

بررسی اثر تقویت کننده‌های عرضی روی ورق‌های فولادی تخت و انحنادار تحت ضربه سقوط آزاد

مرتضی کمالوند^۴حسین حاتمی^{۳*}مجتبی حسینی^۲سید امیر موسوی زاده^۱

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه لرستان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۲۸)

چکیده

در این تحقیق، بررسی آزمایشگاهی و عددی بر روی ورق‌های فولادی تخت و انحنادار در دو حالت ساده و همراه با تقویت کننده‌ها با مقطع عرضی مختلف جهت ارزیابی‌های بیشتر، تحت اثر ضربه ناشی از سقوط آزاد وزنه صورت گرفته است. در این پژوهش از دو شعاع انحنای بی‌نهایت (ورق تخت) و ۱۱۰ میلی‌متر تحت ضربه ناشی از سقوط آزاد وزنه استفاده شده است. ورق فولادی انتخاب شده از جنس فولاد St ۱۲ و با ابعاد ۲۰۰*۲۲۰ میلی‌متر و با ضخامت ۱ میلی‌متر می‌باشد. جنس و ضخامت تقویت کننده‌های مورد استفاده نیز همانند ورق اصلی می‌باشد. پارامترهای مورد ارزیابی این پژوهش شامل مقدار شتاب ضربه، میزان تغییر شکل ماندگار و مقدار جذب انرژی ورق می‌باشد. برای مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شده است. مقاطعی که به‌عنوان تقویت کننده در بررسی‌های پارامتری عددی در نظر گرفته شده است شامل نواری، نیم‌استوانه‌ای، استوانه‌ای، سینوسی، مثلثی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که انحناء باعث کاهش شتاب ضربه، افزایش تغییر شکل ماندگار و جذب انرژی می‌شود. ایجاد تقویت کننده‌ها مقدار طول لهیدگی را کاهش داده اما تقویت کننده‌های نواری باعث کاهش جذب انرژی این ورق‌ها نسبت به ورق‌های ساده شده است. با توجه به انواع تقویت کننده‌ها، المان استوانه‌ای از عملکرد بهتری برخوردار می‌باشد، زیرا نسبت به تقویت کننده‌های متعامد دارای شتاب ضربه کمتر و همچون از جذب انرژی بیشتری برخوردار می‌باشد، البته مقدار تغییر شکل در این ورق‌ها افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی: تغییر شکل ماندگار، ضربه، ورق‌های فولادی مسطح و انحنادار، تقویت کننده

Studies on the Effect of Reinforcers Types on Flat and Curved Steel Sheets' Performance under Drop Impact

S. A. Mousavi Zadeh⁴M. Hosseini^{3*}H. Hatami²M. Kamalvand¹Civil Engineering Department
Lorestan University

(Received:16/August/2019 ; Accepted:19/November/2019)

ABSTRACT

In this research, laboratory investigations and numerical studies are performed on flat and curved steel sheets under the influence of impact caused by the free fall of weights, with and without reinforcers of different transections. In this study, a flat sheet (infinite curvature) and a curved sheet with the curvature radius of 110 mm and a specific level of impact energy (a free fall height) are used for st.12 steel sheets of 1 mm thickness with the dimensions of 220 * 200 mm. The material and thickness of the energy absorbers are similar as the original sheet, and rectangular, cylindrical, half cylindrical, sinusoidal and triangular transection shapes, are considered. In the experimental method, the pickup acceleration is measured by the accelerometer sensor and the post-blow-out plate deformation is measured. The evaluated parameters include the amount of impact acceleration, the rate of permanent deformation, and the amount of energy absorption by the sheet. The Abaqus finite element software is used for numerical modeling. The results show that the curvature reduces the acceleration of the impact and increases the steady deformation and the energy absorption. The reinforcers in general, reduce the amount of crush length, but tape reinforcers reduce also the energy absorption of these sheets compared to plain sheets. Regarding the variety of the reinforcers, the cylindrical element performs better, because it has less impact acceleration and more energy absorption than orthogonal reinforcers, however, there is an increase in the amount of deformation of these sheets.

Key word: Plastic deformation, Impact, Flat and curved steel sheets, Reinforcer

۱- کارشناسی‌ارشد: mousavizadeh.sa@gmail.com

۲- دانشیار: hosseini.h@lu.ac.ir

۳- استادیار (نویسنده پاسخگو): hatami.h@lu.ac.ir

۴- کارشناسی‌ارشد: kamalvand.m@gmail.com

* حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه جامع امام حسین (ع) داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (License CC BY-NC (Commons Creative در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://maj.ihu.ac.ir> دیدن فرمائید.

۱- مقدمه

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 می دهد.

در زمینه تأثیر ضربه با سرعت خیلی بالا تحقیقی توسط مرژیوسکی و همکاران [۴] برای بررسی نفوذ و تغییر شکل 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، اوتولنا و همکاران [۵] نحوه مدل سازی تغییر شکل پلاستیک صفحات فولادی تحت ضربه با سرعت خیلی زیاد مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق دو روش 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 [۶] اثر انحنای ورق فلزی بر روی مقاومت ضربه برای ورق آلومینیومی بررسی کردند. ورق مورد بررسی به ضخامت ۲ mm بوده و ضربه با سرعت بالا (در حد بالستیک) انجام شده است.

همچنین اوستا و همکاران [۷] 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 توسط چوبینی و همکاران [۸] 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.

ارشیدات و همکارانش [۹] خواص ورق فولادی سخت با روکش پلی اوریا را در مقابل ضربه بررسی نموده و نتیجه گرفتند که حد بالستیک با استفاده از روکش پلی اوریا بالا می رود. مسعود نظری و محمدرضا خدمتی [۱۰] به بررسی عددی ویژگی های مقاومت و تغییر شکل اعضای لوله های پیش بارگذاری شده تحت بارهای ضربه جانبی با استفاده از نرم افزار المان محدود ANSYS انجام شده است. نتایج نشان داد که با افزایش در مقدار پیش بارگذاری، مقاومت نهایی

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 بسیاری 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 همچون ضخامت، تخت یا انحنادار بودن آن ها، 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 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. در این پژوهش به بررسی ضربه بر روی ورق های فولادی تخت و انحنادار که به طور کلی در صنایع مختلف از جمله خودروسازی، هوافضا، تانکرهای حمل سوخت، پایه پل های فولادی (مکعبی و دایره ای)، اسکله ها و غیره و همچنین اثر استفاده از تقویت کننده ها با مقاطع عرضی مختلف روی مقدار نیروی وارده، تغییر شکل ماندگار و جذب انرژی آن ها تحت ضربه با سرعت پایین پرداخته می شود.

در تحقیقی تجربی و عددی توسط بیدی و همکاران [۱] اثر ضربه روی رفتار ورق فولادی و اثر انحنای آن ها 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 می یابد که مشخص شده برای ورق صاف، حداکثر شتاب ایجاد می شود. در پژوهشی دیگر توسط احمد بیدی و همکارانش [۲] تحلیل تجربی و عددی روی ورق خمیده دو لایه فولاد پلی اوریا تحت بار ضربه ای انجام گرفت. دیده شد که با افزایش شعاع انحنای ورق، مقدار حداکثر تغییر شکل ماندگار کاهش یافته ولی شتاب برخورد افزایش می یابد. در مطالعه ای دیگر توسط احمد بیدی و همکاران [۳] اثر افزودن نانو رس بر قابلیت جذب انرژی ورق های دولایه فولاد-پلی اوریا تحت بار ضربه ای بررسی گردید. نمونه های دولایه فولاد پلی اوریا و فولاد-نانوپلی اوریا تهیه و مورد آزمایش کشش ساده و ضربه سقوط آزاد قرار گرفتند. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن نانورس به ماده پلیمری

و شکل‌پذیری نهایی پایه‌های پل‌های فولادی مربع شکل و پایه پل فلزی مربع شکل همراه با سخت‌کننده‌های طولی داخلی همانند ستون قبلی با این تفاوت که در داخل آن از بتن پر شده است مورد بررسی قرار داده است. نتایج نشان داد، که سخت‌کننده‌ها و همچنین بتن باعث افزایش استحکام، مقاومت و انعطاف‌پذیری پل‌ها شده است. در تحقیقی که توسط اداره راه‌آهن فدرال آمریکا انجام شد [۲۲]، از پانل‌های ساندویچ فولادی جوش داده شده برای حفاظت پوسته تانکرهای حمل سوخت در برابر ضربه استفاده شد. برای محافظت از پوسته این تانکر از یک پانل انحنادار که در پشت آن از لوله‌هایی برای جذب انرژی می‌باشد استفاده شده است. نتایج نشان داد که اگر چه پانل حفاظتی آسیب جدی را تجربه کرد، اما تانکر فقط تغییر شکل دائمی را تجربه کرد و نشستی نداشت.

باتوجه به این که تقویت‌کننده‌ها دارای تنوع و شکل‌های متفاوتی می‌باشند، و عملکرد هر کدام در برابر نیروهای دینامیکی (ضربه) متفاوت می‌باشد، و همچنین با در نظر داشتن فضاها و نحوه عملکرد سازه‌های مختلف و همچنین انتظاری که ما از سازه در مواجه شدن با این نیروها داریم، باید بهترین نوع تقویت‌کننده را برای سازه مورد نظر انتخاب کنیم.

لذا در این مطالعه، از دو روش آزمایشگاهی و عددی استفاده شده است. مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار المان محدود ABAQUS [۲۳] انجام شده و به وسیله داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده، صحت‌سنجی می‌شود. این تحقیق در سه مرحله انجام پذیرفته است. در مرحله اول تست آزمایشگاهی و عددی بر روی دو نوع ورق، شامل ورق تخت و ورق با شعاع انحنای ۱۱۰ mm ساده که در دو لبه گیردار شده و با دو تقویت‌کننده‌نوار عمود بر صفحه ورق به صورت عمود بر هم، برای ارتفاع سقوط آزاد ۵ cm انجام شده است. در مرحله دوم در نرم‌افزار ABAQUS، نحوه قرارگیری و شکل مقطع تقویت‌کننده‌ها با محیط مقطع مشابه حالت اول تغییر داده شده و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در مرحله سوم برای هر دو نوع ورق تخت و ورق با شعاع ۱۱۰ mm با مدل‌سازی در نرم‌افزار ABAQUS و برای ارتفاع سقوط ثابت ۱۰ cm و همچنین به صورت چهار طرف گیردار، از تقویت‌کننده‌های عرضی نوار، نیم استوانه‌ای، استوانه‌ای، سینوسی، مثلثی گسترش یافته به صورت سرتاسری در کل پهنای ورق با محیط‌های مقطع

کاهش می‌یابد و عضو تحت بارهای با مقدار کم تخریب می‌شود. در تحقیقی توسط امینی و همکاران [۱۱]، اثر پلی‌اوریا بر پاسخ صفحات فولادی در بارهای ضربه‌ای در آزمایش‌های مستقیم پالس فشاری بررسی شد، نتایج نشان داد که حضور پلی‌اوریا روی وجه پشتی (در طرف مقابل دریافت بار) از صفحات فولادی، می‌تواند جذب انرژی صفحات را افزایش دهد و به کاهش خرابی آنها کمک کند. در پژوهشی که توسط قاسمی و همکارانش [۱۲] انجام شد، مقاومت ضربه در بتن مسلح درجه‌بندی شده عملکردی (FGRC) که دارای انحنای می‌باشد، به صورت طبقه‌بندی (لایه‌بندی) شده و بدون تقویت معمولی تحت سقوط وزنه و ضربه پرتابه مورد بررسی قرار گرفته است.

