



## مطالعه عددی تأثیر جنس و تعداد لایه‌های فلزی بر پاسخ مکانیکی سازه‌های فلزی چندلایه تحت بارگذاری ضربه سرعت پائین

محمد باقری توفیقی<sup>۱</sup> و هادی خرمی شاد<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

<sup>۲</sup> دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۱۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۳

### چکیده

در این مقاله، رفتار مکانیکی سازه‌های فلزی چندلایه تحت بارگذاری ضربه سرعت پائین به کمک نرم‌افزار المان محدود ال اس داینا مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر جنس و تعداد لایه‌های فلزی بر خروجی‌های ضربه شامل، نیروی تماسی، مدت زمان تماس، میزان جابجایی نقطه زیرین سازه و میزان انرژی اتلافی مطالعه شده است. ابتدا تعداد لایه‌های فلزی ثابت و برابر دولا به فرض شده و تأثیر استفاده از جنس فلزهای مختلف شامل آلومینیوم 6061-T6، فولاد، سرب و آلومینیوم 6061 در این دو لایه بررسی شده است. سپس جنس مورد استفاده برای ساخت سازه فلزی چندلایه ثابت فرض شده و با تغییر تعداد لایه‌ها از یک تا شش در ضخامت کل ثابت، تأثیر تعداد لایه‌های فلزی مطالعه شده است. تنش تسلیم و مدول الاستیسیته لایه‌های فلزی دو ویژگی مادی تأثیرگذار بر خروجی‌های ضربه هستند. افزایش تعداد لایه‌های فلزی در ضخامت ثابت، موجب کاهش نیروی تماسی و همچنین افزایش میزان جابجایی و مدت زمان تماس شده است. نتایج مدل المان محدود حاضر، در مقایسه با نتایج سایر محققین و نتایج آزمایشگاهی صحه‌گذاری شده است.

**کلمات کلیدی:** سازه‌های فلزی چندلایه؛ بارگذاری ضربه سرعت پائین؛ اتصالات چسبی؛ تحلیل المان محدود.

## Numerical Investigation of the Effects of Material and Number of Metal Layers on Low-Velocity Impact Response of Metal Laminates

M. Bagheri Tofighi<sup>1</sup>, H. Khoramishad<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> MSc., School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Assoc. Prof., School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

### Abstract

In this paper, the mechanical behavior of multi-layer metal laminates was investigated under the low velocity impact loading using Ls-Dyna finite element code. The effects of material and number of the metal layers on the impact outputs including the contact force, the contact duration, the transverse displacement and the dissipated energy were studied. At the first step, the number of metal layers was set to be two layers and the effect of using different metal materials including Aluminum 6061-T6, steel, lead and Aluminum 6061 in the defined layers was investigated. At the second step, the material of the metal layers was fixed and the effect of changing the number of metal layers from one to six in a constant whole thickness was studied. The yield stress and the Young's modulus were the most influencing material parameters on the mechanical behavior of metal laminates. The contact force was decreased while the contact duration and the transverse displacement increased by increasing the number of metal layers in a whole constant thickness. The results of the current finite element modeling were validated against the literature and the experimental investigations.

**Keywords:** Multi-Layer Metal Laminates; Low-Velocity Impact Loading; Adhesively Bonded Joints; Finite Element Analysis.

## ۱- مقدمه

سازه‌های چندلایه که از ترکیب مواد مختلف ساخته شده‌اند، مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته‌اند. سازه‌های چندلایه به‌خاطر مکانیزم‌های اتلاف انرژی گوناگون نسبت به سازه‌های تک‌لایه مقاومت بیشتری در برابر بارگذاری‌های مختلف از جمله ضربه از خود نشان می‌دهند [۱].

رضاصفت و همکاران [۲] بار انفجاری روی سازه‌های تک‌لایه و چندلایه فلزی را به کمک مدل المان محدود بررسی کردند. مستوفی و همکاران [۳]، تغییرشکل‌های عرضی سازه‌های مستطیلی دولایه از ترکیب آلومینیوم و فولاد را تحت انفجار بررسی کردند. مستوفی و بابایی [۴] ورق‌های مستطیل آلومینیومی با روکش پلیمری پلی‌اوره را تحت بارگذاری دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها به‌صورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. ساراسینی و همکاران [۵]، سازه‌های چندلایه متشکل از دو جنس آلومینیوم و کامپوزیت را تحت بارگذاری ضربه مطالعه کردند. کولومبو و همکاران [۶]، سازه‌های سه‌لایه ترکیبی از پلیمر و فلز را تحت ضربه مطالعه نمودند. سان و همکاران [۷] نیز رفتار ضربه‌ای سازه‌های ساندویچی با هسته فومی را بررسی کردند.

سازه‌های فلزی چندلایه به‌عنوان نمونه‌ای از سازه‌های چندلایه در مطالعه حاضر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. معروف و همکاران [۸]، قابلیت جذب انرژی سازه‌های آلومینیومی چندلایه متصل شده با چسب را تحت بارگذاری ضربه شاری بررسی کردند. معروف و همکاران [۹]، در مطالعه دیگری تأثیر تعداد لایه‌های فلزی و انعطاف‌پذیری چسب را بر رفتار دینامیکی سازه فلزی چندلایه تحت بارگذاری ضربه شاری تحقیق کردند. کتنام و همکاران [۱۰]، آسیب در سازه‌های فلزی چندلایه را تحت بارگذاری استاتیکی و خستگی تحت تأثیر رطوبت بررسی کردند. کتنام و همکاران [۱۱]، در مطالعه‌ای دیگر به کمک مدل ناحیه چسبناک توانستند آسیب ناشی از بار استاتیکی در سازه‌های فلزی چند لایه را بررسی نمایند.

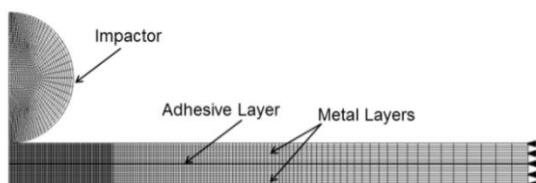
در تعدادی از مطالعات به بررسی رفتار سازه‌های فلزی چندلایه تحت بارگذاری ضربه پرداخته شده است. پاچيون و هامبرگمیر [۱۲] اشاره کردند که سازه‌های فلزی چندلایه به نسبت سازه‌های فلزی تک‌لایه، رفتار مکانیکی بهتری در برابر بارگذاری ضربه از خود نشان می‌دهند. یلدرم و آپالاک [۱۳]

رفتار سازه‌های فلزی دو لایه را تحت بارگذاری ضربه سرعت پایین توسط مدل المان محدود سه‌بعدی بررسی کردند. آپالاک و یلدرم [۱۴]، تأثیر ضخامت چسب و انرژی ضربه-زنده را بر رفتار سازه‌های فلزی دولایه به‌کمک مدل المان محدود مطالعه کردند. افزایش ضخامت لایه چسب موجب کاهش کرنش‌های پلاستیک در چسبندها و در لایه چسب شده است. یلدرم و آپالاک [۱۵]، در تحقیقی جداگانه به بررسی آزمایشگاهی رفتار سازه‌های فلزی دولایه تحت بارگذاری ضربه سرعت پائین پرداختند. وانگ و همکاران [۱۶]، مکانیزم‌های جذب انرژی در سازه‌های دولایه آلومینیوم-آلومینیوم را تحت بارگذاری ضربه سرعت پائین مورد بررسی قرار دادند. خرمی‌شاد و باقری توفیقی [۱۷]، سازه‌های فلزی یک‌لایه تا شش‌لایه متصل شده با چسب را تحت ضربه سرعت پائین مورد مطالعه قرار دادند. ایشان برای نخستین بار از مدل متقارن محوری المان محدود برای مطالعه رفتار سازه‌های فلزی چندلایه تحت بارگذاری ضربه سرعت پائین بهره گرفتند. خرمی‌شاد و همکاران [۱۸]، تأثیر چیدمان‌های مختلف لایه‌های فلزی را بر رفتار مکانیکی سازه‌های فلزی چندلایه بررسی کردند. دو سازه فلزی چندلایه با جنس لایه‌های یکسان ولی با چیدمان متفاوت، در مقابل بارگذاری ضربه رفتار متفاوتی نشان دادند. رضاصفت و همکاران [۱۹]، رفتار پلاستیک سازه‌های فلزی دولایه دایره-ای را تحت بارگذاری دینامیکی بررسی نمودند. مدل ایشان برای پیش‌بینی رفتار ویسکوپلاستیک و آسیب پیشنهاد شده است.

