

بررسی رفتار سازه‌های فلزی دو لایه هم‌جنس و غیرهم‌جنس تحت بارگذاری ضربه سرعت پائین

هادی خرمی شاد^{۱*}، محمد باقری توفیقی^۲

* نویسنده مسئول: khoramishad@iust.ac.ir

چکیده

در تحقیق حاضر رفتار مکانیکی سازه‌های فلزی دو لایه تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت پایین بصورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایشات تجربی برای اعتبارسنجی نتایج مدلسازی عددی استفاده شده است. سپس با استفاده از مدلسازی عددی، رفتار سازه‌های متورق بطور مفصل مورد بررسی قرار گرفته است. سازه‌های فلزی چند لایه بسته به جنس مادی لایه‌های آنها تحت بارگذاری ضربه‌ای می‌توانند رفتار متفاوتی از خود نشان دهند. لایه‌های فلزی از چهار جنس پرکاربرد در این صنعت انتخاب شده‌اند و تمامی لایه‌چینی‌های ممکن در یک سازه‌ی دو لایه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از آنست که در بین سازه‌های چندلایه با جنس لایه‌های یکسان، سازه فولادی بیشترین نیروی تماسی و کمترین مدت زمان تماس را دارا می‌باشد. در صورتیکه سازه سربی بیشترین مقدار جابجایی ماکزیمم و بیشترین مقدار انرژی اتلافی را نشان می‌دهد. در سازه‌های غیرهم‌جنس اگر لایه‌ای که در مقابل ضربه قرار می‌گیرد از آلومینیوم 6061-T6 باشد، بیشترین نیروی تماسی زمانی اتفاق می‌افتد که لایه‌ی دوم از فولاد باشد و بیشترین جابجایی زمانی اتفاق می‌افتد که لایه‌ی دوم از سرب باشد. میانگین نتایج خروجی نیروی تماسی، برای سازه‌هایی که لایه‌ی فولادی در برابر ضربه قرار گرفته است، بیشترین مقدار را نشان می‌دهد. بیشترین میزان میانگین فرورفتگی نیز متعلق به سازه‌هایی است که لایه سربی در برابر ضربه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده در این تحقیق به طراح کمک می‌کند تا بهترین لایه‌چینی را با توجه به هدف طراحی تعیین کند. نتایج مدلسازی اجزای محدود با نتایج آزمایشگاهی و همچنین نتایج دیگر محققین قرابت خوبی داشته‌اند.

واژه‌های کلیدی

سازه فلزی دو لایه، بارگذاری ضربه‌ای
سرعت پایین، اتصالات چسبی، تحلیل اجزاء
محدود.

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

۱- مقدمه

اتصالات چسبی یکی از انواع روش‌های مهم اتصال بشمار می‌آید که در صنایع گوناگون همچون صنایع هوایی و خودروسازی بطور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. از مزایای روش اتصال چسبی قابلیت اتصال مواد با جنس مختلف در کنار یکدیگر است. این مشخصه منجر به ایجاد سازه‌های فلزی چندلایه شده است که در صنایع مختلف کاربرد دارد. سازه‌های فلزی چندلایه می‌توانند از لایه‌های فلزی با جنس یکسان یا متفاوت حاصل شوند.

سازه‌های فلزی چندلایه از اتصال لایه‌های نازک فلزی توسط چسب حاصل می‌شوند. این سازه‌ها رفتار شکست مناسبتری نسبت به سازه‌های تک لایه از خود نشان می‌دهند و رشد ترک در این سازه‌ها با ثبات^۱ است [۱]. دلیل این موضوع را می‌توان به این صورت بیان کرد که وقتی شکست در یکی از لایه‌ها اتفاق می‌افتد، ترک به لایه چسب رسیده، در این لایه پیشروی کرده و در صورتیکه انرژی حاصل از بارگذاری خارجی به اندازه کافی باشد، ترک به لایه دیگر نفوذ می‌کند. از طرف دیگر بدلیل ضخامت کم لایه‌های فلزی، حالت تنش به تنش صفحه‌ای نزدیکتر بوده، اندازه ناحیه پلاستیک بزرگتر است و چقرمگی شکست نسبت به سازه‌های تک لایه بالاتر می‌باشد. جانسون و استراتون [۲] با انجام آزمایشهایی روی سازه‌های چند لایه و تک‌لایه، نشان دادند نرخ رشد ترک در سازه چند لایه نسبت به نمونه تک لایه بطور قابل ملاحظه‌ای کمتر است.

دیگر مشخصه مثبت این گونه سازه‌ها نسبت به سازه‌های تک لایه رفتار مناسب‌تر آنها در مقابل بارگذاری ضربه‌ای سرعت پائین می‌باشد که مورد توجه محققین [۳-۵] واقع شده است. معروف و همکارانش [۳] سازه‌های آلومینیومی چند لایه تحت بارگذاری ضربه‌ای را مطالعه کردند. ایشان

در ضخامت ثابت برای کل سازه تعداد لایه‌های فلزی را افزایش دادند و نشان دادند که خواص جذب انرژی سازه با افزایش تعداد لایه‌ها رابطه‌ی مستقیم دارد. کراچ [۴] رفتار سازه‌های فلزی چندلایه را با سازه‌ی تک‌لایه تحت بارگذاری استاتیکی و ضربه‌ای مقایسه نموده است. ایشان نیز نتیجه تحقیق خود را بالاتر بودن قابلیت جذب انرژی سازه‌ی چندلایه نسبت به سازه‌ی تک لایه بیان نموده است. تحقیق دیگری که در حوزه‌ی ضربه سرعت پایین بر روی سازه‌های چندلایه انجام شده کار یلدرم و آپالاک [۵] است. ایشان رفتار سازه‌های فلزی دو لایه را تحت بارگذاری ضربه با سرعت پایین بررسی نموده‌اند. قابل ذکر است تحقیق ایشان به دو جنس آلومینیوم و فولاد محدود بوده است. از جمله نتایج مهم مطالعه ایشان اثر مستقیم جرم و سرعت ضربه‌زننده بر نیروی تماسی و مدت زمان تماس بوده است در حالی که شعاع ضربه‌زننده تأثیر بسیار اندکی بر نیروی تماسی داشته است. همچنین بر اساس مطالعه‌ی ایشان جابجایی باقیمانده سازه دو لایه آلومینیوم-آلومینیوم بیشترین مقدار را بخود اختصاص داده است و سازه‌های آلومینیوم-فولاد و فولاد-آلومینیوم جابجایی باقیمانده کمتری داشته‌اند و نهایتاً سازه‌ی فولاد-فولاد کمترین جابجایی باقیمانده را داشته است. بنابراین می‌توان گفت که اضافه کردن فولاد سبب افزایش صلبيت سازه شده است. آپالاک و یلدرم [۶] در مطالعه‌ی دیگری تأثیر ضخامت چسب را بر سازه‌های فلزی دو لایه متشکل از جنس فولاد و آلومینیوم را بررسی کردند. مطابق این مطالعه، تنها جابجایی ماکزیمم مرکز سازه و همچنین مدت زمان تماس با افزایش ضخامت لایه‌ی چسب دچار کاهش قابل توجهی می‌شوند و خروجی نیروی تماسی و انرژی جنبشی ضربه‌زننده با تغییر ضخامت چسب دچار تغییر محسوسی نمی‌شوند. پاشیون و هامبریسمر [۷] به این نتیجه رسیدند که مقدار جذب انرژی در آزمایش ضربه برای

گرفته شده و تمامی لایه‌چینی‌های ممکن در یک سازه‌ی دو لایه‌ای مورد بررسی قرار گرفته شده‌است. در مدلسازی اجزای محدود از مدل دو بعدی متقارن محوری استفاده شده است که نسبت مدلسازی سه‌بعدی بمراتب سریع‌تر بوده و در عین حال دقت مناسبی نیز دارد. بنابراین برای تعداد حالت‌های بیشتری در مدت زمان کمتر می‌توان مقایسه انجام داد. همچنین در این مطالعه بطور مشخص خروجی مربوط به فرورفتگی سطحی در سازه عنوان شده است که در سایر مطالعات اشاره‌ای به آن نشده است.

