



حساسیت رفتار مکانیکی سازه‌های چندلایه فلزی به مکان تغییرات خواص مادی در بارگذاری ضربه‌ای

هادی خرم‌شاد^{۱*}، میثم خدائی^۲، محمد باقری توفیقی^۳

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

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

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

* khoramishad@iust.ac.ir، ۱۶۸۴۶۱۳۱۴، تهران

اطلاعات مقاله:

دریافت: خرداد ۹۳

پذیرش: شهریور ۹۳

کلیدواژگان:

سازه‌ی فلزی چندلایه،

روش المان محدود،

انرژی کرنشی،

ضربه سرعت پایین

چکیده

استفاده از مواد فلزی با جنس‌های متفاوت در سازه‌های فلزی چندلایه، امکان طراحی سازه‌هایی با رفتار مکانیکی مناسب را فراهم می‌آورد. بنابراین بررسی اثر تغییرات پارامترهای مادی لایه‌های فلزی به منظور بهینه‌سازی رفتار ضربه‌ای این سازه‌ها، ضروری به نظر می‌رسد. در این مقاله با استفاده از یک مدل المان محدود، رفتار الاستوپلاستیک سازه‌های فلزی چندلایه تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت پائین، بصورت خروجی‌هایی شامل نیروی تماسی، جابجایی عرضی، انرژی کرنشی الاستیک و پلاستیک و همچنین انرژی جنبشی ضربه‌زننده ارزیابی شده است. آلومینیوم ۶۰۶۱ به عنوان ماده پایه‌ی لایه‌های فلزی انتخاب شده و مواد فرضی دیگری که تنها در میزان تنش تسلیم یا مدول الاستیسیته با ماده‌ی پایه متفاوتند، جهت اعمال تغییرات خواص مادی در نظر گرفته شده‌اند. چیدمان‌های مختلفی از فلز پایه و مواد فرضی انتخاب شده‌اند تا علاوه بر مشاهده اثر تغییر خواص مادی بر رفتار مکانیکی، موقعیت مکانی این تغییرات در لایه‌های مختلف نیز مقایسه گردد. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که اثر خمش در لایه‌ی ابتدایی و انتهایی موجب حساسیت بیشتر رفتار سازه به تغییرات خواص این لایه‌ها نسبت به لایه‌ی میانی می‌شود. از سوی دیگر، اثر تغییر شکل‌های موضعی در لایه‌ی ابتدایی، باعث شدت بیشتر تغییرات رفتار سازه در آن نسبت به لایه‌ی انتهایی می‌گردد. نتایج مدل‌سازی حاضر با نتایج آزمایشگاهی و عددی مقایسه شده و انطباق خوبی بین آنها مشاهده شد.

Sensitivity of the impact behavior of multi-layered metal laminates to the position of material parameters variations

Hadi Khoramishad^{1*}, Meysam Khodaei¹, Mohammad Bagheri Tofighi¹

1- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

* P.O.B. 1684613114 Tehran, Iran, khoramishad@iust.ac.ir

Keywords

Multi-layered metal laminate,
Finite element analysis,
Strain energy, Low velocity
impact loading

Abstract

The possibility of using different materials for different layers of adhesively bonded metal laminate (ABML) structures is an important advantage over the monolithic structures which facilitate smart design of the metal laminate structures. Therefore, studying the effects of the material parameters of the metal layers on mechanical behavior of ABML under various loading conditions seems to be necessary. In this paper, a finite element model was developed to study the elastic-plastic behavior of ABML under low-velocity impact loadings. This model was very well validated against the experimental and other numerical results. The effects of the material parameters including the Young's modulus and the yield stress of different layers on the impact responses of the ABML structure were investigated numerically. The contact force, the transverse displacement, the plastic strain energy, the elastic strain energy and the impactor's kinetic energy were considered in this paper as the major impact responses. Al 6061 was selected as the base material. The Young's modulus and the yield stress of the base material were varied to form artificial materials for studying the corresponding effects on the impact responses of the ABML plates. The ABML plates with various stacking sequences of the base and artificial materials were modeled to study both the effect of varying material parameters and the position of the material parameters variations on the impact behaviors of ABML. The results indicated that the impact responses of the ABML plate were much more sensitive to the material characteristics of the top and bottom metal layers than the middle layers due to the bending effects. Moreover, the material parameters of the top metal layer is more influencing on the impact responses of the ABML plates due to the local deformations.

please cite this article using:

Khoramishad, H., Khodaei, M., Bagheri Tofighi, M., "Sensitivity of the impact behavior of multi-layered metal laminates to the position of material parameters variations", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 1, No. 1, pp. 23-34, 2014.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

مزایای روش اتصال چسبی بر دیگر روش‌های رقیب، از جمله توزیع تنش یکنواخت، امکان ایجاد اتصال مستحکم و آیرودینامیک و عدم آسیب به سازه‌ی اصلی، موجب گسترش روزافزون استفاده از این روش در صنایع مختلف شده است. در این میان سازه‌هایی که با اتصال صفحات فلزی با لایه‌هایی از چسب ساخته شده‌اند و در بارگذاری‌های گوناگون رفتاری متفاوت با سازه‌های تک‌لایه از خود نشان می‌دهند [۱-۲]، توجه طراحان و محققین را بخود جلب کرده‌اند. در این سازه‌ها با توجه به امکان انتخاب جنس هر لایه توسط طراح، قابلیت دستیابی به گستره‌ی وسیعی از رفتار مکانیکی وجود دارد. این امر، امکان بهینه‌سازی خواص هر لایه و در نتیجه کل سازه را به دنبال دارد که با افزایش بازدهی مواد در هر یک از لایه‌ها، کاهش نیاز به آلیاژهای گران قیمت و کاهش هزینه‌ها را در پی خواهد داشت. همچنین انعطاف‌پذیری زیاد سازه‌های فلزی چندلایه در انتخاب مواد، دستیابی به سازه‌های سبک‌تر را به دنبال دارد که از نیازهای اساسی صنایع هوایی می‌باشد. این عوامل و دیگر مزایای این سازه‌ها در بارگذاری گوناگون، لزوم توجه به طراحی، بهینه‌سازی و ساخت این سازه‌ها را به دنبال دارد.

کنتام [۳] در مطالعاتی بر روی رفتار واماندگی استاتیکی سازه‌های چسبی، مدل ناحیه‌ی چسبناک را در پیش‌بینی رفتار این سازه‌ها مناسب دانسته و به مزیت‌های این مدل نیز اشاره‌هایی کرده است. این محقق در مطالعاتی دیگر [۴] به بررسی اثرات محیطی و رطوبتی بر روی این سازه‌ها پرداخته و به اثرات منفی این عوامل بر روی مقاومت استاتیکی و خستگی این اتصالات اشاره کرده است. لنکیوتی و پولس [۵] رفتار خستگی مدل‌های ساده و متورق را مورد بررسی قرار داده‌اند و عمر خستگی سازه‌های متورق را بیشتر از نمونه‌های ساده، گزارش کرده‌اند. شینکه و جانسون [۶] در مطالعاتی بر روی سازه‌های متورق، مقاومت برشی و فشاری سازه‌های چندلایه را بهتر از سازه‌های تک‌لایه دانسته‌اند. همچنین در آزمایش ضربه برج سقوط، سازه‌های متورق بهتر از نمونه‌های ساده مقاومت کرده‌اند. در ادامه و در بحث خستگی عمر سازه‌های متورق را بیشتر از نمونه‌های ساده توصیف کرده‌اند. کراج [۷] با مطالعه روی سازه‌های فلزی چندلایه تحت بارگذاری ضربه‌ای، به بهبود جذب انرژی این سازه‌ها نسبت به سازه‌های تک‌لایه پی برده است. پاشیون و هامبریسمر [۸] به این نتیجه رسیده‌اند که میزان جذب انرژی در آزمایش ضربه، با افزایش تعداد لایه‌ها از تک‌لایه تا سه‌لایه افزایش می‌یابد. معروف و همکارانش [۹] مطالعاتی بر روی تأثیر تعداد لایه‌های فلزی و انعطاف‌پذیری چسب بر رفتار ضربه‌ای سازه‌های چندلایه داشته‌اند. طبق مطالعات این گروه، افزایش تعداد لایه‌ها به بهبود رفتار مکانیکی سازه در بارگذاری ضربه‌ای می‌انجامد؛ همچنین افزایش انعطاف‌پذیری چسب نیز به بهبود رفتار سازه کمک می‌کند. با این حال اثر افزایش تعداد لایه‌ها بیش از اثر انعطاف‌پذیری چسب است. آپالاک و یلدریم [۱۰] تأثیر ضخامت چسب بر رفتار سازه‌های دولایه با چینش‌های مختلفی از آلومینیوم و فولاد تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت پایین را، بررسی کرده‌اند. طبق این مطالعات، افزایش ضخامت چسب تأثیر اندکی

بر انرژی اتلافی و نیروی تماسی این سازه‌ها دارد. با این وجود اثر چیدمان لایه‌ها بر روی نیروی تماسی این سازه‌ها بسیار قابل توجه است.

