ساخت کلاه خود نظامی از مواد کامپوزیتی

سیامک مطهری
استاديار دانشكده مهندسي شيمي - پرديس دانشكده هاي فني - دانشگاه تهران
مجتبی نصیرنژاد
فارغ التحصيل كارشناسي ارشد مهندسي شيمي - پرديس دانشكده هاي فني - دانشگاه تهران
حسینعلی عمرانپور شهرضا
دانشجوي كارشناسي ارشد مهندسي شيمي - پرديس دانشكده هاي فني - دانشگاه تهران
(تاريخ دريافت ۸۳/۱۲/۹ ، تاريخ تصويب ۸۴/۶/۲۶)

چكيده
در اين كار تحقيقاتي كلاه خودهاي نظامي با استفاده از مواد كامپوزيتي طراحي و ساخته شد. كامپوزيت هاي طراحي شده قادر به مقاومت در برابر شليك گلوله از فاصله نزديك بودند. در اين مطالعه، كامپوزيت از تلفيق سه نوع تقويت كننده متفاوت همراه با رزين مناسب ساخته شد و با استفاده از روش تاگوچي تعداد لايه هاي بهينه و بهترين نوع رزين براي به دست آوردن حداكثر مقاومت در برابر شليك گلوله تعيين شد. همچنين نحوه قالبگيري و ترتيب قرار گرفتن لايه ها براي بهينه سازي خواص بالستيكي كامپوزيت مشخص گرديده است.

واژه های کلیدی: كولار, الياف دينما, توارون، رزين, پليمر، كامپوزيت، روش تاگوچي، خواص بالستيك

مقدمه
الياف آراميد, نايلون و شيشه، به طور گسترده در طراحي كامپوزيت هاي با ماتريس پليمري (PMC) مورد استفاده قرار مي گيرند و محافظت بالستيكي را در كاربردهاي مختلف از قبيل اتومبيل تا محافظت هاي انساني ايجاد مي كنند. رزين هاي رايج مورد استفاده عبارتند از: اپوكسي, وينيل استر, فنوليک و پلي استرها. الياف تازه وارد به اين بازار, الياف ژل ريسي شده پلي اتيلن (GSPE) هستند. اين الياف پايين ترين دانسيته و بالاترين مدول ويژه و استحكام را در ميان الياف مورد استفاده در صنايع بالستيكي دارند. اين خواص، مقاومت عالي اين الياف در برابر گلوله و وزن كم اين نوع PMC ها را ايجاد مي كند. براي مثال, سطح محافظتي كه براي كلاه خود GS-Mk-VI توسط ارتش انگليس در Area Density بر اساس جرم واحد سطح تعريف شده بود برابر 8 Kg/m^2 پيشنهاد شده بود كه اين سطح محافظت با الياف GSPE مي توانست در Area Density، 4.2 Kg/m^2 برآورد شود.

بنابراين كامپوزيت هاي بر پايه الياف GSPE مي توانند در يک سطح محافظت يكسان با وزن كمتر به كار روند، يا در يک وزن برابر, سطح محافظت بالاتري را ايجاد كنند.

استفاده از الياف توارون و الياف پلي اتيلن با يكديگر مي تواند نتايج مطلوب تري حاصل سازد. الياف توآرون داراي مقاومت حرارتي بالاتري نسبت به الياف پلي اتيلن است و در مقابل الياف پلي اتيلن داراي استحكام كششي، انعطاف و مدول ويژه بالاتري نسبت به الياف توارون است. هيبريد اين دو نوع الياف در ساختار يک كامپوزيت مي تواند خواص فوق العاده اي به كامپوزيت ببخشد. نمونه هاي ساخته شده با الياف توارون، يا تنها با الياف پلي اتيلن داراي خواص ضعيف تري نسبت به اين كامپوزيت هاي هيبريدي دارند. همچنين براي تامين خواص مكانيكي مورد نياز و جلوگيري از ايجاد عمق آسيب بالا از يک جز كامپوزيتي با الياف شيشه معمولي با درصد رزين بالاتر نسبت به ساير قسمت هاي اين مولتي كامپوزيت استفاده شد. وجود اين جز در ساختار، استفاده از آن به عنوان يک جز ساختاري در بدنه و ساير اجزاي يک وسيله نظامي را ممكن مي سازد.

