

# تأثیر انرژی ضربه زننده و ضخامت لایه‌ها در ضربه سرعت پائین بر روی چندلایه‌های فلز - الیاف

معین عباسی نسب<sup>۱</sup>، مصطفی میرزایی<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بافق، بخش مهندسی مکانیک

۲- دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دماوند، بخش مهندسی مکانیک

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۲/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۷/۱۵)

## چکیده

کامپوزیت‌های لایه‌ای فلز-الیاف از به هم چسباندن لایه‌های فلزی و کامپوزیتی الیاف و رزین به هم ساخته می‌شوند. فلز به کار رفته اغلب آلومینیم است و الیاف به طور کلی بر اساس کارکرد مورد انتظار، از جنس آرامید، کربن یا شیشه هستند. کامپوزیت مورد نظر ما در این پژوهش چند لایه آلومینیم-الیاف شیشه (GLARE) می‌باشد که به دلیل مقاومت مکانیکی بالا کاربرد وسیعی در صنایع هوایی و... دارد. در این مقاله در ابتدا اثر تغییر در انرژی ضربه زننده در ضربه سرعت پائین بر روی کامپوزیت فلز-الیاف را به صورت تجربی مورد بحث قرار داده و به این نتیجه می‌رسیم که با افزایش در انرژی اولیه ضربه زننده سازه کامپوزیتی سفتی بیشتری نشان داده و میزان جذب انرژی افزایش می‌یابد. سپس با مدل‌سازی آزمایش‌های انجام شده در نرم‌افزار LS-DYNA ضمن به دست آوردن نتایج مشابه از تحلیل عددی (نرم‌افزاری)، به مقایسه نمودارهای حاصل از تحلیل‌های عددی و نرم‌افزاری خواهیم پرداخت و با مشاهده اختلاف کم میان این نمودارها به صحت مدل‌سازی‌های انجام شده پی می‌بریم. در مرحله آخر نیز به بررسی عددی اثر تغییر در ضخامت لایه‌ها در یک سازه کامپوزیتی با ضخامت کلی ثابت پرداخته و نتیجه می‌گیریم که افزایش در ضخامت لایه‌های الیاف و کاهش ضخامت لایه‌های آلومینیمی موجب افزایش مدت زمان برخورد و کاهش سفتی سازه کامپوزیتی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: چند لایه‌های فلز الیاف، انرژی ضربه زننده، ضربه سرعت پائین، ضخامت لایه‌ها

## Effect of Impactor Energy and Layers Thickness on Fiber Metal Laminates in Low Velocity Impact

### Abstract

Fiber-metal laminate composite is made by pasting metal layers and fiber-resin composite together. The metal used is often aluminum and the fiber is Aramid, Carbon or Glass depend on the application. In this study, we have used aluminum-fiber glass laminates (GLARE) due to its vast application because of its high mechanical resistance. At first, the effect of impact energy on fiber-metal composite in low velocity impact was analyzed experimentally. It was concluded that by increasing the primitive energy of the impactor, composite structure shows more toughness and energy attraction rate. Afterward, by modeling the performed tests in LS-DYNA software, a validation was conducted. Due to the subtle difference between numerical and experimental result, the validation of the modeling was accepted. In the last step, the effect of changing the thickness of layers on a generally fixed thickness composite structure was studied numerically. It was concluded that increasing the thickness of fiber layers and decreasing the thickness of aluminum layers lead to an increase of the collision time span and a decrease of the composite structure toughness.

**Keywords:** Fiber-Metal Laminates, impactor energy, low velocity impact, layers thickness

## مقدمه

امروزه، همگام با به کارگیری فلزات سبک، مواد کامپوزیتی با ترکیب خواص برتر فیزیکی و مکانیکی مواد مختلف و قیمت تمام شده پائین در صنایع گوناگونی مورد توجه قرار گرفته است. کامپوزیت‌های لایه‌ای فلز-الیاف نوعی از مواد کامپوزیتی بوده که از به هم چسبانیدن لایه‌های فلزی و کامپوزیتی متشکل از الیاف و رزین به هم بافته می‌شوند. فلز به کار رفته اغلب آلومینیم است و الیاف به طور کلی بر اساس کارکرد مورد انتظار الیاف کربن، آرامید و یا شیشه هستند [۱-۳].

از پرکاربردترین کامپوزیت‌های لایه‌ای فلز-الیاف که تا به امروز ساخته شده‌اند، می‌توان چندلایه‌های آلومینیم تقویت شده با آرامید (laminate aramid reinforced aluminum) ، چندلایه‌های آلومینیم تقویت شده با شیشه (ARALL) ، چندلایه‌های آلومینیم تقویت شده با شیشه (glass reinforced aluminum laminates GLARE) و چندلایه‌های آلومینیم تقویت شده با کربن (carbon reinforced aluminum laminates CARL) را نام برد [۴].

در میان چند لایه‌های نامبرده شده، GLARE بیشترین مقاومت را در برابر رطوبت و خوردگی داشته و از مقاومت مکانیکی بالایی برخوردار است و به همین دلیل کاربرد وسیعی در صنایع هواپیماسازی یافته است. به عنوان مثال شرکت‌های Airbus، Boeing، Fokker، Bombardier و Airbus به طور وسیعی از GLARE در ساخت هواپیماهای نسل جدید خود استفاده می‌کنند [۵].

