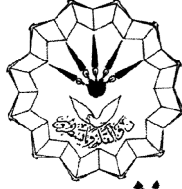


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه رازی

دانشکده فنی مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک  
گرایش طراحی کاربردی

عنوان پایان نامه:

**تحلیل صفحات ساندویچی فوم- کامپوزیت تحت ضربه عمودی**

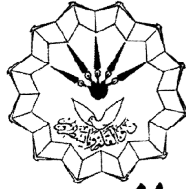
استاد راهنما:

دکتر سعید فعلی

نگارش:

سید سجاد جعفری

بهمن ماه ۱۳۹۱



دانشگاه رازی

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک

گرایش طراحی کاربردی

نام دانشجو: سید سجاد جعفری

تحت عنوان

تحلیل صفحات ساندویچی فوم- کامپوزیت تحت ضربه عمودی

در تاریخ ۱۳۹۱/۱۱/۱۶ توسط هیات داوران بررسی و با درجه به تصویب نهایی رسید.

- |       |                          |                                |                         |
|-------|--------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| امضاء | با مرتبه‌ی علمی دانشیار  | دکتر سعید فعلی                 | ۱- استاد راهنما         |
| امضاء | با مرتبه‌ی علمی استادیار | دکتر حشمت اله حقیقت            | ۲- استاد داور داخل گروه |
| امضاء | با مرتبه‌ی علمی دانشیار  | دکتر محمد ابراهیم اعلمی آل آقا | ۳- استاد داور داخل گروه |

تقدیم ہے

پروماد عزیزم

## تقدیر و سپاس

خداوند یکتا را شاکرم که توفیق انجام این پایان‌نامه را به اینجانب عطا فرمود. از پدر و مادر عزیزم که همواره با حمایت‌ها و فداکاری‌های بی‌دریغشان، مشوق اصلی بنده بوده‌اند سپاسگزاری می‌کنم. با سپاس و تشکر فراوان از زحمات استاد ارجمندم جناب آقای دکتر سعید فعلی که در این مدت با کمک‌ها و رهنمودهایشان مشوق و همراه من در تهیه این پایان‌نامه بوده‌اند.

## چکیده

ساختارهای ساندویچی به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی که دارند، در صنایع مختلف کاربرد وسیعی پیدا کرده‌اند. مهم‌ترین ویژگی این ساختارها این است که با وجود وزن کم، انرژی زیادی را جذب می‌کنند. در دهه‌های اخیر استفاده از مواد کامپوزیتی در پانل‌های ساندویچی افزایش چشم‌گیری داشته است، بطوریکه از این مواد به عنوان لایه‌های پانل ساندویچی و از موادی همچون فوم، هانی‌کامب و مواد هدفمند به عنوان هسته‌ی پانل استفاده می‌شود.

در این پایان‌نامه رفتار پانل‌های ساندویچی فوم-کامپوزیت که در معرض ضربه عمودی سرعت بالا قرار گرفته‌اند، به صورت تحلیلی و عددی بررسی شده است. در پانل ساندویچی فوم بین دو لایه‌ی کامپوزیتی محصور شده است. ضربه با سرعت بالا زمانی رخ می‌دهد که پرتابه پانل ساندویچی را سوراخ نموده و با یک سرعت باقیمانده از آن خارج می‌شود. هدف، به دست آوردن سرعت باقیمانده پرتابه هنگام خروج از پانل ساندویچی و سرعت حد بالستیک می‌باشد. رفتار بالستیک کامپوزیت‌های بافته شده به صورت تحلیلی و با دو تئوری تغییر شکل کلی و موج تنش غالب بررسی شده است. در تئوری تغییر شکل کلی، مکانیزم‌های مختلف جذب انرژی از جمله انرژی جذب شده ناشی از تغییر شکل، لایه لایه شدگی و واماندگی موضعی لایه‌های کامپوزیتی در نظر گرفته شده است. همچنین از تئوری موج تنش غالب که بر اساس تعیین فشار متوسط اعمالی از سوی لمینیت‌های کامپوزیتی به پرتابه می‌باشد نیز استفاده شده است. رفتار هسته فوم با محاسبه جذب انرژی ناشی از له شدن تحت ضربه مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین نفوذ پرتابه در پانل ساندویچی فوم-کامپوزیت و سوراخ شدن آن در نرم‌افزار المان محدود (ال اس داین) شبیه‌سازی شده است. در نهایت نتایج مدل تحلیلی و شبیه‌سازی عددی با نتایج تست‌های تجربی موجود مقایسه و تأثیر پارامترهای مختلف در مدل تحلیلی بررسی شده است.