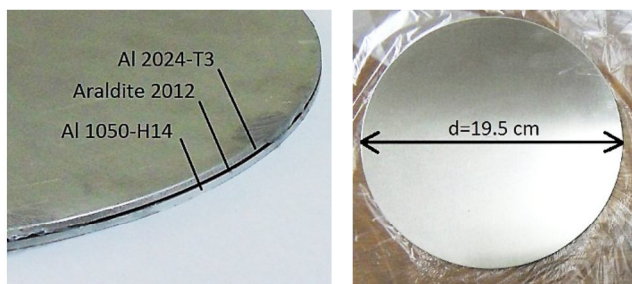
با وجود گستره‌ی وسیع تحقیقات انجام شده روی سازه‌های اتصال چسبی چندلایه، بررسی رفتار مکانیکی این سازه‌ها تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت پایین و اثر خواص مادی لایه‌های فلزی از جمله مدول الاستیسیته و تنش تسلیم بر این رفتار ضروری به نظر می‌رسد. چرا که امکان چینش مواد متفاوت در لایه‌های مختلف این سازه‌ها، دستیابی به گستره‌ی وسیعی از رفتار مکانیکی را فراهم می‌آورد و این بررسی به طراحان این سازه‌ها، دید مناسبی جهت انتخاب جنس لایه‌های فلزی برای دستیابی به رفتار مورد انتظار را می‌دهد. همچنین مقایسه‌ی اثر پارامترهای مادی معرفی شده در لایه‌های گوناگون این سازه‌ها، انتخاب چینش مناسب را برای طراحان فراهم می‌کند که به افزایش بازدهی مواد انتخاب شده می‌افزاید. در تحقیق پیش رو با استفاده از مدل‌سازی المان محدود، اثر تغییرات مدول الاستیسیته و تنش تسلیم لایه‌های فلزی این سازه‌ها که از نخستین خواص مکانیکی در دسترس مواد می‌باشند، تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت پایین بررسی شده است. به این صورت که علاوه بر بررسی تأثیر این تغییرات بر رفتار این سازه‌ها، به مقایسه‌ی اثر تغییرات در لایه‌های مختلف نیز پرداخته شده است. در این موارد رفتار متنوعی از سازه از جمله نیروی تماسی، جابه‌جایی عرضی سازه و ترم‌های مختلف انرژی شامل انرژی اتلافی پلاستیک، و انرژی کرنشی الاستیک صفحه هدف، همچنین انرژی جنبشی ضربه‌زننده تحت بررسی قرار گرفته‌اند. این خروجی‌ها به تشریح کامل رفتار مجموعه در ضربه می‌پردازند و توجه به انرژی اتلافی پلاستیک و انرژی کرنشی الاستیک موجب تمایز میان گونه‌های مختلف جذب و اتلاف انرژی در صفحه هدف می‌شود که می‌تواند به پیش‌بینی رفتار مجموعه در هنگام بازگشت ضربه‌زننده کمک کند.

۲- تشریح مدل‌سازی عددی

در این مقاله برای بررسی و مقایسه‌ی تأثیر تغییرات مدول الاستیسیته و تنش تسلیم در لایه‌های مختلف صفحات فلزی چندلایه بر رفتار مکانیکی این سازه‌ها در بارگذاری ضربه‌ای سرعت پایین، از نرم‌افزار مدل‌سازی المان محدود آباکوس حل صریح استفاده شده است. به این صورت که صفحه هدف دارای مقطع مربعی به ابعاد 210×210 میلی‌متر مربع بوده و از اتصال لایه‌های فلزی با لایه‌ای از چسب طبق شکل ۱، در ضخامت کل $8/3$ میلی‌متر تشکیل شده که در آن ضخامت هرلایه چسب $0/2$ میلی‌متر است. همچنین ضربه زننده کره‌ای صلب به شعاع 13 میلی‌متر، سرعت 3 متر بر ثانیه و انرژی 87 ژول در نظر گرفته شده است. برای لایه‌های فلزی، آلومینیوم ۶۰۶۱ به عنوان ماده پایه انتخاب شده است که توسط لایه‌هایی از چسب اپوکسی EC-۲۲۱۴ به یکدیگر متصل شده‌اند. این چسب از نظر مادی تک جزئی است که استحکام بالا و شکل‌پذیری اندکی را دارا می‌باشد. رفتار تنش-کرنش فلز و چسب به صورت منحنی تنش-کرنش الاستیک، سخت‌گردانی خطی مطابق جدول ۱ به کار گرفته شده است. شرایط مرزی استفاده

چسب پایه اپوکسی بوده و دو جزئی می‌باشد. برای رسیدن به حد بهینه از قدرت اتصال می‌بایست هر دو جزء چسب به نسبت مساوی از نظر جرمی و یا از نظر حجمی با هم مخلوط شوند. تمام عملیات پخت چسب در دمای اتاق (حدوداً ۲۵ درجه سانتیگراد) انجام گرفته است. در مطالعات مربوط به بارگذاری ضربه‌ای از سایر چسبها نیز می‌توان استفاده نمود و حتی تأثیر جنس چسب را بر رفتار مکانیکی سازه‌های متورق می‌توان بررسی کرد. پس از آماده‌سازی چسب آرالدایت ۲۰۱۲ از طریق ترکیب سخت کننده در رزین، مقدار مناسبی از آن بر روی یکی از سطوح توزیع می‌شود به گونه‌ای که با قرار گرفتن لایه‌ی دیگر و سرازیر شدن مقداری از چسب از لبه‌های دیسک، امکان تشکیل هرگونه حباب در محل اتصال از بین برود و ضخامت مورد نظر ایجاد گردد. پس از طی زمان پخت مطابق با دستورالعمل چسب، نمونه از زوائد چسب پاک‌سازی شده و مطابق شکل ۳ برای انجام آزمایش آماده می‌شود. با آماده‌شدن نمونه و اندازه‌گیری ضخامت آن مشخص می‌شود که ضخامت لایه‌ی چسب 0.001 ± 0.002 میلی‌متر می‌باشد. نمونه پس از ساخت در فیکسچر دستگاه مطابق شکل ۴ نصب گردید به گونه‌ای که دیسک تا قطر ۱۵ میلی‌متر گیردار شده و تنها این ناحیه در معرض ضربه زننده قرار بگیرد. در این آزمایش دیسک ساخته شده از سمت لایه‌ی آلومینیوم H۱۴-۱۰۵۰ تحت ضربه قرار می‌گیرد. همچنین ضربه زننده به گونه‌ای تنظیم شده است که با جرم ۱۰/۲۱ کیلوگرم و سرعت ۱/۹۸ متر بر ثانیه به دیسک برخورد کند. برای انجام تست از دستگاه تست ضربه ثقلی استفاده شده است به طوری که مطابق شکل ۵ ضربه‌زننده در محل برخورد به صورت کره‌ای با شعاع ۸/۱ میلی‌متر از جنسی بسیار مستحکم‌تر از دیسک تحت ضربه، ساخته شده است.

پس از انجام تست، تغییر شکلی دائمی حاصل از برخورد ضربه‌زننده در صفحه هدف ایجاد می‌شود که فرورفتگی نقطه مرکزی و جابه‌جایی عرضی آن را مطابق شکل ۶ به دنبال دارد. نتایج حاصل از تست به صورت نمودار شتاب بر حسب زمان، که توسط شتاب‌سنج تعبیه شده بر روی ضربه زننده، اندازه‌گیری شده است در دسترس می‌باشد. این داده‌ها به راحتی و توسط قوانین پایه‌ی نیوتن به داده‌هایی به شکل نمودار نیروی تماسی بر حسب زمان قابل تبدیل است که این خروجی جهت صحت‌گذاری بر مدل‌سازی انتخاب شده است. مقایسه‌ی نتایج بدست آمده از آزمایش و نتایج حاصل از مدل‌سازی، اختلاف ۹/۲ درصدی را در مقدار بیشینه‌ی نیروی تماسی بر اساس شکل ۷ نشان می‌دهد که بیانگر صحت مدل‌سازی صورت گرفته است.