به طور کلی مسائل ضربه به دو گروه اصلی سرعت پایین و سرعت بالا تقسیم می‌شوند. یک معیار برای تمییز این دو گروه مسئله، موضوع آسیب می‌باشد. در این تقسیم بندی، ضربه ای که در آن آسیبی از جمله ایجاد ترک و رشد آن و یا پارگی ورق در سازه صورت نمی‌گیرد به عنوان ضربه سرعت پایین معرفی شده است. مسئله مورد بحث در تحقیق حاضر از این قسم بوده است که در نتیجه آن هیچ یک از مکانیزم‌های آسیب (تکه تکه شدن، نفوذ، رشد ترک و ...) اتفاق نیافتاده و تنها تغییر شکل پلاستیک که در ضربه سرعت پایین نیز صورت می‌گیرد استفاده شده است. علاوه بر این مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی موجود در بخش اعتبارسنجی، حاکی از قابل قبول بودن این فرض در مسئله حاضر است. البته با افزایش سرعت برخورد، مدلسازی مکانیزم‌های محتمل آسیب از جمله جدایش لایه‌های فلزی، نفوذ و ... اجتناب ناپذیر خواهد بود.

در ادامه ابتدا در مورد روش‌های مختلف مدلسازی پدیده‌ی ضربه بحث شده است. سپس توضیحاتی در مورد هندسه ضربه‌زننده و صفحات هدف، همچنین شرایط بارگذاری و مشخصات مادی ارائه شده است. سپس نحوه‌ی اعتبارسنجی نتایج مدلسازی حاضر با نتایج سایر محققین ارائه شده است. در بخشی جداگانه، نتایج کلی حاصل از

صفحه سه لایه‌ای بیشتر از صفحه دو لایه‌ای و برای صفحه دو لایه‌ای بیشتر از ورق ساده تک لایه‌ای می‌باشد. سینکه و یوهانسون [۸] نیز هندسه‌های متنوعی از سازه‌های چند لایه را تحت بارگذاری ضربه‌ای مطالعه کردند و اذعان داشتند که در مقابل بارگذاری ضربه‌ای، سازه‌های چند لایه نسبت به سازه تک‌لایه، رفتار بهتری نشان می‌دهند. معروف و باقری [۹] سازه‌های آلومینیومی دو لایه متصل شده با چسب را مطالعه کردند. آزمایش تیر یکسرگیردار دولبه^۱ برای این سازه در نظر گرفته شده و انواع چسب‌ها که افزودنی‌ها با ترکیب‌های مختلف به آن اضافه شده در این آزمایش مورد بررسی قرار گرفتند. در سالهای اخیر نیز سازه‌های فلزی متورق مورد توجه قرار گرفته‌اند. کتنام و همکارانش [۱۰] با استفاده از مدل ناحیه چسبناک به بررسی شکست استاتیک اتصالات چسبی در سازه‌های فلزی متورق پرداخته‌اند. ایشان با بیان مزایای روش ناحیه چسبناک به کارایی این روش در محاسبه رفتار شکست استاتیک اتصالات چسبی اذعان می‌کنند. کتنام و همکارانش در مطالعه‌ای دیگر [۱۱] سازه‌های فلزی متورق را تحت بارگذاری استاتیک و خستگی و تحت اثر رطوبت مطالعه کرده‌اند. رطوبت هم برای بارگذاری استاتیک و هم برای بارگذاری خستگی بعنوان عامل منفی عمل کرده و بار تحمل نهایی استاتیک و خستگی را کاهش داده است.

در حوزه سازه‌های فلزی چند لایه تحت بارگذاری ضربه‌ای، انجام مطالعات گسترده‌تر و کامل‌تر، لازم و ضروری بنظر می‌رسد. در مطالعه‌ی حاضر، رفتار مکانیکی سازه‌های فلزی دو لایه تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت پائین، با استفاده از مدلسازی اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفته است. لایه‌های فلزی از جنس‌های فولاد، آلومینیوم 6061، آلومینیوم 6061-T6 و سرب در نظر

تنش‌های گذرا، نیروها و همچنین جابجایی‌های ایجاد شده را نمی‌تواند توضیح دهد.

۲-۱-۲- انتشار امواج تنش در مواد کاملاً الاستیک

ضربه سبب ایجاد امواج تنشی می‌شود که انرژی کرنشی را از ناحیه‌ی ضربه منتقل می‌سازد. اگر مقدار انرژی که بصورت ارتعاشات الاستیکی تبدیل شده، نسبت قابل توجهی از انرژی کل را بخود اختصاص داده باشد، مدل دینامیک جسم صلب دیگر پاسخگو نیست و در این صورت رویکردی که بر اساس انتشار امواج است، بسیار مناسب می‌باشد. با استفاده از این مدل آقای گولد اسمیت در سال ۱۹۶۰ مطالعاتی بر روی ضربه‌ی طولی دو میله، ضربه‌ی عرضی یک جسم بر روی تیر، ضربه‌ی کششی یک جسم بر میله و اثر ویسکوالاستیک بر رفتار ضربه‌ای را مطالعه کردند. بعنوان مثال جابجایی‌های یک میله در اثر بار ضربه‌ای [۱۲] بصورت رابطه (۱) ارائه می‌شود.

$$u = -\left\{ \frac{\sigma_0 t^2}{2\rho L} + \frac{2\sigma_0 L}{\pi^2 E} \sum \frac{(-1)^i}{i^2} \right. \\ \left. \cos\left(\frac{i\pi x}{L}\right) \left[1 - \cos\left(\frac{i\pi c_0 t \sigma}{L}\right)\right] \right\}, \quad (1-1)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots$$

$$v = \frac{\partial u}{\partial t} = 0, t = 0, 0 \leq x \leq L; \quad (2-1)$$

$$\left\{ \frac{\partial u}{\partial x} = 0, x = 0, t \geq 0; \right. \\ \left. \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\sigma_0}{E}, x = L, t \geq 0 \right\} \quad (3-1)$$

در رابطه (۱)، L نمایانگر طول میله، σ_0 - تنش فشاری اعمال شده در $x=L$ و در زمان $t \geq 0$ ، E مدول یانگ، ρ چگالی میله، t زمان و v سرعت را نشان می‌دهد.

تئوری هرتر در مطالعات متعددی از جمله توسط جانسون [۱۳] در سال ۱۹۸۵، برای بدست آوردن رابطه‌ی نیرو-جابجایی و همچنین پیش‌بینی مدت زمان تماس و

مدلسازی حاضر مورد بررسی قرار گرفته و نهایتاً نتیجه‌گیری و جمع‌بندی ارائه شده است.

۲- مدلسازی و شبیه‌سازی مکانیک ضربه

برای مدلسازی پدیده‌ی ضربه روش‌های تحلیلی و محاسباتی متعددی وجود دارد [۱۲] که در این قسمت به چند نمونه مهم اشاره شده است. ارائه‌ی مدل‌های موجود در این زمینه، جایگاه مدلسازی ضربه به کمک نرم‌افزار را بهتر نمایان می‌سازد، که در مطالعه‌ی حاضر نیز از این روش استفاده شده است.

۲-۱-۲- مدل‌های تحلیلی

- مدل‌های تحلیلی برای مکانیک ضربه را می‌توان به چهار قسمت اصلی دسته‌بندی نمود:
- مدل‌هایی که بر اساس دینامیک جسم صلب هستند.
- مدل‌هایی که برای انتشار امواج تنش در اجسام کاملاً الاستیک تعریف شده‌اند.
- مدل‌هایی برای انتشار امواج تنش در اجسام جامدی که بطور کامل الاستیک نیستند. بعنوان مثال مدل ضربه و امواج پلاستیک^۱.
- مدل‌های غیرمحلی^۲ که توانایی توضیح پراشیدن^۳ و تکه‌تکه شدن^۴ در فرآیند ضربه را دارند.

