

بررسی تجربی و عددی عملکرد ورق های فولادی ساده و تقویت شده با لچکی تحت ضربه سقوط آزاد

سیدامیرموسوی زاده^۱
دانشجوی کارشناسی ارشد

مجتبی حسینی^۲
دانشیار

حسین حاتمی^۳
دانشیار

در این تحقیق، به بررسی آزمایشگاهی و عددی ورق های فولادی تحت و تقویت شده بوسیله تقویت کننده های فولادی، تحت اثر ضربه ناشی از سقوط آزاد وزنه پرداخته شده است. ورق های فولادی مورد استفاده از جنس فولاد St12 می باشند. پارامترهای مورد ارزیابی این پژوهش شامل مقدار شتاب ضربه بر روی ورق، میزان تغییر شکل ماندگار و مقدار جذب انرژی برای ورق های تحت ساده و با تقویت کننده می باشد. برای مدل سازی عددی از نرم افزار المان محدود آباکوس استفاده شده است. نتایج نشان می دهد که استفاده از تقویت کننده موجب اندکی افزایش در شتاب وارده به ورق و کاهش قابل توجه تغییر شکل ماندگار آن می گردد.

واژه های راهنما: ورق فولادی، تقویت کننده، آزمایش سقوط آزاد، تغییر شکل ماندگار، شتاب ضربه.

۱- مقدمه

مسئله ضربه و نحوه پاسخ صفحات و پوسته ها با جنس مختلف به این نوع از بارگذاری که در صنایع مختلف کاربرد فراوان دارند، در سالیان اخیر محور بسیار از پژوهش ها در بحث مکانیک ضربه بوده است. موضوعات مورد بررسی به طور کلی شامل تأثیر سرعت و شتاب ضربه زننده، هندسه ورق ها شامل ضخامت، تخت یا انحنادار بودن آنها و همچنین جنس ورق ها و روش های مختلف بهبود جذب انرژی و کنترل انرژی ضربه در حد قابل تحمل سازه ها می باشد.

در نیمه دوم قرن گذشته مسائل زیادی مربوط به جذب انرژی مطرح شده اند؛ که این مسائل نسبت به درک بهتر حالت گسیختگی و مسائل پخش انرژی در چنین سازه هایی در حین برخورد کمک می کند. این اطلاعات برای طراحی سازه های مطمئن و همچنین برای ارزیابی سازه های موجود در کاربردهای ویژه بسیار مهم است، چرا که در نهایت خسارت های انسانی و منابع مادی به شدت کاهش می یابد.

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران mousavizadeh.a@lu.ac.ir

^۲ دانشیار، گروه عمران سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران hoseini.m@lu.ac.ir

^۳ نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران hatami.h@lu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۰۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۱

در زمینه تأثیر ضربه با سرعت خیلی بالا تحقیقی توسط مرژیوسکی و همکاران [۱] برای بررسی نفوذ و تغییر شکل صفحات فولادی در محدوده سرعت 3 تا 9km/s انجام شد و یک روش تحلیلی برای ارتباط ذرات خرد شده با جیعت ضربه ارائه گردید. در تحقیقی دیگر در این زمینه، برندان و همکاران [۲] نحوه مدل سازی تغییر شکل پلاستیک صفحات فولادی تحت ضربه با سرعت خیلی زیاد مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق دو تکنیک متفاوت محاسباتی برای شبیه سازی این نوع آزمایش توسعه داده شد که عبارت بودند از: هیدرودینامیک ذرات صاف بر پایه لاگرانژ (SPH) در نرم افزار LS-DYNA و CTH هیدروکد اویلرین. نتایج حاصل شده نشان داد که هر دو مدل شبیه سازی در مجموع موافقت مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارند. کومار و همکاران [۳] اثر انحنای ورق فلزی بر روی مقاومت ضربه برای ورق آلومینیومی بررسی کردند. ورق مورد بررسی به ضخامت ۲ میلی متر بوده و ضربه با سرعت بالا (در حد بالستیک) انجام شده است. که از سه پانل با شعاع های انحنای مختلف در نظر گرفته شد، و پانل c که دارای شعاع انحنایی ما بین دو پانل دیگر بود عملکرد بهتری نسبت به دو پانل دیگر داشت. مک شان و همکارانش [۴] گسیختگی دینامیکی صفحات دولایه فلز-پلیمر را بررسی نموده و نتیجه گرفتند افزایش جرم صفحه در اثر لایه پلیمری اثر خوبی در مقاومت ضربه ای دارد. کیتادا [۵] به بررسی استحکام و شکل پذیری نهایی پایه های پل فولادی پر از بتن در ژاپن پرداخت. در این تحقیق سه نوع پایه پل فلزی مربع شکل، با تقویت کننده های طولی داخلی و پر شده با بتن مورد بررسی قرار گرفته است و مشاهده شد که تقویت کننده ها و همچنین بتن باعث افزایش استحکام، مقاومت و انعطاف پذیری پل می شود. در پژوهشی توسط سقفی و همکارانش [۶] اثر پیش بارگذاری روی پاسخ ضربه پانل های کامپوزیتی ارزیابی شد. در این تحقیق آزمایش های ضربه با سرعت کم روی GFRP برای سه نوع متفاوت از انرژی اولیه ضربه انجام گرفت. نظری و خدمتی [۷] بررسی عددی روی ویژگی های مقاومت و تغییر شکل لوله های دارای پیش بارگذاری تحت ضربه جانبی با استفاده از نرم افزار المان محدود انسیس انجام دادند. در این پژوهش اثر پیش بارگذاری و موقعیت استفاده از بار جانبی اعمال شده بر روی مقاومت کمانشی و همچنین مقاومت نهایی بررسی شد و نشان دادند که با افزایش مقدار پیش بارگذاری، مقاومت نهایی کاهش می یابد و عضو تحت بارهای با مقدار کم تخریب می شود و تورفتگی آن کمتر خواهد بود. همچنین اوستا و همکاران [۸] اثر ضخامت و انحنا روی رفتار ضربه پانل های کامپوزیتی بررسی شد. در این مطالعه رفتار ضربه با سرعت بالا روی پانل ها مسطح و انحنادار به روش عددی مورد ارزیابی قرار گرفت. در تحقیقی تجربی و عددی توسط بیدی و همکاران [۹] اثر ضربه روی ورق های فولادی بررسی گردید. در این پژوهش رفتار ورق فولادی و انحنای آن ها در بهبود خواص ضربه مد نظر قرار گرفت. نتایج هر دو روش تجربی و عددی نشان داد که با افزایش شعاع انحاء، شتاب وارده افزایش می یابد که مشخص شده برای ورق صاف (شعاع انحنای بی نهایت) حداکثر شتاب ایجاد می شود. در تحقیقی توسط چوبینی و همکاران [۱۰] بررسی تجربی و عددی در مورد جذب انرژی و تغییر شکل لوله های جدار نازک توخالی و توپر با هندسی مقاطع دایره و مربع تحت بار ضربه ای عرضی انجام دادند. هدف از این تحقیق بررسی اثر تغییر شکل هندسی برای لوله آلومینیومی بر میزان جذب انرژی و بررسی اثر وجود فوم درون آن برای جذب انرژی بیشتر ناشی از ضربه عرضی بیان گردیده است. در پژوهشی توسط بیدی و همکاران [۱۱] تحلیل تجربی و عددی روی ورق خمیده دو لایه فولاد-پلی اوریا تحت بار ضربه ای انجام گرفت.

با توجه به این تحلیل‌ها دیده می‌شود که با افزایش شعاع انحنای ورق، مقدار حداکثر تغییر شکل ماندگار کاهش یافته ولی شتاب برخورد افزایش می‌یابد. البته با افزایش بیشتر شعاع ورق (نزدیک شدن رفتار به ورق مسطح) حداکثر شتاب ضربه زننده و همچنین تغییر شکل ماندگار، ثابت می‌ماند.

