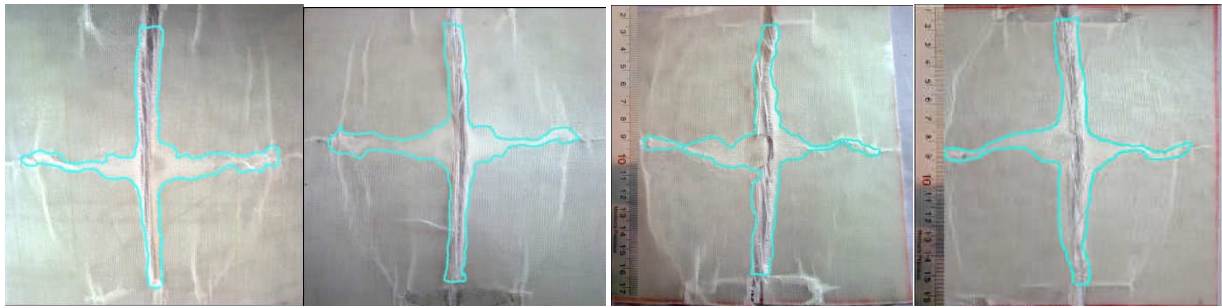
### ۳- نتایج و بحث

در برخورد پرتابه نیم کروی در سرعت ۱۱۸m/s و زاویه صفر درجه (برخورد نرمال)، مشاهده می‌شود خسارت وارده بر ۴ لایه کربن که در شکل ۷ نشان داده شده است، به صورت لوزی شکل و با رشد خطی ترک در راستای الیاف است. میزان خسارت در جلوی ۴ لایه بیشتر از میزان خسارت در پشت ۴ لایه می‌باشد. اما در ۴ لایه شیشه نشان داده شده در شکل ۸، خسارت وارده در راستای الیاف می‌باشد که در ادامه خسارت به یک موج دایروی در قسمت های بیرونی ۴ لایه رسیده است. میزان خسارت در ۲ طرف ۴ لایه در یک حد برابر قرار دارد. با توجه به شکل ۹ در ۴ لایه کربن- شیشه، خسارت در قسمت مرکزی به صورت دایروی است. میزان خسارت جلو کمتر از میزان خسارت در پشت این ۴ لایه می‌باشد.

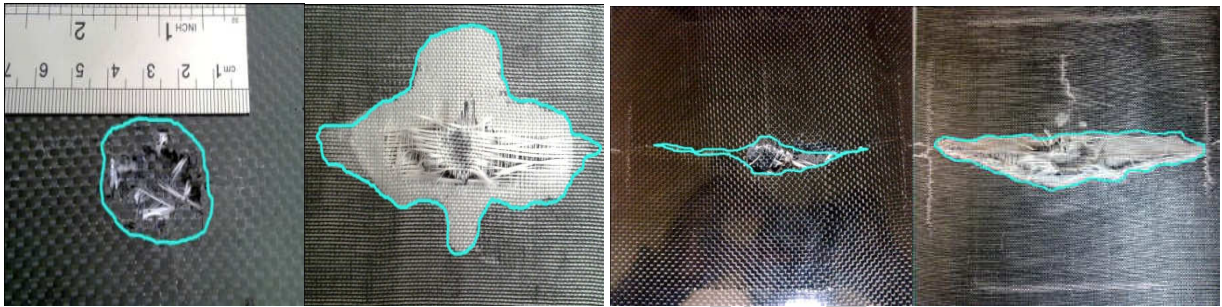
در برخورد پرتابه تخت در سرعت ۱۱۸m/s و زاویه صفر درجه (برخورد نرمال)، مشاهده می‌شود که خسارت وارده بر ۴ لایه کربن نشان داده شده در شکل ۷ به صورت دایروی اما با لبه های ناصاف است. میزان خسارت در جلوی ۴ لایه کمتر از میزان خسارت در پشت ۴ لایه می‌باشد. اما در ۴ لایه شیشه که در شکل ۸ قابل مشاهده است، خسارت وارده در راستای الیاف می‌باشد که در ادامه خسارت به یک موج دایروی در قسمت‌های بیرونی ۴ لایه رسیده است. میزان خسارت در ۲ طرف ۴ لایه در یک حد برابر قرار دارد. با توجه به شکل ۹ در ۴ لایه کربن- شیشه، خسارت در قسمت مرکزی به صورت دایروی و در ادامه، در راستای الیاف رشد کرده است. میزان خسارت جلو کمتر از میزان خسارت در پشت این ۴ لایه می‌باشد.



شکل ۷- برخورد با زاویه ۰ درجه در سرعت ۱۱۸ متر بر ثانیه بر روی ۴ لایه کربن.



