

## بررسی آسیب‌های ناشی از ضربه سقوط آزاد در پوسته ساندویچ پانل با روش المان محدود و آزمون نشر آوایی

علی جعفری<sup>۱</sup>، سید رضا حمزه لو<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

\* rehamzeloo@sru.ac.ir

### چکیده

امروزه کامپوزیت‌های پایه پلیمری و به‌خصوص ساندویچ پانلها به دلیل خواص فیزیکی مناسب در مقایسه با فلزات و آلیاژهای فلزی نظیر سبکی، نسبت استحکام به وزن بالا و ... کاربردهای زیادی در صنعت دارند. در طی بارگذاری مکانیکی کامپوزیت‌ها، آسیب‌های متنوع با مکانیزم‌های مختلف به وجود می‌آید. آسیب‌های انباشته در نهایت منجر به شکست کامپوزیت می‌شود. ترک‌خوردگی ماتریسی، شکست الیاف، لایه‌لایه شدن از جمله آسیب‌های ایجاد شده در این نوع از سازه‌ها می‌باشند. شناسایی سهم هر کدام از این مکانیزم‌ها در شکست نهایی کامپوزیت‌ها ضروری است. شناسایی محل، شدت و نوع آسیب ایجاد شده با بازرسی غیرمخرب بر روی این ساختار و همچنین پیش‌بینی شدت و نوع آسیب توسط نرم‌افزارهای المان محدود بسیار حائز اهمیت می‌باشند. در این مقاله مکانیزم‌های آسیب بر روی ساندویچ پانل از جنس پوسته شیشه/پلی‌استر و هسته فوم پلی اورتان تحت تأثیر ضربه سرعت پایین بررسی شده است. در پژوهش حاضر، پوسته و هسته ساندویچ پانل به صورت دستی ساخته شده و نمونه ساندویچی تحت تأثیر ضربه ۲۰ ژول قرار گرفته است و در حین آزمون، داده های آکوستیکی توسط سنسور نصب شده ذخیره و تحلیل گشته است. و با توجه به سیگنال‌های دریافتی از آزمون نشر آوایی وجود آسیب‌های حاصل از ضربه تشخیص داده شد. همچنین با استفاده از نرم‌افزار آباکوس با حلگر دینامیکی صریح مکانیزم‌های آسیب‌های بین‌لایه‌ای و درون‌لایه‌ای با استفاده مدل المان محدود ارائه شده مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از آزمون تجربی و شبیه‌سازی مورد بحث قرار گرفته و تطابق مناسبی مابین آن‌ها برقرار مشاهده می‌گردد.

**واژگان کلیدی:** شبیه‌سازی المان محدود، کامپوزیت، سقوط آزاد، آزمون نشر آوایی

### ۱- مقدمه

آزمون ضربه سرعت پایین بررسی‌های صورت گرفته است. به همین منظور اولین بار در سال ۱۹۹۷ شعیب و همکاران یک مدل تئوری برای پیش‌بینی شکست تیر ساندویچی تحت تورفتگی موضعی را پیشنهاد کردند. مدل مکانیکی به صورت بار خطی که یک تیر الاستیک به یک پایه الاستیک- پلاستیک متصل شده بود، ساده شد [۱]. شوپنر و همکاران در سال ۲۰۰۰ بار آستانه تخریب جدایش لایه‌ای شدن کامپوزیت را تحت ضربه سرعت پایین بررسی کردند. سطح بار آستانه از نمودار نیرو- جابه‌جایی به دست آمد که در آن افت بار ناگهانی ناشی از افت استحکام نمونه بود و در نتیجه آن آسیب جدایش لایه‌ای رخ می‌دهد [۲]. سوکولینسکی و همکاران در سال ۲۰۰۳ از تئوری مرتبه بالاتر برای پیش‌بینی ظرفیت بار تیر ساندویچی تحت خمش چهار نقطه استفاده کردند. مشاهده شد که شکست زودرس ساندویچ پانل با لایه‌های ضعیف چسب ناشی از تنش پوسته‌ای بالا در بین لایه‌های فوقانی در انتهای نمونه ایجاد شده و ظرفیت بار بیش از ۴۰٪ کاهش یافته است [۳]. لوپز و همکاران

امروزه کامپوزیت‌های پایه پلیمری به صورت ساندویچ پانل به دلیل خواص فیزیکی بسیار خوبی نظیر سبکی، نسبت استحکام به وزن بالا و ... که در مقایسه با فلزات و آلیاژهای فلزی دارند کاربردهای زیادی در صنعت دارند. در طی بارگذاری مکانیکی کامپوزیت‌ها مکانیزم‌های مختلف آسیب به وجود می‌آید. آسیب‌های انباشته در نهایت منجر به شکست کامپوزیت می‌شود. ترک‌خوردگی ماتریسی، شکست الیاف، لایه‌لایه شدن از جمله آسیب‌های ایجاد شده در این نوع از سازه‌ها می‌باشند. بسته به نوع کاربرد اهمیت آسیب‌های ایجاد شده در کامپوزیت‌ها می‌تواند تغییر کند. شناسایی سهم هر کدام از این مکانیزم‌ها در شکست نهایی کامپوزیت‌ها ضروری است. بازرسی غیرمخرب بر روی این ساختار و پیش‌بینی آسیب توسط نرم‌افزارهای المان محدود بسیار حائز اهمیت می‌باشد. رفتار ساندویچ پانل‌ها در مدل ساختاری آنها در اثر بارگذاری‌های مختلف به صورت عددی قابل پیش‌بینی می‌باشد. برای پیش‌بینی آسیب در مواد کامپوزیتی در