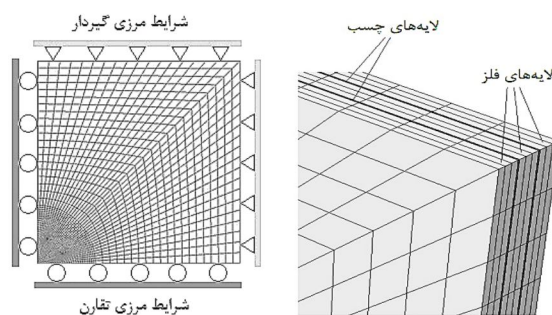


شکل ۳: نمایی از دیسک و چسب لایه‌ها

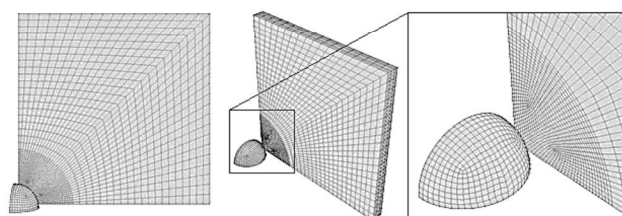
شده در اطراف صفحه هدف به صورت گیردار بوده و برای مدل‌سازی سه بعدی، از یک‌چهارم کل سازه و شرایط مرزی تقارن بر اساس شکل ۱ استفاده شده است. برای المان‌بندی لایه‌های فلزی و چسبی صفحه هدف از المان‌های C3D8R استفاده و ضربه زننده با المان‌های R3D4 مش‌بندی شده است. از سوی دیگر به علت برخورد و انتقال مومنتوم در نواحی مرکزی صفحه هدف و اجتناب از خطاهای عددی در حل مسئله، در این ناحیه از المان‌های ریزتر استفاده شده است (شکل ۲). برای تحلیل رفتار مکانیکی سازه نیز خروجی‌های نیروی تماسی، جابه‌جایی عرضی نقطه‌ی مرکزی صفحه هدف، انرژی کرنشی الاستیک و انرژی اتلافی پلاستیک صفحه هدف همچنین انرژی جنبشی ضربه زننده مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

جدول ۱- خواص مادی پایه لایه‌های صفحه هدف [۱۱-۱۳]

نام ماده	چگالی (kg/m ³)	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون	تنش تسلیم (MPa)	شیب پلاستیک (GPa)
آلومینیوم ۶۰-۶۱	۲۷۰۰	۷۱	۰/۳۳	۱۲۵	۱/۴۸
چسب EC-2214	۱۵۴۵	۵/۱	۰/۳۸	۵۲	۰/۶۸



شکل ۱- چیدمان لایه‌های مختلف و شرایط مرزی مجموعه



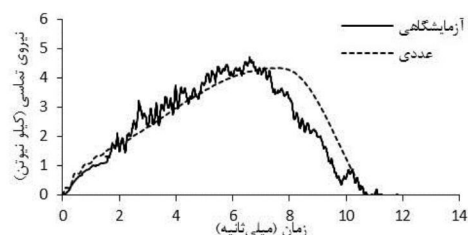
شکل ۲- مش‌بندی مجموعه

۳- صخه‌گذاری مدل عددی

در این بخش صحت مدل عددی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی به صورت مجزا بررسی شده است. صخه‌گذاری نتایج آزمایشگاهی بر اساس تست ضربه صورت گرفته بر یک دیسک دولایه می‌باشد و صخه‌گذاری نتایج عددی بر مبنای نتایج سایر محققین صورت گرفته است.

۳-۱- صخه‌گذاری بر اساس نتایج آزمایشگاهی

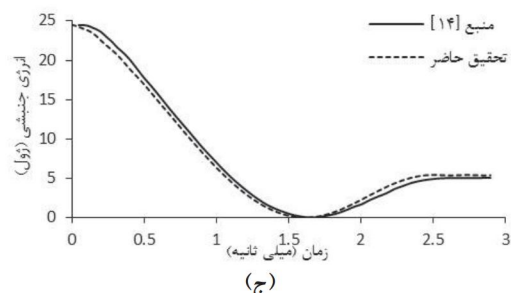
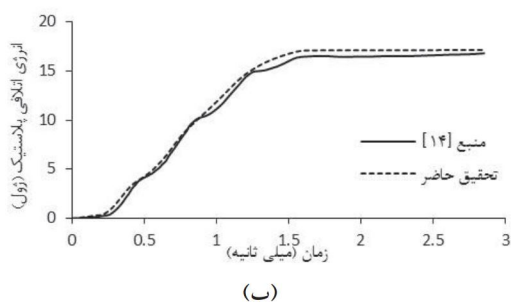
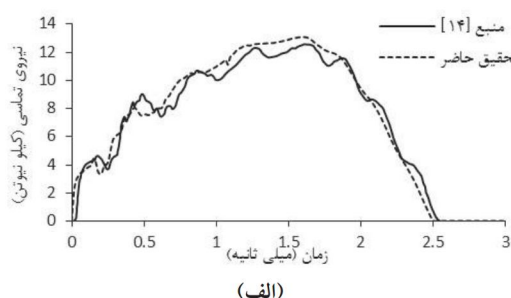
برای ساخت نمونه، ابتدا از ورق‌هایی از جنس آلومینیوم H۱۴-۱۰۵۰ و آلومینیوم T۳-۲۰۲۴ با ضخامت ۲ میلی‌متر، دیسک‌هایی به قطر ۱۹/۵ سانتی‌متر برش خورده است. سپس برای اتصال بهتر و پاک کردن آلودگی‌ها، این دو دیسک چندین مرتبه توسط محلول شیمیایی استون شست‌وشو شده‌اند. برای اتصال دو دیسک از چسب آرالدایت ۲۰۱۲ استفاده شده است که از جمله چسب‌های سازه‌ای پرکاربرد محسوب می‌شود. این



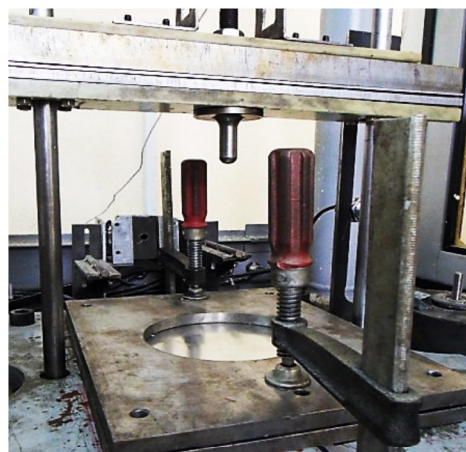
شکل ۷- صحنه‌گذاری بر اساس نتایج آزمایشگاهی نیروی تماسی و زمان تماس

۳-۲- صحنه‌گذاری بر اساس نتایج عددی

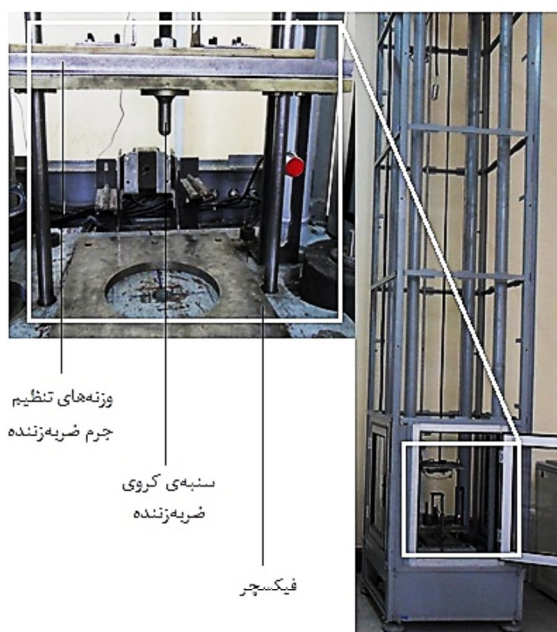
صحنه‌گذاری دیگر، بر اساس نتایج عددی منبع [۱۴] که به بررسی عددی رفتار مکانیکی صفحات دو لایه با چینش‌های متفاوت فولاد و آلومینیوم تحت ضربه سرعت پایین پرداخته، انجام شده است. به این صورت که صحنه‌گذاری برای صفحه‌ای از جنس فولاد-فولاد و برای نیروی تماسی بر حسب زمان و همچنین انرژی اتلافی پلاستیک صفحه هدف و انرژی جنبشی ضربه زننده به عنوان دو ترم انرژی تحت بررسی، مطابق شکل ۸ صورت گرفته است. اختلاف ۲/۴ درصدی و ۶/۳ درصدی برای نیروی تماسی بیشینه و ۲/۰ درصدی برای زمان تماس انطباق خوب نیروی تماسی را نشان می‌دهد. همچنین اختلاف ۲/۴ درصدی و ۶/۳ درصدی به ترتیب برای انرژی اتلافی پلاستیک بیشینه صفحه هدف و انرژی جنبشی ضربه زننده در بازگشت، صحت نتایج حالت‌های مختلف انرژی را به روشنی نمایان می‌کند و مدل عددی المان محدود را در مقاله حاضر، قابل اطمینان می‌سازد.