ضربات مختلفی توسط اجسام خارجی، در حین ساخت، کارکرد و یا نگهداری یک سازه، به آن وارد می‌شود. یک مثال از موارد ذکر شده در زمان کارکرد سازه، ضرباتی است که هواپیماها در زمان بلند شدن و یا فرود آمدن، به سبب برخورد با خورده سنگ‌ها و سایر اشیای دیگر با چرخ‌هایشان با آن مواجه می‌شوند. در هنگام ساخت و یا نگهداری سازه‌ها نیز، ممکن است ابزارهایی بر روی آنها بیافتد. در این گونه موارد عموماً سرعت ضربات اندک اما جرم ضربه زنده‌ها بزرگ می‌باشد. سازه‌های چند لایه کامپوزیتی نسبت به سازه‌های ساده فلزی، در برابر تخریب ناشی از ضربه حساس‌ترند [۶]. بررسی ضربه سرعت پائین بر روی سازه‌های کامپوزیتی به‌ویژه کامپوزیت‌های لایه‌ای فلز-الیاف تاکنون مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته است و موضوعاتی از جمله پارامترهای مؤثر بر تخریب ضربه‌ای که شامل خواص مواد، سفتی جسم ضربه

خورنده، خصوصیات جسم ضربه زنده، لایه چینی و دوختن، پیش بارگذاری، شرایط محیطی و... می‌باشد، توسط این محققان بررسی شده است [۷-۱۲]. در بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های لایه‌ای، حقی کاشانی و همکاران [۱۳] تأثیر اختلاف انرژی در ضربه تکرار شونده سرعت پائین بر روی چند لایه‌های الیاف - فلز را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که این نمونه‌ها تحت ضربه دوم سفتی بیشتری از خود بروز می‌دهند.

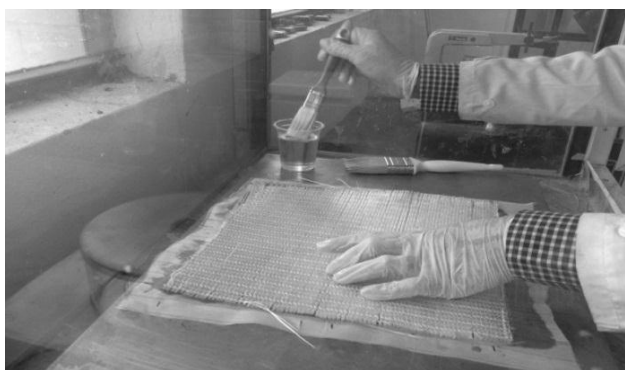
وو و همکاران [۱۴] اثر ضربه کم‌سرعت و مقاومت به رشد تخریب در چند لایه‌های GLARE را بررسی کرده و نشان دادند که برای این کامپوزیت‌ها در ضربه‌های کم سرعت، هنگامی که فرورفتگی ایجاد نشود، جدایش لایه‌ها هم رخ نمی‌دهد. در مواردی هم که فرورفتگی ایجاد می‌شود، اندازه جدایش معمولاً کوتاه تر از ابعاد فرورفتگی است؛ بنابراین حتی پس از ضربه، این مواد استحکام باقی‌مانده زیادی دارند. شوپنر [۱۵] با استفاده از دستگاه سقوط آزاد، یک سری آزمایش به منظور تعیین تأثیر پیش بارگذاری کششی بر روی مقاومت تخریب چند لایه‌های گرافیت-اپوکسی انجام داد. او نشان داد که در اثر این نوع سفت‌کنندگی سازه، ناشی از انجام فرآیند پیش کشش، زمان رسیدن به حداکثر نیروی ضربه کاهش یافته، عمق فرورفتگی افزایش می‌یابد. هم‌چنین این‌که، حداکثر بار با میزان پیش‌بارگذاری ارتباط چندانی ندارد.

هاگنیک و همکاران [۱۶] در بررسی خواص کششی کامپوزیت‌های لایه‌ای، روشی برای پیش‌بینی تعیین استحکام کششی و برشی انواع چند لایه‌های GLARE ارائه دادند. در این پژوهش از معیار خرابی Norris و نسبت حجمی بخش فلزی برای پیش‌بینی خواص استفاده شده بود.

ولت و همکاران [۱۷] رفتار آلومینیم، کامپوزیت‌های الیاف شیشه و رزین اپوکسی، الیاف کربن و رزین اپوکسی و کامپوزیت‌های چند لایه GLARE، ARALL و CARL را تحت بارگذاری‌های کششی، فشاری و ضربه کم‌سرعت و پرسرعت بررسی کردند.

در این پژوهش ابتدا به بررسی اثر تغییر در پارامتر انرژی اولیه ضربه‌زنده در ضربه سرعت پائین بر روی کامپوزیت فلز-الیاف به دو روش تجربی و عددی (با استفاده از نتایج حاصل از مدل‌سازی در نرم‌افزار LS-DYNA) می‌پردازیم که با این کار علاوه بر بررسی پارامتر مذکور با دو روش مختلف می‌توانیم از

سولفات فریک (سولفات آهن ۳) به این محلول اضافه می‌شد تا محلول اچ P2 آماده گردد. برای فرآیند آماده‌سازی سطح آلومینیم ابتدا بایستی لایه‌های آلومینیمی (به‌خصوص در محل اتصال) با محلول استن چربی‌زدایی گردد و در مرحله دوم در محلول آلکالین ۶۵ درجه سانتی‌گراد به مدت هشت دقیقه غوطه‌ور شده و پس از آن شستشو داده شوند و سپس در محلول اچ ۶۰ درجه سانیکرادی به مدت ۱۲ دقیقه غوطه‌ور شده و در نهایت مجدداً با آب شستشو داده شوند.