شکل ۸- برخورد با زاویه ۰ درجه در سرعت ۱۱۸ متر بر ثانیه بر روی ۴ لایه شیشه.   
 نمای پشت پرتابه تخت نمای جلو پرتابه نیم کروی نمای پشت نمای جلو

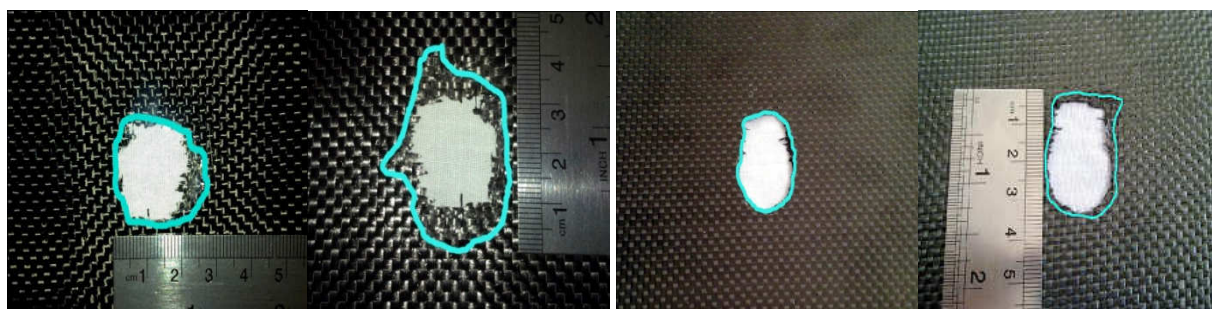


شکل ۹- برخورد با زاویه ۰ درجه در سرعت ۱۱۸ متر بر ثانیه بر روی ۴ لایه کربن-شیشه.   
 نمای پشت پرتابه تخت نمای جلو پرتابه نیم کروی نمای پشت نمای جلو

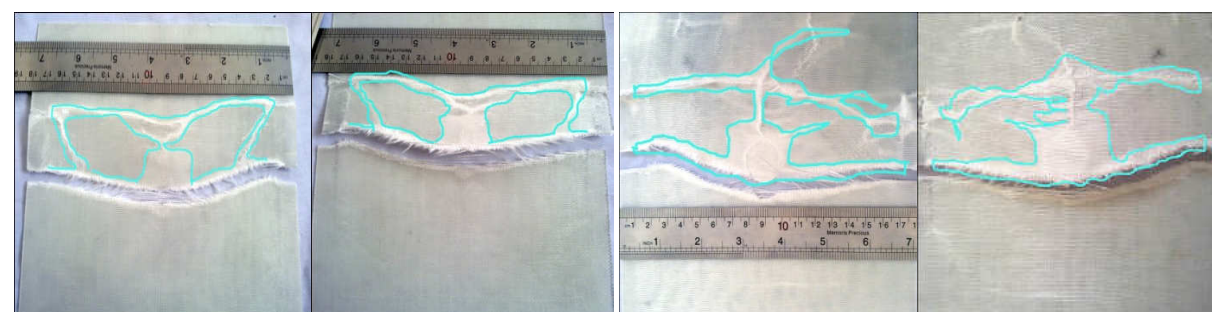
موج دو طرفه به شکل پروانه، و به طرف قسمت‌های بیرونی ۴ لایه رسیده است. میزان خسارت در ۲ طرف ۴ لایه در یک حد برابر قرار دارد. با توجه به شکل ۱۲ در ۴ لایه کربن-شیشه، خسارت در قسمت مرکزی دایروی و به شکل قطره برعکس است. خسارت پشت ۴ لایه به شکل خطی و با مساحت بیشتری در مرکز می‌باشد. میزان خسارت جلو کمتر از میزان خسارت در پشت این ۴ لایه می‌باشد. در برخورد پرتابه تخت در سرعت ۱۱۸m/s و زاویه ۴۵ درجه، مشاهده می‌شود که خسارت وارده بر ۴ لایه کربن نشان داده شده در شکل ۱۳، به صورت بیضوی و در نیمه بالایی ۴ لایه است. میزان خسارت در جلوی ۴ لایه تقریباً برابر با میزان خسارت در پشت ۴ لایه می‌باشد. اما در ۴ لایه شیشه که در شکل ۱۴ قابل مشاهده است، خسارت وارده در نیمه بالایی ۴ لایه می‌باشد و به این گونه که در قسمت میانی برخورد به صورت بیضوی و در ادامه، موج خسارت به صورت پروانه ای و در راستای محور افقی منتشر می‌شود. میزان خسارت در ۲ طرف ۴ لایه در یک حد برابر قرار دارد. با توجه به شکل ۱۵ در ۴ لایه کربن-شیشه، خسارت در قسمت مرکزی متمایل به بالا و به شکل بیضوی است. میزان خسارت جلو کمتر از میزان خسارت در پشت این ۴ لایه می‌باشد.

در برخورد پرتابه تخت در سرعت ۱۱۸m/s و زاویه ۳۰ درجه، مشاهده می‌شود که خسارت وارده بر ۴ لایه کربن نشان داده شده در شکل ۱۰، کشیده شده و به شکل قطره و با لبه صاف است. میزان خسارت در جلوی ۴ لایه تقریباً برابر با میزان خسارت در پشت ۴ لایه می‌باشد. اما در ۴ لایه شیشه که در شکل ۱۱ قابل مشاهده است، خسارت وارده در راستای الیاف و در نیمه بالایی ۴ لایه می‌باشد که در ادامه خسارت به یک موج دایروی در قسمت‌های بیرونی ۴ لایه رسیده است. میزان خسارت در ۲ طرف ۴ لایه در یک حد برابر قرار دارد. با توجه به شکل ۱۲ در ۴ لایه کربن-شیشه، خسارت در قسمت مرکزی و به شکل قطره است. میزان خسارت جلو کمتر از میزان خسارت در پشت این ۴ لایه می‌باشد.