در این تحقیق، با توجه به اهمیت شناخت رفتار ورقها تحت ضربه با سرعت کم، بررسی آزمایشگاهی و همچنین المان محدود روی ورق‌های تخت ساده و تقویت شده با لچکی در برابر بارهای ضربه ای ناشی از سقوط آزاد وزنه انجام می‌شود و شتاب وارده، جذب انرژی (استهلاک انرژی)، تغییرشکل ماندگار این ورقها ارزیابی می‌گردد. در تحقیقی دیگر کربت و همکارانش [۱۲] به بررسی بارگذاری ضربه بر روی صفحات و پوسته‌ها با استفاده از پرتابه‌های با حرکت آزاد پرداختند. در این تحقیق در مورد نفوذ و سوراخ شدن صفحات و استوانه‌ها در اثر انواع پرتابه‌ها با سرعت‌های مختلف انجام شد. در این تحقیق از ۴ نوع نوک پرتابه استفاده شده است. انواع نوک‌ها شامل نوک تخت، نوک کروی، نوک تیز با زاویه ۹۰ درجه و نوک تیز با زاویه ۴۵ درجه می‌باشد. نتایج نشان داد که نوع شکست که در فلزات اتفاق می‌افتد عمدتاً به شکل دماغه (نوک) پرتابه، نسبت بین ضخامت هدف و قطر پرتابه و خواص مواد هدف بستگی دارد. تغییرشکل ورق‌ها در پرتابه‌های با دماغه‌ی تیز بصورت پارگی می‌باشد، اما تغییرشکل ورق‌ها در اثر پرتابه‌های با دماغه‌ی تخت و کروی بصورت کنده شدن قسمتی از ورق که محل برخورد پرتابه با ورق است می‌باشد. در مطالعه‌ای دیگر توسط بیدی و همکاران [۱۳] اثر افزودن نانو رس بر قابلیت جذب انرژی ورق‌های دولایه فولاد-پلی‌اوریا تحت بار ضربه‌ای بررسی گردید. نمونه‌های دولایه فولاد-پلی‌اوریا و فولاد-نانوپلی‌اوریا تهیه و مورد آزمایش کشش ساده و ضربه سقوط آزاد قرار گرفتند. آزمایش کشش نشان می‌دهد که با افزودن ذرات نانو مدول الاستیک حدود ۶۰ درصد افزایش و افزایش طول قبل از شکست نیز حدود ۷ درصد کاهش می‌یابد. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن نانورس به ماده پلیمری مقدار جذب انرژی را حدود ۳ درصد افزایش داده و حداکثر تغییرشکل ماندگار در اثر ضربه در قطعه را نیز حدود ۷ درصد کاهش می‌دهد. نظری و خدمتی [۱۴] به بررسی عددی از ویژگی‌های مقاومت و تغییر شکل اعضای لوله‌های پیش بارگذاری شده تحت بارهای ضربه جانبی با استفاده از نرم افزار المان محدود انسیس انجام شده است. اثر پیش بارگذاری و موقعیت استفاده از بار جانبی اعمال شده بر روی مقاومت کمانشی و همچنین مقاومت نهایی برای لوله‌ها تحت تاثیر ضربه جانبی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که پیش بارگذاری و موقعیت نیرو اعمال شده به طور مستقیم بر این دو عامل تاثیر می‌گذارد. به عبارت دیگر، با افزایش در مقدار پیش بارگذاری، مقاومت نهایی کاهش می‌یابد و عضو تحت بارهای با مقدار کم تخریب می‌شود. هرچه نیروی پیش بارگذاری در لوله بیشتر باشد، عمق (تورفتگی) آن کمتر خواهد بود. موارد زیادی روی استوانه‌های جدارنازک و ورق‌های مشبک نیز بارگذاری ضربه ای انجام گردیده است اما تقویت کننده‌ها صراحتاً مطرح نگردیده‌اند [۱۵-۲۵].

در این تحقیق به بررسی اثر ضربه با سرعت پایین بر روی ورق‌های فولادی تخت ساده و همراه با لچکی (تقویت کننده) پرداخته شده است. لذا برای این مطالعه از دو روش تحلیل آزمایشگاهی و عددی استفاده شده است. در ضمن اطلاعاتی همچون مقدار شتاب ماکزیمم، تغییرشکل پلاستیک و میزان جذب انرژی مورد ارزیابی قرار گرفته است. از کاربردهایی که می‌توان از نتایج این پژوهش برای آنها استفاده کرد، می‌توان به

سپر و بدنه خودروها، پایه فولادی پل های فلزی، جداره تانکرهای حمل سوخت، بدنه کشتی ها، سپرهای دریایی و غیره اشاره کرد.

۲- آزمایش

۲-۱- نمونه های آزمایش

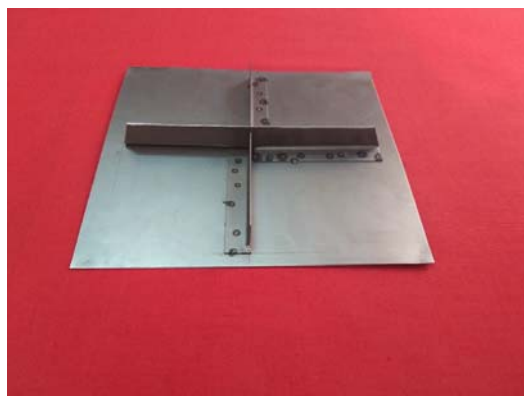
برای انجام آزمایش ضربه از ورق فولادی تخت با استاندارد St12 (St12 DIN 1623) به ضخامت ۱ میلی متر تولیدی شرکت فولادمبارکه اصفهان استفاده شده است. ابعاد کلی ورق ها به اندازه 20×22 سانتی متر می باشد که با توجه به نحوه قرارگیری روی تکیه گاه ها، ابعاد مفید این ورق ها 20×20 سانتی متر است. برای تقویت کننده ها (لچکی) از فولاد با جنس مشابه ورق به شکل نبشی به ارتفاع ۲ سانتی متر و ضخامت ۱ میلی متر با ۱ سانتی متر پهنای ناحیه اتصال به وجه پشتی ورق ها، بصورت عمود بر صفحه ورق با استفاده از جوش نقطه ای در فواصل یکسان (حدود ۲ سانتی متر) اتصال داده شده است. با توجه به اینکه سه ارتفاع سقوط مد نظر است، شش سری نمونه آزمایش شامل نمونه های ساده و با لچکی نیاز می باشد که برای هر کدام سه نمونه برای بررسی خطا در نظر گرفته شده است که در مجموع ۱۸ نمونه آزمایش می باشند. در این مقاله نامگذاری ورق های تخت از عبارت Inf که مخفف کلمه Infinity (ورق با شعاع انحنای بی نهایت) و عدد ارتفاع سقوط استفاده شده است. همچنین برای نامگذاری ورق های با تقویت کننده (لچکی) از حرف P معرف کلمه Pendentive در آخر عبارت استفاده شده است، در جدول (۱) ورق های مورد استفاده معرفی شده اند. در شکل (۱) ورق تخت ساده و ورق تخت تقویت شده با لچکی نمایش داده شده است.

۲-۲- مشخصات مکانیکی ورق ها

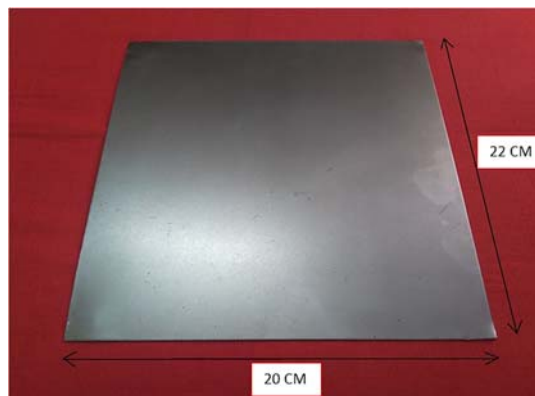
برای تعیین خواص مکانیکی ورق فولادی، طبق استاندارد ASTM E8 [۲۶] سه نمونه آزمایشگاهی برای استفاده در آزمایش تست کشش برش داده شده است. از نتایج حاصل از این آزمون خصوصیات الاستیک و پلاستیک فولاد مصرفی شامل مدول الاستیک (یانگ)، نقطه تسلیم، استحکام و کرنش نهایی از روی نمودار تنش- کرنش حاصل شده، بدست می آید. برای نمونه های آزمایشگاهی به شکل ورق، برای انجام آزمون کشش لازم است که نمونه هایی به شکل دمبل آماده سازی شوند.

جدول ۱- معرفی ورق های مورد استفاده

Inf-h5-P	Inf-h3.5-P	Inf-h2-P	Inf-h5	Inf-h3.5	Inf-h2	کد نمونه ها
تخت تقویت شده	تخت تقویت شده	تخت تقویت شده	تخت ساده	تخت ساده	تخت ساده	نوع ورق
5	3.5	2	5	3.5	2	ارتفاع اولیه سقوط وزنه (cm)



(ب)

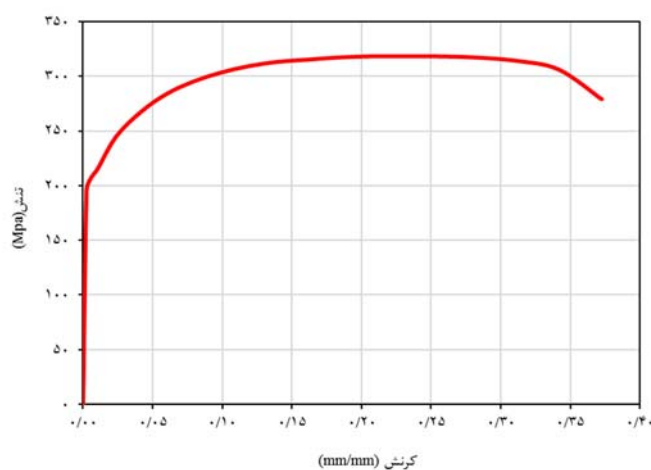


(الف)

شکل ۱- نمای ورق‌های تخت آزمایشگاهی. (الف) ورق ساده، (ب) ورق با لچکی (P).



شکل ۲- نمونه‌های قبل و بعد از تست کشش برای تعیین مشخصات مکانیکی فولاد.