شکست موضعی لمینت از بین می‌رود. دیماسی و همکاران در سال ۲۰۱۷ تأثیر ضربه با سرعت پایین بر روی ساندویچ پانل با هسته فوم تقویت‌شده با پین را با استفاده از المان محدود مورد بررسی قرار دادند [۹]. آسیب‌پذیری ساندویچ پانل‌ها در ضربه با سرعت پایین، استفاده از آن را در هواپیما محدود می‌کند. آنان دریافتند که تقویت هسته فوم با پین، باعث کاهش آسیب هسته فوم می‌شود. شوچانگ لانگ و همکاران در سال ۲۰۱۸ خرابی و مدل‌سازی لمینت‌های ساندویچ فومی تحت بارگذاری ضربه با یک مدل عددی جدید مبتنی بر کرنش ماده بررسی نمودند [۱۰]. این مدل می‌تواند تخریب نمونه‌های ساندویچی را با چند پارامتر به‌درستی پیش‌بینی کند. آنها در این بررسی دریافتند که قبل از نفوذ جدایش لایه‌ای فقط در قسمت بالایی ظاهر می‌شود و پس از نفوذ منطقه جدایش لایه‌ای به‌صورت حلقه‌ای تبدیل می‌شود. همچنین مشاهده شد ساختارهای ساندویچی با هسته سخت نسبت به نمونه دارای هسته نرم نسبت به جدایش لایه‌ای آسیب‌پذیرتر هستند. در سال ۱۳۹۶ قاسمی قلعه بهمن و همکاران، بر روی سازوکارهای خرابی در کامپوزیت‌های چندلایه سوراخ‌دار تحت بارگذاری کششی با استفاده از انتشار صوت پرداختند [۱۱]. هدف از تحقیق آنها بررسی و دسته‌بندی انواع مختلف سازوکارهای خرابی در نمونه‌های کامپوزیتی چندلایه سوراخ‌دار، تحت بارکششی با استفاده از روش انتشار صوت بوده‌است. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش نشان‌دهنده بازدهی مطلوب روش انتشار صوت در تعیین نوع خرابی‌ها و مقدار درصد هریک از آنها در کامپوزیت‌های چندلایه است. در سال ۱۳۹۷ رفاهی اسکوتی و همکاران به مطالعه رفتار ضربه‌ای پانل‌های ساندویچی شیشه/پلی‌استر فوم با بهره‌گیری از روش نشر آوایی پرداختند [۱۲]. نتایج حاصله حاکی از ارتباط مکانیزم‌های مختلف شکست با داده‌های آکوستیکی بود. زکی زاده و همکاران در سال ۱۳۹۷ ارزیابی عیوب حاصل از ضربه سرعت پایین را بر روی ساندویچ پانل شیشه/پلی‌استر با هسته فوم با استفاده از روش نشر آوایی مورد بررسی قرار دادند [۱۳]. آنها در آن تحقیق، فرکانس‌های شکست مربوط به هر یک از مکانیزم‌های شکست در ساندویچ پانل تحت ضربه ۲۰،۳۸ و ۶۰ ژول را ارزیابی کردند و دریافتند که شکست الیاف بیشترین فرکانس و شکست رزین کمترین فرکانس را دارد. آنها همچنین استحکام لایه چینی‌های مختلف را تحت آزمون تجربی مورد بررسی قرار دادند و لایه چینی مناسب‌تر را انتخاب نمودند.

امروزه کاربرد ساندویچ پانل‌ها در سازه‌های مختلف از جمله در صنایع هوایی و دریایی و ساختمانی بسیار مشهود است. سازه‌های

در سال ۲۰۰۹ شبیه‌سازی آسیب را بر روی لمینت‌های کامپوزیتی تحت ضربه سرعت پایین بررسی کردند. آنها از یک مدل مواد پیوسته برای شبیه‌سازی پدیده‌های آسیب با استفاده از سابروتین نویسی در نرم‌افزار آباکوس استفاده کرده و به بررسی آسیب جدایش لایه‌ای با المان‌های کوهسیو پرداختند. مشاهده شد که با افزایش انرژی ضربه و تعداد رابط‌ها میزان دقت نتایج مدل کاهش می‌یابد [۴]. ساترلند و همکارانش در سال ۲۰۱۲ به پیش‌بینی رفتار دینامیکی کامپوزیت‌های GRP به کمک مقایسه با نتایج حاصل از آزمون شبه استاتیک پرداختند. آزمون شبه استاتیکی به‌خوبی رفتار اولیه ضربه و جدایش بین لایه‌ای را پیش‌بینی کرد و نشان داد که می‌تواند طراحی کلیدی برای مقاومت در برابر ضربه باشد. همچنین مشاهده گردید که با افزایش انرژی انحراف بیشتری نسبت به حالت شبه استاتیکی رخ می‌دهد [۵]. فنگ و همکاران در سال ۲۰۱۴ با استفاده از مدل‌سازی المان محدود مکانیزم‌های خرابی لمینت را مورد بررسی قرار دادند [۶]. آنها در این مدل‌سازی برای پیش‌بینی مکانیزم‌های خرابی لمینت‌های که تحت ضربه سرعت پایین هستند از مدل‌های آسیب پیش‌روند مبتنی بر مکانیک آسیب پیوسته و در ترکیب با المان‌های کوهسیو استفاده کردند. برای مدل‌سازی این نمونه در نرم‌افزار آباکوس با استفاده از زیر برنامه وی یومت بررسی کردند. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی با عکس‌های رادیوگرافی گرفته‌شده مقایسه شد. در این مقاله توانستند با مدلی که در آن تنها از آسیب بین لایه‌ای با المان کوهسیو استفاده کردند پاسخ تأثیر ساختاری لمینت را پیش‌بینی کنند. ولی نتوانستند به‌درستی توزیع ضخامت لایه‌ها را انجام دهند. رابین السون و همکارانش در سال ۲۰۱۵ به بررسی معیارهای پارگی پوسته و ترک‌خوردگی برشی هسته بر روی ساندویچ پانل پرداختند [۷]. در این تحقیق ساندویچ پانل با هسته فوم با چگالی ۷۵ کیلوگرم بر مترمکعب و لمینت از جنس الیاف کربن/رزین اپوکسی تحت ضربه با سرعت پایین قرار دادند. در این آزمایش نشان داده شد که فشار پارگی پوسته، بار برشی هسته را محدود می‌کند و با انتخاب ضخامت هسته بیشتر از یک مقدار آستانه خاص، می‌توان از ترک‌خوردگی برشی هسته جلوگیری کرد. فلی و همکاران در سال ۲۰۱۶ یک مدل تحلیلی ساده جدید برای ساندویچ پانل کامپوزیتی تحت تأثیر ضربه سرعت بالا با پرتابه مسطح ارائه کردند [۸]. مشاهده شد که وقتی جرم پرتابه با مقدار ثابت قطر آن افزایش می‌یابد سرعت حد بالستیک کاهش می‌یابد. آنها همچنین دریافتند که انرژی جذب‌شده برای تغییر شکل لمینت بیش از انرژی است که برای جدایش لایه‌ای در

میلی متر و ضخامت هسته ۲۶ میلی متر در مجموعه ساندویچ پانل با ضخامت ۳۰ میلی متر ساخته شد. بعد از برش‌های لازم ابعاد نهایی ساندویچ پانل ۴۰۰×۴۰۰ میلی متر به دست آمد که برای انجام آزمون‌ها مورد نظر به چهار قسمت ۲۰۰×۲۰۰ میلی متر تقسیم شد.



