

## واژه‌های کلیدی:

مواد مرکب پلیمری  
مواد مرکب هیبریدی  
ضربه  
عملکرد پرتابی الیاف  
پوشش‌های حفاظتی

# مروری بر کاربرد مواد مرکب پلیمری در تولید پوشش‌های حفاظتی

مصطفی الماسی زفره<sup>۱</sup>، اعظم قاسمی<sup>۲\*</sup>، ستار محمدی اسفرجانی<sup>۳</sup>

۱ نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، گروه مهندسی مکانیک، دانش آموخته کارشناسی ارشد  
۲ نجف آباد دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، مرکز تحقیقات فناوری های نوین ساخت و تولید  
۳ نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، استادیار، گروه مهندسی مکانیک

## چکیده ...

نجات جان انسان‌ها در برابر سلاح‌های سرد و گرم از زمان‌های دور، همواره مورد توجه بوده است. پیشرفت فناوری تولید سلاح‌های گرم، مستلزم به روز شدن فناوری تولید پوشش‌های حفاظتی است. برای این منظور دست‌یابی به موادی مقاوم با وزن حداقل، ضروری است. مواد مرکب پلیمری، در چند دهه اخیر به ویژه با توسعه روش‌های نوین تولید، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند. پوشش‌های حفاظتی ساخته شده از مواد مرکب، ضمن داشتن وزن کم، از مقاومت بسیار خوبی هم برخوردارند. یکی از مهم‌ترین عوامل مقاومت مواد در برابر ضربه گلوله، حد کشسانی مواد است. مواد مرکب دارای حد کشسانی بالایی هستند که می‌توان با ترکیب این مواد به مواد مرکب هیبریدی دست یافت که از حد کشسانی بسیار بیشتری برخوردارند. در این مقاله ابتدا تاریخچه ساخت پوشش‌های حفاظتی بیان می‌شود و در ادامه، مواد مرکب پرکاربرد در ساخت پوشش‌های حفاظتی و روش‌های بافت آن‌ها، مدل‌های نیمه تحلیلی، پیش‌بینی نفوذ و محدودیت پرتابی معرفی می‌شود.

\*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

a\_ghassemi@pmc.iaun.ac.ir

## ۱ مقدمه

۱۹۷۱ الیاف کولار را به عنوان جایگزین الیاف نایلون حجیم پرتابی در جلیقه‌های ضدگلوله معرفی کرد. در حال حاضر این لیف یکی از مهم‌ترین الیاف مورد استفاده در تولید پوشش‌های حفاظتی است. در سال ۱۹۸۹ شرکت آلید سیگنال (Allied Signal) رقیبی را برای الیاف کولار به نام اسپکترا (Spectra) به بازار عرضه کرد. در ابتدا از این الیاف برای تولید بادبان کشتی و در حال حاضر از منسوج بی‌بافت حاصل از آن برای تهیه جلیقه ضدگلوله استفاده می‌شود. الیاف پلی‌اتیلن، بسیار سبک و دارای مقاومت زیاد هستند [۳، ۴].

با ظهور مواد جدید و فناوری نانو پیشرفت‌های بیشتری به منظور افزایش کارایی زره‌ها در مقابل تهدیدهای بسیار بالای پرتابی قابل پیش‌بینی است. برای سال‌های متعددی نایلون به علت نسبت استحکام به وزن بالایی که دارد به عنوان لیف مقاوم پرتابی مطرح بوده است و می‌تواند با تعداد لایه‌های کافی برای کاهش ضربه ناشی از ترکش‌های تیز و پرتابه‌های انفجاری به کار رود. با پیشرفت علم پلیمر، الیاف پلی‌امید با خاصیتی بالا، الیاف آرامید و الیاف پلی‌اتیلن خطی با چگالی بالا (HDPE) برای کاربردهای مقاوم پرتابی تولید شدند [۵]. لانگدان و همکاران در سال ۲۰۰۷ پاسخ انواع چند لایه‌های (GLARE) را به بارهای انفجاری یکنواخت بررسی کردند. شیوه تخریب مشاهده شده شامل جدایش لایه‌ها، تغییر شکل پلاستیک، کمانش داخلی و پارگی لایه فلزی بود. مهم‌ترین نتیجه به دست آمده، ارتباط خطی میان تغییر مکان جبهه جلو و پشت صفحات بود [۶]. لانگدان و همکاران در پژوهش بعدی، شیوه تخریب هر صفحه را معین کردند. این شیوه شامل جدایش لایه‌ها، تغییر مکان پلاستیک بزرگ، شکست الیاف و ترک خوردگی فاز زمینه بود [۷]. در ادامه ابتدا خواص مواد مرکب لایه‌ای بیان می‌شود و در پایان روش‌های بافت پارچه‌های مورد استفاده در پوشش‌های حفاظتی ارائه می‌شود.

## ۲ مروری بر خواص مواد مرکب لایه‌ای

مواد مرکب، ترکیب دو یا چند ماده، در مقیاس میکروسکوپی هستند تا مواد جدیدی را با خواص افزایش یافته نسبت به هر یک از مواد تشکیل دهنده ایجاد کنند [۸]. پلیمر تقویت‌شده لیفی شکل (FRP) ماده تشکیل دهنده زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف