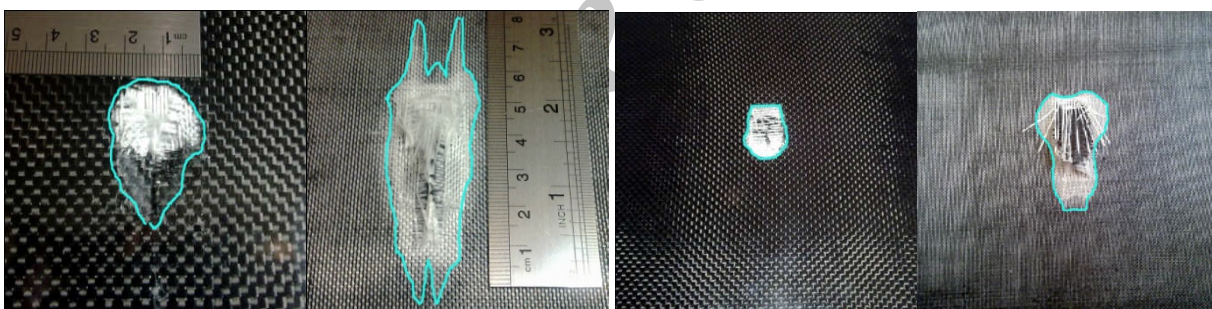
در برخورد پرتابه نیم کروی در سرعت ۱۱۸m/s و زاویه ۳۰ درجه، مشاهده می‌شود که خسارت وارده بر ۴ لایه کربن که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، از حالت کروی کشیده شده و به شکل بیضی و با لبه ناصاف است. میزان خسارت در جلوی ۴ لایه تقریباً برابر با میزان خسارت در پشت ۴ لایه می‌باشد. اما در ۴ لایه شیشه نشان داده شده در شکل ۱۱، خسارت وارده در راستای الیاف و در نیمه بالایی ۴ لایه می‌باشد که در ادامه خسارت به یک



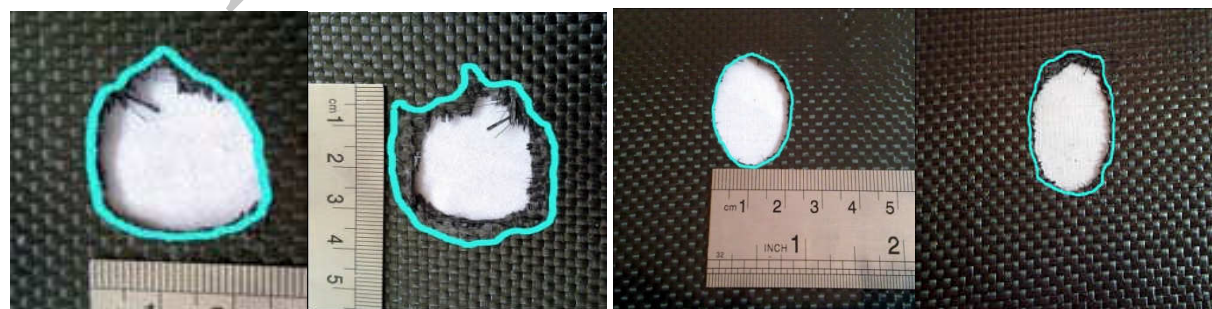
شکل ۱۰- برخورد با زاویه ۳۰ درجه در سرعت ۱۱۸ متر بر ثانیه بر روی ۴ لایه کربن.



شکل ۱۱- برخورد با زاویه ۳۰ درجه در سرعت ۱۱۸ متر بر ثانیه بر روی ۴ لایه شیشه.



شکل ۱۲- برخورد با زاویه ۳۰ درجه در سرعت ۱۱۸ متر بر ثانیه بر روی ۴ لایه کربن-شیشه.

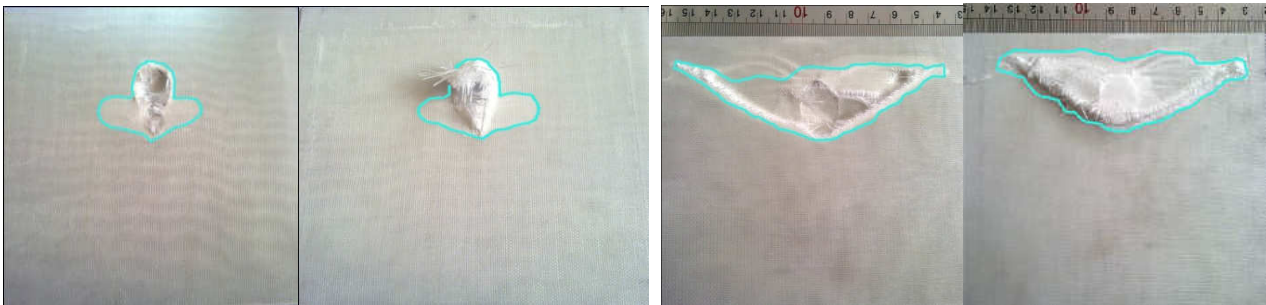


شکل ۱۳- برخورد با زاویه ۴۵ درجه در سرعت ۱۱۸ متر بر ثانیه بر روی ۴ لایه کربن.



