

## Experimental and Numerical investigation on CK45, St12, Al3105 with layers under drop test free loading

A.Bashiri<sup>1</sup>, M.Hosseini<sup>2</sup>, H.Hatami<sup>3\*</sup>

1- M.Sc., Civil Engineering, Engineering Faculty, Lorestan University, Khorramabad, Lorestan, Iran

2 -Associated Professor, Civil Engineering, Engineering Faculty, Lorestan University, Khorramabad, Lorestan, Iran

3 -Assistant Professor, Mechanical Engineering, Engineering Faculty, Lorestan University, Khorramabad, Lorestan, Iran

### ABSTRACT

*In this investigation, the Al sheet metals Al3105, Ck45 and St12 with layers under impact drop test free loading are tested experimentally and numerically. The sheets are tested with 3-layers under impact free loading numerically. for comparing, the experimental test is tested. The height is 12 cm with free impact loading. The dimension of specimens are 220\*230 cm2. With screw the specimens are tied. The fixture are made with steel and the specimens are fixed on the fixture freely. The screw has Din933 standard. The acceleration data are reported with acceleration sensor. The deformation are reported with hammer test. Also with theoretical method, the shells are investigated with the dynamic equations. For numerical modeling, the ABAQUS is used. The results are shown that two method are the same results. Also the results are shown that the energy absorption is more for Al3105-St12-Al3105 to other sheets.*

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 18 October 2019

**Revise Date:** 01 March 2020

**Accept Date:** 07 March 2020

### Keywords:

*Free Drop Test  
Deformation  
Impact Acceleration  
Energy Absorption  
Shell*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.205674.1978>

\*Corresponding author: H.Hatami

Email address: hatami.h@lu.ac.ir

## تحلیل تجربی، تئوری و شبیه‌سازی عددی ورق‌های فلزی AL3105، st12، ck45 با لایه چینی متقابل تحت ضربه سقوط آزاد

آرش بشیری<sup>۱</sup>، مجتبی حسینی<sup>۲</sup>، حسین حاتمی<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، لرستان، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، لرستان، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، لرستان، ایران

### چکیده

در این تحقیق ورق‌های فلزی آلومینیوم *ck45*، *AL3105* و *St12* با لایه چینی متقابل در برابر بار ضربه ای به صورت تجربی، تئوری و عددی بررسی شده‌اند. در مدل عددی ورق‌ها به صورت سه لایه ای با لایه چینی متقابل تحت ضربه سقوط آزاد قرار گرفته‌اند و تحلیل شده‌اند. برخورد به صورت سقوط آزاد وزنه بوده و ارتفاع سقوط ۱۲ سانتی متر می‌باشد. ورق‌های مورد استفاده از جنس *st12*، *ck45*، *AL3105* با ابعاد ۲۲۰ در ۲۳۰ میلیمتر مربع و هر کدام با ضخامت ۱ میلی‌متر تهیه شده و لایه چینی متقابل که در قسمت بالا ذکر شد روی هم قرار گرفته و توسط پیچ و مهره بهم متصل می‌شوند. ورق‌ها به صورت کاملاً آزاد بر روی فیکسچر قرار می‌گیرند. پیچ مورد استفاده از نوع پیچ با استاندارد *din933* تمام رزوه هستند. در روش تجربی شتاب ضربه زننده توسط سنسور شتاب‌سنج اندازه‌گیری شده و تغییر شکل ماندگار ورق پس از اتمام ضربه اندازه‌گیری می‌شود. پارامترهای مورد ارزیابی پژوهش شامل مقدار شتاب ضربه بر روی ورق، میزان تغییر شکل ماندگار و مقدار جذب انرژی برای ورق‌های می‌باشد. همچنین در روش تئوری نیز روابط مرتبط با ورق‌های جدار نازک بصورت دینامیکی بررسی گردیده‌اند. برای مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شده است. مقایسه نتایج حاصل از روش تجربی و عددی نشان می‌دهد که این دو روش تحقیق دارای نتایج نزدیک به هم می‌باشند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که جذب انرژی در ورق‌های با لایه گذاری *AL3105-st12-AL310* بیشتر از ورق‌های دیگری باشد، همچنین شتاب در ورق‌های با لایه چینی *ck45-st12-ck45* بیشتر از ورق‌های دیگر می‌باشند.

کلمات کلیدی: آزمایش سقوط آزاد، تغییر شکل ماندگار، شتاب ضربه، جذب انرژی، ورق جدار نازک.