شکل ۳- نمودار تنش-کرنش حاصل از تست کشش

جدول ۲- مشخصات مکانیکی فولاد مصرفی

جرم حجمی (kg/m ³)	مدول یانگ (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	ضریب پواسون (ν)
7850	210	196	318	0.3

در شکل (۲) نمونه‌ای از قبل و بعد آزمایش کشش نشان داده شده است. دستگاه مورد استفاده برای تست کشش، ۵ تنی و ساخت کشور تایوان و همچنین مربوط به شرکت GOTECH می‌باشد. نمودار تنش- کرنش حاصل از این آزمایش در شکل (۳) نشان داده شده است. همچنین در جدول (۲) مشخصه‌های مهم مکانیکی فولاد مصرفی همچون مقاومت تسلیم، مدول یانگ و تنش نهایی ارائه گردیده است.

۲-۳- فیکسچر

برای نگه داشتن نمونه‌ها و ایجاد تکیه‌گاه مناسب از فیکسچر نگهدارنده استفاده شده است. این فیکسچر برای مقید کردن حرکت ورق در دو لبه‌ی روبروی هم طراحی شده است و در جهت عمود بر این راستا، تکیه‌گاهی وجود ندارد؛ به عبارت دیگر، دو لبه از چهار لبه ورق گیردار شده است. میزان طول گیرداری ورق در تکیه‌گاه ۱ سانتی‌متر می‌باشد که با سفت کردن پیچ‌های فوقانی، تلاش شده است که از لغزش ورق‌ها جلوگیری شود. در بخش بالایی فیکسچر (برروی بال فوقانی تیرآهن‌ها) از یک پلیت فولادی به عنوان نگهدارنده‌ی ورق‌های اصلی استفاده شده است، که از نوع فولاد St37 با ابعاد ۱/۵ * ۸ * ۱۹ سانتی‌متر و مربوط به کارخانه فولاد مبارکه اصفهان می‌باشد.

نحوه قرارگیری ورق به این صورت است که ورق برروی تیرآهن‌ها (پایه‌ها) قرار می‌گیرد، سپس پلیت‌های فولادی نگهدارنده بر روی ورق قرار داده و با استفاده از ۶ پیچ به قطر ۸ میلی‌متر به بال فوقانی پایه‌ها متصل می‌گردد تا مانع از لغزش ورق‌ها در بین تیرآهن‌ها و پلیت شود. در شکل (۴) نمای فیکسچر مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است.

۲-۴- دستگاه آزمایش تست ضربه و شتاب‌سنج

دستگاه مورد استفاده برای آزمایش ضربه در این پژوهش، دستگاه تست سقوط آزاد (چکش سقوطی - دراپ‌همر) ۷۵۰۰ ژول (DH - TM 7500 J) می‌باشد. حداکثر ارتفاع قابل تنظیم این دستگاه ۳ متر می‌باشد و جرم ضربه زننده در این دستگاه از ۱۸۰ تا ۲۵۰ کیلوگرم قابل تنظیم کردن می‌باشد، که جرم ضربه زننده برای این تحقیق ۱۸۰ کیلوگرم انتخاب شده است.

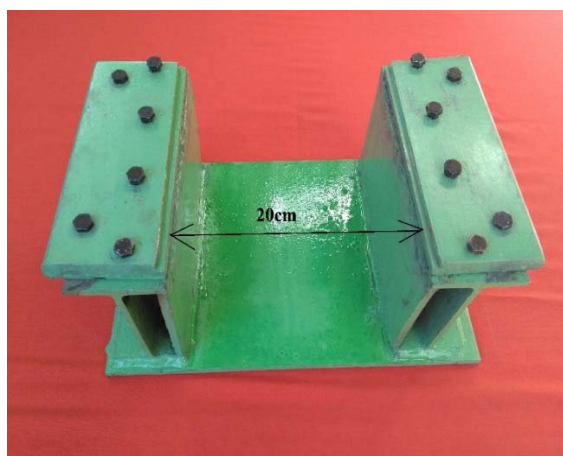
دماغه ضربه زننده به شکل نیم کره به قطر ۱۲ سانتی‌متر می‌باشد. این دستگاه در دانشگاه لرستان ساخته شده و از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده است، که عبارت‌اند از قسمت کنترل مرکزی دستگاه، سیستم اندازه‌گیری و ضبط اطلاعات، موتور، پایه‌های نگهدارنده‌ی ضربه زننده، وزنه‌های ضربه زننده و دماغه ضربه زننده به شکل نیم‌کره (عرفچین) می‌باشد. در شکل (۵) تصویری از دستگاه چکش سقوطی و دماغه ضربه

زننده دستگاه نشان داده شده است. همچنین در جدول (۳) خواص مکانیکی دماغه ضربه زننده بیان شده است. برای ثبت تاریخچه شتاب از لحظه شروع تماس ضربه زننده با نمونه‌ها تا مدت زمان حدود دو ثانیه بعد از ضربه توسط شتاب سنج ضبط شده است. لذا تاریخچه شتاب با استفاده از سنسور شتاب سنج مدل ACC-4g ساخت دانشگاه لرستان اندازه‌گیری می‌شود. دامنه عملکرد این سنسور از 0 تا 4g و یک سنسور با ظرفیت بیشتر از 0 تا 200g می‌باشد. مبنای محاسبات برای اندازه‌گیری شتاب، حرکت ضربه زننده و وزنه متصل به آن می‌باشد، که توسط شتاب سنج متصل به مجموعه وزنه، اندازه‌گیری شده است. شتاب سنج‌ها توسط پیچ یا چسب به ضربه زننده متصل می‌شود که در این دستگاه با استفاده از چسب به ضربه زننده متصل شده است.

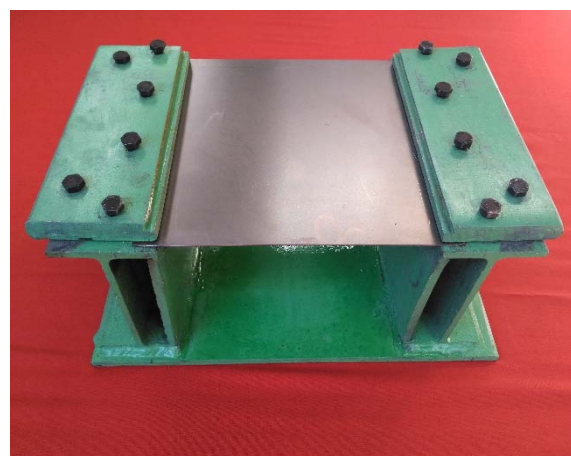
۲-۵- نتایج آزمایش تجربی

۲-۵-۱- حداکثر شتاب ضربه

شتاب ضربه به عنوان یک پارامتر مهم در بررسی عملکرد ورق‌ها می‌باشد، که نتایج حاصل از این تحلیل بصورت نمودارهای شتاب-زمان حاصل از دستگاه شتاب‌سنج، ضبط شده است. در نمودار شتاب-زمان قله نمودارها نشان دهنده حداکثر شتاب در لحظه برخورد ضربه‌زننده به ورق می‌باشد، لذا در جدول (۴) ماکزیمم شتاب ایجاد شده در هر ورق آورده شده است. همانطور که قابل پیش‌بینی بود، با افزایش انرژی ضربه زننده ناشی از افزایش ارتفاع سقوط، شتاب وارده در هر دو حالت ورق ساده و با تقویت‌کننده افزایش می‌یابد. با این وجود با مقایسه نتایج نمونه‌های دارای تقویت‌کننده با نمونه‌های ساده متناظر (با ارتفاع سقوط یکسان) دیده می‌شود که برای نمونه‌های با ارتفاع ۲، ۳/۵ و ۵ سانتی‌متر، وجود تقویت‌کننده‌ها به ترتیب باعث افزایش شتاب ضربه در حدود ۷، ۴ و ۳ درصد نسبت به نمونه‌های ساده شده است. در شکل (۶) نمودار شتاب-زمان برای ورق ساده و با لچکی نشان داده شده است.



(ب)

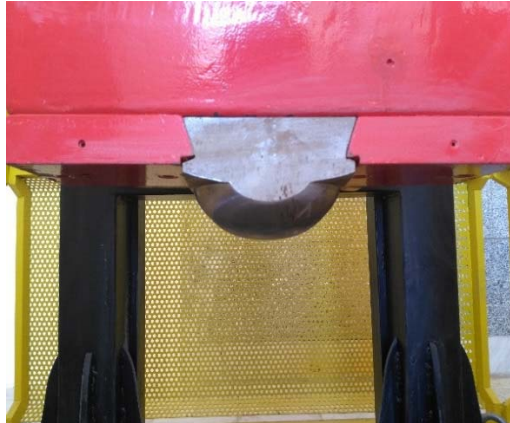


(الف)

شکل ۴- (الف) نمای ورق تخت ساده تثبیت شده روی فیکسچر، (ب) فیکسچر.

جدول ۳- مشخصات مکانیکی دماغه ضربه زننده-ASTM A536

درصد تغییر طول	سختی برینل	مدول یانگ (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)
2	350	310	620	827



(ب)



(الف)

شکل ۵- دستگاه سقوط وزنه. (الف) نمای کلی، (ب) دماغه ضربه زننده.

