



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی نساجی

بررسی رفتار ضربه ی بالستیک پانل های پارچه ای

پایان نامه کارشناسی ارشد تکنولوژی نساجی

صهبا روح الهی

استاد راهنما

دکتر محمد ذره بینی

دکتر محمد قانع



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی نساجی

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته تکنولوژی نساجی خانم صهبا روح الهی
تحت عنوان
بررسی رفتار ضربه ی بالستیک پانل های پارچه ای

در تاریخ ۹۲/۱۰/۱۸ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

- | | |
|--------------------|-------------------------------|
| دکتر محمد ذره بینی | ۱- استاد راهنما اول |
| دکتر محمد قانع | ۲- استاد راهنما دوم |
| دکتر علی زادهوش | ۳- استاد داور |
| دکتر سعید آجلی | ۴- استاد داور |
| دکتر مصطفی یوسفی | سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده |

تقدیر و تشکر

سپاس مخصوص پروردگاری است که انسان را به نعمت عقل کرامت بخشید. ستایش مخصوص خداوندی است که آغاز همه از اوست و انجام همه بدوست. این پژوهش حاصل الطاف الهی و یاری اساتید و بزرگوارانی است که مرا در انجام این امر بسیار یاری نمودند.

در ابتدا صمیمانه ترین مراتب سپاس و قدردانی خود را تقدیم اساتید گرانقدرم آقای دکتر ذره بینی و آقای دکتر قانع می نمایم که با راهنمایی های بی دریغشان راهگشای اینجانب بودند.

در پایان سپاس می دارم پدر و مادر و همسر را که این اثر، با همراهی و صبر بی دریغشان به پایان رسیده است و سپاس گذار تمام دوستانی هستم که به هر طریقی مرا یاری کردند.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوری های ناشی از تحقیق
موضوع این پایان نامه (رساله) متعلق به
دانشگاه صنعتی اصفهان است.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
هفت	فهرست مطالب
۱	چکیده
	فصل اول: مقدمه
۳	۱-۱- تعاریف
۳	۲-۱- انواع زره
۳	۱-۲-۱- زره نرم
۴	۲-۲-۱- زره سخت
۴	۳-۱- کاربرد زره های مقاوم به گلوله
۴	۴-۱- مکانیزم های جذب انرژی
۱۲	۵-۱- تأثیر هندسه ی پرتابه بر میزان نفوذ
۱۳	۱-۵-۱- جذب انرژی ضربه
۱۵	۲-۵-۱- نفوذ تحت سرعت زیاد
۱۵	۶-۱- مواد مرکب
۱۷	۷-۱- لایه چینی دستی
۱۷	۸-۱- روابط حاکم بر کامپوزیت ها
۱۷	برای تعیین مدول طولی کامپوزیت به شیوه ی زیر عمل می گردد:
۲۰	Halpin- Tsai
	فصل دوم: تجربیات
۲۲	۱-۲- مواد اولیه
۲۳	۲-۲- تهیه ی کامپوزیت
۲۶	۳-۲- آزمایش کشش
۲۸	۴-۲- آزمایش ضربه
۳۰	۵-۲- خصوصیات برشی
۳۳	۶-۲- آزمایش شلیک
	فصل سوم: مدل سازی به روش المان محدود
۳۹	۱-۳- معرفی روش اجزای محدود

۴۰	.....	۲-۳- معرفی نرم افزار آباکوس
۴۰	.....	۳-۳- Part مدول
۴۱	.....	۴-۳- Property مدول
۴۱	.....	۵-۳- Assembly مدول
۴۲	.....	۶-۳- Step مدول
۴۲	.....	۷-۳- Interaction مدول
۴۲	.....	۸-۳- Load مدول
۴۳	.....	۹-۳- Mesh مدول
۴۴	.....	۱۰-۳- Job مدول
۴۴	.....	۱۱-۳- Visualization مدول
		فصل چهارم: نتایج و بحث
۴۶	.....	۱-۴- تأثیر تعداد لایه
۴۸	.....	۲-۴- تأثیر سطح مقطع گلوله
۵۰	.....	۳-۴- نتایج حاصل از مدل سازی
		فصل پنجم: نتیجه گیری کلی
۵۶	.....	۱-۵- نتیجه گیری
۵۷	.....	۲-۵- پیشنهادها
۵۸	.....	منابع
۵۸	.....	ضمائم