طرف ۴ لایه در یک حد برابر قرار دارد. با توجه به شکل (۱۵) در ۴ لایه کربن- شیشه، خسارت در قسمت مرکزی متمایل به بالا و به شکل بیضوی است و در پشت ۴ لایه به صورت خسارت ناموزونی در اطراف مرکز برخورد است. میزان خسارت جلو کمتر از میزان خسارت در پشت این ۴ لایه می‌باشد. در شکل‌های ۱۶ تا ۱۸، تغییرات میزان خسارت وارده بر دو طرف ۴ لایه‌ها با افزایش زاویه برخورد در سرعت ۱۱۸m/s آورده شده است.

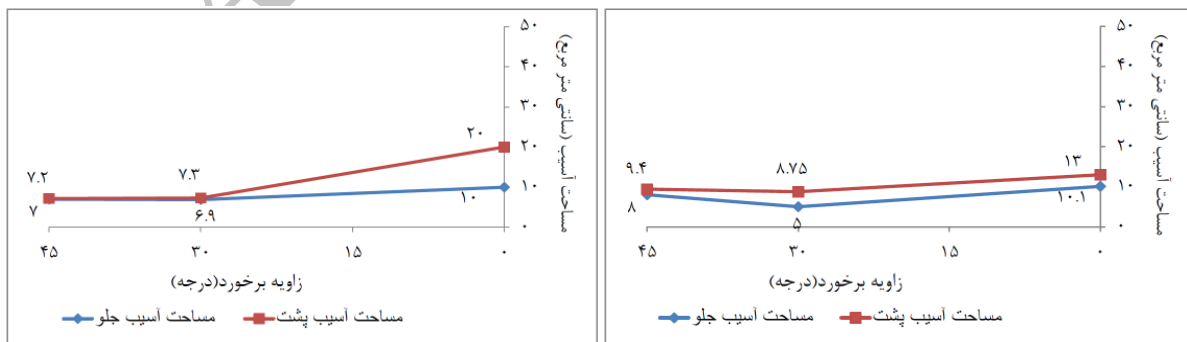
در برخورد پرتابه نیم کروی در سرعت ۱۱۸m/s و زاویه ۴۵ درجه، مشاهده می‌شود که خسارت وارده بر ۴ لایه کربن که در شکل (۱۳) نشان داده شده است، به صورت بیضوی مایل به شکل قطره می‌باشد و در نیمه بالایی ۴ لایه است. میزان خسارت در جلوی ۴ لایه تقریباً برابر با میزان خسارت در پشت ۴ لایه می‌باشد. اما در ۴ لایه شیشه نشان داده شده در شکل (۱۴)، خسارت وارده در نیمه بالایی ۴ لایه می‌باشد و به این گونه که در قسمت برخورد، مثلثی شکل و در ادامه به صورت بیضوی منتشر می‌شود. میزان خسارت در ۲



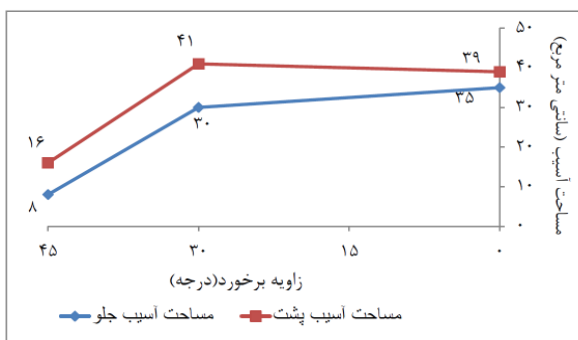
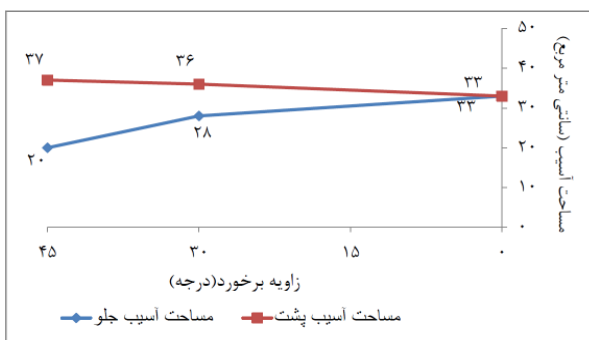
شکل ۱۴- برخورد با زاویه ۴۵ درجه در سرعت ۱۱۸ متر بر ثانیه بر روی ۴ لایه شیشه. نمای پشت پرتابه تخت نمای جلو نمای پشت پرتابه نیم کروی نمای جلو