استفاده از روش طراحي آزمايش تاگوچي، امكان صرفه جويي در هزينه و زمان را همزمان با امكان تعيين دخالت

Archive of SID

www.SID.ir

هر فاکتور در نتیجه آزمایش ایجاد مي کند. روش تاگوچي در مقایسه با روش هاي دیگر از قبیل روش فاکتوریل یا روش Simplex تعداد آزمایشات کمتر و در نتیجه صرفه جویي در زمان و هزینه را در بر خواهد داشت. همچنین با تکیه بر روش هاي آماري, امکان دستیابي به بهترین نتیجه را فراهم مي سازد. در این روش مي توان اثر سایر فاکتور هاي مزاحم یا Noise Factors را بررسي کرد.

در جدول (۱) خواص الیاف توآرون با الیاف پلي اتیلن مقایسه شده است.

فعالیتهای تجربی

در ساخت نمونه ها چهار فاکتور در سه سطح مورد بررسي قرار گرفت. با توجه به مطالعات قبلي و تخمین محدوده اي که هدف مورد نظر را تامین کند هر یک از این چهار فاکتور در سه سطح که در جدول (۲) مشاهده مي شود مورد بررسي قرار گرفت. براي بررسي این چهار فاکتور طبق روش طراحي آزمایش تاگوچي از آرایه متعامد L9 استفاده شد.

مواد

براي ساخت این نمونه ها از سه نوع رزین استفاده شد که نوع رزین هاي مورد استفاده در جدول (۳) آمده است. همچنین از سه نوع الیاف تواورن که داراي ساختار شیمیایي پلي آرامیدي است به همراه الیاف پلي اتیلن و الیاف شیشه جهت ساخت نمونه ها استفاده شد که در جدول (۴) مشخصات آنها همراه با نام شرکت سازنده مشاهده مي شود.

جدول۱: مقایسه الیاف توآرون با الیاف پلی اتیلن.

نوع الیاف	مزایا	معایب
تواورن	پایداري حرارتي چسبندگي خوب به ماتریس کارایي بالاي بالستیکي	عدم پایداري نسبت به UV
پلي اتیلن	دانسیته پایین مدول ویژه بالا کارکرد راحت تر	عدم پایداري حرارتي عدم پایداري نسبت به UV قابلیت اشتعال

جدول۲ : چهار فاکتور مورد بررسی در این تحقیق به همراه سطوح.

سطح / نوع متغیر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
تعداد لایه الیاف تواورن A	۱۹	۱۷	۱۳
نوع رزین B	پلي استر	اپوکسي	وینیل استر
تعداد لایه الیاف شیشه C	۹	۷	۵
تعداد لایه الیاف پلي اتیلن D	۳۰	۲۶	۲۲

جدول ۳ : رزین های مورد استفاده در ساخت نمونه ها.

نوع رزین	نام تجاري	شرکت سازنده
پلي استر	۸۰۴۳۰	صنایع شیمیایي بوشهر
اپوکسي	CO -207	صنایع شیمیایي مکرر
وینیل استر	Atlak 590	DSM هلند

Archive of SID

www.SID.ir

تهیه نمونه ها

براي دستيابي به خواص ضد بالستيكي مناسب در كنار مقاومت مكانيكي، تصميم بر آن شد كه هر نمونه داراي دو بخش زير باشد:

۱- بخش تامين كننده خواص ضد بالستيكي كه از كامپوزيت هايي با الياف توآرون و پلي اتيلن با درصد رزين بسيار پايين ساخته شد.

۲- بخش تامين كننده خواص مكانيكي كه از كامپوزيتي با الياف شيشه و درصد رزين بالاتر بود.