شکل ۱- قالب ساخته شده برای تزریق فوم و لایه چینی



شکل ۲- لایه چینی الیاف به همراه رزین بر روی صفحات قالب

### ۲-۳- آزمون تجربی ضربه

آزمون ضربه سرعت پایین طبق استاندارد ASTM-D7136 بر روی ساندویچ پانل با پوسته شیشه/پلی استر و هسته فوم پولی اورتان انجام شد در شکل ۳ نمای از انجام آزمون ضربه را نشان می‌دهد. آزمون ضربه با نیرو ۲۰ ژول بر روی نمونه انجام شد. خروجی آزمون ضربه به صورت داده‌های شتاب-زمان داده شد که با ضرب جرم ضربه زننده در شتاب نمودار نیرو-زمان و در ادامه با انتگرال گیری از داده‌های نیرو-زمان جابجایی محاسبه شد.



شکل ۳- نمای از انجام آزمون ضربه

ساندویچی در برابر ضربه بسیار حساس هستند. با توجه به این موضوع و کاربرد ساندویچ پانل در صنایع هوایی و احتمال برخورد اجسام معلق در جو و همچنین برخورد پرندگان با سازه‌های هوایی، بررسی مقاومت این نوع از کامپوزیت‌ها در برابر ضربه و بررسی مقدار آسیب ناشی از ضربه بسیار ضروری است.

هدف از این تحقیق بررسی پیش‌بینی مقاومت ساندویچ پانل تحت تأثیر ضربه سرعت پایین با آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی با مدل المان محدود می‌باشد. به دلیل اینکه آسیب در ضربه‌های سرعت پایین به صورت داخلی می‌باشد و با چشم غیر مسلح دیده نمی‌شود به همین منظور برای اعتبار سنجی آسیب‌های درون لایه‌ای و بین لایه‌ای حاصل از شبیه‌سازی از نتایج آزمون تجربی که توسط مرجع انجام شده است پرداخته می‌شود. با توجه به بالا بودن هزینه و زمان آزمایش‌های تجربی امروزه استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود جهت پیش‌بینی رفتار مواد کامپوزیتی بسیار پرکاربرد است. به همین منظور برای پیش‌بینی مکانیزم‌های آسیب نرم‌افزار المان محدود آباکوس مورد استفاده قرار گرفت.

### ۲-۲- مواد و روش تحقیق

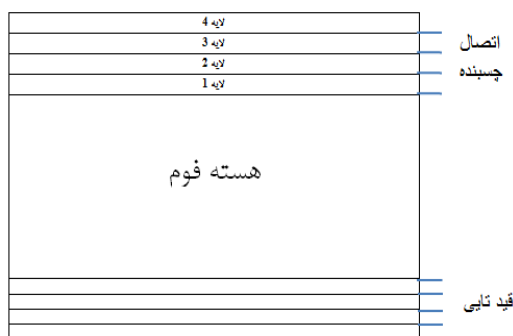
#### ۲-۱- مواد مورد استفاده

در این پژوهش از رزین پلی استر به عنوان فاز زمینه و از الیاف شیشه به عنوان تقویت کننده در ساخت پوسته‌ای ساندویچ پانل استفاده شد. هسته ساندویچ پانل از جنس فوم پلی اورتان با چگالی ۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد.

#### ۲-۲- روش ساخت نمونه و مشخصات ابعادی

پوسته ساندویچ پانل به صورت لایه گذاری دستی ساخته شده است. برای ساخت نمونه از قالب ۵۰۰×۵۰۰ میلی متر که از دو ورق با همین ابعاد و سه عدد پروفیل ۴۰۰ میلی متری ساخته شده استفاده گردید. شکل ۱ قالب استفاده شده برای ساخت نمونه را نشان می‌دهد. بعد از ساخت قالب لایه گذاری الیاف شیشه به همراه رزین پلی استر به روش دستی بر روی هر یک از ورقه‌های ۵۰۰ میلی متر انجام شد. شکل ۲ ساخت پوسته را به صورت دستی نشان می‌دهد. بعد از لایه چینی الیاف بر روی دو صفحه قالب پوسته، دو طرف ساندویچ پانل ایجاد شد. سپس پوسته‌های ایجاد شده همراه با صفحات قالب مونتاژ و توسط گیره به هم متصل شد و در ادامه با ترکیب پلی ایل و ایزوسیانات و ریختن این ترکیب در فضای خالی بین دو پوسته ساندویچ پانل مورد نظر ساخته شد. در نهایت ساندویچ پانل ساخته شده به صورت چهار لایه با لایه چینی {۹۰، ۹۰، ۹۰، ۹۰} و ضخامت هر پوسته ۲

صفحه مربع ای مدل شد. برای بررسی آسیب جدایش لایه‌ای از اتصال چسبنده بین لایه‌ها استفاده شد. پوسته ساندویچ پانل به صورت پوسته پیوسته<sup>۲</sup> چهار لایه مدل شده است که برای کاهش زمان محاسبات المان‌ها فقط در ناحیه ضربه ریز شد. و همچنین برای کاهش محاسبات برای اتصال لایه‌های پوسته پایین از قید اتصال کامل<sup>۳</sup> استفاده شد. لازم به ذکر است پوسته پایین در آزمون تجربی هیچ آسیبی ایجاد نشده است. نحوه اعمال قیود را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن حداکثر نیروی تماسی بعنوان معیار مقایسه با آزمون تجربی با ریز کردن المان‌ها از ۰/۰۰۵ تا ۰/۰۰۶۲۵ بهینه‌ترین سایز میش در ناحیه ضربه ۰/۰۱۲۵ متر و برای سایر نواحی ۰/۱۲۵ متر در نظر گرفته شد. المان استفاده شده برای لمینت از نوع المان کاهش یافته پوسته پیوسته (SC8R) و برای فوم پولی اورتان از المان کاهش یافته جامد<sup>۴</sup> (C3D8R) استفاده شده است. برای لمینت آسیب پیش‌رونده و روش حذف المان استفاده شده است. برای مدل کردن ضربه زنده از نیم‌کره با قطر ۱۶ میلی‌متر و به صورت جسم صلب با المان‌های پوسته مدل شده است.