بر اساس بررسی‌های انجام گرفته توسط محققان مطالعه حاضر، تا کنون رفتار سازه‌های فلزی دولایه تحت بارگذاری ضربه سرعت پائین با در نظر گرفتن چیدمان‌های متفاوت برای جنس لایه‌های مختلف فلزی به‌طور جامع بررسی نشده است و مطالعات پیشین تنها اثرات عواملی چون جرم و سرعت ضربه‌زنده [۱۳]، ضخامت لایه چسب [۱۴] و حالت‌های مختلف اتصال بین لایه‌های فلزی [۱۶] را بررسی کرده‌اند.

دو هدف مهم در مطالعه‌ی حاضر، ابتدا بررسی اثر جنس و سپس اثر تعداد لایه‌های فلزی بر رفتار ضربه‌ای سازه‌های چندلایه بوده است. بررسی حاضر به‌کمک مدل المان محدود انجام پذیرفته است. برای نیل به دو هدف بالا، ابتدا یک مدل

فلزی شامل، سازه‌های دولایه‌ای بوده که از ترکیب تمامی حالت‌های ممکن از چهار فلز آلومینیوم 6061-T6، فولاد، سرب و آلومینیوم 6061 ساخته شده است. قابل ذکر است، چهار جنس فلز در نظر گرفته شده از نظر تنش تسلیم و مدول الاستیسیته تفاوت قابل توجهی دارند تا تأثیر پارامترهای مذکور در نتایج بارگذاری ضربه مشخص گردد. آلومینیوم 6061-T6 و آلومینیوم 6061 از نظر تنش تسلیم متفاوت هستند، در حالی که مدول الاستیسیته آن‌ها نزدیک به هم است. آلومینیوم 6061-T6 و فولاد از نظر مدول الاستیسیته متفاوت هستند، در حالی که تنش تسلیم آن‌ها نزدیک به هم است. سرب نیز تفاوت قابل ملاحظه‌ای هم از نظر تنش تسلیم و هم از نظر مدول الاستیسیته با دیگر فلزات دارد. در بخش بررسی اثر تعداد لایه‌ها، از چندلایه‌ها با تعداد لایه‌های یک تا شش استفاده شده است که در هر چندلایه جنس فلزها ثابت و از چهار فلز آلومینیوم 6061-T6، فولاد، سرب و آلومینیوم 6061 در نظر گرفته شده است. چسب مورد استفاده برای اتصال صفحات فلزی EC-2214 است که از نوع چسب‌های اپوکسی محسوب می‌شود. مشخصات مادی مربوط به چسب و فلزات مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است. مشخصات مادی شامل، چگالی ( $\rho$ )، مدول الاستیسیته ( $E$ )، نسبت پواسون ( $\nu$ )، تنش تسلیم ( $\sigma_y$ )، مدول مماسی ( $E_t$ ) و ضرایب مدول کوپرسایموند ( $C$  و  $p$ ) در جدول ۱ ارائه شده است. در شکل ۱ نمایی از مدل متقارن محوری دو بعدی نشان داده شده است. بررسی همگرایی مش برای مدل المان محدود انجام پذیرفته است. نیروی تماسی ماکزیمم به‌عنوان خروجی هدف مد نظر قرار گرفته و تعداد ۵۸۸۰ المان به‌عنوان تعداد المان مناسب انتخاب شده است. نمودار همگرایی مش در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱- مدل المان محدود متقارن محوری از سازه فلزی دولایه به همراه ضربه‌زننده

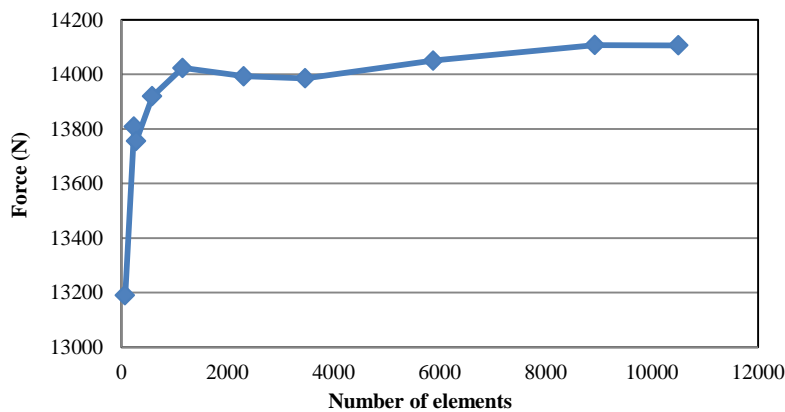
اجزای محدود متقارن محوری به‌صورت دوبعدی توسعه داده شد که جزئیات آن در بخش تعریف مسأله ارائه شده است. برای اطمینان از صحت مدل المان محدود، نتایج مدل المان محدود حاضر هم با نتایج سایر محققان و هم با نتایج آزمایشگاهی انجام شده توسط محققان حاضر، صحت‌گذاری شده است. مطالعات آزمایشگاهی به‌صورت محدود و فقط به-منظور صحت‌گذاری نتایج المان محدود انجام شده است. برای مطالعه اثر جنس لایه‌های فلزی بر خروجی‌های ضربه، چهار جنس متفاوت فلزی شامل آلومینیوم 6061-T6، فولاد، سرب و آلومینیوم 6061 برای سازه‌های دولایه در نظر گرفته شده است. از آن جهت که تعداد لایه‌ها در سازه‌های دولایه محدود است، تمامی حالت‌های ممکن برای لایه‌چینی از جنس‌های مختلف فلزی بررسی شده است. هدف بعدی مطالعه اثر تعداد لایه‌های فلزی بوده است. در مطالعه حاضر، رفتار سازه‌های فلزی ۲ لایه با سازه‌های فلزی ۳ لایه مقایسه شده است. مشخص شد که با افزایش تعداد لایه‌ها تأثیر چیدمان لایه‌ها بیشتر شده است. در ادامه، برای مطالعه سازه‌های فلزی با تعداد لایه‌های بیشتر از ۲، از چهار جنس فلزی مذکور استفاده شده است. در ضخامت کل ثابت برای هر چهار جنس فلز، تعداد لایه‌ها از یک تا شش افزایش یافته است. تأثیر افزایش تعداد لایه‌های فلزی بر خروجی‌های بارگذاری ضربه مطالعه شده است.

## ۲- تعریف مسأله

در مدل المان محدود صفحات هدف به‌صورت دیسکی با قطر ۲۱۰ میلی‌متر و ضخامت  $8/3$  میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در بخش مطالعه اثر جنس سازه، ضخامت چسب بین دو لایه‌ی فلزی برابر  $0/2$  میلی‌متر و در بخش مطالعه اثر تعداد لایه‌های فلزی ضخامت چسب برابر  $0/1$  میلی‌متر فرض شده است. ضخامت کل ثابت و برابر  $8/3$  میلی‌متر برای تمامی حالت‌ها فرض شده است. با معلوم بودن ضخامت کل ثابت و ضخامت چسب، ضخامت لایه‌های فلزی قابل محاسبه است. جابجایی نقاط مرزی دیسک هدف در سه جهت مقید شده است. جسم ضربه‌زننده نیز کره‌ای به شعاع ۱۳ میلی‌متر است. ضربه‌زننده جسمی صلب در نظر گرفته شده که  $19/31$  کیلوگرم جرم دارد و با سرعت ۳ متر بر ثانیه به جسم هدف برخورد می‌کند. جسم هدف برای مطالعه اثر جنس لایه‌های

جدول ۱- مشخصات مادی چسب و فلزات استفاده شده در مدل المان محدود [۱۸]

ماده	P	C (1/s)	$E_t$ (GPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\nu$	E (GPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
آلومینیوم 6061-T6	۴	۱۷۰۰۰۰	۰/۸	۲۷۶	۱/۳۳	۶۸/۹	۲۶۸۵
فولاد	۵	۴۰	۵/۸۸	۲۳۷	۱/۲۹	۲۱۰	۷۸۰۰
سرب	۰/۸	۴۰	۰/۲۳	۱۰	۱/۴۴	۱۶	۱۱۲۰۰
آلومینیوم 6061	۴	۶۵۰۰	۱/۴۸	۱۲۵	۱/۳۳	۷۱	۲۷۰۰
چسب EC 2214	۵/۲۶	۷۹۵۵	۰/۶۷	۵۲	۱/۳۸	۵/۱	۱۵۴۵



شکل ۲- نمودار همگرایی مش برای مدل المان محدود متقارن محوری

داینا برای تعریف تماس بین سطوح استفاده شده است. هم برای تماس بین ضربه‌زننده و جسم هدف و همچنین تماس بین لایه‌های مختلف چسب و فلز از تماس مذکور استفاده شده است. چون مدل متقارن محوری از نوع مدل دوبعدی است، می‌توان از دستور مذکور استفاده کرد.