از جدیدترین تحقیقات انجام گرفته در زمینه تأثیر ضربه بر صفحات، آقای هیون بوم پارک [۱۳] مقایسه‌ای روی رفتار صفحات فولادی و کامپوزیتی گرافیت-اپوکسی تحت اثر ضربه با سرعت پایین انجام داد. نتایج نشان داد که صفحات لایه‌های کامپوزیتی حدود دو برابر بیشتر از صفحات فولادی جابه‌جایی در بارهای ضربه‌ای مختلف دارند. بنابراین، مشخص شد که مشخصه انعطاف‌پذیری صفحات لایه‌های کامپوزیتی روی جذب ضربه تأثیر دارد. مهدی عزتی و همکارانش [۱۴]، از یک مدل عددی به منظور شبیه‌سازی پاسخ نیرو-تغییر مکان اعضای لوله‌ای تحت ضربه جانبی بدون در نظر گرفتن فشار داخلی یا نیروی محوری استفاده شده و با روابط تحلیلی موجود در آیین‌نامه‌ها مقایسه شده است. در سالیان اخیر نیز روی نمونه‌های خاصی مانند ورق‌های مشبک بارگذاری‌های ضربه‌ای توسط حاتمی و همکاران [۱۵-۱۸] انجام شده است که این نمونه‌های خاص دارای ویژگی‌های خاصی مانند سبکی در عین جذب انرژی بالا تحت بارگذاری ضربه‌ای از خود نشان داده‌اند.

در تحقیقی دیگر توسط کوروش خورشیدی [۱۹]، به بررسی ضربه الاستوپلاستیک یک گلوله کرومی فولادی با ورق دارای شرایط مرزی دولبه موازی ساده و سایر لبه‌ها ترکیبی از شرایط مرزی ساده، گیردار و آزاد پرداخته است. سید وحید حسین و همکارانش [۲۰]، به بررسی تأثیر پارامترهای هندسی و مکانیکی بر نیروی لهیدگی جاذب‌های انرژی چهارگوش تحت بارگذاری محوری پرداختند، نتایج حاکی از آن بود که کرنش پلاستیک زیاد در گوشه‌های سلول‌های جدار نازک، باعث جذب هرچه بهتر انرژی می‌شود. در تحقیقی از کیتادا [۲۱]، که به بررسی استحکام

(یک ارتفاع سقوط آزاد) مد نظر است، چهار سری نمونه آزمایش شامل نمونه‌های ساده به اختصار (Inf)، نمونه ساده با تقویت‌کننده نواری (Inf-P)، انحنادار با شعاع انحنای ۱۱۰ (R110) و انحنادار با تقویت‌کننده نواری (R110-P) خواهیم داشت که برای هر کدام سه نمونه برای بررسی خطا در نظر گرفته شده است که در مجموع ۱۲ نمونه آزمایش خواهیم داشت. در شکل‌های ۱ و ۲ نمای بالایی و پشت ورق‌های تقویت‌شده با تقویت‌کننده نواری برای تست آزمایشگاهی نمایش داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل (۱): ورق تخت (شعاع انحنای بی‌نهایت). (الف) ساده، (ب) وجه پشتی ورق با تقویت‌کننده نواری



(ب)



(الف)

شکل (۲): ورق با شعاع ۱۱۰ mm. (الف) ساده، (ب) وجه پشتی ورق با تقویت‌کننده نواری

۲-۲- تعیین مشخصات مکانیکی ورق مورد استفاده در آزمایش

برای تعیین خواص مکانیکی ورق فولادی مورد آزمایش سه نمونه آزمایشگاهی طبق استاندارد ASTM E8/E8M-09 [۲۷]، برش داده شده و مورد آزمایش کشش قرار گرفته است. از نتایج حاصل از این آزمون خصوصیات الاستیک و پلاستیک فولاد مصرفی شامل مدول الاستیسیته (بانگ)، نقطه تسلیم، استحکام، کرنش نهایی از روی نمودار تنش کرنش حاصل شده، به دست می‌آید. برای نمونه‌های آزمایشگاهی به شکل ورق، برای انجام آزمون کشش لازم است که نمونه‌هایی به شکل دمبل آماده‌سازی شوند. برای جلوگیری از لغزش ورق‌ها در دستگاه تست کشش از سنباده

یکسان استفاده شده است. همچنین تحقیق و پژوهش روی ورق‌های جناب نازک و ساندویچ پنل‌ها تحت بارگذاری ضربه‌ای به صورت تجربی و عددی نیز انجام شده است [۲۴-۲۶].

در تمامی تحقیقات پیشین روی ورق‌های جدار نازک با تقویت‌کننده به صورت عددی و تجربی تحقیقات پراکنده‌ای انجام شده است که پارامترهای ضخامت، جذب انرژی، ارتفاع سقوط تعداد تقویت‌کننده‌ها، انحنای یک پارامتر مهم است و موارد دیگر تجمیع نگردیده است. در تحقیق حال حاضر روی ورق‌های مسطح و انحنادار به صورت عددی و تجربی پارامترهای ارتفاع سقوط، مقدار جذب انرژی، منحنی نیرو جابجایی و شتاب زمان، مقدار ضخامت ورق جدار نازک و غیره مورد بررسی و مقایسه قرار خواهد گرفت.

۲- آزمایش تجربی

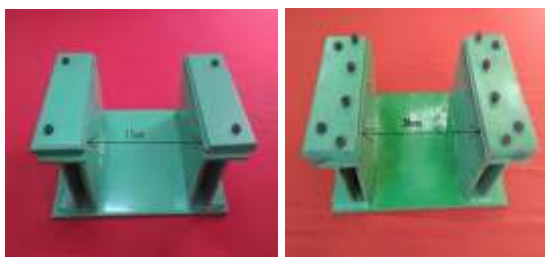
در بخش تجربی مشخصات نمونه‌ها و خواص مکانیکی آن‌ها تعیین می‌گردد. سپس نحوه طراحی فیکسچر بیان شده است. روش استفاده از دستگاه تست ضربه و نحوه اندازه‌گیری داده‌های تغییر شکل و جذب انرژی اشاره شده است.

۲-۱- مشخصات نمونه‌های آزمایش

برای انجام آزمایش ضربه از ورق فولادی تخت و انحنادار با استاندارد ST12 DIN 1623 (ST12) به ضخامت ۱ mm تولیدی شرکت فولاد مبارکه اصفهان استفاده شده است. ابعاد کلی ورق‌ها به اندازه ۲۰ × ۲۲ سانتی‌متر می‌باشد که با توجه به نحوه قرارگیری روی تکیه‌گاه‌ها، ابعاد مفید این ورق‌ها ۲۰ × ۲۰ سانتی‌متر است. در این پژوهش از دو شعاع انحنای بی‌نهایت (ورق تخت) و ۱۱۰ mm و همچنین از دو ارتفاع ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر استفاده شده است. برای تقویت‌کننده‌ها از فولاد با جنس مشابه ورق اصلی به ضخامت ۱ mm با اتصال به وجه پشتی ورق‌ها، به صورت عمود بر صفحه ورق با استفاده از جوش نقطه‌ای اتصال داده شده است. برای بقیه تقویت‌کننده‌ها می‌توان از روش‌های متداول اتصال دو ورق مثل با قوس الکتریکی یا پرچ استفاده کرد. چون ورق‌ها دارای دو نوع انحنای مختلف می‌باشند، به همین دلیل تقویت‌کننده‌ها مورد استفاده در این ورق‌ها متناسب با انحنای ورق ایجاد شده‌اند.

در مرحله اول آزمایش که به دو روش تجربی و عددی انجام شده است با توجه به این که یک سطح انرژی ضربه

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، تکیه گاهی وجود ندارد. با توجه به این که از دو نوع انحنا در این پژوهش استفاده شده است و لبه‌های این ورق‌ها با هم متفاوت است، لذا برای مشابه بودن تکیه‌گاه در هر دو نوع ورق، لبه‌های ورق با شعاع انحنای ۱۱۰ mm را به اندازه ۱ سانتی‌متر خم کرده و موازی با سطح افق قرار می‌دهیم. میزان طول گیرداری ورق در تکیه‌گاه ۱ cm می‌باشد که با سفت کردن پیچ‌های فوقانی، تلاش شده است که از لغزش ورق‌ها جلوگیری شود. در بخش بالایی فیکسچر (بر روی بال فوقانی تیر آهن‌ها) از یک پلیت فولادی به‌عنوان نگهدارنده 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. برای فراهم کردن شرایط مرزی گیردار، پلیت‌های فولادی نگهدارنده با استفاده از ۶ پیچ به قطر ۸ mm به بال فوقانی پایه‌ها متصل می‌گردد تا ورق‌ها را به‌طور کامل در خود حفظ کنند. البته در فیکسچر B به دلیل فراهم آوردن شرایط گیرداری کافی از دو پیچ به قطر ۸mm استفاده شده است. در شکل ۵ نمای دو فیکسچر مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است.



(الف) (ب)

شکل (۵): فیکسچرها. (الف) برای نگهداری ورق تخت (ب) برای نگهداری ورق با شعاع انحنای ۱۱۰ mm

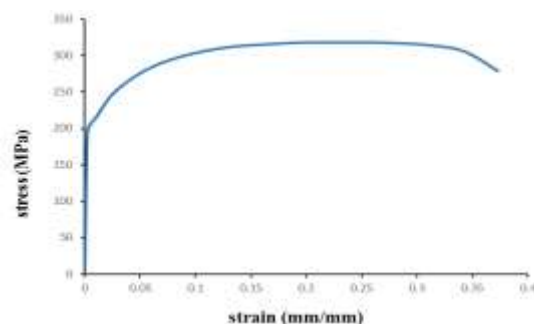
۴-۲- دستگاه آزمایش تست ضربه و معرفی شتاب‌سنج

دستگاه مورد استفاده برای تست ضربه در این پژوهش، دستگاه تست سقوط آزاد (دراپ‌همر) ۷۵۰۰ ژول (DH-TM 7500 J) می‌باشد که مربوط به دانشگاه لرستان و ساخت ایران است. این دستگاه از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده است، که عبارت‌اند از: قسمت کنترل مرکزی دستگاه، سامانه اندازه‌گیری و ضبط اطلاعات، موتور، پایه‌های نگهدارنده ضربه‌زننده، وزنه‌های ضربه‌زننده و سره

استفاده شده است. در شکل ۳ نمونه‌های این آزمایش نشان داده شده است. دستگاه تست کشش ۵ تنی ساخت کشور تایوان و مربوط به شرکت GOTECH می‌باشد. نمودار تنش-کرنش حاصل از این آزمایش در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین در جدول ۱ مشخصه‌های مهم مکانیکی فولاد مصرفی همچون مقاومت تسلیم، مدول یانگ، تنش، کرنش و ضریب پواسون ارائه گردیده است.



شکل (۳): نمونه‌های قبل و بعد از تست کشش برای تعیین مشخصات مکانیکی فولاد.



شکل (۴): نمودار تنش-کرنش حاصل از تست کشش

جدول (۱): مشخصات مکانیکی فولاد مصرفی

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

۳-۲- فیکسچر

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 از فیکسچر (ب) برای ورق با شعاع انحنای ۱۱۰ mm استفاده شده است. این

همچنین برای کم کردن مقدار خطا در محاسبه تغییرشکل ماندگار از روش دستی هم برای محاسبه تغییرشکل استفاده شده است.

۲-۶- اندازه‌گیری جذب انرژی

یکی از پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش مقدار جذب انرژی توسط ورق‌های فولادی ساده و با تقویت‌کننده می‌باشد با استفاده از رابطه ۱ حداکثر مقدار انرژی را برای ارتفاع‌های سقوط ۵ و ۱۰ سانتی‌متر مورد نظر محاسبه می‌گردد. برای به‌دست آوردن جذب انرژی ورق‌ها از محاسبه سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی که معادل مقدار جذب انرژی که بر مبنای رابطه ۲ می‌باشد، استفاده شده است.

$$E = m \cdot g \cdot h \left\{ \begin{array}{l} h = 0.05 \text{ m} \rightarrow E = 90 \text{ J} \\ h = 0.10 \text{ m} \rightarrow E = 177 \text{ J} \end{array} \right. \quad (1)$$

$$E = \int_{x_2}^{x_1} F(x) dx \quad (1)$$

۳- مدل‌سازی عددی

به‌منظور بررسی عددی رفتار ورق‌های مسطح و انحنادار تقویت شده تحت ضربه ناشی از سقوط آزاد وزنه و مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی، مدل‌سازی المان محدودی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS [۲۳] انجام شده است. مراحل شبیه‌سازی مورد نظر که به‌طور کامل در این نرم‌افزار انجام شده است، به‌صورت زیر می‌باشد:

۳-۱- مدل‌سازی رفتار فولاد

نمودار تنش-کرنش فولاد ST12 حاصل شده از آزمون کشش تک محوری (شکل ۴) به‌عنوان 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 ۰/۳ لحاظ شده است. در تغییرشکل‌های بزرگتر، مصالح فولادی وارد محدوده رفتار با تغییرشکل ماندگار می‌شوند. 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.