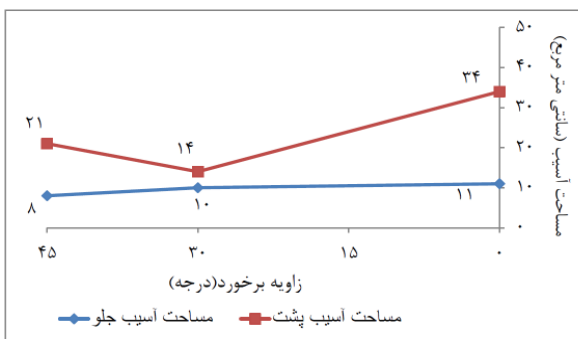
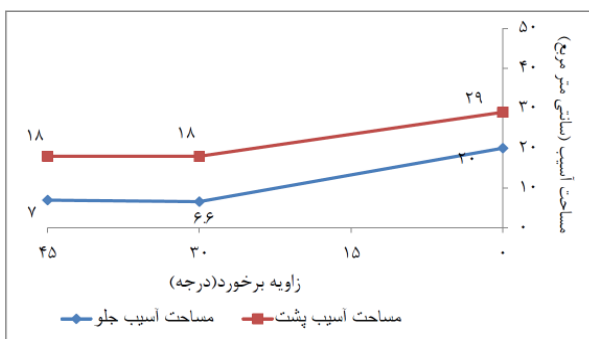
شکل ۱۵- برخورد با زاویه ۴۵ درجه در سرعت ۱۱۸ متر بر ثانیه بر روی ۴ لایه کربن- شیشه. نمای پشت پرتابه تخت نمای جلو نمای پشت پرتابه نیم کروی نمای جلو



شکل ۱۶- تغییرات میزان خسارت نسبت به تغییرات زاویه در ۴ لایه کربن با پرتابه تخت (راست) و نیم کروی (چپ).



شکل ۱۷- تغییرات میزان خسارت نسبت به تغییرات زاویه برخورد در ۴ لایه شیشه با پرتابه تخت (راست) و نیم کروی (چپ).



شکل ۱۸- تغییرات میزان خسارت نسبت به تغییرات زاویه برخورد در ۴ لایه کربن-شیشه با پرتابه تخت (راست) و نیم کروی (چپ).

تفاوت میزان خسارت در ۲ طرف ۴ لایه می‌توان به قطر کم الیاف در پارچه شیشه، و در مورد میزان بالای خسارت، می‌توان به ضریب کشسان بالای آن اشاره کرد. در برخورد با پرتابه نیم کروی در ۴ لایه شیشه نشان داده شده در شکل ۱۷ با افزایش زاویه برخورد در بازه ۰ تا ۳۰ درجه میزان خسارت پشت با یک شیب کم در حال افزایش است اما در بازه ۳۰ تا ۴۵ درجه با یک شیب زیاد کاهش می‌یابد، اما میزان خسارت جلو در بازه ۰ تا ۴۵ درجه، کاهش می‌یابد که البته باز هم مطابق شکل در بازه ۳۰ تا ۴۵ درجه بسیار چشمگیر است. تفاوت خسارت جلو و پشت ۴ لایه با افزایش زاویه برخورد افزایش دارد. از نظر تفاوت میزان خسارت در ۲ طرف ۴ لایه می‌توان به قطر کم الیاف در پارچه شیشه، و در مورد میزان بالای خسارت، می‌توان به ضریب کشسان بالای آن اشاره کرد.

در ۴ لایه کربن-شیشه که در شکل ۱۸ نشان داده شده است، با افزایش زاویه برخورد با پرتابه تخت، میزان خسارت ۲ طرف در محدوده ۰ تا ۳۰ درجه کاهش، و در محدوده ۳۰ تا ۴۵ درجه ثابت می‌ماند و تفاوت میزان خسارت جلو و پشت ۴ لایه کربن-شیشه نسبت به ۴ لایه شیشه و ۴ لایه کربن بیشتر است. می‌توان گفت که تفاوت میزان خسارت در ۲ طرف ۴ لایه

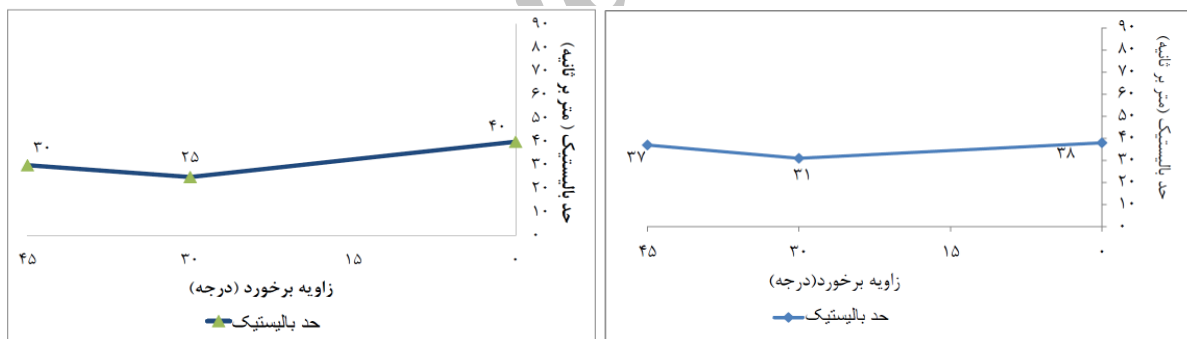
با توجه به شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ می‌توان گفت که در ۴ لایه کربن نشان داده شده در شکل ۱۶، با افزایش زاویه برخورد با پرتابه تخت، میزان خسارت در بازه ۰ تا ۳۰ درجه دارای یک سیر نزولی و در بازه ۳۰ تا ۴۵ درجه تقریباً ثابت مانده است. تفاوت میزان خسارت جلو و پشت ۴ لایه کربن با افزایش زاویه برخورد کاهش می‌یابد. دلیل کم شدن خسارت، تنش‌های برشی بزرگ تر و همچنین جوانه زنی سریع‌تر ترک در برخورد با زاویه، توسط پرتابه تخت است. در برخورد با پرتابه نیم کروی با افزایش زاویه برخورد که در شکل ۱۶ نشان داده شده است، میزان خسارت در بازه ۰ تا ۳۰ درجه دارای یک سیر نزولی و در بازه ۳۰ تا ۴۵ درجه تقریباً ثابت مانده است. تفاوت میزان خسارت جلو و پشت ۴ لایه کربن در برخورد با پرتابه نیم کروی، با افزایش زاویه برخورد کاهش می‌یابد. دلیل کم شدن خسارت در برخورد زاویه دار، کاهش میزان تنش‌های وارده از طرف پرتابه به علت شکل سر پرتابه می‌باشد.