براي ساخت نمونه ها همان طور كه قبلاً ذكر شد از روش طراحي آزمايش تاگوچي استفاده شد كه در جدول (۵) مشخصات هر يک از نمونه ها مشاهده مي شود. به علت اينكه كامپوزيت ها از هيبريد سه جز آراميدي, پلي اتيلني و شيشه اي ساخته شده اند، نمونه ها در سه مرحله تهيه شدند. ابعاد هر يک از نمونه ها $20*20cm^2$ بود.

ساخت جزء آراميدی

براي ساخت نمونه ها ابتدا تعداد لايه هاي مورد نظر از اين الياف در اندازه مناسب بريده و همچنين رزين مورد استفاده در هر نمونه به صورت زير آماده شد:

۱- براي ساخت نمونه هاي با رزين پلي استر مقدار ۰,۲% از نفتنات كبالت با رزين آميخته شده و در هنگام استفاده مقدار ۱,۲% از كاتاليزور AAP با رزين مخلوط شد.

۲- براي ساخت نمونه هاي با رزين اپوكسي ۱۰۰ گرم از رزين با مقدار ۱۵ گرم از سخت كننده مخلوط شد.

۳- براي ساخت نمونه هاي با رزين وينيل استر چون اين رزين بطور تجاري با نفتنات كبالت آميخته است در هنگام استفاده مقدار ۱,۲% از كاتاليزور MEKP با رزين آميخته شد.

براي ساخت هر يک از نمونه ها تعداد لايه مورد نظر از الياف با حدود ۱۶% رزين آغشته و داخل قالبي كه به اين منظور ساخته شده بود قرار داده شدند و تحت فشار ۱۰۰ بار قرار گرفتند، تا رزين به اندازه كافي سخت شود. هر ۹ نمونه به اين صورت ساخته شد.

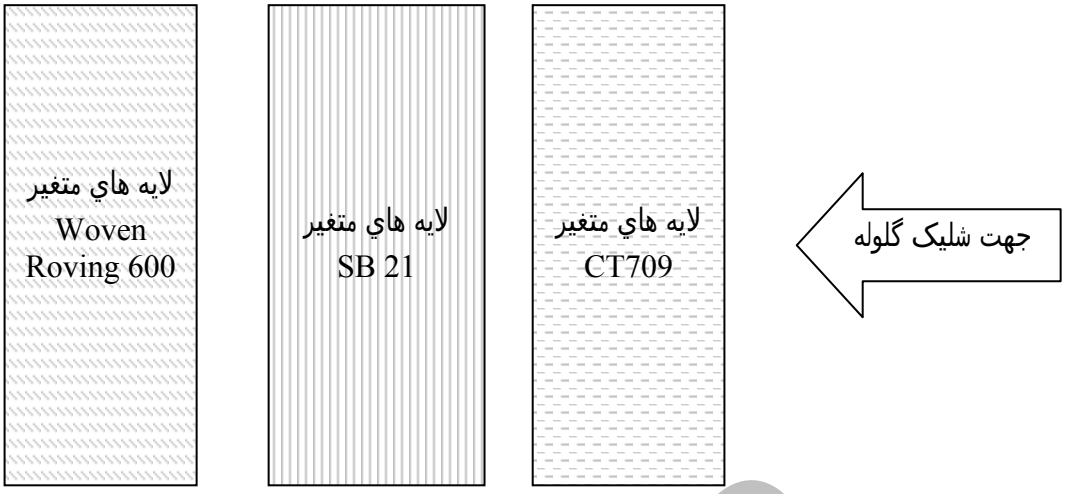
جدول ۴ : مشخصات الياف مورد استفاده در ساخت نمونه ها.

نام الياف	نام تجاري	وزن واحد سطح (گرم)	نوع بافت الياف	شركت سازنده
توآرون	CT 709	۲۲۰	حصيري	Akzo Nobel
پلي اتيلن	Dyneema SB21	۱۴۵	تک جهته	DSM
شيشه	Woven	۶۰۰	حصيري	Camelyaf

جدول ۵ :طراحی آزمایشات با استفاده از آرایه متعامد L9 .