ضربه زننده به شکل نیم کره می‌باشد. حداکثر ارتفاع قابل تنظیم این دستگاه ۳ m می‌باشد و جرم ضربه‌زننده در این دستگاه از ۱۸۰ تا ۲۵۰ کیلوگرم قابل تنظیم می‌باشد. جرم ضربه زننده برای این تحقیق ۱۸۰ kg انتخاب شده است. سره ضربه زننده به شکل نیم کره به قطر ۱۲ cm است. در جدول ۲ خواص مکانیکی سره ضربه‌زننده بیان شده است. این دستگاه برای ثبت تاریخچه شتاب از لحظه شروع تماس ضربه‌زننده با نمونه‌ها تا مدت زمان حدود دو ثانیه بعد از ضربه توسط شتاب‌سنج ضبط شده است. لذا تاریخچه شتاب با استفاده از حسگر شتاب‌سنج مدل ACC-200 g ساخت ایران اندازه‌گیری می‌شود. دامنه عملکرد این حسگر از ۰ تا ۲۰۰ g می‌باشد. مبنای محاسبات برای اندازه‌گیری شتاب، حرکت ضربه‌زننده و وزنه متصل به آن است، که توسط شتاب‌سنج متصل به مجموعه وزنه، اندازه‌گیری می‌گردد. شتاب‌سنج در این دستگاه با استفاده از چسب به ضربه‌زننده متصل می‌شود. در شکل ۶ تصویری از دستگاه دراپ‌همر و سره ضربه‌زننده دستگاه نشان داده شده است.

جدول (۲): مشخصات مکانیکی سره ضربه‌زننده

جرم حجمی (kg/m ³)	مدول یانگ (GPa)	ضریب پواسون
۹۹۴۵/۰	۲۳۰/۰	۰/۳



(ب)



(الف)

شکل (۶): دستگاه دراپ‌همر. (الف) نمای کلی، (ب) سره ضربه‌زننده.

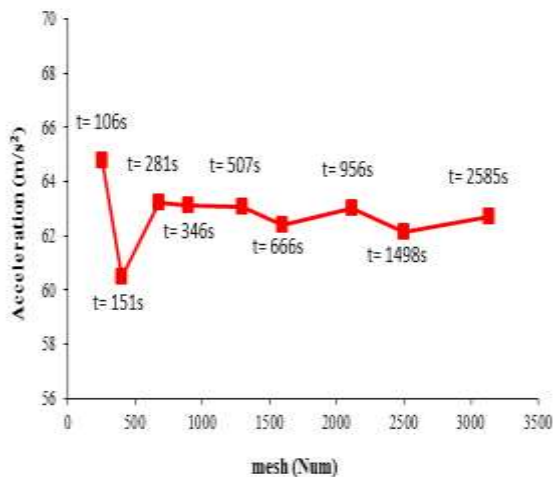
۲-۵- اندازه‌گیری تغییرشکل پلاستیک

برای اندازه‌گیری تغییرشکل ماندگار از سامانه اندازه‌گیری متصل به دستگاه استفاده شده است. با توجه به محدودیت‌های دستگاه از جمله قطر سره ضربه‌زننده و

$$v = \sqrt{2gh} = \begin{cases} h = 50 \text{ mm} \rightarrow v = 1000 \text{ mm/s} \\ h = 100 \text{ mm} \rightarrow v = 1400 \text{ mm/s} \end{cases} \quad (3)$$

۳-۴- 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، بهینه ترین حالت نیز باشد. در روش اجزاء محدود معمولاً هر چه تعداد اجزاء بیشتر باشد جواب مسأله از دقت بیشتری برخوردار است، از طرف دیگر افزایش تعداد المان‌ها باعث افزایش زمان تحلیل می‌شود. برای به دست آوردن تعداد اجزای مناسب باید حساسیت یک پارامتر خاص را با افزایش تعداد اجزا بررسی نمود [۲۸]. به همین منظور در این تحقیق اثر تعداد اجزاء بر میزان شتاب برای نمونه ورق تخت ساده مورد بررسی قرار گرفته است. از ۹ مدل با تعداد مش‌های افزایشی برای این هدف در نظر گرفته شده است. در شکل ۷ نمودار شتاب در مقابل تعداد مش و همچنین زمان تحلیل هر مدل مش‌بندی برای تحلیل ورق نشان داده شده است. همان‌طور که 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. سائز مش‌ها با توجه به شکل ۷ از بزرگ به کوچک (در نمودار از چپ به راست) برابر با ۱۳/۷۵، ۱۱، ۸/۴۶، ۷/۳۳، ۶/۱۱، ۵/۵، ۴/۷۸، ۴/۴، ۳/۹۲ بر حسب mm می‌باشد.



شکل (۷): نمودار شتاب بر حسب تعداد مش.

۳-۲- مدل هندسی و مش‌بندی مصالح مصرفی

ابعاد هندسی ورق‌های تخت در مدل عددی به صورت مربع ۲۰*۲۰ سانتی‌متر با ضخامت ۱ mm می‌باشد. همچنین هندسه ورق‌های انحنادار همانند نمونه‌های تجربی اما بدون یک سانتی‌متر مسطح در هر طرف برای تکیه‌گاه، در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی این عناصر از مدل غشای سه بعدی و از نوع تغییرشکل‌پذیر استفاده شده است. برای مش‌بندی ورق‌ها از المان‌های غشایی ۴ گرهی با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته با نام S4R استفاده شده است. ابعاد سخت‌کننده نواری نیز همانند نمونه‌های آزمایشگاهی به طول ۲۰ و ارتفاع ۲ cm و همچنین ضخامت ۱ mm است و ابعاد بقیه تقویت‌کننده‌ها از جمله مساحت، محیط و ضخامت مشابه با نوع نواری و در نرم‌افزار به صورت المان پوسته‌ای مدل‌سازی شده‌اند. برای اتصال تقویت‌کننده‌ها به صفحات از قابلیت Tie استفاده شده است. در شبیه‌سازی ضربه‌زننده، تنها سره ضربه‌زننده که در تماس با ورق قرار می‌گیرد، مدل شده است. این المان نیم‌کره شکل با قطر ۱۲ cm می‌باشد. به علت سختی بسیار زیاد آن نسبت به ورق‌های فولادی آزمایش، از نوع مصالح صلب، در نظر گرفته شده است. این عضو در ابتدا به صورت جامد سه بعدی مدل شده است و در ادامه برای کاهش المان‌های مورد نیاز برای مش‌بندی، با استفاده از قابلیت تبدیل المان جامد به المان پوسته، فقط جداره بیرونی آن نگه داشته شده است. بدین صورت تعداد المان‌های کل آن برابر با ۸۵۶ عدد و از نوع R3D4 می‌باشد.

۳-۳- اندازه‌گیری سرعت و شرایط مرزی

با توجه به این‌که ورق‌های فولادی به پهنای ۱ cm 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 دورانی در دو لبه رو به روی هم فراهم شده است. برای شبیه‌سازی سقوط وزنه نیز از سرعت معادل در لحظه پیش از برخورد استفاده می‌شود. 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 به دست می‌آید. بدین صورت با استفاده در رابطه ۳ خواهیم داشت:

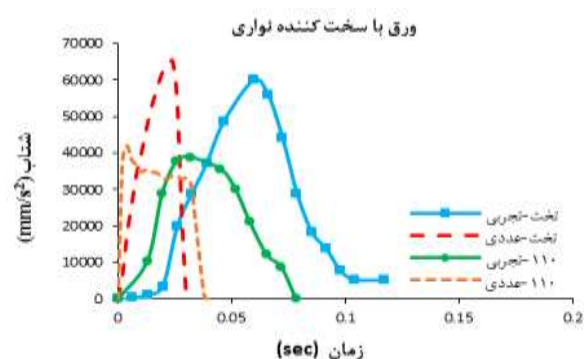
می‌باشد، که باعث افزایش سختی ورق به مقدار قابل توجه شده است. دیده می‌شود که در ورق انحنادار ساده و با تقویت‌کننده، شتاب وارده به ترتیب حدود ۱۲۰ و ۵۵ درصد کمتر از ورق تخت ساده و با تقویت‌کننده می‌باشد. یعنی با افزایش انحناء شتاب کاهش یافته است. در شکل ۱۱ نمای زیرین ورق تخت تقویت شده پس از انجام تست ضربه برای هر دو مدل تحلیل عددی و آزمایشگاهی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در وسط تقویت‌کننده در راستای عمود بر تکیه‌گاه، تنش‌های بسیار بزرگ کششی ایجاد می‌شود و وارد مرحله سخت شدگی کرنشی می‌شود.

این در حالی است که تقویت‌کننده در راستای تکیه‌گاه تنش کمی را تحمل می‌کند و تأثیر ناچیزی در سختی ورق دارد. همچنین در شکل ۱۲ نیز نمود تغییر شکل برای ورق انحنادار با تقویت‌کننده نشان داده شده است. دیده می‌شود در این حالت نیز تقویت‌کننده در راستای عمود بر تکیه‌گاه، تنش‌های بسیار بزرگی را تحمل می‌کند. در فاصله حدود یک‌چهارم از طول ورق در هر طرف از ورق به علت مقاومت بالای تقویت‌کننده در برابر خم شدن، تنش‌های فشاری موجب کماتش ورق در این ناحیه می‌شود و در میانه تقویت‌کننده نیز تنش‌های کششی بزرگ تا مرز گسیختگی رخ می‌دهد. ورق سخت‌کننده در راستای تکیه‌گاه نیز تأثیر کمی روی مقاومت ورق دارد اما موجب توزیع تنش در سطح وسیع‌تری از ورق می‌شود.

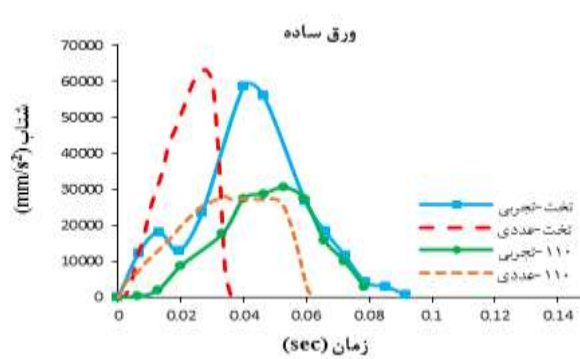
۴- نتایج تست تجربی و صحت‌سنجی نمونه‌های عددی

در مرحله اول تحلیل که به صورت تجربی و عددی می‌باشد، به بررسی نتایج ورق تخت و ورق با شعاع انحنای ۱۱۰ mm ساده و با تقویت‌کننده‌نوار برای ارتفاع سقوط ۵cm پرداخته می‌شود. در تست تجربی تکیه‌گاه‌های گیردار تنها در دو لبه‌ای که صاف می‌باشد قرار داده شده و دو لبه دیگر ورق آزاد می‌باشند. در مدل عددی، برای حالت اول تکیه‌گاه‌ها مطابق تست آزمایشگاهی در دو وجه ورق می‌باشد.