۲-۱-۱-۲- مدل دینامیک جسم صلب

مدل دینامیک جسم صلب بر اساس قانون ضربه-مومنتم پایه‌ریزی شده است. این قانون بر اساس مشاهدات پدیدارشناختی از رفتار بازگشتی مواد الاستیک و غیر الاستیک بیان شده است. مدل دینامیک جسم صلب برای ضربه دارای محدودیت‌های بسیار جدی است. این مدل

1- Shock and plastic waves
2- Non-local
3- Spallation
4- Fragmentation

تحت تأثیر قرار می‌دهد، بر همین اساس تعداد کثیری از مطالعات از تئوری‌هایی استفاده می‌کنند که بر پایه‌ی میکروساختارها هستند. یک روش غیر محلی بسیار مهم فرمول پریدینامیک^۲ می‌باشد [۱۲] که بطور ویژه برای شکست و گسیختگی دینامیکی بسط داده شده است. شاخصه مهمی که مدل‌های غیر محلی را از سایر مدل‌ها جدا می‌سازد توانایی استفاده از این مدل‌ها برای پیش‌بینی آسیب‌هایی پیچیده همچون پراشیدن و تکه‌تکه شدن می‌باشد که سایر مدل‌های تحلیلی ضربه، این قابلیت را ندارند.

۲-۲- مدل‌های عددی

یکی از ابزارهای قدرتمند برای مدل‌سازی و طراحی مواد جاذب انرژی جدید، مدل‌های عددی می‌باشند. هر چند پیشرفت مهمی در زمینه‌ی مدل‌سازی آسیب و گسیختگی در زمینه‌های ضربه و نفوذ صورت پذیرفته ولی هنوز هم کارهای زیادی برای انجام در این حوزه وجود دارد. مدل‌سازی عددی ابزاری است که برای پیش‌بینی رفتار فیزیکی سیستم‌های مادی مورد استفاده بوده و در طراحی سازه‌های بهینه بسیار کارگشا هستند. زمینه‌ی طراحی بهینه بمنظور ساخت مواد جاذب انرژی، هنوز در ابتدای راه خویش است. از جمله روش‌های عددی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- روش‌های المان محدود و تفاضل محدود که در نرم-افزارهایی مثل ال اس داینا و آباکوس استفاده شده است.
- روش‌های مستقل از مش‌بندی.

۳- تعریف مسأله

صفحات هدف بصورت دیسکی به قطر ۲۱۰ میلی‌متر و ضخامت ثابت ۸/۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. ضخامت

میزان حداکثر فرورفتگی در جسم هدف مورد استفاده قرار گرفته است.

فرمول تماس هرتز [۱۳] که ارتباط بین نیروی تماسی عمودی و جابجایی عمودی را برقرار می‌سازد بصورت رابطه (۲) است.

$$F = K_c \alpha^{3/2} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، K_c عبارت از سفتی تماس، α جابجایی عمودی بین دو جسم برخوردکننده و F نیروی تماسی می‌باشد. با ترکیب رابطه‌ی (۲) با معادله‌ی حرکت صفحه یا تیر می‌توان تغییرات نیروی تماسی بر حسب زمان و همچنین مدت زمان تماس را بدست آورد (بعنوان مثال می‌توان به کارهای گولداسمیت ۱۹۶۰ اشاره کرد).

۲-۱-۳- انتشار امواج تنش در مواد الاستوپلاستیک

مدل ضربه‌ی الاستیک برای حالتی که تغییر شکل‌های پلاستیک نیز در ناحیه‌ی تماس بوجود آید قابل تعمیم است. معادله‌ی نیرو-جابجایی معمولاً با اضافه کردن یک ترم میرایی بمنظور نشان دادن اتلاف در ناحیه‌ی تماس، تصحیح می‌شود. بنابراین امکان این امر فراهم می‌شود که بصورت مؤثری بتوان ناحیه‌ی تماس را همچون سیستم دمپر-فتری [۱۲] بصورت رابطه (۳) مدل‌سازی نمود.

$$F = F_c(\alpha) + F_v(\alpha, \dot{\alpha}) + F_p(\alpha, \dot{\alpha}) \quad (3)$$

F_c همان قسمت الاستیک نیروی تماسی می‌باشد و F_v قسمت میرایی ویسکوز و F_p نیروی مربوط به اتلاف ناشی از تغییر شکل‌های پلاستیک می‌باشد. α و $\dot{\alpha}$ نیز به ترتیب تغییر شکل و نرخ تغییر شکل بین هدف و گلوله می‌باشند.

۲-۱-۴- مدل‌های غیر محلی

مواد مهندسی دارای میکروساختارهایی^۱ هستند که عکس‌العمل آنها را به انتشار امواج، ضربه، آسیب و شکست

فلزات مذکور در منابع [۵، ۱۱] موجود است که در جدول (۱) به آنها اشاره شده است. در شکل (۱) نمایی از مدل متقارن محوری دو بعدی نشان داده شده است. هم لایه‌های فلزی هم لایه‌ی چسب، توسط المان‌های Thin Shell 163 مش‌بندی شده‌اند. در محل تماس بین گوی و جسم هدف اندازه‌ی المان‌ها ریزتر شده است تا از خطاهای عددی ناشی از شرایط غیر خطی ایجاد شده در ناحیه تماس، تا حد ممکن جلوگیری شود. نرم‌افزار ال اس داین این امکان را فراهم می‌سازد که کاربر از میان طیف وسیعی از مدل‌های مادی، بتواند مدل مادی مد نظر خود را انتخاب نماید.

چسب بین دو لایه‌ی فلزی برابر ۰/۲ میلیمتر می‌باشد. جابجایی نقاط مرزی دیسک هدف در سه جهت مقید شده است. جسم ضربه‌زننده نیز کره‌ای به شعاع ۱۳ میلیمتر می‌باشد. ضربه‌زننده جسمی صلب در نظر گرفته شده که ۱۹/۳۱ کیلوگرم جرم دارد و با سرعت ۳ متر بر ثانیه به جسم هدف برخورد می‌کند. جسم هدف نیز از ترکیب تمامی حالت‌های ممکن از چهار فلز آلومینیوم 6061-T6، فولاد، سرب و آلومینیوم 6061 بصورت دو لایه ساخته شده است. چسب مورد استفاده برای اتصال صفحات فلزی EC-2214 می‌باشد که از نوع چسب‌های اپوکسی محسوب می‌شود. مشخصات مادی مربوط به چسب و

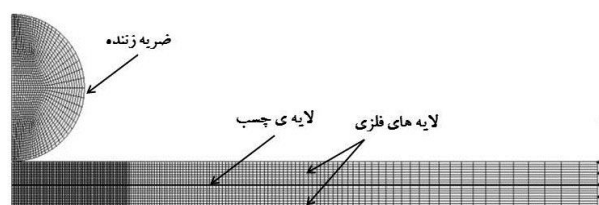
جدول (۱) مشخصات مادی فلزات و چسب بکار رفته در مدلسازی.

نام ماده	چگالی (kg/m^3)	مدول الاستیسیته (GPa)	نسبت پواسون	تنش تسلیم (MPa)	ضرب اول کوپرسایموند (s^{-1})	ضرب دوم کوپرسایموند
آلومینیوم [14] 6061-T6	۲۶۸۵	۶۸/۹	۰/۳۳	۲۷۶	۱۷۰۰۰۰	۴
فولاد [15]	۷۸۰۰	۲۱۰	۰/۲۹	۲۳۷	۴۰	۵
سرب [16]	۱۱۲۰۰	۱۶	۰/۴۴	۱۰	۴۰	۰/۸
آلومینیوم [17] 6061	۲۷۰۰	۷۱	۰/۳۳	۱۲۵	۶۵۰۰	۴
چسب [18] EC2214	۱۵۴۵	۵/۱	۰/۳۸	۵۲	۷۹۵۵	۵/۲۶

ذکر است، رفتار غیر الاستیک مواد پلیمری از جمله چسب‌های پلیمری با مواد فلزی متفاوت می‌باشد. البته این تفاوت بسته به نوع ماده پلیمری و نوع بارگذاری می‌تواند شدت و ضعف داشته باشد. در مسئله حاضر، مقایسه نتایج مدلسازی با نتایج آزمایشگاهی حاکی از آن بود که مدل مادی الاستیک-پلاستیک-سینماتیک برای فلز و چسب قابل قبول بوده است.