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.205674.1978
۱۳۹۸/۰۷/۲۶	۱۳۹۸/۱۲/۱۱	۱۳۹۸/۱۲/۱۷	۱۳۹۸/۱۲/۱۷	۱۴۰۰/۰۳/۳۰	doi: 10.22065/jsce.2020.205674.1978
*نویسنده مسئول:		حسین حاتمی			
پست الکترونیکی:		hatami.h@lu.ac.ir			

## ۱- مقدمه

ورق ها به عنوان ساده ترین نمونه و معمولی ترین المان های سازه ای هستند که در بسیاری از کاربردهای مهندسی مانند بدنه خودروها، بدنه بال هواپیما، موشک ها، بدنه کشتی ها و زیر دریایی ها و غیره مورد استفاده قرار می گیرند. در مهندسی مکانیک یکی از مهمترین سازه ها، ورق ها و به تبع آن پوسته ها می باشند. ورق سازه ای است که یک بعد آن نسبت به دو بعد دیگر بسیار کوچک است، پوسته ها نوع دیگری از سازه ها می باشند که دارای انحنا در هر یک محورهای آن می باشند. تفاوت ورق و پوسته در شعاع انحنای آن ها می باشد. ورق ها در حقیقت گونه ای از پوسته ها می باشند که شعاع انحنای بی نهایت دارند و به عنوان مثال در کف و سقف اتاق خودروها، کانتینرها، پل ها و غیره از ورق و پوسته استفاده می گردد. از آنجا که این ورق ها در مواد مختلفی تحت بارهای دینامیکی و ضربه ای قرار می گیرند، مطالعه رفتار ارتعاشی و مخصوصا پاسخ ضربه در ورق ها اجتناب ناپذیر می گردد. منظور از دینامیک ضربه مطالعه حرکت ضربه زننده، هدف و نیز تعامل بین آنها در برخورد می باشد. بهبود خواص دینامیکی سازه ها و مقاوم سازی آنها در برابر بارهای ضربه ای و دینامیکی نیز از اهداف مهندسان بوده است. ورق ها به سبب هندسه خود پاسخ پیچیده ای به بارهای متحرک یا دینامیکی از خود نشان می دهند که بدین سبب از گذشته تاکنون توجه بسیاری از محققین رابه خود معطوف داشته اند [۱].

قیان و سوانسون [۱] دو راه حل متفاوت را برای پدیده ضربه بر روی سازه های کامپوزیتی مطالعه کردند. آنها دو روش ریلی-ریتز با انتگرالهای عددی نسبت به زمان و یک روش تحلیلی با استفاده از تبدیل لاپلاس با معادلات دیفرانسیل حاکم را مورد تحقیق قرار داده و پاسخ ها را با محاسبات المان محدود و اندازه گیری عددی مقایسه و نمودارهای نیروی تماس تنش، خیز مرکز ورق را در نقطه تماس نسبت به زمان اعمال ضربه بررسی کردند. نتایج نشان داد که روشهای حل ارائه شده از دقت قابل قبولی برخوردار است. هر ولیانگ [۲] با استفاده از نرم افزارهای المان محدود اثر ضربه را بر روی ورق های کامپوزیتی چند لایه با ضربه زننده سرعت پایین و دونوع شرط مرزی ساده و تمام گیردار بررسی کردند. آنها برای محاسبه نیروی تماسی از قانون ضربه اصلاح شده هر تز استفاده کرده و تاثیر پارامترهایی نظیر سرعت ضربه زننده، سفتی تماسی و شرایط مرزی در ضربه اعمالی بر سازه را تحقیق کردند کاپرینو و همکارانش [۳] رفتار ضربه با سرعت پایین در ورق کامپوزیتی با لایه فلزی را که از لایه های آلومینیوم در بین لایه های فایبرگالاس استفاده شده، بررسی کردند. آنها با انجام آزمایش ضربه سقوط آزاد، به این نتیجه رسیدند که مقاومت ورق های کامپوزیتی لایه فلزی فایبرگالاس-آلومینیوم نسبت به ورق های الیاف کربن و الیاف فایبرگالاس در پاسخ نفوذ ضربه بهتر است. همچنین استفاده از الیافهای آلومینیوم به جای این فلز از پدیده نفوذ ضربه در ورق می کاهش دهد. زارعی و صدیقی [۴] در پژوهش خود به بررسی ضربه ی سرعت بالا در چند لایه های GLARE با استفاده از دو پرتابه ی سرتخت و مخروطی شکل پرداختند. نتایج نشان داده است که سرعت حد بالستیک در نمونه ها با استفاده از پرتابه ی سرتخت نسبت به پرتابه ی مخروطی، بالاتر می باشد. نمونه های سوراخ شده با پرتابه ی مخروطی نیز دارای پالگ نمی باشند. کیتادا [۶] به بررسی استحکام و شکل پذیری نهایی پایه های پل فولادی پر از بتن پرداخت. در این تحقیق سه نوع پایه پل فلزی مربع شکل، با سخت کننده های طولی داخلی و پر شده با بتن مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که سخت کننده ها و همچنین بتن باعث افزایش استحکام، مقاومت و انعطاف پذیری پل می شود. مالک زاده و ستوده [۷] رفتار غیر خطی ورق های لایه ای مستطیل شکل الاستیک در حالت متقارن و پادمقارن را مطالعه کردند، با استفاده از تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول و با فرض تغییر شکل ون-کارمن، ورق مدل شده است. از روش تکرار نیوتن-رافسون برای حل معادلات جبری سیستم استفاده شده است. اثرات نسبت طول به ضخامت، نسبت صفحه و تعداد لایه ها بر رفتار غیر خطی ورق های لایه ای با شرایط مرزی مختلف بررسی شده استاوستا و همکاران [۸] اثر ضخامت و انحنا را روی رفتار ضربه پانل های کامپوزیتی بررسی کردند. در این مطالعه رفتار ضربه با سرعت بالا روی پانل ها مسطح و انحنادار به روش عددی مورد ارزیابی قرار گرفت. هاشم بابایی و همکاران [۹] به مطالعه تجربی ارائه مدل تحلیلی برای پاسخ غیر الاستیک ورق های مستطیلی تحت بارگذاری هیدرودینامیکی پرداختند. 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 پرداختند. 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. هدایتیان و همکاران [۱۱] رفتار سازه های مشبک استوانه ای کامپوزیتی، تحت ضربه سرعت بالا را به روش تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. در روش عددی برای مدلسازی پوسته و تقویت کننده ها از المانهای جامد سه بعدی و جهت تعیین رفتار ماده، از مدل مادی ویویوم بر مبنای معیارهای آسیب