با توجه به شکل ۱۷، در ۴ لایه شیشه با افزایش زاویه برخورد با پرتابه تخت، در بازه ۰ تا ۴۵ درجه میزان خسارت پشت با یک شیب کم در حال افزایش است، اما میزان خسارت جلو در بازه ۰ تا ۴۵ درجه، کاهش می‌یابد و تفاوت خسارت جلو و پشت ۴ لایه با افزایش زاویه برخورد افزایش دارد. از نظر

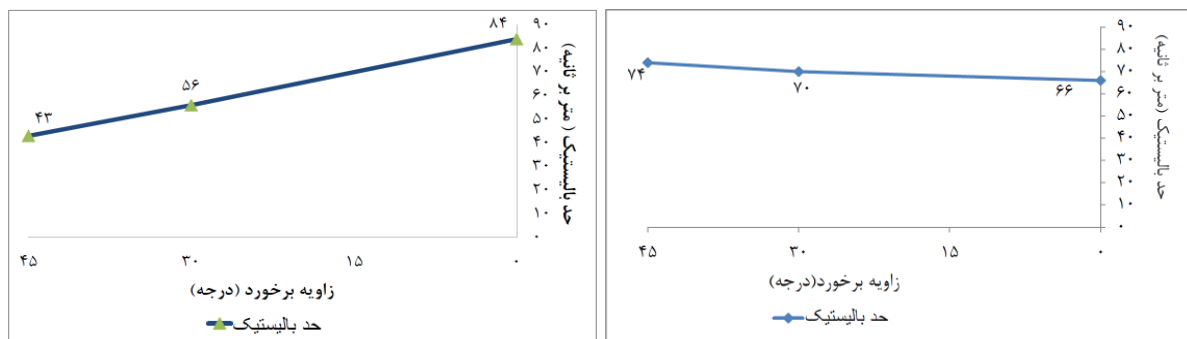
مشاهده می‌شود که محدوده بحرانی از نظر تغییرات خسارت در محدوده زاویه ۳۰ درجه است. از نظر رفتارهای ۴ لایه‌ها می‌توان گفت که ۴ لایه کربن از نظر تغییرات میزان خسارت دارای کمترین تأثیر پذیری و ۴ لایه شیشه دارای بیشترین تأثیر پذیری نسبت به تغییرات زاویه برخورد است و ۴ لایه کربن-شیشه رفتارهای میانگین این ۲ را به ارث برده است. در شکل‌های ۱۹ تا ۲۱، تغییرات میزان حد بالستیک ۴ لایه‌ها با افزایش زاویه برخورد در سرعت ۱۱۸ m/s آورده شده است.

با توجه به شکل‌های شماره ۱۹، ۲۰ و ۲۱ مشخص می‌شود که در ۴ لایه کربن که در شکل ۱۹ نشان داده شده است، میزان حد بالستیک در برخورد با پرتابه تخت نسبت به افزایش زاویه برخورد از ۰ تا ۳۰ درجه، کاهش و با افزایش زاویه از ۳۰ تا ۴۰ درجه، افزایش می‌یابد این میزان در برخورد با پرتابه نیم کروی نیز نسبت به افزایش زاویه برخورد از ۰ تا ۳۰ درجه، کاهش و با افزایش زاویه از ۳۰ تا ۴۰ درجه، افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۲۰، در ۴ لایه شیشه حد بالستیک با افزایش زاویه برخورد با پرتابه تخت، رابطه عکس دارد و با یک شیب نزولی در حال کاهش است اما در برخورد با پرتابه نیم کروی حد بالستیک با افزایش زاویه برخورد رابطه مستقیم دارد و با یک شیب صعودی در حال افزایش است.

