

بررسی تجربی جذب انرژی ورق‌های فولادی انحنادار تحت بارگذاری ضربه‌ای و تاثیر لچکی روی تغییر شکل نمونه‌ها

سید امیر موسوی زاده^۱، مجتبی حسینی^۲ و حسین حاتمی^{۳*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۰۵	<p>ورق‌های فولادی در صنایع مختلف مانند خودروسازی، هوافضا، تانکرهای حمل و نگهداری سوخت و پایه پل‌های فلزی، اسکله‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد و مسئله ضربه و نفوذ در ورق‌های فولادی و همچنین جذب انرژی محور اصلی پژوهش‌های زیادی بوده است. در این تحقیق، بررسی آزمایشگاهی روی ورق‌های فولادی تخت و انحنادار و همچنین تقویت شده بوسیله سخت‌کننده‌های عمود بر صفحه ورق، تحت اثر ضربه ناشی از سقوط آزاد وزنه مورد بررسی قرار می‌گیرد. ورق‌های فولادی از جنس ST۱۲ و با ابعاد $1 \times 200 \times 220$ میلی‌متر می‌باشد، که در یک جهت بوسیله فیکسچر مقید شده و در سمت دیگر آزاد است. جنس و ضخامت لچکی مورد استفاده نیز همانند ورق و دارای پهنای ۲ سانتی متر می‌باشد. پارامترهای مورد ارزیابی پژوهش شامل مقدار شتاب ضربه بر روی ورق، میزان تغییر شکل ماندگار و مقدار جذب انرژی برای ورق‌های تخت و انحنادار ساده و با سخت‌کننده می‌باشد. نتایج برای ورق‌های با شعاع انحنای تخت، ۳۰۰ و ۱۱۰ میلی‌متر نشان می‌دهد که استفاده از سخت‌کننده موجب افزایش شتاب وارده به ورق در حدود ۷، ۵ و ۳۸ و همچنین کاهش قابل توجه تغییر شکل ماندگار ورق در حدود ۵، ۰، ۱ و ۱،۵ برابر می‌باشد. مقدار انرژی جذب شده توسط ورق‌های تقویت شده اندکی کمتر از ورق‌های ساده است. با توجه به نتایج، ورق با شعاع انحنای ۱۱۰ میلی‌متر با لچکی دارای عملکرد بهتری نسبت به بقیه ورق‌ها می‌باشد.</p>
پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۲۵	
واژگان کلیدی:	
ورق فولادی، لچکی، سقوط آزاد، تغییر شکل ماندگار، شتاب ضربه.	

۱- مقدمه

قرن گذشته مسائل زیادی مربوط به جذب انرژی مطرح شده‌اند؛ که این مسائل نسبت به درک بهتر حالت گسیختگی و مسائل پخش انرژی در چنین سازه‌هایی در حین برخورد کمک می‌کند. این اطلاعات برای طراحی سازه‌های مطمئن و همچنین برای ارزیابی سازه‌های موجود در کاربردهای ویژه بسیار مهم است، چرا که در نهایت خسارت‌های انسانی و منابع مادی به شدت کاهش می‌یابد. البته مطالعاتی در مورد استحکام درب‌های خودرو توسط غلامحسین لیاقت [۱] به روی ورق‌های تخت و با انحناء انجام شده است. اما در این

مسئله ضربه و نحوه پاسخ صفحات و پوسته‌ها با جنس مختلف به این نوع از بارگذاری که در صنایع مختلف کاربرد فراوان دارند، در سالیان اخیر محور بسیاری از پژوهش‌ها در بحث مکانیک ضربه بوده است. موضوعات مورد بررسی به طور کلی شامل تاثیر سرعت و شتاب ضربه زننده، هندسه ورق‌ها شامل ضخامت، تخت یا انحنادار بودن آنها همچنین جنس ورق‌ها و روش‌های مختلف بهبود جذب انرژی و کنترل انرژی ضربه در حد قابل تحمل سازه‌ها می‌باشد. در نیمه دوم

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: hatami.h@lu.ac.ir

۱. کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه لرستان

۲. دانشیار، گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه لرستان

۳. دانشیار، گروه مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه لرستان

تحقیق نوع تقویت، تغییر در نوع تکیه‌گاه و همچنین بررسی وسیع‌تر کاربرد این عوامل در صنایع مختلف انجام شده است. در زمینه تأثیر ضربه با سرعت خیلی بالا تحقیقی توسط مرژیوسکی و همکاران [۲] برای بررسی نفوذ و تغییرشکل صفحات فولادی در محدوده سرعت ۳ تا ۹ کیلومتر بر ساعت انجام شد و یک روش تحلیلی برای ارتباط ذرات خرد شده با سرعت ضربه ارائه گردید. در تحقیقی دیگر در این زمینه، برندان و همکاران [۳] نحوه مدل‌سازی تغییرشکل پلاستیک صفحات فولادی تحت ضربه با سرعت خیلی زیاد را مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق دو تکنیک متفاوت محاسباتی برای شبیه‌سازی این نوع آزمایش توسعه داده شد که عبارت بودند از: هیدرودینامیک ذرات صاف بر پایه لاگرانژ (SPH) در نرم‌افزار LS-DYNA و هیدروکد CTH مبتنی بر اویلر. نتایج حاصل شده نشان داد که اندازه‌گیری‌های فیزیکی دهانه و برآمدگی ناشی از ضربه منطبق با نتایج شبیه‌سازی شده و در حدود $\pm 8\%$ می‌باشد. کومار و همکاران [۴] اثر انحنای ورق فلزی بر روی مقاومت ضربه برای ورق آلومینیومی بررسی کردند. ورق مورد بررسی به ضخامت ۲ میلی‌متر بوده و ضربه با سرعت بالا (در حد بالستیک) انجام شده است. که از سه پانل با شعاع‌های 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 [۵] گسیختگی دینامیکی صفحات دولایه فلز-پلیمر را بررسی نموده و نتیجه گرفتند افزایش جرم صفحه در اثر لایه پلیمری اثر خوبی در مقاومت ضربه‌ای دارد. کیتادا [۶] به بررسی استحکام و شکل‌پذیری نهایی پایه‌های پل فولادی پر از بتن در ژاپن پرداخت. در این تحقیق سه نوع پایه پل فلزی مربع شکل، با سخت‌کننده‌های طولی داخلی و پر شدن با بتن مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که سخت‌کننده‌ها و همچنین بتن باعث افزایش استحکام، مقاومت و انعطاف پذیری پل می‌شود.

در پژوهشی توسط سقفی و همکارانش [۷] اثر پیش بارگذاری روی پاسخ ضربه پانل‌های کامپوزیتی ارزیابی شد. در این تحقیق آزمایش‌های ضربه با سرعت کم روی GFRP برای سه نوع متفاوت از انرژی اولیه ضربه انجام گرفت. نظری و خدمتی [۸] بررسی عددی روی ویژگی‌های مقاومت و تغییرشکل لوله‌های دارای پیش‌بارگذاری تحت ضربه جانبی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود انسیس انجام دادند. در این پژوهش اثر پیش‌بارگذاری 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 پیش‌بارگذاری، مقاومت نهایی کاهش می‌یابد و عضو تحت بارهای با مقدار کم تخریب می‌شود و تورفتگی آن کمتر خواهد بود. همچنین اوستا و همکاران [۹] اثر ضخامت و انحنای ورق رفتار ضربه پانل‌های کامپوزیتی بررسی شد. در این مطالعه رفتار ضربه با سرعت بالا روی پانل‌ها مسطح و انحنادار به روش عددی مورد ارزیابی قرار گرفت. در تحقیقی تجربی و عددی توسط بیدی و همکاران [۱۰] اثر ضربه روی ورق‌های فولادی بررسی گردید. در این پژوهش رفتار ورق فولادی و انحنای آن‌ها در بهبود خواص ضربه مد نظر قرار گرفت. نتایج هر دو روش تجربی و عددی نشان داد که با افزایش شعاع انحناء، شتاب وارده افزایش می‌یابد که مشخص شده برای ورق صاف (شتاب بی‌نهایت) حداکثر شتاب ایجاد می‌شود. در تحقیقی توسط چوبینی و همکاران [۱۰] بررسی تجربی و عددی در مورد جذب انرژی و تغییرشکل لوله‌های جدار نازک توخالی و توپر با هندسی مقاطع دایره و مربع تحت بار ضربه‌ای عرضی انجام دادند. هدف از این تحقیق بررسی اثر تغییرشکل 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 احمد بیدی و همکاران [۱۱] تحلیل تجربی و عددی روی ورق خمیده دو لایه فولاد-پلی‌اورا تحت بار ضربه‌ای انجام گرفت. با توجه به این تحلیل‌ها دیده می‌شود که با افزایش شعاع انحنای ورق، مقدار حداکثر تغییرشکل ماندگار کاهش یافته ولی شتاب برخورد افزایش می‌یابد. البته با افزایش بیشتر شعاع ورق (نزدیک شدن رفتار به ورق مسطح) حداکثر شتاب ضربه‌زنده و همچنین تغییرشکل 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 ضربه‌ای ناشی از سقوط آزاد وزنه انجام می‌شود و شتاب وارده، جذب انرژی (استهلاک انرژی)، تغییرشکل ماندگار این ورق‌ها ارزیابی می‌گردد. در تحقیقی دیگر گربت 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 سوراخ‌شدن صفحات و استوانه‌ها در اثر انواع پرتابه‌ها با سرعت‌های مختلف انجام شد. در

مهم می‌گنجد [۱۶-۱۸].