چکیده

استفاده از زره های سبک وزن در مقایسه با انواع سنتی آن جهت متوقف ساختن گلوله ی شلیک شده از جنگ افزار های سبک دستی از دهه ی ۱۹۴۰ میلادی افزایش یافته است. کاهش وزن زره با به کار گیری مواد مرکب لینی امکان پذیر می باشد. تحقیقات در زمینه ی توسعه و تولید این مواد که امروزه کامپوزیت نامیده می شود بسیار گسترده می باشد به گونه ای که خود به یک شاخه از علوم مهندسی با کاربرد های بسیار متنوع نظامی و غیر نظامی مبدل شده است. بواسطه ی انرژی زیاد پرتابه، زره مصرفی بایستی قادر به جذب مقدار زیاد از انرژی با کمترین تغییرات پلاستیکی باشد. بنابراین در شرایط خاص که زره دچار تغییرات پلاستیکی می شود امکان مهار پرتابه توسط زره وجود نخواهد داشت و پارگی و یا شکست زره رخ می دهد. تغییرات به وجود آمده بیانگر رفتار محافظت کنندگی توسط زره بوده و می تواند جهت تعیین شرایط حد شکست و یا پارگی زره به کار گرفته شوند.

در این تحقیق نمونه های زره کامپوزیتی با استفاده از پارچه ی بافته شده از نخ کولار و رزین پلی یورتان دو جزئی تولید و تحت شلیک گلوله با هندسه ی مخروط ناقص و سر صاف توسط دستگاه شلیک گلوله قرار گرفتند و حد بالستیک کامپوزیت های ۸ و ۱۲ لایه به ترتیب ۱۱۸ و ۱۴۴ متر بر ثانیه به دست آمد.

نرم افزار آباکوس جهت مدل سازی سرعت پرتابه در لحظه ی اصابت و خروج پرتابه از پانل مورد استفاده قرار گرفت. نتایج با داده های حاصل از آزمایشات شلیک پرتابه با هندسه ی مخروط ناقص مقایسه شد. تأثیر تعداد لایه ی کامپوزیت و سطح مقطع نوک پرتابه در رابطه با قابلیت جذب انرژی توسط زره مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت همبستگی نتایج تئوریک و آزمایشی تأیید گردید.

کلمات کلیدی:

بالستیک- کولار- دستگاه شلیک- نرم افزار آباکوس- محافظت- زره- پلی یورتان

فصل اول

مقدمه

تجارب حاصل از جنگ جهانی دوم، پایه و اساس استفاده از زره های سبک وزن با قابلیت متوقف نمودن گلوله ی تفنگ را تشکیل می دهند. زره های سبک اولیه با استفاده از فولاد تولید می شدند. پیشرفت در فناوری تولید زره مرکب های الیاف شیشه در دهه ی ۱۹۶۰ سبب معرفی گروهی از مواد بسیار سبک تر از انواع فولاد گردید. این فناوری نوین در تولید نسل بعدی زره ها به کار گرفته شد و کامپوزیت از الیاف شیشه در سمت پشت و سرامیک آلومینیوم اکسید در سمت رو ساخته شد. الیاف شیشه ی موجود در پشت زره قادر به جذب قطعات خرد شده ی سرامیک بواسطه ی برخورد گلوله با زره می باشد. جرم سطحی این مواد زره مرکبی بیش از 60 kg/m^2 می باشد. پیشرفت در فناوری تولید مواد، منجر به ساخت سرامیک های سبک وزن بر پایه برن کرباید که ۲۰٪ سبک تر از سرامیک بر پایه آلومینیوم اکسید بود، گردید. متحول شدن روش تولید برن کرباید نیز منجر به تولید نوع فشرده ی سرامیک برن کرباید که انبار نمودن آن ساده تر می باشد، شد. آلومینیوم اکسید با وزن مخصوص $\frac{g}{\text{cm}^3}$ ۳/۴۳ اولین سرامیک به کار رفته در ساخت زره سخت است که قادر به متوقف نمودن طیف وسیع از گلوله ها می باشد.

۱-۱- تعاریف

زره^۱ تعریف می شود از مانعی که بتوان توسط آن شخص مصرف کننده در مقابل خطرات ناشی از شلیک گلوله و یا پرتابه را محافظت نمود. بررسی حرکت پرتابه در حوزه ی علم بالستیک^۲ می باشد. این بررسی می تواند تحت سرعت بالا^۳ و یا سرعت پایین^۴ انجام پذیرد. ضربه ی وارد شده بواسطه ی برخورد پرتابه با زره، ضربه ی بالستیک^۵ نامیده شده است. حد بالستیک^۵ عبارت است از سرعت پرتابه در لحظه ای که نصف پرتابه از زره خارج شده و نصف دیگر آن در درون و در سمت شلیک باقی مانده باشد. مقاومت بالستیک زره یا مواد وابسته به توانایی آن در متوقف نمودن پرتابه می باشد. زره یا ماده می تواند ساده و یا متشکل از اجزای مختلف باشد که در این صورت زره مرکب^۶ نامیده می شود [۱].