پاک و هاشین (سه بعدی) استفاده شد. نمودارهای تغییرات سرعت و نیروی پرتابه، گستردگی سطح خرابی و مکانیزم های مختلف شکست به عنوان نتایج گزارش شدند. نتایج نشان دادند که حضور تقویت کننده ها مانع گسترش خرابی به سلول های مجاور می گردد.

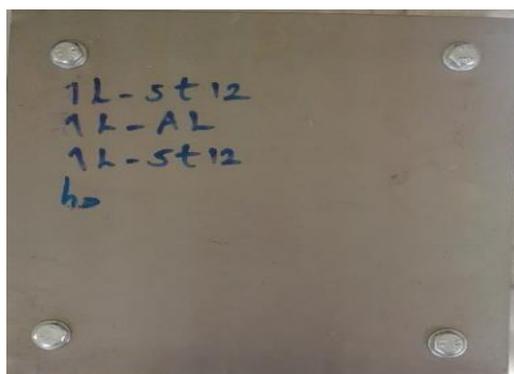
در تحقیق احمد بیدی و همکاران [۱۲] اثر افزودن نانو رس بر قابلیت جذب انرژی ورق های دولایه فولاد-پلی اوریا تحت بار ضربه ای بررسی گردید. نمونه های دولایه فولاد-پلی اوریا و فولاد-نانوپلی اوریا تهیه و مورد آزمایش کشش ساده و ضربه سقوط آزاد قرار گرفتند. آزمایش کشش نشان می دهد که با افزودن ذرات نانو مدول الاستیک حدود ۶۰ درصد افزایش و افزایش طول قبل از شکست نیز حدود ۷ درصد کاهش می یابد. 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 می دهد. اوسلون [۱۳] با بررسی تئوری و تجربی ورق های کامپوزیتی ساندویچی نشان داد که قانون برخورد هرتز برای پانل های ساندویچی درست نبوده و باید اصلاح گردد. وی نتیجه گرفت که رفتار نیرو-تغییر شکل در پانل های ساندویچی تحت بار ضربه ای تقریباً خطی است و بهتر است به علت تغییر شکل زیاد رویه ی بالایی، از کرنش های محدود و غیرخطی استفاده گردد و مسئله غیرخطی بودن هندسی لحاظ شود. چوی وهونگ [۱۴] روش جدیدی را برای بدست آوردن توزیع نیروی ضربه در زمان برخورد برحسب زمان ارائه دادند. ایشان ورق را نازک گرفته و از انرژی برخورد به علت تغییر شکل کم موضعی صرف نظر کردند و باز از مدل جرم و فنر و قانون بقای انرژی استفاده کردند. آنها به کمک آنالیز مقادیر ویژه و استفاده از آنالیز مودال توزیع نیروی ضربه را بدست آوردند. میتال [۱۵] یک آنالیز ساده برای بررسی اثر برش بر روی پاسخ ورق الاستیک در بارگذاری ضربه ای ارائه نمود. بررسی وی در مورد مساله ضربه عمودی بر روی ورق الاستیک مانند ورق ضخیم یا تقویت شده با الیاف موازی که اثر برش روی تغییر شکل در آن غیر قابل اغماض است، انجام گردید. با انجام تقریب کاهشی به یک حل بسته برای خیز و لنگر خمشی دست یافتند. این حل ها در حالت ابتدایی ضربه، مستقل از شرایط مرزی بودند، به علاوه با استفاده از قانون تماس هرتز، بدست آوردن پیشینه نیروی ضربه در زمان برخورد یک جسم متراکم به سطح ورق ممکن می گردد. در این کار نشان داده شد که یک پارامتر واحد برشی نیز به خوبی خیز و لنگر خمشی می تواند برش جانبی را در نقطه ضربه توصیف نماید. در آخر نیز نتایج عددی برای نشان دادن کم بودن اثر برش روی خیز نسبت به نیروی ضربه و لنگر خمشی ارائه گردید [۱۶]. شگلتر ضربه پرتاب های تنگستنی با سرکروی بر روی ورق های آلومینیومی نرم را مورد بررسی قرارداد. در این بررسی درک نفوذ بالستیک در مجاورت سرعت آستانه