۲-۵-۲- حداکثر تغییر شکل پلاستیک

برای اندازه گیری تغییر شکل ماندگار هر ورق به عنوان دیگر پارامتر مهم در بررسی عملکرد ورق ها، از سیستم اندازه گیری متصل به دستگاه استفاده شده است. با توجه به محدودیت های دستگاه از جمله قطر دماغه ضربه زننده و همچنین برای کم کردن مقدار خطا در محاسبه تغییر شکل ماندگار پس از پایان فرآیند ضربه، از روش دستی هم برای محاسبه تغییر شکل استفاده شده است. مطابق با جدول (۴)، تقویت کننده های استفاده شده در پشت ورق ها باعث کنترل و کاهش تغییر شکل ها شده است، بطوریکه برای نمونه های با ارتفاع ۲، ۳/۵ و ۵ سانتی متر، تغییر شکل ماندگار به ترتیب ۳۳، ۲۷ و ۲۳ درصد نسبت به نمونه های ساده کاهش می یابد. در شکل (۷) نمایی از تغییر شکل ورق های تخت ساده و دارای لچکی تست آزمایشگاهی نشان داده شده است.

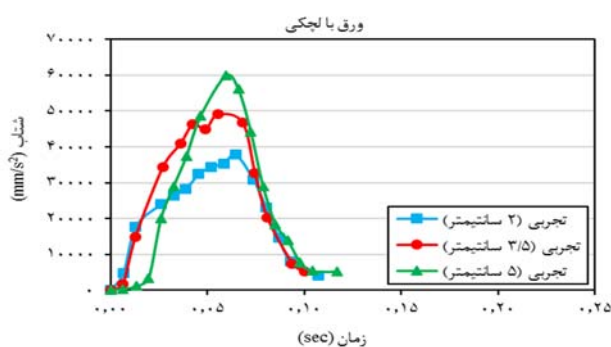
۲-۵-۳- مقدار جذب انرژی

یکی دیگر از پارامترهای مهم که در تست های آزمایشگاهی مربوط به ضربه سقوط آزاد به آن پرداخته می شود جذب انرژی می باشد. لذا در این تحقیق، برای بررسی عملکرد و تأثیر ایجاد تقویت کننده ها در پشت ورق ها بر روی نتایج، مقدار جذب انرژی در ورق های ساده و با تقویت کننده مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به داده هایی که از تست آزمایشگاهی بدست آمده است، برای محاسبه مقدار جذب انرژی از نرم افزار گراف نسخه ۴.۲.۴ استفاده شده است. در شکل (۸) نمودار نیرو-جابجایی ورق ساده و با تقویت کننده را برای ارتفاع سقوط ۵ سانتی متر مشاهده می کنید، همچنین مساحت زیر نمودار که معادل جذب انرژی نمونه می باشد

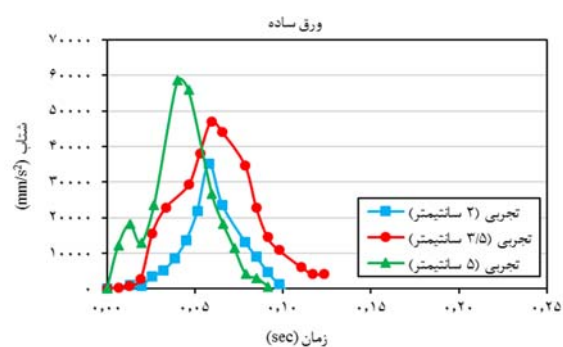
با عبارت Area در شکل لحاظ شده است. همینطور نتایج حاصل از تست آزمایشگاهی در جدول (۴) آورده شده است. در ضمن با ضرب کردن عدد ۱۸۰ (که معادل وزن ضربه زننده می‌باشد) در داده‌های شتاب مقدار نیرو بدست می‌آید. با توجه به نتایج، مقدار جذب انرژی ورق‌های با تقویت‌کننده حدود ۲ درصد کمتر از ورق‌های ساده می‌باشد.

جدول ۴- نتایج حاصل از تست تجربی

نمونه	Inf-h2	Inf-h3.5	Inf-h5	Inf-h2-P	Inf-h3.5-P	Inf-h5-P
شتاب حداکثر (m/s^2)	35.2	47	58.5	37.8	49.1	60
تغییر شکل پلاستیک حداکثر (mm)	13.4	17.1	20.3	9	12.6	15.6
جذب انرژی (J)	33.96	59.3	87.71	33.53	58.37	86.22

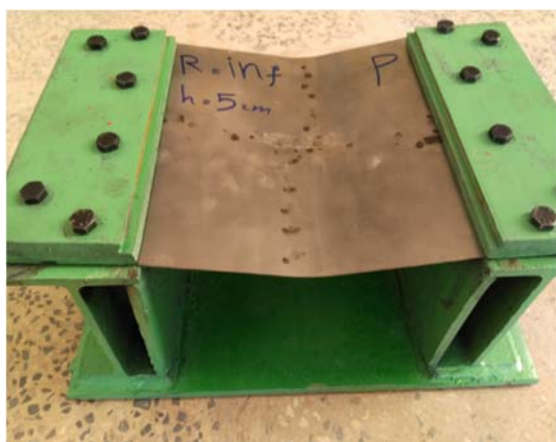


(ب)



(الف)

شکل ۶- نمودار شتاب-زمان ورق‌ها (مدل تجربی). (الف) ورق تخت ساده، (ب) ورق با لچکی (P)

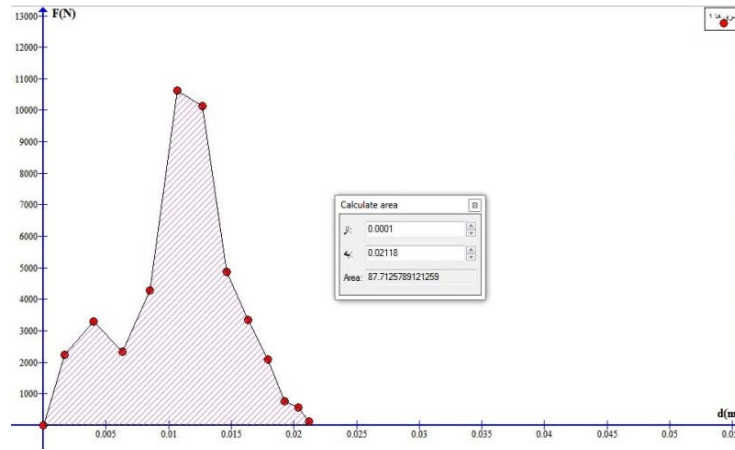


(ب)

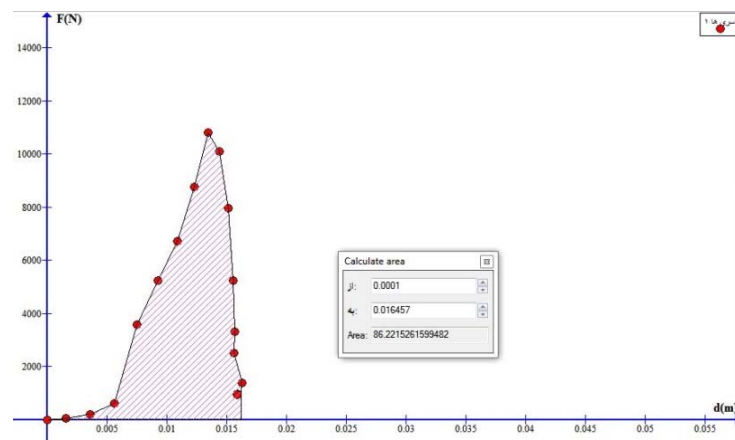


(الف)

شکل ۷- ورق تخت دارای لچکی با ارتفاع سقوط ۵ سانتیمتر. (الف) هنگام برخورد، (ب) بعد از برخورد



(الف)



(ب)

شکل ۸- نمودار نیرو- جابجایی و مقدار جذب انرژی برای ارتفاع ۵ سانتیمتر. (الف) ورق ساده، (ب) ورق با لچکی (P)

۳- مدل سازی عددی

به منظور بررسی عددی رفتار ورق های مسطح، تحت ضربه ناشی از سقوط آزاد وزنه و مقایسه با داده های آزمایشگاهی، مدل سازی المان محدودی با استفاده از نرم افزار ABAQUS [۲۷] برای هر شش نمونه آزمایشگاهی انجام شده است. مراحل این شبیه سازی که بطور کامل در این نرم افزار انجام شده است، به صورت زیر می باشد:

۳-۱- مدل سازی رفتار فولاد

نمودار تنش- کرنش فولاد St12 بدست آمده در آزمون کشش تک محوری شکل (۳) به عنوان مشخصه اصلی رفتار این مصالح در نظر گرفته شده است. محدوده رفتار خطی به صورت الاستیک ایزوتروپیک با شیبی برابر با مدول یانگ تا نقطه تنش تسلیم و ضریب پواسون 0.3 لحاظ شده است. در تغییر شکل های بزرگتر، مصالح فولادی وارد محدوده رفتار با تغییر شکل پلاستیک می شوند. برای تعریف مرحله پلاستیک از مدل پلاستیک ایزوتروپیک کلاسیک با تعریف تنش تسلیم در هر نقطه از نمودار در برابر کرنش پلاستیک استفاده گردیده است.