۴- اعتبارسنجی نتایج

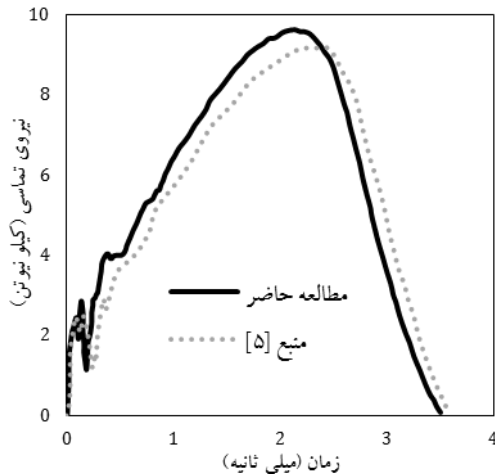
اعتبارسنجی نتایج در دو مرحله انجام شده است. بعنوان اعتبارسنجی اول، نتایج نمودار نیرو بر حسب زمان برای سازه‌ی فولاد-آلومینیوم رسم شده و با نتایج منبع [۵] مقایسه شده است. مطابق شکل (۲) تطابق خوبی بین نتایج مدلسازی حاضر با نتایج منبع [۵] ملاحظه می‌شود. به ترتیب ۵٪ و



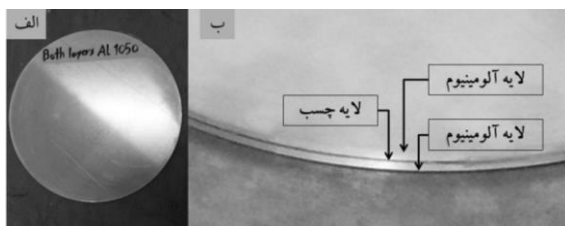
شکل (۱) نمایی از مدل متقارن محوری ضربه‌زننده و جسم هدف.

مدل مادی پلاستیک-سینماتیک-ایزوتروپیک^۱ که قابلیت در نظر گرفتن رفتار الاستیک-پلاستیک دارد، برای مدلسازی لایه‌های فلزی و لایه‌ی چسب استفاده شده است. این مدل مادی با در نظر گرفتن ضرایب کوپرسایموند، می‌تواند اثرات نرخ کرنش در بارگذاری ضربه‌ای را محاسبه نماید. ضرایب کوپرسایموند مربوط به مواد بکار رفته در مدلسازی در جدول (۱) ارائه شده است.

۸/۱ میلیمتر از ارتفاع ۲۰ سانتیمتر به ترتیب با جرم ۶/۲ و ۱۰/۲ کیلوگرم به سازه‌های ۱۰۵۰-۲۰۲۴ و ۱۰۵۰-۱۰۵۰ برخورد کرده است. نمایی از نمونه آزمایشگاهی بسته شده در دستگاه در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۲) اعتبارسنجی نتایج برای صفحات فولاد- آلومینیوم.



شکل (۳) سازه فلزی دولایه تحت آزمایش ضربه الف) نمای بالا ب) چیدمان سازه.

خروجی‌های آزمایش ضربه شامل نیروی تماسی ماکزیمم، مدت زمان تماس، میزان فرورفتگی در سطح جسم هدف (جابجایی نقطه بالا)، میزان جابجایی باقیمانده در نقطه مرکزی پشت سازه (جابجایی نقطه پائین)، شعاع پلاستیک و میزان انرژی جنبشی باقیمانده ضربه‌زننده اندازه‌گیری شده و با نتایج عددی مقایسه شده است.

۲/۵٪ خطا در نیروی تماسی و زمان تماس برای صفحات فولاد-آلومینیوم مشاهده گردید.

بعنوان اعتبارسنجی دوم، سازه‌های فلزی دولایه تحت آزمایش ضربه‌ی وزنه‌ی افتان قرار گرفته و نتایج این آزمایش‌ها با نتایج مدلسازی حاضر مقایسه شده است. دو سازه فلزی متورق ساخته شده است. سازه اول شامل دو لایه از آلومینیوم 1050-H14 بوده (۱۰۵۰-۱۰۵۰) و در سازه‌ی دوم لایه‌ی اول از جنس آلومینیوم 1050-H14 و لایه‌ی دوم آن از جنس آلومینیوم 2024-T3 (۱۰۵۰-۲۰۲۴) ساخته شده است. نمونه‌ای از سازه‌های دو لایه فلزی در شکل (۳) نشان داده شده است.

مشخصات هندسی هر دو سازه مشابه بوده بطوری که صفحات فلزی دیسک مانند به قطر ۱۹/۵ سانتیمتر و به ضخامت 0.2 ± 0.02 میلیمتر توسط چسب Araldite 2012 به ضخامت 0.1 ± 0.025 میلیمتر بهم متصل شده‌اند. چسب سازه‌ای Araldite 2012 دو جزئی بوده و از نوع چسب‌های اپوکسی محسوب می‌شود. مشخصات مادی چسب و دو جنس آلومینیوم بکار رفته در آزمایش در جدول (۲) ارائه شده است. لازم به ذکر است که عملیات پخت چسب در دمای اتاق انجام شده است. همچنین برای تقویت هرچه بیشتر اتصال بین چسب با لایه‌های فلزی، سطوح فلزی چندین بار با آستون تمیز شده‌اند.

فاصله‌ای به اندازه‌ی ۲/۲۵ سانتیمتر در جهت شعاعی در محیط هر دو سازه بصورت گیردار نگهداشته شده است. یعنی دایره‌ای به اندازه‌ی قطر ۱۵ سانتیمتر بصورت آزاد در وسط سازه قرار دارد که ضربه‌زننده به مرکز آن برخورد می‌کند. در هر دو سازه ضربه‌زننده به لایه‌ی آلومینیوم 1050-H14 برخورد کرده است. ضربه‌زننده کروی به شعاع

جدول (۲) مشخصات مادی فلزات و چسب بکار رفته در آزمایش ضربه.

نام ماده	چگالی (kg/m^3)	مدول الاستیسیته (GPa)	نسبت پواسون	تنش تسلیم (MPa)	ضریب اول کوپرسایموند (s^{-1})	ضریب دوم کوپرسایموند
آلومینیوم [17] 2024-T3	۲۷۸۰	۷۳/۱	۰/۳۳	۳۴۵	۶۵۰۰	۴
چسب [19] Araldite 2012	۱۱۷۰	۱/۳۵	۰/۴۱	۳۰	۹۱/۹۳	۵/۲۶
آلومینیوم [17] 1050-H14	۲۷۱۰	۷۱	۰/۳۳	۸۵	۶۵۰۰	۴

آزمایشگاهی نیروی تماسی ماکزیمم و مدت زمان تماس برای سازه ۲۰۲۴-۱۰۵۰ نیز برابر ۷/۷۱ کیلونیوتن و ۶/۴ میلی ثانیه بوده است و مقادیر عددی برای این خروجی‌ها برابر ۸/۱ کیلونیوتن و ۵/۶ میلی ثانیه بوده که به ترتیب برای نیرو و زمان، میزان خطای ۵ و ۱۲/۵ درصد در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. خروجی‌های دیگر آزمایش ضربه‌ی سرعت پائین برای سازه ۱۰۵۰-۱۰۵۰ با نتایج عددی مقایسه شده و در شکل (۵) نشان داده شده است. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی برای سازه ۲۰۲۴-۱۰۵۰ نیز در شکل (۶) نشان داده شده است. میزان خطای نتایج عددی نسبت به نتایج آزمایشگاهی مطابق شکل‌های (۵) و (۶) برای خروجی‌های جابجایی نقطه بالا، جابجایی نقطه پائین، شعاع پلاستیک و انرژی جنبشی باقیمانده‌ی ضربه‌زننده برای سازه ۱۰۵۰-۱۰۵۰ به ترتیب برابر ۱۴/۳، ۸/۶، ۱۰/۸ و ۱۱/۸ درصد می‌باشند و همچنین برای سازه ۲۰۲۴-۱۰۵۰ به ترتیب برابر ۱۰/۶، ۱۳/۸، ۸/۹ و ۶/۵ درصد می‌باشند. اختلاف بین نتایج مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی برای تمام خروجی‌های ضربه سرعت پائین، برای هر دو سازه ۱۰۵۰-۱۰۵۰ و ۲۰۲۴-۱۰۵۰ در جدول (۳) بصورت درصد ارائه شده است.