## فهرست

صفحه	عنوان
	فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱- مقدمه
۴	۲-۱- تعاریف و مفاهیم اساسی
۵	۳-۱- طبقه‌بندی مسائل برخورد و نفوذ
۷	۴-۱- مروری بر تحقیقات انجام شده
۷	۱-۴-۱- ضربه در لمینیت‌های کامپوزیتی
۸	۲-۴-۱- ضربه در پانل‌های ساندویچی
۱۱	۵-۱- معرفی موضوع پایان نامه

## فصل دوم: انواع کامپوزیت‌ها و فوم‌ها، موارد کاربرد و خواص آن‌ها

۱۴	۱-۲- کامپوزیت‌ها
۱۴	۱-۱-۲- مقدمه
۱۵	۲-۱-۲- تاریخچه
۱۵	۳-۱-۲- الیاف
۱۶	۱-۳-۱-۲- انواع الیاف
۲۰	۴-۱-۲- کامپوزیت‌های FRP
۲۳	۲-۲- فوم‌ها
۲۳	۱-۲-۲- مقدمه
۲۳	۲-۲-۲- فوم‌های فلزی
۲۵	۳-۲-۲- فوم‌های پلیمری
۲۵	۱-۳-۲-۲- فوم پلی‌استایرن
۲۵	۲-۳-۲-۲- فوم پلی‌یورتان
۲۶	۳-۳-۲-۲- فوم پلی‌اتلین (پلی فوم)
۲۶	۴-۳-۲-۲- فوم پلی‌وینیل کلراید (PVC)
۲۷	۴-۲-۲- کاربرد فوم‌ها

## فصل سوم: مدل تحلیلی برای شبیه‌سازی رفتار پانل‌های ساندویچی فوم-کامپوزیت تحت ضربه

۳۱	۱-۳- مقدمه
۳۲	۲-۳- مدل تحلیلی
۳۲	۱-۲-۳- نیروی شبه‌استاتیکی لازم جهت واماندگی لایه‌ی رویی
۳۳	۱-۱-۲-۳- نیروی تماسی
۳۵	۲-۱-۲-۳- جذب انرژی پانل در اثر واماندگی لایه‌ی رویی
۳۷	۲-۲-۳- سوراخ شدن پانل ساندویچی
۳۷	۱-۲-۲-۳- تئوری تغییر شکل کلی
۴۱	۲-۲-۲-۳- تئوری موج تنش غالب
۴۳	۳-۲-۲-۳- جذب انرژی توسط فوم
۴۳	۴-۲-۲-۳- جذب انرژی توسط پانل ساندویچی کامپوزیت- فوم

## فصل چهارم: شبیه‌سازی در نرم‌افزار LS-DYNA

۴۹	۱-۴- معرفی نرم‌افزار LS-DYNA
۵۲	۲-۴- شبیه‌سازی پرتابه و پانل ساندویچی
۵۳	۳-۴- انتخاب نوع مواد
۵۷	۴-۴- انتخاب خواص مواد
۵۸	۵-۴- تعریف تماس‌المان‌ها در برخورد
۵۹	۶-۴- شرایط مرزی و اولیه
۵۹	۷-۴- تکمیل فرآیند شبیه‌سازی
۶۰	۸-۴- نتایج شبیه‌سازی

## فصل پنجم: نتایج و بحث

۶۵	۱-۵- مقدمه
۶۵	۲-۵- مقایسه‌ی نتایج مدل تحلیلی جدید با داده‌های تجربی (ارزیابی مدل)
۶۶	۱-۲-۵- مشخصات هندسی و مکانیکی هدف و پرتابه
۶۶	۱-۱-۲-۵- مشخصات پرتابه
۶۶	۲-۱-۲-۵- مشخصات لایه‌های کامپوزیتی
۶۷	۳-۱-۲-۵- مشخصات فوم (هسته)



- ۶۷.....۲-۲-۵- واماندگی لایه‌ی رویی در بارگذاری شبه‌استاتیکی
- ۶۹.....۳-۲-۵- سرعت حد بالستیک
- ۷۰.....۴-۲-۵- سرعت باقیمانده‌ی پرتابه
- ۷۴.....۵-۲-۵- مقایسه‌ی نتایج مدل تحلیلی برای پانل فوم-آلومینیوم
- ۷۶.....۳-۵- مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی عددی با داده‌های تجربی
- ۷۷.....۴-۵- مقایسه‌ی نتایج مدل تحلیلی جدید با نتایج شبیه‌سازی عددی
- ۷۸.....۵-۵- بررسی اثر پارامترهای مدل تحلیلی جدید
- ۷۸.....۱-۵-۵- بررسی اثر جرم و قطر پرتابه بر روی سرعت حد بالستیک
- ۷۹.....۲-۵-۵- بررسی اثر جرم و قطر پرتابه بر روی سرعت باقیمانده‌ی پرتابه
- ۷۹.....۳-۵-۵- بررسی اثر ضخامت فوم در رفتار پانل ساندویچی
- ۸۰.....۴-۵-۵- بررسی انرژی جذب شده توسط لایه‌های کامپوزیتی و هسته‌ی فوم

#### فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

- ۸۳.....۱-۶- نتیجه‌گیری
- ۸۵.....۲-۶- پیشنهادها

## فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان شکل
۴	۱-۱- برخورد پرتابه به پانل ساندویچی فوم-کامپوزیت
۹	۱-۲- نفوذ پرتابه‌ی سرکروی در پانل ساندویچی [۷]
۱۰	۱-۳- سوراخ شدن پانل ساندویچی با لایه‌های کامپوزیتی از جنس الیاف شیشه و هسته‌ی فوم آلومینیومی [۸]
۱۰	۱-۴- سوراخ شدن پانل ساندویچی با لایه‌های کامپوزیتی از جنس الیاف کولار و هسته‌ی فوم آلومینیومی [۸]
۱۷	۲-۱- ساختار نوار موجی لایه‌های گرافیت برای یک لیف کربن بر اساس PAN با مدول ۴۰۰GPa
۲۰	۲-۲- راکت تنیس شامل ۹۲٪ الیاف گرافیت و ۸٪ الیاف کربیدسیلیکون در یک زمینه‌ی چسب رزین
۲۱	۲-۳- نمونه‌ای از کامپوزیت‌های FRP
۲۴	۲-۴- منحنی تنش-کرنش فوم‌های آلومینیومی با چگالی نسبی‌های مختلف
۲۷	۲-۵- منحنی تنش-کرنش فوم Divinycell H130
۳۱	۳-۱- برخورد پرتابه‌ی سر تخت به پانل ساندویچی فوم-کامپوزیت (دو بعدی)
۳۳	۳-۲- شبیه‌سازی برخورد پرتابه با پانل ساندویچی با مدل فتر
۳۶	۳-۳- تعادل نیروی در پرتابه هنگام واماندگی لایه‌ی رویی در بارگذاری شبه‌استاتیکی
۳۸	۳-۴- نفوذ پرتابه‌ی سر تخت در لمینیت‌های FRP
۳۹	۳-۵- تغییرات تنش برشی در راستای ضخامت لایه‌ی کامپوزیتی
۴۵	۳-۶- فلوجارت تعیین نیروی واماندگی لایه‌ی رویی و جذب انرژی ناشی از آن
۴۶	۳-۷- فلوجارت تعیین سرعت حد بالستیک و سرعت باقیمانده‌ی پرتابه توسط تئوری تغییر شکل کلی
۴۷	۳-۸- فلوجارت تعیین سرعت حد بالستیک و سرعت باقیمانده‌ی پرتابه توسط تئوری موج تنش غالب
۵۲	۴-۱- محیط LS-PrePost
۵۲	۴-۲- ابعاد هندسی پانل ساندویچی و پرتابه
۵۳	۴-۳- پوسته‌ی پانل ساندویچی و پرتابه (الف) سطح مقطع هدف (ب) سطح مقطع پرتابه
۵۴	۴-۴- مدل نهایی برخورد پرتابه به پانل ساندویچی (الف) از نمای روبرو (ب) سه بعدی
۵۷	۴-۵- تعریف مواد (الف) کامپوزیت (ب) فوم (ج) پرتابه
۵۸	۴-۶- تعریف خواص مواد
۵۸	۴-۷- تعریف برخورد
۵۹	۴-۸- تعریف شرط اولیه
۵۹	۴-۹- تعیین مدت زمان نفوذ
۶۱	۴-۱۰- فرآیند نفوذ پرتابه‌ی سر تخت صلب در پانل ساندویچی فوم-کامپوزیت (الف) نفوذ پرتابه در لایه‌ی رویی (ب) نفوذ پرتابه در هسته (ج) نفوذ پرتابه در لایه‌ی زیری
۶۲	۴-۱۱- منحنی تغییرات سرعت پرتابه بر حسب زمان در فرآیند سوراخ شدن پانل ساندویچی فوم-کامپوزیت
۶۳	۴-۱۲- بیشترین تنش فشاری در محل برخورد پرتابه به لایه‌ی کامپوزیتی بالایی