۱-۲- انواع زره

نیروی های مسلح از قبیل پلیس و سایر ارگان های مجری قانون و یا ارتش نیازمند به پوشش های محافظتی متفاوت می باشند. پوشش محافظتی در دو نوع نرم و سخت وجود دارند. استفاده از پوشش نرم در نیروی پلیس و ارگان های مجری قانون و پوشش سخت در ارتش جهت به کار گیری در میدان های جنگ متداول است. زره های سخت سبک وزن می توانند در اشکال متنوع از قبیل کلاه ایمنی^۷ ساخته شوند.

۱-۲-۱- زره نرم

نیروهای ویژه ی مجری قانون معمولاً از جلیقه ی^۸ مخفی نرم و منعطف در مأموریت ها استفاده می نمایند. جلیقه-های نرم مقاوم به گلوله بوده و به اشتباه ضد گلوله نامیده می شوند. این نوع جلیقه تنها قادر به محافظت مأمور در مقابل گلوله ی شلیک شده از سلاح های سبک دستی بوده و نمی تواند محافظت در مقابل سلاح های سرد نوک تیز از قبیل چاقو را تأمین نمایند. جلیقه ی نرم تنها قادر به محافظت اندام های حساس واقع در قسمت بالای بدن بوده و سایر اندام ها از قبیل دست ها، گردن، سر و پا را محافظت نمی کند [۱].

جلیقه های نرم اولیه با استفاده از الیاف آرامید کارا^۹ تولید و توسط نیروی پلیس برای اولین بار در دهه ی ۱۹۷۰ مورد استفاده قرار گرفتند. نسل بعدی جلیقه های نرم، سنگین تر و حجیم تر ساخته شده و در اواسط دهه ی ۱۹۸۰ معرفی شدند. پیشرفت در فناوری تولید الیاف آرامید با کارایی بسیار بالا و الیاف پلی اتیلن، سبب ساخت جلیقه های

¹ Armor

² Ballistic

³ High speed

⁴ Low speed

⁵ Ballistic limit

⁶ Composite armor

⁷ Helmet

⁸ Vest

⁹ High performance

بالستیک نازک و سبک گردید. امروزه جلیقه ی زره ای تحت شرایط مندرج در استاندارد شماره NIJ ۰۱۰۱,۰۴^۱ تدوین شده بوسیله انجمن ملی قضا واقع در ایالات متحده ی آمریکا تولید می شود. زره نرم امروزه علاوه بر نوع محافظت پرسنلی، جهت پوشش سقف و بدنه وسائط نقلیه و یا گارد محافظتی، پروانه ی موتور هواپیما به صورت شکل یافته نیز به کار گرفته می شود [۱].

۱-۲-۲- زره سخت

زره سخت به صورت صفحات فولادی، تیتانیوم و سرامیک در روی زره نرم و یا به صورت صفحات HMPE^۲ در پشت زره نرم باعث افزایش قابلیت محافظتی زره به کار گرفته می شود. از کاربرد های متداول این نوع زره می توان به کلاه ایمنی پلیس و یا ارتش، زره پوش های ارتش، زره های دستی ضد شورش و وسایل نقلیه شخصی و غیر نظامی اشاره نمود [۱].

۱-۳- کاربرد زره های مقاوم به گلوله

استفاده از الیاف کارا سبک وزن در زره های مقاوم به ضربه در دهه های اخیر رشد چشمگیر داشته و در موارد زیر به کار گرفته می شود:

- ❖ جلیقه ی نرم
- ❖ زره سخت از قبل شکل گرفته
- ❖ کلاه ایمنی بالستیک
- ❖ زره وسائط نقلیه [۱]

۱-۴- مکانیزم های جذب انرژی

نایک^۳ و همکاران رفتار ضربه ی بالستیک^۴ کامپوزیت متشکل از پارچه ی بافته شده ی ساده از الیاف شیشه/اپوکسی^۵ و کامپوزیت پارچه ای با بافت سرژه از الیاف کربن / اپوکسی^۶ را بررسی و اعلام نمودند که کامپوزیت متشکل از الیاف شیشه دارای چگالی حجمی بیشتر، انرژی جنبشی زیادتری را جذب می نماید [۲].

¹ National Institute of Justice

² High Modulus Polyethylene

³ Naik

⁴ Ballistic impact

⁵ E-glass/epoxy

⁶ T300 carbon/epoxy

تحقیقات بیانگر نقش کلیدی اصطکاک در ضربه ی بالستیک می باشد [۳-۵]. در تحقیقات دیگر از روش المان محدود FEM^۱ جهت شبیه سازی ضربه ی بالستیک پرتابه ی کرومی شکل صلب به هنگام برخورد با پارچه ی مربع استفاده گردید [۶, ۷].