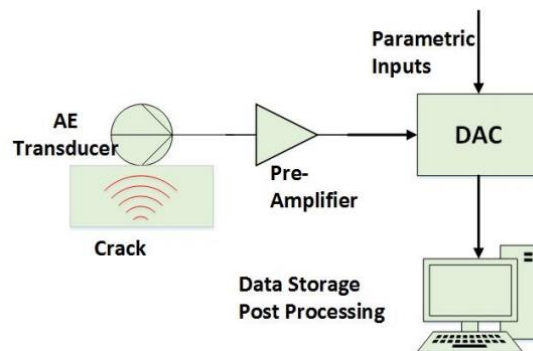


شکل ۶- اعمال قیود در بین لایه‌ها

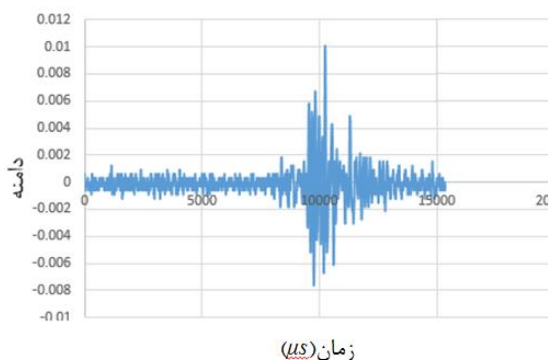
در این تحلیل هسته به صورت الاستیک-پلاستیک در نظر گرفته شده است. برای قسمت الاستیک هسته فوم به صورت الاستیک ایزوتروپ و از پارامترهای مدل الاستیک و ضریب پواسون استفاده شد و برای قسمت پلاستیک از مدل فوم قابل تخریب<sup>۵</sup> و سخت‌شوندگی ایزوتروپ در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شد. رفتار سخت‌شوندگی با استفاده از داده‌های آزمون فشار تک‌محوری داده شده است. از بخش پوسته برای تعیین ساختار لایه، نوع ماده و جهت‌گیری هر لایه استفاده شد. معیار شکست برای لمینت توسط هاشین برای شناسایی حالت‌های شکست در ماتریس و الیاف تحت هر دو شکست کشش و فشاری

4 solid  
5 Crashbal foam

۲-۴- آزمون نشر آوایی  
از دیگر اقدامات مهم در آزمون ضربه، ثبت داده‌های آکوستیک با استفاده از سیستم آکوستیک امیشن دوکاناله و سیستم پی سی آی<sup>۱</sup> با نرخ داده‌برداری ۴۰ MHz استفاده گردید. فعالیت‌های شناسایی شده توسط سنسور، به وسیله پیش تقویت‌کننده با حد آستانه 40 دسی‌بل تقویت شدند و مطابق شکل ۴ ابتدا توسط دو عدد سنسور پیزو الکتریک بر روی هر یک از نمونه‌ها در موقعیت وسط هر یک از ضلع‌ها موقعیت دهی شد برای بهبود عبور دهی سیگنال بین نمونه و سنسور و اتصال مناسب حس گر به سطح نمونه، از گریس سیلیکون خلاء استفاده شد. کالیبراسیون آکوستیک با آزمون‌های شکست نوک مداد مطابق استاندارد ASTM E1106-12 انجام شده و هر آزمون دو بار تکرار شده تا خطای داده‌برداری حذف شود [13]. نمونه سیگنال دریافت شده از آزمون آکوستیک را نشان می‌دهد.



شکل ۴- آزمون غیر مخرب آکوستیک امیشن



شکل ۵- نمونه سیگنال دریافت شده آزمون آکوستیک

۲-۵- مدل‌سازی المان محدود  
در این تحلیل برای شبیه‌سازی ضربه از نرم‌افزار آباکوس با حلگر صریح استفاده شده است. صفحه ساندویچی به صورت یک

1 PCI  
2 Continuum shell  
3 Tie

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_C}\right)^2 = \begin{cases} \geq 1 & \text{شکست} \\ < 1 & \text{بدون شکست} \end{cases} \quad (2)$$

معیار کششی ماتریس ( $\sigma_{22} \geq 0$ )

$$\left(\frac{\sigma_{22}^2}{Y_T^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2}\right) = \begin{cases} \geq 1 & \text{شکست} \\ < 1 & \text{بدون شکست} \end{cases} \quad (3)$$

معیار فشار ماتریس ( $\sigma_{22} < 0$ )

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{2S_T}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_C}{2S_T}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_{22}}{Y_C} + \left(\frac{\tau_{12}}{S_L}\right) = \begin{cases} \geq 1 & \text{شکست} \\ < 1 & \text{بدون شکست} \end{cases} \quad (4)$$

در اینجا  $X_C$  و  $Y_T$  به ترتیب استحکام کششی و فشاری در جهت طولی و  $Y_C$  و  $S_T$  مقاومت کششی و فشاری در جهت عرضی می‌باشد.  $S_L$  استحکام برشی درون صفحه‌ای در جهت طولی و عرضی هستند.  $\alpha$  ضریبی است که مقدار مقاومت برشی طولی را به معیار شکست کششی الیاف تعریف می‌کند.  $\sigma_{11}$ ،  $\sigma_{22}$  و  $\tau_{12}$  بردار تنش مؤثر را نشان می‌دهد.