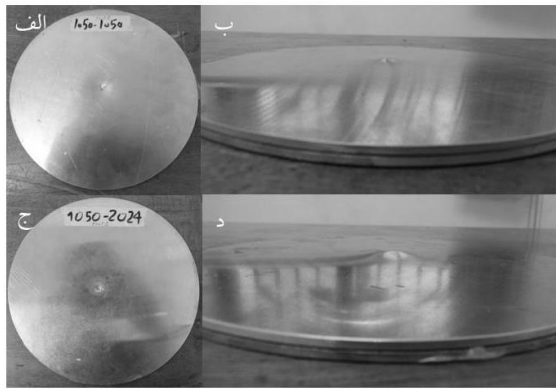
جدول (۳) اختلاف درصدی بین نتایج مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی.

سازه	نیروی تماسی	مدت زمان تماس	انرژی جنبشی باقیمانده	شعاع پلاستیک	جابجایی نقطه پائین	جابجایی نقطه بالایی
۱۰۵۰-۱۰۵۰	۶/۸	۱۳/۳	۱۱/۸	۱۰/۸	۸/۶	۱۴/۳
۲۰۲۴-۱۰۵۰	۵	۱۲/۵	۶/۵	۸/۹	۱۳/۸	۱۰/۶

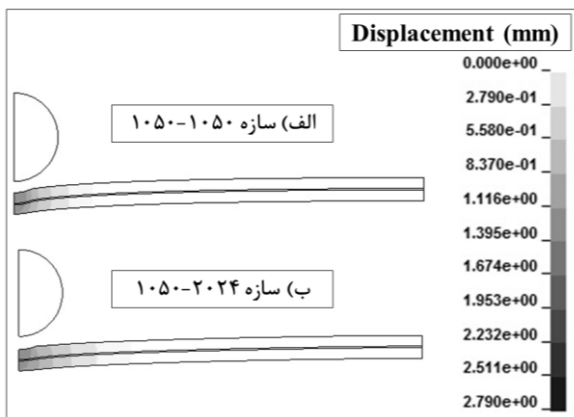


شکل (۴) سازه فلزی دو لایه قرار گرفته در دستگاه تست ضربه.

محاسبه نیروی تماسی در آزمایش ضربه به روش‌های مختلفی از جمله استفاده از نیروسنج یا شتاب‌سنج، می‌تواند انجام پذیرد. در آزمایش‌های حاضر محاسبه نیروی تماسی با استفاده از شتاب‌سنج صورت پذیرفته است. بدین صورت که شتاب‌سنج به پشت ضربه‌زننده وصل شده و شتاب ضربه‌زننده در حین تماس ثبت شده است. با ضرب کردن میزان شتاب در جرم ضربه‌زننده می‌توان مقدار نیروی تماسی را بدست آورد. مقادیر آزمایشگاهی نیروی تماسی ماکزیمم و مدت زمان تماس برای سازه ۱۰۵۰-۱۰۵۰ برابر ۴/۴ کیلونیوتن و ۶ میلی ثانیه بوده است و مقادیر عددی برای این خروجی‌ها برابر ۴/۷ کیلونیوتن و ۵/۲ میلی ثانیه بوده که به ترتیب برای نیرو و زمان میزان خطای ۶/۸ و ۱۳/۳ درصد در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌شود. مقادیر



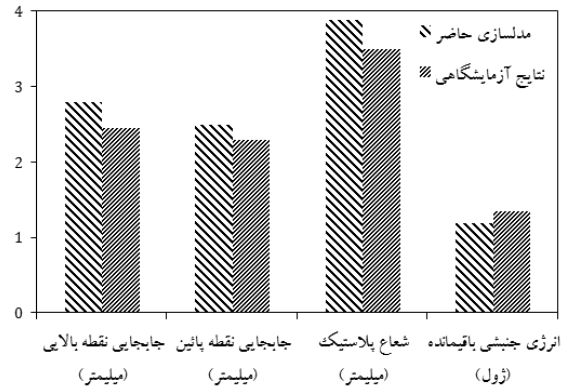
شکل (۷) تغییر شکل صفحات جلو و پشت سازه‌های دولایه الف) صفحه جلو سازه ۱۰۵۰-۱۰۵۰ ب) صفحه پشت سازه ۱۰۵۰-۱۰۵۰ ج) صفحه جلو سازه ۱۰۵۰-۲۰۲۴ د) صفحه پشت سازه ۱۰۵۰-۲۰۲۴.



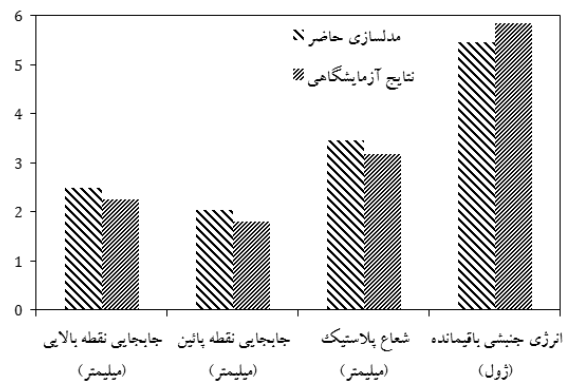
شکل (۸) نتایج مدل‌سازی عددی برای جابجایی عمودی نقاط مختلف سازه‌ها.

۵- سازه‌های فلزی چندلایه هم‌جنس تحت بارگذاری ضربه‌ای

سازه‌های هدف از چهار جنس فلز متفاوت ساخته شده‌اند که برای هر جنس یک عدد از ۱ تا ۴ اختصاص داده شده است. عدد متناظر با آلومینیوم 6061-T6 برابر ۱، عدد متناظر با فولاد برابر ۲، عدد متناظر با سرب برابر ۳ و عدد متناظر با آلومینیوم 6061 برابر ۴ فرض شده است. کد گذاری سازه‌های هدف نیز با یک مثال توضیح داده می‌شود. در نامگذاری سازه‌ی هدف، نام فلزی که در مقابل ضربه‌زننده قرار می‌گیرد، نخست ذکر می‌شود. کد ۱۲ متعلق به سازه‌ای است که در آن جنس آلومینیوم 6061-T6 در برابر ضربه‌زننده بوده و جنس فولاد بعنوان لایه‌ی فلزی دوم قرار دارد. نکته مهم

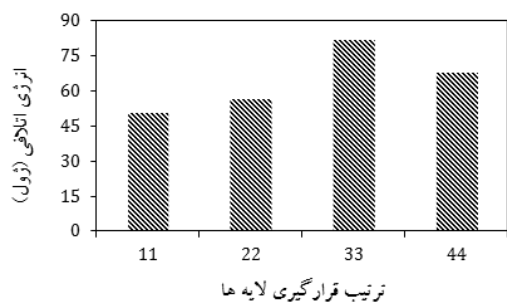


شکل (۵) مقایسه نتایج مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی برای سازه ۱۰۵۰-۱۰۵۰.



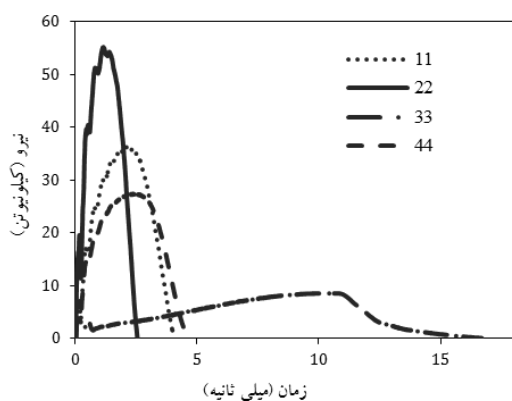
شکل (۶) مقایسه نتایج مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی برای سازه ۱۰۵۰-۲۰۲۴.

آسیب‌های ایجاد شده در صفحات جلو و پشت سازه‌ی متورق در شکل (۷) نشان داده شده است. جابجایی نقاط بالایی و پایینی سازه هدف نیز در مدل‌سازی متقارن محوری در شکل (۸) نشان داده شده است. با مقایسه‌ی شکل‌های (۷) و (۸) کاملاً مشخص است که بیشترین جابجایی در نقطه مرکزی سازه اتفاق افتاده است. همچنین با مقایسه شکل‌های (۷) و (۸) میزان خطای نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی برای خروجی‌های جابجایی نقطه بالایی و پایینی برای سازه ۱۰۵۰-۱۰۵۰ به ترتیب برابر ۱۴/۳ و ۸/۶ درصد و همچنین برای سازه ۱۰۵۰-۲۰۲۴ به ترتیب برابر ۱۰/۶ و ۱۳/۸ درصد می‌باشند.