نایک و دوشی^۲ در سال ۲۰۰۸ رفتار کامپوزیت منسوج شیشه / اپوکسی با ضخامت های مختلف تحت سرعت های متفاوت پرتابه را مورد مطالعه قرار دادند [۸]. نتایج در جدول ۱-۱ نشان داده شده است.

جدول ۱-۱ زره مرکب شیشه / اپوکسی [۸]

نتایج آزمایش	سرعت شلیک (m/s)	ضخامت هدف (mm)	قطر پرتابه (mm)	وزن پرتابه (g)
نفوذ	۵۵۰/۸۹۴	۱۹	۶/۳۵	۳/۸۴
نفوذ	۴۵۲/۵۴۶	۱۴/۵	۶/۳۵	۳/۸۴
نفوذ	۵۰۸/۸۰	۱۹	۴/۷۶	۳/۳۳
نفوذ	۳۹۲/۹۸	۱۴	۴/۷۶	۳/۳۳
نفوذ	۲۶۹/۰۳	۹	۴/۷۶	۳/۳۳
عدم نفوذ	۱۷۴/۲۹	۷	۶/۳۳	۵/۸۴
نفوذ	۱۴۲/۵۰	۵	۶/۳۳	۵/۸۴
نفوذ	۵۵۹/۱۱۲	۲/۵	۶/۰۰	۵/۰۰

اصابت پرتابه با کامپوزیت، سبب گسیختگی آن خواهد شد. شدت گسیختگی وابسته به عواملی از قبیل اندازه، شکل، جرم و سرعت پرتابه و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی زره کامپوزیتی می باشد. کمیت های مطرح در تحلیل اصابت پرتابه با زره به شرح جدول ۱-۲ می باشند:

^۱ Finite Element Method

^۲ Doshi

جدول ۱-۲ کمیت های مورد استفاده [۸]

A, A_p	مساحت سطح مقطع پرتابه	V_i	سرعت پرتابه در i امین لحظه
A_{qt}	عامل کاهش مساحت	V_m	کسر حجمی ماتریس
dc_i	کاهش شتاب پرتابه در مدت زمان معین	V_R	سرعت باقیمانده
E	انرژی / مدول یانگ	V_{z1}	سرعت موج تنش فشاری در جهت Z
G	مدول برشی	V_{zt}	سرعت موج تنش برشی در جهت Z
G_{IICd}	نرخ رها سازی انرژی کرنش بحرانی	x_d	طول صدمه دیده
h	ضخامت هدف	x_l	جابجائی موج طولی در جهت X
h_l	ضخامت هر لایه	x_{ll}, r_p	جابجائی موج طولی در جهت X در یک لایه
h_p	طول الیاف بیرون زده تحت برش	x_{llc}	طول کشیده شده نخ
K	ضریب ثابت شکل پرتابه	x_t	مسافت مورب طی شده بوسیله موج در جهت X
KE_p	انرژی جنبشی پرتابه در مدت زمان معین	x_{tl}, r_t	جابجائی مورب موج در جهت X در n لایه
KE_{p0}	انرژی جنبشی پرتابه در لحظه ی برخورد	z	میزان نفوذ پرتابه در هدف
l	طول پرتابه	z_i	میزان نفوذ پرتابه در هدف در مدت زمان معین
m	جرم پرتابه	z_l	جابجائی بواسطه تنش فشاری در جهت Z
m_0	جرم اولیه ی پرتابه	z_{pl}	جابجائی لایه به طرف جلو
n_{lfs}, n_s	تعداد لایه ی شکسته شده بواسطه نیروی برشی	z_t	جابجائی بواسطه تنش برشی در جهت Z
n_{lft}	تعداد لایه ی گسیخته شده بواسطه کشش	ϵ_{cz}	کرنش فشاری در امتداد ضخامت
n_{lsc}	تعداد لایه ی کرنش یافته تحت فشار	ϵ_{max}	کرنش نهایی
P_d	درصد ورقه شدن لایه ها	ϵt	کرنش کششی در امتداد شعاع
P_m	درصد ترک خوردگی ماتریس	ϵ_{txl}	کرنش کششی در جهت X در یک لایه
S_{sp}	نیروی برشی	γ	کرنش برشی
V_{bl}	سرعت حد بالستیک	v	ضریب پواسون
V_f	کسر حجمی لیف	ρ	چگالی مواد هدف
σ_{cz}	تنش فشاری در امتداد ضخامت	σ_{max}	تنش نهایی
σ_t	تنش کششی در امتداد شعاع	σ_{tx}	تنش کششی در جهت X
τ	تنش برشی	Δh_{lc}	فشرده گی هر لایه

خواص مکانیکی پانل تحت آزمایش و دیگر جزئیات در جدول ۱-۳ نشان داده شده است.