شکل ۱- لایه‌چینی نمونه‌ها به صورت یک‌جا

پس از آماده نمودن قطعات آلومینیمی بایستی مبادرت به ساخت نمونه‌ها نمائیم. جهت سهولت در انجام کار بهتر است مطابق آن‌چه در زیر توضیح داده شده است، تعداد قطعات مورد نظر را به صورت یک‌جا ساخته و سپس برش بزنیم. برای این کار ابتدا صفحه کار تمیز شده و سپس پارچه‌ای تحت عنوان داکرون روی آن پهن می‌شود تا از چسبیدن قطعات به صفحه کار جلوگیری کند. پس از آن این پارچه را به مقداری چسب آغشته کرده و قطعات آلومینیمی را روی آن می‌چینیم. حال مطابق شکل (۱) پارچه‌های تک‌جهته (UD) کامپوزیتی را به صورتی که قصد داریم مورد آزمایش قرار دهیم، روی هم چیده و بعد قطعات آلومینیمی را روی آن‌ها قرار می‌دهیم (لازم به ذکر است که لایه‌چینی کلیه قطعات در طول آزمایشات به صورت  $[AL, 0, 90]$  می‌باشد). در مرحله بعدی و پس از ۱۲ تا ۲۴ ساعت از ساخت قطعات، تست‌ها آغاز می‌شود. برای فراوری بهتر قطعات و یکسان شدن ضخامت رزین بین لایه‌ها در کلیه نمونه‌ها، در طی این مدت قطعات تحت بار ۴۰۰ نیوتنی قرار می‌گیرند. (شکل ۲).

طریق مقایسه نمودارهای حاصله از این دو روش به صحت مدل‌سازی نرم‌افزاری نیز پی ببریم و سپس اثر تغییر در ضخامت لایه‌ها را به روش عددی بررسی می‌کنیم.

## تجهیزات آزمایش تجربی

### مواد و دستگاهها

مواد مورد استفاده جهت تهیه نمونه‌ها عبارتند از الیاف شیشه کلاس E تک‌جهتی، ورق آلومینیم ۱۰۵۰ با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر و رزین اپوکسی با مارک EPOLM 2002 که به عنوان ماتریس در ساخت لایه‌های کامپوزیتی مورد استفاده قرار می‌گیرد و به منظور تسریع در انجام واکنش‌های شیمیایی از کاتالیزور یاهاردنر به نسبت وزنی ۱:۱۲ استفاده شده است. بنابراین افزودن هاردنر به ماتریس باعث می‌شود که واکنش‌های شیمیایی سریع‌تر انجام شده و عملیات پخت آن در دمای محیط صورت گیرد. دستگاه سقوط آزاد نیز به کار گرفته شده است.

### روش‌ها

برای ساختن نمونه‌ها از روش دستی استفاده شده است. در این روش ابتدا باید سطوح آلومینیم تحت چند عمل شیمیایی قرار گیرد تا اتصال بهتری بین لایه‌های آلومینیم و کامپوزیت ایجاد شود.

برای اطمینان از استحکام اتصال چسبی لایه‌های کامپوزیت به فلز، آماده‌سازی سطح صفحات آلومینیمی امری اجتناب‌ناپذیر است. برای آماده‌سازی سطح آلومینیم به منظور اتصال چسبی، روش‌های مختلفی پیشنهاد گردیده است. در این پژوهش روش اچ کردن با اسید سولفوریک (P2 ETCH) به کار گرفته شده است.

برای انجام این فرآیند از سه محلول استفاده شده است. محلول چربی‌زدایی که در این پژوهش استن مورد استفاده قرار گرفته، محلول آلکالین و محلول اچ. محلول آلکالین تهیه شده دارای خاصیت قلیایی بوده و ترکیب آن به صورت ۶ قسمت وزنی سدیم هیدروکساید در ۱۵۰ قسمت وزنی آب مقطر انتخاب شده است. حال به سراغ ساخت محلول اچ می‌رویم، برای این کار باید ابتدا ۲۰۰ میلی‌لیتر اسید سولفوریک غلیظ به آهستگی و به تدریج به ۸۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه شود و سپس ۱۵۰ گرم

ارتفاع بوده و همچنین ضربه‌زننده دارای ۱۷٪ اتلاف انرژی است که در تحلیل عددی نیز این مسأله در نظر گرفته شده است.



شکل ۴- برش نمونه‌های ساخته شده



شکل ۲- نمونه‌های آماده شده، تحت بار، جهت فراوری بهتر



شکل ۳- نمونه‌های ساخته شده پس از جدا نمودن پارچه داکرون



شکل ۵- نمای داخلی دستگاه سقوط آزاد

### شرح آزمایشات

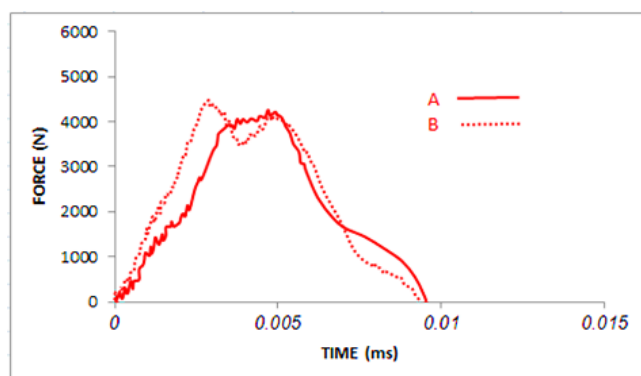
در این پژوهش دو نمونه با مشخصات مندرج در جدول ۱ مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. که جهت بررسی اثر تغییر در انرژی ضربه‌زننده به مقایسه و بحث در مورد آن‌ها خواهیم پرداخت. لازم به ذکر است که در کلیه نمونه‌های موجود در این مقاله ضربه‌زننده از نوع کرووی و با قطر ۱۶ میلی‌متر و هم‌چنین نحوه لایه‌چینی نمونه‌ها به صورت  $[AL, 0, 90]_s$  می‌باشد. جدول ۲ بیانگر رفتار فیزیکی نمونه‌های تحت آزمایش بوده و هم‌چنین در شکل‌های (۶) و (۷) نمای رویی و زیرین نمونه B پس از اعمال ضربه قابل مشاهده می‌باشد.