#### ۲-۱-۱-۵-۱-آسیب بین لایه‌ای

از روش اتصال چسبنده برای بررسی جدایش لایه‌ای در ساندویچ پانل استفاده شد. اساس این روش تعامل رفتار منسجم دو سطح مجاور است. تنش کششی و جابجایی گره‌های روی سطوح توسط قانون جدایش کششی<sup>۱</sup> ارائه می‌شوند. لازم به ذکر است همانند آسیب درون لایه‌ای آسیب بین لایه‌ای دارای تکامل آسیب می‌باشد.

تنش کششی روی یک سطح از سه جزء تشکیل شده است، یک تنش نرمال و دو تنش برشی. رفتار الاستیک می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$t = \begin{bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_n & 0 & 0 \\ 0 & k_s & 0 \\ 0 & 0 & k_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{bmatrix} \quad (5)$$

$t$  تنش‌های کششی<sup>۲</sup>،  $\delta$  جابجایی جدایی<sup>۳</sup> و  $k$  سفتی می‌باشد. برای کنترل معیار آسیب جدایش لایه‌ای از قانون جدایی درجه دوم<sup>۴</sup> استفاده شد. در این قانون فرض می‌شود زمانی که تابع درجه دوم به یک برسد آسیب آغاز می‌شود.

$$\left(\frac{\delta_n}{\delta_n^0}\right)^2 + \left(\frac{\delta_s}{\delta_s^0}\right)^2 + \left(\frac{\delta_t}{\delta_t^0}\right)^2 \geq 1 \quad (6)$$

و شامل چهار حالت شکست استفاده شد. خواص مکانیکی موردنظر برای پوسته و هسته فوم در جدول ۱، ۲ و ۳ برای انجام شبیه‌سازی آمده است.

جدول ۱- خواص مکانیکی درون لایه‌ای پوسته کامپوزیتی

شیشه/پلی‌استر	
مقدار	خواص درون لایه‌ای
۱۶۵۰	چگالی ( $kg/m^3$ )
۲۴	مدول الاستیسیته در جهت الیاف (Gpa)
۵	مدول الاستیسیته در جهت عمود بر الیاف (Gpa)
۱،۹۶	مدول برشی در جهت الیاف (Gpa)
۲،۲۴	مدول برشی در جهت عمود بر الیاف (Gpa)
۰،۳۷	ضریب پواسون
۴۷۰	مقاومت کششی در راستای الیاف (Mpa)
۳۵۰	مقاومت فشاری در راستای الیاف (Mpa)
۴۰	مقاومت کششی در راستای عمود بر الیاف (Mpa)
۶۰	مقاومت فشاری در راستای عمود بر الیاف (Mpa)
۳۰	مقاومت برشی (Mpa)

جدول ۲- خواص مکانیکی بین لایه‌ای پوسته کامپوزیتی

شیشه/پلی‌استر	
مقدار	خواص بین لایه‌ای
$K_{NN} = 120000$ $K_{SS} = K_{TT} = 48000$	خواص الاستیک (Mpa)
$T_n = 30$ , $T_s = T_t = 80$	مقاومت شروع آسیب (Mpa)
$G_n = 500$ , $G_s = G_t = 970$	انرژی شکست (m/N)

جدول ۳- خواص مکانیکی فوم پلی‌اورتان

مقدار	خواص
۴۱	چگالی ( $kg/m^3$ )
۴،۳۲	مدخل الاستیسیته (Mpa)
۰،۱	ضریب پواسون
۳	مقاومت فشاری (Mpa)
۱،۳	مقاومت برشی (Mpa)

#### ۲-۱-۵-۱-تکامل و گسترش آسیب

معیار شکست برای لمینت توسط هاشین برای شناسایی حالت‌های شکست در ماتریس و الیاف تحت هر دو شکست کشش و فشار شامل چهار حالت شکست است. حالت‌های شکست در معیار هاشین به شرح زیر است:

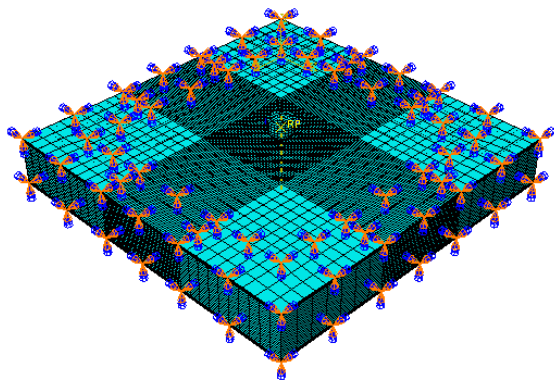
معیار کششی فایبر ( $\sigma_{11} \geq 0$ )

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_T}\right)^2 + \alpha \left(\frac{\tau_{12}}{S_L}\right)^2 = \begin{cases} \geq 1 & \text{شکست} \\ < 1 & \text{بدون شکست} \end{cases} \quad (1)$$

معیار فشار فایبر ( $\sigma_{11} < 0$ )