تعداد لايه الياف پلي اتيلن	تعداد لايه الياف شيشه	نوع رزين	تعداد لايه الياف توارون	فاكتور / آزمايش
۳۰	۹	پلي استر	۱۹	E1
۲۶	۷	اپوكسي	۱۹	E2
۲۲	۵	وينيل استر	۱۹	E3
۲۲	۷	پلي استر	۱۷	E4
۳۰	۵	اپوكسي	۱۷	E5
۲۶	۹	وينيل استر	۱۷	E6
۲۶	۵	پلي استر	۱۵	E7
۲۲	۹	اپوكسي	۱۵	E8
۳۰	۷	وينيل استر	۱۵	E9

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۱: ساختار نمونه ها.

ساخت جزء پلی اتیلنی

براي ساخت اين جزء تعداد لايه هاي مورد نظر از اين الياف در اندازه مذكور بريده شد و بعد از بريدن لايه ها به تعداد مشخص براي هر نمونه، لايه ها داخل قالب تحت پرس و دماي 138°C به مدت يک ساعت قرار داده شدند، سپس نمونه ها تا دماي محيط خنک شدند.

ساخت جزء با الیاف شیشه

در ساخت اين جزء چون خواص مكانيكي مد نظر بود، لذا در ساخت نمونه ها درصد رزين بالاتر مورد استفاده قرار گرفت. طرز تهيه رزين ها همانند روش ساخت جزء آراميدي است. بعد از آماده سازي، الياف با ۴۰% رزين آغشته شدند و داخل قالب تحت پرس ملايم تري قرار گرفتند تا رزين به اندازه كافي سخت شود. بعد از سخت شدن رزين، نمونه ها از قالب خارج شدند.

اتصال سه جزء به یکدیگر

بعد از تهيه سه جزء مذكور يک لايه بسيار نازک از رزين مربوطه بين آنها قرار گرفت و هر سه با هم تحت پرس ۱۰۰ بار قرار گرفتند. بعد از سخت شدن رزين، نمونه ها آماده شدند. در شكل (۱) ساختار نمونه ها مشاهده مي شود.

تست بالستیکی نمونه ها

بعد از ساخت نمونه ها, هر يک از آنها به همراه يک صفحه آلومينيومي شاهد با ضخامت 1,5 mm كه داراي ابعاد نمونه ها بود داخل يک چهار چوب فلزي قرار گرفته و در داخل آن محكم شدند و كاملاً بي حركت در محل تست نصب شدند. سپس نمونه ها از فاصله ۵ متري مورد اصابت گلوله هاي تفنگ MP5 قرار گرفتند. گلوله هاي اين تفنگ داراي سرعت تقريبي 400m/s هستند و هر يک از آنها داراي وزني برابر gr 8 مي باشند. بعد از تست، ميزان فرو رفتگي صفحات آلومينيومي اندازه گرفته شد.

مبانی تئوریک

در يک ضربه بالستيكي، كامپوزيت پليمري با كاهش انرژي جنبشي، پرتابه را متوقف مي سازد. مكانيسم هاي مختلفي از جمله شكست كششي الياف، تغيير شكل الاستيک كامپوزيت، جدايي بين سطحي، تغيير شكل پشت كامپوزيت، برش بين لايه ها و اينرسي كامپوزيت، پاسخي براي جذب انرژي در حوزه هاي مختلف هستند. در اين ميان فاكتورهايي كه جذب انرژي را كنترل مي كنند ، خواص مقاومت كششي الياف، خواص ماتريس، چيدمان الياف در كامپوزيت و استحكام بين سطحي هستند. براي طراحي مواد در كامپوزيت ها جهت محافظت در برابر ضربه هاي بالستيک تجزيه و تحليل هر يک از مكانيسم هاي جذب انرژي ضروري است.

در طراحي مدل فرض هاي زير اعمال شد:

۱- پرتابه سخت است و در حين ضربه بدون تغيير شكل باقي مي ماند.