- ۴-۱۳- بیشترین تنش فشاری در محل برخورد پرتابه به فوم ..... ۶۳
- ۴-۱۴- بیشترین تنش فشاری در محل برخورد پرتابه به لایه‌ی کامپوزیتی زیری ..... ۶۴
- ۵-۱- منحنی تغییرات نسبت نیروی واماندگی لایه‌ی کامپوزیتی رویی به ضخامت لایه‌ی کامپوزیتی، بر حسب قطر پرتابه و مقایسه‌ی آن با داده‌های تجربی مرجع [۷] ..... ۶۸
- ۵-۲- منحنی تغییرات انرژی جذب شده توسط پانل به واسطه‌ی واماندگی لایه‌ی کامپوزیتی رویی بر حسب نسبت اندازه‌ی موثر پانل ساندویچی به ضخامت لایه‌های کامپوزیتی، بر اساس تئوری‌های مختلف و مقایسه با داده‌های تجربی مرجع [۷] ..... ۶۸
- ۵-۳- منحنی تغییرات انرژی جذب شده توسط پانل به واسطه‌ی واماندگی لایه‌ی کامپوزیتی بالایی بر حسب قطر پرتابه، بر اساس تئوری‌های مختلف و مقایسه با داده‌های تجربی مرجع [۷] ..... ۶۹
- ۵-۴- منحنی تغییرات سرعت حد بالستیک بر اساس تئوری‌های تغییر شکل کلی و موج تنش غالب، بر حسب نسبت ضخامت پانل به قطر پرتابه و مقایسه با داده‌های تجربی مرجع [۷] ..... ۷۰
- ۵-۵- منحنی تغییرات سرعت باقیمانده پرتابه بر حسب سرعت اولیه، بر اساس تئوری تغییر شکل کلی و مقایسه با داده‌های تجربی مرجع [۷] ..... ۷۳
- ۵-۶- منحنی تغییرات سرعت باقیمانده پرتابه بر حسب سرعت اولیه، بر اساس تئوری موج تنش غالب و مقایسه با داده‌های تجربی مرجع [۷] ..... ۷۳
- ۵-۷- منحنی تغییرات سرعت باقیمانده‌ی پرتابه‌ی سر کروی بر حسب سرعت اولیه و مقایسه با داده‌های تجربی مرجع [۲۲] ..... ۷۵
- ۵-۸- منحنی تغییرات سرعت باقیمانده بر حسب سرعت اولیه بر اساس شبیه‌سازی عددی و مقایسه با داده‌های تجربی مرجع [۷] ..... ۷۷
- ۵-۹- منحنی تغییرات سرعت باقیمانده پرتابه بر حسب سرعت اولیه بر اساس مدل تحلیلی و مقایسه با نتایج شبیه‌سازی عددی ..... ۷۷
- ۵-۱۰- منحنی تغییرات سرعت حد بالستیک بر حسب قطر پرتابه بر اساس تئوری الف) تغییر شکل کلی ب) موج تنش غالب ..... ۷۸
- ۵-۱۱- منحنی تغییرات سرعت باقیمانده بر حسب قطر پرتابه بر اساس تئوری الف) تغییر شکل کلی ب) موج تنش غالب ..... ۷۹
- ۵-۱۲- منحنی تغییرات سرعت حد بالستیک بر حسب ضخامت فوم برای پانل ساندویچی فوم-کامپوزیت .. ۸۰
- ۵-۱۳- منحنی تغییرات انرژی جذب شده توسط فوم، لایه‌های کامپوزیتی و پانل ساندویچی بر حسب قطر پرتابه ..... ۸۱

## فهرست جدول‌ها

عنوان جدول	صفحه
۱-۱- تعیین نوع رفتار مواد در فرآیند نفوذ بر اساس سرعت برخورد	۷
۱-۲- خواص الیاف آرامید [۱۷]	۱۸
۱-۳- مقادیر $\lambda$ و $\gamma$ برای اهداف فلزی و لمینیت‌های FRP [۳۸]	۴۲
۱-۴- خواص مکانیکی لایه‌ی کامپوزیتی [۹]	۵۶
۲-۴- خواص مکانیکی هسته‌ی فوم [۹]	۵۷
۱-۵- مشخصات لایه‌های کامپوزیتی [۳۹]	۶۶
۲-۵- مشخصات هسته‌ی فوم [۹]	۶۷
۳-۵- مقایسه‌ی سرعت حد بالستیک محاسبه شده توسط تئوری تغییر شکل کلی، با داده‌های تجربی مرجع [۷]	۷۰
۴-۵- مقایسه‌ی سرعت حد بالستیک محاسبه شده توسط تئوری موج تنش غالب، با داده‌های تجربی مرجع [۷]	۷۰
۵-۵- مقایسه‌ی سرعت باقیمانده محاسبه شده توسط تئوری تغییر شکل کلی، با داده‌های تجربی مرجع [۷]	۷۱
۶-۵- مقایسه‌ی سرعت باقیمانده محاسبه شده توسط تئوری موج تنش غالب، با داده‌های تجربی مرجع [۷]	۷۲
۷-۵- خواص مکانیکی لایه‌های زیری و رویی آلومینیومی [۲۲]	۷۴
۸-۵- خواص مکانیکی فوم [۲۲]	۷۴
۹-۵- مقایسه نتایج حاصل از مدل تحلیلی با داده‌های تجربی مرجع [۲۲]	۷۵
۱۰-۵- مقایسه سرعت حد بالستیک مدل تحلیلی با داده‌های تجربی مرجع [۲۲]	۷۵
۱۱-۵- مقایسه‌ی سرعت‌های باقیمانده‌ی پرتابه بر اساس شبیه‌سازی عددی بر حسب سرعت‌های اولیه‌ی پرتابه‌ی فولادی به جرم $20/4$ g و قطر $10/5$ mm، با داده‌های تجربی مرجع [۷]	۷۶