خوردگی توسعه داده شده و تصحیح گردید. بررسی های وی نشان داد که زمان اتفاق افتادن پدیده بالستیک قسمت بدون فرسایش نه از یک زمان و نه از یک عمق مشخص تبعیت نمی کند ولی با یک تغییر شکل مجاز در ضربه زنده همراه است [۱۷]. زاو و هاتچینسون نشان دادند که تیرهای ساندویچی در مقایسه با تیرهای یکپارچه با جنس و وزن یکسان رفتار بهتری به منظور جذب انرژی در برابر بارهای انفجاری از خود نشان می دهند [۱۸]. شاپکیوف و همکاران پاسخ دینامیک ورق بیضوی تحت بارگذاری ضربه ای را بدست آوردند. در این کار یک حل تحلیلی برای بدست آوردن ارتعاش ورق بیضوی تحت ضربه با سرکروی به دست آمد. آنها سرعت ضربه زنده را به دست آوردند و فرض نمودند که ضربه زنده و ورق در ناحیه ای با شعاع  $r_d$  در تماس هستند. آن ها فشار ضربه را بدست آورده و نتیجه نیرو را برابر با نیروی برخورد در مساحت ورق قراردادند. بدین وسیله رفتار ورق بر حسب تئوری تیموشنکو با محاسبه کرنش های برشی و اینرسی چرخشی نرمال و تغییر مکان های هر نقطه از ورق به دست آمد. از این رو این محققان توانستند کرنش ها و نیز به وسیله قانون هوک تنش ها را به صورت یک سری به دست آوردند. کرنش های بدست آمده با نتایج تجربی در کار این محققان دارای تطابق خوبی بود [۱۹]. گوپیتا و سخون نتایج تجربی روی ورق آلومینیوم با ضخامت ۱ میلی متر با استفاده از یک تفنگ گازی با پرتابه های سرتخت و دماغه نیم کروی انجام دادند. ورق های هدف با سرعت های مختلف آزمایش شدند. سرعت های برخورد و سرعت های خروجی اندازه گیری شد و سرعت حد بالستیک برای پرتابه های سر نیم کروی بالاتر از پرتابه های سرتخت بدست آمد. آنها اثر شکل پرتابه روی تغییر شکل ورق را مورد بررسی قراردادند. شبیه سازی های با استفاده از کد ضمنی المان محدود آباکوس انجام پذیرفت. نتایج المان محدود با نتایج تجربی در کار این محققان بررسی گردید و دقت خوبی در کار این محققان بین نتایج تجربی و شبیه سازی مشاهده گردید. کنتام [۲۰] در مطالعاتی بر روی رفتار و ماندگی استاتیکی سازه های چسبی، مدل ناحیه ی چسبناک را پیش بینی و رفتار این سازه ها را مناسب دانسته و به مزیت های این مدل نیز اشاره کرده است. میراندا و همکاران [۲۱] از مدل دشتیند-فلک در بررسی نقش تغییر شکل پلاستیک روی رفتار مقاطع پر شده با فوم آلومینیوم استفاده کردند. راجندان و همکاران [۲۲] رفتار تغییر شکل فوم آلومینیوم تحت ضربه سقوطی را با استفاده از نرم افزار انسیس بررسی کردند، آنها برای این منظور از مدل ماده فوم



AL3105-st12-Al3105، st12 استفاده شده است. در جدول ۱ ورق های مورد استفاده معرفی شده اند. در شکل ۱ نمونه ای از ورق ها بالاییه چینی متفاوت و پیچ و مهره استفاده شده نشان داده شده است.