Archive of SID

www.SID.ir

۲- از کاهش انرژي به علت اصطکاک بین پرتابه و کامپوزیت و همچنین از گرماي حاصل چشم پوشي مي شود.
۳- مکانیسم شکست کامپوزیت در سرتاسر آن ثابت باقي مي ماند.
۴- از انرژي جذب شده به علت لایه لایه شدن کامپوزیت، صرف نظر مي شود.

مقدار انرژي جنبشي گلوله با سرعت V و جرم m برابر است با:

$$K.E = \frac{1}{2}mV^2$$

(۱)

اگر سرعت شلیک گلوله برابر V_S و سرعت باقیمانده برابر V_R باشد انرژي هدر رفته در حین ضربه برابر است با:

$$E_L = \frac{1}{2}m(V_S^2 - V_R^2)$$

(۲)

ضربه پرتاب باعث به وجود آمدن یک مخروط در پشت کامپوزیت شده که در شکل (۲) مشاهده مي شود. نخ هاي ابتدایي کامپوزیت که مستقیماً توسط پرتابه ضربه زده مي شوند تا حد شکست کششي شان کشیده مي شوند. نخ هاي ثانویه که مستقیماً با پرتابه برخورد نکرده اند تغییر شکل مي دهند و مخروط به وجود مي آید.

علاوه بر دو مکانیسم مذکور مکانیسم سوم جذب انرژي، انرژي جنبشي جزء حرکت کرده در صفحه کامپوزیت مي باشد، در واقع داریم:

$$E_{total} = E_{TF} + E_{ED} + E_{KE}$$

(۳)

که:

E_{TF} انرژي جذب شده بوسیله شکست کششي نخ هاي اولیه بوده و مقدار آن برابر است با:

$$E_{TF} = E_C V$$

(۴)

در رابطه بالا V حجم کامپوزیت کشیده شده و E_C انرژي جذب شده در واحد حجم در نقطه شکست کششي کامپوزیت مي باشد.

E_{ED} انرژي جذب شده توسط تغییر شکل الاستیک نـخ هاي ثانویه بوده و در کرنش ε، براي کامپوزیت با مدول کششي M مقدار آن برابر است با:

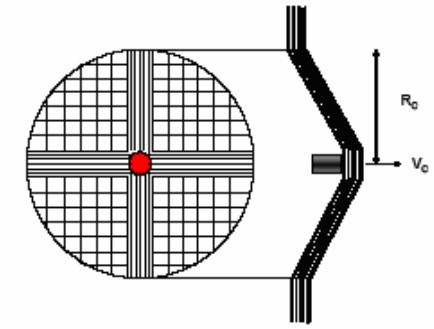
$$E_{ED} = \frac{1}{2}M\varepsilon^2$$

(۵)

وبالاخره E_{KE} انرژي جنبشي مخروط شکل گرفته در پشت کامپوزیت بوده و براي مخروط با جرم m که با سرعت V_C تشکیل شده مقدار آن برابر است با:

$$E_{KE} = \frac{1}{2}mV_C^2$$

(۶)



شکل ۲ : تغییر شکل مخروطی پشت کامپوزیت [۱].

بحث وبررسی

نتایج تست بالستیکی نمونه ها

بعد از شلیک گلوله به نمونه ها در هیچ کدام از آنها عبور گلوله مشاهده نشد و نمونه ها توانسته بودند ازفاصله ۵ متري در برابر گلوله هاي تفنگ MP5 مقاومت کنند.

همان طور که قبلاً ذکر شد براي مشاهده اثر ضربه گلوله بر کامپوزیت ها, در هنگام تست, پشت نمونه ها صفحات آلومینیومي قرار دادیم. اثر ضربه ناشي از گلوله ها بر صفحات آلومینیومي نقش بسته بود که براي هر نمونه, عمق آسیب ایجاد شده اندازه گرفته شد. نتایج این اندازه گیري در جدول (۶) مشاهده مي شود. در بین نمونه ها در نمونه E1 کمترین عمق آسیب و در نمونه E5 بیشترین عمق آسیب مشاهده مي شود.