## فهرست علامتها

$A$	..... سطح مقطع جانبی پرتابه
$A_d$	..... سطح لایه لایه شدگی در صفحه میانی
$B$	..... ثابت تجربی
$C$	..... ضخامت فوم
$C$	..... سرعت انتشار موج در راستای الیاف
$C_{ij}$	..... ثوابت الاستیک
$D$	..... قطر پرتابه
$E_e$	..... سختی موثر خمشی
$E_{com}^w$	..... انرژی جذب شده توسط لمینیت‌های FRP (تئوری موج تنش غالب)
$E_{ct}$	..... انرژی ناشی از نیروی تماسی
$E_f$	..... مدول یانگ فوم
$E_{fdyn}$	..... انرژی جذب شده توسط فوم در بارگذاری دینامیکی
$E_{fst}$	..... انرژی جذب شده توسط فوم در بارگذاری شبه‌استاتیکی
$E_{gd}$	..... انرژی ناشی از تغییر شکل کلی
$E_{in}$	..... انرژی جذب شده ناشی از واماندگی لایه‌ی رویی
$E_{pcom}$	..... انرژی سوراخ شدن لمینیت
$E_{s1}$	..... مدول یانگ طولی لایه‌ی کامپوزیتی
$E_{s3}$	..... مدول یانگ در راستای ضخامت
$E_T$	..... انرژی جذب شده توسط پانل
$E_T^d$	..... انرژی جذب شده توسط پانل ساندویچی کامپوزیت- فوم (تئوری تغییر شکل کلی)
$E_T^w$	..... انرژی جذب شده توسط پانل ساندویچی کامپوزیت- فوم (تئوری موج تنش غالب)
$G_f$	..... مدول برشی فوم
$G_{IIc}$	..... چقرمگی شکست در مد دوم
$G_{st}$	..... مدول برشی لایه‌های کامپوزیتی
$h$	..... ضخامت لایه‌های کامپوزیتی
$H$	..... ضخامت کل پانل ساندویچی
$K$	..... ضریب ثابت
$K_b$	..... سختی خمشی
$K_{bs}$	..... سختی موثر ناشی از خمش و برش
$K_c$	..... سختی تماسی
$K_m$	..... سختی غشائی
$K_s$	..... سختی برشی
$L$	..... اندازه‌ی موثر پانل

$M_p$	جرم پرتابه
$P$	نیروی تماسی شبه‌استاتیکی
$P_d$	نیروی بحرانی لایه لایه شدگی
$P_i$	نیروی لازم جهت واماندگی لایه‌ی رویی
$r$	نسبت تناسبی پانل
$R$	شعاع پرتابه
$r_d$	شعاع سطح لایه لایه شدگی
$V_b$	سرعت حد بالستیک
$V_{bd}$	سرعت حد بالستیک در برخورد با پانل (تئوری تغییر شکل)
$V_{bw}$	سرعت حد بالستیک در برخورد با پانل (تئوری موج تنش غالب)
$V_c$	سرعت بحرانی فون کارمن
$V_i$	سرعت اولیه پرتابه
$V_{rd}$	سرعت باقیمانده در برخورد با پانل (تئوری تغییر شکل)
$V_{rw}$	سرعت باقیمانده در برخورد با پانل (تئوری موج تنش غالب)
$W$	خیز عرضی صفحه‌ی میانی پانل
$W_0$	خیز لایه‌ی میانی لمینیت
$W_{0f}$	خیز عمودی بحرانی
$\alpha$	فرورفتگی موضعی پانل
$\varepsilon_f$	کرنش واماندگی کششی استاتیکی
$\varepsilon_d$	کرنش تراکمی فوم
$\nu_f$	ضریب پواسون فوم
$\nu_{s12}$	ضریب پواسون لایه‌های کامپوزیتی
$\rho$	چگالی لمینیت
$\rho_t$	چگالی هدف
$\sigma$	فشار متوسط اعمالی از سوی لمینیت
$\sigma_c$	استحکام فشاری فوم
$\sigma_d$	فشار مقاومتی دینامیکی
$\sigma_e$	حد الاستیک خطی شبه‌استاتیکی
$\sigma_s$	فشار مقاومتی استاتیکی
$\sigma_t$	استحکام شبه‌استاتیکی
$\sigma_y$	تنش تسلیم
$\tau_0$	تنش برشی متوسط
$\tau_{13}$	استحکام نهایی برشی عرضی
$\tau_{max}$	تنش برشی صفحه میانی لمینیت FRP