پوشش‌های حفاظتی مانند جلیقه‌های ضدگلوله، پوشش‌های نوین و سبکی هستند که برای حفاظت قسمت‌های حیاتی بدن انسان در برابر صدمات ناشی از سلاح گرم طراحی شده‌اند. جلیقه ضدگلوله که به بسیاری از چنین پوشش‌های حفاظتی نسبت داده می‌شود، اصطلاح نادرستی است، چون کاملاً از انسان در برابر اصابت گلوله محافظت نمی‌کند. به همین لحاظ عبارت «جلیقه‌های مقاوم در برابر گلوله» برای این پوشش‌ها مناسب‌تر است. به طور کلی کشورها در گذشته دارای فرهنگ‌های متفاوتی برای پوشش و حفاظت بدن در جنگ بودند. مردم یونان قدیم (شهر مسین) در قرن ۱۶ قبل از میلاد و ایرانیان و یونانی‌ها در قرن ۱۵ قبل از میلاد از حداقل ۱۴ لایه پارچه کتان، ساکنین جزایر میکرونزی واقع در اقیانوس آرام تا قرن ۱۹ از پارچه تهیه شده از الیاف نارگیل و در بعضی از کشورها از پوست حیوانات استفاده می‌کردند. نوع دیگری از زره‌ها به صورت نیم‌تنه‌های بدون آستین بود که از قطعات مستطیل شکل کوچک آهنی یا صفحات فلزی پرچ شده بر روی نوارهای چرمی ساخته می‌شد و مثل کاشی‌های پوشش بام، روی یکدیگر قرار می‌گرفت. این پوشش‌ها زمینه‌ای برای تولید جلیقه‌های ضدگلوله امروزی بودند. بررسی کارایی پوشش‌ها در برابر سلاح‌های گرم به طور چشم‌گیری تا جنگ داخلی آمریکا، جنگ جهانی اول و دوم ادامه یافت تا در سال ۱۹۴۰ با تحول در صنعت پلاستیک جلیقه‌هایی با کارایی مطلوب تولید شد، که توسط افراد نظامی و مجریان قانون مورد استفاده قرار گرفت. این جلیقه‌ها از جنس نایلون همراه با لایه‌هایی از الیاف شیشه، فولاد، سرامیک، تیتانیوم، دارون (Doron) و مواد مرکبی از جنس الیاف شیشه و سرامیک تهیه شد که مواد مرکب از کارایی بهتری برخوردار بودند. از این نوع نایلون تا سال ۱۹۷۰ برای تهیه جلیقه‌های ضدگلوله استفاده می‌شد. در سال ۱۹۶۵ شرکت دوپانت (Du Pont)، پارچه‌ای از الیاف پلیمر مایع پلی-پارافنیل ترفتالامید با نام تجاری کولار (از خانواده آرامید) تولید تولید کرد. در ابتدا کولار در صنعت لاستیک‌سازی و سپس در تولیدات گوناگونی مثل طناب، واشر و قسمت‌های مختلف هواپیما و قایق، مورد استفاده قرار گرفت [۱، ۲].

دارد. الیاف معمولی با عملکرد بالا عبارتند از: شیشه، کربن، پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بالا (HWMPE)، پلی‌فنیلن‌بنزو بیسوکسازول (PBO)، و M5. جدول ۱ خصوصیات اصلی و خواص مکانیکی الیاف با عملکرد بالا را به طور خلاصه مقایسه کرده است.

## ۲-۲ آرامید

الیاف آرامید شامل زنجیره‌های مولکولی طولانی از ترفتالامید پلی-پارافنیلن هستند [۱۱]. دو نوع لیف آرامید با نام تجاری وجود دارد: کولار و توارون. کولار توسط دوپونت در سال ۱۹۶۵ تولید شد و چند سال بعد توارون توسط آزکو تولید شد [۱۲]. الیاف آرامید دارای ساختار بلوری هستند به طوری که تشکیل زنجیره بلندی از پلی آمید مصنوعی را می‌دهند که در آن ۹۰ درصد از ارتباط آمید (-CO-NH-) به طور مستقیم به دو حلقه آروماتیک متصل است که این امر سختی لیف را بسیار بالا می‌برد (شکل ۱) الیاف تولید شده به روش روزنرانی (Extrusion) که به صورت رشته‌های به هم تابیده فرونشانی (Quench) شده‌اند، با کنترل

است. الیاف و فاز زمینه هر دو نقش اساسی در خواص نهایی مواد مرکب دارند، الیاف باعث تقویت و سختی و ماده مرکب و فاز زمینه باعث محافظت و انتقال بار بین الیاف می‌شود.

## ۲-۱ الیاف

صفحات مقاوم در برابر برخوردکننده، از الیافی که دارای عملکرد بالایی هستند تولید می‌شوند. این الیاف دارای خواص منحصر به فردی هستند که مجموعه آن‌ها را از سایر الیاف ساخته دست انسان که در کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند، جدا می‌کند. الیافی با عملکرد بالا برای اهداف و کاربردهای خاصی که نیاز به خواص مخصوصی دارند، به صورت مهندسی تولید شده‌اند. برای محافظت در برابر برخوردکننده در علم هوانوردی نیاز است تا خواصی مانند: سختی بالا، مقاومت نهایی بالا، کرنش زیاد در مقابل شکست، چگالی پایین، سرعت صوت بالا (مدول بالا و چگالی پایین)، خواص استحکامی تقریباً یکسان بین تک تک الیاف، ایستایی و ثبات در حین استفاده، طول بلند نسبت به میزان قطر را دارا باشند. انواع مختلفی از الیاف با خواص خوب در مقابل برخوردکننده‌ها وجود

جدول ۱ خواص اصلی الیاف متداول با عملکرد بالا [۹ و ۱۰].

الیف	نوع لیف	چگالی $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	مدول کشش طولی $E$ (MPa)	استحکام کششی طولی $\sigma$ (GPa)	کشیدگی شکست (%)
کولار ۲۹	آرامید	۱/۴۴	۷۰	۲۹۲۰	۳/۶۰
کولار ۴۹	آرامید	۱/۴۴	۱۱۲	۳۰۰۰	۲/۴۰
کولار ۱۴۹	آرامید	۱/۴۷	۱۷۹	۳۴۵۰	۲/۰۰
کولار ۱۴۹	آرامید	۱/۴۷	۸۳	۳۴۰۰	۳/۵۵
کولار KM2	آرامید	۱/۴۵	۱۲۰	۳۵۰۰	۲/۵۰
Twaron	پلی اتیلن	۰/۹۷	۱۱۰	۳۵۰۰	۳/۳۰
Dyneema SK75	پلی اتیلن	۰/۹۷	۱۱۳	۲۵۷۰	۳/۱۰
زیلون AS	PBO	۱/۵۴	۱۸۰	۵۸۰۰	۳/۵۰
زیلون HM	PBO	۱/۵۶	۲۷۰	۵۸۰۰	۲/۵۰
شیشه E-	شیشه	۲/۶۰	۲۲	۳۵۰۰	۴/۷۰
کربن	کربن	۱/۷۵	۲۲۷	۳۸۰۰	۱/۷۶
M5	M5	۱/۷۰	۲۷۱	۵۸۰۰	۱/۴۰

ریسیدن رشته‌ها برای بافته‌شدن انجام گیرد. برای بافتن کولار به منظور تولید پارچه، از ساده‌ترین الگو استفاده می‌شود [۱۵-۱۳].