بررسی نتایج

با توجه به روش آماري، ملاحظه مي شود که افزایش تعداد لایه ها در هر سه بخش باعث کاهش عمق آسیب مي گردد. با توجه به محاسبات مشاهده مي شود که افزایش تعداد لایه هاي شیشه مي تواند در نتیجه آزمایش

Archive of SID
www.SID.ir

حدود ۷۰% تاثير گذارد. با توجه به اينكه دليل استفاده از لايه هاي شيشه در ابتدا نيز براي افزايش مقاومت مكانيكي كامپوزيت بوده است, مي توان گفت كه استفاده از يک كامپوزيت با الياف شيشه معمولي در پشت پانل ها مي تواند عمق آسيب را به نحو قابل ملاحظه اي كاهش دهد. با توجه به نتايج حاصل مي توان گفت كه كامپوزيت تهيه شده از رزين وينيل استر و تعداد حداكثر لايه هاي مورد استفاده از الياف فوق بهترين گزينه خواهد بود.

با استفاده از روش تاگوچي مي توان حتي به مقدار عمق آسيب بهينه نيز دست يافت. در جدول (۷) مشاهده مي شود كه در سطح ۱ فاكتور هاي A,C,D و در سطح ۳ فاكتور B سطوح بهينه براي اين منظور هستند. بنابراين با اغماض از خطاها مي توان نشان داد كه در حالت بهينه عمق آسيب برابر با ۱۰,۲۷ ميلي متر خواهد بود.

مقايسه نتايج با كارهاى انجام شده توسط ساير محققين

براي مقاوم سازي يک كامپوزيت در برابر ضربه هاي با سرعت بالا بايد آنرا با موادي با كرنش بالا هيبريد كرد. با اين كار وقتي گلوله با كامپوزيت برخورد مي كند ماده با كرنش بالا مقدار زيادي از انرژي را جذب كرده و از پارگي كامپوزيت اصلي جلوگيري مي كند. از جمله اينگونه مواد مي توان الياف كولار، الياف شيشه نوع s، و الياف اسپكترا (نوعي پلي اتيلن ويژه) را نام برد (بلس و هارتمن ۱۹۸۹، لي ات ال ۱۹۹۴، زو ات ال ۱۹۹۱). از ديگر موادي كه به اين منظور استفاده مي شوند مي توان به آلياژهاي با حافظه الاستيک بالا (SMA) و پلي اتيلن با زنجيره هاي كشيده شده (ECPE) اشاره كرد [۷]. در شكل (۳) ساختار يک كامپوزيت هيبريدي نشان داده شده است. نتايج حاصل از كارهاي پروفسور روگر و همكارانش كه بر روي هيبريدهاي SMA و ECPE همراه با كامپوزيت گرافيت انجام گرفته در شكل (۴) مشاهده مي شود.

جدول ۶ : عمق آسيب ايجاد شده در نمونه ها.

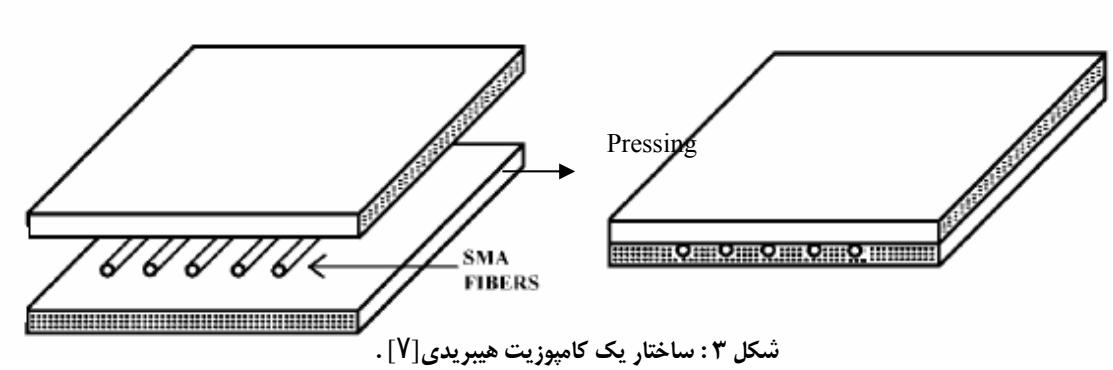
نمونه	عمق آسيب ايجاد شده بر حسب ميلي متر	انرژي جذب شده (J)	درصد انرژي جذب شده
E1	۱۱,۰۵	۵۳۱,۵	۹۲,۰۲
E2	۱۳,۵۱	۵۳۵,۵	۹۲,۷۱
E3	۱۴,۰۳	۵۲۰,۵	۹۰,۱۱
E4	۱۳,۴۵	۵۰۰,۰	۸۶,۵۷
E5	۱۵,۹۰	۵۲۳,۸	۹۰,۶۹
E6	۱۲,۸۶	۵۲۷,۹	۹۱,۴۰
E7	۱۵,۲۱	۴۹۴,۷	۸۵,۶۵
E8	۱۲,۴۰	۵۰۹,۹	۸۸,۲۸
E9	۱۱,۲۵	۵۱۶,۷	۸۹,۴۶