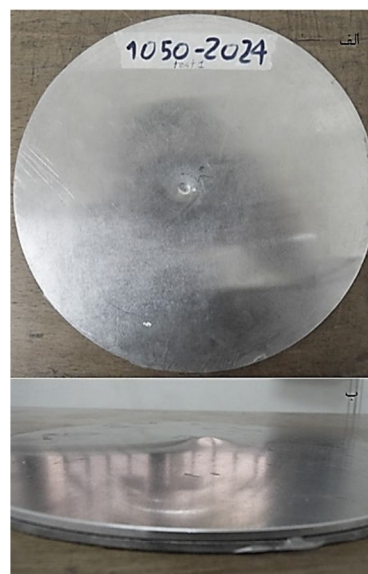
شکل ۸- صحنه‌گذاری بر اساس نتایج عددی مرجع [۱۴]
(الف) نیروی تماسی (ب) انرژی اتلافی پلاستیک (ج) انرژی جنبشی



شکل ۴- نمایی از فیکسچر نصب شده بر روی دیسک



شکل ۵- دستگاه ضربه‌ی ثقلی و تجهیزات آن



شکل ۶- تغییر شکل دائمی سازه
(الف) فرورفتگی نقطه‌ی مرکزی (ب) جابه‌جایی عرضی نقطه‌ی مرکزی

۴- نتایج عددی

۴-۱- تأثیر تغییرات مدول الاستیسیته لایه‌های فلزی بر

رفتار مکانیکی

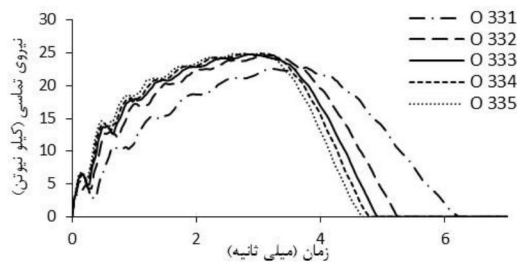
در این قسمت تأثیر تغییر مدول الاستیسیته‌ی لایه‌های مختلف صفحه هدف سه لایه، بر رفتار مکانیکی سازه مطالعه شده است. برای این منظور، فلز پایه به عنوان جنس لایه‌های فلزی انتخاب شده سپس با تغییر مدول الاستیسیته‌ی هر لایه بر اساس جدول ۲ تغییرات رفتار سازه بررسی شده است. بایستی به این نکته توجه شود که هدف اصلی این بخش، مطالعه‌ی رفتار کلی سازه با تغییر مدول الاستیسیته‌ی لایه‌های فلزی می‌باشد.

در هنگام مطالعه‌ی اثر هر لایه، اگر تغییرات به شکل افزایش مدول الاستیسیته در نظر گرفته شود، می‌توان گفت با افزایش مدول الاستیسیته، صفحه هدف سفت‌تر شده، مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل الاستیک از خود نشان می‌دهد و انعطاف‌پذیری آن کاهش می‌یابد؛ در نتیجه با افزایش سفتی صفحه هدف نیروی تماسی بیشینه میان صفحه و ضربه زننده مطابق شکل ۹ افزایش و با کاهش انعطاف‌پذیری، جابه‌جایی بیشینه صفحه هدف مطابق شکل ۱۰ کاهش خواهد یافت.

جدول ۲- مدول الاستیسیته مواد تعریف شده در بررسی تأثیر تغییرات مدول الاستیسیته

عدد مشخصه در مدل‌سازی‌ها	مقدار مدول الاستیسیته (GPa)
۱	۱۰
۲	۴۰
۳	۷۰ (*)
۴	۱۰۰
۵	۱۳۰

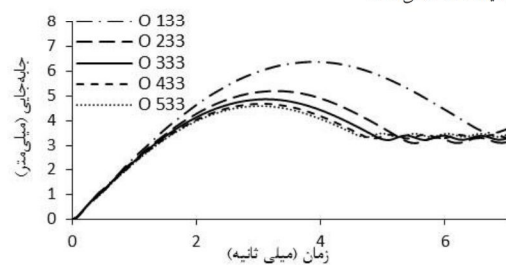
(*) مدول الاستیسیته ماده پایه برای اعمال راحت‌تر تغییرات به جای ۷۱ مقدار ۷۰ گیگا پاسکال انتخاب شده است.



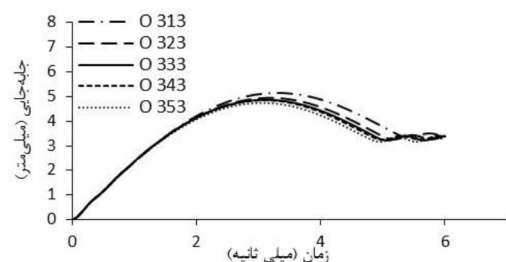
(ج)

شکل ۹- تغییرات نیروی تماسی با تغییر مدول الاستیسیته در (الف) لایه اول (ب) لایه دوم (ج) لایه سوم

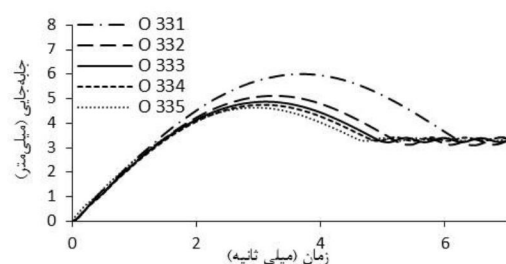
(*) چپش لایه‌ها بر اساس عدد مشخصه جدول ۲ بوده و علامت O موقعیت ضربه زننده را نسبت به چپش لایه‌ها نشان می‌دهد.



(الف)

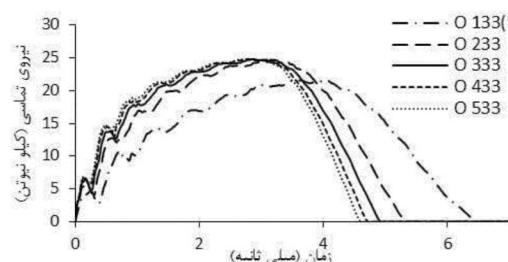


(ب)

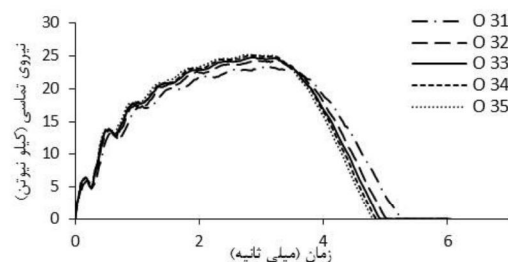


(ج)

شکل ۱۰- تغییرات جابه‌جایی با تغییر مدول الاستیسیته در (الف) لایه اول (ب) لایه دوم (ج) لایه سوم

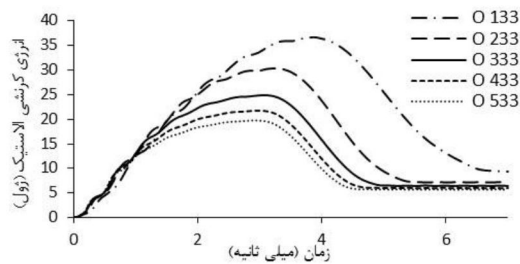


(الف)

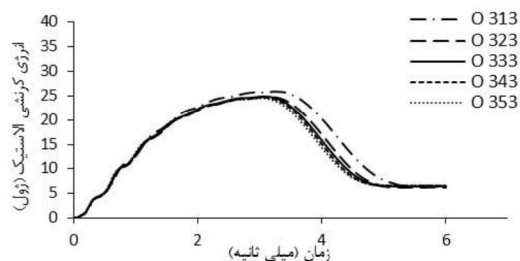


(ب)

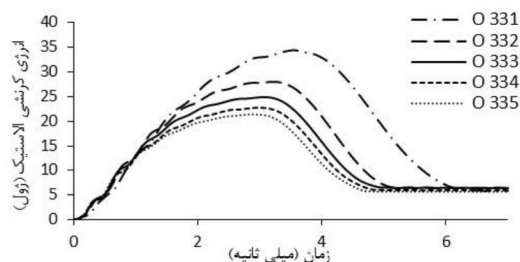
از سوی دیگر با افزایش مدول الاستیسیته و ثابت بودن سایر پارامترهای مادی، مدول برجهندگی کاهش خواهد یافت. این بدان معنی است که ماده تا قبل از تسلیم، انرژی کمتری را به صورت انرژی کرنشی الاستیک جذب می‌کند و چون مجموع انرژی جذب شده برابر انرژی جنبشی اولیه ضربه زننده بوده و مقدار ثابتی است، میزان جذب انرژی صفحه هدف در ناحیه پلاستیک افزایش می‌یابد. بایستی به این نکته توجه داشت که بیشتر انرژی جذب شده در ناحیه پلاستیک، به صورت انرژی اتلافی پلاستیک است و تغییر میزان جذب انرژی در این ناحیه، بیشتر موجب تغییر انرژی اتلافی پلاستیک خواهد شد و تأثیر کمی بر انرژی کرنشی



(الف)

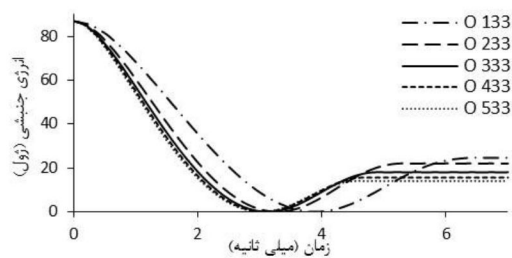


(ب)