۲-۳- مدل هندسی و مش بندی مصالح

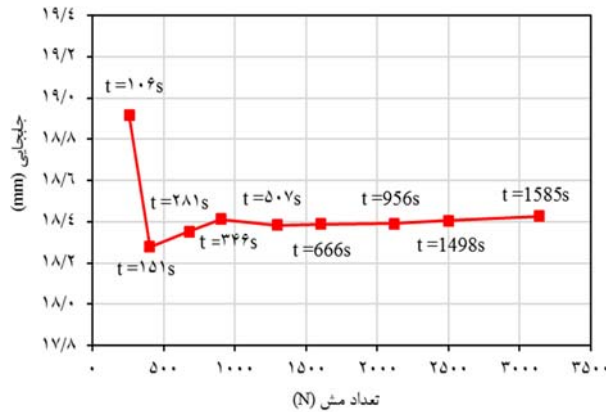
ابعاد هندسی ورق‌ها در مدل عددی به صورت مربع 20×20 سانتی‌متر با ضخامت ۱ میلی‌متر می‌باشد. ابعاد تقویت‌کننده‌ها نیز همانند نمونه‌های آزمایشگاهی به طول ۲۰ و ارتفاع ۲ سانتی‌متر و همچنین ضخامت ۱ میلی‌متر مدل سازی شده‌اند. برای مش‌بندی این عناصر از المان‌های غشایی ۴ گرهی با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته با نام S4R استفاده شده است. مدل سه بعدی ضربه زننده کروی شکل نیز به علت سختی بسیار زیاد آن به صورت discrete rigid به صورت پوسته در نظر گرفته شده است تا در عین سادگی در مدلسازی ناشی از کاهش المان‌های آن، از هرگونه تغییر شکل آن نیز جلوگیری شود. لذا تعداد المان‌های آن برابر با ۸۵۶ عدد و از نوع R3D4 می‌باشد.

در مدل‌های آزمایشگاهی، شکست جوش‌ها دیده نمی‌شود. بر این اساس در مدل سازی عددی برای ایجاد مدل بدون جزئیات پیچیده از اتصال tie استفاده شد. همچنین در این زمینه برای کنترل اثر بر روی ورق‌ها، حالت‌های مختلف اتصال tie در نظر گرفته شد و نتایج با مدل آزمایشگاهی مقایسه گردید و در نهایت در مدل سازی عددی، اتصال تقویت‌کننده‌ها به ورق به صورت نقطه‌ای و در فواصل مناسب انتخاب شد تا سختی نمونه عددی تا حد امکان به مدل آزمایشگاهی نزدیک گردد.

۳-۳- استقلال از شبکه و انتخاب اندازه مش مناسب برای صفحات

یکی از اقدامات اساسی در تحلیل عددی، انتخاب اندازه مناسب مش برای المان مورد نظر می‌باشد تا علاوه بر دقت مناسب، بهینه‌ترین حالت نیز باشد. در روش اجزاء محدود معمولاً هر چه تعداد اجزاء بیشتر باشد جواب مسئله از دقت بیشتری برخوردار است؛ از طرف دیگر افزایش تعداد اجزاء باعث افزایش زمان حل مسئله می‌شود. برای به دست آوردن تعداد اجزای مناسب باید حساسیت یک پارامتر خاص را با افزایش تعداد اجزاء بررسی نمود. به همین منظور در این تحقیق اثر تعداد اجزاء بر میزان جابجایی برای نمونه ورق تخت ساده برای ارتفاع ۵۰ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفته است. به همین دلیل مدل عددی صفحه فولادی را با تعداد مش مختلف برای یک ارتفاع سقوط، مورد تحلیل قرار داده و مقادیر جابه‌جایی و زمان تحلیل برای هر مدل استخراج می‌شود. تعداد مدل‌های مش‌بندی شده در این تحقیق ۹ مدل می‌باشد، که عبارت‌اند از ۲۵۶، ۴۰۰، ۶۷۶، ۹۰۰، ۱۲۹۶، ۱۶۰۰، ۲۱۱۶، ۲۵۰۰، ۳۱۳۶ المان.

در شکل (۹) نمودار تغییر مکان در مقابل تعداد مش استفاده شده برای تحلیل هر ورق نشان داده شده است. همانطور که در هر دو نمودار دیده می‌شود، تغییرات نتایج حاصل از تحلیل برای تعداد مش بیش از ۹۰۰ تقریباً نامحسوس است و نمودار افقی شده است. بر این اساس برای تحلیل‌های عددی مورد نظر از این تعداد مش استفاده شده است.

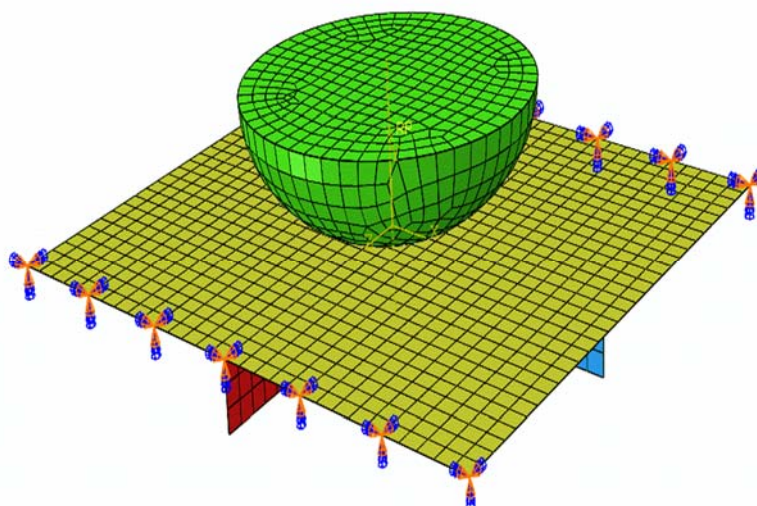


شکل ۹- نمودار جابه‌جایی ماندگار بر حسب تعداد مش.

۳-۴- بارگذاری و شرایط مرزی

با توجه به اینکه ورق‌های تخت فولادی به پهنای ۱ سانتی‌متر درون نشیمن‌گاه فیکسچر مقید شده‌اند، در مدل‌سازی برای سادگی، این ناحیه را حذف کرده و شرایط مرزی گیرداری با بستن هر شش درجه آزادی ورق شامل سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی دوران در دو لبه روی هم را فراهم گردیده است شکل (۱۰). برای شبیه‌سازی برخورد ضربه زننده از سرعت معادل در لحظه شروع ضربه استفاده شده است که از برابر قرار دادن انرژی پتانسیل ضربه زننده در ارتفاع مورد نظر با انرژی جنبشی در لحظه پیش از برخورد بدست می‌آید. در این تحقیق حداکثر سرعت در لحظه برخورد وزنه به هدف با فرض عدم وجود اصطکاک بین یاتاقان‌های ضربه زننده و میله‌های نگهدارنده وزنه و با استفاده از اصل بقای انرژی قابل محاسبه می‌باشد، لذا معمولاً سرعت برخورد را از روی ارتفاع سقوط آزاد و براساس اصل بقای انرژی محاسبه می‌کنند، ولی در صورت نیاز به دقت بیشتر، بایستی با قرار دادن سنسور سرعت مناسب در نقطه قبل از برخورد ضربه زننده با قطعه مورد آزمایش، سرعت برخورد را اندازه‌گیری نمود. با این وجود برای سه ارتفاع مورد نظر در این پژوهش، سرعت با استفاده از رابطه ارتفاع سقوط (۱) بدست آمده است:

$$v = \sqrt{2gh} \rightarrow \begin{cases} \text{if } h = 20\text{mm} \rightarrow v = 626 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \\ \text{if } h = 35\text{mm} \rightarrow v = 828 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \\ \text{if } h = 50\text{mm} \rightarrow v = 990 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \end{cases} \quad (1)$$



شکل ۱۰- مدل المان محدود تست ضربه سقوط آزاد.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- مقایسه نتایج شتاب تحلیل تجربی و عددی

پس از تعیین مش مناسب برای صفحه فولادی، نمونه‌های آزمایشگاهی مختلف موجود در این تحقیق به وسیله روش مدل‌سازی ذکر شده شبیه‌سازی گردیدند. در شکل (۱۱) نمودار شتاب-زمان مدل عددی و تجربی به تفکیک ارتفاع‌های مختلف برای هر دو نوع ورق ساده و با تقویت‌کننده نشان داده شده است. نتایج عددی شتاب تست آزمایشگاهی و مدل عددی در جدول (۵) آورده شده است. روند نتایج شتاب مدل عددی مشابه تست آزمایشگاهی می‌باشد و با توجه به نتایج، درصد اختلاف این دو روش کمتر از ۹ درصد می‌باشد. که این مقدار به دلایلی همچون وجود اصطکاک بین یاتاقان‌های ضربه زننده و میله‌های نگهدارنده وزنه، همچنین وجود میرایی می‌باشد، که در مدل عددی اعمال نشده است. البته باید در نظر داشت که شرایط تکیه‌گاهی و طریقه ساخت لچکی‌ها و نوع جوش عامل مهمی در مقدار نتایج می‌باشد.