3 Traction stress  
4 Quadratic separation law

1 Traction-separation  
2 Separation displacement



شکل ۷- مدل المان محدود

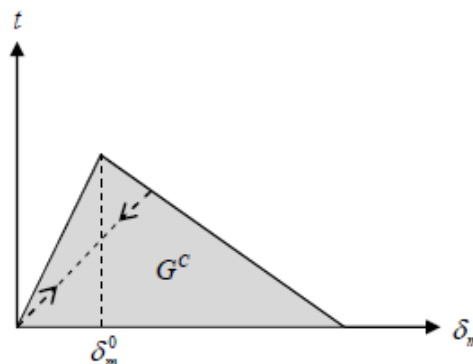
### ۳-۱- نمودار نیرو-جابجایی

شکل ۹ نمودار نیرو-جابجایی را نشان می‌دهد. جابجایی برحسب متر و نیرو برحسب نیوتون داده شده است، نمودارهای تجربی توسط شتاب سنج در آزمون تجربی از داده‌های شتاب-زمان که به‌عنوان خروجی از دستگاه گرفته شده است به روش انتگرال‌گیری به‌دست آمده است. در این مقاله برای اعتبار سنجی داده‌های المان محدود از نتایج آزمون تجربی استفاده شد. در این نمودار مشاهده می‌شود که حداکثر نیروی تماسی بین نمودار تجربی و المان محدود از توافق خوبی برخوردار است. در برگشت الاستیک بین این دو نمودار اختلاف می‌باشد که می‌تواند ناشی از شرایط ساخت نمونه که به‌صورت دستی ساخته شده که آن خطای اپراتوری وجود دارد که تعریف کردن این شرایط در نرم‌افزار المان محدود امکان‌پذیر نیست. با توجه به پژوهش‌های انجام شده در آزمون ضربه با نرم‌افزارهای المان محدود می‌توان به این نتیجه رسید که مدل استفاده شده در این تحلیل از اعتبار نسبتاً خوبی برخوردار است. در نمودار نیرو-جابجایی مشاهده می‌شود نمودار حاصل از آزمون تجربی دارای دامنه بازتر نسبت به حالت مدل المان محدود دارد که نشان می‌دهد مدل تجربی انرژی بیشتری را جذب نموده است. با توجه به نمودار حاصل می‌توان به این نتیجه رسید که این ساندویچ پانل در ضربه سرعت پایین دارای برگشت الاستیک خوبی نمی‌باشد.

جدایی در امتداد اتصال نرمال و جهت برشی دوم و سوم را نشان می‌دهد.

### ۲-۱-۵-۲- تکامل آسیب

قانون تکامل آسیب در جدایش لایه‌ای شبیه قانون تکامل آسیب در آسیب‌های درون لایه‌ای است. هنگامی که معیار آسیب به یک برسد سختی کوهسیو کاهش می‌یابد.



شکل ۷- قانون کشش-جدایی برای اتصال چسبنده [14]

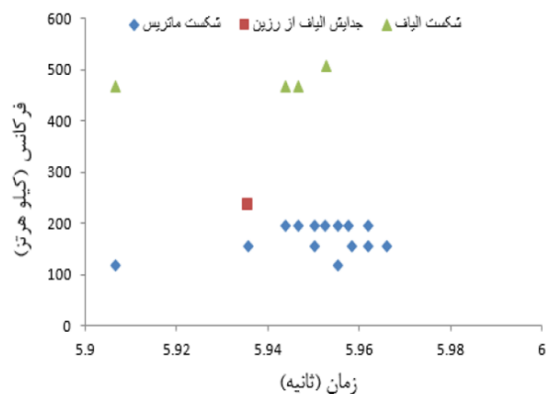
$G^c$  انرژی شکست لایه‌لایه شدن باحالت‌های مختلط است. در این بررسی از معیار  $B-K^2$  به‌عنوان نسبت حالت مختلط در پیش‌بینی و تکثیر جدایش لایه‌ای استفاده شده است. معادله (۷) معیار  $B-K$  را نشان می‌دهد:

$$G^c = G_n^c + (G_s^c - G_n^c) \left( \frac{G_s^c + G_t^c}{G_s^c + G_n^c} \right)^\eta \quad (7)$$

$G_n^c, G_s^c, G_t^c$  انرژی‌های شکست در جهت نرمال و برشی هستند.  $\eta$  پارامتر مربوط به خواص مواد می‌باشد.

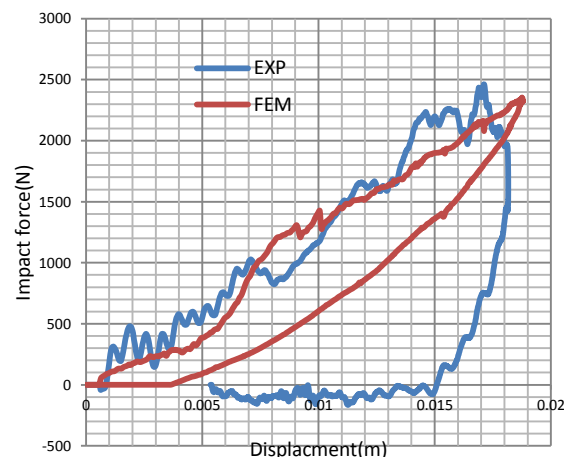
### ۳- نتایج و بحث

شکل ۸ مدل المان محدود را برای شبیه‌سازی آزمون ضربه در آباکوس را نشان می‌دهد. این مدل شامل ۸۸۵۳۶ المان جامد (C3D8R) و ۳۶۵۷۰ المان پوسته‌پوسته (SC8R) می‌باشد. شرایط مرزی باتوجه به شکل فیکسچرها در آزمون تجربی به‌صورت پارتیشن‌بندی به قسمت زیرین نمونه اعمال شده است که در شکل ۸ بارنگ قرمز مشخص شده است. در مدل المان محدود، سرعت اولیه معادل سرعت لحظه برخورد پرتابه به ضربه زننده داده شد. زمان محاسبه این مسئله با پردازنده ۴ هسته‌ای ۲۰ ساعت می‌باشد.



شکل ۹- نمودار فرکانس-زمان برای نمونه ساندویچ پانل تحت تأثیر ضربه

جدول ۴ مقایسه تصاویر اسکن شده از آزمون تجربی را با آسیب لایه‌لایه‌شدگی در بین لایه‌های پوسته ساندویچ پانل را نشان می‌دهد. در این تصاویر مشاهده می‌شود بیشترین آسیب ایجاد شده در بین لایه‌ها مربوط به رابط ۱|۳ می‌باشد. و کمترین آسیب بین لایه‌های ۱|۲ ایجاد می‌شود. در این تصاویر دیده شد که شکل آسیب ایجاد شده بین ۳|۴ مشابه تصویر اسکن شده آزمون تجربی می‌باشد، رابط ۳|۴ در سمت ضربه می‌باشد. لازم به ذکر است تصاویر در این بررسی به صورت بزرگنمایی می‌باشد. واضح است که در بازرسی تصاویر چشمی نمی‌توان وجود چنین آسیب را تشخیص داد به همین منظور با مراجع به نمودار فرکانس-زمان حاصل از آزمون نشر آوایی می‌توان فرکانس جدایش لایه‌ای و جدایش الیاف از ماتریس را مشاهده نمود که در تحلیل المان محدود هم وجود چنین عیبی به وضوح قابل مشاهده می‌باشد.