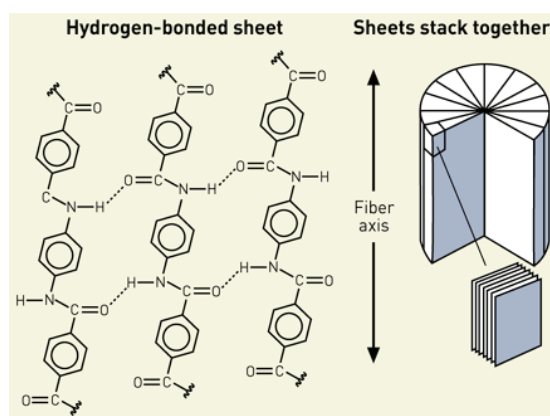
## ۲-۳ پلی اتیلن

پلی اتیلن با وزن مولکولی بالا (UHWM-PE) را همچنین تحت عنوان پلی اتیلن با مدول یانگ بالا (HMPE) یا پلی اتیلن با عملکرد بالا (HPPE) می‌شناسند، که ساخته شده از زنجیرهای بسیار طولانی، با وزن مولکولی میلیونی است [۱۱]. زنجیرهای بسیار طولانی امکان انتقال بار بیشتر را به پیکره پلیمر با تقویت تعاملات بین مولکولی می‌دهد. این امر منجر به داشتن مواد بسیار سخت، با بالاترین مقاومت ضربه در گرمانرم‌های شناخته‌شده می‌شود [۱۶]. دو نام تجاری اصلی برای الیاف پلی اتیلن وجود دارد: داینیما (Dyneema) و اسپکترا (Spectra) که به ترتیب توسط DSM و هانی ول تولید شده‌اند. DSM روش جدیدی را در سال ۱۹۷۹ به نام ژل چرخان ثبت کرد. در این روش، مولکول‌های طولانی، انعطاف‌پذیر و پیچیده در حلال، از ۲ تا ۱۵ درصد غلظت حل و روزن‌رانی می‌شود [۱۶]. الیاف پلی اتیلن دارای مقاومت بالایی در برابر خوردگی شیمیایی (به جز اسیدهای اکسیدکننده)، هستند. آن‌ها میزان رطوبت کمی جذب می‌کنند، ضریب شکست بسیار پایینی دارند و دارای مقاومت بالایی در برابر ساییدگی هستند. هنگامی که این الیاف شکل می‌گیرند، زنجیرهای پلیمری می‌توانند به چرخش موازی بالاتر از ۹۵ درصد و سطحی از میزان بلوری شدن تا ۸۵ درصد برسند که این امر، سختی بسیار بالایی به الیاف می‌دهد [۱۶]. دما همچنین بر الیاف پلی اتیلن تأثیر می‌گذارد. دمای ذوب حدود ۱۵۰ درجه سانتیگراد بوده، برای استفاده در دماهای بالاتر از ۸۰ تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد برای مدت زمان طولانی توصیه نمی‌شوند. الیاف پلی اتیلن در دماهای زیر ۱۵۰- درجه سانتیگراد ترد و شکننده می‌شوند [۱۱].

## ۲-۴ شیشه

الیاف شیشه قدیمی‌ترین و آشناترین الیاف با عملکرد بالا هستند. این الیاف با عبور رشته‌های باریک پایه سیلیکا ( $\text{SiO}_2$ ) از رشته ساز با قطر کوچک تشکیل می‌شود. در دمای ۱۷۱۳ درجه سانتیگراد، بیشتر مولکول‌ها می‌توانند تقریباً آزادانه حرکت کنند. الیاف شیشه بر خلاف سایر

شرایط روزن‌رانی، الیافی با مقاومت‌های متفاوت به دست می‌آیند [۱۱]. برای مثال، کولار ۲۹، تنش‌پذیری بالا دارد و بیشتر در تولید مواد صنعتی مانند کابل یا زره، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حالی که مدول بالا، ویژگی شاخص کولار ۴۹ است. کولار ۴۹ در تقویت پلاستیک بدنه کشتی یا هواپیما و موتور استفاده می‌شود. از آنجایی که کولار ۴۹ پایداری چندانی در برابر پرتو فرابنفش ندارد نمی‌تواند در کاربردهای بیرونی سودمند باشد. کولار، به عنوان پلی آمید از پیوندهای آمیدی برخوردار است. در میان این پیوندها، حلقه‌های بنزن به عنوان گروه‌های تکراری قرار دارند. این ساختار به پلیمر یاد شده کمک می‌کند تا رشته‌های کاملی تشکیل دهد. در واقع، حلقه‌های بنزن به خاطر حجم زیاد، توانایی چرخش ندارند در نتیجه پیوندهای آمیدی همواره به صورت راست، بدون آن که بتوانند پیچ و تاب بخورند؛ در رشته قرار می‌گیرند. از سوی دیگر میان پیوندهای آمیدی هر رشته با رشته دیگر، پیوندهای هیدروژنی برقرار است که سبب می‌شود رشته‌ها به طور منظم در کنار یکدیگر قرار گیرند و به ساختار ایجاد شده استحکام ببخشند. پلیمر کولار در جریان فرایند بسپارش در آزمایشگاه تهیه می‌شود. پس از آن مایع بلوری به دست آمده از یک صفحه فلزی کوچک، شامل منفذهای بسیار ریز شبیه صافی عبور می‌کند تا رشته‌های کولار تشکیل شود. این رشته‌ها از حمام سرد گذرانده می‌شوند تا سخت شوند. با پاشیدن آب، رشته‌های به دست آمده لوله می‌شوند. پس از آن، رشته‌ها به بخش پشم‌بافی انتقال می‌یابند تا



شکل ۱ ساختار بلوری کولار [۱۲].

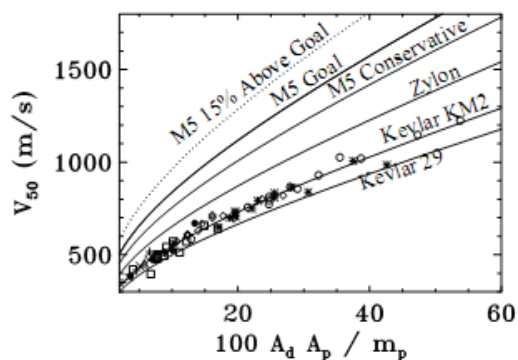
## ۲-۸ عملکرد پرتابی الیاف

در پژوهشی عملکرد پرتابی الیاف مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت [۱۰]. در شکل ۲، عملکرد پرتابی الیاف مختلف، با هم مقایسه شده است.  $A_d$  چگالی سطحی کامپوزیت،  $A_p$  سطح برخورد و  $M_p$  جرم پرتابه است. بنابر میانگین آزمایش‌های عملی محدوده پرتابی ( $V_{50}$  یا  $V_b$ ) سرعتی است که در آن سرعت احتمال نفوذ پرتابه در هدف ۵۰ درصد باشد.