موضوع مورد بحث در این تحقیق در صنایع مختلف از جمله خودروسازی، هوافضا، تانک‌های حمل سوخت، پایه پل‌های فولادی (مکعبی و دایره‌ای) و غیره کاربرد دارد.

در این پژوهش به بررسی ورق‌های فولادی و ایجاد حالت‌هایی از جمله ایجاد سخت‌کننده (لچکی)، انحنای اولیه در ورق‌ها و نوع تکیه‌گاه تحت اثر ضربه و بررسی تأثیر این عوامل بر روی مقدار پارامترهای شتاب ضربه، تغییر شکل ماندگار و جذب انرژی ورق‌ها پرداخته می‌شود. در این تحقیق سه انحنای مختلف به کار رفته است، که با استفاده از فیکسچرهای مناسب آزمایش ضربه سقوط آزاد در سه ارتفاع مختلف انجام می‌شود.

تفاوت عمده این تحقیق با تحقیقات پیشین در نظر گرفتن عواملی از جمله نوع ورق، نوع سخت‌کننده، در نظر گرفتن تکیه‌گاه در یک جهت و قرارگیری آن در قسمت صاف ورق و همچنین نوع اتصال سخت‌کننده‌ها به ورق می‌باشد.

لچکی‌های به کار رفته در ورق‌ها باعث شده که شتاب به مقدار کمی افزایش پیدا کند و همچنین موجب کاهش خیلی کمی در مقدار جذب انرژی ورق‌ها شده است. اما ایجاد این لچکی‌ها تغییر شکل ایجاد شده در ورق‌ها را بعد از برخورد به طور چشمگیری کاهش داده است. در بحث انحناء‌ها می‌توان گفت که ورق با شعاع ۱۱۰ میلی‌متر با لچکی دارای بهترین عملکرد می‌باشد. نوع تکیه‌گاه به کار رفته تأثیر زیادی بر روی نتایج ورق با شعاع انحنای ۳۰۰ میلی‌متر دارد.

۲- تست تجربی

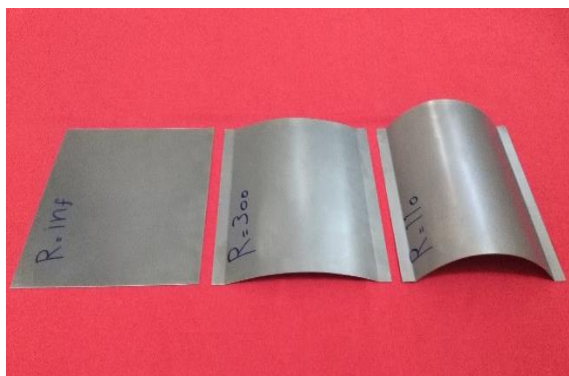
۲-۱- مشخصات نمونه‌های آزمایش

برای انجام آزمایش ضربه از ورق فولادی تخت و انحنادار با استاندارد ST۱۲ (ST12 DIN 1623) به ضخامت ۱ میلی‌متر استفاده شده است. ابعاد کلی ورق‌ها به اندازه 20×22 سانتی‌متر می‌باشد که با توجه به نحوه قرارگیری روی تکیه‌گاه‌ها، ابعاد مفید این ورق‌ها 20×20 سانتی‌متر است. در این پژوهش از سه شعاع انحنای بینهایت (Inf) (ورق تخت)، ۳۰۰ میلی‌متر و ۱۱۰ میلی‌متر و همچنین از سه ارتفاع ۲۰، ۳۵ و ۵۰ میلی‌متر استفاده شده است. برای سخت‌کننده-ها P^۲ (لچکی) از فولاد با جنس مشابه ورق به شکل نبشی به ارتفاع ۲ سانتی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر با ۱ سانتی‌متر پهنای ناحیه اتصال به وجه پشتی ورق‌ها، بصورت عمود بر

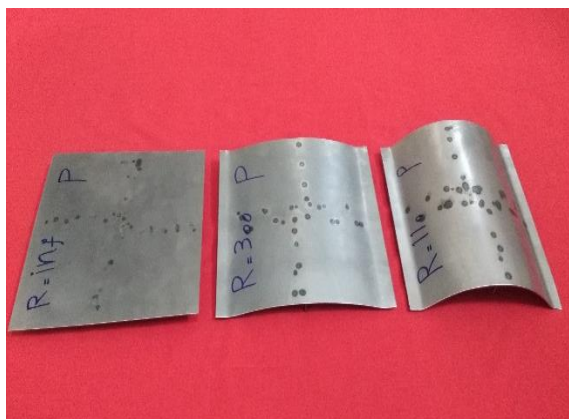
این تحقیق از ۴ نوع نوک پرتابه استفاده شده است. انواع نوک‌ها شامل نوک تخت، نوک کروی، نوک تیز با زاویه ۹۰ درجه و نوک تیز با زاویه ۴۵ درجه می‌باشد. نتایج نشان داد که نوع شکست که در فلزات اتفاق می‌افتد عمدتاً به شکل دماغه (نوک) پرتابه، نسبت بین ضخامت هدف و قطر پرتابه و خواص مواد هدف بستگی دارد. تغییر شکل ورق‌ها در پرتابه‌های با دماغه‌ی تیز بصورت پارگی می‌باشد، اما تغییر شکل 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 احمد 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 تغییر شکل ماندگار در اثر ضربه در قطعه را نیز حدود ۷ درصد کاهش می‌دهد. ارسیدات و همکارانش [۱۴] خواص ورق فولادی سخت با روکش پلی‌اوریا را در مقابل ضربه بررسی نموده و نتیجه گرفتند که حد بالستیک با استفاده از روکش پلی‌اوریا بالا می‌رود. نظری و خدمتی [۱۵] 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 تأثیر ضربه جانبی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که پیش بارگذاری و موقعیت نیرو اعمال شده به طور مستقیم بر این دو عامل تأثیر 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. در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی روی نمونه‌های مختلف جاذب انرژی تحت بارگذاری دینامیکی و ضربه‌ای قرار گرفته است که انواع مختلف جدار نازک‌ها نیز در این

² Pendentive

¹ Infinity



(الف)



(ب)

شکل ۱- نمای ورق‌ها با انحنای مختلف. (الف) ورق‌های ساده، (ب) ورق‌های با لچکی (P).

صفحه ورق با استفاده از جوش نقطه‌ای اتصال داده شده است. سعی شده که نقطه جوش‌های به کار رفته در اتصال لچکی به ورق دارای تعداد و فاصله مشخص، و همچنین نحوه‌ی اجرای این نقطه جوشها به صورتی بوده که از تابیدگی ورق جلوگیری شود.

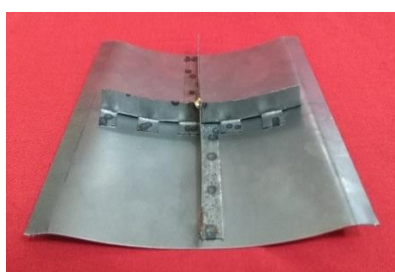
چون ورق‌ها دارای سه نوع انحنای مختلف می‌باشند، به همین دلیل لچکی مورد استفاده در این ورق‌ها متناسب با انحنای ورق ایجاد شده‌اند. که برای ورق‌های انحنا دار لچکی-ها با استفاده از ااره مویی ساخته شده‌اند. با توجه به اینکه سه سطح انرژی ضربه (سه ارتفاع سقوط آزاد) مد نظر است، هجده سری نمونه آزمایش شامل نمونه‌های ساده و با لچکی خواهیم داشت که برای هر کدام سه نمونه برای بررسی خطا در نظر گرفته شده است که در مجموع ۵۴ نمونه آزمایش می‌باشند. در جدول ۱ ورق‌های مورد استفاده معرفی شده‌اند. در شکل‌های (۱) و (۲) به ترتیب تمام ورق‌ها و نمای پشت ورق‌های تقویت شده با لچکی نمایش داده شده است.