### ۳- اعتبارسنجی مدل المان محدود

اعتبارسنجی مدل المان محدود در دو بخش؛ یکی بر اساس نتایج تحقیقات گذشته و دیگری بر اساس نتایج آزمایشگاهی تحقیق حاضر انجام گرفته است.

به‌عنوان صحنه‌گذاری نخست، نتایج مدل المان محدود حاضر با نتایج یلدرم و آپالاک [۱۳] صحنه‌گذاری شده است. سازه‌های آلومینیوم-آلومینیوم و فولاد-آلومینیوم به‌ترتیب به-عنوان یک سازه فلزی دولایه هم‌جنس و یک سازه فلزی

هم لایه‌های فلزی و هم لایه چسب، توسط المان‌های Thin Shell 163 مدل‌سازی 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، جلوگیری شود. در مطالعه‌ی حاضر رشد ترک در لایه چسب مد نظر نبوده و همانند لایه‌های فلزی، رفتار الاستیک و پلاستیک چسب مد نظر بوده است؛ بنابراین از نرم‌افزار ال اس داینا، مدل مادی Plastic-Kinematic-Isotropic 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 کوپر سایموند، می‌تواند اثرات نرخ کرنش در بارگذاری ضربه‌ای را لحاظ نماید. از دستور CONTACT\_2D\_AUTOMATIC که از نوع SURFACE\_TO\_SURFACE می‌باشد، در نرم افزار ال اس

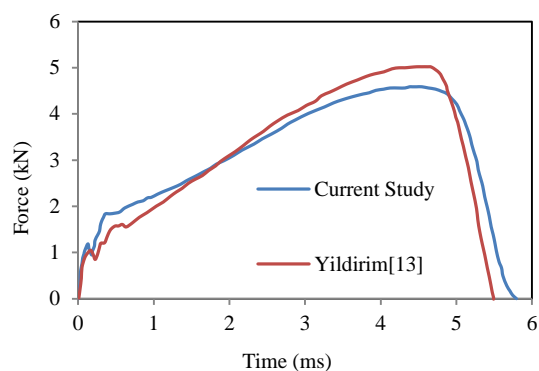
مدل سه‌بعدی با نتایج مدل دوبعدی برای سازه‌های فلزی هم‌جنس و غیرهم‌جنس توسط محققان حاضر مقایسه شده و تفاوت قابل توجهی در خروجی‌های مدل‌سازی مشاهده نشده است.

به‌عنوان صحنه‌گذاری دوم، نتایج مدل المان محدود حاضر با نتایج آزمایشگاهی ضربه سرعت پائین مقایسه شده است. دو سازه به‌عنوان نمونه‌های آزمایشگاهی فرض شده است. سازه اول شامل دو لایه از آلومینیوم 1050-H14 بوده (1050-1050) و در سازه دوم لایه‌ی اول از جنس آلومینیوم 1050-H14 و لایه دوم آن از جنس آلومینیوم 2024-T3 (1050-2024) ساخته شده است.

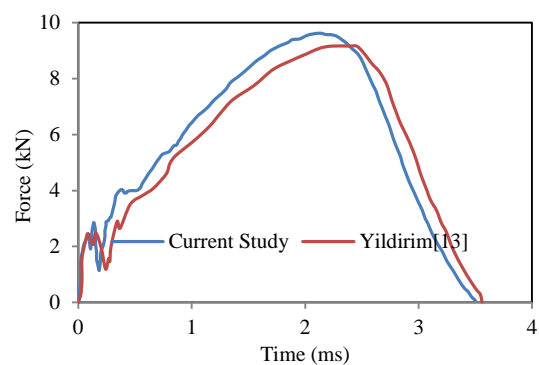
مشخصات هندسی هر دو سازه مشابه بوده به‌طوری که صفحات فلزی دیسک مانند به قطر ۱۹/۵ سانتیمتر و به ضخامت  $2 \pm 0.2$  میلی‌متر توسط چسب Araldite 2012 به ضخامت  $0.1 \pm 0.25$  میلی‌متر به هم متصل شده‌اند. چسب سازه‌ای Araldite 2012 دو جزئی بوده و از نوع چسب‌های اپوکسی محسوب می‌شود. مشخصات مادی چسب و دو نوع آلومینیوم بکار رفته در آزمایش از منبع [۱۷] استخراج 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. پس از ساختن نمونه‌های آزمایشگاهی، از دستگاه ضربه وزنه افتان برای انجام آزمایش ضربه سرعت پائین استفاده شده است. نمایی از نمونه آزمایشگاهی بسته شده در دستگاه در شکل ۴ نشان داده شده است.

فاصله‌ای به اندازه‌ی ۲/۲۵ سانتیمتر در جهت شعاعی در محیط هر دو سازه به‌صورت گیردار نگهداشته شده است؛ یعنی دایره‌ای به اندازه‌ی قطر ۱۵ سانتیمتر به‌صورت 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 ۸/۱ میلی‌متر از ارتفاع ۲۰ سانتیمتر به ترتیب با جرم ۶/۲ و ۱۰/۲ کیلوگرم به سازه‌های 1050-1050 و 1050-2024 برخورد کرده است. به‌دلیل محدودیت دستگاه آزمایش، از جرم ضربه‌زننده برابر ۱۹/۳۱ کیلوگرم مطابق با مدل‌سازی المان محدود استفاده نشده است.

دولایه غیرهم‌جنس تحت بارگذاری ضربه سرعت پائین مدل‌سازی شده و با نتایج یلدرم و آپالاک [۱۳] مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، تطابق خوبی بین نتایج مدل المان محدود حاضر با نتایج یلدرم و آپالاک [۱۳] وجود دارد. میزان خطا در نیروی تماسی و زمان تماس برای سازه آلومینیوم-آلومینیوم به ترتیب ۰.۸٪ و ۵/۵٪ مشاهده گردید. میزان خطا در نیروی تماسی و زمان تماس برای سازه فولاد-آلومینیوم به ترتیب ۵٪ و ۲/۵٪ مشاهده گردید. مدل المان محدود حاضر دوبعدی و به‌صورت متقارن محوری است، اما مدل المان محدود مرجع [۱۳]، به‌صورت سه‌بعدی انجام شده است. از مزایای مدل متقارن محوری می‌توان به زمان حل بسیار کم آن در مقایسه با مدل سه‌بعدی اشاره کرد که قادر می‌سازد، تعداد حالت‌های بیشتری از چیدمان‌های متفاوت لایه‌های فلزی بررسی گردد. قابل ذکر است که نتایج



(الف)



(ب)

شکل ۳- مقایسه نمودارهای نیرو-زمان مطالعه حاضر و منبع [۱۳]، (الف) برای سازه دولایه آلومینیوم-آلومینیوم و (ب) برای سازه دولایه فولاد-آلومینیوم

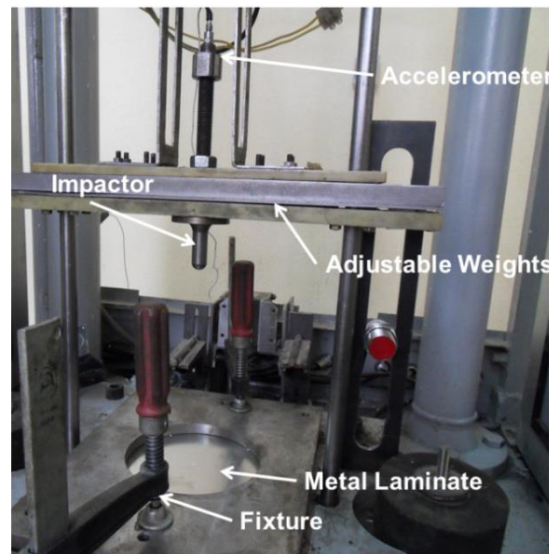
با سرعت نهایی ضربه زننده در نظر گرفته شده است. پدیده پارگی با توجه به میزان کم انرژی ضربه‌زننده (ضربه سرعت پائین) در هیچ کدام از نمونه‌های آزمایش شده ایجاد نشده است. مقدار خروجی‌های آزمایش ضربه‌ی سرعت پائین برای سازه‌های 1050-1050 و 1050-2024 با نتایج عددی مقایسه شده و در جدول ۲ نشان داده شده است. شکل نمونه‌های آزمایشگاهی پس از ضربه در مقایسه با نتایج المان محدود در شکل ۵ نشان داده شده است.