شکل ۲ به خوبی نشان می‌دهد که مواد مرکب ساخته شده از الیاف آلی عملکرد بهتری دارند (پرتابه‌ها را در سرعت بالاتر متوقف می‌کنند). M5 عملکرد برخوردی بهتری نسبت به کولار و زیلون دارد. کولار KM2 دارای مدول‌های برتری نسبت به کولار ۲۹ بوده، عملکرد برخورد آن نیز بهتر است. هرچه که مدول‌های کشسانی برتر باشند، لیف دارای عملکرد برخوردی بهتری است.

## ۳ فاز زمینه

عملکرد اصلی و اولیه‌ی فاز زمینه (که به آن رزین هم می‌گویند) انتقال فشار بین الیاف تقویت‌کننده است. رزین مانند چسبی برای نگه داشتن الیاف عمل می‌کند و از آن‌ها در برابر آسیب‌های محیطی و مکانیکی محافظت می‌کند [۱۱]. رزین‌ها به دو گروه اصلی گرمانرم و گرماسخت تقسیم می‌شوند. رزین‌های گرمانرم با حرارت دیدن نرم می‌شوند و ممکن است هنگامی که در حالت نیمه مایع گرم شده قرار می‌گیرند شکل گرفته و وقتی سرد می‌شوند سخت و سفت شوند. پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن و پلی‌وینیل بوتیرال جزء رزین‌های گرمانرم معمولی هستند. رزین‌های گرماسخت اغلب مایع هستند یا شکل جامد آن‌ها در دمای پایین ذوب



شکل ۲ محدوده پرتابی برای الیاف با عملکرد بالا [۱۰].

الیافی که برای کاربردهای پرتابی استفاده می‌شوند، الیافی از نوع آمورف (بی شکل) هستند که در مقابل ضربه با سرعت بالا خواص استحکامی آن باقی می‌ماند. این الیاف نسبتاً غیرقابل انعطافند و می‌توانند در طیف وسیعی از کاربردهای نهایی مثلاً پوشش‌ها، پارچه‌های ضد حریق و مواد تقویتی برای مواد تشکیل دهنده پلاستیک مورد استفاده قرار گیرند. رطوبت جذب شده می‌تواند باعث ایجاد ترک‌های میکروسکوپی و شکست‌های سطحی شود [۱۶ و ۱۱].

## ۲-۵ کربن

الیاف کربن را می‌توان برای مقاوم‌سازی و سخت کردن زمینه تشکیل دهنده استفاده کرد. در اشکال دیگر می‌توانند، هدایت الکتریکی، رسانش گرمایی، و مقاومت شیمیایی و گرمایی مواد بافت را افزایش دهند. روش متداول تولید رشته‌های کربنی اکسایش و تجزیه گرمایی پلی‌آکریلونیتریل (PAN) است. کربن می‌تواند از طریق فرایندهای عملیات گرمایی دارای خواص بالاتری شود، مانند کربن با مدول یانگ بالا (گرافیتی کردن)، یا کربن با مقاومت بالا (کربنیزه کردن). الیاف کربن به خاطر مقاومت کششی بالا و چگالی پایین، برای ساخت قطعات در صنعت هوانوردی کاربرد دارند [۱۱].

## ۲-۶ لیف PBO

PBO لیفی با عملکرد بالا است که پایه آن ساختارهای تکرار شده بودار است. PBO مقاومت بافتی خیلی خوب و مدول بالایی از خود نشان می‌دهد، که برای کاربردهای تقویتی مفید است. در حال حاضر توپوبو شرکتی است که الیاف PBO را تحت نام تجاری زیلون (Benzobisoxazole-۶,۲-p-Phenylene) تولید می‌کند [۱۷].

## ۲-۷ لیف M5

M5 لیفی آلی با عملکرد بالا است که توسط سامانه‌های مگلان و دوپونت ساخته می‌شود. این لیف پایه پلی-دیمیدازو-پایریدینایلن-دی هیدروکسی-فنیلن دارد و دارای اتصالات کووالانسی در جهت لیف و شبکه متصل هیدروژن در جهت‌های موازی است. M5 دارای خواص خوبی است (مدول بالا، مقاومت کششی و فشاری بالا) که تحت شرایط مختلف UV، گرما و رطوبت، ثابت باقی می‌ماند. همچنین ۴۰ تا ۶۰ درصد نسبت به آرامیدها وزن کمتری دارند [۹ و ۱۱].

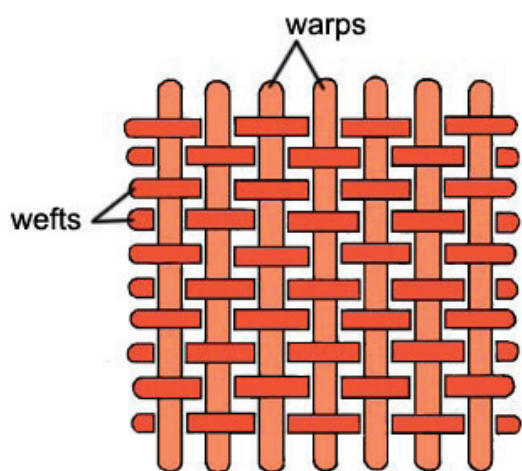
#### ۴ شکل و طراحی پوشش‌های حفاظتی با الیاف

پس از آشنایی با دو جزء تشکیل‌دهنده‌ی مواد مرکب (الیاف و زمینه) اکنون به چگونگی تلفیق آنها پرداخته می‌شود. باید توجه داشت لیف قطر بسیار کوچکی دارد. مثلاً لیف کولار ۲۹ دارای قطر ۱۲ میکرومتر و لیف اسپکترا ۹۰۰ قطری معادل ۳۸ میکرومتر دارد [۲۰]. بنابراین آن‌ها باید به یکدیگر پیچیده شوند تا به نخ تبدیل شود که بتواند به عنوان رشته‌ای پیوسته برای بافت یا تهیه پارچه‌های بافت‌دار مورد استفاده درمی‌آیند [۱۱]. در نهایت رشته‌ها با اشکال مختلف به صورت پارچه درمی‌آیند. بنابراین زره‌ها را می‌توان به صورت پارچه‌های بافته شده و پارچه‌های غیربافتی تقسیم بندی کرد.