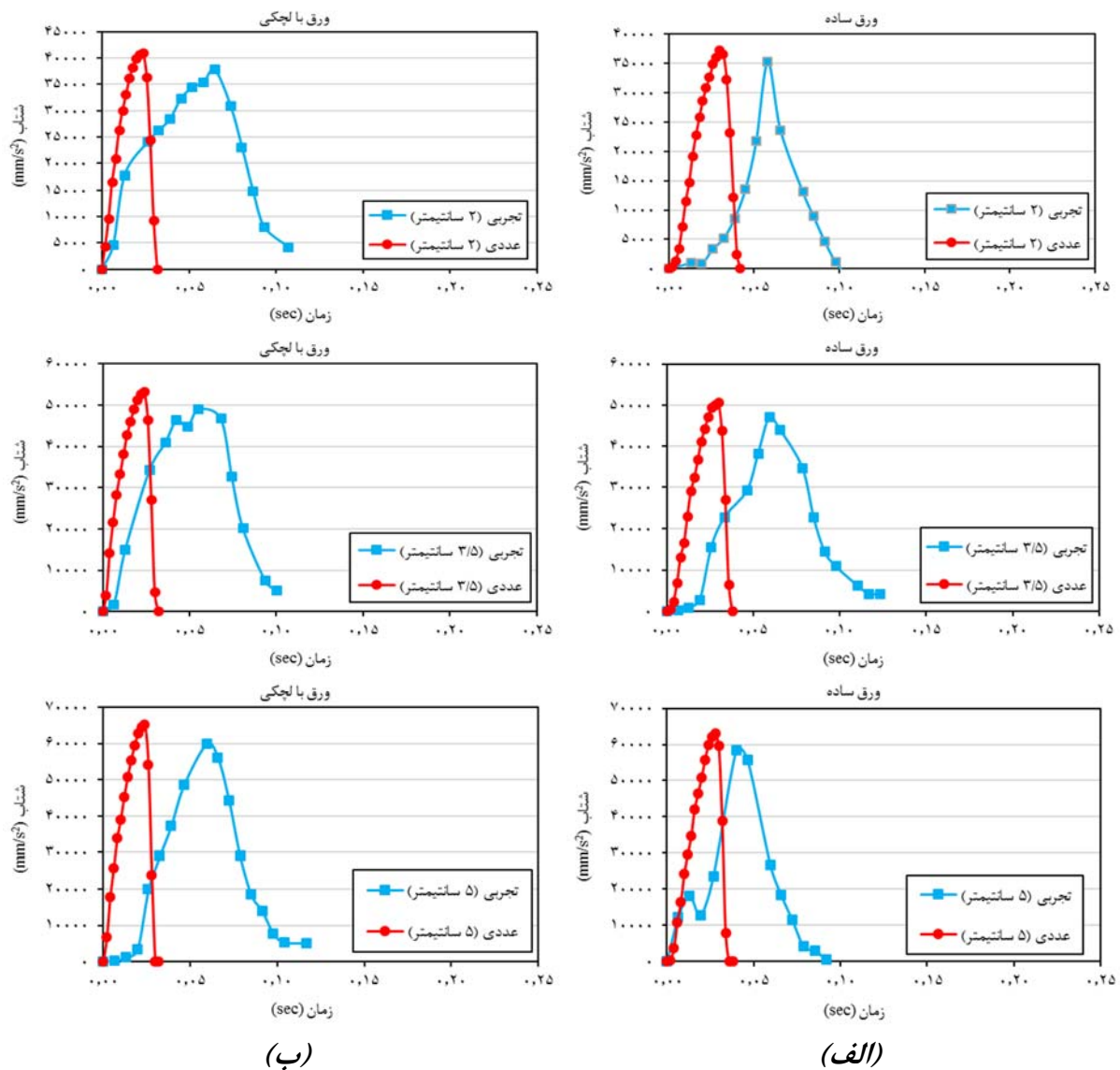
۴-۲- مقایسه نتایج تغییر شکل تحلیل تجربی و عددی

تغییر شکل پلاستیک حاصل از انجام مدل‌سازی عددی به صورت نمودار جابجایی-زمان بدست آمده است. در شکل (۱۲) نمودار تغییر شکل پلاستیک مدل عددی برای هر دو ورق ساده و با لچکی نشان داده شده است. براساس این نمودار، تغییر شکل تا حداکثر مقدار خود افزایش پیدا کرده که معادل تغییر شکل الاستیک و پلاستیک ورق‌ها می‌باشد، و بعد از بلند شدن ضربه زننده از روی ورق تغییر شکل الاستیک موجود در ورق حذف شده و تغییر شکل نهایی (پلاستیک) در ورق باقی می‌ماند، که در این مرحله نمودار به صورت افقی در خواهد آمد. در جدول (۶) نتایج تغییر شکل پلاستیک مدل عددی و همچنین مقایسه آن‌ها با نتایج تست تجربی آورده شده است.

در مدل عددی، مشابه تست آزمایشگاهی، تغییر شکل پلاستیک ورق های با تقویت کننده به طور چشمگیری نسبت به ورق های ساده کاهش یافته است، و همچنین درصد اختلاف این دو روش کمتر از ۱۰ درصد می باشد. در شکل (۱۳) و (۱۴) مدهای تغییر شکل ورق های ساده و با تقویت کننده نمایش داده شده است.

جدول ۵- نتایج شتاب ماکزیمم حاصل از تست تجربی و مدل عددی.

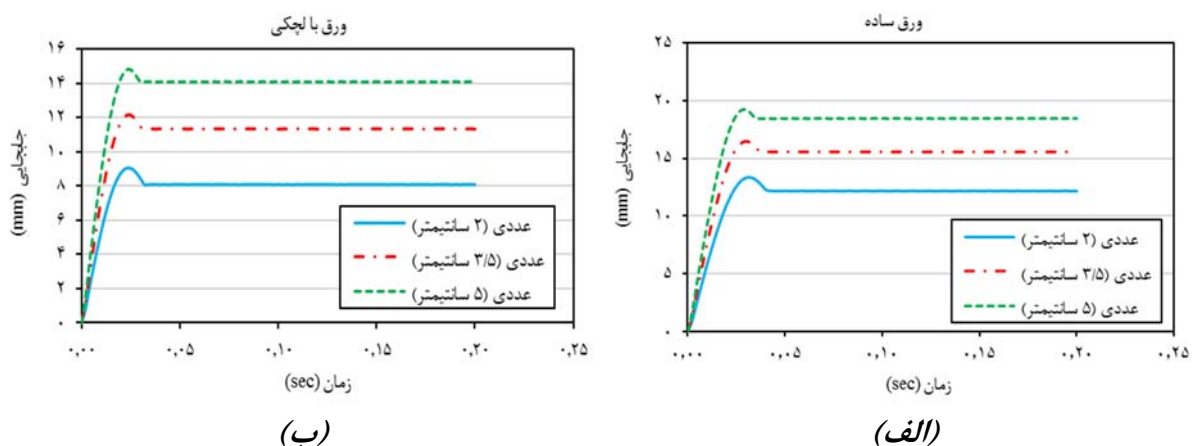
نمونه	Inf-h2	Inf-h3.5	Inf-h5	Inf-h2-P	Inf-h3.5-P	Inf-h5-P
شتاب حداکثر تجربی	35.2	47	58.5	37.8	49.1	60
عددی (m/s ²)	37.25	50.5	63.13	40.93	53.26	65.29
درصد اختلاف (/.)	5.7	7.3	7.8	8.2	8.4	8.8



شکل ۱۱- نمودار شتاب-زمان مدل تجربی و عددی. (الف) ورق ساده، (ب) ورق با لچکی.

جدول ۶- نتایج تغییر شکل پلاستیک حاصل از تست تجربی و مدل عددی.

نمونه	Inf-h2	Inf-h3.5	Inf-h5	Inf-h2-P	Inf-h3.5-P	Inf-h5-P
تغییر شکل پلاستیک (mm)	تجربی 13.4	تجربی 17.1	تجربی 20.3	تجربی 9	تجربی 12.6	تجربی 15.6
عددی	12.2	15.53	18.4	8.2	11.36	14.1
درصد اختلاف (%)	8.9	9.1	9.3	8.8	9.8	9.6

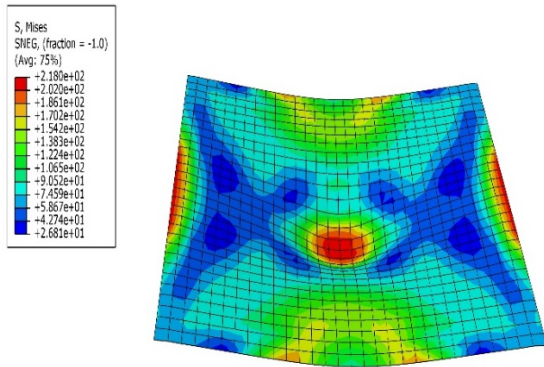


شکل ۱۲- نمودار جابجایی-زمان مدل عددی. (الف) ورق ساده، (ب) ورق با لچکی.