۲-۲- خواص مکانیکی ورق‌ها

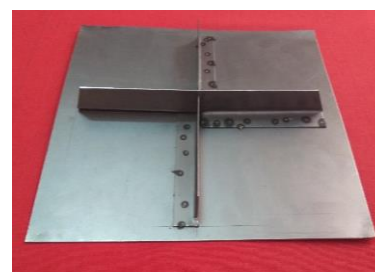
برای تعیین خواص مکانیکی ورق فولادی مورد آزمایش سه نمونه آزمایشگاهی طبق استاندارد ASTM E8 برش داده شده و مورد آزمایش کشش قرار گرفته است [۱۹].



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۱- نمای پشتی ورق‌های مختلف با لچکی. (الف) ورق تخت، (ب) ورق با شعاع ۳۰۰ میلیمتر (ج) ورق با شعاع ۱۱۰ میلیمتر.

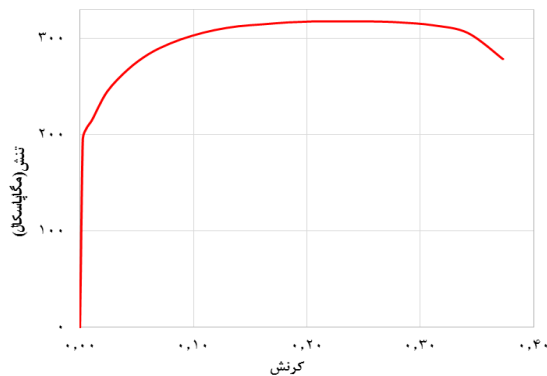
جدول ۲ خواص مهم مکانیکی فولاد مصرفی ارائه گردیده است. ۲-۳- فیکسچرها
برای محکم نگه داشتن نمونه‌ها و ایجاد تکیه‌گاه مناسب از دو فیکسچر نگهدارنده (الف) و (ب) استفاده شده است. فیکسچر (الف) برای ورق تخت و ورق با شعاع انحنای ۳۰۰ میلیمتر می‌باشد و از فیکسچر (ب) برای ورق با شعاع انحنای ۱۱۰ میلیمتر استفاده شده است. این فیکسچرها برای مقید کردن حرکت ورق در دو لبه روبروی هم و در دو وجهی از ورق که بدون انحنا می‌باشد طراحی شده است و در جهت عمود بر این راستا، تکیه‌گاهی وجود ندارد. با توجه

از نتایج حاصل از این آزمون خصوصیات الاستیک و پلاستیک فولاد مصرفی شامل مدول الاستیک (یانگ)، نقطه تسلیم، استحکام، کرنش نهایی و ضریب پواسون از روی نمودار تنش-کرنش حاصل شده، بدست می‌آید. برای نمونه-های آزمایشگاهی به شکل ورق، برای انجام آزمون کشش لازم است که نمونه‌هایی به شکل دمبل آماده‌سازی شوند (شکل ۳). دستگاه تست کشش ۵ تنی و مربوط به شرکت GOTECH می‌باشد. نمودار تنش-کرنش حاصل از این آزمایش که از میانگین نتایج تست کشش سه نمونه بدست آمده، در شکل (۴) نشان داده شده است. همچنین در

به اینکه از سه نوع انحنای در این پژوهش استفاده شده است و لبه‌های این ورق‌ها با هم متفاوت است، لذا برای مشابه بودن تکیه‌گاه در هر سه نوع ورق، لبه‌ها را به اندازه ۱ سانتی‌متر خم کرده و موازی با سطح افق قرار می‌دهیم.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی فولاد مصرفی

Inf-۵-P	Inf-۳,۵-P	Inf-۲-P	Inf-۵	Inf-۳,۵	Inf-۲	نمونه
ورق تخت با ارتفاع سقوط ۵ cm با لچکی	ورق تخت با ارتفاع سقوط ۳,۵ cm با لچکی	ورق تخت با ارتفاع سقوط ۲ cm با لچکی	ورق تخت با ارتفاع سقوط ۵ cm	ورق تخت با ارتفاع سقوط ۳,۵ cm	ورق تخت با ارتفاع سقوط ۲ cm	نام گذاری نمونه ها
۳۰۰-۵-P	۳۰۰-۳,۵-P	۳۰۰-۲-P	۳۰۰-۵	۳۰۰-۳,۵	۳۰۰-۲	نمونه
ورق با شعاع انحنای ۳۰۰ mm با ارتفاع سقوط ۵ cm با لچکی	ورق با شعاع انحنای ۳۰۰ mm با ارتفاع سقوط ۳,۵ cm با لچکی	ورق با شعاع انحنای ۳۰۰ mm با ارتفاع سقوط ۲ cm با لچکی	ورق با شعاع انحنای ۳۰۰ mm با ارتفاع سقوط ۵ cm	ورق با شعاع انحنای ۳۰۰ mm با ارتفاع سقوط ۳,۵ cm	ورق با شعاع انحنای ۳۰۰ mm با ارتفاع سقوط ۲ cm	نام گذاری نمونه ها
۱۱۰-۵-P	۱۱۰-۳,۵-P	۱۱۰-۲-P	۵,۱۱۰	۱۱۰-۳,۵	۱۱۰-۲	نمونه
ورق با شعاع انحنای ۱۱۰ mm با ارتفاع سقوط ۵ cm با لچکی	ورق با شعاع انحنای ۱۱۰ mm با ارتفاع سقوط ۳,۵ cm با لچکی	ورق با شعاع انحنای ۱۱۰ mm با ارتفاع سقوط ۲ cm با لچکی	ورق با شعاع انحنای ۱۱۰ mm با ارتفاع سقوط ۵ cm	ورق با شعاع انحنای ۱۱۰ mm با ارتفاع سقوط ۳,۵ cm	ورق با شعاع انحنای ۱۱۰ mm با ارتفاع سقوط ۲ cm	نام گذاری نمونه ها



شکل ۳- نمودار تنش-کرنش حاصل از تست کشش.

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 تیر آهن‌ها) از یک پلیت فولادی به عنوان نگهدارنده‌ی ورق‌های اصلی استفاده شده است، که از نوع فولاد ST37 با ابعاد $1/5 \times 8 \times 19$ سانتی‌متر و مربوط به کارخانه فولاد مبارکه اصفهان می‌باشد. برای فراهم کردن شرایط مرزی گیردار، پلیت‌های فولادی نگهدارنده با استفاده از ۶ پیچ به قطر ۸ میلیمتر به بال فوقانی پایه‌ها متصل می‌گردد تا ورق‌ها را بطور کامل در خود حفظ کنند. البته در فیکسچر (ب) به دلیل فراهم آوردن شرایط گیرداری کافی از دو پیچ به قطر ۸ میلیمتر استفاده شده



(الف)



(ب)

شکل ۲- (الف) نمونه‌های تست کشش برای تعیین خواص مکانیکی، (ب) نمونه‌ها قبل و بعد از تست کشش.

جدول ۲- خواص مکانیکی فولاد مصرفی

ضریب پواسون	تنش نهایی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	مدول یانگ (GPa)	جرم حجمی (kg/m ³)
۰/۳	۳۱۸	۱۹۶	۲۱۰	۷۸۵۰

حداکثر مقدار انرژی را برای سه ارتفاع سقوط مورد نظر محاسبه می‌کنیم. برای بدست آوردن جذب انرژی ورق‌ها از نمودار نیرو-جابجایی که معادل مقدار جذب انرژی می‌باشد، استفاده شده است، که برای محاسبه این پارامتر از نرم افزار گراف نسخه ۲.۴.۴ که بر مبنای رابطه (۲) عمل می‌کند، استفاده شده است.

$$E = 1/2 \cdot M \cdot V^2$$

$$M=180 \text{ kg} \left\{ \begin{array}{l} v = 0.63 \text{ m/s} \rightarrow E = 36 \text{ J} \\ v = 0.83 \text{ m/s} \rightarrow E = 62 \text{ J} \\ v = 1 \text{ m/s} \rightarrow E = 90 \text{ J} \end{array} \right. \quad (1)$$

$$E = \int_{x_2}^{x_1} F(x) dx \quad (2)$$



(الف)



(ب)

شکل ۵- دستگاه دراپ همپر. (الف) نمای کلی، (ب) سره ضربه زننده (وزن ضربه زننده ۱۸۰ کیلوگرم می‌باشد).