#### ۴-۱ پارچه‌های بافته شده

پارچه‌های بافته شده شامل مجموعه‌ای از الیاف به هم بافته شده است که عمود بر هم قرار دارند. الیاف می‌توانند به طرق مختلف به هم بافته شوند تا طرح‌های بافتی بسیار متعددی را ایجاد کنند که هر بافت خواص مکانیکی خود را دارد [۲۱]. همان‌طور که در شکل ۳ قابل مشاهده است، بسته به جهت، دو نوع الیاف وجود دارد [۱۱ و ۲۱]:

۱. تار: الیافی هستند که در ابعاد طولی به موازات هم می‌روند.
۲. پود (یا پر کننده): الیافی هستند که به صورت متقاطع بر بقیه هستند.



شکل ۳ جهات تار و پود در پارچه بافته شده [۲۱].

می‌شود و به حالت مایع درمی‌آید. رزین‌های گرماسخت هنگام استفاده در تولید محصولات تمام شده، توسط یک یا هر دو عامل کاتالیزور و گرما، تصفیه می‌شوند و به محض تصفیه، جامد می‌شوند و امکان برگشت به حالت اصلی خود که مایع بود را ندارند [۱۸]. مهم‌ترین رزین‌های گرماسخت معمولی در مصارف صنعتی پلی‌استرهای اشباع شده، استخراجی و وینیل استرها هستند. در ادامه رزین‌های متداول مانند وینیل استر، پلی‌وینیل بوتیرال و پلی‌اتیلن توضیح داده خواهد شد.

#### ۳-۱ وینیل استر

وینیل استر دارای خواص خوب رزین‌های اپوکسی همراه با قابلیت تصفیه سریع‌تر رزین‌های پلی‌استر معمولی اشباع تولید می‌شود. این رزین‌ها از واکنش اپوکسی با اسیدآکرلیک یا متاکریلیک تولید می‌شوند. این مسئله باعث ایجاد محل اشباع نشده می‌شود که بیشتر شبیه آن چیزی است که در رزین‌های پلی‌استر، به هنگام استفاده از انیدرید، تولید شده است. مواد حاصل به استیرن تجزیه می‌شوند تا مایعی به دست آید که شبیه رزین پلی‌استر است. وینیل استرها نیز با پروکسیدهای آلی معمولی تصفیه می‌شوند و سختی مکانیکی و مقاومت بالایی از نظر خوردگی از خود نشان می‌دهند.

#### ۳-۲ پلی نیوبیل بوتیرال

پلی نیوبیل بوتیرال (PVB) رزینی است که اغلب برای کاربردهایی که نیاز به اتصالات قوی، وضوح و شفافیت، انسجام و هماهنگی با بسیاری از سطوح، سختی و انعطاف‌پذیری دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این رزین از الکل پلی وینیل با واکنش با بوتیرال‌دی‌هاید به دست می‌آید [۱۸].

#### ۳-۳ پلی اتیلن

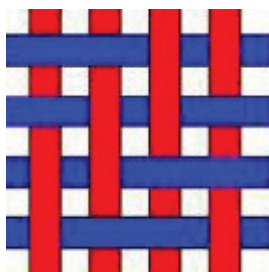
پلی اتیلن پلیمری گرمانرم است و از خانواده رزین‌ها می‌باشند که از طریق پلیمری‌شدن گاز اتیلن ( $C_2H_4$ ) به دست می‌آید. رزین پلی اتیلن دارای فرمول شیمیایی ( $C_{2n}H_{4n+2}$ ) است و این فرمول شامل تعداد مونومرهایی است که در طول فرآیند بسپارش با هم ترکیب می‌شوند تا یک زنجیره را شکل دهد. فرآیند بسپارش اتیلن را تبدیل به رزین پلی اتیلن می‌نماید. یک مولکول پلی اتیلن زنجیر بلندی از اتم‌های کربن است که به هر اتم کربن دو اتم هیدروژن چسبیده است [۱۸ و ۱۹].

۳. بافت کج راه که دو یا چند نخ تار و پود را تکرار می‌کند. پارچه‌های کج راه دارای خطوط مورب برجسته روی سطح پارچه هستند (شکل ۵) [۲۱].

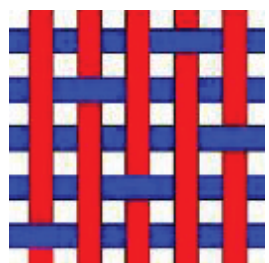
بافت ساتن که به دلیل صافی سطحش بسیار مورد توجه است و با تارهای نسبتاً دراز شل بافته می‌شود که در این مورد، یک تار روی سه یا چند نخ پود و زیر یک نخ پود قرار می‌گیرد [۱۰]. شکل ۵ نشان دهنده بافت ساتن پنج یراقی است که در آن یک تار روی پنج پود رفته است.

#### ۴-۲ پارچه‌های غیر بافتی

پارچه‌های غیر بافتی توسط کشاف ریز پارچه‌ها با ترکیبی که برای کارهای مکانیکی، کارهای شیمیایی، رطوبت و گرما بدون بافت یا کشاف مناسب هستند، ساخته می‌شود. برای مثال، الیاف می‌توانند با هم توسط عامل چسبنده یا با الیاف گرمانرمی که خودشان عامل گرمایی دارند، در کنار هم نگه داشته شوند. دو نوع اصلی از پارچه‌های غیر بافتی وجود دارد. نمدها الیافی هستند که با ترکیب واکنش شیمیایی و گرما به هم متصل می‌شوند [۱۱]. یک مثال در شکل ۶ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۶ قابل مشاهده است، این نمونه‌ها از رشته خوابانده شده که نوع بسیار خوبی از ساختارهای مقاوم پرتابی است، تشکیل شده‌اند.



(الف)



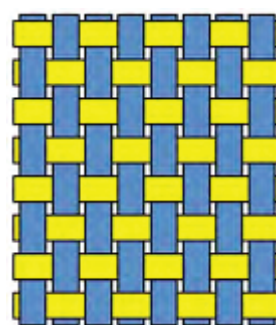
(ب)

شکل ۵ دو پارچه با بافت‌های مختلف: بافت کج راه (الف) و بافت ساتن پنج یراقی (ب) [۲۱].