#### ۴- تأثیر جنس لایه‌های فلزی بر رفتار مکانیکی سازه‌های فلزی چندلایه

برای مطالعه اثر جنس لایه‌های فلزی، سازه فلزی دولایه انتخاب شده و جنس لایه‌های متفاوت آن مطالعه شده است. 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. در نامگذاری سازه‌ی هدف، نام فلزی که در مقابل ضربه‌زننده قرار می‌گیرد، نخست ذکر می‌شود. به‌عنوان مثال، کد ۱۲ متعلق به سازه‌ی است که جنس آلومینیوم 6061-T6 در برابر ضربه‌زننده بوده و جنس فولاد به‌عنوان لایه فلزی دوم قرار دارد. در این مطالعه به چهار خروجی مهم شامل نیروی تماسی، مدت زمان تماس، جابجایی عرضی و انرژی اتلافی اشاره شده است. میزان انرژی اتلافی حاصل اختلاف انرژی جنبشی ضربه‌زننده قبل و بعد از برخورد است.

#### ۴-۱- سازه‌های فلزی دولایه هم‌جنس تحت بارگذاری ضربه‌ای

در این قسمت سازه‌های ۱۱، ۲۲، ۳۳ و ۴۴ بررسی شده‌اند. شکل ۶-الف میزان جابجایی ماکزیمم نقطه‌ی زیرین سازه‌ی هدف را برای سازه‌هایی که جنس لایه‌های فلزی مشابهی دارند نشان می‌دهد. مطابق با شکل ۶-الف، سازه ۳۳ بیشترین میزان جابجایی ( $1/1\text{mm}$ ) را در اثر برخورد گوی تجربه می‌کند؛ زیرا مدول الاستیسیته پائین‌تری نسبت به سایر جنس‌های فلزی دارد. سازه‌ای که جابجایی عرضی بیشتری داشته نهایتاً مدت زمان تماس بیشتری نیز داشته است؛



(الف)



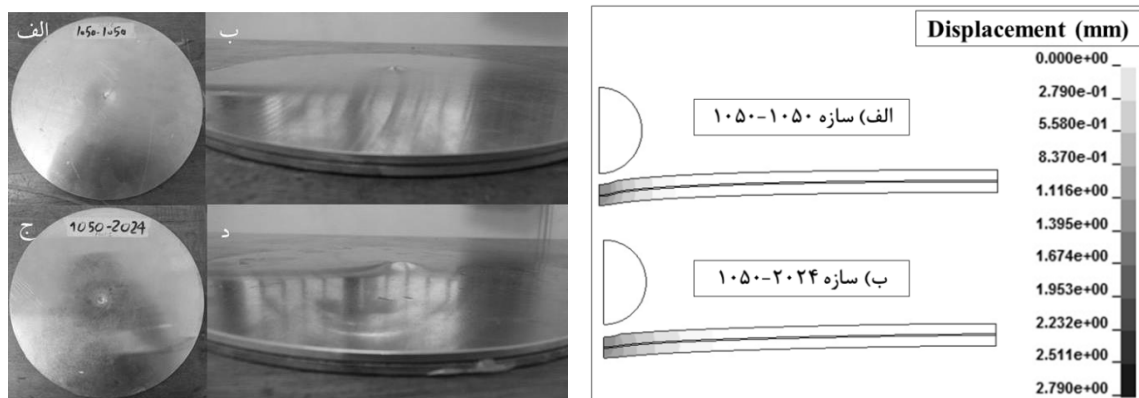
(ب)

شکل ۴- نمای از آزمایش ضربه سرعت پائین، الف) دستگاه ضربه توسط وزنه افتان و ب) استفاده از تراز برای اطمینان از افقی بودن سطح جسم هدف

خروجی‌های آزمایش ضربه سرعت پائین 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. خروجی دستگاه ضربه وزنه افتان، نمودار شتاب بر حسب زمان می‌باشد. حاصل ضرب شتاب در جرم پرتابه برابر با نیروی تماسی مورد نظر قرار گرفته است. مدت زمان تماس میزان کل زمان تماس پرتابه با جسم هدف بوده است که توسط دستگاه وزنه افتان اندازه‌گیری شده است. میزان سرعت باقیمانده پس از برخورد به کمک نمودار شتاب-زمان محاسبه شده است. مساحت زیر نمودار شتاب-زمان محاسبه شده و مقدار به‌دست آمده، همان اختلاف سرعت ورودی ضربه زننده

جدول ۲- مقایسه نتایج مدل المان محدود حاضر با نتایج آزمایشگاهی

خروجی ضربه	سازه 1050-1050		سازه 1050-2024	
	آزمایشگاهی	عددی (خطای درصدی)	آزمایشگاهی	عددی (خطای درصدی)
نیروی تماسی (kN)	۴/۴	۴/۷ (٪۶/۸)	۷/۷۱	۸/۱ (٪۵/۱)
زمان تماس (ms)	۶	۵/۲ (٪۱۳/۳)	۶/۴	۵/۶ (٪۱۲/۵)
جابجایی نقطه بالا (mm)	۲/۴۵	۲/۸ (٪۱۴/۳)	۲/۲۶	۲/۵ (٪۱۰/۶)
جابجایی نقطه پایین (mm)	۲/۳	۲/۵ (٪۸/۶)	۱/۸	۲/۰۵ (٪۱۳/۸)
شعاع پلاستیک (mm)	۳/۵	۳/۸۸ (٪۱۰/۸)	۳/۱۷۵	۳/۴۶ (٪۸/۹)
انرژی جنبشی باقیمانده ضربه‌زننده (J)	۱/۳۵	۱/۱۹ (٪۱۱/۸)	۵/۸۴	۵/۴۶ (٪۶/۵)



شکل ۵- مقایسه نتایج مدل المان محدود و نتایج آزمایشگاهی برای جابجایی سازه‌ها بعد از بارگذاری

افزایش پیدا می‌کنند و نتیجه نیروی تماسی بیشتری (۵۵/۱۷ kN) خواهد بود. 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 می‌شوند و میزان نیروی منته‌ج خواهد بود. بنابراین دو پارامتر مادی تنش تسلیم و مدول الاستیسیته نقش قابل توجهی در اندازه‌ی نیروی تماسی ایفا می‌کنند.

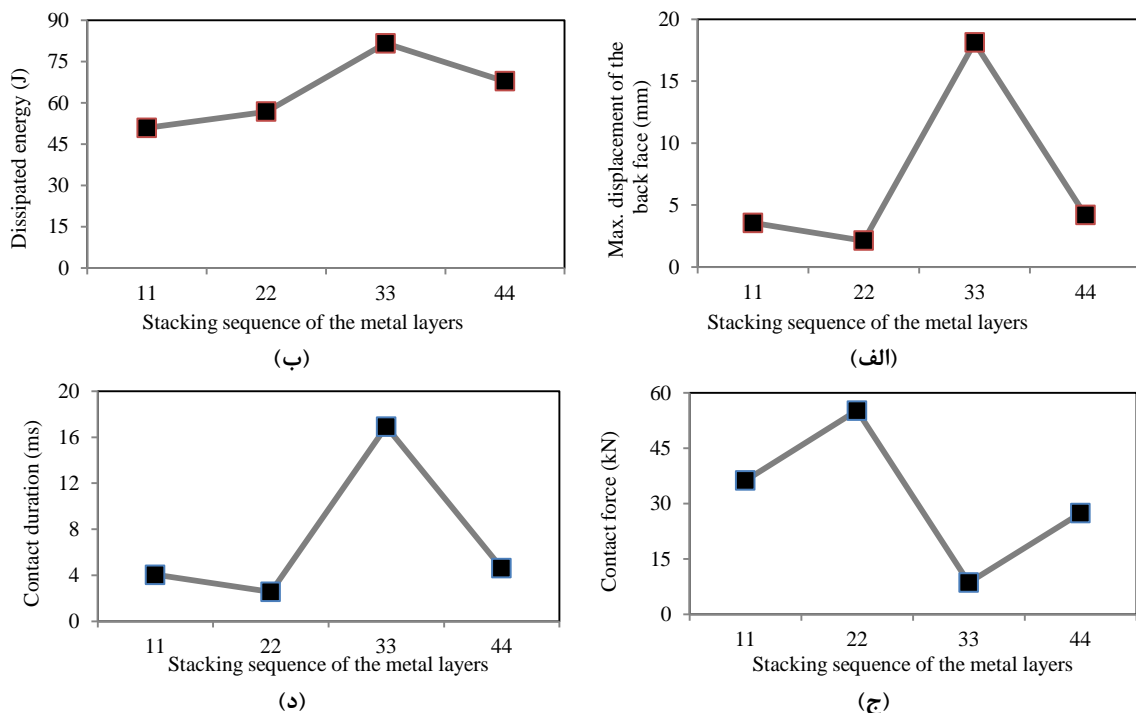
#### ۲-۴- سازه‌های فلزی دولایه غیرهم‌جنس تحت بارگذاری ضربه‌ای