جدول ۱) معرفی ورق های مورد استفاده

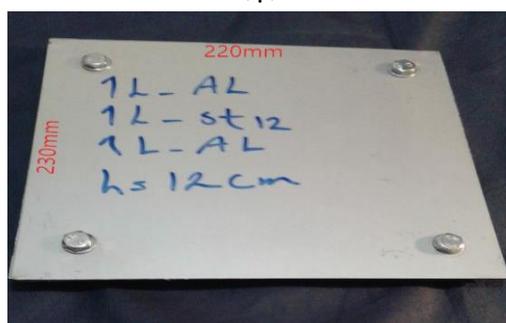
AL-st12-AL	st12-AL-st12	ck45-AL-ck45	AL-ck45-AL	st12-ck45-st12	ck45-st12-ck45	نمونه
12cm	12cm	12cm	12cm	12cm	12cm	ارتفاع سقوط



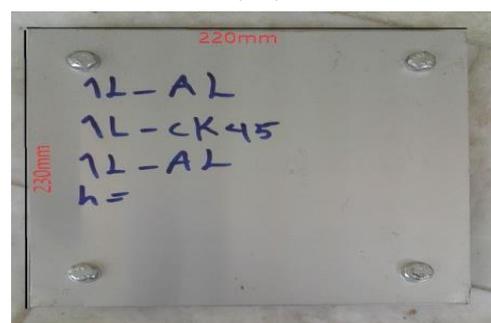
(ب)



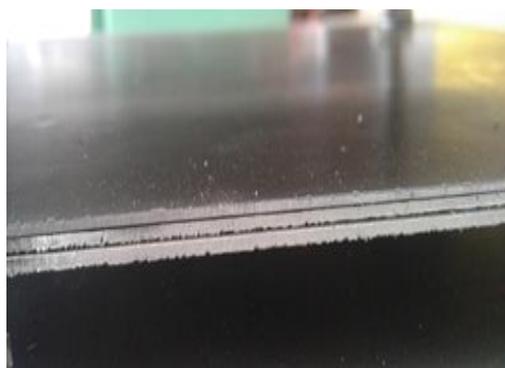
(الف)



(د)



(ج)



(ز)



(س)

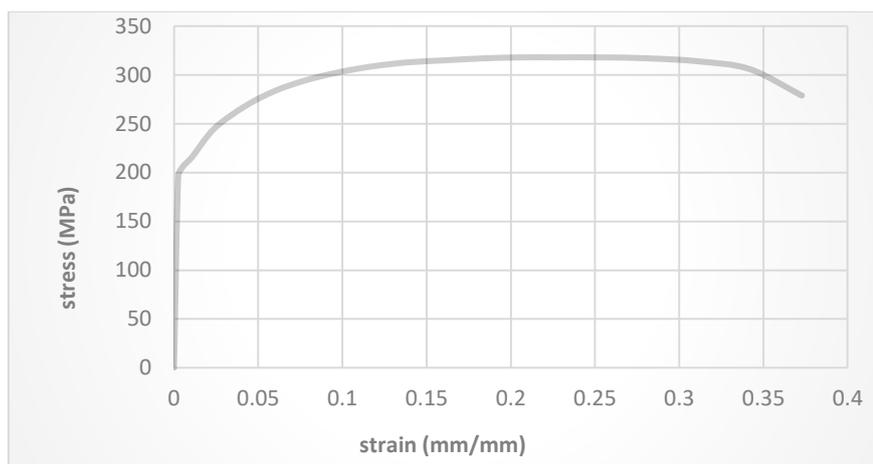
شکل ۱) نمای ورق های مورد استفاده، ورق با لایه چینی به ترتیب از بالا به پایین (الف) st12-ck45-s12، (ب) st12-AL3105-s12، (ج) AL3105-ck45-AL3105، (د) AL3105-st12-AL3105 (س) نمای زیرین ورق و (ز) نحوی قرارگیری ورق ها