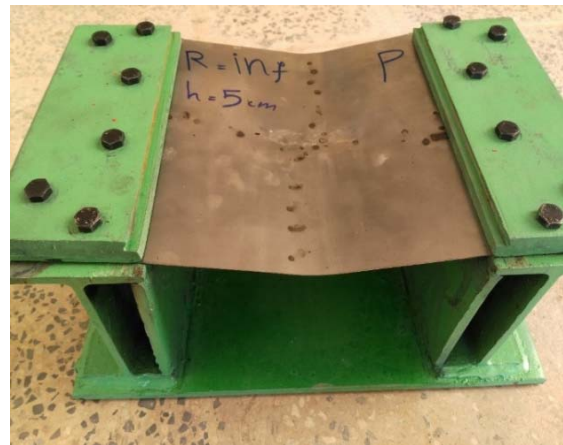
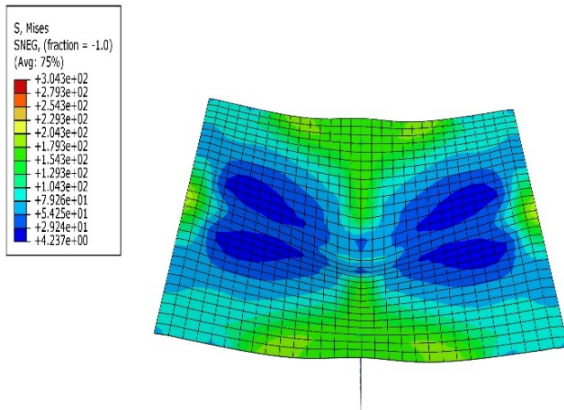
۴-۳- مقایسه نتایج جذب انرژی تحلیل تجربی و عددی

در شکل (۱۵) (الف) و (ب) نمودارهای مقدار بار-جابجایی ورق‌های مدل عددی در دو حالت ساده و با لچکی (تقویت‌کننده) در ارتفاع‌های مختلف سقوط ضربه‌زننده نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، شکل نمودارها از الگوی یکسانی برخوردار هستند و با افزایش نیروی ضربه با عملکرد تقریباً خطی افزایش تغییر شکل خواهیم داشت. با این وجود نمونه‌های با لچکی در ابتدای ضربه برخلاف نمونه‌های ساده سختی بیشتری از خود نشان می‌دهند. در نتیجه به ازای تغییر شکل یکسان، ورق‌های تقویت شده با لچکی در مقایسه با نمونه‌های ساده نیروی بیشتری را متحمل می‌شود.

در جدول (۷) نتایج عددی جذب انرژی ورق‌های ساده و با لچکی و همچنین نتایج تست تجربی برای مقایسه هر دو تحلیل ارائه شده است. در نتایج مدل عددی مطابق با نتایج تست آزمایشگاهی دیده می‌شود، که مقدار جذب انرژی ورق‌های دارای تقویت‌کننده نسبت به ورق‌های ساده به طور میانگین با کاهش اندکی در حدود ۱/۴ درصد مواجه می‌شوند. که دلیل اصلی آن وجود تقویت‌کننده‌ها می‌باشد، که باعث افزایش سختی و مقاومت ورق‌ها در برابر نیروی ضربه شده است. چنانچه مشاهده می‌کنید درصد اختلاف این دو روش تحلیل کمتر از ۳ درصد می‌باشد. برای نمونه و مقایسه، نمودارهای جذب انرژی دو حالت ساده و با لچکی در شکل (۱۶) نشان داده شده است.

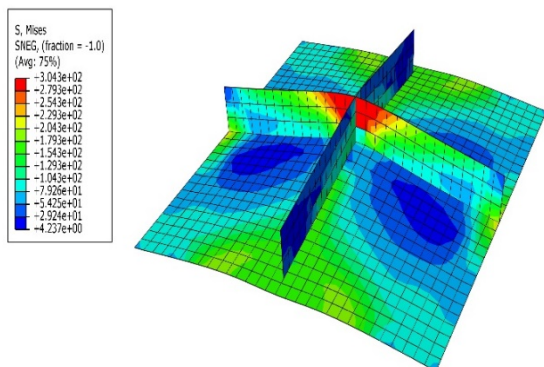


(الف)



(ب)

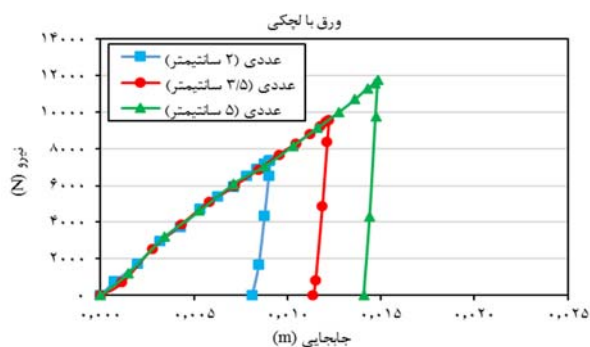
شکل ۱۳- مقایسه الگوی تغییرشکل تست آزمایشگاهی و مدل عددی. (الف) ورق تخت ساده، (ب) ورق تخت با لچکی.



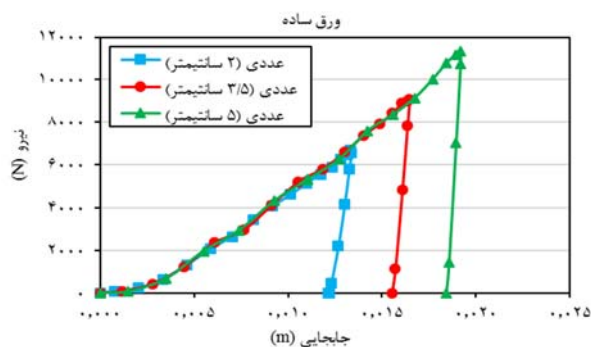
(ب)

(الف)

شکل ۱۴- مد تغییرشکل لچکی. (الف) آزمایشگاهی، (ب) عددی.



(ب)

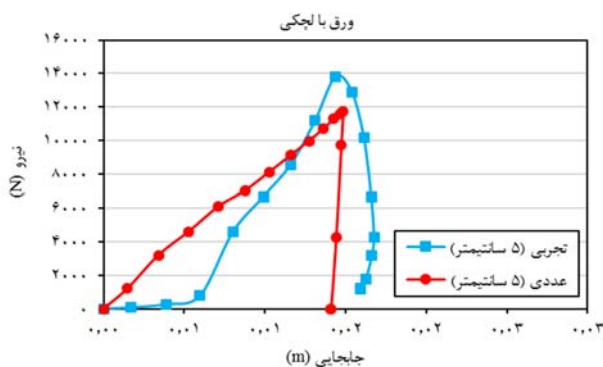


(الف)

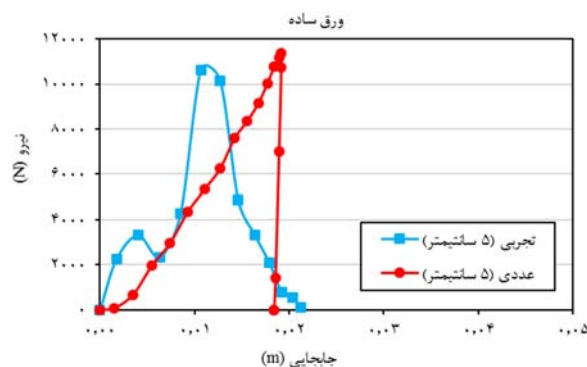
شکل ۱۵- نمودار بار- جابه‌جایی مدل‌های عددی. (الف) ورق ساده، (ب) ورق با لچکی.

جدول ۷- نتایج مقدار جذب انرژی

نمونه	Inf-h2	Inf-h3.5	Inf-h5	Inf-h2-P	Inf-h3.5-P	Inf-h5-P
جذب انرژی تجربی	33.96	59.3	87.71	33.53	58.37	86.22
(J) عددی	32.9	58.46	85.81	32.52	57.68	85.58
درصد اختلاف (%)	3.1	1.4	2.1	3	1.1	0.7



(ب)



(الف)

شکل ۱۶- مقایسه نمودار بار-جابه‌جایی تست آزمایشگاهی و مدل عددی. (الف) ورق ساده، (ب) ورق با لچکی.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش بررسی آزمایشگاهی و عددی بر روی رفتار ورق‌های تخت فولادی ساده و تقویت شده با لچکی (تقویت‌کننده) تحت ضربه با سرعت پایین ناشی از سقوط آزاد وزنه انجام شد.