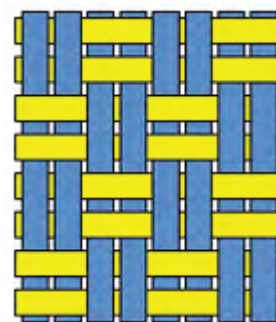
سه نوع بافت اصلی وجود دارد که سایر بافت‌ها از آن‌ها الگو گرفته می‌شود:

۱. بافت ساده که به عنوان ساده‌ترین شکل آن سه نوع بافت است (شکل ۴). در بافت ساده نخ‌های تارها به صورت یکی زیر و یکی روی نخ‌های پود قرار می‌گیرند و حتی نخ‌های تارها برعکس این نظم، به صورت یکی رو و یکی زیر قرار می‌گیرند.

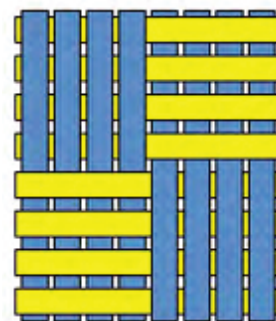
۲. بافت سبدي (شکل ۴)؛ در این مورد دو یا چند نخ با هم در جهات تارها یا پودها و به صورت جایگزین زیر و روی یکدیگر قرار می‌گیرند [۲۱ و ۲۲].



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴ دو نوع پارچه با بافت مختلف: بافت ساده (الف)، بافت سبدي ۲ در ۲ (ب) و بافت سبدي ۴ در ۴ (ج) [۲۱ و ۲۲].

بافته شده و تک جهتی، برخی مدل‌های تحلیلی و تجربی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. از جمله این مدل‌های تحلیلی و تجربی می‌توان به مدل لمبرت و جوناس، مدل ناوارو، مدل چوکرون، مدل بلس و هارتمن، مدل جیکوب و ون دینین، مدل ون گورپ، مدل ون، مدل سونگ و اگلستون، مدل بلس و هارتمن اشاره کرد. این مدل‌ها با توجه به فرضیات و محدودیت‌هایشان، وسعت کاربردی متفاوتی دارند [۲۵-۳۰]. در ادامه دو مدل تحلیلی پرکاربرد در تحلیل ضربات پرتابی معرفی می‌شوند.

### ۵-۱ مدل ون

ون [۲۶] مدلی تعاملی از هدف - پرتابه ارائه کرد که در آن نفوذ و میزان سوراخ کردن را با چندلایه‌های FRP پیش‌بینی می‌کند. فرض بر این است که فشار میانه ( $\sigma$ ) به طور عادی برای سطح پرتابه مورد استفاده قرار می‌گیرد و می‌تواند به دو قسمت تجزیه شود. یک قسمت فشار مقاومتی نیمه ثابت منسجم است ( $\sigma_s$ ) به خاطر تغییر شکل‌های پلاستیک کشسان مواد چندلایه و دیگری فشار مقاومتی پویا ( $\sigma_d$ ) است که از تأثیرات سرعت ناشی می‌شود. ون برای نفوذ و میزان سوراخ کردن چندلایه‌های FRP، معادله ۱ را ارائه کرد.

$$V_b = \frac{\pi\beta\sqrt{\rho_t\sigma_e}D^2T}{4G} \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{8G}{\pi\beta^2\rho_t D^2T}} \right] \quad (1)$$

که در آن  $V_b$  محدوده‌ی پرتابی،  $\beta$  قطر شکل (بسته به دماغه پرتابه)،  $p_t$  چگالی چندلایه،  $\sigma_e$  فشار مقاومتی چندلایه در میان ضخامت،  $D$  قطر پرتابه،  $T$  ترکیب چندلایه و  $G$  جرم پرتابه است. با توجه به شکل هندسی پرتابه‌ها که می‌تواند به صورت دماغه‌دار مخروطی یا پرتابه‌های دماغه‌دار اوجی وال، دو مقدار مختلف برای عامل می‌تواند تعیین شود (شکل ۷). برای پرتابه‌های دماغه‌دار مخروطی، با زاویه دماغه‌شان ( $\theta$ ) و با متغیری که بستگی به آن دارد مشخص می‌شوند. مقدار متغیر  $\beta$  در پرتابه‌های دماغه‌دار مخروطی از رابطه ۲ به دست می‌آید.

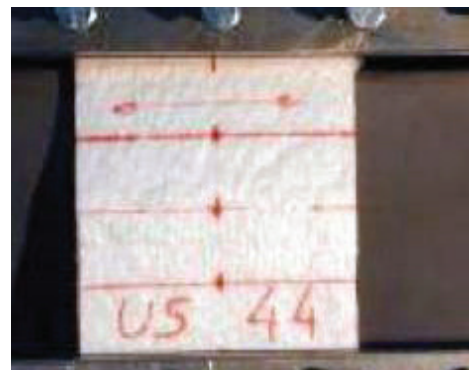
$$\beta = 2 \sin(\theta/2) \quad (2)$$

در پرتابه‌های دماغه‌دار اوجی وال، با شعاع کالیبره نوک ( $\psi$ ) مشخص می‌شود. مقدار متغیرهای  $\beta$  و  $\psi$  در پرتابه‌های دماغه‌دار مخروطی از رابطه ۳ به دست می‌آید.

این ساختارها نه بافته و نه کشبافی هستند و به طور معمول به آن‌ها غیر بافتی می‌گویند همچنین برای تشکیل زمینه ییاف نیز مناسبند [۲۳].

### ۵ مدل‌های نیمه‌تحلیلی، پیش‌بینی نفوذ و محدودیت پرتابی

یکی از مهم‌ترین مسائلی که در مطالعه سازوکار نفوذ تحت برخورد پرتابی با آن مواجهیم، تشخیص سرعت بحرانی است. سرعت بحرانی، سرعتی است که یک پرتابه ممکن است هدف را سوراخ کند. این خاصیت عموماً تحت عنوان محدوده پرتابی ( $V_b$ ) نامیده می‌شود و در طراحی سامانه‌های محافظ در برابر برخورد پرتابی بسیار مهم است. محدوده پرتابی ( $V_{50}$ ) بر اساس یک مفهوم آماری است: سرعت محدوده‌ی پرتابی ( $V_{50}$ ) به عنوان سرعتی که پرتابه بدون انحراف به یک هدف مشخص برخورد کند و ۵۰ درصد احتمال سوراخ کردن آن هدف را داشته باشد، تعریف می‌شود. [۲۴]. برای پیش‌بینی رفتار ترکیبات



(الف)



(ب)

شکل ۶ نمونه‌هایی از نمدهای پلی اتیلن (الف و ب) [۲۳].