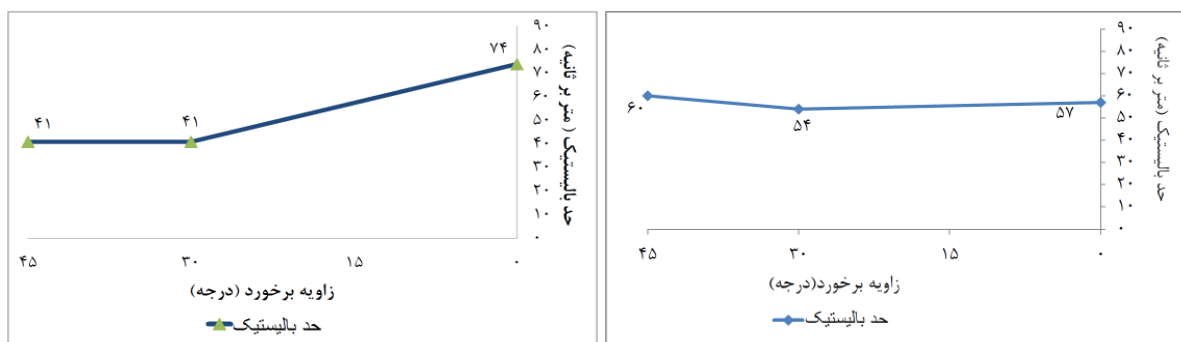
کربن-شیشه به دلیل تفاوت جنس و قطر الیاف بکار رفته در پارچه کربنی و پارچه شیشه می‌باشد. از نظر میزان خسارت نیز چون جهت برخورد از طرف پارچه کربنی است میزان خسارت جلو در سطح نزدیک به ۴ لایه کربنی و چون لایه پشت از نوع پارچه شیشه است میزان خسارت آن به ۴ لایه شیشه نزدیک‌تر است. با توجه به شکل ۱۸، در برخورد با پرتابه نیم کروی در ۴ لایه کربن-شیشه، با افزایش زاویه برخورد، میزان خسارت ۲ طرف در محدوده ۰ تا ۳۰ درجه کاهش، و در محدوده ۳۰ تا ۴۵ درجه افزایش می‌یابد. تفاوت میزان خسارت جلو و پشت ۴ لایه کربن-شیشه نسبت به ۴ لایه شیشه و ۴ لایه کربن بیشتر است. می‌توان گفت که تفاوت میزان خسارت در ۲ طرف ۴ لایه کربن-شیشه به دلیل تفاوت جنس و قطر الیاف بکار رفته در پارچه کربنی و پارچه شیشه می‌باشد. از نظر میزان خسارت نیز چون جهت برخورد از طرف پارچه کربنی است میزان خسارت جلو در سطح نزدیک به ۴ لایه کربنی و چون لایه پشت از نوع پارچه شیشه است میزان خسارت آن به ۴ لایه شیشه نزدیک‌تر است. بالاترین میزان خسارت در برخورد، مربوط به ۴ لایه شیشه در زاویه ۳۰ درجه و پرتابه نیم کروی است و پایین‌ترین میزان خسارت مربوط به ۴ لایه کربن در زاویه ۳۰ درجه و پرتابه نیم کروی می‌باشد. با توجه به این نمودارها



شکل ۱۹- تغییرات میزان حد بالستیک نسبت به تغییرات زاویه برخورد در ۴ لایه کربن با پرتابه تخت (راست) و نیم کروی (چپ).



شکل ۲۰- تغییرات میزان حد بالستیک نسبت به تغییرات زاویه برخورد در ۴ لایه شیشه با پرتابه تخت (راست) و نیم کروی (چپ).



شکل ۲۱- تغییرات میزان حد بالستیک نسبت به تغییرات زاویه برخورد در ۴ لایه کربن-شیشه با پرتابه تخت (راست) و نیم کروی (چپ).

می‌شود. از طرف دیگر، افزایش زاویه برخورد در برخورد با پرتابه تخت، باعث کاهش ۳۰ درصدی حد بالستیک و کاهش ۳۶ درصدی میزان خسارت می‌شود البته محدوده زوایای حول ۳۰ درجه، نقطه بحرانی تغییرات است، یعنی در بازه ۰ تا ۳۰ درجه تغییرات بسیار چشمگیر است. افزایش زاویه برخورد در برخورد با پرتابه نیم کروی، باعث افزایش ۲۵ درصدی حد بالستیک و کاهش ۴۰ درصدی میزان خسارت می‌شود البته محدوده زوایای حول ۳۰ درجه، نقطه بحرانی تغییرات است، یعنی در بازه ۰ تا ۳۰ درجه تغییرات بسیار چشمگیر است که مشاهده شده، ۴ لایه کربن شیشه دارای عملکرد عالی در زاویه ۳۰ درجه می‌باشد.

## مراجع

- [1]. کامران دانشجو، حسن معین الدینی، مجید شهری، میثم سیستانی نیا «تحلیل عددی تأثیر اثر شکل سر پرتابه های میله ای تخت و نیم کروی با نفوذ در اهداف مایل محل انتشار» هفتمین همایش انجمن هوافضا ایران ۱۳۸۶.
- [2]. Simpson, Bruce A.; Goldsmith, W. "Oblique Impact on a Head-Helmet System."; International Journal of Mechanical Sciences 1976, 337-340.
- [3]. Zhou, D. W.; Stronge W. J. "Ballistic Limit for Oblique Impact of Thin Sandwich Panels and Spaced Plates."; International Journal of Impact Engineering 2008, 339-414
- [4]. Goldsmith, W.; Finnegan, S. A. "Normal and Oblique Impact of Cylindro-Conical and Cylindrical Projectiles on Metallic Plates." International Journal of impact Engineering 1986, 4, 83-105.
- [5]. Fawaz, Z.; Zheng, W.; Behdinan, K. "Numerical Simulation of Normal and Oblique Ballistic Impact on Ceramic Composite Armours."; Composite Structures 2004, 387-395.
- [6]. Johnson, W.; Sengupta, A. K.; Ghosh, S. K. "High Velocity Oblique Impact and Ricochet Mainly of Long Rod Projectiles."; International Journal of Mechanical Sciences 1982, 425-436.