بر اساس نتایج بدست آمده از این تحقیق، ورق‌هایی که دارای تقویت‌کننده می‌باشند، از سختی بیشتری برخوردار هستند، لذا اثر شوک، شتاب و نیروی ضربه در این ورق‌ها بیشتر از ورق‌های ساده می‌باشد، و درصد اختلاف شتاب بین دو روش تحلیل تجربی و عددی کمتر از ۹ درصد می‌باشد. اما تغییر شکل ماندگار در ورق‌های با تقویت‌کننده به طور قابل توجهی کمتر از ورق‌های ساده است، و می‌توان گفت، درصد تأثیر تقویت‌کننده بر روی تغییر شکل بیشتر از شتاب می‌باشد. همچنین درصد اختلاف تغییر شکل بین دو روش تحلیل تجربی و عددی کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد. ورق‌های دارای تقویت‌کننده نسبت به ورق‌های ساده جذب انرژی کمتری دارند، البته این کاهش خیلی اندک می‌باشد و درصد اختلاف بین دو روش تحلیل کمتر از ۳ درصد می‌باشد. نتایج حاصل از دو روش تحلیل تجربی و عددی حاکی از آن است که مدل عددی از دقت مناسب و نزدیک به روش تحلیل آزمایشگاهی دارد. در ورق‌های ساده اولین ناحیه‌ای که به حد جاری شدن می‌رسد وسط ورق می‌باشد و سپس لبه‌هایی که بر روی تکیه‌گاه‌ها قرار می‌گیرند به تسلیم می‌رسند، اما در ورق‌های تقویت شده، محل تقاطع بین دو تقویت‌کننده اولین نقطه‌ای است که به حد تسلیم می‌رسد، لذا برای تسلیم شدن ورق اصلی نیاز به نیروی بیشتری می‌باشد. که این عامل نشان از استحکام بالای این ورق‌ها می‌باشد. در ضمن به دلیل اینکه تکیه‌گاه‌ها فقط در دو لبه ایجاد شده است، تقویت‌کننده‌ای که موازی تکیه‌گاه‌ها قرار دارد تأثیر کمتری در تحمل نیروی ضربه دارد. لذا برای اینکه بتوان از تمام ظرفیت هر دو تقویت‌کننده استفاده کرد، هر چهار لبه را گیردار در نظر گرفت. برای بررسی بیشتر می‌توان به جای تقویت‌کننده نواری از انواع جاذب‌های مربعی، لوله‌ای و غیره استفاده کرد. از نتایج این پژوهش می‌توان در سپر خودروها، بدنه تانکرهای حمل سوخت و بدنه کشتی‌ها استفاده کرد.

مراجع

- [1] Merzhievskii, L. A., and Titov, V. M., "Perforation of Plates Through High Velocity Impact", Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, Vol. 16, pp. 757 (1975).
- [2] O'Toolea, B., Trabiaa, M., Hixsonb, R., Roya, S. K., Penab, M., Beckerb, S., Daykinb, E., Machorro, E., Jenningsa, R., and Matthes, M., "Modeling Plastic Deformation of Steel Plates in Hypervelocity Impact Experiments", Journal of Procedia Engineering, Vol. 103, pp. 458-465 (2015).
- [3] Kumar, P., LeBlanc, J., Stargel, D., and Shukla, A., "Effect of Plate Curvature on Blast Response of Aluminum Panels", International Journal of Impact Engineering, Vol. 46, No. 29, pp.74-85 (2012).
- [4] McShane, G. J., Stewart, C., Aronson, M.T., Wadley, H. N. G., Fleck, N. A., and Deshpande, V. S., "Dynamic Rupture of Polymer-Metal Bilayer Plates", International Journal of Solids and Structures, Vol. 45, No. 16, pp. 4407-4426 (2008).
- [5] Kitada T., "Ultimate Strength and Ductility of Concrete-filled Steel Bridge Piers", Engineering Structures, Vol. 20, No. 4, pp. 347-354, (1998).

- [6] Saghafi, H., Minak, G., and Zucchelli, A., "Effect of Preload on the Impact Response of Curved Composite Panels", *Composites: Part B*, Vol. 60, pp. 74-81, (2014).
- [7] Khedmati, K., and Nazari, M., "A Numerical Investigation into Strength and Deformation Characteristics of Preloaded Tubular Members under Lateral Impact Loads", *Marine Structures*, Vol. 25, pp. 33-57, (2012).
- [8] Ustaa, F., Mullaoglu, F., Türkmen, H. S., Balkan, D., Mecitoglu, Z., Kurtaran, H., and Akay, E., "Effects of Thickness and Curvature on Impact Behaviour of Composite Panels", *Journal of Procedia Engineering*, Vol. 167, pp. 216-222, (2016).
- [9] Bidi, A., Liaghat, Gh., and Rahimi, Gh., "Experimental and Numerical Analysis of Impact on Steel Curved Panels", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 281-288, (2016). (In Persian).
- [10] Choubini, M., Liaghat, Gh. H., and Hossein, Pol M., "Investigation of Energy Absorption and Deformation of Thin Walled Tubes with Circle and Square Section Geometries under Transverse Impact Loading", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 75-83 (2015). (In Persian).
- [11] Bidi, A., Liaghat, A., and Rahimi, Gh., "Experimental and Numerical Analysis of Impact on Curved Steel-polyurea Bi-layer Panels", *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 3, pp. 207-214, (2016). (In Persian).
- [12] Corbett, G. G., Reid, S. R., and Johnson, W., "Impact Loading of Plates and Shells by Free-Flying Projectiles: A Review", *Int. J. Impact Engng*, Vol. 18, No. 2, pp. 141-230 (1995).
- [13] Bidi, A., Liaghat, Gh., and Rahimi, Gh., "Effect of Nano Clay Addition to Energy Absorption Capacity of Steel-polyurea Bi-layer", *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 2, pp. 157-164, (2016).
- [14] Khedmati, M.R., and Nazari, M., "A Numerical Investigation into Strength and Deformation Characteristics of Preloaded Tubular Members under Lateral Impact Loads", *Marine Structures*, Vol. 25, pp. 33-57, (2012).
- [15] Hatami, H., and Ghodsbin Jahromi, A., "Energy Absorption Performance on Multilayer Expanded Metal Tubes under Axial Impact", *Thin-walled Structures*, Vol. 116, pp. 1-11 (2017).
- [16] Nouri, M.D., Hatami, H., and Jahromi, A.G., "Experimental and Numerical Investigation of Expanded Metal Tube Absorber under Axial Impact Loading", *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 54, No. 6, pp. 1245-1266, (2015).
- [17] Hatami, H., and Nouri, M.D., "Experimental and Numerical Investigation of Lattice-walled Cylindrical Shell under Low Axial Impact Velocities", *Latin American Journal of Solids and Structures*, Vol. 12, No. 10, pp. 1950-1971, (2015).
- [18] Hatami, H., Shokri Rad, M., and Ghodsbin Jahromi A., "A Theoretical Analysis of the Energy Absorption Response of Expanded Metal Tubes under Impact Loads", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 109, pp. 224-239, (2017).

- [19] Nouri M.D., and Hatami, H., "Experimental and Numerical Study of the Effect of Longitudinal Reinforcements on Cylindrical and Conical Absorbers under Impact Loading", *Indian Journal of Science and Technology*, Vol. 7, No. 2, pp. 199-210, (2014).
- [20] Damghani Noori, M., Hatami, H., and Ghodsbin Jahromi, A., "Expanded Metal Tube Absorbers under Axial Impact Loading", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 371-378, (2015).
- [21] Hatami, H., Hosseini, M., and Yasuri, A.K., "Perforation of Thin Aluminum Targets under Hypervelocity Impact of Aluminum Spherical Projectiles", *Materials Evaluation*, Vol. 77, No. 3, pp. 411-422, (2019).
- [22] Rad, M.S., Hatami, H., Alipouri, R., Nejad, A.F., and Omidinasab, F., "Determination of Energy Absorption in Different Cellular Auxetic Structures", *Mechanics & Industry*, Vol. 20, No. 3, pp. 302, (2019).
- [23] Rad, M.S., Hatami, H., Ahmad, Z., and Yasuri, A.K., "Analytical Solution and Finite Element Approach to the Dense Re-entrant Unit Cells of Auxetic Structures", *Acta Mechanica*, Vol. 230, pp. 1-15, (2-19).
- [24] Ghodsbin Jahromi, A., and Hatami, H., "Numerical Behavior Study of Expanded Metal Tube Absorbers and Effect of Cross Section Size and Multi-layer under Low Axial Velocity Impact Loading", *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 49, No. 4, pp. 685-696, (2018).
- [25] Hatami, H., and Fatholahi, A.B., "The Theoretical and Numerical Comparison and Investigation of the Effect of Inertia on the Absorbent Collapse Behavior of Single Cell and Two-cell Reticular under Impact Loading", *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 50, No. 5, pp. 51-60, (2017).
- [26] ASTM E8/E8M-09, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.
- [27] ABAQUS/CAE 6.12, ABAQUS Analysis Users Manual Version 6.10, (2016).

فهرست نمادهای انگلیسی

Inf	: ورق تخت
p	: ورق با تقویت کننده (لچکی)
h	: ارتفاع سقوط وزنه (cm)
v	: سرعت معادل (mm/s)
g	: شتاب جاذبه زمین ($9.81 \cdot \text{mm/s}^2$)

نمادهای یونانی

v	: ضریب پواسون
---	---------------

Abstract

Steel sheets are used in various industries such as automotive, aerospace, and The issue of impact and penetration in steel sheets has been the main focus of many studies. In this study, Laboratory and numerical studies of flat and reinforced steel sheets by steel reinforcement have been performed under the of impact caused by free fall of the weights. Steel sheets used are steel St12. The material and thickness of the pendentive used are similar to the sheet and have a width of 2 cm. The parameters have evaluated include the amount of impact acceleration on the sheet, the rate of permanent deformation, and the amount of energy absorption for simple and reinforcer flat sheets. The numerical modeling of Abaqus finite element software is used. The results show that the use of reinforcer causes a slight increase in the acceleration of the sheet and a significant reduction in its permanent deformation.