## ۲-۲ مشخصات مکانیکی ورق‌ها و پیچ‌ها

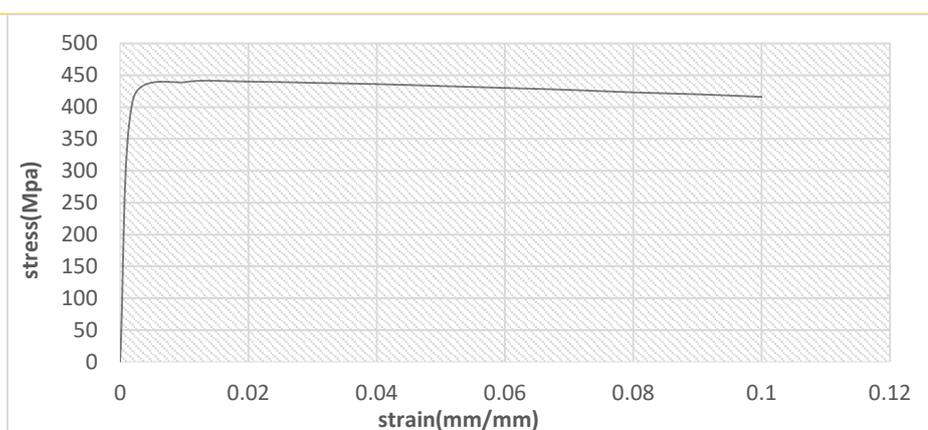
برای تعیین خواص مکانیکی ورق‌ها ی مورد آزمایش ۹ نمونه آزمایشگاهی طبق استاندارد ASTM E8 برش داده شده و مورد آزمایش کشش قرار گرفته است. از نتایج حاصل از این آزمون خصوصیات الاستیک و پلاستیک فولاد مصرفی شامل مدول الاستیک (یانگ)، نقطه تسلیم، استحکام و کرنش نهایی از روی نمودار تنش کرنش حاصل شده بدست می‌آید. برای نمونه‌های آزمایشگاهی به شکل ورق، برای انجام آزمون کشش لازم است که نمونه‌هایی به شکل دمبل آماده‌سازی شوند. در شکل ۲ نمونه‌های این آزمایش نشان داده شده‌اند. دستگاه تست کشش ۵ تنی ساخت کشور تایوان و مربوط به شرکت GOTECH می‌باشد. نمودارهای تنش - کرنش حاصل از این آزمایش در شکل ۳ نشان داده شده است. در جدول ۲ تا ۴ مشخصه‌های مهم مکانیکی ورق AL3105,ck45,st12 همچون مقاومت تسلیم، مدول یانگ و تنش و کرنش ارائه گردیده است. همچنین مشخصات کارخانه ای پیچ و مهره طبق استاندارد DIN933 در جدول ۵ آورده شده است.



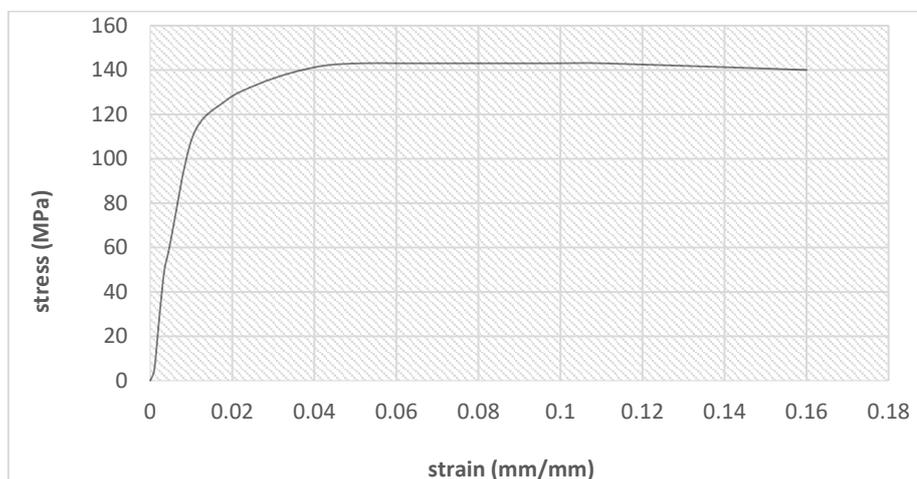
شکل ۲) نمونه‌های تست کشش برای تعیین مشخصات مکانیکی ورق‌ها



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳ نمودارهای تنش- کرنش حاصل از تست کشش. (الف) ورق st12، (ب) ورق ck45، (ج) ورق AL3105

جدول ۲) مشخصات مکانیکی ورق st12

جرم حجمی ( $kg/m^3$ )	مدول یانگ ( $Gpa$ )	تنش تسلیم ( $Mpa$ )	تنش نهایی ( $Mpa$ )	ضریب پواسون
۷۸۵۰	۱۹۰	۲۰۰	۳۱۸	۰/۳
S(%)	P(%)	Mn(%)	Si(%)	C(%)
۰/۰۴۵	۰/۰۴۵	۰/۶۰	۰	۰/۱۲