جدول ۱-۳ مشخصات آزمایش [۸]

۵/۸۴	وزن (g)	خصوصیات پرتابه (سیلندری)
سراف	هندسه	
۶/۳۳	قطر گلوله (mm)	
شیشه/پوکسی	نوع کامپوزیت	خصوصیات هدف
۵۰	درصد حجمی الیاف	
۵	ضخامت کامپوزیت (mm)	
۱۹	تعداد لایه	
۱۸۵۰	چگالی (kg/m^3)	
۳/۵	کرنش شکست کششی (%)	
۱۳/۵	کرنش شکست فشاری (%)	
۹۰	استحکام برشی (MPa)	

رفتار کامپوزیت با استفاده از تحلیل مکانیزم های جذب انرژی، نیروی تماس^۱، مسافت طی شده توسط پرتابه و موج طولی و برشی شکل گرفته در امتداد ضخامت نسبت به زمان محاسبه شد. کرنش کششی در نقطه ی شکست برای لایه ها نیز نسبت به زمان و ضخامت هدف بررسی گردید. سرعت حد بالستیک برای پانل ۱۹ لایه با استفاده از سرعت پرتابه که سبب سوراخ شدن لایه و خارج شدن پرتابه از آن گردید محاسبه شد [۸].

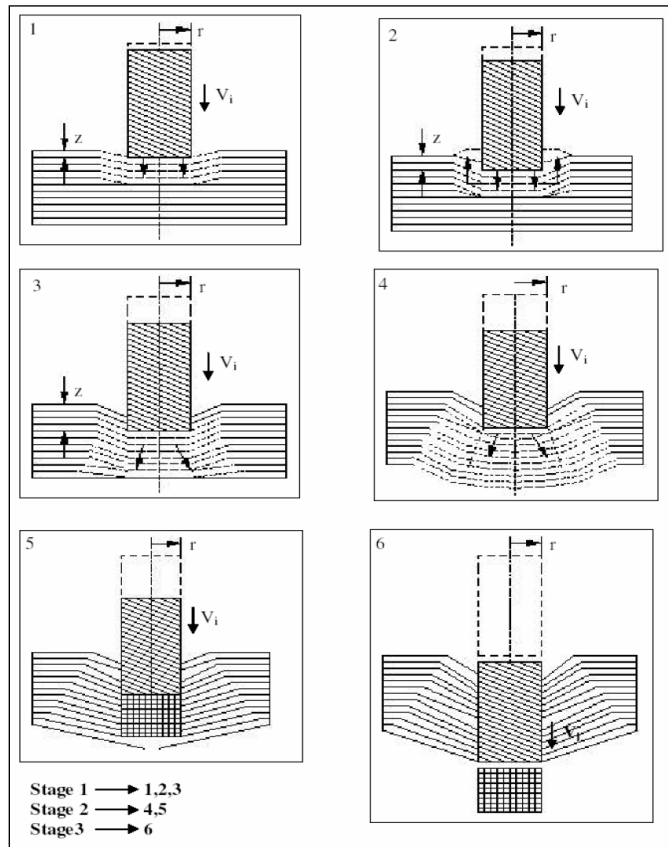
شکل ۱-۱ شماتیک انواع آسیب ایجاد شده در یک پانل ضخیم بواسطه ی اصابت ضربه ی بالستیک را نشان می دهد. نخ های قرار گرفته شده در زیر و در امتداد شعاع پرتابه نخ های اولیه و ثانویه نامیده می شوند. نخ های اولیه در برابر نفوذ پرتابه در هدف مقاومت نموده، در حالیکه نخ های ثانویه دچار آسیب می شوند.

در خلال فرآیند ضربه ی بالستیک، ناحیه ی ۱ بواسطه ی فشار از پانل به قسمت زیرین پرتابه به وجود می آید. کسش ایجاد شده در امتداد شعاع سبب به وجود آمدن ناحیه ی ۲ می شود. فرآیند اصابت و ضربه در سه بخش قابل توصیف می باشد. در طول مرحله ی اول، پرتابه به پانل برخورد کرده و فشار ایجاد شده در پانل به پرتابه منتقل می شود. این فشار به صورت موج شعاعی و دوره ای در تمام سطح پانل جریان یافته و باعث ایجاد برآمدگی بر روی پانل می گردد. تنش فشاری تولیدی در مسیر زیر پرتابه به کسش شعاعی در ناحیه ی محاط آن منجر می شود.