$\tau_{IRSS}$  ..... تنش برشی داخلی

$\varphi$  ..... ضریب افزایش دینامیکی

$\phi$  ..... ثابت تجربی

# فصل اول

مقدمه



## ۱-۱- مقدمه

بحث برخورد اجسام و نفوذ پرتابه در هدف بیش از صد سال است که مورد توجه دانشمندان و محققین قرار گرفته است و در دهه‌های اخیر ده‌ها کنفرانس و سمپوزیوم علمی بین‌المللی تحت عناوین شوک و ضربه<sup>۱</sup>، بالستیک<sup>۲</sup>، ضربه مافوق سرعت<sup>۳</sup> و ... برگزار شده است.

این بحث ابتدا با انگیزه‌های دفاعی و نظامی دنبال شد و در مواردی از قبیل طراحی بدنه‌ی مقاوم خودروهای نظامی، کشتی‌های نظامی و ... و یا جلیقه‌ها و پانل‌های ضد گلوله کاربرد پیدا کرد، ولی امروزه این موضوع کاربردهای غیر نظامی متنوعی یافته است. محافظت از ماهواره‌ها و فضاپیماها در برابر برخورد شهاب‌سنگ‌ها، محافظت از راکتورهای هسته‌ای و وسایل حمل مواد خطرناک در برابر حملات موشکی که از جهت زیست محیطی بسیار مهم است و همچنین مقاوم سازی بدنه‌ی هلیکوپترها و هواپیماها در برابر برخورد اجسام مختلف و طراحی پناهگاه‌ها و ... نمونه‌هایی هستند که مستقیماً با بحث مکانیک نفوذ ارتباط دارند.

موضوع بحث نفوذ هنوز هم یکی از مباحث روز دنیا بوده و مجالات علمی که در زمینه ضربه منتشر می‌شوند معمولاً در هر شماره، مقالاتی را به مسئله نفوذ اختصاص می‌دهند.

امروزه به کارگیری پرتابه‌های بالستیک با هسته‌های سخت‌تر، استفاده از زره‌های کاراتر و به تبع آن استفاده از مواد جدید و سیستم‌های حفاظتی جدید را ضروری کرده است. این نیاز در اهداف سبک وزنی که در آن‌ها وزن یک فاکتور کلیدی است چشمگیرتر است. مقدار سوخت هواپیماها و وسایل نقلیه نظامی و غیرنظامی در صورتی که در آن‌ها از پانل‌های حفاظتی سنگین استفاده گردد افزایش یافته و تحرک لشگرهای دفاعی و امنیتی نیز در صورتی که افراد از جلیقه‌های سنگین استفاده کنند کاهش می‌یابد.

استفاده از مواد کامپوزیتی در صنایع نظامی و غیرنظامی روزه‌روز در حال افزایش است. دلایل مختلفی برای گسترش استفاده از این مواد وجود دارد که می‌توان به سختی و استحکام زیاد، افزایش عمر خستگی و هزینه‌ی پایین تعمیرات و نگهداری اشاره نمود. کامپوزیت‌ها از دو بخش ماتریس<sup>۴</sup> و الیاف<sup>۵</sup> تشکیل شده‌اند که به طور مفصل در فصل دوم معرفی خواهند شد. جنس ماتریس و الیاف استفاده شده به کاربرد کامپوزیت بستگی دارد. به عنوان مثال، در صنایع هوا و فضا معمولاً از الیاف کربن و در صنایع دریایی و حمل و نقل از

<sup>1</sup> Shock & Impact

<sup>2</sup> Ballistic

<sup>3</sup> Hyper velocity impact

<sup>4</sup> Matrix

<sup>5</sup> Fiber

الیاف شیشه که ارزان تر نیز می باشد، استفاده می شود.