جدول ۳) مشخصات مکانیکی ورق CK45

جرم حجمی ( $kg/m^3$ )	مدول یانگ ( $Gpa$ )	تنش تسلیم ( $Mpa$ )	تنش نهایی ( $Mpa$ )	ضریب پواسون
۷۸۳۰	۱۹۰	۴۱۱	۴۴۰	۰/۳
S(%)	P(%)	Mn(%)	Si(%)	C(%)
۰/۰۳	۰/۰۳۵	۰/۵	۰/۴	۰/۴۲

جدول ۴) مشخصات مکانیکی ورق AL3105

جرم حجمی ( $kg/m^3$ )	مدول یانگ ( $Gpa$ )	تنش تسلیم ( $Mpa$ )	تنش نهایی ( $Mpa$ )	ضریب پواسون
۸۰۰۲	۸۱	۱۲۶	۱۴۳	۰/۲۷
AL	Zn(%)	Mn(%)	Mg(%)	Cu(%)
۹۶/۰	۰/۲۵	۰/۵۵	۰/۵	۰/۳

جدول ۵) مشخصات مکانیکی پیچ ومهره

جرم حجمی ( $kg/m^3$ )	مدول یانگ ( $Gpa$ )	تنش تسلیم ( $Mpa$ )	تنش نهایی ( $Mpa$ )	ضریب پواسون
۷۸۵۰	۲۰۰	۴۲۰	۵۰۰	۰/۳

۲-۳ فیکسچر<sup>۱</sup>

برای نگه داشتن نمونه‌ها و ایجاد تکیه‌گاه مناسب از فیکسچر نگهدارنده استفاده شده است. این فیکسچر به نحوی طراحی شده است که هیچ نوع گیرداری ورق با فیکسچر ندارد و ورق فقط بر روی فیکسچر قرار گرفته است در شکل ۴ نمای فیکسچر مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۴ (الف) نمای کلی فیکسچر، (ب) نمای جانبی فیکسچر

## ۲-۴ دستگاه آزمایش تست ضربه و شتاب سنج

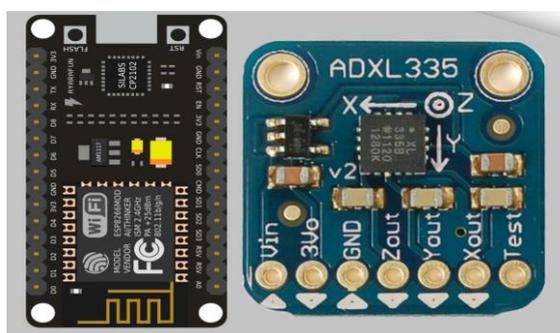
دستگاه مورد استفاده برای آزمایش ضربه در این پژوهش، دستگاه تست سقوط آزاد (دراپ همر)<sup>۲</sup> ۷۵۰۰ ژول  $DH - TM 7500 J$  می باشد. حداکثر ارتفاع قابل تنظیم این دستگاه ۳ متر می باشد و جرم ضربه زننده برای این تحقیق ۱۸۰ کیلوگرم انتخاب شده است و تا ۲۲۰ کیلوگرم قابل تنظیم کردن می باشد. این دستگاه در آزمایشگاه مکانیک ضربه دانشگاه لرستان مسقر است. این دستگاه از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده است، که عبارت‌اند از قسمت کنترل مرکزی دستگاه، سیستم اندازه‌گیری و پردازش اطلاعات، موتور، پایه‌های نگهدارنده‌ی ضربه زننده، وزنه‌های ضربه زننده، سرضربه زننده (عرقچین) می باشد. همچنین داده‌گیری و پردازش داده توسط شتاب سنج با دقت اندازه‌گیری میکرو ثانیه و بصورت وای فای نتایج را به سیستم انتقال می دهد و توسط نرم افزاری که با کدنویسی پایتون نوشته شده است نتایج بصورت منحنی شتاب-زمان نمایش داده می شود. در شکل ۵ تصویری از دستگاه دارپ همر و سرضربه زننده و سنسور شتاب سنج دستگاه نشان داده شده است. همچنین در جدول ۶ خواص مکانیکی سرضربه زننده گزارش شده است. برای ثبت تاریخچه شتاب از لحظه شروع تماس ضربه زننده با نمونه‌ها، از سنسور شتاب‌سنج که بر روی ضربه‌زننده قرار می‌گیرد، استفاده شده است.