جدول ۲ مقادیر ثابت  $a$  و  $K$  برای برخی مواد [۲۹].

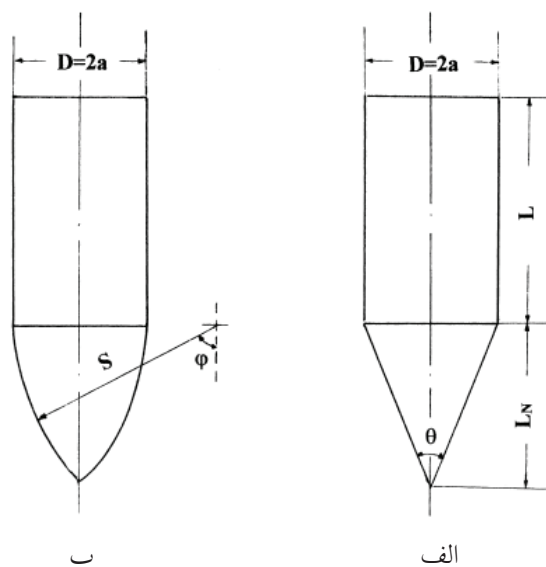
مقدار $a$	مقدار $K$ ( $J/mm$ ) <sup>2</sup>	ماده
۱/۴۰	۰/۴۹	CFRP
۱/۳۰	۰/۹۰	GRP
۱/۴۲	۰/۳۵	PC

حجمی لیف،  $D$  قطر پرتابه،  $a$  و  $k$  متغیرهای مواد چندلایه مشخص شده از داده‌های تجربی کاپرینو است. جدول ۲ مقادیر به دست آمده برای  $a$  و  $K$  را برای متغیرهای مواد، CFRP (پلیمر تقویت شده با لیف کربن)، GRP (پلیمر تقویت شده با شیشه) و PC (پلی کربنات) نشان می‌دهد.

شبهات مقادیر  $a$  باعث به وجود آمدن این سوال می‌شود که آیا این متغیر واقعاً بستگی به مواد دارد یا می‌تواند به عنوان ثابتی برای قابلیت کاربردی کلی در نظر گرفته شود. این مسئله بررسی شد اما نتایج نشان دادند که داده‌های پراکنده تجربی اجازه نمی‌دهند تا درباره اینکه کدام یک از آن‌ها بالاترین کارایی را در پیش‌بینی انرژی نفوذی دارد، تصمیم‌گیری و قضاوت شود.

## ۶ نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا تاریخچه ساخت جلیقه‌های ضد گلوله بیان شد و در ادامه مواد مرکب پرکاربرد در ساخت پوشش‌های حفاظتی و روش‌های بافت آن‌ها معرفی شد. نتایج پژوهشگران نشان داده است که مواد مرکب ساخته شده از الیاف آلی عملکرد بهتری دارند (پرتابه‌ها را در سرعت بالاتر متوقف می‌کنند). M5 عملکرد برخوردی بهتری نسبت به کولار و زیلون دارد. کولار KM2 دارای مدول برتری نسبت به کولار ۲۹ است و عملکرد برخورد آن نیز بهتر است. هرچه که مدول‌های کشسان، برتر باشند، لیف دارای عملکرد برخورد بهتری است. در ادامه ویژگی‌های سه رزین پرکاربرد وینیل‌استر، پلی‌وینیل‌بوتیرال و پلی‌اتیلن که در ساخت جلیقه‌های ضدگلوله استفاده می‌شوند معرفی شد. سپس به پارچه‌های بافته شده و پارچه‌های غیربافتی پرداخته شد. در پارچه‌های بافته، بافت ساتن به دلیل صافی سطحش بسیار مورد توجه است. پارچه‌های غیربافتی نوع خیلی خوبی از ساختارهای مقاوم پرتابی است. در پایان مدل‌های نیمه‌تحلیلی، پیش‌بینی نفوذ و محدودیت پرتابی معرفی شد.



شکل ۷ هندسه پرتابه‌ها الف) دماغ دار اوجی وال، ب) دماغ دار مخروطی [۲۶].

$$\beta = \frac{3}{4\psi} \quad , \quad \psi = \frac{s}{2a} \quad (۳)$$

پرتابه سر نیم‌کره را می‌توان مورد خاصی از پرتابه‌های دماغ‌دار اوجی‌وال دانست که در این نوع پرتابه مقدار  $\psi = 0.5$  است.

## ۵-۲ مدل کاپرینو و همکاران

مدل کاپرینو و همکاران [۲۹] متعلق به مدل‌های تجربی برای پیش‌بینی محدوده پرتابی است. در تحقیقات آن‌ها مشخص شد که متغیرهایی از قبیل قطر پرتابه و ضخامت چندلایه روی کمیت مطلوب مثل انرژی نفوذ یا محدوده پرتابی بسیار تأثیرگذارند. وزن ناحیه‌ای لیف (Fibre Areal Weight) لیف و قطر برخورد کننده ( $D_f$ ) متغیرهایی هستند که بیشترین تأثیر را در انرژی نفوذکننده ( $U_p$ ) دارند. بر اساس برخی تحقیقات، انرژی نفوذ کننده برای چندلایه مورد نظر، به صورت خطی با افزایش  $t$  (وزن ناحیه‌ای) افزایش می‌یابد. البته داده‌های اخیر نشان می‌دهند که افزایش  $U_p$  بیشتر از افزایش خطی با ضخامت است. اگر تأثیر ضخامت و قطر نفوذ کننده مدل‌سازی شود به رابطه ۴ که رابطه‌ای تجربی است، منجر می‌شود.