در ۴ لایه کربن- شیشه نشان داده شده در شکل ۲۱، در برخورد با پرتابه تخت و نیم کروی، حد بالستیک همانند ۴ لایه کربن با یک نزول در بازه ۰ تا ۳۰ همراه است و در بازه ۳۰ تا ۴۵ درجه ثابت می‌ماند. البته تغییرات حد بالستیک در یک حد میانگین ۴ لایه کربن و ۴ لایه شیشه و نزدیک به ۴ لایه شیشه ثبت شده است. پایین آمدن حد بالستیک در برخورد با زاویه به وسیله پرتابه تخت، به دلیل وجود تمرکز تنش در محل برخورد با ۴ لایه در هنگام برخورد پرتابه تخت است و بالعکس افزایش حد بالستیک در برخورد با زاویه به وسیله پرتابه نیم کروی، به دلیل کاهش تمرکز تنش در محل برخورد با ۴ لایه در هنگام برخورد پرتابه نیم کروی است. بالاترین میزان حد بالستیک مربوط به ۴ لایه شیشه و در زاویه ۰ درجه به وسیله پرتابه تخت است و پایین‌ترین مربوط به ۴ لایه کربن و در زاویه ۳۰ درجه و پرتابه نیم کروی می‌باشد. ۴ لایه کربن- شیشه از نظر رفتار در تغییرات حد بالستیک به ۴ لایه کربن و از نظر میزان حد بالستیک به ۴ لایه شیشه نزدیک است.

## ۴- نتیجه گیری

نتایج آزمایشات نشان داد که وسعت خسارت در ۴ لایه کربن بسیار کمتر از وسعت خسارت در ۴ لایه شیشه است و این ویژگی ۴ لایه شیشه ممکن است باعث کاهش مقاومت این ۴ لایه در بارگذاری بعدی شود. در مقابل ۴ لایه شیشه بسیار چقرمه تر نسبت به ۴ لایه کربن است. می‌توان با ترکیب پارچه کربن و پارچه شیشه، چند لایه کربن - شیشه را ساخت که علاوه بر کم کردن هزینه ساخت (به علت قیمت کمتر الیاف شیشه در مقایسه با الیاف کربن) و کم کردن ضخامت چند لایه، حد خواص چند لایه کربن و چند لایه شیشه را بهبود بخشید. در این حالت، میزان خسارت کمتر چند لایه کربن و مقاومت حرارتی آن در کنار حد بالستیک بالای چند لایه شیشه ای حاصل

- [13]. Liu, Y.; Ma, Aie; Huang, Fenglei "Numerical Simulations of Oblique-Angle Penetration by Deformable Projectiles in to Concrete Targets."; International Journal of Impact Engineering 2009, 438-446.
- [14]. A'Hearn, Michael F.; Sunshine, Jessica M.; Lisse Carey M. "The Deep Impact Oblique Impact Cratering Experiment."; Icarus, 2007, 190, 295-333.
- [15]. Phoenix, L.; Porwal, Pankaj, K. "A New Membrane Model for the Ballistic Impact Response and V50 Performance of Multi-Ply Fibrous Systems."; International Journal of Solids and Structures 2003, 6723-6765.
- [16]. Ben-Dor, A.; Dubinsky, T. Elperin "On the Order of Plates Providing the Maximum Ballistic Limit Velocity of a Layered Armor."; International Journal of Impact Engineering 1999, 741-755.
- [17]. Park, Myungsoo; Yoo, Jeonghoon; Chung, Dong-Teak "An Optimization of a Multi-Layered Plate Under Ballistic Impact."; International Journal of Solids and Structures 2005, 123-137.
- [18]. Iqbal, M. A.; Gupta, G.; Diwakar, A.; Gupta, N. K. "Effect of Projectile Nose Shape on the Ballistic Resistance of Ductile Targets."; European Journal of Mechanics 2010, 683-694.
- [7]. Manolakos, D. E.; Mamalis, A. G. "The Plastic Collapse of Longitudinally Framed Shell Plating Subjected to Oblique Loading."; International Journal of Impact Engineering 1985, 41-55.
- [8]. Zhou, D. W.; Stronge W. J. "Ballistic Limit for Oblique Impact of Thin Sandwich Panels and Spaced Plates."; International Journal of Impact Engineering 2008 ,1339-1354.
- [9]. Lee, M. "A Numerical Comparison of the Ballistic Performance of Unitary Rod and Segmented-Rods Against Stationary and Moving Oblique Plates."; International Journal of Impact Engineering. 2001, 399-407.
- [10]. Chen, X. W.; Fan, S. C.; Li, Q. M. "Oblique and Normal Perforation of Concrete Targets by a Rigid Projectile."; International Journal of Impact Engineering 2004, 617-637.
- [11]. Forde, L. C.; Proud, W. G.; Walley, S. M.; Church, P. D.; Cullis, I. G. "Ballistic Impact Studies of a Borosilicate Glass."; International Journal of Impact Engineering 2010, 568-578.
- [12]. Gupta, N. K.; Madhu, V. "An Experimental Study of Normal and Oblique Impact of Hard-Core Projectile on Single and Layered Plates."; International Journal of Impact Engineering 1997, 395-414.

Archive of SID