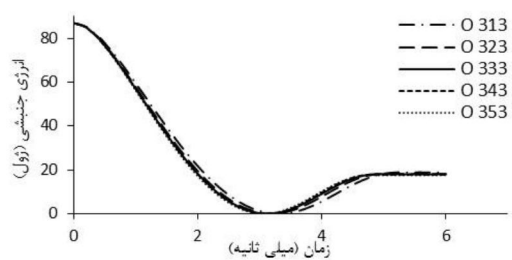


(ج)

شکل ۱۲- تغییرات انرژی کرنشی الاستیک با تغییر مدول الاستیسیته در (الف) لایه اول (ب) لایه دوم (ج) لایه سوم

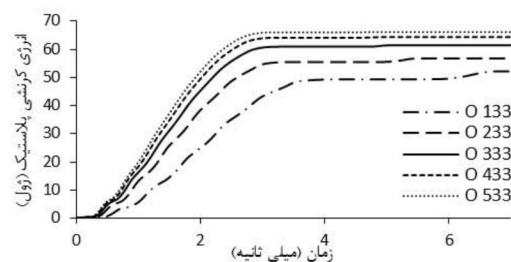


(الف)

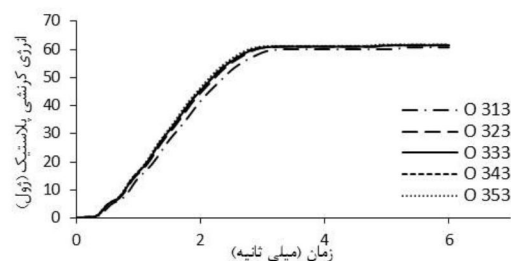


(ب)

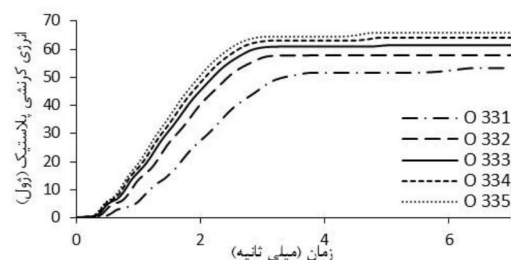
الاستیک جذب شده دارد. برای مثال برای آلومینیوم ۶۰۶۱ در کرنشی معادل $\epsilon=5\epsilon_y$ انرژی کرنشی الاستیک ۱۲/۶ درصد کل انرژی جذب شده را تشکیل می‌دهد که تنها ۱۵ درصد نسبت به انرژی کرنشی الاستیک تا پیش از تسلیم، افزایش داشته است در حالی که انرژی اتلافی پلاستیک ۸۷/۴ درصد انرژی جذب شده را شامل می‌شود. به عبارت دیگر در ناحیه پلاستیک، شدت افزایش انرژی اتلافی پلاستیک بسیار بیشتر از انرژی کرنشی الاستیک است. بنابراین با افزایش مدول الاستیسیته و افزایش جذب انرژی در ناحیه پلاستیک، انرژی اتلافی پلاستیک افزایش می‌یابد. این روند در لایه‌های مختلف صفحه سه لایه در شکل ۱۱ مشخص است. چون مجموع انرژی‌های جذب شده صفحه هدف ثابت است با افزایش انرژی اتلافی پلاستیک، انرژی جذب شده به صورت انرژی کرنشی الاستیک، در هنگام افزایش مدول الاستیسیته طبق شکل ۱۲ کاهش می‌یابد. همچنین چون ضربه زننده در بازگشت انرژی خود را از انرژی کرنشی الاستیک صفحه هدف دریافت می‌کند، طبیعتاً تغییرات انرژی جنبشی ضربه زننده در بازگشت، مطابق با تغییرات انرژی کرنشی الاستیک کاهش می‌یابد. این تغییرات با افزایش مدول الاستیسیته لایه‌های مختلف در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود.



(الف)



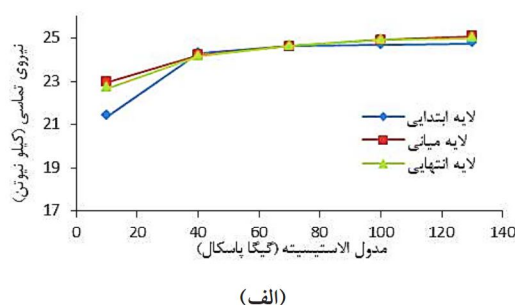
(ب)



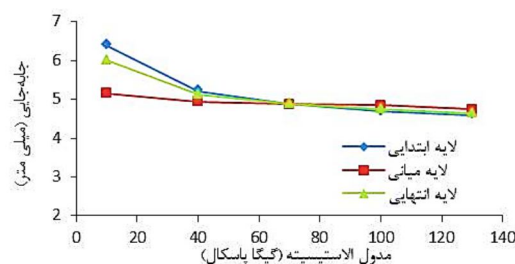
(ج)

شکل ۱۱- تغییرات انرژی اتلافی پلاستیک با تغییر مدول الاستیسیته در (الف) لایه اول (ب) لایه دوم (ج) لایه سوم

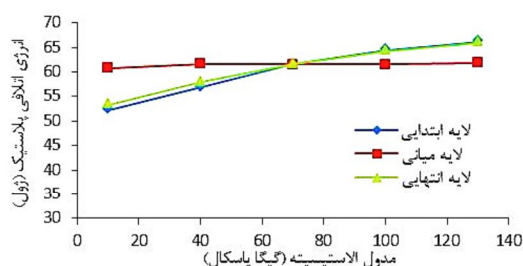
کل صفحه هدف دارد بر تغییر شکل‌های موضعی نیز گذاشته و موجب می‌شود که تغییرات انرژی کرنشی الاستیک با تغییرات مدول الاستیسیته لایه‌ی ابتدایی، شدت یابد. اثر لایه‌های ابتدایی و انتهایی در خمش صفحه هدف و شدت بیشتر تغییرات انرژی کرنشی الاستیک در آنها، موجب شده تا تغییرات انرژی جنبشی ضربه زننده در بازگشت نیز طبق شکل ۱۴-۵ شدت بیشتری را برای این دو لایه نسبت به لایه‌ی میانی تجربه کند. از سوی دیگر، تغییر شکل‌های موضعی در لایه‌ی ابتدایی اثر خود را با ممانعت از آزاد شدن انرژی کرنشی الاستیک صفحه هدف و انتقال آن به ضربه زننده، خصوصاً در هنگام کاهش شدید مدول الاستیسیته‌ی این لایه، نشان داده است. این امر، با توجه به قسمت انتهایی منحنی تغییرات انرژی کرنشی الاستیک در شکل ۱۵ و مقایسه‌ی انرژی کرنشی الاستیک باقیمانده در هنگام کاهش مدول الاستیسیته‌ی لایه‌ی ابتدایی و انتهایی مشخص می‌شود. به این صورت که، با کاهش مدول الاستیسیته‌ی لایه‌ی ابتدایی، سطح انرژی کرنشی الاستیک آزاد نشده ۴۵/۵ درصد بیش از حالت پایه است؛ درحالی‌که این مقدار برای لایه‌ی انتهایی ۸/۵ درصد کمتر از حالت پایه بوده است. این تفاوت بیانگر آزاد نشدن انرژی کرنشی الاستیک در هنگام کاهش مدول الاستیسیته‌ی لایه‌ی ابتدایی است.



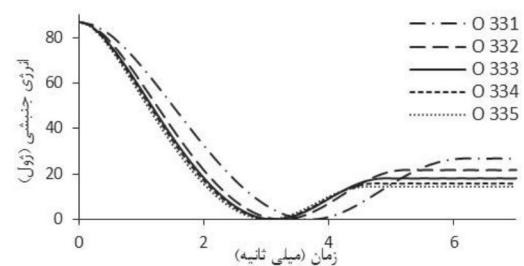
(الف)



(ب)



(ج)



(ج)

شکل ۱۳ تغییرات انرژی جنبشی ضربه زننده با تغییر مدول الاستیسیته در (الف) لایه اول (ب) لایه دوم (ج) لایه سوم

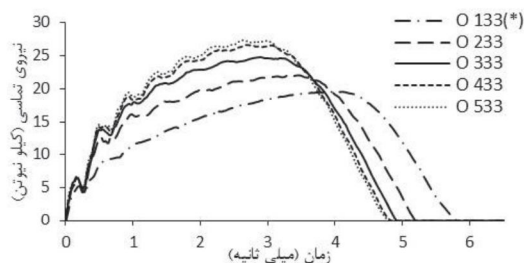
۴-۲- مقایسه‌ی اثرات تغییر مدول الاستیسیته لایه‌های