تماس پرتابه با پانل سبب به وجود آمدن تنش برشی در پرتابه و پانل شده که سبب ایجاد شکست در پانل می شود. پیشروی پرتابه در پانل سبب اعمال فشار توسط نخ های ناحیه ی ۲ لایه ی رویی پانل به نخ های همین ناحیه در لایه-های زیری شده و بنابراین سبب ایجاد تغییر شکل نخ ها در لایه ها و نهایتاً بروز گسیختگی در پانل می شود. بخش

¹ Contact force

دوم درگیر با پدیده ی بروز برآمدگی در پشت پانل و پارگی نخ های لایه ها می باشد. با افزایش مقدار نفوذ پرتابه در پانل تغییر شکل در نوک پرتابه افزایش خواهد یافت و شدت کشیدگی به وجود آمده در نخ های واقع در پشت پانل سبب افزایش احتمال پارگی آن ها خواهد شد [۹].



شکل ۱-۱ شماتیک انواع آسیب در پانل ضخیم بواسطه اصابت پرتابه [۹]

بخش سوم بیانگر شرایط نفوذ پرتابه در لایه ی آخرین می باشد. در خلال ضربه ی بالستیک ترک خوردگی ماتریس و ورقه^۱ شدن لایه رخ می دهد. اصطکاک ناشی از نفوذ و پیشروی پرتابه در پانل سبب ایجاد حرارت می شود [۹].

انرژی جنبشی پرتابه که توسط پانل جذب می گردد از رابطه ی زیر محاسبه می شود [۲, ۸-۱۲]:

$$E_{TOTALi} = E_{cfi} + E_{rbi} + E_{cysi} + E_{tfi} + E_{spi} + E_{bbi} + E_{ali} + E_{mci} + E_{fri} + E_{hgi} \quad (1)$$

E_{cfi} = انرژی جذب شده در اثر فشار پرتابه توسط ناحیه ۱

E_{rbi} = انرژی جذب شده بواسطه ی برآمدگی سطح رویی پانل

E_{cysi} = انرژی جذب شده بواسطه ی فشار نخ در بخش ۲

E_{tffi} = انرژی جذب شده بواسطه ی کشش نخ‌های یک لایه

E_{spfi} = انرژی جذب شده بواسطه ی برآمدگی نخ‌های برش خورده

E_{bbfi} = انرژی جذب شده بواسطه ی برآمدگی سطح پشت پانل

E_{dffi} = انرژی جذب شده بواسطه ی ورقه شدن پانل

E_{mcfi} = انرژی جذب شده بواسطه ی ترک خوردگی ماتریس

E_{frfi} = انرژی جذب شده بواسطه ی اصطکاک

E_{hffi} = انرژی جذب شده بواسطه ی ایجاد حرارت

جدول ۴-۱ مقدار انرژی جذب شده توسط هر مکانیزم را نشان می دهد.

جدول ۴-۱ انرژی جذب شده توسط انواع مکانیزم‌ها بر حسب سرعت [۸]

Incident ballistic impact velocity (m/s)	600	550.894	500
Energy (%)			
Total kinetic energy of projectile, KE_{po}	100.0	100.0	100.0
Energy absorbed due to compression: Region 1, E_{cf}	7.1	8.4	8.0
Energy absorbed due to compression: Region 2, E_{csy}	2.2	2.5	3.1
Energy absorbed due to tension in yarns, E_{tf}	1.4	2.3	0.8
Energy absorbed due to shear plugging, E_{sp}	58.0	76.4	87.0
Energy absorbed due to matrix cracking, E_{mc}	3.0	2.9	0.7
Energy absorbed due to delamination, E_{dl}	0.4	0.5	0.1
Energy absorbed due to friction, E_{fr}	6.0	7.3	0
Kinetic energy of projectile at exit, E_p	22.1	0	0

نیروی اعمال شده بر روی پرتابه در هر قسمت به شرح زیر قابل محاسبه می باشد:

$$F = F_i + F_c \quad (2)$$

$$F_i = \frac{1}{2} \rho k A V^2 \quad (\text{نیروی اینرسی}) \quad (3)$$

$$F_c = \sigma_{cz} A \quad (\text{نیروی فشاری}) \quad (4)$$

آوربوخ^۱ پیشنهاد نموده است که مقدار K برای پرتابه ی سر صاف برابر ۱ در نظر گرفته شود [۱۳].