در دهه های اخیر به منظور کاهش وزن و بالا بردن سختی مواد استفاده شده در صنایع مختلف، مواد کامپوزیتی در کنار مواد دیگری همچون هانی کامب<sup>۱</sup>، فوم<sup>۲</sup>، مواد هدفمند (FGM)<sup>۳</sup> و سرامیک قرار داده می شوند. پانل های ساندویچی فوم-کامپوزیت از جمله سازه هایی هستند که به صورت گسترده ای در صنایع نظامی و به منظور جذب انرژی استفاده می شوند. این پانل ها دارای هسته ی فوم هستند که بین دو لایه ی کامپوزیتی محصور شده اند. همچنین از این پانل ها می توان به عنوان عایق حرارتی و صوتی نیز استفاده نمود. با وجود سختی بالا، این پانل ها در برابر بارگذاری عرضی استاتیکی و دینامیکی آسیب پذیر می باشند. آسیب های به وجود آمده در پانل ممکن است قابل مشاهده (مانند نفوذ<sup>۴</sup> و سوراخ شدن<sup>۵</sup>) و یا غیرقابل مشاهده (مانند لایه لایه شدگی<sup>۶</sup>) باشند. بنابراین مطالعه ی رفتار پانل های ساندویچی فوم-کامپوزیت در برابر بار عرضی، موضوع مهم و پیچیده ای است که در این پایان نامه بررسی شده است.

در شکل ۱-۱، نمونه ای از پانل های ساندویچی کامپوزیت-فوم تحت برخورد پرتابه به صورت شماتیک، نشان داده شده است. پس از برخورد پرتابه به کامپوزیت رویی، درصدی از انرژی جنبشی پرتابه توسط ماده کامپوزیتی جذب می شود. پس از نفوذ کامل پرتابه در لایه ی کامپوزیتی رویی، مقداری از انرژی جنبشی پرتابه به واسطه ی لهیدگی فوم جذب می شود. در نهایت با رسیدن پرتابه به ماده کامپوزیت پشتی این ماده ممکن است کل انرژی پرتابه را جذب نماید و پرتابه در داخل پانل متوقف گردد و یا این که بخشی از انرژی پرتابه را جذب کند و پرتابه با سرعت باقیمانده<sup>۷</sup> از ماده کامپوزیتی خارج شود.

اولین قدم برای درک بهتر مفاهیم و مسائل موجود در مسئله ضربه توسعه مدل های ریاضی برای پیش بینی روند نیروی اعمالی ضربه زننده به هدف می باشد. روش های تحلیلی که در بررسی اثرات ضربه در کامپوزیت ها به کار می روند هنوز تا آن حد پیشرفته نشده اند که بتوانند رفتار حقیقی مواد کامپوزیتی را، در طی ضربه بر این ساختارها را نشان دهند. از آنجا که کاربرد این مواد روند رو به رشدی دارد تحقیقات روی آزمایش های تجربی نیز در این زمینه در حال انجام می باشد تا بدین وسیله نیاز صنایع مختلف برطرف شود. از نتایج این آزمایش ها می توان جهت پایه ریزی تئوری های جدید استفاده نمود.

---

<sup>1</sup> Honey comb

<sup>2</sup> Foam

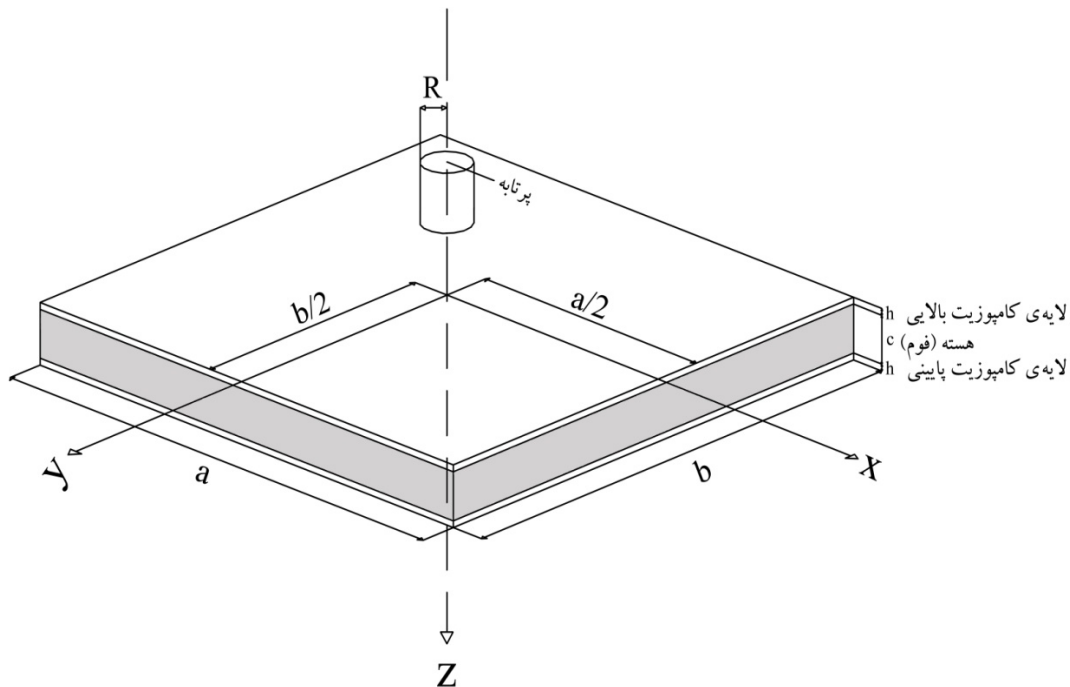
<sup>3</sup> Fundamental Graded Material