مختلف بر رفتار مکانیکی

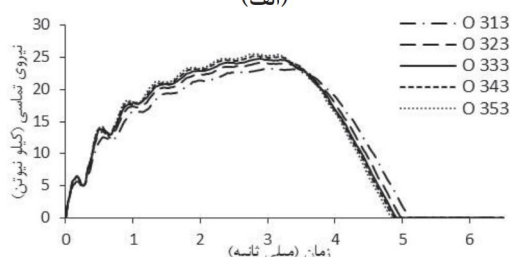
در این بخش اثر تغییر مدول الاستیسیته در لایه‌های مختلف صفحه هدف سه لایه، مورد مقایسه قرار گرفته است تا تمایز اثر لایه‌ها بر رفتار مکانیکی سازه روشن گردد. با مقایسه اثر لایه‌های مختلف، مشاهده می‌شود که طبق شکل ۱۴-الف افزایش مدول الاستیسیته نسبت به حالت پایه، تفاوت چندانی بر نیروی تماسی بیشینه لایه‌های مختلف نداشته است؛ اما در هنگام کاهش مدول الاستیسیته، شدت تغییرات برای لایه‌های ابتدایی و انتهایی بیش از لایه میانی بوده است. علت این امر را می‌توان قرار گرفتن این دو لایه در دو سمت صفحه هدف و تأثیر بیشتر آنها در خمش صفحه هدف دانست. در نتیجه کاهش مدول الاستیسیته آنها تأثیر بیشتری در کاهش سفتی صفحه و در نتیجه کاهش نیروی تماسی بیشینه دارد. عامل دیگر که خصوصاً موجب تمایز رفتار لایه‌ی ابتدایی با لایه‌ی انتهایی شده است، اثر تغییر شکل‌های موضعی در لایه‌ی ابتدایی است که منجر به افزایش ۱۱ درصدی سطح تماس میان ضربه زننده و صفحه هدف نسبت به حالت پایه شده درحالی‌که این مقدار برای لایه‌ی انتهایی تنها ۰/۶۳ درصد بوده است. این افزایش سطح تماس برای لایه‌ی ابتدایی سبب توزیع نیرو در سطح بزرگتری شده است که افت نیروی تماسی بیشینه را به دنبال دارد. در مورد جابه‌جایی بیشینه صفحه هدف و بر اساس شکل ۱۴-ب تأثیر بیشتر لایه‌های ابتدایی و انتهایی بر خمش صفحه هدف سبب شدت بیشتر تغییرات در آنها شده است. همچنین اثر تغییر شکل‌های موضعی در لایه‌ی ابتدایی، عامل تغییرات بیشتر جابه‌جایی بیشینه در آن مخصوصاً در هنگام کاهش مدول الاستیسیته شده است.

با مقایسه‌ی تغییرات انرژی اتلافی پلاستیک بیشینه در لایه‌های مختلف در شکل ۱۴-ج، مشاهده می‌شود که اثر لایه‌های ابتدایی و انتهایی به علت اثرشان در خمش صفحه هدف بیش از لایه‌ی میانی است. همچنین این اثر موجب شدت بیشتر تغییرات انرژی کرنشی الاستیک بیشینه این لایه‌ها نسبت به لایه‌ی میانی در شکل ۱۴-د شده است. از سوی دیگر موقعیت خاص لایه‌ی ابتدایی و اثرات تغییر شکل‌های موضعی در آن، شدت تغییرات را برای این لایه بیش از لایه‌ی انتهایی کرده است؛ چرا که تغییر مدول الاستیسیته در لایه‌ی ابتدایی همان اثری که بر

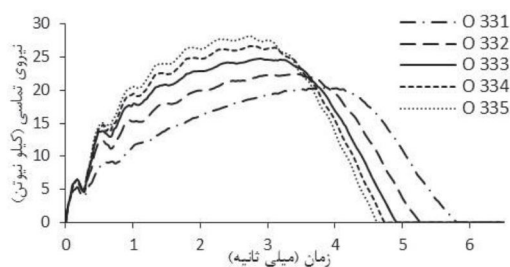
با افزایش تنش تسلیم و بر اساس منحنی تنش-کرنش ماده، در یک تنش ثابت در ناحیه‌ی پلاستیک، کرنش ماده کاهش می‌یابد. این امر به معنای صلب تر شدن رفتار صفحه هدف و کاهش انعطاف‌پذیری آن است که افزایش نیروی تماسی را مطابق شکل ۱۶ و کاهش جابه‌جایی را بر اساس شکل ۱۷ به دنبال دارد.



(الف)



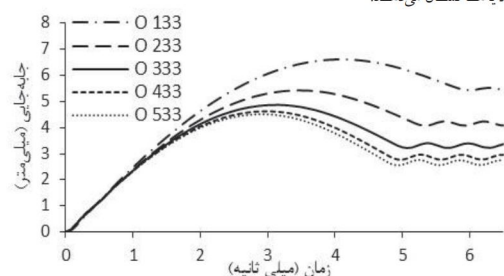
(ب)



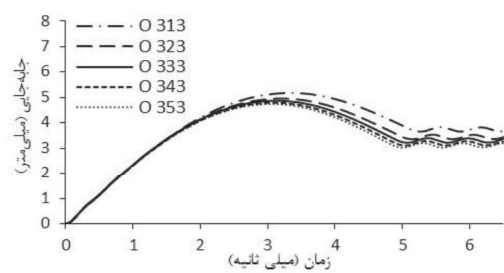
(ج)

شکل ۱۶- تغییرات نیروی تماسی با تغییر تنش تسلیم در (الف) لایه اول (ب) لایه دوم (ج) لایه سوم

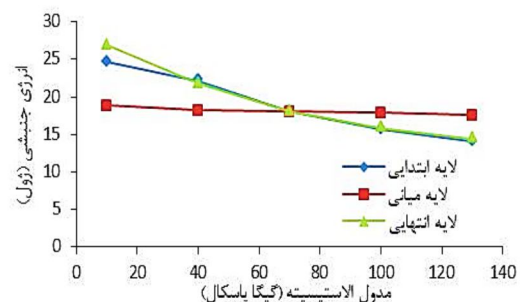
(*) چپش لایه‌ها بر اساس عدد مشخصه جدول ۳ بوده و علامت O موقعیت ضربه زننده را نسبت به چپش لایه‌ها نشان می‌دهد.



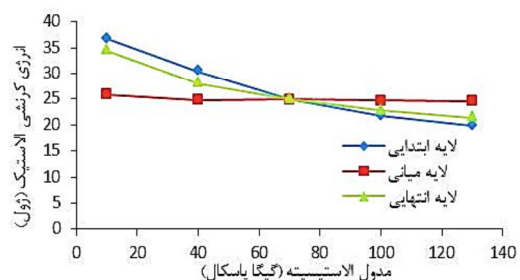
(الف)



(ب)

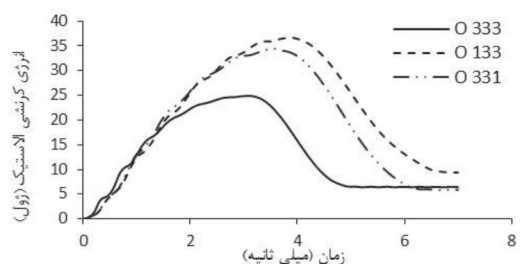


(د)



(ه)

شکل ۱۴- مقایسه اثر تغییرات مدول الاستیسیته لایه‌های مختلف بر (الف) نیروی تماسی پیشینه (ب) جابه‌جایی پیشینه (ج) انرژی اتلافی پلاستیک پیشینه (د) انرژی کرنشی الاستیک پیشینه (ه) انرژی جنبشی ضربه زننده در بازگشت



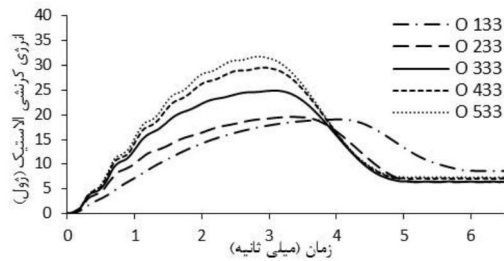
شکل ۱۵- مقایسه انرژی کرنشی الاستیک باقیمانده در هنگام کاهش مدول الاستیسیته‌ی لایه‌ی ابتدایی و انتهایی

۳-۴- تأثیر تغییرات تنش تسلیم لایه‌های فلزی بر رفتار مکانیکی

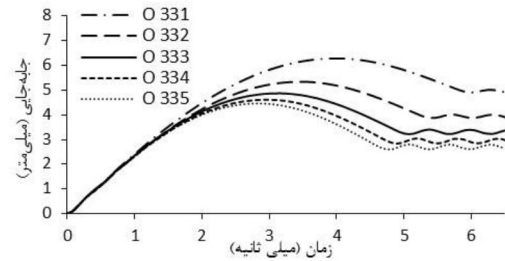
در این بخش، اثر تغییر تنش تسلیم در لایه‌های مختلف صفحه سه لایه بر رفتار مکانیکی سازه بررسی شده است. به این صورت که، جنس لایه‌های فلزی از نوع فلز پایه انتخاب و در ادامه برای مطالعه‌ی اثر هر لایه، تنش تسلیم بر اساس جدول ۳ تغییر و رفتار مکانیکی سازه مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف اصلی این قسمت، مطالعه‌ی اثر کلی تغییرات تنش تسلیم بر رفتار مکانیکی مجموعه است و دیگر شرایط مسأله از جمله جنس لایه‌های چسب، شرایط مرزی صفحه هدف، ابعاد و خواص ضربه زننده همچون بخش‌های پیشین، ثابت در نظر گرفته شده است.