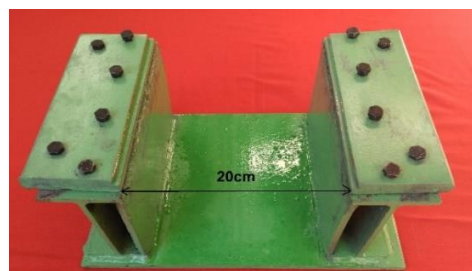
جدول ۳- مشخصات مکانیکی سره ضربه زننده

درصد تغییر طول	مدول یانگ (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	ضریب پواسون
۲	۳۱۰	۶۲۰	۸۲۷	۰/۳

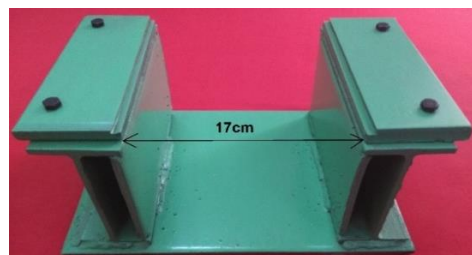
۲-۵- اندازه گیری شتاب و معرفی شتاب سنج

برای ثبت تاریخچه شتاب از لحظه شروع تماس ضربه‌زننده با نمونه‌ها تا مدت زمان حدود دو ثانیه بعد از ضربه توسط

است. در شکل (۵) نمای دو فیکسچر مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است.



(الف)



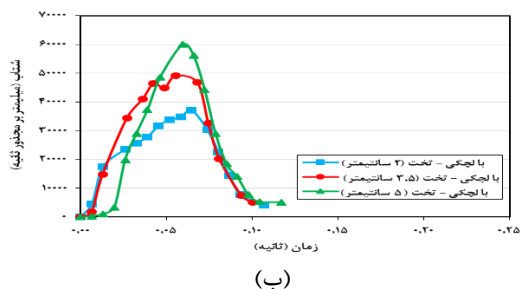
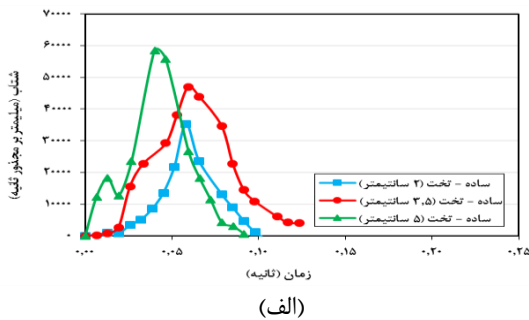
(ب)

شکل ۴- نمایی از فیکسچرها. (الف) برای ورق‌های تخت و شعاع ۳۰۰ میلیمتر، (ب) برای ورق با شعاع ۱۱۰ میلیمتر.

۴-۲- دستگاه تست سقوط آزاد

دستگاه مورد استفاده برای آزمایش ضربه در این پژوهش، دستگاه تست سقوط آزاد (دراپ همپر) 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. سره ضربه زننده به شکل نیم کره (عرقچین) به قطر ۱۲ سانتیمتر می‌باشد. این دستگاه از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده است، که عبارت‌اند از قسمت کنترل مرکزی، سیستم اندازه‌گیری و ضبط اطلاعات، موتور، پایه‌های نگهدارنده، وزنه‌ها و سره ضربه زننده می‌باشد (شکل ۶). همچنین در جدول ۳ خواص مکانیکی سره ضربه زننده بیان شده است. برای اندازه‌گیری تغییرشکل ماندگار از سیستم اندازه‌گیری متصل به دستگاه استفاده شده است. با توجه به محدودیت‌های دستگاه از جمله قطر سره ضربه‌زننده و همچنین برای کم کردن مقدار خطا در محاسبه تغییرشکل ماندگار از روش دستی هم برای محاسبه تغییرشکل استفاده شده است. یکی از پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش مقدار جذب انرژی توسط ورق‌های فولادی ساده و با لچکی می‌باشد. با توجه به اینکه از سه ارتفاع سقوط استفاده شده است، با استفاده از فرمول (۱)

درصد می‌شود؛ که بیشترین تفاوت مربوط به ورق با شعاع انحنای ۱۱۰ میلی‌متر می‌باشد. که علت اصلی این تفاوت، شکل خاص سخت‌کننده که در راستای انحنای ورق قرار می‌گیرد و همچنین مقاومت بالای این سخت‌کننده می‌باشد. با توجه به اینکه تکیه‌گاه‌ها در راستایی که ورق بدون انحناء است وجود دارد، با افزایش شعاع انحناء از ۱۱۰ میلی‌متر تا شعاع انحناء ۳۰۰ میلی‌متر در یک سطح انرژی معین، شتاب برخورد افزایش محسوسی می‌یابد، و بعد از آن با افزایش بیشتر شعاع انحناء (کاهش انحناء) تا رسیدن به ورق تخت (شعاع انحناء بینهایت) شتاب برخورد به مقدار خیلی کم کاهش می‌یابد و با کمی اغماص می‌توان آن را ثابت در نظر گرفت. لذا تغییرات شتاب از شعاع انحنای ۳۰۰ تا شعاع انحنای بینهایت خیلی کم می‌باشد. با توجه به این موضوع شتاب ورق با شعاع انحناء ۱۱۰ میلی‌متر دارای کمترین شتاب برخورد می‌باشد و از عملکرد بهتری برخوردار می‌باشد. و ورق با شعاع انحناء ۳۰۰ میلی‌متر با اختلاف خیلی زیاد نسبت به ورق با شعاع ۱۱۰ میلی‌متر و با اختلاف خیلی کم نسبت به ورق تخت دارای شتاب بزرگتری می‌باشد. با توجه به نمودار تغییرات شتاب در شعاع انحنای کم بسیار زیاد می‌باشد، و هر چه شعاع انحناء افزایش می‌یابد، تغییرات شتاب کاهش یافته و به همین دلیل رفتار ورق، به ورق تخت نزدیک می‌شود. در شکل پیوسته (۹) نمودار شتاب برحسب شعاع انحناء در ارتفاع های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۶- مقایسه نتایج شتاب ورق تخت. (الف) ورق ساده، (ب) ورق با لچکی.

شتاب سنج ضبط شده است. لذا تاریخچه شتاب با استفاده از سنسور شتاب‌سنج مدل ACC-4g ساخت ایران اندازه‌گیری می‌شود. دامنه عملکرد این سنسور از ۰ تا ۴ جی و یک سنسور با ظرفیت بیشتر از ۰ تا ۲۰۰ جی با دقت میکروثانیه 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. شتاب‌سنج‌ها توسط پیچ یا چسب به ضربه‌زننده متصل می‌شود که در این دستگاه با استفاده از چسب به ضربه زننده متصل شده است.

۲-۶- اندازه‌گیری سرعت

سرعت معادل برخورد ضربه‌زننده با فرض عدم وجود اصطکاک و با استفاده از اصل بقای انرژی در لحظه شروع ضربه که از برابر قرار دادن انرژی پتانسیل ضربه‌زننده در ارتفاع مورد نظر با انرژی جنبشی در لحظه پیش از برخورد بدست می‌آید. بدین صورت برای سه ارتفاع سقوط با استفاده از فرمول (۳) خواهیم داشت:

$$v = \sqrt{2gh}$$

$$= \left\{ \begin{array}{l} h = 20 \text{ mm} \rightarrow v = 630 \text{ mm/s} \\ h = 35 \text{ mm} \rightarrow v = 830 \text{ mm/s} \\ h = 50 \text{ mm} \rightarrow v = 1000 \text{ mm/s} \end{array} \right\} \quad (2)$$