در شکل ۷ میزان جابجایی ماکزیمم، میزان انرژی اتلافی و رفتار نیرو بر حسب زمان برای سازه‌های ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴

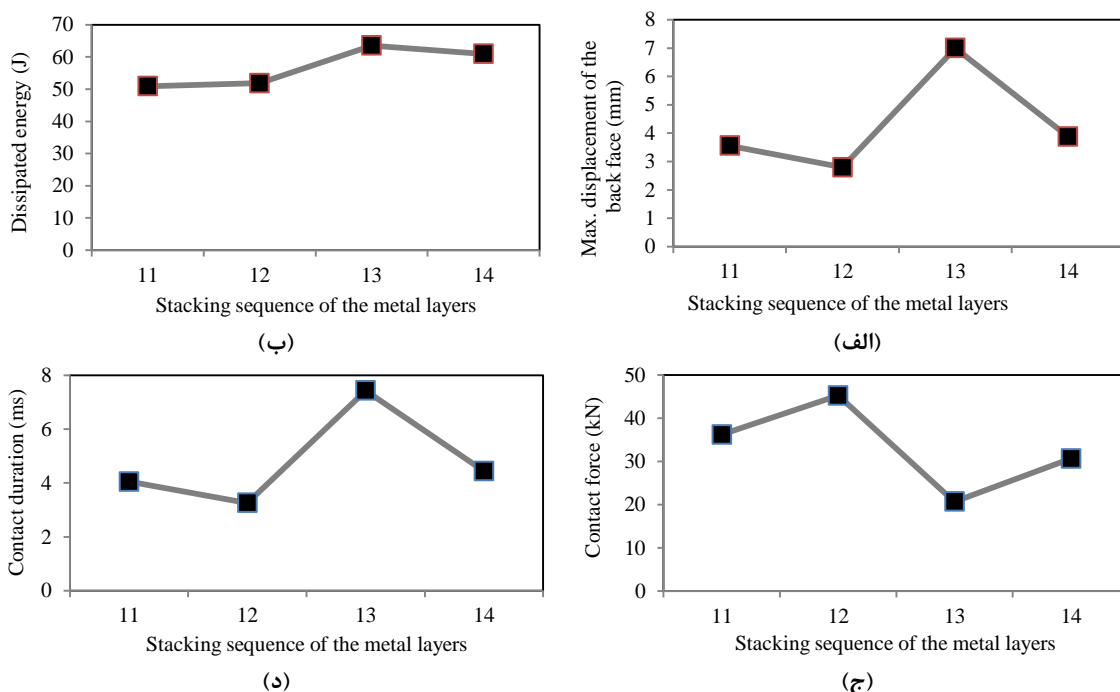
بنابراین بیشترین مدت زمان تماس (۱۶/۹۳ ms) نیز مطابق با شکل ۶-د متعلق به ۳۳ است.

شکل ۶-ب میزان انرژی اتلافی را برای سازه‌های هم-جنس نشان می‌دهد. سرب بدلیل اینکه تنش تسلیم پائین-تری نسبت به سایر فلزات داراست، لذا نواحی زیادی وارد ناحیه پلاستیک شده است. بنابراین میزان انرژی اتلافی برای سرب (۸۱/۶۵ J) بیشترین مقدار را بخود اختصاص داده است. میزان انرژی اتلافی برای آلومینیوم 6061-T6 کمترین مقدار (۵۰/۹۲ J) را برای خود اختصاص داده است.

شکل ۶-ج 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



شکل ۶- خروجی‌های ضربه برای سازه‌های ۱۱، ۲۲، ۳۳ و ۴۴ (الف) حداکثر جابجایی صفحه پشتی، (ب) انرژی اتلافی، (ج) نیروی تماسی و (د) مدت زمان تماس



شکل ۷- خروجی‌های ضربه برای سازه‌های ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴ (الف) حداکثر جابجایی صفحه پشتی، (ب) انرژی اتلافی، (ج) نیروی تماسی و (د) مدت زمان تماس



شکل ۷-ب برای سازه فلزی غیرهم‌جنس بیشترین انرژی اتلافی (J ۶۳/۵۳) برای سازه ۱۳ اتفاق افتاده که لایه دوم از سرب است؛ یعنی بکارگیری سرب با تنش تسلیم کمتر سبب افزایش انرژی اتلافی هم برای سازه دولایه هم‌جنس و هم برای سازه دولایه غیرهم‌جنس شده است.

مطابق با شکل ۶، برای سازه‌های هم‌جنس اختلاف بین بیشترین مقدار و کمترین مقدار جابجایی عرضی، انرژی اتلافی، نیروی تماسی و مدت زمان تماس به ترتیب برابر ۱۶ میلی‌متر، ۳۰/۷۳ ژول، ۴۶/۵۷ کیلونیوتن و ۱۴/۳۸ میلی‌ثانیه است. مطابق با شکل ۷، برای سازه‌های غیرهم‌جنس اختلاف بین بیشترین مقدار و کمترین مقدار جابجایی عرضی، انرژی اتلافی، نیروی تماسی و مدت زمان تماس به ترتیب برابر ۴/۲ میلی‌متر، ۱۲/۶۱ ژول، ۲۴/۵۲ کیلونیوتن و ۴/۱۷ میلی‌ثانیه است. میزان اختلاف نتایج برای سازه‌های غیرهم‌جنس کمتر از سازه‌های هم‌جنس است؛ زیرا در سازه‌های غیرهم‌جنس، یکی از لایه‌ها ثابت بوده و تنها جنس یکی از لایه‌های فلزی تغییر کرده است.

در شکل ۸ میزان جابجایی ماکزیمم، میزان انرژی اتلافی و رفتار نیرو بر حسب زمان برای سازه‌های ۱۱، ۲۱، ۳۱ و ۴۱ نشان داده شده است. جنس لایه نخست تغییر کرده ولی جنس لایه دوم ثابت فرض شده است تا تأثیر تغییر جنس لایه اول مشخص گردد.

از مقایسه شکل ۸ با شکل ۷ مشخص است که ترتیب قرارگیری دو جنس متفاوت فلزی در برابر ضربه‌زننده تأثیری در خروجی‌های بارگذاری ضربه سرعت پائین نخواهد داشت. به‌عنوان مثال نیروی تماسی برای سازه ۱۲ برابر ۴۵/۲۵ کیلونیوتن و برای سازه ۲۱ برابر ۴۳/۵ کیلونیوتن است که تفاوت چندانی باهم ندارند و اختلاف این دو عدد تنها ۳/۸۷ درصد است. این اختلاف کم در نتایج برای سایر خروجی‌ها نیز برقرار است. در واقع سه چیدمان ۱۱، ۱۲ و ۲۲ تفاوت زیادی در نتایج بارگذاری ضربه دارند، ولی چیدمان ۱۲ با ۲۱ تفاوت چشمگیری ندارند.