نمودارهای تغییرات شتاب تابع زمان برای هر چهار نمونه آزمایش شده به همراه داده‌های حاصل از تحلیل عددی در شکل ۸ برای مقایسه نشان داده شده است. در شکل ۹ نمودار تغییرات تغییر شکل پلاستیک و در شکل ۱۰ نمودار نیرو در برابر جابه‌جایی حاصل از تست آزمایشگاهی و مدل عددی نشان داده شده است. همچنین در جدول ۳ نتایج تحلیل‌ها و مقدار سطح زیر نمودارهای بار-جابه‌جایی که معرف مقدار جذب انرژی توسط ورق است، به صورت خلاصه ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که وجود تقویت‌کننده نواری در پشت ورق‌ها باعث افزایش شتاب هر دو نوع ورق تخت و انحنادار شده که این افزایش شتاب در ورق تخت حدود ۴ درصد و در ورق با شعاع ۱۱۰mm حدود ۴۹ درصد می‌باشد، که علت افزایش بیشتر در ورق انحنادار، نوع انحناء و شکل تقویت‌کننده به کار رفته در ورق

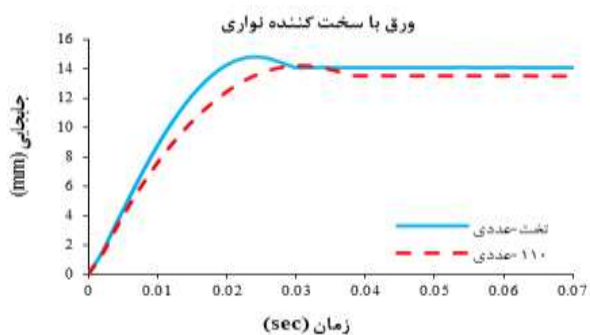


(ب)

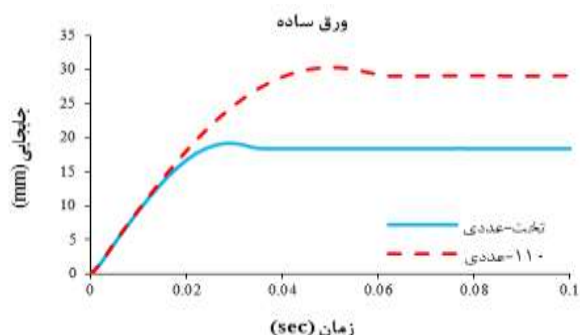


(الف)

شکل (۸): نمودار شتاب- زمان آزمایشگاهی و عددی برای ارتفاع ۵ cm. (الف) ورق ساده، (ب) ورق با المان نواری.



(ب)

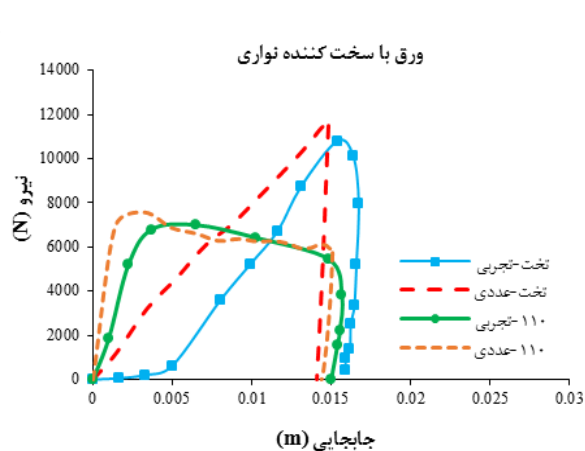


(الف)

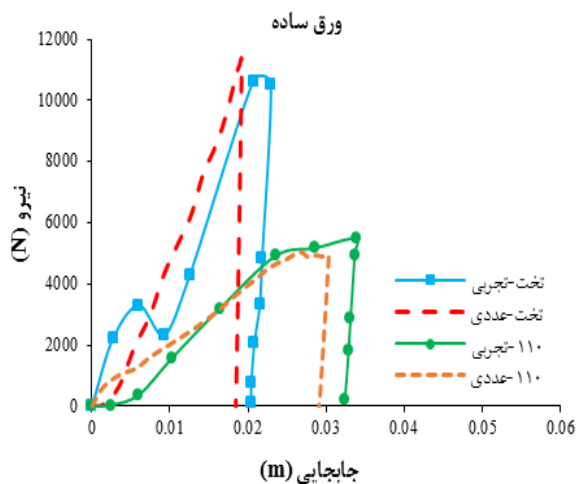
شکل (۹): نمودار جابجایی-زمان مدل عددی برای ارتفاع ۵ cm. (الف) ورق ساده، (ب) ورق با المان نواری

جدول (۳) نتایج تست آزمایشگاهی و عددی برای حالت دو طرف گیردار برای ارتفاع سقوط ۵ cm

110-P	110	Inf-P	Inf	روش تحلیل	پارامترها
۳۸/۹	۳۰/۵	۶۰/۰	۵۸/۵	تجربی	شتاب (m/s^2)
۴۲/۰	۲۸/۰	۶۵/۳	۶۳/۱	عددی	
۷/۹	۸/۱	۸/۸	۷/۸	%	درصد اختلاف
۱۵/۰	۳۲/۲	۱۵/۶	۲۰/۳	تجربی	تغییر شکل ماندگار (mm)
۱۳/۷	۲۹/۳	۱۴/۱	۱۸/۴	عددی	
۸/۶	۹	۹/۶	۹/۳	%	درصد اختلاف
۸۷/۳	۸۸/۱	۸۶/۲	۸۷/۷	تجربی	جذب انرژی (J)
۸۵/۸	۸۶/۸	۸۵/۶	۸۵/۸	عددی	
۱/۷	۱/۴	۰/۷	۲/۱	%	درصد اختلاف

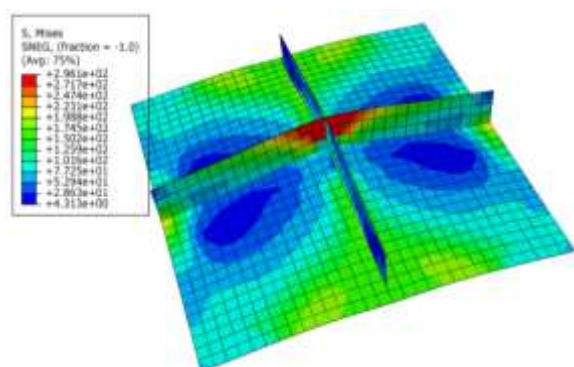


(ب)



(الف)

شکل (۱۰): نمودار نیرو-جابجایی آزمایشگاهی و عددی (الف) ورق ساده، (ب) ورق با المان نواری.

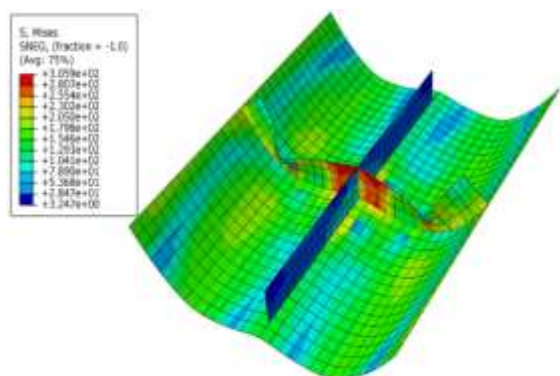


(ب)



(الف)

شکل (۱۱): وجه پشتی ورق تخت با المان نواری برای ارتفاع سقوط ۵ cm، (الف) تجربی، (ب) مدل عددی.



(ب)



(الف)

شکل (۱۲): وجه پشتی ورق با شعاع ۱۱۰ mm با المان نواری برای ارتفاع سقوط ۵ cm، (الف) تجربی، (ب) مدل عددی.

آزمایشگاهی توافقی مناسبی را نشان می‌دهند و می‌توان از مدل عددی برای تحلیل‌های جامع‌تر در این زمینه استفاده نمود.

۵- مطالعات پارامتری بر روی عملکرد ورق‌ها

در این بخش پارامترهای مقطع تقویت کننده، مود تغییر شکل، شتاب، تغییر مکان، مقدار جذب انرژی و نوع تکیه‌گاه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۵-۱- بررسی عددی تأثیر شکل مقطع تقویت کننده

در عملکرد ورق‌ها

در این مرحله به بررسی عددی ورق‌های تخت و انحنا دار با شعاع انحنای ۱۱۰ mm با تقویت کننده‌های عرضی مختلف برای ارتفاع سقوط آزاد ۵ cm که در دو طرف گیردار شده است (همانند تست آزمایشگاهی)، پرداخته می‌شود تا بدین وسیله تأثیر شکل مقطع تقویت کننده بر مشخصات مختلف

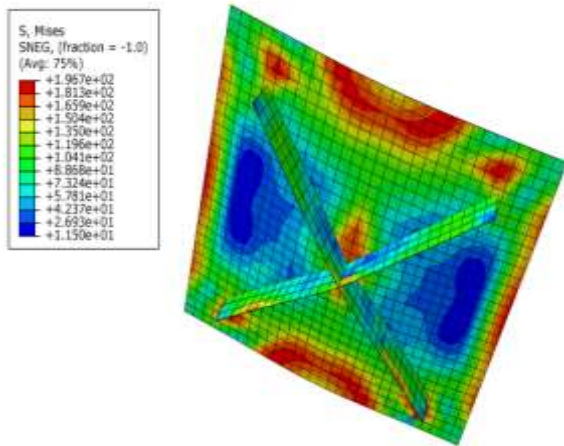
با توجه به نتایج این تحلیل دیده می‌شود که ورق‌های با المان نواری دارای تغییر شکل کمتری نسبت به ورق‌های ساده می‌باشند. که این کاهش تغییر شکل برای ورق‌های تخت و ورق انحنا دار به ترتیب حدود ۲۳ و ۵۳ درصد است. در ورق‌های ساده با افزایش انحناء تغییر شکل حدود ۵۹ درصد افزایش می‌یابد، یعنی ورق با شعاع ۱۱۰ mm تغییر شکل بیشتری نسبت به ورق تخت دارد. اما در ورق‌های با المان نواری تغییر شکل ورق انحنا دار حدود ۳ درصد کمتر از ورق تخت می‌باشد. علاوه بر این داده‌های مقدار جذب انرژی نشان می‌دهد که هر دو نوع ورق تخت و انحنا دار همراه با المان نواری دارای جذب انرژی کمتری (کمتر از ۱ درصد) نسبت به ورق‌های ساده می‌باشند. همچنین ورق انحنا دار در هر دو حالت ساده و با المان نواری از جذب انرژی بیشتری (کمتر از ۱ درصد) نسبت به ورق تخت برخوردار می‌باشد. در مجموع مود تغییر شکل ورق‌ها و داده‌های حاصل از هر دو تحلیل عددی و

تقویت کننده نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود توزیع تنش در ورق با تقویت کننده قطری به شکل گسترده تری انجام شده و تنش‌های قابل توجه در تقویت کننده ایجاد نمی‌شود (بیشینه مقدار تنش ۱۹۴ MPa است) اما در ورق‌های با سخت کننده نواری متعامد استوانه‌ای تنش‌های بسیار بزرگی در سخت کننده‌ها ایجاد می‌شود (در حدود ۲۹۷ MPa).

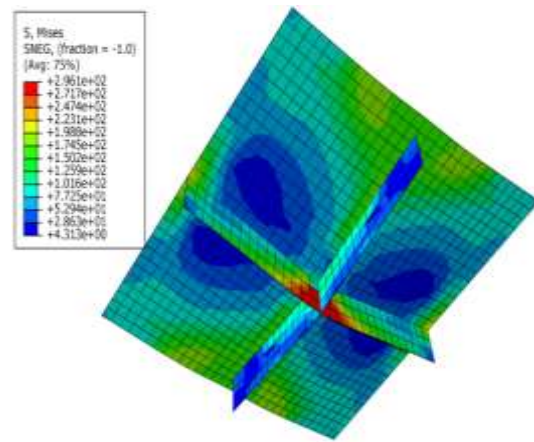
عملکرد ورق‌ها بررسی گردد. سخت کننده‌های عرضی که مورد بررسی قرار می‌گیرد به شکل نواری شامل متعامد (همانند حالت قبل) و قطری، نیم استوانه‌ای و استوانه‌ای می‌باشد. میزان فولاد مصرفی تقویت کننده‌ها برای همه نمونه‌ها شامل محیط مقطع و طول آن‌ها یکسان می‌باشد.