۳- نتایج تست تجربی

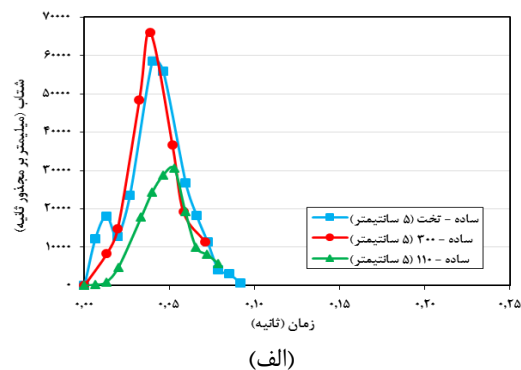
۳-۱- نمودار شتاب زمان

شتاب ضربه به عنوان 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 شکل‌های (۷) و (۸) نمودارهای شتاب-زمان برای ورق تخت ساده و لچکی و همچنین نمودار شتاب-زمان به صورت مقایسه‌ای برای یک ارتفاع نشان داده شده است. در جدول ۴ ماکزیمم شتاب ضربه ایجاد شده در هر ورق نمایش داده شده است. همانطور که قابل پیش‌بینی بود، با افزایش انرژی ضربه‌زننده ناشی از افزایش ارتفاع سقوط، شتاب وارده در هر دو حالت ورق ساده و با لچکی (سخت‌کننده) افزایش می‌یابد. با این وجود با مقایسه نتایج نمونه‌های با لچکی (سخت‌کننده)، با نمونه‌های ساده متناظر (با ارتفاع سقوط یکسان) برای سه شعاع انحنای بی‌نهایت، ۳۰۰ و ۱۱۰ میلی‌متر دیده می‌شود که وجود سخت‌کننده‌ها به ترتیب باعث افزایش شتاب وارده تا حداکثر ۷، ۵ و ۳۸

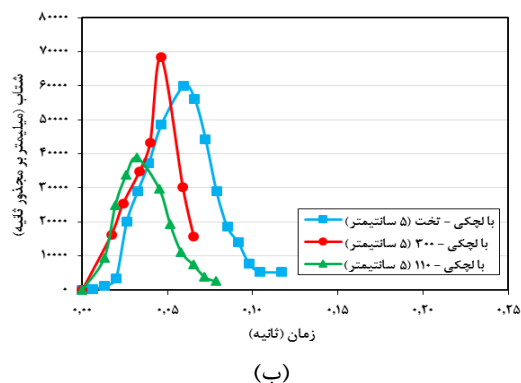
(ماندگار) ورق می‌باشد. این پارامتر برای تمام نمونه‌های ساده و با لچکی و همچنین برای سه نوع انحناء اندازه گیری شده است. نتیجه تغییرات حداکثر تغییرشکل ماندگار با توجه به ارتفاع سقوط آزاد و شعاع انحنای ورق و همچنین برای ورق‌های ساده و با لچکی در شکل (۱۰) نشان داده شده است. با توجه به اینکه تکیه‌گاه‌ها در راستایی که ورق بدون انحناء است وجود دارد، با افزایش شعاع انحناء از ۱۱۰ میلیمتر تا شعاع انحناء ۳۰۰ میلیمتر در یک سطح انرژی معین، تغییرشکل ماندگار افزایش محسوسی می‌یابد، و بعد از آن تغییرشکل ماندگار برای ورق تخت (شعاع انحناء بینهایت) به مقدار خیلی زیادی کاهش می‌یابد، به طوری که تغییرشکل ورق تخت حتی از ورق با شعاع انحناء ۱۱۰ میلیمتر هم کمتر می‌شود. با توجه به این موضوع تغییرشکل ماندگار ورق تخت دارای کمترین مقدار می‌باشد. اما در مورد ورق‌های دارای لچکی باید گفت، لچکی ورق با شعاع انحناء ۱۱۰ میلیمتر به دلیل انحنایی که دارد، دارای مقاومت خیلی بیشتری نسبت به دو لچکی دیگر می‌باشد، لذا تغییرشکل ورق با شعاع انحناء ۱۱۰ میلیمتر کمتر از دو ورق دیگر می‌باشد. با توجه به جدول ۵، ایجاد لچکی در ورق‌های تخت، شعاع ۳۰۰ میلیمتر و شعاع ۱۱۰ میلیمتر به ترتیب باعث کاهشی در حدود ۰/۵، ۱ و ۱/۵ برابری در مقدار تغییرشکل پلاستیک شده است. که بیشترین تأثیر مربوط به ورق با شعاع ۱۱۰ میلیمتر می‌باشد. در شکل‌های (۱۱) الی (۱۵) الگوهای تغییرشکل ورق‌ها نشان داده شده است.

۳-۳- مقدار نیرو

با توجه به محاسبه شتاب ضربه زننده در هر لحظه نیروی حاصل از ضربه برابر است با جرم ضربه زننده در شتاب. در این تحقیق جرم ضربه زننده ثابت بوده و برابر با ۱۸۰ کیلوگرم می‌باشد. بنابراین منحنی نیرو-زمان دقیقاً مشابه منحنی شتاب-زمان می‌باشد، با این تفاوت که منحنی نیرو نسبت به منحنی شتاب در جرم ضربه زننده (عدد) ۱۸۰ ضرب شده است. نتایج عددی در جدول ۶ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که وجود سخت‌کننده‌ها مقدار نیروی وارده به صفحه فولادی را افزایش می‌دهد و در رابطه با انحنای مختلف روند نیرو مشابه آنچه در مورد شتاب گفته شد می‌باشد؛ با این حال کمترین مقدار نیرویی که به ورق وارد می‌شود مربوط به ورق با شعاع انحنای ۱۱۰ میلیمتر می‌باشد.

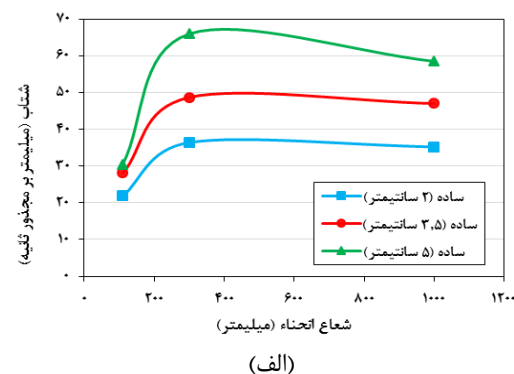


(الف)

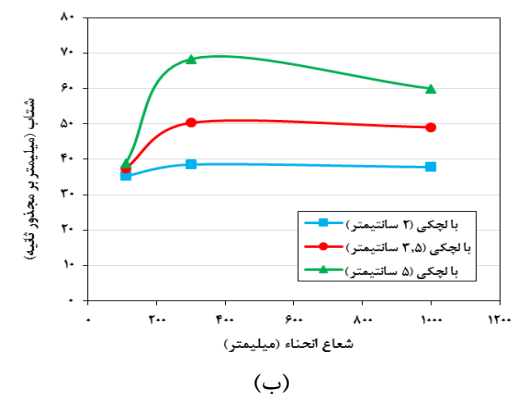


(ب)

شکل ۷- مقایسه نتایج شتاب در ارتفاع ۵ سانتیمتر. (الف) ورق ساده، (ب) ورق با لچکی.



(الف)



(ب)

شکل ۸- نمودار شتاب-شعاع انحناء. (الف) ورق ساده، (ب) ورق با لچکی.

۳-۲- حداکثر تغییرشکل پلاستیک

یکی از پارامترهای مهم در این تحقیق تغییرشکل پلاستیک

جدول ۴- نتایج شتاب حداکثر

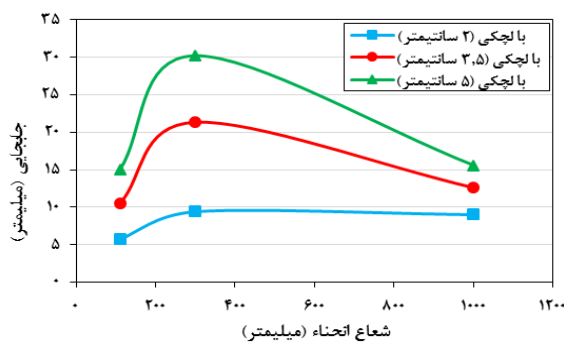
شتاب حداکثر (m/s ²)									نمونه ها
انحناء									
ورق با شعاع ۱۱۰ میلیمتر			ورق با شعاع ۳۰۰ میلیمتر			ورق تخت			
۵ cm	۳,۵ cm	۲ cm	۵ cm	۳,۵ cm	۲ cm	۵ cm	۳,۵ cm	۲ cm	
۳۰,۵۱	۲۸,۱۲	۲۱,۸۶	۶۶	۴۸,۷۲	۳۶,۴۳	۵۸,۵۲	۴۷,۰۴	۳۵,۲۳	ورق ساده
۳۸,۸۸	۳۷,۵	۳۵,۲۸	۶۸,۳۲	۵۰,۳۲	۳۸,۵۴	۶۰	۴۹,۰۷	۳۷,۸	ورق با لچکی

جدول ۵- نتایج تغییرشکل پلاستیک حداکثر.