گفتنی است که جهت جلوگیری از چسبیدن وزنه‌ها به قطعات مجدداً از یک لایه پارچه داکرون استفاده می‌نمائیم. حال پس از گذشت زمان مذکور و پس از برداشتن وزنه‌ها، پارچه‌های داکرون را از دو طرف قطعات جدا نموده (شکل (۳)) و همان‌گونه که گفته شد اقدام به برش دادن می‌نمائیم (شکل (۴)). بدین صورت نمونه‌ها جهت انجام آزمایشات آماده می‌باشند. دستگاه مورد استفاده جهت آزمایش ضربه سرعت پائین دستگاه سقوط آزاد می‌باشد (شکل (۵)).

در این دستگاه نمونه‌های مورد آزمایش در قسمت کف دستگاه و ما بین تکیه‌گاه قرار گرفته و ضربه‌زننده می‌تواند با اشکال هندسی و انرژی‌های مورد نظر بر روی آن فرود آمده و شتاب ضربه‌زننده در هر لحظه توسط حسگری که به آن متصل است، اندازه‌گیری می‌شود و خروجی دستگاه نمودار شتاب-زمان می‌باشد که توسط حسگر مذکور به رایانه داده می‌شود. البته با استفاده از نرم‌افزار Excel می‌توان آن را به نمودار نیرو-زمان تبدیل نمود. شایان ذکر است که ایجاد تغییر در انرژی ضربه‌زننده، مستلزم ایجاد تغییر در یکی از دو پارامتر جرم و



شکل ۷- نمای زیرین نمونه B پس از اعمال ضربه



شکل ۸- مقایسه نمودار نیرو- زمان نمونه‌های A و B

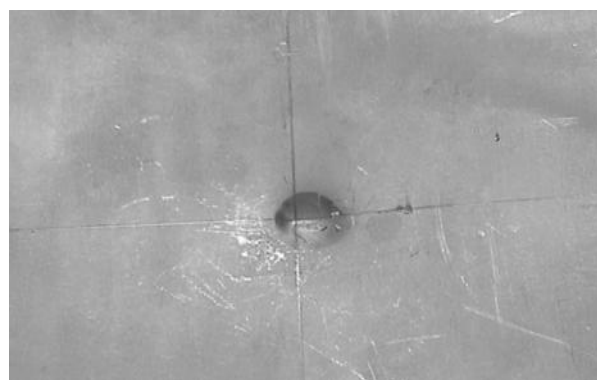
- همان‌گونه که قابل پیش‌بینی است و در شکل (۸) مشاهده می‌شود، مقدار حداکثر نیروی وارد شده به نمونه‌ای که تحت ضربه ۴۰ ژ قرار گرفته (B)، نسبت به نمونه‌ای که تحت ضربه ۲۵ ژ قرار دارد (A) به میزان ۷٪ بیشتر می‌باشد.
- میزان فرورفتگی در محل ضربه در نمونه B به میزان ۳۴٪ بیشتر از نمونه A می‌باشد.
- پس از انجام آزمایش نمونه A فقط دارای اندکی ترک است اما نمونه B دچار پارگی شده و در اطراف پارگی نیز ترک‌هایی وجود دارد.
- افت موجود در قسمت بالای نمودار نیرو-زمان نمونه B نشان‌دهنده سوراخ شدن نمونه می‌باشد.
- در نمونه B که انرژی ضربه زنده بیشتر است، قطر ناحیه تغییر شکل یافته هم بزرگتر است.
- زمان رسیدن مقدار نیروی وارده به حداکثر، در نمونه B حدوداً ۰/۰۰۲ میلی ثانیه زودتر اتفاق می‌افتد.

جدول ۱- کدگذاری نمونه‌های مورد آزمایش

کد نمونه	ابعاد نمونه (mm)	ضخامت هر یک از لایه‌های آلومینیومی (mm)	ضخامت الیاف (mm)	انرژی ضربه زنده (J)
A	۱۰۰*۱۰۰	۰/۴	۱/۹	۲۵
B	۱۰۰*۱۰۰	۰/۴	۱/۹	۴۰

جدول ۲- رفتار نمونه‌های تحت آزمایش

کد نمونه	فرورفتگی در محل ضربه (mm)	قطر ناحیه تغییر شکل یافته (mm)	نوع خرابی
A	۶/۵۹	۹۵	قطعه دچار پارگی نشده اما ترکی به طول ۷/۵ میلی متر در محل ضربه (پشت قطعه) ایجاد شده است.
B	۸/۸۱	۱۰۰	قطعه در محل ضربه دچار پارگی به طول ۱۸/۶۵ میلی‌متر شده و در دو طرف پارگی ترک‌های با طول‌های ۴/۳ میلی متر و ۱/۸ میلی متر وجود دارد.