۵-۱-۱- مود تغییر شکل و توزیع تنش در ورق‌ها

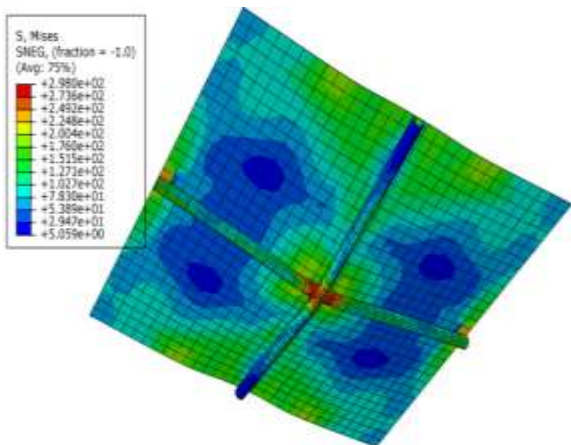
در شکل ۱۳ (الف) تا (د) مود تغییر شکل و توزیع تنش ون میسر در ورق‌های تخت تقویت شده با انواع شکل



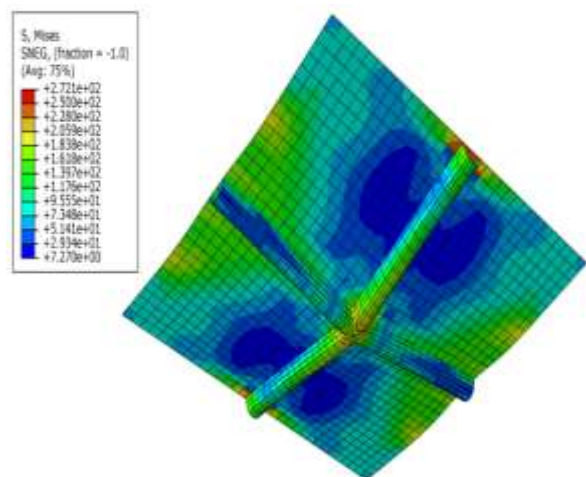
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

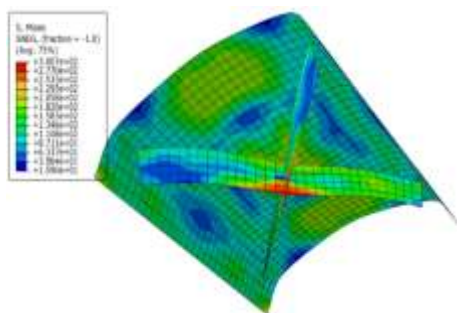
شکل (۱۳): مود تغییر شکل و توزیع تنش در ورق‌های تخت یا تقویت کننده‌های مختلف شامل: (الف) نواری متعامد، (ب) نواری قطری، (ج) نیم استوانه‌ای، (د) استوانه‌ای.

این ورق‌ها تنش در تقویت کننده‌ها نسبت به ورق‌های تخت بیشتر است و بیشینه مقدار در تقویت کننده استوانه‌ای

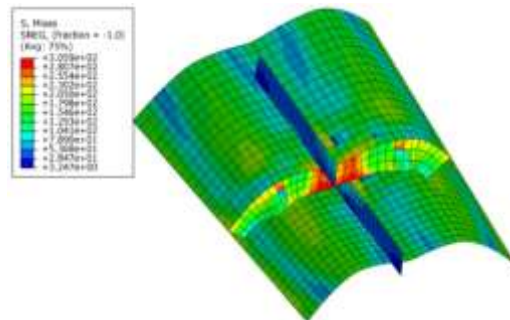
در شکل ۱۴ (الف) تا (د) نیز توزیع تنش در ورق‌های تقویت شده انحنادار نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در

نوار عمود بر هم می‌باشد.

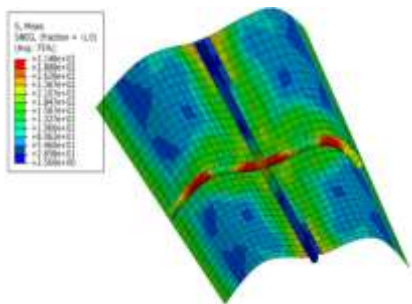
رخ می‌دهد. همانند ورق تخت، ورق‌های انحنادار با تقویت‌کننده قطری دارای تنش یکسان در هر دو



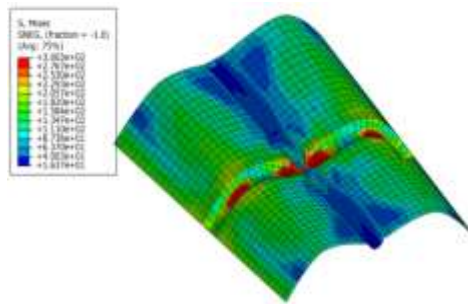
(ب)



(الف)



(د)



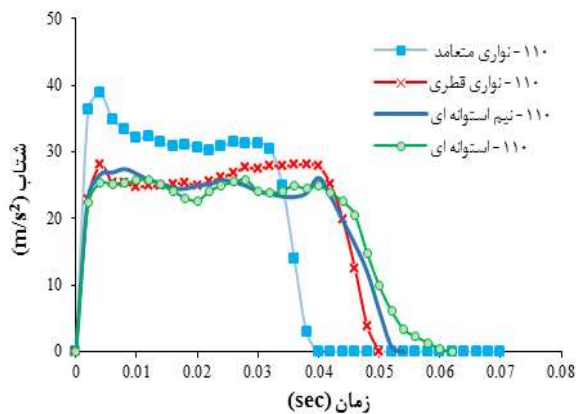
(ج)

شکل (۱۴): مود تغییرشکل و توزیع تنش در ورق‌های انحنادار یا تقویت‌کننده‌های مختلف شامل: (الف) نواری متعامد، (ب) نواری قطری، (ج) نیم استوانه‌ای، (د) استوانه‌ای.

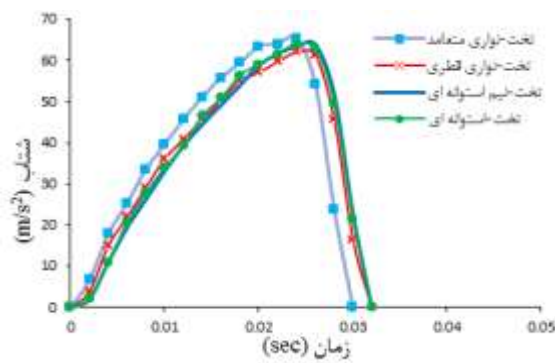
نمایش داده شده است. همچنین در شکل ۱۶ (الف) و (ب) نمودار مقدار جابه‌جایی ورق‌ها تابع زمان نشان داده شده است. در جدول ۴ نیز پاسخ‌های این دو کمیت به همراه مقدار جذب انرژی به صورت کمی ارائه گردیده است.

۵-۱-۲- بررسی نتایج شتاب، تغییر مکان و جذب انرژی

در شکل ۱۵ (الف) و (ب) به ترتیب نمودار تغییرات شتاب برای ورق‌های تخت و انحنادار تقویت شده

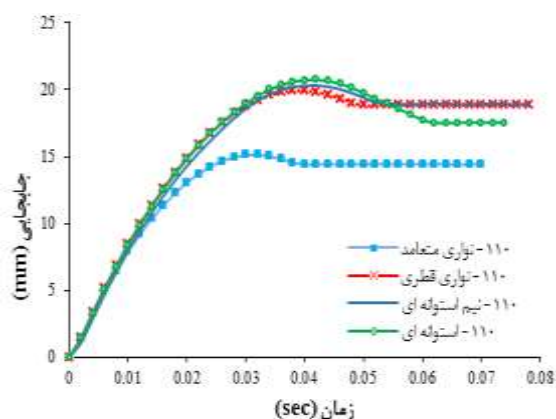


(ب)

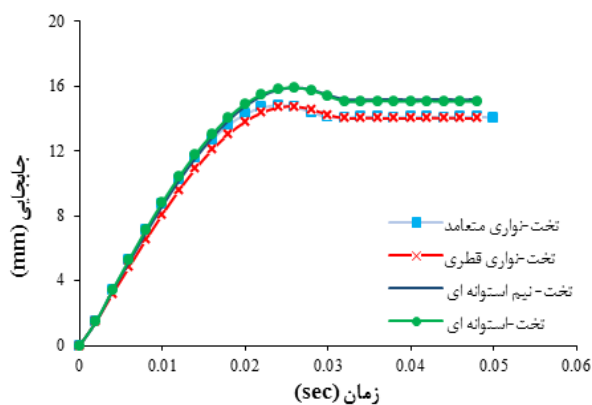


(الف)

شکل (۱۵): نمودار شتاب- زمان ورق‌های تقویت شده (الف) ورق تخت، (ب) ورق انحنادار



(ب)



(الف)

شکل (۱۶): نمودار جابجایی- زمان ورق‌های تقویت شده با انواع تقویت کننده‌ها (الف) ورق تخت، (ب) ورق انحنا دار

جدول (۴): نتایج مدل عددی برای تقویت کننده‌ها در حالت دو طرف گیردار

جذب انرژی (J)		تغییر شکل پلاستیک (mm)		شتاب (m/s^2)		نوع تقویت کننده
110-P	Inf-P	110-P	Inf-P	110-P	Inf-P	
۸۵/۸	۸۵/۶	۱۳/۷	۱۴/۱	۴۲/۰	۶۵/۳	نوار متعامد
۸۵/۹	۷۹/۸	۱۸/۹	۱۴/۰	۲۸/۱	۶۲/۰	نوار قطری
۸۸/۳	۸۲/۵	۱۸/۹	۱۵/۲	۲۷/۴	۶۳/۸	نیم استوانه‌ای
۸۴/۴	۸۲/۶	۱۷/۵	۱۵/۱	۲۵/۸	۶۴/۰	استوانه‌ای

با المان نیم استوانه‌ای و المان نوار متعامد می‌باشد. بیشترین جذب انرژی، مربوط به المان نیم استوانه‌ای می‌باشد، و کمترین جذب انرژی در اختیار ورق با المان استوانه‌ای می‌باشد.

با مقایسه نتایج ورق انحنا دار نسبت به ورق تخت مشخص شد که شتاب حدود ۱/۵ برابر کاهش داشته است. اما به جزء ورق با تقویت کننده نوار که تغییر شکل کاهش داشته در بقیه ورق‌ها با سخت کننده‌های دیگر تغییر شکل به طور میانگین ۲۵ درصد افزایش پیدا کرده است. همچنین جذب انرژی در ورق‌های انحنا دار با المان‌های مختلف بیشتر از ورق‌های تخت می‌باشد. با توجه به اطلاعات به دست آمده تقویت کننده استوانه‌ای از عملکرد بهتری برخوردار می‌باشد.

۵-۱-۳- تأثیر نوع تکیه‌گاه بر روی نتایج

یکی از مواردی که در این قسمت به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته، بررسی دو نوع شرایط تکیه‌گاهی می‌باشد، که نوع اول مربوط به حالت دو طرف گیردار (در

با توجه به نتایج، بیشترین شتاب مربوط به المان نوار متعامد می‌باشد و کمترین شتاب مربوط به المان نوار قطری است. بیشترین تغییر شکل پلاستیک در ورق با المان نیم استوانه‌ای رخ داده است و کمترین آن در ورق با المان نوار قطری ایجاد شده است. در رابطه با جذب انرژی باید گفت که بیشترین مقدار در جذب انرژی مربوط به ورق با المان نوار متعامد و کمترین مقدار در ورق با المان قطری اتفاق افتاده است. اطلاعات نشان می‌دهد که ورق تخت با المان نوار متعامد از سختی و مقاومت بالایی برخوردار می‌باشد. همچنین می‌توان گفت که به علت توزیع یکنواخت تر تنش در ورق با تقویت کننده قطری، کمترین مقدار شتاب و جابه‌جایی در این ورق رخ می‌دهد.

در ورق‌های انحنا دار تقویت شده، بیشترین شتاب در ورق با المان نوار متعامد ایجاد شده است و کمترین در ورق با المان استوانه‌ای رخ داده است. در رابطه با تغییر شکل، بیشترین و کمترین به ترتیب مربوط به ورق‌های

۵ آورده شده است. با مقایسه نتایج حاصل از تحلیل ورق با تکیه‌گاه ۴ طرف گیردار و ورق با تکیه‌گاه ۲ طرف گیردار دیده می‌شود که در حالت اول، افزایش شتاب، کاهش تغییر شکل ماندگار و کاهش جذب انرژی رخ می‌دهد که مبین افزایش سختی ورق می‌باشد.