شکل (۱۰) میزان انرژی اتلافی برای سازه‌های هم‌جنس.

شکل (۱۱) رفتار نیروی تماسی بر حسب زمان را برای سازه‌های هم‌جنس نشان می‌دهد. جنس فولاد تنش تسلیم بالاتری دارد بنابراین هنگامی که گوی به سازه‌ی فولادی برخورد می‌کند تنش‌ها در محل تماس با شیب بیشتری افزایش پیدا کرده و نتیجه نیروی تماسی بیشتری بوده است. عامل دوم مربوط به مدول الاستیسیته‌ی بالای فولاد است که سبب شده جابجایی کمتری داشته باشد. در نتیجه سطح تماس بین ضربه‌زننده و جسم هدف کوچکتر بوده و تنش‌ها در ناحیه‌ی کوچکتری توزیع شده و میزان نیروی منته‌جه بیشتر شده است. بنابراین دو پارامتر مادی تنش تسلیم و مدول الاستیسیته نقش قابل توجهی در اندازه‌ی نیروی تماسی ایفا می‌کنند.



شکل (۱۱) نیروی تماسی بر حسب زمان برای سازه‌های هم‌جنس.

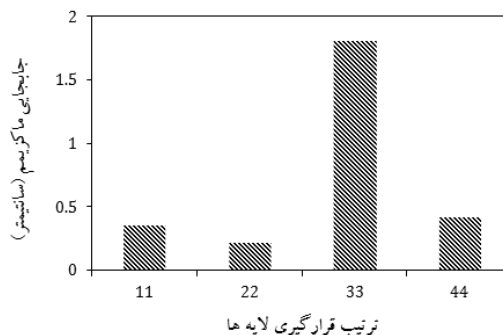
۶- سازه‌های فلزی چندلایه غیرهم‌جنس تحت بارگذاری ضربه‌ای

در شکل‌های (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) به ترتیب میزان جابجایی ماکزیمم، میزان انرژی اتلافی و رفتار نیرو بر حسب زمان

دیگر در مورد خروجی‌هاست. در این مطالعه به ۵ خروجی مهم اشاره شده است. خروجی اول نیروی تماسی که بین گوی و صفحه هدف ایجاد می‌شود در نظر گرفته شده است. خروجی‌های دیگر مسأله عبارتند از مدت زمان تماس که از لحظه‌ی تماس بین گوی با صفحه‌ی هدف آغاز شده و تا لحظه‌ی جدایی دو جسم ادامه دارد. میزان جابجایی که ناشی از حرکت نقطه‌ی زیرین سازه در راستای ضربه است. میزان فرورفتگی در سطح جسم هدف که ناشی از برخورد گوی به صفحه‌ی بالایی جسم هدف است. میزان انرژی اتلافی که حاصل اختلاف انرژی جنبشی ضربه‌زننده قبل و بعد از برخورد می‌باشد. ابتدا سازه‌های ۱۱، ۲۲، ۳۳ و ۴۴ که هر دو لایه‌ی ابتدایی و انتهایی از فلزات هم‌جنس تشکیل شده‌اند بررسی شده است.

شکل (۹) میزان جابجایی ماکزیمم نقطه‌ی زیرین سازه‌ی هدف را برای سازه‌هایی که جنس لایه‌های فلزی مشابهی دارند نشان می‌دهد. سازه‌ی ۳۳ بیشترین میزان جابجایی را در اثر برخورد گوی تجربه می‌کند. زیرا مدول الاستیسیته‌ی پائین‌تری نسبت به سایر جنس‌های فلزی دارد.

شکل (۱۰) میزان انرژی اتلافی را برای سازه‌های هم‌جنس نشان می‌دهد. سرب بدلیل اینکه تنش تسلیم پائین‌تری نسبت به سایر فلزات داراست لذا نواحی زیادی وارد ناحیه پلاستیک خواهند شد. بنابراین میزان انرژی اتلافی برای سرب بیشترین مقدار را بخود اختصاص داده است.



شکل (۹) میزان جابجایی ماکزیمم نقطه زیرین سازه برای سازه‌های هم‌جنس.

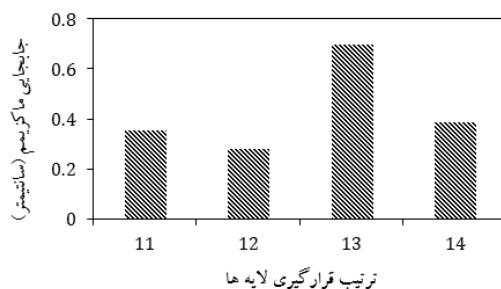
جنسی که مدول الاستیسیته‌ی بالایی داشته باشد در اثر اعمال بار، کمتر جابجا می‌شود.

شکل (۱۳) در مقایسه با شکل (۱۰) یکنواختی بیشتری دارد. زیرا در تمامی سازه‌های نشان داده شده در شکل (۱۳) جنسی که در برابر ضربه‌زننده قرار می‌گیرد یکسان است و لذا تشابه بیشتری در ایجاد نواحی پلاستیک محل اتصال خواهند داشت. نهایتاً در شکل (۱۳) مشخص است که اعمال ماده‌ی سرب به سازه سبب شده که نسبت حجمی ماده با تنش تسلیم کمتر در جسم زیاد شود و این امر موجب افزایش انرژی اتلافی سازه شده است.

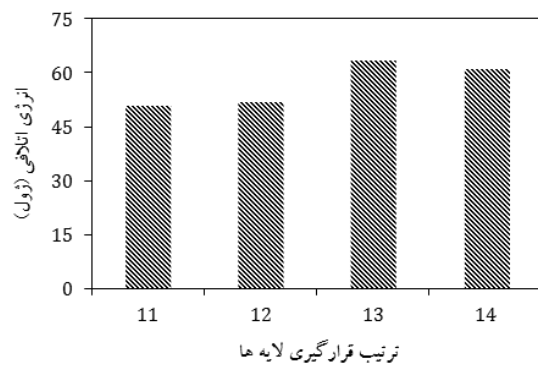
اندازه نیروی تماسی و همچنین مدت زمان تماس در شکل (۱۴) در مقایسه با شکل (۱۱) اختلاف کمتری دارد. علت کم شدن اختلاف بین نتایج و افزایش یکنواختی در خروجی‌ها مربوط به تشابه در جنس لایه‌ی نخست سازه‌ی دولایه می‌باشد. ولی ترتیب سازه‌ها از بیشترین نیروی تماسی به کمترین میزان همچنان حفظ شده است. هرچه نسبت حجمی جنس فلزات بکار رفته در سازه‌های فلزی چند لایه از نظر خصوصیات مادی همچون تنش تسلیم و مدول الاستیسیته بهم نزدیک بوده، نهایتاً رفتار سازه‌ها در مقابل بارگذاری ضربه‌ای بهم نزدیکتر بوده است.

در شکل‌های (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) به ترتیب میزان جابجایی ماکزیمم، میزان انرژی اتلافی و رفتار نیرو بر حسب زمان برای سازه‌های ۱۱، ۲۱، ۳۱ و ۴۱ نشان داده شده است. با این نمودارها می‌توان تأثیر جنس لایه‌ی نخست را بهتر بررسی نمود زیرا در تمام این سازه‌ها، جنس لایه‌ی دوم از آلومینیوم 6061-T6 می‌باشد و جنس لایه‌ی نخست که در برابر ضربه‌زننده قرار می‌گیرد در حالت‌های مختلف عوض می‌شود. بنابراین تأثیر تغییر پارامترهای مادی در لایه‌ی نخست بر روی خروجی‌ها مشخص می‌شود.

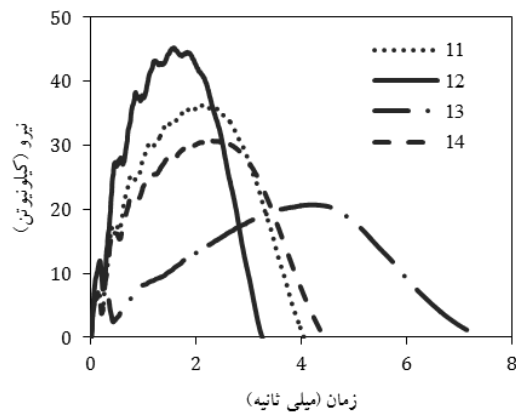
برای سازه‌های ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. با این نمودارها می‌توان تأثیر جنس لایه‌ی دوم را بهتر مقایسه نمود.