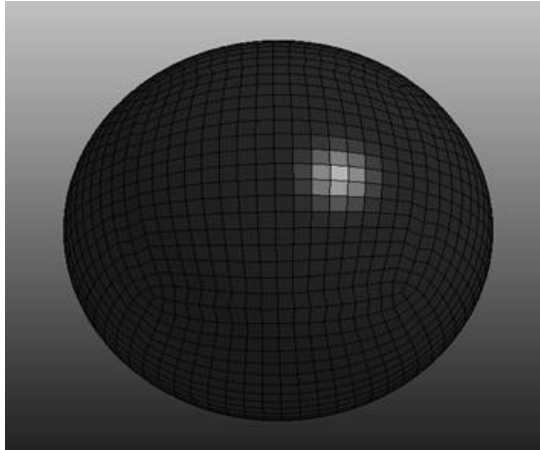


شکل ۶- نمای روی نمونه B پس از اعمال ضربه

### بحث و نتایج بخش تجربی

در شکل (۸) نمودار نیرو- زمان نمونه‌های A و B ارائه شده است. در این قسمت به مقایسه و بحث در مورد آن‌ها خواهیم پرداخت.

تماس بین سطوح را می‌توان به روش‌های گوناگون توسط پارامترهای موجود در کادر CONTACT\* انجام داد. جهت مدل کردن آزمایشات انجام شده در این پژوهش در نرم‌افزار از مدل تماس AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE استفاده شده است.



شکل ۱۰:- ساخت و شبکه‌بندی ضربه زننده در نرم‌افزار

در مرحله آخر نیز بایستی اقدام به وارد نمودن خواص مواد در نرم‌افزار نمائیم. جهت وصول این امر بایستی از یکی از مدل ماده‌های موجود در نرم‌افزار LS-DYNA استفاده نمود. جهت وارد نمودن خواص مواد همسان‌گرد مانند آلومینیم می‌توان از مدل ماده‌های گوناگونی از جمله مدل سه و یا مدل (PLASTIC\_KINEMATIC)، مدل دوازده و یا مدل (ISOTROPIC\_ELASTIC\_PLASTIC)، مدل پانزده و یا مدل (JHONSON\_COOK)، مدل بیست و چهار و یا مدل (PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY) و... استفاده نمود. که در این پژوهش جهت این امر از مدل ماده بیست و چهار استفاده شده است.

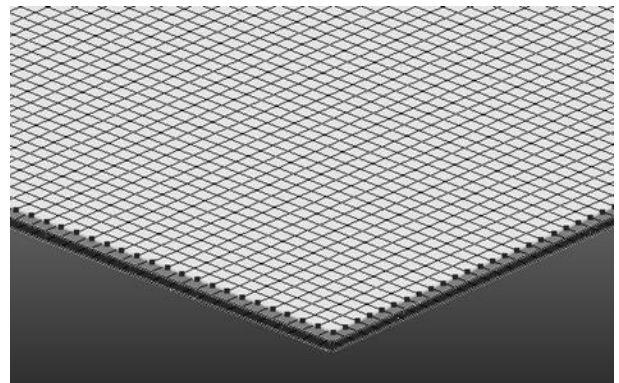
در مورد لایه کامپوزیتی لازم به ذکر است، همان‌گونه که می‌دانیم چهار لایه الیاف شیشه موجود در نمونه‌های مورد آزمایش با استفاده از رزین اپوکسی (EPOLM2002) بر روی هم چسبانده شده‌اند. در واقع ترکیب این چهار لایه و رزین اپوکسی تشکیل یک کامپوزیت را می‌دهد که با استفاده از مدل ماده پنج‌جاء و چهار/پنج‌جاء (ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE) در نرم‌افزار مدل شده است.

- مدت زمان برخورد در هر دو نمونه تقریباً به یک اندازه می‌باشد.
- عمودی‌تر بودن شیب صعودی در نمودار نیرو- زمان دلیل بر سفتی بیشتر نمونه می‌باشد و همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، شیب نمودار نمونه B عمودی‌تر می‌باشد.

### بررسی عددی

#### نحوه مدل‌سازی نمونه‌ها در نرم‌افزار

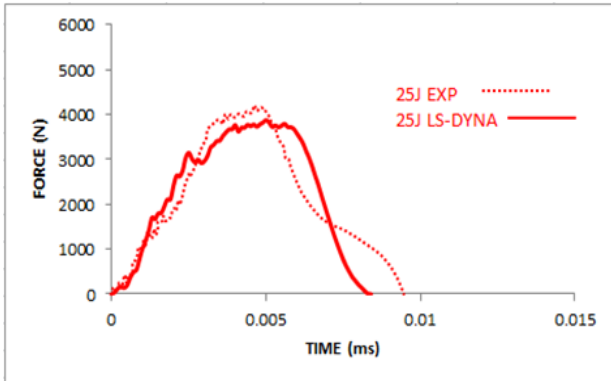
همان‌طور که قبلاً هم ذکر شده قطعات مورد آزمایش، نمونه‌هایی متشکل از دو لایه آلومینیم در دو طرف و چند لایه الیاف شیشه تک‌جهته آغشته به رزین اپوکسی می‌باشند. جهت شبیه‌سازی لایه‌چینی فوق در نرم‌افزار ابتدا سه صفحه بدون ضخامت (با ابعاد مورد نیاز)، با فواصل متناسب با ضخامت‌های مورد نظر برای هر لایه بر روی هم ایجاد نموده و اقدام به شبکه‌بندی، دادن ضخامت‌های مورد نظر، مقید نمودن حاشیه‌ها (در حالت واقعی قطعه در گیره مقید شده) و ... می‌نمائیم (شکل (۹)).