جدول ۳- تنش تسلیم مواد تعریف شده در بررسی تأثیر تغییرات تنش تسلیم

عدد مشخصه در مدل‌سازی‌ها	مقدار تنش تسلیم (مگا پاسکال)
۱	۲۵
۲	۷۵
۳	۱۲۵
۴	۱۷۵
۵	۲۲۵

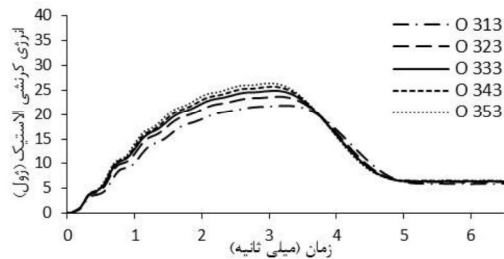


(الف)



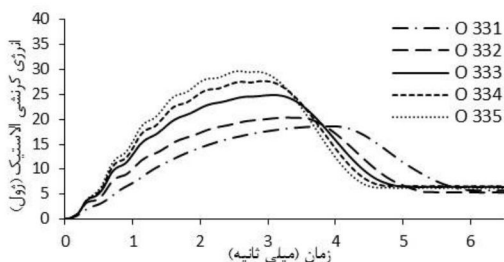
(ب)

شکل ۱۷- تغییرات جابه‌جایی صفحه هدف با تغییر تنش تسلیم در
(الف) لایه اول (ب) لایه دوم (ج) لایه سوم



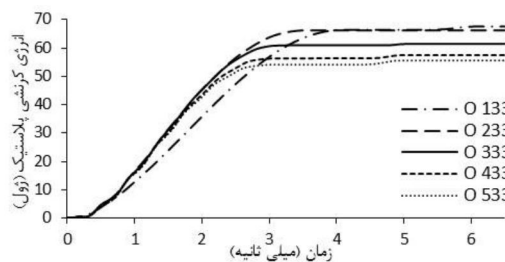
(ج)

افزایش تنش تسلیم ماده، افزایش مدول برجهندگی و در نتیجه افزایش جذب انرژی در ناحیه الاستیک را به دنبال دارد. بنابراین میزان جذب انرژی در ناحیه پلاستیک کاهش میابد و چون بیشتر انرژی جذب شده در این ناحیه به صورت انرژی اتلافی پلاستیک است، این ترم انرژی مطابق شکل ۱۸ و با افزایش تنش تسلیم لایه‌های مختلف کاهش و با ثابت بودن مقدار انرژی جذب شده، انرژی کرنشی الاستیک مطابق شکل ۱۹ افزایش خواهد یافت. همچنین با افزایش انرژی کرنشی الاستیک جذب شده توسط صفحه هدف، انرژی جنبشی ضربه زننده در بازگشت مطابق شکل ۲۰ با افزایش تنش تسلیم لایه‌های مختلف، افزایش خواهد یافت.

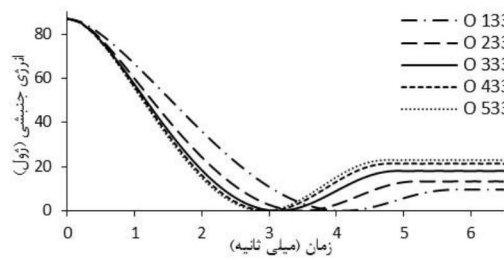


(د)

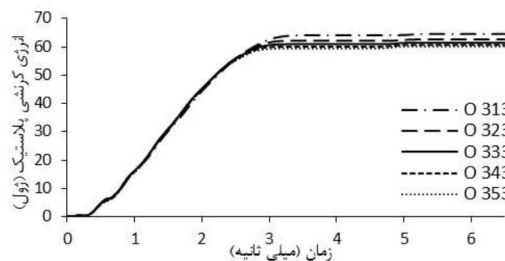
شکل ۱۹- تغییرات انرژی کرنشی الاستیک با تغییر تنش تسلیم در
(الف) لایه اول (ب) لایه دوم (ج) لایه سوم



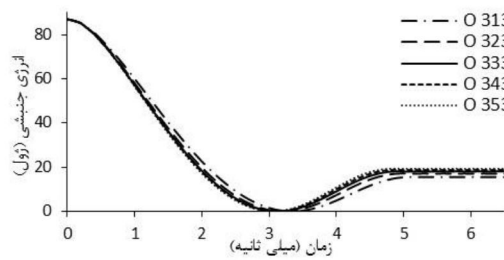
(الف)



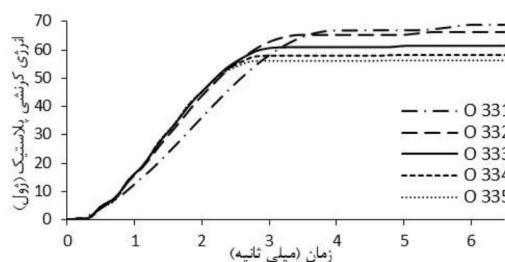
(ب)



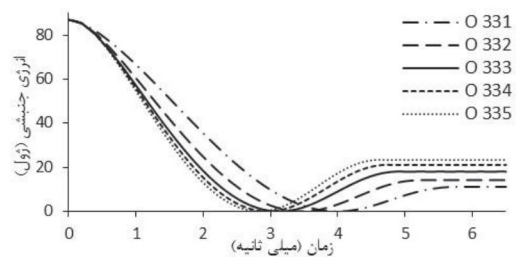
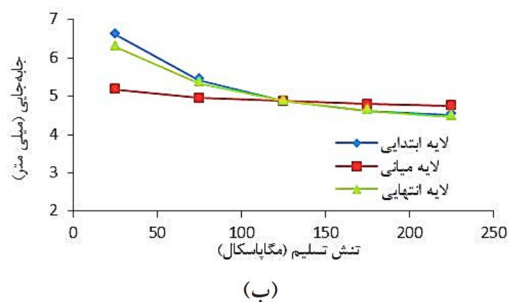
(ج)



(د)



شکل ۱۸- تغییرات انرژی اتلافی پلاستیک با تغییر تنش تسلیم در
(الف) لایه اول (ب) لایه دوم (ج) لایه سوم



(ج)

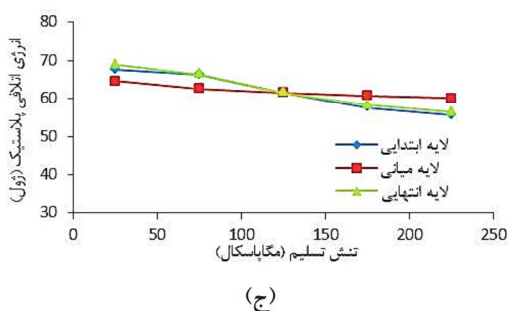
شکل ۲۰- تغییرات انرژی جنبشی ضربه زننده با تغییر تنش تسلیم در
(الف) لایه اول (ب) لایه دوم (ج) لایه سوم

۴-۴- مقایسه‌ی اثرات تغییر تنش تسلیم لایه‌های مختلف

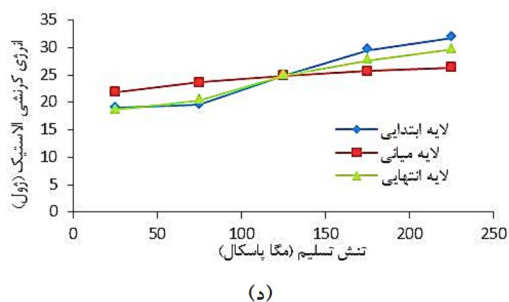
بر رفتار مکانیکی

در این قسمت، اثر تغییر تنش تسلیم لایه‌های مختلف مورد مقایسه قرار گرفته و تفاوت اثر لایه‌ها در هنگام تغییر تنش تسلیم، مشخص شده است. مطابق شکل ۲۱- الف لایه‌های ابتدایی و انتهایی به علت تأثیر بیشتر در خمش صفحه هدف، تأثیر بیشتری را بر تغییرات نیروی تماسی بیشینه داشته‌اند. همین امر موجب شدت یافتن تغییرات جابه‌جایی بیشینه صفحه هدف برای این دو لایه مطابق شکل ۲۱- ب شده است. به علاوه، افزایش تغییر شکل‌های موضعی پلاستیک بیشتر که کرنش‌های بزرگتری را به دنبال دارد، موجب افزایش بیشتر جابه‌جایی بیشینه در هنگام کاهش تنش تسلیم لایه‌ی ابتدایی شده است.