شکل (۱۲) میزان جابجایی ماکزیمم نقطه‌ی زیرین سازه برای سازه‌های مختلف.



شکل (۱۳) میزان انرژی اتلافی برای سازه‌های مختلف.



شکل (۱۴) نیروی تماسی بر حسب زمان برای سازه‌های مختلف.

مطابق شکل (۱۲) کمترین جابجایی ماکزیمم متعلق به سازه ۱۲ می‌باشد. دلیل این امر می‌تواند بخاطر مدول الاستیسیته‌ی بالای فولاد باشد که در اثر اعمال خمش ناشی از ضربه‌ی عرضی، جابجایی کمتری داشته است. بطور کلی

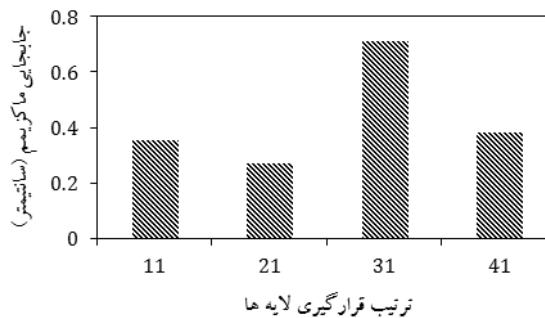
قسمت عمده‌ی انرژی اتلافی بخاطر نواحی پلاستیک ایجاد شده در جسم هدف می‌باشد. بنابراین بطور کلی می‌توان بیان کرد که در جنسی که تنش تسلیم کمتری دارد نهایتاً انرژی اتلافی بیشتری ایجاد شده است. همین امر در شکل (۱۶) بطور کامل قابل استناد است. در سازه ۳۱ بدلیل قرار گرفتن جنس سرب در مقابل ضربه زننده، میزان انرژی اتلافی افزایش یافته، که این امر بخاطر پائین بودن تنش تسلیم جنس سرب می‌باشد.

با مقایسه‌ی دو شکل (۱۴) و (۱۷) مشخص می‌شود که با تغییر ترتیب لایه‌های فلزی، تفاوت خیلی کمی از نظر خروجی‌های نیروی تماسی و مدت زمان تماس حاصل شده است. زیرا نسبت حجمی مواد بکار رفته در سازه فلزی چند لایه در مقایسه این دو نمودار ثابت مانده است. تفاوت ناچیزی هم که در نتایج این دو نمودار مشاهده می‌شود، بخاطر تغییرات محلی مکان تماس ضربه می‌باشد که در تغییر ترتیب لایه‌ها می‌تواند بعنوان عاملی اثرگذار ایفای نقش کند ولی رفتار کلی سازه را نتوانسته تحت تأثیر قرار دهد.

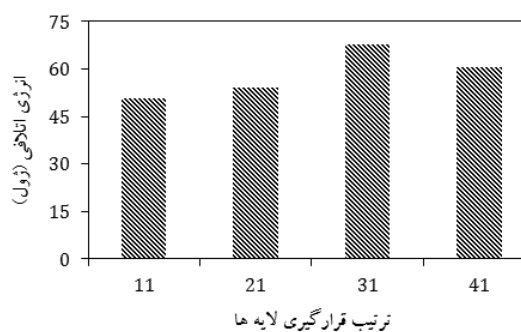
۷- لایه‌چینی‌های ممکن از ترکیب چهار جنس فلز

در این قسمت تمام حالت‌های ممکن از ترکیب چهار جنس فلز ۱، ۲، ۳ و ۴ از نظر خروجی‌های مختلف بررسی شده و نتایج در جدول (۴) بیان شده است.

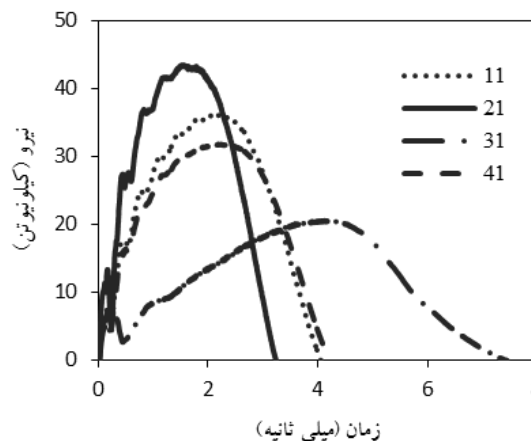
در جدول (۴) میانگینی از پنج خروجی مختلف برای سازه‌های متفاوت ارائه شده است. توضیح بیشتر در مورد جدول (۴) اینکه ستون اول، جنس لایه‌ی نخست را نشان می‌دهد که در برابر ضربه‌زننده قرار گرفته است. برای هر جنس از لایه‌ی نخست که در برابر ضربه‌زننده قرار می‌گیرد، چهار حالت مختلف امکان مدلسازی وجود دارد زیرا چهار جنس فلزی مختلف موجود است که می‌تواند بعنوان جنس لایه‌ی دوم انتخاب شود. میانگینی از این چهار حالت برای



شکل (۱۵) میزان جابجایی ماکزیمم نقطه‌ی زیرین سازه برای سازه‌های مختلف.



شکل (۱۶) میزان انرژی اتلافی برای سازه‌های مختلف.



شکل (۱۷) نیروی تماسی بر حسب زمان برای سازه‌های مختلف.

مطابق شکل (۱۵) جابجایی دو سازه ۱۱ و ۴۱ نزدیک هم هستند چرا که پارامترهای مادی هر دو جنس بسیار مشابه هم هستند. اما سازه‌های ۲۱ و ۳۱ تفاوت بسیار زیادی با این دو سازه دارند. سازه ۳۱ بخاطر وجود سرب در ترکیب لایه‌ی نخست دارای جابجایی بیشتری بوده است. سازه ۲۱ نیز بخاطر اینکه فولاد در مقابل ضربه‌زننده واقع شده، دارای جابجایی کمتری نسبت به سازه‌های دیگر بوده است.

حالت بهینه در مسائل مختلف است. دلیل این امر این است که جنس مادی لایه های اول و دوم بر روی خروجی های مختلف نظیر نیروی تماس، زمان تماس، حداکثر جابجایی در اثر برخورد و انرژی جذب شده توسط سازه اثرات مختلف دارد. برای مثال ممکن است در یک مسئله کمینه بودن جابجایی محل برخورد مد نظر باشد و در مسئله دیگری بیشینه بودن میزان انرژی جذب شده اهمیت بیشتری داشته باشد.

از طرف دیگر این مقاله برای شبیه سازی رفتار مکانیکی سازه های چند لایه، یک روش مدل سازی (شامل مدل مادی و هندسی) نیز پیشنهاد می دهد که در نتیجه زمان حل بطور چشمگیری کاهش یافته است بدون اینکه دقت نتایج تغییر قابل توجهی پیدا کند. این موضوع به محققین دیگر اجازه می دهد در زمان کمتری بتوانند تحلیل های مورد نظر خود را انجام دهند.

۸- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر مدل دوبعدی متقارن محوری جهت مدل سازی ضربه سرعت پائین بکار رفته و با نتایج مدل سازی سایر محققین و همچنین با نتایج آزمایشگاهی، اعتبارسنجی شده است. سازه های چند لایه فلزی کاربرد زیادی در صنایع مختلف از جمله صنایع هوایی دارند ولی رفتار ضربه ای آنها بطور کامل مطالعه نشده است. لذا در این مطالعه رفتار ضربه ای سازه های دولایه با چهار جنس متفاوت بررسی شده است. با توجه به آنچه که گفته شد در ضربه ای سرعت پائین روی سازه های فلزی چند لایه پارامترهای مادی مربوط به جنس لایه های فلزی نقش بسزایی روی رفتار مکانیکی این سازه ها خواهند داشت. جنس فلزی که تنش تسلیم و مدول الاستیسیته بیشتری داشته باشد، نهایتاً نیروی تماسی بیشتری ایجاد شده است. تنش تسلیم بیشتر سبب می شود نواحی

خروجی های مختلف محاسبه شده و در جدول (۴) ثبت شده است.