وجه بدون انحناء) است و نتایج آن در مرحله قبلی بررسی شد و نوع دوم مربوط به چهار طرف گیردار می‌باشد. این بررسی به منظور استفاده از تکیه‌گاه ۴ طرفه در مطالعات بخش بعد که توزیع متفاوتی از تقویت‌کننده‌ها وجود دارد، انجام می‌گردد. نتایج حاصل از این بررسی در جدول

جدول (۵): نتایج مدل عددی برای حالت دو طرف و چهار طرف گیردار

پارامترها	نوع تکیه‌گاه	Inf	Inf-P	110	110-P
شتاب (m/s^2)	۲ طرف گیردار	۶۳/۱	۶۵/۳	۲۸/۰	۴۲/۰
	۴ طرف گیردار	۷۴/۹	۷۶/۲	۴۶/۷	۵۵/۵
تغییر شکل ماندگار (mm)	۲ طرف گیردار	۱۸/۴	۱۴/۱	۲۹/۳	۱۳/۷
	۴ طرف گیردار	۱۶/۱	۱۲/۴	۲۲/۵	۱۰/۵
جذب انرژی (J)	۲ طرف گیردار	۸۵/۸	۸۵/۶	۸۶/۸	۸۵/۸
	۴ طرف گیردار	۸۵/۳	۸۴/۵	۸۶/۷	۸۴/۷

همچنین توزیع تنش ون میسر در نمونه‌های تخت تقویت شده با انواع مختلف تقویت‌کننده نمایش داده شده است.

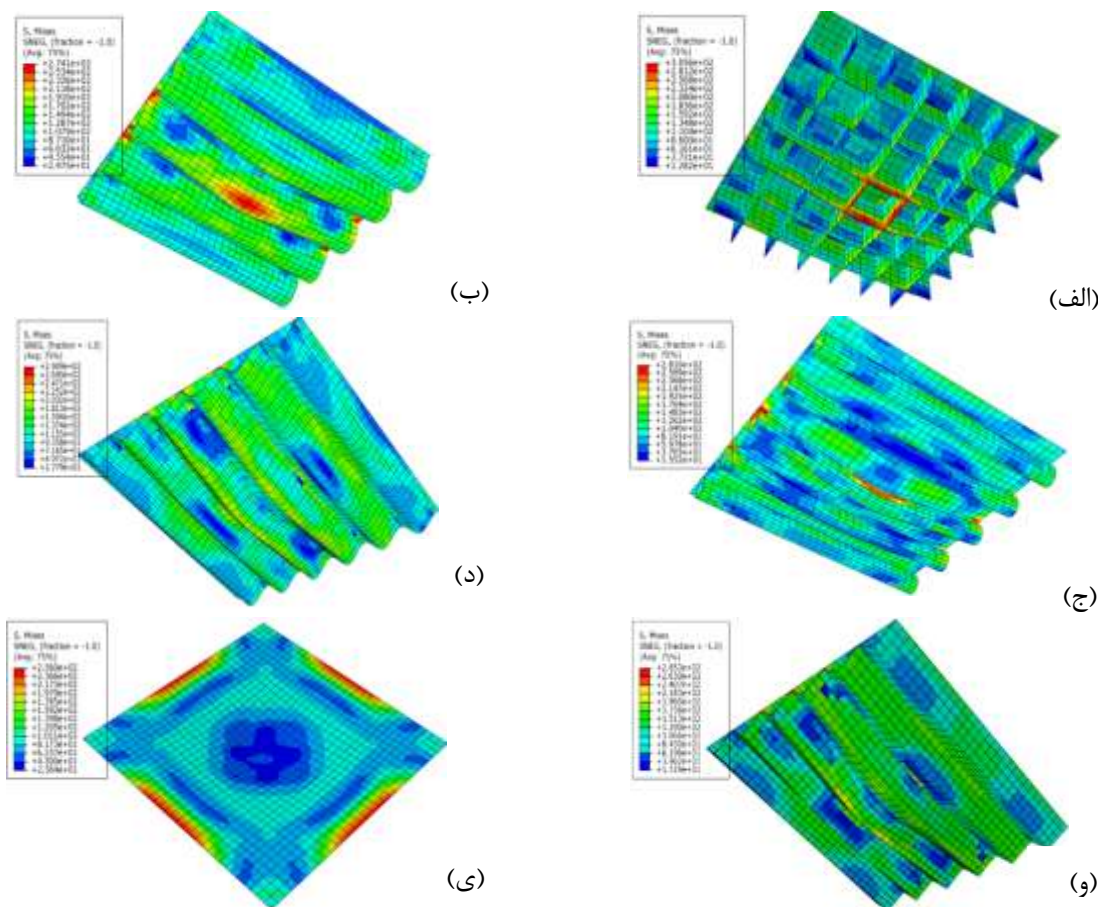
همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین مقدار تنش در تقویت‌کننده‌های نواری متعامد رخ می‌دهد که مقدار آن برابر با ۳۰۵ MPa می‌باشد و کمترین مقدار در ورق با تقویت‌کننده نیم استوانه‌ای با مقدار ۲۷۴ MPa می‌باشد. در شکل ۱۸ نمودارهای شتاب-زمان و همچنین جابه‌جایی-زمان برای ورق تخت تقویت شده در سراسر ورق نشان داده شده است. همچنین در جدول ۶ نتایج کمی این بررسی ارائه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین شتاب ضربه مربوط به ورق با ضخامت ۲/۲ mm و کمترین مربوط به ورق با المان مثلثی و استوانه‌ای می‌باشد. بیشترین تغییر شکل مربوط به ورق با المان سینوسی و کمترین مربوط به ورق با المان نواری متعامد است. مطابق با جدول ۶ و شکل ۱۸ ورق با المان نیم‌استوانه‌ای و سینوسی، بیشترین مقدار جذب انرژی و ورق با ضخامت ۲/۲ mm کمترین مقدار جذب انرژی را به خود اختصاص داده است.

۵-۲- توزیع یکنواخت تقویت‌کننده‌ها در کل ورق

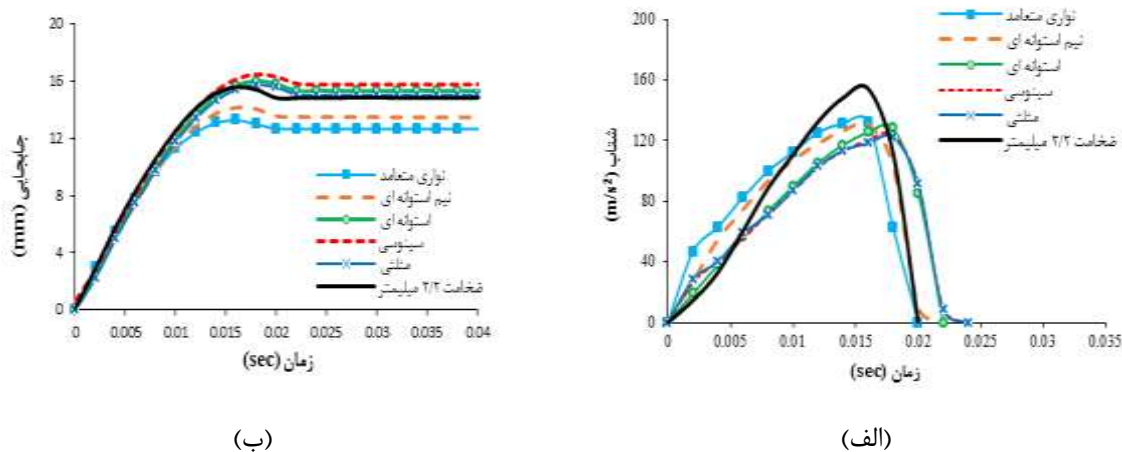
در این بخش شش نوع تقویت‌کننده برای ورق تخت و ورق با شعاع انحنای ۱۱۰ mm مورد بررسی قرار می‌گیرد که در کل ورق توزیع شده است. ارتفاع سقوط ضربه‌زننده در این مرحله ۱۰ cm است. تقویت‌کننده‌ها شامل نواری متعامد، نیم استوانه‌ای، استوانه‌ای، سینوسی، مثلثی و ورق ساده با ضخامت معادل ۲/۲ mm می‌باشد. برای این‌که بتوان عملکرد تقویت‌کننده‌ها را با یکدیگر مقایسه کرد و به نتایج مطلوب رسید، طول و مساحت این المان‌ها برابر می‌باشد و همچنین تکیه‌گاه‌ها به صورت چهار طرف گیردار در نظر گرفته شده است. با توجه به تقارن ورق تخت نسبت به هر دو راستایی که تکیه‌گاه دارد، جهت تقویت‌کننده‌ها تنها در یک راستا بررسی می‌شود ولی برای ورق‌های انحنادار، در یک مرحله تقویت‌کننده‌ها در راستای انحناء و در مرحله بعد عمود بر راستای انحنادار در نظر گرفته می‌شوند.

۵-۲-۱- بررسی نتایج ورق تخت

در شکل ۱۷ ورق تغییر شکل یافته در اتمام فرآیند ضربه و



شکل (۱۷): ورق تخت تقویت شده با اشکال مختلف تقویت کننده (الف) نواری متعامد، (ب) نیم‌استوانه‌ای، (ج) استوانه‌ای، (د) سینوسی، (و) مثلثی، (ی) ضخامت ۲/۲ mm.



شکل (۱۸): نمودارهای ورق تخت تقویت شده (الف) نمودار شتاب-زمان، (ب) نمودار جابه‌جایی-زمان

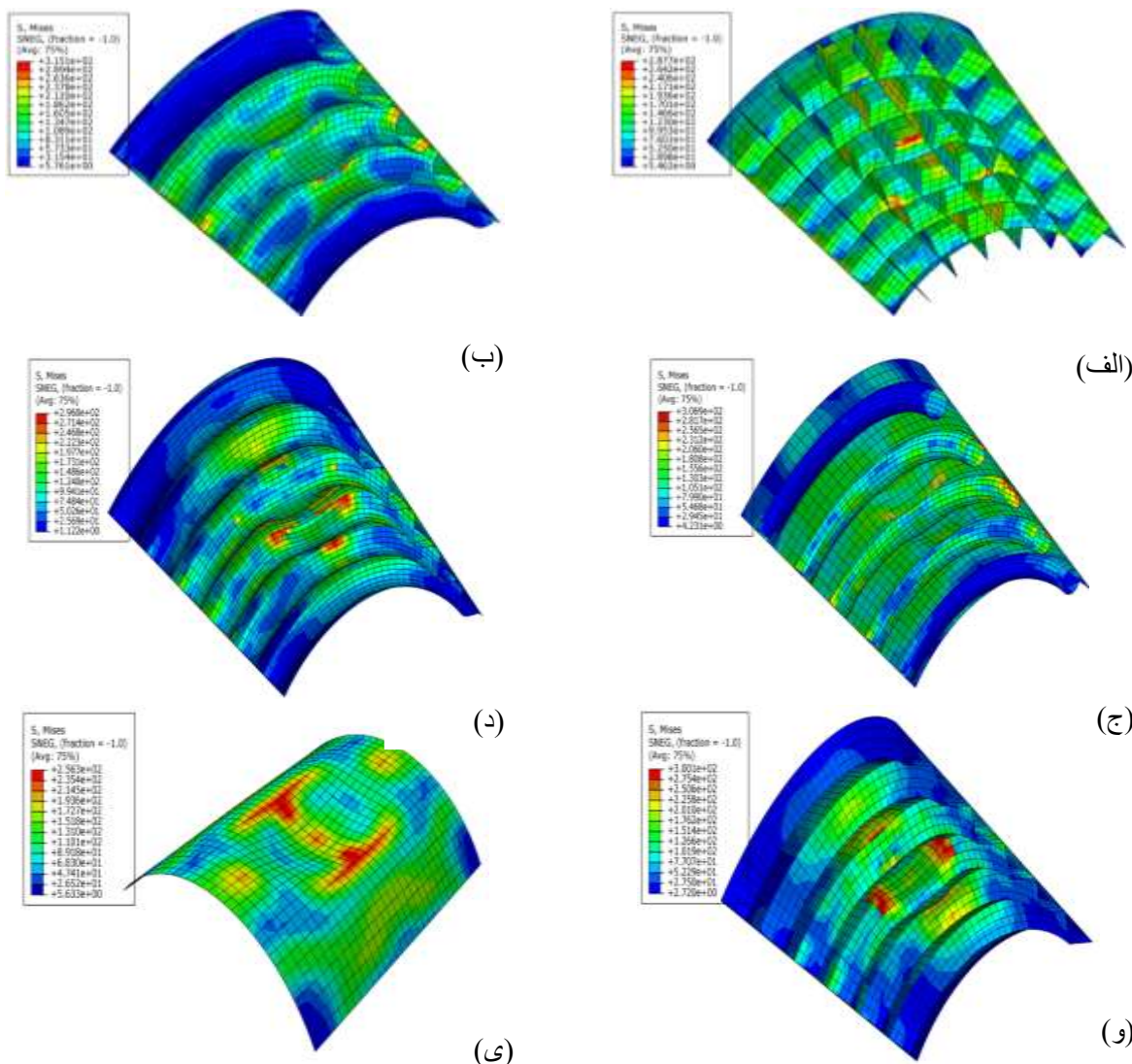
خلاف حالت قبل، تنش در تقویت کننده نواری بیشینه مقدار نیست و در سخت کننده نیم‌استوانه‌ای به علت کم‌انرژی جابجایی بیشینه مقدار است. در شکل ۲۰ نمودارهای شتاب-زمان و همچنین جابه‌جایی-زمان برای ورق انحنادار