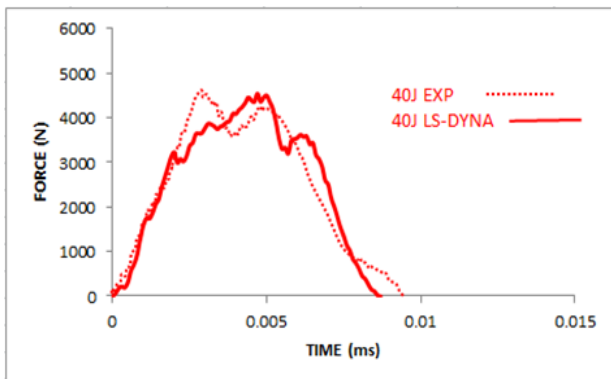
شکل ۹- ساخت و شبکه‌بندی لایه‌های سازه کامپوزیتی در نرم‌افزار

دو صفحه‌ای که در بالا و پائین وجود دارند لایه‌های آلومینیمی می‌باشند و صفحه وسط لایه‌های الیاف می‌باشند که لایه‌چینی آن‌ها با زوایای مد نظر نیز باید انجام شود. علاوه بر ساخت نمونه باید مبادرت به ساخت و شبکه‌بندی ضربه زننده با هندسه مورد نظر نیز بنمائیم (شکل ۱۰). در مرحله بعد بایستی به مدل کردن تماس بین لایه‌ها بپردازیم. با استفاده از تعریف تماس در نرم‌افزار اجازه می‌دهیم المان‌های که به هم متصل نیستند با هم تعامل داشته باشند.

مدل‌سازی‌ها می‌باشند، مورد بحث و مقایسه قرار می‌گیرند. در ضمن نمونه‌های D و E دقیقاً مشابه نمونه‌های A و B می‌باشند که در این جا تحت مدل‌سازی نرم‌افزاری قرار گرفته‌اند.



شکل ۱۲-مقایسه نمودار نیرو- زمان تجربی و نرم‌افزاری ضربه 25J



شکل ۱۳: مقایسه نمودار نیرو-زمان تجربی و نرم‌افزاری ضربه 40J

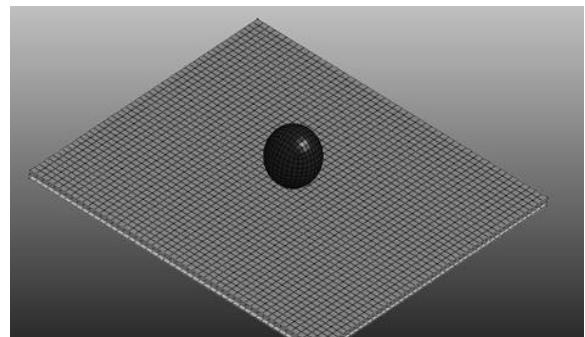
جدول ۳- کدگذاری نمونه‌های مدل‌سازی شده جهت بررسی اثر تغییر در انرژی ضربه زننده

کد نمونه	ابعاد نمونه (mm)	ضخامت لایه‌های آلومینیومی (mm)	ضخامت هریک از لایه‌های آلومینیومی (mm)	ضخامت الیاف (mm)	انرژی ضربه زننده (J)
C	۱۰۰*۱۰۰	۰/۴	۰/۴	۱/۹	۱۲/۵
D	۱۰۰*۱۰۰	۰/۴	۰/۴	۱/۹	۲۵
E	۱۰۰*۱۰۰	۰/۴	۰/۴	۱/۹	۴۰
F	۱۰۰*۱۰۰	۰/۴	۰/۴	۱/۹	۸۰

فولاد نیز مانند آلومینیوم ماده‌ای همسانگرد است و می‌توان جهت مدل‌سازی آن از مدل ماده‌های ذکر شده جهت مدل‌سازی آلومینیوم استفاده کرد اما از آن جا که تنها ضربه زننده از جنس فولاد می‌باشد، آن را به صورت یک جسم صلب در نظر گرفته و از مدل ماده بیست (RIGID) جهت وارد نمودن خواص در نرم‌افزار استفاده می‌شود. در شکل (۱۱) نمای کلی نمونه کامپوزیتی و ضربه‌زننده را مشاهده می‌نمائیم.

### اعتبارسنجی

همان‌گونه که قبلاً هم ذکر شده است، هدف از انجام این پروژه بررسی عددی اثر تغییر در پارامترهای انرژی اولیه ضربه‌زننده و تغییر در ضخامت لایه‌ها، در ضربه سرعت پائین بر روی کامپوزیت‌های فلز-الیاف با استفاده از نتایج حاصل از نرم‌افزار LS DYNA می‌باشد. اما قبل از این که به بررسی اثر تغییر این پارامترها بپردازیم، باید از صحت مدل‌سازی نرم‌افزاری مطمئن می‌شدیم و اصلی‌ترین فایده انجام کار آزمایشگاهی در این پژوهش نیز همین نکته می‌باشد. جهت اطمینان از به واقعیت نزدیک بودن کار نرم‌افزاری کافی است تا به مقایسه نمودارهای حاصل از آزمایشات با نمودارهای حاصله از مدل‌سازی نرم‌افزاری بپردازیم (شکل‌های (۱۲) و (۱۳)). همان‌گونه که در این شکل‌ها مشاهده می‌گردد نمودارهای حاصل از شبیه‌سازی نرم‌افزاری تا حدی زیاد به نمودارهای حاصل از کار تجربی نزدیک بوده؛ لذا می‌توان نتیجه گرفت که نتایج حاصل از تحلیل عددی قابل اعتماد بوده و به واقعیت بسیار نزدیک می‌باشند.