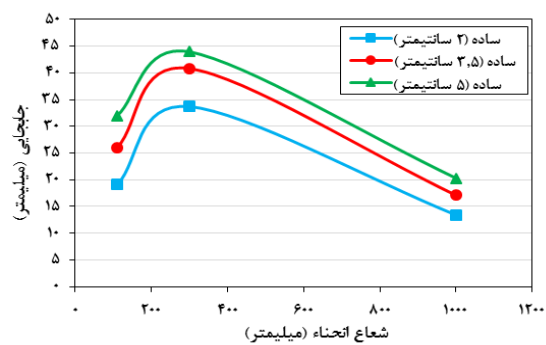
تغییرشکل پلاستیک حداکثر (mm)									نمونه ها
انحناء									
ورق با شعاع ۱۱۰ میلیمتر			ورق با شعاع ۳۰۰ میلیمتر			ورق تخت			
۵ cm	۳,۵ cm	۲ cm	۵ cm	۳,۵ cm	۲ cm	۵ cm	۳,۵ cm	۲ cm	
۳۲,۲	۲۶	۱۹	۴۳,۹	۴۰,۸	۳۳,۷	۲۰,۳	۱۷,۱	۱۳,۴	ورق ساده
۱۵	۱۰,۵	۵,۷	۳۰,۲	۲۱,۳	۹,۴	۱۵,۶	۱۲,۶	۹	ورق با لچکی

جدول ۶- نتایج نیرو.

نیرو (N)									نمونه ها
انحناء									
ورق با شعاع ۱۱۰ میلیمتر			ورق با شعاع ۳۰۰ میلیمتر			ورق تخت			
۵ cm	۳,۵ cm	۲ cm	۵ cm	۳,۵ cm	۲ cm	۵ cm	۳,۵ cm	۲ cm	
۵۴۹۲	۵۰۶۱	۳۹۳۴	۱۱۸۸۰	۸۷۶۹	۶۵۵۷	۱۰۵۳۳	۸۴۶۱	۶۳۴۱	ورق ساده
۶۹۹۸	۶۷۴۸	۶۳۵۰	۱۲۲۹۷	۹۰۵۷	۶۹۳۷	۱۰۸۰۰	۸۸۳۲	۶۸۰۴	ورق با لچکی



(ب)



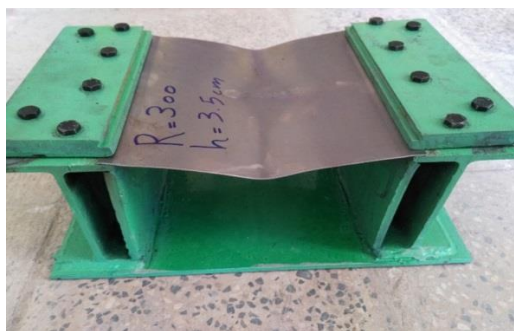
(الف)

شکل ۹- نمودار جابجایی-شعاع انحناء. (الف) ورق ساده، (ب) ورق با لچکی.

در حالیکه ورق‌های بدون لچکی سختی بیشتری را نشان می‌دهند.

در شکل (۱۷) نمونه‌ای از محاسبه مقدار جذب انرژی ورق با شعاع ۱۱۰ میلیمتر ساده با استفاده از نرم افزار گراف نشان داده شده است.

می‌شود، نمونه‌های با لچکی در ابتدای ضربه برخلاف نمونه‌های ساده سختی بیشتری از خود نشان می‌دهند. در نتیجه به ازای تغییرشکل یکسان، ورق‌های تقویت شده با لچکی در مقایسه با نمونه‌های ساده نیروی بیشتری را متحمل می‌شود اما در ادامه فرآیند ضربه از سختی آن کاسته می‌شود



(ب)

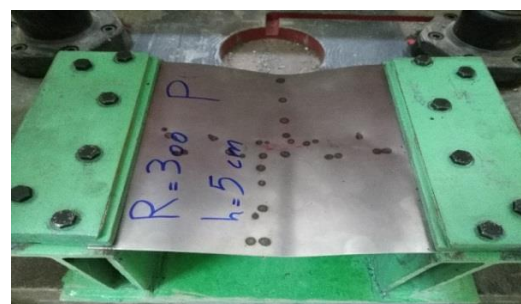


(الف)

شکل ۱۰- الگوی تغییرشکل ورق‌ها. (الف) ورق تخت ساده، (ب) ورق با شعاع انحنای ۳۰۰ میلیمتر.

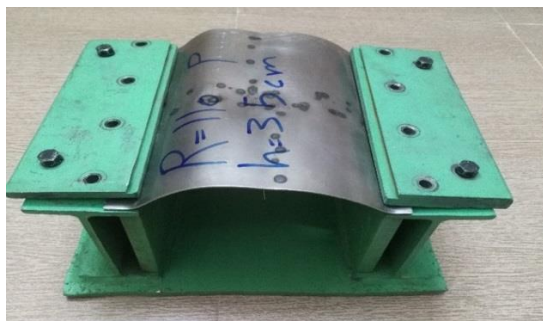


(ب)

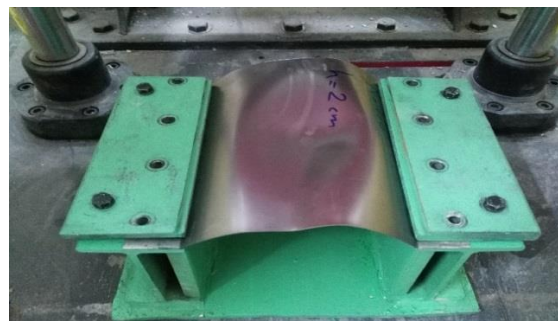


(الف)

شکل ۱۱- ورق با شعاع انحنای ۳۰۰ میلیمتر با ارتفاع سقوط ۳٫۵ سانتیمتر. (الف) نمای بالا، (ب) نمای روبرو.



(ب)



(الف)

شکل ۱۲- ورق با شعاع انحنای ۱۱۰ میلیمتر. (الف) بدون لچکی با ارتفاع ۲ سانتیمتر، (ب) با لچکی و ارتفاع ۳٫۵ میلیمتر.



(ب)

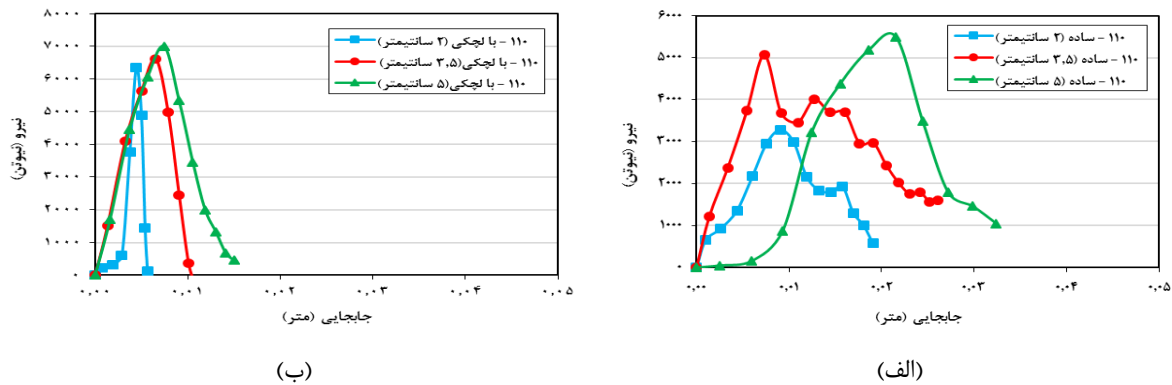


(الف)

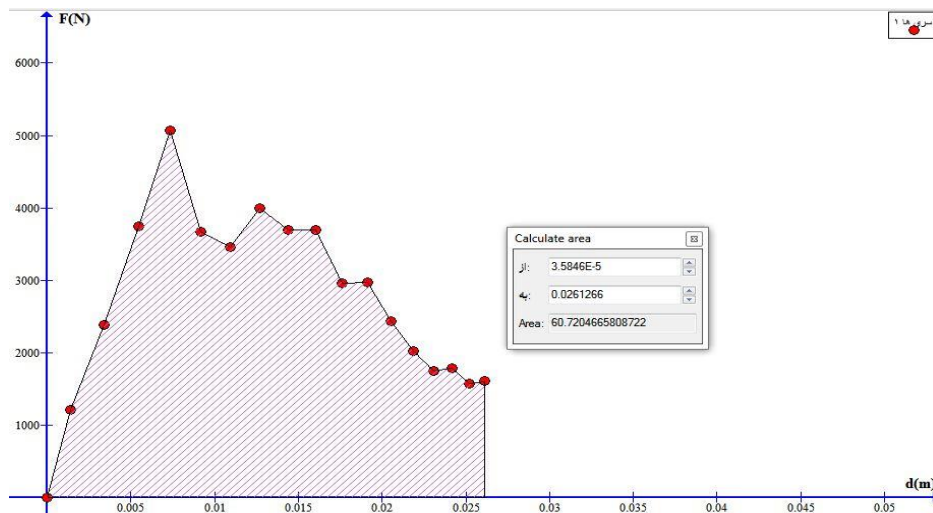
شکل ۱۳- ورق با شعاع انحنای ۱۱۰ میلیمتر با ارتفاع سقوط ۵ سانتیمتر. (الف) نمای بالا، (ب) نمای روبرو.