۵-۲-۲- نتایج ورق انحنادار با تقویت کننده‌های در جهت انحناء

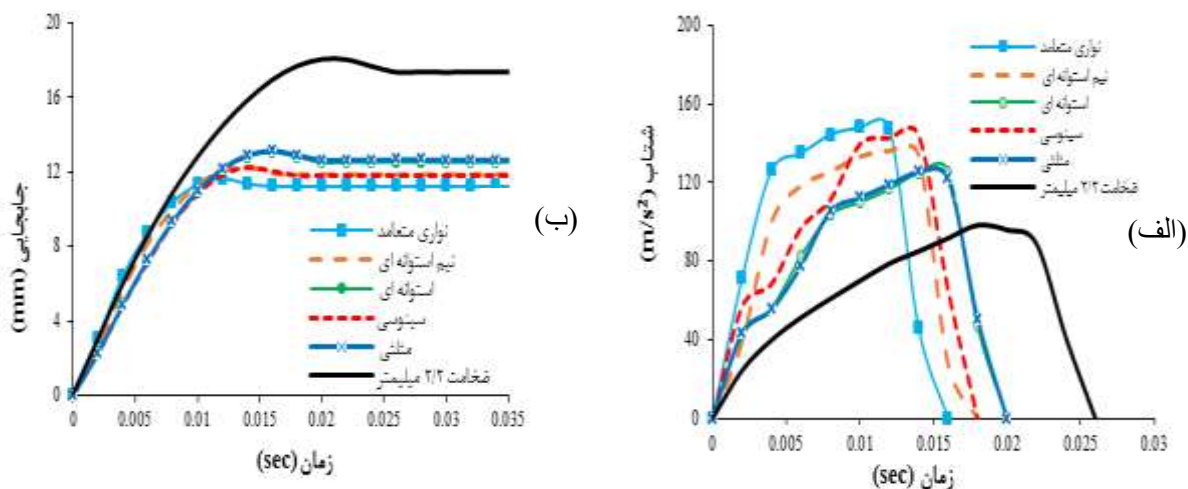
توزیع تنش در ورق‌های انحنادار تقویت شده در راستای انحناء در شکل ۱۹ نشان داده شده است. در این ورق‌ها بر

ضخامت ۲/۲ mm که شتاب ورق با شعاع ۱۱۰ mm از ورق تخت کوچکتر می‌باشد، در بقیه موارد شتاب ورق انحنادار بزرگتر از ورق تخت می‌باشد. دومین نکته در مورد تغییر شکل ورق‌ها است، که به جزء ورق با ضخامت ۲/۲ mm، ورق‌های با شعاع ۱۱۰ mm تغییر شکل کوچکتری نسبت به ورق‌های تخت دارند. با توجه به جدول ۶ و مقایسه بین داده‌های شتاب، جابجایی، جذب انرژی و ناحیه‌ای که دچار تغییر شکل شده، می‌توان نتیجه گرفت که المان‌های استوانه‌ای و مثلی از عملکرد بهتری برخوردار می‌باشند.

تقویت شده در سراسر ورق نشان داده شده است. مطابق جدول ۶، بیشترین شتاب ضربه مربوط به ورق با المان نواری متعامد می‌باشد و کمترین آن مربوط به ورق با ضخامت ۲/۲ mm می‌باشد. در مورد تغییر شکل، بیشترین مقدار مربوط به ورق با ضخامت ۲/۲ mm و کمترین مربوط به ورق با المان نواری متعامد و بعد از آن نمونه سینوسی کمترین تغییر شکل را داراست. ورق با المان نواری متعامد، بیشترین مقدار جذب انرژی و ورق با ضخامت ۲/۲ mm کمترین مقدار جذب انرژی را دارا می‌باشد. اولین نکته‌ای که باید به آن توجه داشت این است که، به جزء ورق با



شکل (۱۹): ورق انحنادار تقویت شده با اشکال مختلف تقویت کننده (الف) نواری متعامد، (ب) نیم استوانه‌ای، (ج) استوانه‌ای، (د) سینوسی، (و) مثلی، (ی) ضخامت ۲/۲ mm.



شکل (۲۰): نمودارهای ورق انحنادار تقویت شده (الف) نمودار شتاب-زمان، (ب) نمودار جابه‌جایی-زمان

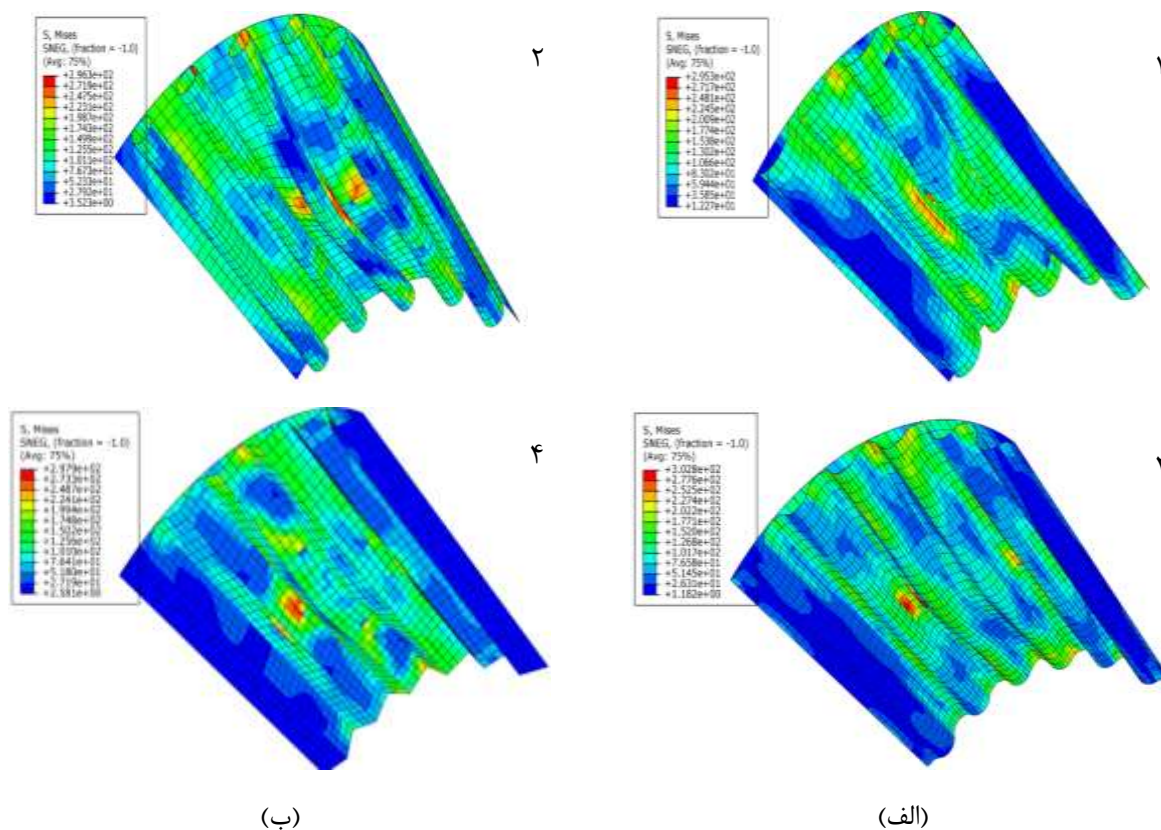
جدول (۶): نتایج مدل عددی برای انواع تقویت کننده‌ها در سرتاسر ورق

جذب انرژی (J)			تغییر شکل پلاستیک (mm)			شتاب (m/s^2)			نوع تقویت کننده
110-P-2	100-P-1	Inf-P	110-P-2	110-P-1	Inf-P	110-P-2	110-P-1	Inf-P	
۱۶۵/۹			۱۷/۴			۹۸/۳			ورق با ضخامت ۲/۲mm
۱۶۵/۲			۱۴/۸			۱۵۴/۲			
۱۷۶/۲			۱۱/۲			۱۴۸/۰			نواری متعامد
۱۶۶/۶			۱۲/۷			۱۳۲/۴			
۱۶۶/۷	۱۷۵/۹	۱۶۸/۸	۱۵/۷	۱۱/۸	۱۳/۵	۱۰۴/۲	۱۳۶/۱	۱۳۰/۵	نیم استوانه‌ای
۱۶۷/۹	۱۶۸/۱	۱۶۸/۰	۱۹/۲	۱۲/۵	۱۵/۳	۹۶/۲	۱۲۹/۰	۱۲۸/۰	استوانه‌ای
۱۷۰/۱	۱۷۳/۲	۱۶۸/۱	۱۷/۲	۱۱/۸	۱۵/۸	۱۰۷/۴	۱۴۴/۰	۱۲۳/۶	سینوسی
۱۶۶/۳	۱۶۸/۱	۱۶۷/۸	۱۵/۳	۱۲/۶	۱۵/۰	۱۱۳/۹	۱۲۵/۳	۱۲۲/۱	مثلثی

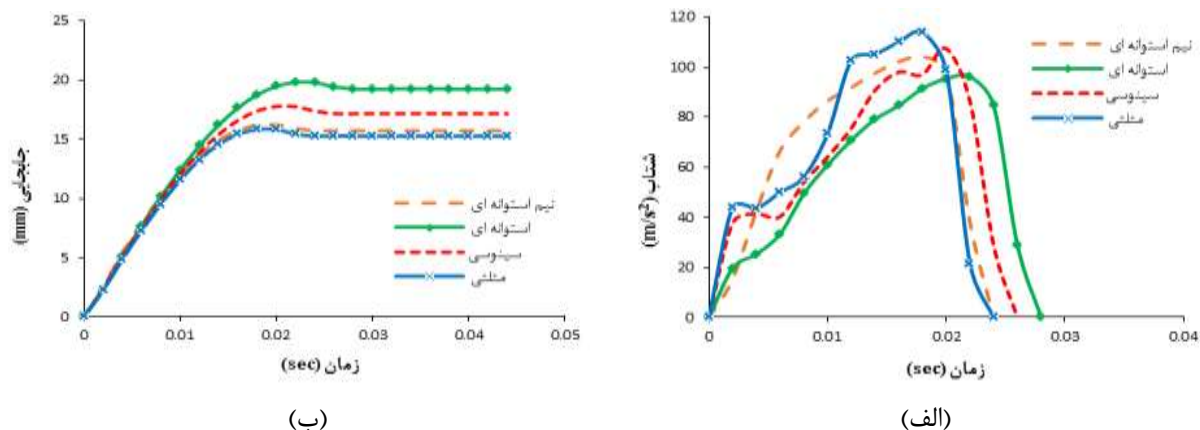
نشده است. نتایج به صورت نمودارهای شتاب-زمان و جابجایی-زمان در شکل ۲۲ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۶ و نمودارهای نتایج بدست آمده مشاهده شد، بیشترین شتاب ضربه مربوط به المان مثلثی و کمترین آن مربوط به المان استوانه‌ای می‌باشد. جابجایی در المان استوانه‌ای دارای بیشترین مقدار و کمترین جابجایی مربوط به المان مثلثی می‌باشد.