نیرو بر جرم مؤثر پرتابه که شامل اجزای جابجا شده در هدف توسط پرتابه می باشد اعمال می شود. جرم مؤثر

توسط رابطه $m_0 + \rho A Z$ تعریف می گردد. حرکت پرتابه در جهت Z می باشد و بنابراین معادله ی نفوذ پرتابه به

صورت زیر قابل بیان است:

$$\frac{d}{dt} (mV) = F_i + F_c \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} (mV) = V \frac{dm}{dt} + m \frac{dv}{dt} = \frac{1}{2} K \rho A V^2 + \sigma_{cz} A$$

¹ Awerbuch

با جایگزینی معادله ی ۶ در معادله ی ۵ معادله ی زیر به دست می آید:

$$\rho AV^2 + (m_0 + \rho Az) V \frac{dV}{dz} = \frac{1}{2} K \rho AV^2 + \sigma_{cz} A \quad (۶)$$

با حل معادله ی بالا سرعت [۱۳] به صورت زیر در می آید:

$$V(z) = \left([V_i^2 + \frac{\sigma_{cz}(z)}{\rho(1+0.5K)}] \left(\frac{m_0/\rho A}{(m_0/\rho A)+z} \right)^{2+K} - \frac{\sigma_{cz}(z)}{\rho(1+0.5K)} \right)^{1/2} \quad (۷)$$

زمان لازم برای نفوذ پرتابه در مسیر Z از رابطه ی زیر محاسبه می گردد:

$$t = \int_0^z \frac{1}{V(z)} dz = \int_0^z \left([V_i^2 + \frac{\sigma_{cz}(z)}{\rho(1+0.5K)}] \left(\frac{m_0/\rho A}{(m_0/\rho A)+z} \right)^{2+K} - \frac{\sigma_{cz}(z)}{\rho(1+0.5K)} \right)^{-1/2} dz \quad (۸)$$

با استفاده از معادله ی ۸، سرعت پرتابه و انرژی جنبشی آن در فاصله زمانی اول محاسبه می شود. نتایج می توانند جهت محاسبه ی سرعت پرتابه در زمانی های بعدی به کار گرفته شوند. امواج فشاری و برشی در امتداد ضخامت نمونه حرکت می نمایند. سرعت حرکت موج در امتداد ضخامت از روابط زیر محاسبه می گردد:

$$V_{zl} = \lambda \sqrt{\frac{1}{\rho} \frac{d\sigma_{cz}}{d\varepsilon_{cz}}} \quad (۹)$$

$$V_{zt} = \lambda \sqrt{\frac{1}{\rho} \frac{d\tau}{d\gamma}} \quad (۱۰)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (۱۱)$$

مسافت طی شده توسط موج فشاری و موج برشی از روابط زیر محاسبه می شود:

$$z_l = V_{zl} t \quad (۱۲)$$

$$z_t = V_{zt} t \quad (۱۳)$$

کرنش فشاری لحظه ای در هر لایه به صورت زیر بیان می شود:

$$\varepsilon_{cz} = \frac{z}{z_l} \quad (۱۴)$$

خطی بودن تغییرات کرنش و وجود مقدار بیشینه ی آن در نواحی اطراف پرتابه در پانل و ناچیز شدن آن در ناحیه ای با بیشترین مسافت طی شده توسط موج در جهات طول و عرض در پانل، بیشینه ی لحظه ای کرنش به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\varepsilon_{txl}^{max} = 2 \varepsilon_{txl} \quad (۱۵)$$

در لحظه ی اصابت، پرتابه فقط انرژی جنبشی داشته که با نفوذ در پانل این انرژی به صورت های دیگر تغییر می- یابد. معادله ی ۱۶ این تبدیل در i امین فاصله ی زمانی را نشان می دهد:

$$KE_{p0} = KE_{pi} + E_{cf(i-1)} + E_{rb(i-1)} + E_{csy(i-1)} + E_{tf(i-1)} \\ + E_{sp(i-1)} + E_{bb(i-1)} + E_{dl(i-1)} + E_{mc(i-1)} \\ + E_{fr(i-1)} + E_{hg(i-1)} \quad (16)$$

با مرتب کردن معادله ی ۱۶:

$$\frac{1}{2} m_0 V^2 - \sum_{i=1}^{i-1} E_{i-1} = \frac{1}{2} m_i V_i^2 \\ \text{Or} \\ \frac{1}{2} m_{i-1} V_{i-1}^2 - E_{i-1} = \frac{1}{2} m_i V_i^2 \quad (17)$$