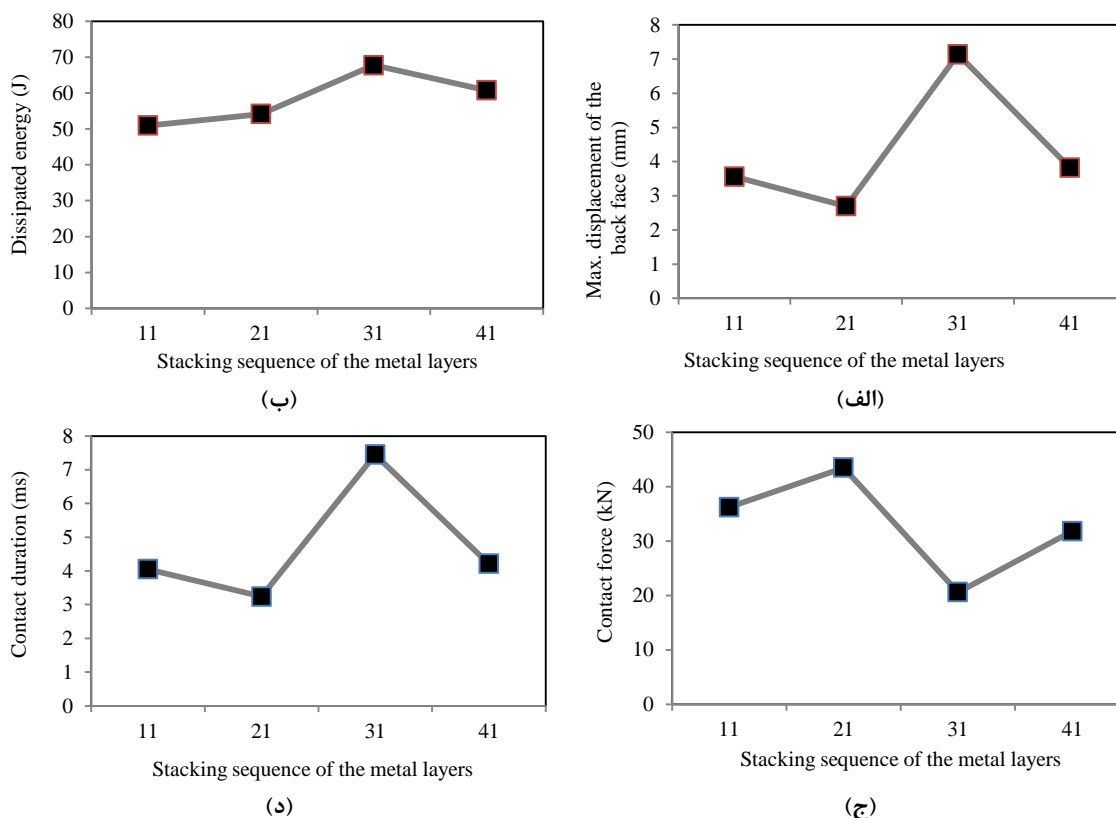
##### ۵- تأثیر تعداد لایه‌های فلزی بر رفتار مکانیکی سازه‌های فلزی چندلایه

برای تعداد لایه‌های بیشتر از ۲ نمی‌توان تمام چیدمان‌های مختلف را بررسی نمود؛ زیرا که تعداد حالت‌های ممکن از

نشان داده شده است. در این سازه‌ها، جنس لایه دوم تغییر داده شده است تا تأثیر تغییر جنس لایه دوم مشخص گردد. به‌کارگرفتن جنس فلزی با مدول الاستیسیته کمتر به‌عنوان لایه دوم سبب شده تا میزان جابجایی و مدت زمان تماس افزایش یابد. از این جهت است که سازه ۱۳ مطابق با شکل ۷ بیشترین مقدار جابجایی (۶/۹ mm) و مدت زمان تماس (۷/۴۳ ms) را در بین سایر سازه‌ها بخود اختصاص داده است.

مطابق با شکل ۷-ب سازه‌های ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴ به ترتیب مقادیر انرژی اتلافی ۵۰/۹۲، ۵۱/۸۶، ۶۳/۵۳ و ۶۰/۹۵ ژول را بخود اختصاص داده‌اند. کمترین انرژی اتلافی (J ۵۰/۹۲) مربوط به سازه ۱۱ است؛ زیرا جنس آلومینیوم 6061-T6 در مقایسه سایر جنس فلزات تنش تسلیم بیشتری دارد و نواحی کمتری وارد ناحیه پلاستیک شده و میزان انرژی اتلافی کاهش یافته است.

سازه‌های ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴ به ترتیب مقادیر نیروی تماسی ۳۶/۲۳، ۴۵/۲۵، ۲۰/۷۳ و ۳۰/۶۹ کیلونیوتن را به‌خود اختصاص داده‌اند. بکارگیری جنس فلز با تنش تسلیم و مدول الاستیسیته بیشتر سبب افزایش نیروی تماسی شده است. به‌عنوان مثال نیروی تماسی سازه ۱۱ از ۱۴ بیشتر است؛ زیرا جنس فلزی در لایه دوم سازه ۱۱ بکار رفته که تنش تسلیم آن از جنس فلز لایه دوم ۱۴ بیشتر است؛ هرچند که مدول الاستیسیته جنس لایه دوم در هر دو سازه ۱۱ و ۱۴ تقریباً باهم برابر هستند. از مقایسه شکل ۶ و ۷ مشخص می‌شود که نتایج به‌دست آمده برای سازه‌های فلزی غیرهم‌جنس دقیقاً مشابه با نتایجی است که برای سازه‌های فلزی هم‌جنس بدست آمده است. مطابق با شکل ۶-الف برای سازه‌های فلزی هم‌جنس کمترین جابجایی عرضی (۲/۱ mm) برای سازه ۲۲ اتفاق افتاده که جنس هر دولایه از فولاد است و به‌طور مشابه مطابق با شکل ۷-الف برای سازه فلزی غیرهم‌جنس نیز کمترین جابجایی عرضی (۲/۸ mm) برای ۱۲ اتفاق افتاده که لایه دوم از فولاد است؛ یعنی بکارگیری جنس فولاد با مدول الاستیسیته زیاد سبب کاهش جابجایی عرضی هم برای سازه دولایه هم‌جنس و هم برای سازه دولایه غیرهم‌جنس شده است. مطابق با شکل ۶-ب برای سازه‌های فلزی هم‌جنس بیشترین انرژی اتلافی (J ۸۱/۶۵) برای سازه ۳۳ اتفاق افتاده که جنس هر دولایه از سرب است و به‌طور مشابه مطابق با



شکل ۸- خروجی‌های ضربه برای سازه‌های ۱۱، ۲۱، ۳۱ و ۴۱ (الف) حداکثر جابجایی صفحه پشتی، (ب) انرژی اتلافی، (ج) نیروی تماسی و (د) مدت زمان تماس

کلی برای سازه‌های فلزی دولایه می‌توان از اثرات تغییر چیدمان لایه‌های فلزی صرف‌نظر کرد، ولی با افزایش تعداد لایه‌های فلزی نمی‌توان این تقریب مهندسی را در نظر گرفت. برای هر چهار جنس فلزی مورد مطالعه در این تحقیق سازه‌هایی با تعداد لایه‌های ۱ تا ۶ به روش المان محدود مدل‌سازی شده و نتایج آن‌ها با هم مقایسه شده است. در شکل ۹ تأثیر تعداد لایه‌های فلزی بر خروجی‌های ضربه نشان داده شده است. مطابق با شکل ۹-الف با افزایش تعداد لایه‌ها، میزان نیروی تماسی برای آلومینیوم 6061-T6، فولاد و آلومینیوم 6061 کاهش یافته است، ولی برای سرب با افزایش مواجه شده است؛ زیرا تنش تسلیم سرب مطابق با جدول ۱ کمتر از جنس چسب به‌کار رفته در سازه است. با افزایش تعداد لایه‌ها، میزان چسب با تنش تسلیم بیشتر در سازه افزایش داشته و نهایتاً موجب افزایش نیروی تماسی برای سازه سربی شده است. در شکل ۹-ب رفتار جنس‌های

ترکیب چهار جنس مختلف فلزی، عددی نسبتاً بزرگ بوده و مقایسه این حالت‌ها امری زمان‌بر خواهد بود. در عین حال با انتخاب هدفمند روش‌هایی می‌توان اثرات برخی عوامل مؤثر بر رفتار مکانیکی سازه‌های فلزی با تعداد لایه‌های بیش از ۲ را نیز بررسی کرد. در این بخش با مقایسه تأثیر چیدمان برای سازه‌های دولایه و سه‌لایه نشان داده شده است که اهمیت تأثیر چیدمان از سازه‌های سه‌لایه به بعد قابل توجه است؛ همچنین در مرحله بعدی تأثیر افزایش تعداد لایه‌های فلزی در ضخامت کل ثابت مطالعه شده است.