شکل ۱۱- نمای کلی سازه کامپوزیتی و ضربه‌زننده پس از ساخت و مش‌بندی

### بررسی عددی اثر تغییر در انرژی ضربه زننده

در این قسمت نمونه‌هایی با مشخصات مندرج در جدول ۳ مدل‌سازی شده و نمودارهای نیرو-زمان و انرژی جنبشی-زمان سازه کامپوزیتی (شکل‌های (۱۴) و (۱۵)) که حاصل از این



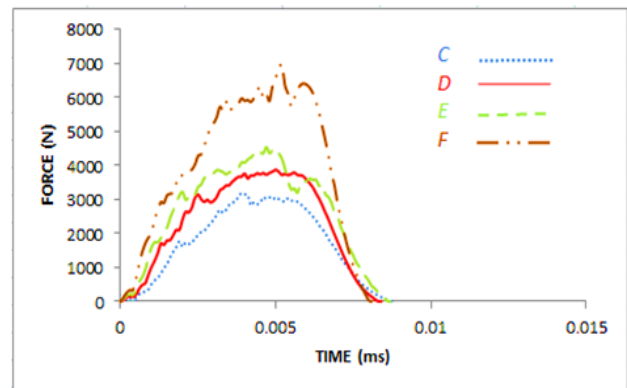
- مدت زمان برخورد در چهار نمونه تقریباً برابر می‌باشد.
- زمان رسیدن مقدار نیروی وارده به حداکثر، در چهار نمونه فوق تقریباً برابر می‌باشد.
- شیب نمودار نیرو- زمان در نمونه‌های که انرژی ضربه زننده بیشتری دارند عمودی‌تر است.

### بررسی اثر تغییر در ضخامت لایه‌ها

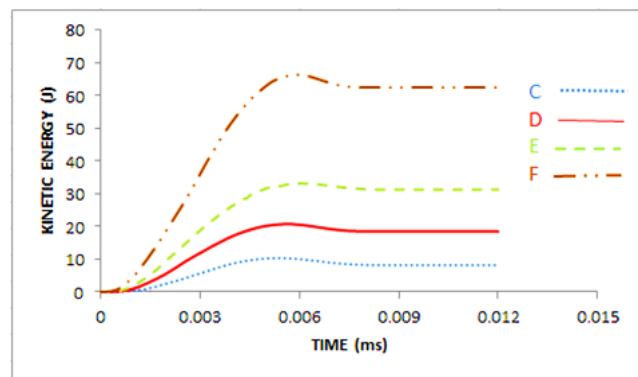
در این قسمت قصد داریم تا به بررسی اثر تغییر در ضخامت لایه‌ها در یک سازه کامپوزیتی با ضخامت کلی ثابت بپردازیم؛ به این منظور نمونه‌هایی با مشخصات مندرج در جدول ۴ مدل‌سازی شده و نمودارهای حاصل از این مدل‌سازی‌ها (شکل‌های (۱۶) و (۱۷)) مورد بحث و مقایسه قرار می‌گیرند

جدول ۴: کدگذاری نمونه‌های مدل‌سازی شده جهت بررسی اثر تغییر در ضخامت لایه‌ها

کد نمونه	ابعاد نمونه (mm)	ضخامت هر یک از لایه‌های آلومینیومی (mm)	ضخامت الیاف (mm)	انرژی ضربه زننده (J)
G	۱۰۰*۱۰۰	۰/۷۵	۱/۹	۲۵
H	۱۰۰*۱۰۰	۰/۳	۲/۸	۲۵
I	۱۰۰*۱۰۰	۱/۲	۱	۲۵



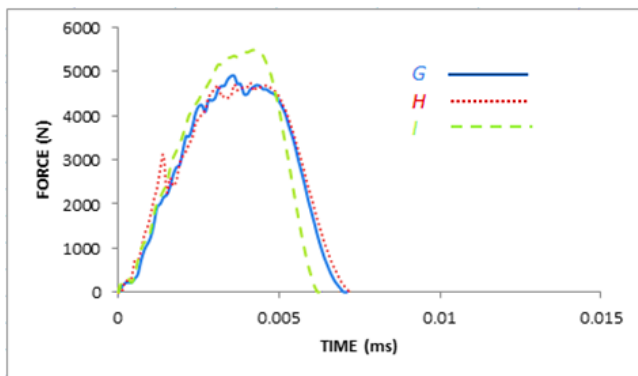
شکل ۱۴: مقایسه نمودارهای نیرو- زمان نمونه‌های C, D, E, و F



شکل ۱۵: مقایسه نمودارهای انرژی جنبشی- زمان نمونه‌های E و C, D, و F

### بحث و مقایسه (تغییر در انرژی ضربه زننده):

- بیشترین میزان جذب انرژی مربوط به نمونه F و کمترین میزان جذب انرژی مربوط به نمونه C می‌باشد که البته با توجه به مقادیر انرژی ضربه زننده در نمونه‌ها این موضوع قابل پیش‌بینی بود. در نمونه D میزان انرژی ضربه زننده نسبت به نمونه C، ۱۰۰ درصد زیاد شده و میزان جذب انرژی ۱۲۵ درصد. در نمونه E میزان انرژی ضربه زننده نسبت به نمونه D، ۶۰ درصد زیاد شده و میزان جذب انرژی ۶۹ درصد و نهایتاً در نمونه F میزان انرژی ضربه زننده نسبت به نمونه E، ۱۰۰ درصد زیاد شده و میزان جذب انرژی نیز ۱۰۰ درصد افزایش یافته است.
- بیشترین مقدار نیروی وارده به سازه کامپوزیتی مربوط به نمونه F می‌باشد که به میزان ۵۲٪ بیشتر از نمونه E، ۷۷٪ بیشتر از نمونه D و ۱۲۶٪ بیشتر از نمونه C می‌باشد.