بنابراین،

$$E_{(i-1)} = E_{cf(i-1)} + E_{rb(i-1)} + E_{csy(i-1)} + E_{tf(i-1)} \\ + E_{sp(i-1)} + E_{bb(i-1)} + E_{dl(i-1)} + E_{mc(i-1)} \\ + E_{fr(i-1)} + E_{hg(i-1)} \quad (18)$$

سرعت پرتابه در فاصله زمانی بعدی از رابطه ی زیر محاسبه می گردد:

$$V_i = \sqrt{\frac{(\frac{1}{2} m_{i-1} V_{i-1}^2 - E_{(i-1)})}{\frac{1}{2} m_i}} \quad (19)$$

کاهش شتاب پرتابه در طول i امین فاصله ی زمانی:

$$dc_i = \frac{V_{i-1} - V_i}{\Delta t} \quad (20)$$

مسافت طی شده توسط پرتابه در طول i امین فاصله ی زمانی:

$$z_i = V_{i-1} \Delta t - \frac{1}{2} dc_i (\Delta t)^2 \quad (21)$$

نیروی مقابله کننده با حرکت پرتابه در لحظه ی i ام به صورت زیر است:

$$F_i = m_i dc_i \quad (22)$$

فشار اعمال شده در بخش ۱ هدف باعث جذب انرژی می شود:

$$E_{cf} = A_p \left(\int_{\varepsilon_c=0}^{\varepsilon_{cz}} \sigma_{cz} (\varepsilon_{cz}) d\varepsilon \right) z_l \quad (23)$$

انرژی جذب شده به واسطه ی فشار نخها در ناحیه ی اطراف محل ضربه:

$$E_{csy} = 2\pi h \sum_{j=nlf}^{n_{lsc}} \int_{d/2}^{x_l} \left(\int_{\varepsilon=0}^{\varepsilon_{cz}} \sigma_{cz} (\varepsilon_{cz}) d\varepsilon \right) x dx \quad (24)$$

انرژی جذب شده به واسطه ی کشش نخها:

$$E_{tf} = A_y \sum_{j=nlf}^{n_{lsc}} \int_0^{x_l} \left(\int_{\varepsilon=0}^{\varepsilon_{txl}} \sigma_{tx} (\varepsilon_{txl}) d\varepsilon \right) dx \quad (25)$$

استحکام برشی در ناحیه ی متأثر از نیروی برشی از رابطه ی زیر محاسبه می شود:

$$\Delta E_{spi} = n_s h_l S_{sp} \pi dh \quad (26)$$

انرژی جذب شده به واسطه ی برش در i امین فاصله ی زمانی:

$$E_{sp} = \sum_{n=1}^i \Delta E_{spi} \quad (27)$$

انرژی جذب شده در اثر ورقه شدن و ترک خوردگی ماتریس در i امین فاصله ی زمانی:

$$E_{dli} = P_d \pi x_d^2 A_{ql} G_{IIcd} (N_0 - 1)$$

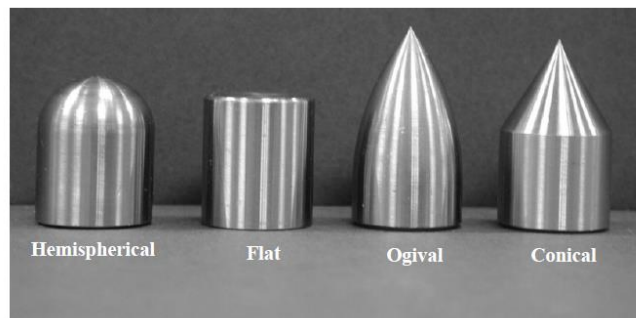
$$E_{mci} = P_m \pi x_d^2 A_{ql} E_{mt} h (V_m) [\lambda] \quad (28)$$

۵-۱- تأثیر هندسه ی پرتابه بر میزان نفوذ

تن^۱ و همکارانش در سال ۲۰۰۱ تأثیر هندسه ی پرتابه در رابطه با جذب انرژی توسط پارچه ی مستقیم بافت از نوع Twaron CT 716 را با استفاده از ۴ هندسه ی پرتابه ی نشان داده شده در شکل ۱-۲ مورد بررسی قرار دادند [۱۴].

هندسه ی پرتابه های مورد استفاده به شرح زیر تعریف شده اند:

پرتابه با هندسه ی نیم دایره^۲، پرتابه ی سر صاف^۳، پرتابه با هندسه ی مخروط کامل^۴، پرتابه با هندسه ی مخروطی^۵. پرتابه ها دارای قطر ۱۲/۶ میلی متر و جرم برابر ۱۵ گرم می باشند.



شکل ۱-۲ پرتابه با هندسه های مختلف [۱۴]

¹ Tan

² Hemispherical

³ Flat

⁴ Ogival

⁵ Conical