در جدول ۳ اختلاف خروجی‌های ضربه برای سازه‌های فلزی دولایه و سه‌لایه با چیدمان متفاوت نشان داده شده است. با تغییر چیدمان لایه‌های فلزی، میزان تغییر در خروجی‌های ضربه برای سازه سه‌لایه بیشتر از سازه‌های دولایه بوده است. این امر نشان می‌دهد که اثر تغییر چیدمان با افزایش تعداد لایه‌های فلزی نسبت مستقیم دارد. به‌طور

جدول ۳- میزان اختلاف و اختلاف درصدی خروجی‌های ضربه برای سازه‌های فلزی چندلایه با چیدمان‌های مختلف

اختلاف در زمان تماس (ms)	اختلاف در نیرو (kN)	اختلاف در انرژی اتلافی (J)	اختلاف در جابجایی عرضی (mm)	سازه‌های مقایسه شده
-۰/۰۲ (-۰/۰۶۱)	-۱/۷۵ (-۳/۸۷)	۲/۲۸ (۰/۴۳۹)	-۰/۱۰ (-۳/۶۴)	12 → 21
۰/۰۲ (۰/۰۲۷)	-۰/۱۴ (-۰/۰۶۷)	۴/۲۳ (۰/۶۶۶)	۰/۱۴ (۰/۲)	13 → 31
-۰/۲۳ (-۵/۱۸)	۱/۱۳ (۳/۶۸)	-۰/۱۹ (-۰/۳۱)	-۰/۰۵۷ (-۱/۴۷)	14 → 41
۰/۲۴ (۲/۸۵)	-۰/۲۶ (-۱/۳۹)	۱/۷۵ (۲/۶۲)	۰/۷۶ (۰/۹۰۲)	133 → 313
-۰/۰۵ (-۰/۰۶)	-۰/۷۷ (-۴/۱۴)	۶/۵۸ (۰/۹۸۴)	۰/۵ (۰/۵۹۴)	133 → 331
-۰/۲۹ (-۳/۳۵)	-۰/۵۱ (-۲/۷۸)	۴/۸۳ (۰/۱۱)	-۰/۲۶ (-۲/۸۳)	313 → 331

آلومینیوم 6061-T6، فولاد، سرب و آلومینیوم 6061 به ترتیب برابر ۴/۰۸-، ۱۰/۰۶-، ۹/۸۳ و ۳/۲۷- درصد بوده که برای فولاد بیشترین است.

#### ۶- نتیجه گیری

سازه‌های فلزی چندلایه تحت بارگذاری ضربه سرعت پائین به کمک مدل المان محدود متقارن محوری مطالعه شده است. از نتایج مهم به موارد زیر می‌توان اشاره کرد.

- در مقایسه سازه‌های فلزی دولایه هم‌جنس مشخص شد که استفاده از جنس فلز با مدول الاستیسیته کمتر سبب جابجایی عرضی بیشتری در سازه شده و سازه‌ای که دارای جابجایی عرضی بیشتری بوده در مقایسه با سایر سازه‌ها مدت زمان تماس بیشتری داشته است.

- در مقایسه سازه‌های فلزی دولایه هم‌جنس مشخص شد که استفاده از جنس فلز با تنش تسلیم کمتر، سبب اتلاف انرژی بیشتری در سازه شده است.

- مدول الاستیسیته و تنش تسلیم به‌طور هم‌زمان بر نیروی تماسی سازه‌های دولایه هم‌جنس تأثیرگذار بوده‌اند. بکارگیری جنس فلز با تنش تسلیم و مدول الاستیسیته بیشتر، موجب افزایش نیروی تماسی برای سازه‌های هم‌جنس شده است.

- اگر در سازه‌های هم‌جنس، تغییر جنس از x به y موجب کاهش یا افزایش خروجی z شده باشد؛ در سازه‌های غیرهم‌جنس نیز تغییر جنس از x به y

آلومینیوم 6061-T6، فولاد و آلومینیوم 6061 بدون در نظر گرفتن سرب نشان داده شده است تا نحوه کاهش نیروی تماسی برای این سه جنس بهتر نمایش داده شود. مطابق با نتایج شکل ۹-ج با افزایش تعداد لایه‌های فلزی در ضخامت کل ثابت، میزان جابجایی برای آلومینیوم 6061-T6، فولاد و آلومینیوم 6061 افزایش یافته است، ولی برای سرب با کاهش مواجه شده است. در شکل ۹-د رفتار جنس‌های آلومینیوم 6061-T6، فولاد و آلومینیوم 6061 بدون در نظر گرفتن سرب نشان داده شده است تا نحوه‌ی افزایش جابجایی برای این سه جنس بهتر نمایش داده شود. به‌همین ترتیب میزان زمان تماس برای آلومینیوم 6061-T6، فولاد و آلومینیوم 6061 افزایش یافته است، ولی برای سرب با کاهش مواجه شده است. میزان انرژی اتلافی برای تمامی جنس‌های فلزی با افزایش تعداد لایه‌ها تفاوت چشم‌گیری نداشته است.

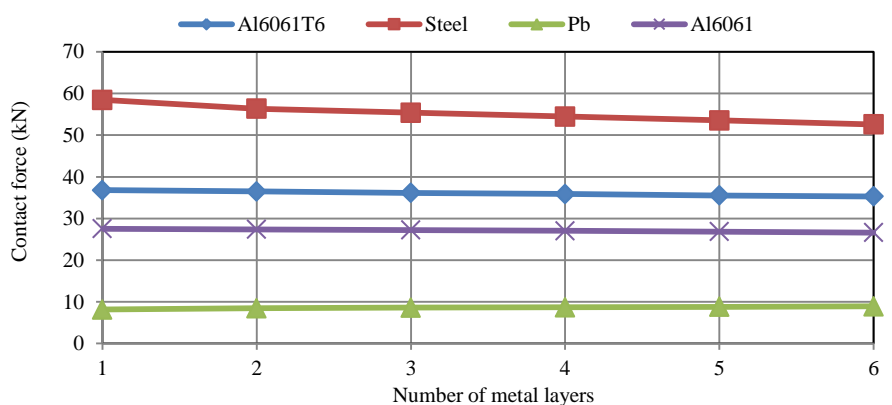
همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است برای تمامی تعداد لایه‌ها میزان نیروی تماسی برای فولاد از همه جنس‌های دیگر بیشتر بوده و میزان جابجایی برای فولاد برای تمامی تعداد لایه‌ها کمترین مقدار را به خود اختصاص داده است. این امر با نتایج شکل ۶ نیز مطابقت دارد.

مسئله مهم دیگری که از شکل ۹ می‌توان نتیجه گرفت مربوط به میزان تغییرات خروجی خاصی مثل نیروی تماسی با افزایش تعداد لایه‌ها برای جنس خاص مثل فولاد می‌باشد. تأثیر تغییر تعداد لایه‌ها بر روی خروجی‌ها برای جنس فولاد بیشتر از سایر جنس‌ها بوده است. به‌عنوان مثال با تغییر تعداد لایه‌ها از یک تا شش میزان تغییر نیروی تماسی برای

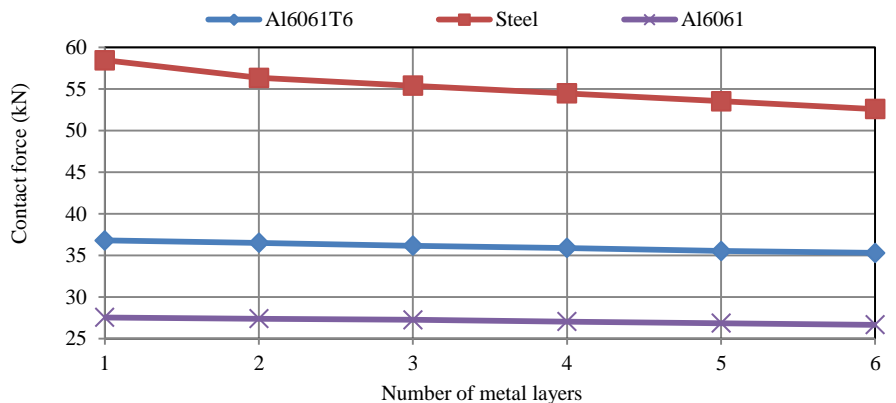
جنس، تنها جنس یک لایه فلزی تعویض شده است.

- مدول الاستیسیته و تنش تسلیم به‌عنوان دو پارامتر مهم مادی هستند که تمام رفتارهای سازه‌های

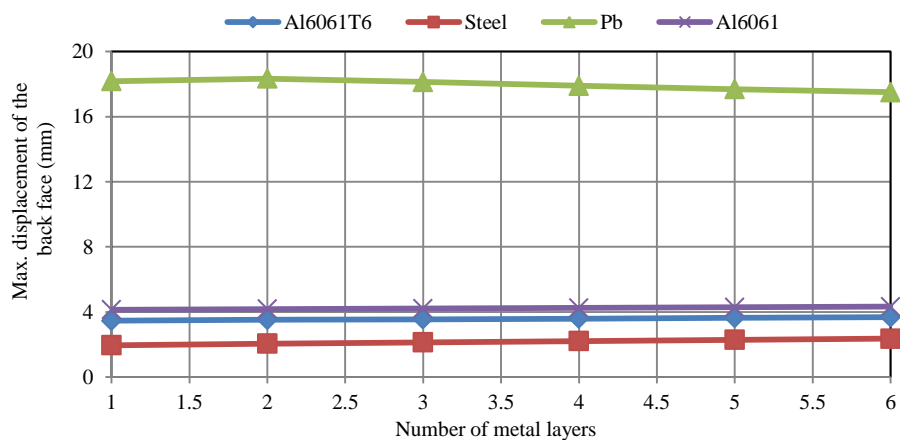
موجب کاهش یا افزایش خروجی  $Z$  شده است؛ اما میزان تغییرات در سازه‌های هم‌جنس بیشتر بوده است؛ زیرا که در آن‌ها جنس دولایه فلزی به‌طور هم‌زمان تعویض شده، ولی در سازه‌های غیرهم-