شکل ۱۴- فرم تغییرشکل ورق‌های با لچکی (الف) تخت، (ب) شعاع انحنا ۳۰۰ میلیمتر، (ج) شعاع انحنا ۱۱۰ میلیمتر.



شکل ۱۵- نمودار بار-جابجایی. (الف) ورق ساده، (ب) ورق با لچکی.

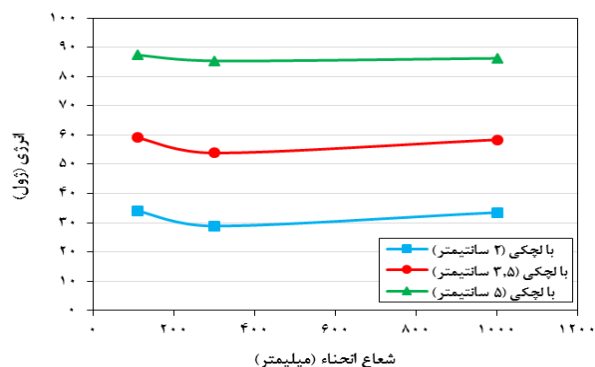


شکل ۱۶- نمودار جذب انرژی ورق با شعاع انحنای ۱۱۰ میلیمتر ساده برای ارتفاع سقوط ۳۵ میلیمتر با استفاده از نرم افزار گراف.

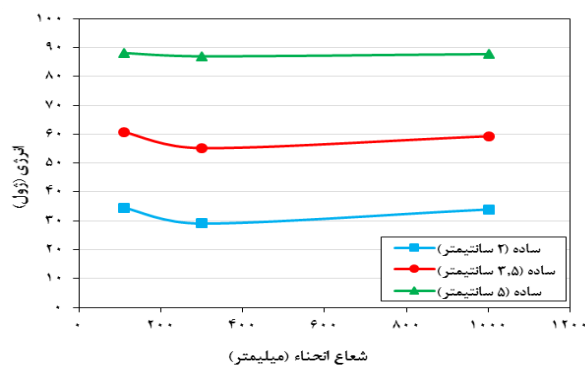
انرژی و انحنا مورد بررسی قرار می‌گیرد، لذا برای بررسی اثر انحنا بر روی مقدار جذب انرژی با استفاده از داده‌هایی که در دست داریم، به کمک نمودار پیوسته به بررسی این دو پارامتر می‌پردازیم. شکل‌های (الف-۱۸) و (ب-۱۸) به ترتیب تصاویری از نمودار اثر انحنا بر مقدار جذب انرژی ورق‌های ساده و دارای لچکی نشان می‌دهند. با توجه به

همچنین در جدول ۷ نتایج بدست آمده برای جذب انرژی به صورت خلاصه ارائه شده است. دیده می‌شود که ورق‌های دارای لچکی نسبت به ورق‌های ساده به طور میانگین با کاهش اندکی جذب انرژی در حدود ۱,۴ درصد مواجه می‌شوند. با توجه به اینکه در این پژوهش پارامترهایی از جمله جذب

یک شعاع انحناء خاص مثل ورق با شعاع انحناء ۳۰۰ هر چه شعاع انحناء افزایش می‌یابد تغییرات جذب انرژی کمتر می‌شود. مقدار جذب انرژی ورق‌های دارای لچکی با مقدار ناچیزی کاهش (کمتر از ۱٫۵ درصد) نسبت به ورق‌های ساده، دارای همان روندی می‌باشد که در رابطه با ورق‌های ساده گفته شد.



(ب)



(الف)

شکل ۱۷- نمودار انرژی-شعاع انحناء. (الف) ورق ساده، (ب) ورق با لچکی.

جدول ۷- نتایج مقدار جذب انرژی.

جذب انرژی (J)									نمونه‌ها
انحناء									
ورق با شعاع ۱۱۰ میلیمتر			ورق با شعاع ۳۰۰ میلیمتر			ورق تخت			
۵ cm	۳٫۵ cm	۲ cm	۵ cm	۳٫۵ cm	۲ cm	۵ cm	۳٫۵ cm	۲ cm	
۸۸٫۱۱	۶۰٫۷۲	۳۴٫۵۵	۸۶٫۹۷	۵۵٫۱۸	۲۹٫۰۸	۸۷٫۷۱	۵۹٫۳	۳۳٫۹۶	ورق ساده
۸۷٫۳۳	۵۹٫۰۹	۳۴٫۰۸	۸۵٫۳۵	۵۳٫۸۷	۲۸٫۹۲	۸۶٫۲۲	۵۸٫۳۷	۳۳٫۵۳	ورق با لچکی

ورق‌های تقویت شده، وجود لچکی‌ها موجب افزایش سختی نمونه‌ها و در نتیجه آن کاهش قابل توجه تغییر شکل نسبت به ورق‌های ساده می‌شود. مقدار درصد کاهش تغییر شکل ورق‌ها نسبت به درصد افزایش شتاب ضربه خیلی بیشتر می‌باشد. ورق‌های دارای لچکی نسبت به ورق‌های ساده جذب انرژی کمتری دارند، البته این کاهش کمتر از ۳ درصد می‌باشد.

با توجه به اینکه تکیه‌گاه‌های موجود فقط در یک جهت می‌باشند (در جهت صاف ورق)، بعد از برخورد ضربه زننده با وسط ورق، گسترش تغییر شکل از وسط ورق به سمت وجهی که تکیه‌گاه ندارد (قسمت انحنادار ورق)، بیشتر می‌باشد. لذا اگر در هر چهار وجه ورق تکیه‌ها داشته باشیم، می‌توان از تمام ظرفیت هر دو سخت‌کننده استفاده کرد و

۴- نتیجه‌گیری

ورق‌های فولادی در صنایع مختلف مانند خودروسازی، هواپضا، تانکرهای حمل و نگهداری سوخت و پایه پل‌های فلزی، اسکله‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد و مسئله ضربه و نفوذ در ورق‌های فولادی و همچنین جذب انرژی محور اصلی پژوهش‌های زیادی بوده است. در این پژوهش بررسی آزمایشگاهی روی رفتار ورق‌های تخت و انحنادار فولادی ساده و تقویت شده با لچکی تحت ضربه با سرعت پایین ناشی از سقوط آزاد وزنه انجام شد.

براساس نتایج بدست آمده از این تحقیق، ورق‌هایی که دارای لچکی می‌باشند نسبت به ورق‌های ساده دارای شتاب و نیروی ضربه بیشتری می‌باشند. لذا اثر شوک و ضربه وارده در اثر برخورد در این ورق‌ها بیشتر است. با این وجود در

می‌باشد در مقابل نیروی ضربه از خود مقاومت نشان می‌دهد. این روند در ورق‌های با لچکی مشابه ورق‌های ساده می‌باشد با این تفاوت که ورق با شعاع ۱۱۰ میلیمتر کمترین تغییر شکل را دارا می‌باشد. که نوع لچکی به کار رفته در این ورق که از شکل منحصر به فردی برخوردار می‌باشد (سخت-کننده انحنادار) عامل اصلی این روند می‌باشد.