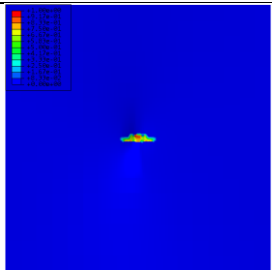
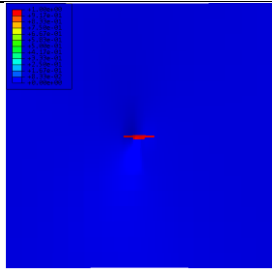
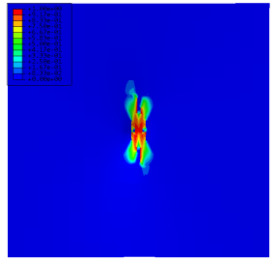
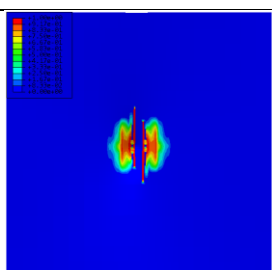
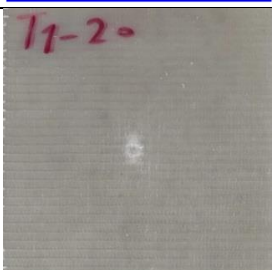


شکل ۸- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی آزمون تجربی با شبیه‌سازی

۳-۲- نمودار فرکانس-زمان برای هر یک از مکانیزم‌های شکست احتمالی در ساندویچ پانل  
شکل ۱۰ نمودار فرکانس-زمان را برای نمونه ساندویچ پانل نشان می‌دهد. سیگنال‌های که فرکانس آن‌ها پایین‌تر از ۲۰۰ کیلوهرتز باشد در طبقه‌بندی شکست رزین قرار می‌گیرند سیگنال‌های که بازه فرکانسی آن‌ها بین ۲۱۰ تا ۳۵۰ کیلوهرتز باشد جدایش الیاف از رزین و لایه‌لایه را نشان می‌دهد. فرکانس‌های بالای ۳۶۰ مربوط به شکست الیاف می‌باشد [15].  
در نمودار فرکانس-زمان مشاهده می‌شود که با توجه به نوع ماتریس که یک ماده ترد و استحکام پایین است فرکانس‌های شکست ماتریس در سرتاسر بازه زمانی دیده می‌شود، همچنین جدایش الیاف از ماتریس و جدایش لایه‌ای که دارای بازه فرکانسی یکسان می‌باشند در نمودار مشاهده می‌شود، شکست الیاف در فرکانس‌های بالا در نمودار فرکانس-زمان مشاهده شد. لازم به ذکر است تشخیص این عیوب با چشم غیرمسلح امکان‌پذیر نمی‌باشد ولی در آزمون نشر آوایی وجود این آسیب‌ها در ساندویچ پانل به صورت واضح تشخیص داده شده است. آسیب قالب در این نوع از کامپوزیت با این لایه‌چینی آسیب ماتریس می‌باشد.

جدول ۵- مقایسه آسیب‌های درون لایه‌ای در شبیه‌سازی را با تصویر

اسکن شده آزمون تجربی

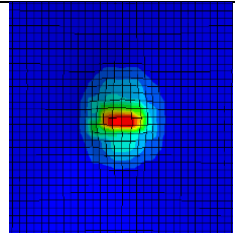
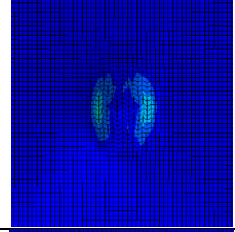
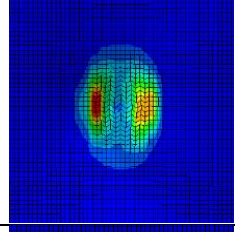
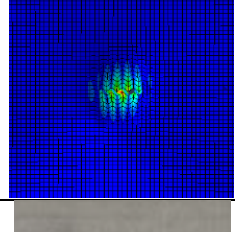

شکست فشاری الیاف	
شکست کششی الیاف	
شکست فشاری ماتریس	
شکست کششی ماتریس	
تخریب	

#### ۴- نتیجه‌گیری

در طی بارگذاری مکانیکی کامپوزیت‌ها به خصوص ضربه سرعت پایین، مکانیزم‌های مختلف آسیب در آنها به وجود می‌آید. آسیب‌های انباشته در نهایت منجر به شکست کامپوزیت می‌شود. ترک‌خوردگی ماتریسی، شکست الیاف، لایه‌لایه شدن از جمله آسیب‌های ایجاد شده در این نوع از سازه‌ها می‌باشند. بسته به نوع کاربرد اهمیت آسیب‌های ایجاد شده در کامپوزیت‌ها می‌تواند

جدول ۴- مقایسه تصویر اسکن شده از آزمون تجربی با آسیب

لایه‌لایه‌شدگی در بین لایه‌های پوسته ساندویچ پانل

فوم ۱	
۱ ۲	
۲ ۳	
۴ ۳	
تجربی	

جدول ۵ آسیب درون لایه‌ای در مقایسه با اثر ضربه بر روی ساندویچ پانل در آزمون تجربی نشان می‌دهد. تصاویر در ابعاد واقعی برای بررسی آسیب درون لایه‌ای آورده شده است. وجود آسیب‌های شکست الیاف و ماتریس در آزمون نشر آوایی به خوبی مشخص است و می‌توان گفت وجود چنین آسیب‌های در اثر این ضربه حتمی است که در تحلیل المان محدود هم به وضوح قابل مشاهده است به عبارتی می‌توان گفت مدل المان محدود از اعتبار نسبتاً خوبی برخوردار است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی و نشر آوایی مشخص است آسیب غالب این نوع از کامپوزیت با این نوع لایه چینی آسیب ماتریس می‌باشد، ماتریس از جنس پلی‌استر که یک ماده ترد می‌باشد باعث می‌شود که این نوع از کامپوزیت دارای خاصیت برگشت الاستیک کمی باشد.