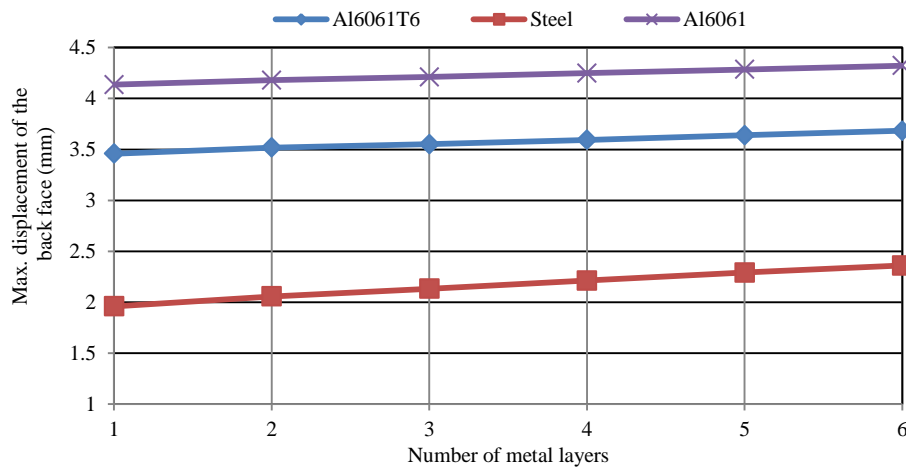
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۹- تأثیر تعداد لایه‌های فلزی بر خروجی‌های ضربه سرعت پائین برای جنس فلزهای مختلف، الف) نیروی تماسی، ب) نیروی تماسی بدون در نظر گرفتن سرب، ج) حداکثر جابجایی صفحه پشتی و د) حداکثر جابجایی صفحه پشتی بدون در نظر گرفتن سرب

عمل کرده، ولی از نظر چند خروجی ضربه، رفتار مکانیکی مناسبی نسبت به سایر سازه‌ها نداشته باشد. به‌عنوان مثال افزایش تعداد لایه‌ها در ضخامت کل ثابت موجب کاهش نیروی تماسی شده که امری مناسب به نظر می‌رسد؛ زیرا کاهش نیروی تماسی موجب کاهش ناحیه آسیب در محل برخورد خواهد شد؛ ولی از طرفی افزایش تعداد لایه‌ها موجب افزایش جابجایی عرضی جسم هدف شده است که می‌تواند به‌عنوان عاملی منفی در طراحی تلقی شود. در مطالعه حاضر سعی شده است که تأثیر تغییر هر کدام از پارامترها بر خروجی‌ها مطرح شود تا مهندس طراح با تغییر پارامترها بتواند به هدف طراحی مورد نظر برسد.

## ۷- مراجع

- [1] Bagheri Tofighi M, Biglari H (2021) FEM analyses of low velocity impact response of sandwich composites with nanoreinforced polypropylene core and aluminum face sheets. *Phys Mesomech* 24(1): 107-116.
- [2] Rezasefat M, Mostofi TM, Ozbakkaloglu T (2019) Repeated localized impulsive loading on monolithic and multi-layered metallic plates. *Thin Walled Struct* 144: 106332.

فلزی دولایه هم‌جنس و غیرهم‌جنس توسط تغییرات این دو پارامتر مادی قابل توجیه است. به‌کارگیری لایه‌های فلزی با تنش تسلیم بیشتر، سبب افزایش نیروی تماسی و در مقابل باعث کاهش انرژی اتلافی شده است. بکارگیری لایه‌های فلزی با مدول الاستیسیته بیشتر، سبب افزایش نیروی تماسی و کاهش جابجایی نقطه زیرین سازه شده است.

- افزایش تعداد لایه‌های فلزی در ضخامت کل ثابت موجب کاهش نیروی تماسی، افزایش میزان جابجایی و مدت زمان تماس شده و تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر میزان انرژی اتلافی نداشته است.

- اثر تغییر چیدمان برای سازه‌های دولایه قابل اغماض است، ولی برای سازه‌های سه‌لایه تأثیر قابل توجهی بر رفتار مکانیکی سازه خواهد داشت؛ بنابراین با افزایش تعداد لایه‌ها تأثیر چیدمان لایه‌های فلزی بیشتر است.

- افزایش یا کاهش یک خروجی می‌تواند به‌عنوان هدف طراحی مطرح شود. انتخاب بهترین لایه‌چینی ارتباط مستقیمی با هدف طراحی دارد؛ بنابراین یک لایه‌چینی خاص می‌تواند از یک منظر بهتر

- bonded metal laminate structures: A Cohesive Zone Approach. *J Adhes Sci Technol* 25(10): 1131-1157.
- [12] Pacchione M, Hombergsmeier E (2009) Hybrid metal laminates for low weight fuselage structures. *Engineering Against Fracture*. Dordrecht, Springer: 41-57.
- [13] Yildirim M, Kemal Apalak M (2011) Transverse low-speed impact behavior of adhesively bonded similar and dissimilar clamped plates. *J Adhes Sci Technol* 25(1): 69-91.
- [14] Kemal Apalak M, Yildirim M (2011) Effect of adhesive thickness on transverse low-speed impact behavior of adhesively bonded similar and dissimilar clamped plates. *J Adhes Sci Technol* 25(19): 2587-2613.
- [15] Yildirim M, Kemal Apalak M (2014) Experimental investigation on transverse low-speed impact behavior of adhesively bonded similar and dissimilar clamped plates. *J Adhes Sci Technol* 28(13): 1219-1242.
- [16] Wang P, Zhang X, Zhang H, Li X, He P, Lu G, Yu TX, Yang J (2015) Energy absorption mechanisms of modified double-aluminum layers under low-velocity impact. *Int J Appl Mech* 7(6): 1-18.
- [17] Khoramishad H, Bagheri Tofighi M (2015) Effects of mechanical and geometrical properties of adhesive and metal layers on low-velocity impact behavior of metal laminate structures. *J Adhes Sci Technol* 29(7): 592-608.
- [18] Khoramishad H, Bagheri Tofighi M, Khodaei M (2018) Effect of stacking sequence on low-velocity impact behavior of metal laminates. *Phys Mesomech* 21(2): 140-149.
- [19] Rezasafat M, Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Ziya-Shamami M, Alitavoli M (2019) Dynamic plastic response of double-layered circular metallic plates due to localized impulsive loading. *P I Mech Eng L-J Mat* 233(7): 1449-1471.
- [3] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M, Lu G, Ruan D (2019) Large transverse deformation of double-layered rectangular plates subjected to gas mixture detonation load. *Int J Impact Eng* 125: 93-106.
- [4] Mostofi T M, Babaei H (2019) Plastic deformation of polymeric-coated aluminum plates subjected to gas mixture detonation loading: Part I: Experimental studies. *JFSM* 9(1): 71-83.
- [5] Sarasini F, Tirillo J, Ferrante L, Sergi C, Sbardella F, Russo P, Simeoli G, Mellier D, Calzolari A (2019) Effect of temperature and fiber type on impact behavior of thermoplastic fiber metal laminates. *Compos Struct* 223: 110961.
- [6] Colombo C, Carrado A, Palkowski H, Vergani L (2015) Impact behaviour of 3-layered metal-polymer-metal sandwich panels. *Compos Struct* 133: 140-147.
- [7] Sun G, Wang E, Wang H, Xiao Z, Li Q (2018) Low-velocity impact behaviour of sandwich panels with homogeneous and stepwise graded foam cores. *Mater Des* 160: 1117-1136.
- [8] Marouf B T, Bagheri R, Mahmudi R (2008) Role of interfacial fracture energy and laminate architecture on impact performance of aluminum laminates. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 39(11): 1685-1693.
- [9] Marouf BT, Bagheri R, Mahmudi R (2004) Effects of number of layers and adhesive ductility on impact behavior of laminates. *Mater Lett* 58(22): 2721-2724.
- [10] Katnam KB, Crocombe AD, Sugiman H, Khoramishad H (2011) Static and fatigue failures of adhesively bonded laminate joints in moist environments. *Int J Damage Mech* 20(8): 1217-1242.
- [11] Katnam KB, Crocombe AD, Khoramishad H, Ashcroft A (2011) The static failure of adhesively