$$U_p = K(t.V_f.D)^a \quad (۴)$$

که در آن،  $U_p$  انرژی نفوذکننده،  $t$  ضخامت چندلایه،  $V_f$  شکست

## مراجع

1. Kabir R. B., Ferdous N., "Kevlar-The Super Tough Fiber," *International Journal of Textile Science*, 1,78-83, **2012**.
2. Rajabioun R., "Cuckoo Optimization Algorithm," *Applied Soft Computing*, 11, 5508–5518, **2011**.
3. Kumar S., "Advances in High Performance Fiber," *Indian Journal of Fiber & Textile Research*, 16, 52-64, **1991**.
4. Lem K. W., Kwon Y. D., Chin H. B., Li H. L., Prevorsek D. C., "Spectra Composite That Withstands Torch Flame Test," *Polymer Engineering & Science*, 34, 765–778, **1994**.
5. Dencheva N.V., Maria J. Oliveira, Antonio S. Pouzada, Mark P. Kearns, Zlatan Z. Denchev, "Mechanical Properties of Polyamide 6 Reinforced Microfibrillar Composites," *Polymer composites*, 32, 407–417, **2011**.
6. Langdon G.S., Nurick G.N., Lemanski S.L., Simmons M.C., Cantwell W.J., Schleyer G.K., "Failure Characterisation of Blast-Loaded Fibre-Metal Laminate Panels Based on Aluminium and Glass-Fibre Reinforced Polypropylene," *Composites Science and Technology*, 67, 1385-1405, **2007**.
7. Langdon G.S., Lemanski S.L., Nurick G.N., Simmons M.C., Cantwell W.J., Schleyer G.K., "Behaviour of Fibre-Metal Laminates Subjected to Localised Blast Loading: Part I-Experimental Observations," *International Journal of Impact Engineering*, 34, 1202-1222, **2007**.
8. Nayak N.V., *Composite Materials in Aerospace Applications*, *International Journal of Scientific and Research Publications*, 4, 1-10, **2014**.
9. Cunniff P.M., Auerbach M.A. Vetter E., "High Performance M5 Fiber for Ballistics/Structural Composites," *The 23<sup>rd</sup> army science conference*, Orlando, FL, USA, Nov 29-Dec 2, **2004**.
10. Chocron S., Pintor A., Gálvez F., Roselló C., Cendón D., Sánchez-Gálvez V., "Lightweight Polyethylene Non-Woven Felts for Ballistic Impact Applications: Material Characterization," *Composites-Part B: engineering*, 39, 1240-1246, **2008**.
11. Jassal M., Ghosh S., "Aramid Fibers - an Overview," *Indian Journal of Fiber & Textile Research*, 27, 290-306, **2002**.
12. Bhatnagar A., "Lightweight Ballistic Composites. Military and Law-Enforcement Applications," *CRC Press: Cambridge, Woodhead Publishing in Materials*, England, **2006**.
13. Singh P., Malik V., Priyawart L., "Analysis of Composite Materials Used in Bulletproof Tests Using FEM Technique," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4, 1789-1796, **2013**.
14. Kumar N., "Bulletproof Vest and Its Improvement—A Review," *International Journal of Scientific Development and Research (IJS DR)*, 1, 34-39, **2016**.
15. کورده‌پزان‌مفتخر مهدیه، یوسفی لیلا، "جلیقه‌های ضدگلوله"، *رشد آموزش شیمی*، دوره ۲۴، شماره ۴، تابستان ۱۳۹۰.
16. Marissen R., "Design with Ultra Strong Polyethylene Fibers," *Materials Sciences and Applications*, 2, 319-330, **2011**.
17. Jeong Y. G., Baik D. H., Jang J. W., Min B. G., "Preparation Structure and Properties of Poly (P-Phenylene Benzobisoxazole) Composite Fibers Reinforced with Graphene," *RSC Advances*, 22, 279–286, 2015. Ambrósio J. D., Lucas A., Otaguro H., Costa L., "Preparation and Characterization of Poly (Vinyl Butyral)-Leather Fiber Composites," *Polymer Composites*, 32, 776 - 785, **2011**.
18. Shockey D. A., Giovanola J. H., Simons J. W., Erlich D.C., Klopp R.W., Skaggs S.R., "Advanced Armor Technology: Application Potential for Engine Fragment Barriers for Commercial Aircraft," *U.S. Department of Transportation- Federal Aviation Administration William J. Hughes Technical Center's*, Report No. DOT/FAA/AR-97/53, USA. **1997**.
19. Chen C.F., Frederick D., "Contact of Isotropic Square Plates with Rigid Spherical Indentors," *International Journal Solids and Structures*, 30, 637-650, **1993**.

20. Zaera R., "Ballistic Impacts on Polymer Matrix Composites, Composite Armor, Personal Armor," *Impact Engineering of Composite Structures. CISM International Centre for Mechanical Sciences*, Springer, Vienna, Austria, 526, **2011**.
21. Cavallaro V. P., "Soft Body Armor: An Overview of Materials, Manufacturing, Testing, and Ballistic Impact Dynamics," *NUWC-NPT Technical Report*, USA, 12,057, **2011**.
22. Silva M.A.G., Cismasiu C., Chiorean C.G., "Numerical Simulation of Ballistic Impact on Composite Laminates," *International Journal of Impact Engineering*, 31, 289-306, **2005**.
23. Zukas J.A., Nicholas T., Swift H.F., Greszczuk L.B., Curran D.R., "Impact Dynamics," *John Wiley & Sons, Journal of Applied Mechanics*, 50, 702, **1982**.
24. Navarro C., "Simplified Modelling of the Ballistic Behaviour of Fabrics and Fibre-Reinforced Polymeric Matrix Composites," *Key Engineering Materials*, 141-143, 383-402, **1998**.
25. Wen H.M., "Predicting the Penetration and Perforation of FRP Laminates Struck Normally by Projectiles With Different Nose Shapes," *Composite Structures*, 49, 321-329, **2000**.
26. Chocron I.S., Rodríguez J., Sánchez-Gálvez V., "A Simple Analytical Model for Ballistic Impact in Composites," *Journal of Physical IV. Colloque C3, Supplement from Journal of Physical III*, 7, 821-826, **1997**.
27. Bless S.J., Hartman D.R., "Ballistic Penetration of S-2 Glass Laminates," *21<sup>st</sup> International SAMPE Technical Conference*, Atlantic City, USA, 25-28, **1989**.
28. Caprino G., Lopresto V., "On the Penetration Energy for Fibre-Reinforced Plastics Under Low Velocity Impact Conditions," *Composites Science and Technology*, 61, 65-73, **2001**.
29. Jacobs M.J.N., M.J.N. Van Dingenen M.J.N., "Ballistic Protection Mechanisms in Personal Armour," *Journal Materials Science*, 36, 3137-3142, **2001**.