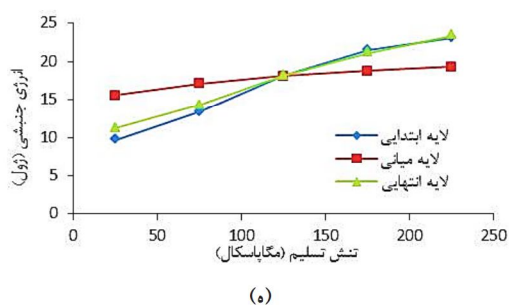
با مقایسه‌ی اثر لایه‌های مختلف در شکل ۲۱- ج، مشخص می‌شود که اثر خمش در لایه‌های ابتدایی و انتهایی، به شدت یافتن روند تغییرات انرژی اتلافی پلاستیک بیشینه در هنگام تغییر تنش تسلیم این دو لایه، منجر شده است. همچنین خمش، تأثیر خود را مطابق شکل ۲۱- د بر انرژی کرنشی الاستیک بیشینه گذاشته است. به علاوه، تأثیر مشابه روند کلی و تغییر شکل‌های موضعی موجب شده است تا روند تغییرات برای انرژی کرنشی الاستیک بیشینه لایه‌ی اول خصوصاً در هنگام افزایش تنش تسلیم، شدت یابد. این موضوع، تأثیر چندانی را در هنگام کاهش تنش تسلیم نداشته است. در مورد انرژی جنبشی ضربه زننده در بازگشت و بر اساس شکل ۲۱- ه تأثیر خمش بر تغییرات انرژی کرنشی الاستیک در لایه‌های ابتدایی و انتهایی، به شدت یافتن تغییرات انرژی جنبشی ضربه زننده با تغییر تنش تسلیم این دو لایه منجر شده است. همچنین تغییر شکل‌های موضعی با ممانعت از آزاد شدن انرژی کرنشی الاستیک صفحه هدف در هنگام کاهش تنش تسلیم لایه‌ی ابتدایی، کاهش بیشتر انرژی جنبشی ضربه زننده در بازگشت را به همراه داشته است. چرا که بر اساس شکل ۲۲، سطح انرژی کرنشی الاستیک آزاد نشده برای لایه‌ی ابتدایی، ۳۴ درصد بیش از حالت پایه و برای لایه‌ی انتهایی، ۱۱ درصد کمتر از حالت پایه بوده است.



(ج)



(د)

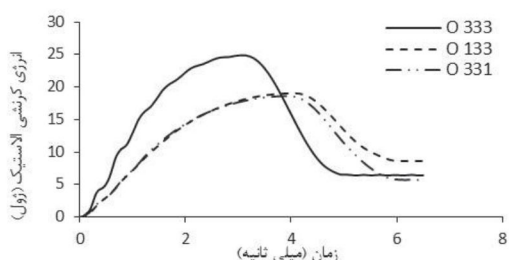


(ه)

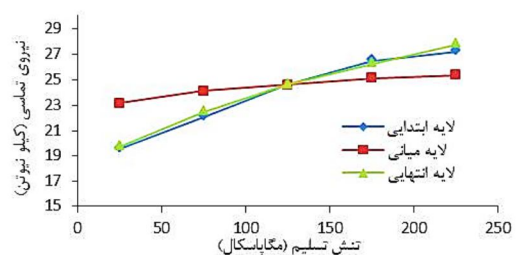
شکل ۲۱ مقایسه اثر تغییرات تنش تسلیم لایه‌های مختلف بر

(الف) نیروی تماسی بیشینه (ب) جابه‌جایی بیشینه (ج) انرژی اتلافی پلاستیک بیشینه

(د) انرژی کرنشی الاستیک بیشینه (ه) انرژی جنبشی ضربه زننده در بازگشت



شکل ۲۲- مقایسه‌ی انرژی کرنشی الاستیک باقیمانده در هنگام کاهش تنش تسلیم لایه‌ی ابتدایی و انتهایی



(الف)

۵- نتیجه‌گیری

به طور خلاصه، می‌توان گفت آنچه با استفاده از مدل‌سازی المان محدود مورد بررسی قرار گرفت، در واقع مقایسه‌ی اثر تغییرات مدول الاستیسیته و تنش تسلیم لایه‌های فلزی، بر رفتار مکانیکی سازه‌های فلزی چند لایه تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت پایین بوده است. نتایج بررسی‌ها نشان داد که افزایش مدول الاستیسیته منجر به افزایش نیروی تماسی، کاهش جابه‌جایی، افزایش انرژی اتلافی پلاستیک و کاهش انرژی جنبشی ضربه زننده در بازگشت می‌شود. از سوی دیگر، اثر افزایش تنش تسلیم به صورت افزایش نیروی تماسی، کاهش جابه‌جایی، کاهش انرژی اتلافی پلاستیک و افزایش انرژی جنبشی کرنشی الاستیک صفحه هدف آشکار می‌شود و افزایش انرژی کرنشی الاستیک، افزایش انرژی جنبشی ضربه زننده در بازگشت را به همراه دارد. به علاوه، با مقایسه‌ی اثر لایه‌های مختلف در رفتار مکانیکی صفحه هدف، سه‌لایه مشخص شد که اثر لایه‌های ابتدایی و انتهایی بر رفتار مکانیکی به علت نقشی که در خمش صفحه هدف دارند، به مراتب بیش از لایه‌ی میانی است.

این امر موجب شدت یافتن روند تغییرات در خروجی‌های گوناگون در هنگام تغییر مدول الاستیسیته و تنش تسلیم این لایه‌ها گردید. از سوی دیگر موقعیت خاص لایه‌ی ابتدایی، قرار گرفتن آن در معرض ضربه زننده و تأثیر تغییر شکل‌های موضعی در این لایه، موجب تمایز رفتار لایه‌ی ابتدایی نسبت به لایه‌ی انتهایی شده است. به این صورت که اثر تغییر شکل‌های موضعی بر سطح تماس و همچنین حاکم بودن اثرات کلی بر این تغییرشکل‌ها، سبب می‌شود که تغییرات پارامترهای خروجی صفحه هدف برای تغییرات خواص این لایه بیش از لایه‌ی انتهایی گردد. همچنین اثر آن بر ممانعت از آزاد شدن انرژی کرنشی الاستیک صفحه هدف، عامل کاهش روند تغییرات انرژی جنبشی ضربه زننده در هنگام تغییرات خواص لایه‌ی ابتدایی گردید.

۶- مراجع

- [1] Johnson, W. S. and 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.
- [2] Sinke, J. S. and Johansson, A. H.: Fatigue and Damage Tolerance Aspects of Metal Laminates. in: Bos, M. J. ICAF 2009, Bridging the Gap between Theory and Operational Practice, Eds., pp. 585-599: Springer Netherlands, 2009.
- [3] Katnam, K. B., et al.: The Static Failure of Adhesively Bonded Metal Laminate Structures: A Cohesive Zone Approach. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2011, 25(10), p. 1131-1157.
- [4] Katnam, K. B., et al.: Static and Fatigue Failures of Adhesively Bonded Laminate Joints in Moist Environments. *International Journal of Damage Mechanics*, 2011.
- [5] Lanciotti, A. and Polese, C.: Fatigue Properties of Monolithic and Metal-laminated Aluminium Open-hole Specimens. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2008, 31(10), p. 911-917.
- [6] Sinke, J. and Johansson, S.A.H.: Fatigue and Damage Tolerance Aspects of Metal Laminates. in ICAF 2009, Bridging the Gap between Theory and Operational Practice, Bos, M.J. Editor, 2009 Springer Netherlands, p. 585-599.
- [7] 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. English
- [8] Pacchione, M. and Hombergsmeier, E.: Hybrid Metal Laminates for Low Weight Fuselage Structures. in: S. Pantelakis, C. Rodopoulos, *Engineering Against Fracture*, Eds., pp. 41-57: Springer Netherlands, 2009.
- [9] Tekyeh-Marouf, B. Bagheri, R. and Mahmudi, R.: Effects of number of layers and adhesive ductility on impact behavior of laminates. *Materials Letters*, Vol. 58, No. 22-23, pp. 2721-2724, 2004.
- [10] Apalak, M. K. and 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, pp. 2587-2613, 2011/01/01, 2011.
- [11] Khorshidi, K.: Elasto-Plastic Response of Impacted Moderately Thick Rectangular Plates with Different Boundary Conditions. *Procedia Engineering*, Vol. 10, No. 0, pp. 1742-1747, 2011.
- [12] Raviraj, S. Laxmikant, K. Pai, R. and Rao, S. S.: Finite Element Modeling of Stress Distribution in the Cutting Path in Machining of Discontinuously Reinforced Aluminium Composites, 2008.
- [13] Rincon, L. F. T.: Analysis and Performance of Adhesively Bonded Crush Tube Structures. Master of Applied Science Thesis, University of Waterloo, 2012.
- [14] Yildirim, M. and 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, pp. 69-91, 2011/01/01, 2011.