جدول ۷ : مقايسه سطوح مختلف فاكتورها .

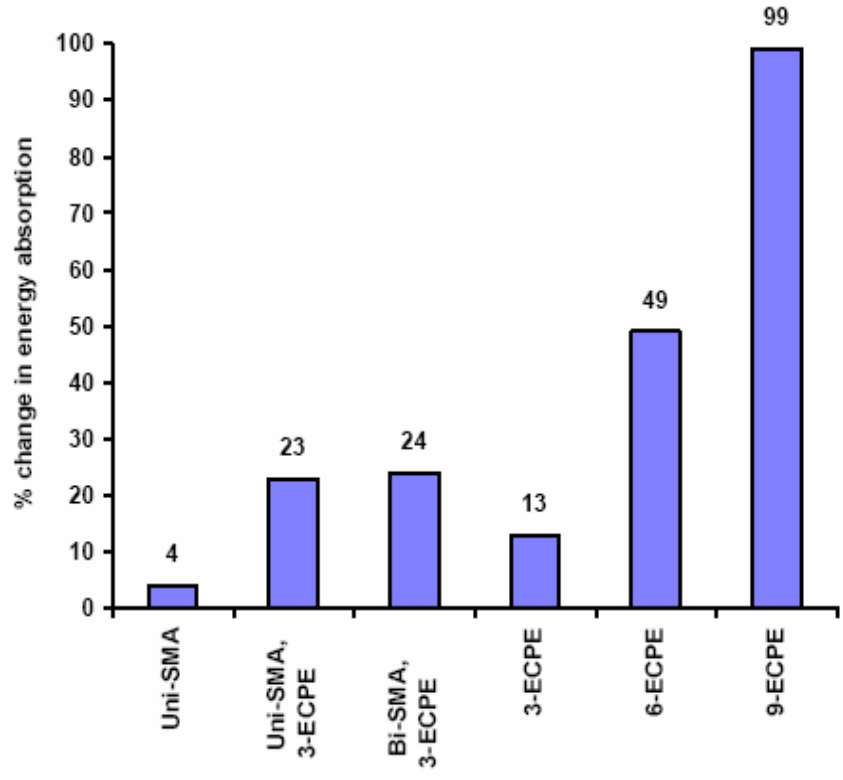
فاكتور	سطح۱	سطح۲	سطح۳
A تعداد لايه توارون	۱۲,۸۶	۱۴,۰۷	۱۲,۹۵
B نوع رزين	۱۳,۲۳	۱۳,۹۴	۱۲,۴۵
C تعداد لايه شيشه	۱۲,۱۰	۱۲,۷۴	۱۵,۰۵
D تعداد لايه پلي اتيلن	۱۲,۷۳	۱۳,۸۶	۱۳,۲۹

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۳ : ساختار یک کامپوزیت هیبریدی[۷] .



شکل ۴ : میزان جذب انرژی در کامپوزیتهای SMA و ECPE [۷] .