جدول (۴) نتایج برای تمام لایه چینی های ممکن از ترکیب چهار جنس.

جنس لایه در برابر ضربه زننده	میانگین نیروی ماکزیمم (kN)	میانگین زمان تماس (ms)	میانگین انرژی اتلافی (J)	میانگین جابجایی ماکزیمم (cm)	میانگین فرورفتگی (cm)
۱	۳۳/۲۳	۴/۷۸	۵۶/۸۲	۰/۴۳۰۹	۰/۲۵۱۶
۲	۴۰/۱۳	۳/۶۵	۶۰/۸۸	۰/۳۱۹۶	۰/۱۹۹۶
۳	۱۷/۷	۹/۳۹	۷۴/۴۴	۰/۹۵۶۹	۰/۷۳۴۹
۴	۲۸/۸	۵/۰۱	۶۶/۳۲	۰/۴۷۳۹	۰/۳۵۴۶

به عبارت دیگر هر کدام از داده های جدول (۴)، میانگینی از چهار حالت مختلف را نشان می دهند. میانگین نیروی ماکزیمم برای حالتی که جنس لایه ی نخست از فولاد بوده برابر با ۴۰/۱۳۱ کیلو نیوتن می باشد که نسبت به سایر فلزات بیشترین مقدار را بخود اختصاص داده است. میانگین مدت زمان تماس و انرژی اتلافی برای سرب به ترتیب ۹/۳۹۰ میلی ثانیه و ۷۴/۴۴ ژول می باشد که در بین سازه های دیگر بیشترین مقدار را بخود اختصاص داده است. ترتیب میانگین خروجی های جابجایی و فرورفتگی سطحی نیز از بیشترین مقدار به کمترین مقدار برای جنس های سرب، آلومینیوم 6061، آلومینیوم 6061-T6 و فولاد بوده است.

قابل ذکر است، با در نظر گرفتن چهار جنس فلز پر کاربرد صنعتی در سازه های فلزی چند لایه، تاثیر حضور هر کدام از این جنس ماده ها در لایه اول و دوم یک سازه دو لایه مورد بررسی قرار گرفته است. البته هدف این مقاله بطور مستقیم بهینه یابی نبوده است ولی مقاله اطلاعات ارزشمندی در خصوص اثر جنس لایه ها در اختیار مهندسین طراح قرار می دهد تا بتوانند بسته به مسئله خود، حالت بهینه را تعیین نمایند. این امر بخاطر متفاوت بودن

مراجع:

[1] Alic J.A., Stable crack growth in adhesively bonded aluminum alloy laminates, *International Journal of Fracture*, Vol. 11, No. 4, 1975, pp. 701-704.

[2] Johnson W.S., Stratton J.M., Effective remote stresses and stress intensity factors for an adhesive bonded multi-ply laminate, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 9, No. 2, 1977, pp. 411-421.

[3] Marouf B.T., Bagheri R., Mahmudi R., Role of interfacial fracture energy and laminate architecture on impact performance of aluminum laminates, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 39, No. 11, 2008, pp. 1685-1693.

[4] Crouch I., *Adhesively-bonded Aluminium Laminates - Their Future as Energy-absorbing, Structural Materials*, in Conference on New Materials and Processes for Mechanical Design (1988 : Brisbane, Qld.), Barton, ACT, 1988, pp. 21-26.

[5] Yildirim M., Apalak M.K., Transverse Low-Speed Impact Behavior of Adhesively Bonded Similar and Dissimilar Clamped Plates, *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 25, No. 1-3, 2011, pp. 69-91.

[6] Apalak M.K., Yildirim M., Effect of Adhesive Thickness on Transverse Low-Speed Impact Behavior of Adhesively Bonded Similar and Dissimilar Clamped Plates, *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 25, No. 19, 2011, pp. 2587-2613.

[7] Pacchione M., Hombergsmeier E., Hybrid Metal Laminates for Low Weight Fuselage Structures, in: S. Pantelakis, C. Rodopoulos, *Engineering Against Fracture*, 2009, pp. 41-57.

[8] Sinke J., Johansson S.A.H., Fatigue and Damage Tolerance Aspects of Metal Laminates, in: M. J. Bos, Bridging the Gap between Theory and Operational Practice, 2009, pp. 585-599.

[9] Tekyeh-Marouf B., Bagheri R., Fracture behavior of multi-layered composites under impact loading, *Materials Science and Engineering*, Vol. 448, No. 1, 2007, pp. 20-24.

کمتری از جسم هدف وارد ناحیه‌ی پلاستیک شوند و نهایتاً میزان انرژی اتلافی کاهش یافته است. جنس فلزی که مدول الاستیسیته بیشتری دارد در مقابل ضربه‌ی عرضی، کمتر جابجا شده است. در مورد فرورفتگی سطحی نیز می‌توان گفت جسمی که تنش تسلیم کمتری دارد بعد از ضربه، دارای فرورفتگی بیشتری بوده است زیرا نواحی بیشتری وارد ناحیه‌ی پلاستیک می‌شوند که این تغییر شکل‌ها بطور دائمی و بصورت فرورفتگی در سطح جسم هدف باقی می‌مانند. از نتایج مهم دیگری که می‌توان اشاره نمود استفاده از سازه‌های فلزی غیرهم‌جنس می‌باشد. استفاده از جنس‌های مادی متفاوت سبب افزایش یکنواختی خروجی‌های مختلف می‌شود. بنابراین ترکیب جنس‌های فلزی متفاوت موجب رفتار متعادل‌تر سازه‌ی چندلایه شده است.

فهرست علائم

L	طول میله (m)
t	زمان (s)
E	مدول الاستیسیته (GPa)
v	سرعت (m/s)
K_c	سفتی تماس ($N/m^{3/2}$)
F	نیروی تماسی (N)
F_c	قسمت الاستیک نیروی تماسی (N)
F_v	قسمت میرایی ویسکوز (N)
F_p	قسمت پلاستیک نیروی تماسی (N)

علائم یونانی

σ_0	تنش فشاری (N/m^2)
ρ	چگالی (kg/m^3)
α	جابجایی (m)
$\dot{\alpha}$	نرخ جابجایی (m/s)

- [10] Katnam K.B., Crocombe A.D., Khoramishad H., Ashcroft I.A., The Static Failure of Adhesively Bonded Metal Laminate Structures: A Cohesive Zone Approach, *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 25, No. 10, 2011, pp. 1131-1157.
- [11] Katnam K.B., Crocombe A.D., Sugiman S., Khoramishad H., Ashcroft I.A., Static and Fatigue Failures of Adhesively Bonded Laminate Joints in Moist Environments, *International Journal of Damage Mechanics*, 2011.
- [12] Qiao P., Yang M., Bobaru F., Impact Mechanics and High-Energy Absorbing Materials: Review, *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 21, No. 4, 2008, pp. 235-248.
- [13] Khorshidi K., Elasto-Plastic Response of Impacted Moderately Thick Rectangular Plates with Different Boundary Conditions, *Procedia Engineering*, Vol. 10, No. 0, 2011, pp. 1742-1747.
- [14] Lu G., Yu T., *Energy Absorption of Structures and Materials*, Woodhead Publishing Limited, 2003, pp. 58-59.
- [15] Quesada A., Gauchia A., Alvarez Caldas C., San Roman J.L., *Influence of the Parameters of the Material Model in Finite Element Simulation of Sheet Metal Stamping*, in 7th EUROMECH Solid Mechanics Conference, Lisbon, Portugal, 2009.
- [16] Buchar J., Rolc S., Voldrich J., Lazar M., Starek M., *The Development of the Glass Laminates Resistant to the Small Arms Fire*, 19th International Symposium of Ballistics, Interlaken, Switzerland, 2001.
- [17] Raviraj S., Laxmikant K., Pai R., Rao S.S., Finite Element Modeling of Stress Distribution in the Cutting Path in Machining of Discontinuously Reinforced Aluminum Composites, *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 3, No. 4, 2008, pp. 25-31.
- [18] Rincon L.F.T., *Analysis and Performance of Adhesively Bonded Crush Tube Structures*, University of Waterloo, 2012.
- [19] Goda Y., Sawa T., Study on the Effect of Strain Rate of Adhesive Material on the Stress State in Adhesive Joints, *The Journal of Adhesion*, Vol. 87, 2011, pp. 766-779.