با توجه به نتایج، ورق‌های با شعاع ۱۱۰ میلیمتر با اختلاف خیلی کمی نسبت به ورق‌های تخت دارای جذب انرژی بیشتری می‌باشند و ورق با شعاع ۳۰۰ میلیمتر جذب انرژی کمتری دارد که این روند در هر دو ورق ساده و با لچکی مشابه می‌باشد، که می‌توان دلیل اصلی آن را در ایجاد شدن ناحیه‌های تسلیم شده ورق (یا همان مفاصل پلاستیک) دانست.

با توجه به مطالبی که گفته شد، نوع تکیه‌گاه به کار رفته در این پژوهش عملکرد ورق با شعاع انحنای ۳۰۰ میلیمتر را تحت شعاع قرار داده است. در ضمن این نوع تکیه‌گاه باعث شده لچکی که موازی با تکیه‌گاه‌ها می‌باشد نتواند از تمام ظرفیت خود استفاده کند. با این حال با توجه به نوع تکیه‌گاه به کار رفته در این تحقیق، در بحث مقاوم سازی سازه‌ها در جایی که فضای کافی وجود داشته باشد بهترین نوع ورق، ورق با شعاع انحنای ۱۱۰ میلیمتر با لچکی می‌باشد. اما در جایی که با محدودیت فضا مواجه هستیم بهترین نوع ورق، ورق تخت با لچکی می‌باشد. از این المان‌ها می‌توان در بحث بدنه‌ی کشتی‌ها، پایه پل‌های فلزی و اسکله‌ها، سپر خودروها و موارد دیگر استفاده کرد. جهت بررسی‌های بیشتر می‌توان در هر چهار طرف ورق تکیه‌گاه مناسب طراحی کرد و همچنین با استفاده از نرم افزارهای المان محدود از جمله آباکوس، انسیس و غیره مدل عددی این پژوهش را انجام داد.

همچنین از میزان گستردگی تغییر شکل ایجاد شده جلوگیری کنیم. با توجه به بررسی سه انحنای مختلف و همچنین نوع تکیه‌گاه در این پژوهش، تغییرات شتاب در شعاع انحنای کم، زیاد می‌باشد و با افزایش بیشتر شعاع انحنای یک انحنای خاص تغییرات شتاب کم می‌شود. همچنین در این محدوده با کاهش خیلی کم شتاب مواجه هستیم که با کمی اغماض می‌توان آن را ثابت در نظر گرفت که مقدار شتاب در این محدوده به ورق تخت نزدیک می‌باشد. در ورق‌های با لچکی این روند مشابه ورق‌های ساده می‌باشد. در ضمن دلایلی هم‌چون وجود اصطکاک بین یاتاقان‌های ضربه‌زننده و میله‌های نگهدارنده وزنه، همچنین وجود میرایی عواملی هستند که بر روی نتایج تأثیر بسزایی دارند، البته باید در نظر داشت که شرایط تکیه‌گاهی و طریقه ساخت لچکی‌ها و نوع جوش عامل مهمی در مقدار نتایج می‌باشد. با توجه به نوع تکیه‌گاه کمترین تغییر شکل در این پژوهش و در ورق‌های ساده مربوط به ورق تخت می‌باشد و با افزایش انحنای تا یک حد مشخص که همان ورق با شعاع ۳۰۰ میلیمتر می‌باشد این افزایش ادامه دارد و با بیشتر شدن انحنای تا شعاع ۱۱۰ میلیمتر با کاهش تغییر شکل مواجه می‌شویم، اما تغییر شکل ایجاد شده در این ورق بیشتر از ورق تخت می‌باشد. با در نظر گرفتن نوع تغییر شکل‌های ایجاد شده در ورق‌ها می‌توان گفت که در ورق تخت ساده، تسلیم‌شدگی ابتدا در نزدیکی دو تکیه‌گاه ایجاد می‌شود و سپس وسط ورق تسلیم می‌شود (یعنی در سه ناحیه تسلیم‌شدگی داریم)، اما در ورق با شعاع ۱۱۰ میلیمتر در مرحله اول وسط ورق به تسلیم می‌رسد و در مرحله بعد در دو قسمت دیگر ورق (بین وسط ورق و تکیه‌گاه‌ها) تسلیم‌شدگی رخ می‌دهد (یعنی ورق در سه ناحیه تسلیم می‌شود)، و قسمت‌هایی از ورق که به تکیه‌گاه نزدیک

مراجع

- [1] A. Bidi, Gh. Liaghat, and Gh. Rahimi., "Experimental and numerical analysis of impact on steel curved panels", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 281-288, 2016.
- [2] L. A. Merzhievskii, and V. M. Titov, "Perforation of Plates through High Velocity Impact", *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, Vol. 16, pp. 757-772, 1975.
- [3] B. Toolea, M. Trabiaa, R. Hixsonb, S. K. Roya, M. Penab, S. Beckerb, E. Daykinb, E. Machorro, R. Jenningsa, and M. Matthes, "Modeling Plastic Deformation of Steel Plates in Hypervelocity Impact Experiments", *Journal of Procedia Engineering*, Vol. 103, pp. 458-465, 2015.
- [4] P. Kumar, J. LeBlanc, D. Stargel, and A. Shukla, "Effect of plate curvature on blast response of aluminum panels", *International Journal of impact engineering*, Vol. 46, No. 29, pp.74-85, 2018.

- [5] G. J. McShane, C. Stewart, M. T. Aronson, H. N. G. Wadley, N. A. Fleck, and V. S. Deshpande, "Dynamic rupture of polymer-metal bilayer plates", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 45, No. 16, pp. 4407-4426, 2008.
- [6] T. Kitada., "Ultimate strength and ductility of concrete-filled steel bridge piers", *Engineering Structures*, Vol. 20, pp. 347-361, 2017.
- [7] H. Saghafi, G. Minak, and A. Zucchelli, "Effect of preload on the impact response of curved composite panels", *Composites: Part B*, Vol. 60, pp.74-81, 2014.
- [8] M. Khedmati, and A. Nazari, "Numerical investigation into strength and deformation characteristics of preloaded tubular members under lateral impact loads", *Marine Structures*, Vol. 25, pp. 124-149, 2016.
- [9] F. Ustaa, F. Mullaoglu, H. S. Türkmen, D. Balkan, Z. Mecitoglu, H. Kurtaran, and E. Akay, "Effects of Thickness and Curvature on Impact Behaviour of Composite Panels", *Journal of Procedia Engineering*, Vol. 167, pp 216-222, 2016.
- [10] M. Choubini, Gh. H. Liaghat, and M. Hossein Pol, "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.
- [11] A. Bidi, Gh. Liaghat, and Gh. Rahimi, "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, 2017.
- [12] G. G. Corbett, S. R. Reid and W. Johnson, "Impact Loading Of Plates And Shells By Free-Flying Projectiles: A Review", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 18, No. 2, pp. 141-230, 2016.
- [13] A. Bidi, Gh. Liaghat, and Gh. Rahimi, "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, (In Persian), 2016.
- [14] M. Irshidat, A. Al-Ostaz, and A. H. D. Cheng, "Predicting the response of polyurea coated high hard steel plates to ballistic impact by fragment simulating projectiles", *Journal of Impact Engineering*, Vol. 12, pp. 156-170, 2014.
- [15] M. R. Khedmati, and M. Nazari, "A numerical investigation into strength and deformation characteristics of preloaded tubular members under lateral impact loads", *Marine Structures*, Vol. 25, pp. 33-5, 2012.
- [۱۶] علی علوی نیا و صابر چهاردولی، "بررسی تجربی و عددی تأثیر سوراخ و انحنای لبه بر ویژگی های فروپاشی جاذب های استوانه ای تحت بار محوری ضربه ای"، *مدلسازی در مهندسی*، دوره ۱۶، شماره ۵۳، تابستان ۱۳۹۷، صفحه ۶۵-۵۳.
- [۱۷] علی علوی نیا و حامد خدابخش، "بررسی عددی تأثیرفاصله ی لوله های جدار نازک متداخل بر رفتار مکانیکی و جذب انرژی آن ها"، *مدلسازی در مهندسی*، دوره ۱۴، شماره ۴۵، تابستان ۱۳۹۵، صفحه ۴۷-۳۳.
- [۱۸] سید سجاد جعفری و سعید فعلی، "بررسی تحلیلی برخورد پرتابه استوانه ای با دماغه های مختلف به ورق های ساندویچی"، *مدلسازی در مهندسی*، دوره ۱۳، شماره ۴۲، پاییز ۱۳۹۴، صفحه ۷۷-۶۵.
- [19] ASTM E8/E8M-09, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.