۵-۲-۳- نتایج ورق انحنادار با تقویت کننده‌های در جهت عمود بر انحناء

در این بخش جهت تقویت کننده‌ها بر خلاف حالت قبل، در راستای لبه‌های صاف ورق انحنادار می‌باشد. در شکل ۲۱ نمایی از توزیع تنش در این ورق‌ها نشان داده شده است که در آن ورق با ضخامت ۲/۲ mm و ورق تقویت شده با المانهای نواری به علت تشابه با حالت قبل نمایش داده



شکل (۲۱): (الف) تقویت کننده در راستای انحنای ورق، (ب) تقویت کننده در راستای صاف ورق. (۱) نیم استوانه‌ای، (۲) استوانه‌ای، (۳) سینوسی، (۴) مثلثی.



شکل (۲۲): نمودارهای ورق انحنادار تقویت شده در جهت صاف، (الف) نمودار شتاب-زمان، (ب) نمودار جابه‌جایی-زمان

ورق قرار می‌گیرند. با توجه به اطلاعات بدست آمده از جدول ۶ و شکل ۲۲، می‌توان نتیجه گرفت، المان‌هایی که در راستای انحنای ورق قرار می‌گیرند از عملکرد بهتری برخوردار هستند، در ضمن با توجه به نتایج و میزان محدوده‌ای که دچار تغییرشکل شده است بهترین نوع تقویت کننده در این مرحله، مربوط به المان استوانه‌ای می‌باشد.

۵-۲-۴- مقایسه نتایج حاصل از تقویت ورق انحنادار در راستای انحاء و در راستای صاف

نتایج نشان داد، در حالتی که المان‌ها در راستای صاف ورق قرار می‌گیرند، مقدار شتاب ضربه حدود ۳۰ درصد و مقدار جذب انرژی در اکثر موارد حدود ۱ درصد کمتر، اما تغییرشکل ایجاد شده به طور میانگین ۳۷ درصد در این ورق‌ها بیشتر از حالتی است که المان‌ها در راستای انحنادار

۶- نتیجه گیری

تقویت کننده در این مرحله با توجه به پارامترهای مختلف، مربوط به المان استوانه‌ای می‌باشد.

ورق‌های بدون تقویت کننده با شتاب ضربه کمتر و تغییرشکل بیشتر انرژی را مستهلک می‌کنند، اما ورق‌های همراه با تقویت کننده انرژی را با شتاب ضربه بیشتر ولی با تغییرشکل کمتر مستهلک می‌کنند.

نتایج مدل عددی نشان داد، اولین ناحیه در ورق‌های با تقویت کننده که به حد جاری شدن می‌رسد، در تقاطع المان‌ها و در ناحیه وسط ورق می‌باشد.

به‌طور کلی می‌توان گفت، ایجاد انحناء باعث افزایش استحکام ورق‌ها نسبت به ورق‌های تخت شده است، و برخی از پارامترهای مورد بحث در این تحقیق را بهبود بخشیده است. همچنین استفاده از انواع المان‌ها به‌عنوان تقویت کننده تأثیر به‌سزایی در رفتار ورق‌ها داشته است. با توجه به نتایجی که بیان شد، تقویت کننده استوانه‌ای عملکرد بهتری نسبت به بقیه تقویت کننده‌ها دارد.

در مکان‌هایی که محدودیت فضا وجود ندارد می‌توان از ورق با شعاع انحنای ۱۱۰ mm همراه با تقویت کننده استفاده کرد. همچنین در مکان‌هایی که فضا محدود می‌باشد هم، می‌توان از ورق تخت با انواع تقویت کننده استفاده کرد.

از نتایج این تحقیق می‌توان به استفاده در بدنه و سپر خودروها، بدنه کشتی، محافظت از پوسته تانک‌های حمل سوخت، اسکله‌ها و پایه سکوها دریاپی و غیره اشاره کرد.

برای این که نتایج به واقعیت نزدیک باشد می‌توان از انواع تقویت کننده (جاذب‌های انرژی) به‌صورت آزمایشگاهی و همچنین از ورق با ابعاد بزرگتر استفاده کرد.

۷- مراجع

1. Bidi, A. Gh., Liaghat, Gh. and Rahimi. Gh., "Experimental and numerical analysis of impact on steel curved panels", *Modares Mech. Eng.* Vol. 16, No. 4, pp. 281-288, 2016. (In Persian).
2. Bidi, A., Liaghat, Gh., and Rahimi, Gh. "Experimental and numerical analysis of impact on curved steel- polyurea bi-layer panels", *Sci. and Tech. of Composites.* Vol. 3, No. 3, pp. 207-214, 2016. (In Persian).

در این پژوهش، بررسی آزمایشگاهی و عددی بر روی رفتار ورق‌های تخت و انحنادار فولادی ساده و با انواع تقویت کننده تحت بارگذاری ضربه با سرعت پایین ناشی از سقوط آزاد وزنه انجام شد.

نتایج مرحله اول این تحقیق نشان داد، ایجاد انحناء در ورق‌ها باعث کاهش قابل توجه شتاب ضربه، افزایش تغییرشکل پلاستیک و همچنین افزایش در مقدار جذب انرژی ورق‌ها شده است. وجود تقویت کننده نواری هم در پشت ورق‌ها به دلیل افزایش سختی ورق موجب افزایش شتاب ضربه، کاهش چشمگیر در تغییرشکل پلاستیک و همین‌طور باعث کاهش در جذب انرژی ورق‌ها شده است. همچنین درصد اختلاف بین نتایج تست آزمایشگاهی و عددی کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد، که این اختلاف به دلیل فرضیاتی (از جمله اصطکاک و ...) می‌باشد.

با توجه به نتایج مرحله دوم این پژوهش، شتاب در ورق انحنادار کاهش پیدا کرده است، اما تغییرشکل و جذب انرژی در این ورق با افزایش روبرو شده است. همچنین نتایج نشان داد که تقویت کننده‌ی استوانه‌ای با در نظر گرفتن عوامل مختلف از عملکرد بهتری نسبت به بقیه جاذب‌ها برخوردار می‌باشد. البته در مواردی که میزان تغییرشکل باید محدود باشد می‌توان از جزء نواری متعامد استفاده کرد. زیرا استفاده از این المان باعث کاهش چشمگیر تغییرشکل نسبت به المان‌های دیگر می‌باشد. در ضمن به دلیل سختی بالای این نوع جزء وسعت ناحیه‌ای که دچار تغییر مکان می‌شود نسبت به جزء‌های دیگر کمتر می‌باشد.

نتایج مرحله سوم نشان می‌دهد که، شتاب و جذب انرژی ورق با شعاع انحنای ۱۱۰ mm نسبت به ورق تخت افزایش داشته، اما تغییرشکل با کاهش روبرو شده است. همچنین المان‌های استوانه‌ای و مثلثی از عملکرد بهتری برخوردار می‌باشند.

نتایج مرحله چهارم پژوهش حاکی از آن است که، المان‌هایی که در راستای انحنای ورق قرار می‌گیرند از عملکرد بهتری برخوردار هستند، همچنین بهترین نوع

- functionally graded reinforced concrete (FGRC) slabs under drop weight and projectile impacts”, *Construct. and Building Mater.* Vol. 95, pp. 296–311, 2015.
13. Hyunbum P., “Investigation on low velocity impact behavior between graphite/epoxy composite and steel plate”, *Composite Struct.* Vol. 171, pp. 126-130, 2017.
 14. Ezzati, M., Zeinoddini, M., and Masoudi, T. “Assessment of Force-Deflection Relations of Steel Tubular Members under Lateral Quasi-Static Impacts from Dropped Objects”, *Sea Engi J.* No.20, pp. 79 – 88, 2015.
 15. Hatami, H., and Jahromi, A.G. “Energy absorption performance on multilayer expanded metal tubes under axial impact”, *Thin-Walled Struct.* Vol. 116, pp. 1–11, 2016.
 16. Hatami, H., and Nouri, M.D. “Experimental and numerical investigation of lattice-walled cylindrical shell under low axial impact velocities”, *Latin American J. of Solids and Struct.* Vol. 12, No. 10, pp. 1950-1971, 2015.
 17. Nouri, M.D., Hatami, H., and Jahromi, A.G. “Experimental and numerical investigation of expanded metal tube absorber under axial impact loading”, *Struct. Eng. and Mech.* Vol. 54, No. 6, pp. 1235-1266, 2015.
 18. Hatami, H., Rad, M.S., and Jahromi, A.G. “A theoretical analysis of the energy absorption response of expanded metal tubes under impact loads”, *Inter. J. of Impact Eng.*, Vol. 109, pp. 224-239, 2017.
 19. Khorshidi, K. “Analytical Nonlinear Elasto-Plastic Impact Response Of a Moderately Thick Rectangular Plate”, *Aerospace Mech. Jo.* Vol. 6, No. 4, pp. 25-42, 2010. (In Persian).
 20. Hossini, S.V., Zamani, J., Darvize, A. and Soleimani, M. “Experimental and Numerical Analysis of the Effects of Geometrical and Mechanical Parameters on the Folding Force of Extruded Square Energy Absorbers, Under Out of Plane Loading”, *Aerospace Mech J.* Vol. 2, No. 2, pp. 27-40, 2006. (In Persian).
 21. Kitada, T. “Ultimate strength and ductility of concrete-filled steel bridge piers”, *Eng. Struct.* Vol. 20, No 4, pp. 347-354, 1998.
 3. Bidi, A., Liaghat, Gh., and Rahimi, Gh. “Effect of nano clay addition to energy absorption capacity of steel-polyurea bi-layer”, *Sci. and Tech. of Composites.* Vol. 3, No. 2, pp. 157-164, 2016. (In Persian).
 4. Merzhievskii, L. A., and Titov, V. M. “Perforation of Plates through High Velocity Impact”, *Appl. Mech. and Tech. Physics.* No.16, pp. 757, 1975.
 5. O’Toolea, B., Trabiaa, M., Hixsonb, R., Roya, S.K., Penab, M., Beckerb, S., Daykinb, E., Machorrob, E., Jenningsa, R., and Matthes, M. “Modeling Plastic Deformation of Steel Plates in Hypervelocity Impact Experiments”, *Procedia Eng.* No.103, pp. 458-465, 2015.
 6. Kumar, P. and LeBlanc, J., Stargel, D., and Shukla, A. “Effect of plate curvature on blast response of aluminum panels”, *Int. J. of Impact Eng.* Vol. 46, No.29, pp.74-85, 2012.
 7. 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”, *Procedia Eng.* No.167, pp. 216-222, 2016.
 8. 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 Mech. Eng.* Vol. 15, No. 1, pp. 75-83, 2015. (In Persian).
 9. Irshidat, M., Al-Ostaz, A., and Cheng, A. H. D. “predicting the response of polyurea coated high hard steel plates to ballistic impact by fragment simulating projectiles”, *App. Eng. Sci. Physics.* Vo. 12, No. 3, pp. 212-241, 2014.
 10. Khedmati, M.R., and Nazari, M. “A numerical investigation into strength and deformation characteristics of preloaded tubular members under lateral impact loads”, *Marine Struct.* Vol. 25, pp. 33–57, 2012.
 11. Amini, M.R., Isaacs, J., and Nasser, S. “Investigation of Effect of Polyurea on Response of Steel Plates to Impulsive Loads in Direct Pressure Pulse Experiments”, *Mech. of Mater.* Vol. 42, pp. 628-639, 2010.
 12. Mastali, M., Naghibdehi, M.G., Naghipour, M., and Rabiee, S.M. “Experimental assessment of

26. ASTM E8/E8M-09, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.
27. Malekzadeh, K., and Gholami, M., "Dynamic Response of Curved Composite Shells under Lateral Impact with Low Velocity", *Aerospace Mech J.*, V. 10, No. 3, 1393. (In Persian).
28. 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 J. of Sci. and Tech.* Vol 7, No. 2, 199–210, 2014.
22. Federal Railroad Administration. "Application of Welded Steel Sandwich Panels", *Eng. Struct.* Vol. 30, No 6, pp. 2499-264, 1998. 2013.
23. ABAQUS/CAE 6.12, ABAQUS Analysis User,s Manual version 6.10, 2016.
24. Malekzadeh, K., and Veisi, G., "Analysis of Impact on the Thinkness Curved Shell Under Impact loading", *Modarres Mechanical*, V. 13, N 2, 1396. (In Persian).
25. Zarei, H., DavoodiNik, A., and Delara, A., "Experimental Analysis of Impact on the Muliti-Layer Sheets with Metal-Glare", *Aerospace Mech J.*, V. 10, N. 4, 1393. (In Persian).