نتیجه گیری

با بررسي نتايج مي توان گفت كه الياف توارون كه در بخش خارجي كامپوزيت قرار گرفته و اولين برخورد كننده با گلوله هستند، سهم به سزايي در ساختار بالستيكي كامپوزيت بازي مي كنند. بنابراين انتظار مي رفت كه اين فاكتور سهم بزرگتري در جذب انرژي داشته باشد. در واقع لايه هاي الياف توارون با خاصيت ضد بالستيكي خود انرژي بالايي از گلوله مي گيرند. نوع رزين اگرچه در عكس العمل كامپوزيت در برابر ضربه و انتقال آن به الياف موثر است، در درجه دوم اهميت قرار دارد، در واقع جدا شدن لايه ها و جذب انرژي به اين طريق بر عهده رزين مي باشد. در صدي از انرژي توسط الياف دينما جذب مي شود ولي چون هيچ كدام از گلوله ها به اين لايه نرسيده اند در مقايسه با الياف توارون سهم كمتري دارند. الياف شيشه كمترين نقش را در جذب انرژي گلوله بازي مي كنند ولي از آنجا كه در اين لايه از درصد بيشتري رزين استفاده شده بنابراين خواص مكانيكي نسبت به ديگر لايه ها بالاتر بوده و در نتيجه مانع از تغيير شكل كامپوزيت در اثر ضربه مي شوند.

تشکر و سپاس

در اينجا جا دارد تا مراتب تشكر و سپاسمان را از مسئولان شركت تيوا پليمر كه در اجراي اين پروژه ما را پشتيباني كردند به جا آوريم.

www.SID.ir

مراجع

1 - *Bazle a Gama Ballistic damage analysis of thick-section composites ud-ccm*, march 2, 2005.

2 - Bless, S. J. and Hartman, D. R. (1989). "Ballistic penetration of S-2 glass laminates." *21st International SAMPE Technical Conference*, September 25-28, PP. 852-866.

3 - Brown, J. R. Chappell, P. J. C. and Mathis, Z. (1992). "Plasma surface modification of advance organic fibers.Part II: Effects on the mechanical fracture and ballistic properties of extended-chain polyethylene/epoxy composites." *Journal of Materials Science*, Vol. 27, No. 12, PP. 3167-3172.

4 - Dhingra, A. K. (1988). "Fibers engineering. In: Mark HF, Bikales NM." *Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*. New York: Wiley, 2nd ed., Vol. 6, PP.756-802.

5 - Ire monger, M. J. and Went, A. C. (1996). "Ballistic impact of fiber composite armors by fragment-simulating projectiles." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 27 A, No. 7, PP. 575-581.

6 - Lee, B. L., Song, J. W. and Ward, J. E. (1994). "Failure of Spectra Polyethylene fiber reinforced composites under ballistic impact loading." *Journal of Composite Materials*, Vol. 28, No. 13, PP.1202-1226.

7 - Roger, L. (1996). *Ellis Ballistic impact resistance of graphite epoxy composites with shape memory alloy and extended chain polyethylene spectra™ hybrid components*.

8 - Woodward, R. L., Eagle, S. G. T., Baxter, B. J. and Challis, K. (1994). "Resistance to penetration and compression of fiber-reinforced composite materials." *Composites Engineering*, Vol. 4, No. 3, PP. 329-341.

9 - Wu, E., Tsai, C. Z. and Chen, Y. C. (1994). "Penetration into glass/epoxy composite laminates." *Journal of Composite Materials*, Vol. 28, No. 18, PP. 1783-1802.

10 - Zee, R. H. and Hsieh, C. Y. (1993). Energy loss partitioning during ballistic impact of polymer composites. Polymer Composites, Vol. 14, No. 3, PP. 265-271.

11 - Zhu, G., Goldsmith, W. and Dharan, C. K. H. (1992). "Penetration of laminated Kevlar by projectiles: I. experimental investigation." *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 29, No. 4, PP. 399-420.

Archive of SID

www.SID.ir