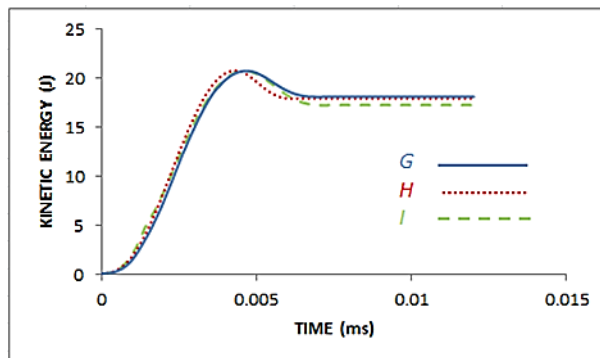
شکل ۱۶: مقایسه نمودارهای نیرو- زمان نمونه‌های H و G



✓ در یک سازه کامپوزیتی با ضخامت کلی ثابت، افزایش ضخامت لایه‌های آلومینیمی باعث می‌شود تا سازه سفتی بیشتری در مقابل ضربه نشان دهد.

### منابع و مراجع

[1] Wu G. and Yang J.M., The Mechanical Behavior of Glare Laminates for Aircraft Structures, JOM, J. Mineral. Metal. Mater. Soc., No.57, 2005, pp.72-79  
 [2] Wu G. and Yang J.M., analytical modeling and numerical simulation of the nonlinear deformation of hybrid fiber-metal laminates, Modelling Simul. Mater. Sci., Eng., No.13, 2005, pp.413-425  
 [3] Carrillo J.G. and Cantwell W.J., scaling effects in the tensile behavior of fiber-metal laminates, Compos. Sci. Technol., No.67, 2007, pp.1684-1693  
 [4] Sadighi M., Tajdari M., and dariushi S., an investigation on tensile properties of glass fiber/aluminum laminates, polymer. Sci. Technol., Vol.22, No.1, 2009  
 [5] Volt A., Vogel sang L.B., and de Vries T.J., towards application of fiber metal laminates in larger aircrafts, Eng. Aerosp. Thechnol., No.71, 1999, pp.558-570  
 [6] Abrate S., impact on composite structures, England Cambridge University press, 1998  
 [7] Kumar p. and Rai., Impact damage on single interface GFRP laminates.an experimental study, composite structures., Vol.18, No.1, 1991, pp.1-10  
 [8] Deransfield K., Baillie C., and Mai Y.W., improving the delamination resistance of GERP by stitching. A review, composite science and technology., No.50, 1994, pp.305-317  
 [9] Phillips D.C., Park N., and Lee R.j., the impact behavior of high performance ceramic matrix fiber composite, Composite Science and Technology., No.37, 1990, pp.249-265  
 [10] Sun C.T. and Rechack S., effect of adhesive layers on impact damage in composite laminates, ASTM STP., No.972, 1988, pp.97-123  
 [11] Homan JJ., fatigue initiation in fiber metal laminates. Int J fatigue., No.28, 2006, pp.366-374  
 [12] Takeda N., Sierakowski R.L., and Malvern L.E., studies of impacted glass fiber reinforced laminates, SAMPE., Vol.12, No.2, 1981, pp.9-17  
 [13] Hagh Kashani M., Sadighi M., and Lalehpour A., the effect of impact energy division over repeated low velocity impact on fiber-metal laminate , journal of composite materials., 2014, pp.1-12  
 [14] Wu E. and Shyu K., response of composite laminates to contact loads and relationship to low velocity impact, journal of composite materials., Vol.27, No.15, 1993, pp. 1443-1464.  
 [15] Schoeppner G.A., low velocity impact response of tension preloaded composite laminates, conference on fibrous composites in structural design, Hilton Head Island., 1993.



شکل ۱۷: مقایسه نمودارهای انرژی جنبشی - زمان نمونه‌های H, G و I

### بحث و مقایسه (تغییر در ضخامت لایه‌ها):

- بیشترین میزان جذب انرژی مربوط به نمونه G و کمترین میزان جذب مربوط به نمونه I می‌باشد. میزان جذب انرژی در نمونه G به میزان ۱٪ بیشتر از نمونه H و ۵٪ بیشتر از نمونه I می‌باشد.
- بیشترین مقدار نیروی وارده به سازه کامپوزیتی مربوط به نمونه I می‌باشد که به میزان ۱۲٪ بیشتر از نمونه G و ۱۵٪ بیشتر از نمونه H می‌باشد.
- زمان رسیدن مقدار نیروی وارده به حداکثر، در سه نمونه فوق تقریباً برابر می‌باشد.
- بیشترین زمان برخورد مربوط به نمونه H می‌باشد که بالاترین ضخامت الیاف را دارد و کمترین زمان برخورد مربوط به نمونه I می‌باشد که بالاترین ضخامت لایه‌های آلومینیمی را دارد.
- شیب نمودار نیرو- زمان با افزایش ضخامت لایه‌های آلومینیمی عمودی تر می‌شود.

### نتیجه گیری

- ✓ افزایش انرژی ضربه زننده باعث می‌شود تا سازه کامپوزیتی تحت ضربه، سفتی بیشتر از خود نشان دهد.
- ✓ تغییر در انرژی ضربه‌زننده تأثیری بر مدت زمان برخورد ندارد.
- ✓ با افزایش میزان انرژی اولیه ضربه‌زننده، میزان جذب انرژی افزایش می‌یابد.
- ✓ در یک سازه کامپوزیتی با ضخامت ثابت، با افزایش در ضخامت الیاف و کاهش ضخامت لایه‌های آلومینیمی، مدت زمان برخورد افزایش می‌یابد و بالعکس.

[17] Vlot A., impact loading on fiber metal laminates, Int. J. Impact Eng., No.18, 1996, pp.291-307

[16] Hagenbeek M., Van Hengel C., and Vermeeren C., static properties of fiber metal laminates, Appl. Compos. Mater., No.10, 2003, pp.207-222