[5] Sutherland, L. and C.G. Soares, The use of quasi-static testing to obtain the low-velocity impact damage resistance of marine GRP laminates. *Composites Part B: Engineering*, 2012. 43(3): p. 1459-1467

[6] Wang, J., A. Waas, and H. Wang. Experimental study on the low-velocity impact behavior of foam-core sandwich panels. in 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive

[7] Hassan, M., S. Naderi, and A.R. Bushroa, Low-velocity impact damage of woven fabric composites: Finite element simulation and experimental verification. *Materials & Design*, 2014. 53: p. 706-71

[8] Feng, D. And F. Aymerich, Finite element modelling of damage induced by low-velocity impact on composite laminates *Composite Structures*, 2014. 108: p. 161-171.

[9] Anbusagar, N., Giridharan, P., Palanikumar, K., "Effect of nanomodified polyester resin on hybrid sandwich laminates," *Materials & Design*, vol. 54, pp. 507-514, 2014.

[10] Olsson, R. and T.B. Block, Criteria for skin rupture and core shear cracking induced by impact on sandwich panels *Composite Structures*, 2015. 125: p. 81-87.

[۱۱] قاسمی قلعه بهمن، ا. و سیبیا، ه. (۱۳۹۵)، "مکانیسم های عدم موفقیت در کامپوزیت های روکش شده با سوراخ باز با بارگذاری کششی با استفاده از انتشار صوتی"، علمی پژوهشی علوم فناوری کامپوزیت، شماره ۵. ص ۱۴۳-۱۵۲

[۱۲] رفاهی اسکوئی، ا. و زکی زاده، ا. و حمزelo، ر. (۱۳۹۷) "بررسی تأثیر بررسی رفتار ساندویچ پانل های کامپوزیت فوم-شیشه / پلی استر با استفاده از انتشار آکوستیک" سومین کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک و هوافضا [۱۳] زکی زاده، ا. اسکوئی رفاهی، و. حمزه لو (۱۳۹۷) "ارزیابی عیوب حاصل از ضربه سرعت پایین روی ساندویچ پانل شیشه / پلی استر - فوم با استفاده از روش انتشار صوتی"، به زبان فارسی، علوم و فنون کامپوزیت. شماره ۶ ص ۳۱۹-۳۲۹.

[14] Long, S., X. Yao, and X. Zhang, Delamination prediction in composite laminates under low-velocity impact. *Composite Structures*, 2015. : p. 290-298.

[15] Oskouei, A. and Ahmadi, M., "Acoustic emission characteristics of mode I delamination glass/polyester composites," *Journal of Composite Materials*, Vol. 44, No. 7, pp. 793-807 2010.

تغییر کند. شناسایی سهم هر کدام از این مکانیزم ها در شکست نهایی کامپوزیت ها ضروری است. در این مقاله با استفاده از نتایج آزمون نشر آوایی و شبیه سازی المان محدود به بررسی این مکانیزم های آسیب ناشی از ضربه سقوط آزاد در ساندویچ پانل پلیمری با هسته فوم پرداخته شد. تفکیک فرکانسی رویدادهای رخ داده سیگنال صوتی امکان تشخیص مکانیزم خرابی را فراهم آورد. علاوه بر آزمون نشر آوایی، با شبیه سازی المان محدود رفتار سازه کامپوزیتی و نوع آسیب های ناشی از ضربه سقوط آزاد مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج شبیه سازی و نشر آوایی مشخص است که آسیب غالب این نوع از کامپوزیت با این نوع لایه چینی آسیب ماتریس می باشد. ماتریس از جنس پلی/استر که یک ماده ترد می باشد باعث می شود که این نوع از کامپوزیت دارای خاصیت برگشت الاستیک کمی باشد. برای پانل ساندویچی نیز می توان ذکر کرد که نقش فوم در توزیع بیشتر و یکنواخت تر انرژی ضربه و جلوگیری از تمرکز تنش اولیه در ضربه می باشد. با مقایسه نتایج تجربی و شبیه سازی می توان اظهار کرد که مدل المان محدود از اعتبار نسبتاً خوبی برخوردار است.

## ۵- منابع

[1] Shuaeib, F. and P. Soden, Indentation failure of composite sandwich beams. *Composites science and Technology*, 1997. 57(9-10): p. 1249-1259

[2] Schoeppner, G.A. and S. Abrate, Delamination threshold loads for low velocity impact on composite laminates. *Composites part A: applied science and manufacturing*, 2000. 31(9): p. 903-915

[3] Sokolinsky, V.S. et al. Experimental and analytical study of nonlinear bending response of sandwich beams. *Composite Structures*, 2003. 60(2): p. 219-229

[4] Lopes, C. et al. Simulation of low-velocity impact damage composite laminates. in 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference 17th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 11th AIAA No. 2009

## Investigating Damages of Drop Impact on Sandwich Panel Shell by Finite Element Method and Acoustic Emission

Ali Jafari<sup>1</sup>, Seyed Reza Hamzeloo<sup>2</sup>

1- MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

### Abstract:

Nowadays, polymer based sandwich panels are widely used in industry because of their excellent physical properties compared to metallic alloys, such as lightness, high strength to weight ratio, and so on. Different mechanisms of damage occur during mechanical loading of the composites. Accumulated defects eventually lead to the composite failure. Matrix cracking, fiber breakage, and delamination are some of the damage mechanisms caused by these types of structures. It is necessary to identify the contribution of each mechanism to the ultimate failure of the composites. Non-destructive monitoring of this type of structures and prediction of damage with simulation by finite element method is very important. In this paper, damage mechanisms under low impact for sandwich panel made of glass / polyester shell and polyurethane foam core was investigated. In the present study, the shell and core of the sandwich panel was made manually and the sandwich sample was affected by the impact of 20 Joule, and during the test, acoustic data was stored by the installed sensor and was analyzed. Also, the impact process modeled using Abaqus FE software with explicit dynamic solver and damage mechanisms investigated applying cohesive bonding between layers and the proposed finite element model. The results obtained from the empirical test and simulation were discussed and there is a good agreement observed between them.

**Keywords:** Finite element modeling, Composite, Drop Test, Acoustic emission