<sup>4</sup> Penetration

<sup>5</sup> Perforation

<sup>6</sup> Delamination

<sup>7</sup> Residual velocity



شکل ۱-۱- برخورد پرتابه به پانل ساندویچی فوم-کامپوزیت

## ۲-۱- تعاریف و مفاهیم اساسی

در این قسمت تعاریف و مفاهیم مهمی که در برخورد پرتابه به پانل ساندویچی فوم-کامپوزیت نقش دارند، معرفی می‌شوند.

**پرتابه<sup>۱</sup>**: جسمی است که برای انجام عملیات بالستیکی خاصی طراحی شده است مانند: بمب، خمپاره، گلوله، توپ و ...

**هدف نیمه بی نهایت<sup>۲</sup>**: هدفی است که از یک طرف تا بی نهایت گسترده شده است به طوریکه اثرات مرز پشتی آن بر پدیده نفوذ بی تأثیر است.

**هدف ضخیم**: هدفی است که سطح پشتی آن فقط پس از نفوذ پرتابه به المان هدف، تأثیر می‌گذارد و ممکن است که شیوه‌های شکست مختلفی را مطرح نماید (اصولاً به ضخامت‌های بیشتر از شعاع پرتابه، هدف ضخیم می‌گویند).

**هدف متوسط**: هدفی است که سطح پشتی آن در تمام طول فرآیند نفوذ، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی تغییر شکل دارد.

**هدف نازک**: هدفی است که در طول ضخامت آن تغییرات تنش و گرادیان تغییر شکل وجود نداشته باشد (ضخامت‌های کمتر از شعاع پرتابه).

<sup>1</sup> Projectile

<sup>2</sup> Semi-infinite target

**نفوذ:** به ورود پرتابه به درون هر واحد از هدف گفته می‌شود.

**عمق نفوذ:** طول حفره‌ی ناشی از نفوذ پرتابه در راستای حرکت آن در درون هدف را گویند.

**سوراخ شدن:** به عبور کامل پرتابه از المان هدف اطلاق می‌شود.

**سرعت حد بالستیک<sup>۱</sup>:** حداقل سرعت لازم جهت نفوذ کامل و خروج پرتابه از هدف را گویند.

**ضخامت حد بالستیک:** حداقل ضخامت لازم برای هدف که در آن پرتابه در لحظه‌ی خروج از هدف دارای سرعت نزدیک به صفر باشد.

**پلاگینگ<sup>۲</sup>:** جدا شدن بخشی از هدف که در جلوی پرتابه است و به علت ایجاد برش در صفحه هدف رخ می‌دهد. این نوع گسیختگی معمولاً در اهداف ضخیم اتفاق می‌افتد.

**لایه<sup>۳</sup>:** یک ورقه نازک از ماده کامپوزیتی را نامند. اصولاً ماده کامپوزیتی برای افزایش استحکام از ورق‌های روی هم قرار گرفته، تشکیل شده است.

**ماتریس:** رزین همگن یا ماده پلیمری که ضروری برای تشکیل ماده کامپوزیتی می‌باشد.

**مواد کامپوزیتی<sup>۴</sup>:** به ترکیب دو یا بیشتر از دو ماده که بیشتر به صورت عناصر تقویت کننده، پرکننده و محصور شده در زمینه کامپوزیت است گفته می‌شود.

**استحکام ضربه<sup>۵</sup>:** به قابلیت مقاومت مواد در برابر بار ضربه‌ای گفته می‌شود. به طور علمی به کار انجام شده در شکست یک نمونه آزمایشی تحت بار ضربه‌ای در یک حالت تعیین شده استحکام ضربه گفته می‌شود.

**غشایی شدن<sup>۶</sup>:** نوعی تغییر شکل در مواد کامپوزیتی می‌باشد به طوری که این مواد در اثر بار عرضی خارجی کشیده می‌شوند.

## ۱-۳- طبقه‌بندی مسائل برخورد و نفوذ

بر اساس ضخامت هدف:

✓ نیمه بی نهایت

✓ ضخیم اما محدود

✓ هدف متوسط

✓ نازک

<sup>1</sup> Ballistic limit velocity

<sup>2</sup> Plugging

<sup>3</sup> Lamina

<sup>4</sup> Composite material

<sup>5</sup> Impact strength

<sup>6</sup> Membrane