<sup>1</sup>- fixture<sup>2</sup>- drop hammer



(ب)

(الف)



(ج)

شکل ۵) دستگاه دراپ هم. (الف) نمای کلی، (ب) سر ضربه زنده. (ج) سنسور شتاب سنج بصورت وای فای با دقت میکروثانیه

جدول ۶) مشخصات مکانیکی سره ضربه زنده

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

## ۲-۵- نتایج آزمایش تجربی

نتایج حاصل از این تحلیل بصورت نمودارهای شتاب-زمان حاصل از دستگاه شتاب سنج می باشد. همچنین تغییر شکل ماندگار هر ورق به عنوان دیگر پارامتر مهم در بررسی عملکرد ورق ها، می باشد. این تغییر شکل توسط سیستم متصل به دستگاه مشخص و ثبت می گردد. در جدول ۷ ماکزیمم شتاب ایجاد شده در هر ورق و همچنین تغییر شکل ماکزیمم آنها نمایش داده شده است. همانطور که قابل پیش بینی بود، با سخت شدن لایه رویه که مورد هدف ضربه زنده است، شتاب وارده بیشتر و همچنین تغییر شکل ماندگار کمتر است و بالعکس. جذب انرژی در ورق با لایه چینی AL3105-st12-AL3105، بیشتر از ورق های دیگر است. همچنین تغییر شکل در این نمونه ورق

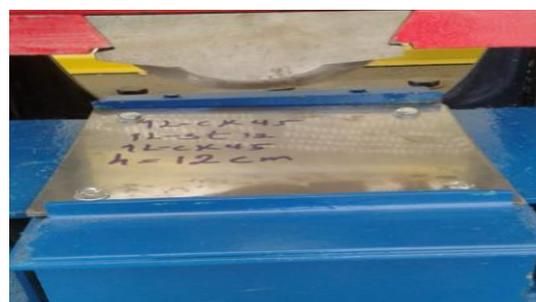
نیز بیشتر از نمونه های دیگر می باشد. تغییر شکل در ورق با لایه چینی ck45-st12-ck45 کمتر نمونه های دیگر است. پیچ و مهره مورد استفاده تغییر شکل ورق های زیرین را بدون اینکه جدا شوند به ورق های بالایی انتقال داده اند، که این مفهوم را می رساند پیچ و مهره انتخابی برای این سطح از انرژی ضربه بسیار مقاوم است. بدون اینکه ورق ها از هم جدا شوند. در شکل ۶ تا ۱۱ الگوی تغییر شکل نمونه ها نشان داده شده است.

جدول (۷) نتایج حاصل از تست تجربی

AL-st12-AL	st12-AL-st12	ck45-AL-ck45	AL-ck45-AL	st12-ck45-st12	ck45-st12-ck45	نمونه
۸۱,۰۲	۸۵,۱۳	۹۵,۱	۸۴,۵۷	۹۰,۲۷	۹۷,۸۸	شتاب حداکثر ( $m/s^2$ )
۰,۰۲۳	۰,۰۱۶	۰,۰۱۳۵	۰,۰۲	۰,۰۱۸	۰,۰۱۲	تغییر شکل پلاستیک حداکثر (m)



(ب)



(الف)

شکل ۶ الگوی تغییر شکل ورق با لایه چینی ck45-st12-ck45. (الف) قبل از برخورد، (ب) بعد از برخورد



(ب)



(الف)

شکل ۷ الگوی تغییر شکل ورق با لایه چینی st12-ck45-st12. (الف) قبل از برخورد، (ب) بعد از برخورد



(ب)



(الف)

شکل ۸) الگوی تغییر شکل ورق با لایه چینی AL-ck45-AL (الف) قبل از برخورد، (ب) بعد از برخورد



(ب)



(الف)

شکل ۹) الگوی تغییر شکل ورق با لایه چینی ck45-AL-ck45 (الف) قبل از برخورد، (ب) بعد از برخورد



(ب)



(الف)

شکل ۱۰) الگوی تغییر شکل ورق با لایه چینی st12-AL-st12 (الف) قبل از برخورد، (ب) بعد از برخورد



(ب)



(الف)

شکل (۱۱) الگوی تغییر شکل ورق با لایه چینی، AL-st12-AL (الف) قبل از برخورد، (ب) بعد از برخورد

### ۳- تئوری ضربه

#### ۳-۱ روابط حاکم برای ورق مستطیل شکل

رفتار دینامیکی یک المان از ورق مستطیل شکل مطابق شکل ۱۲ با روابط زیر بیان می شود [۳۳].

$$\partial Q_x / \partial x + \partial Q_y / \partial y + p = \mu \ddot{w} \quad (۱)$$

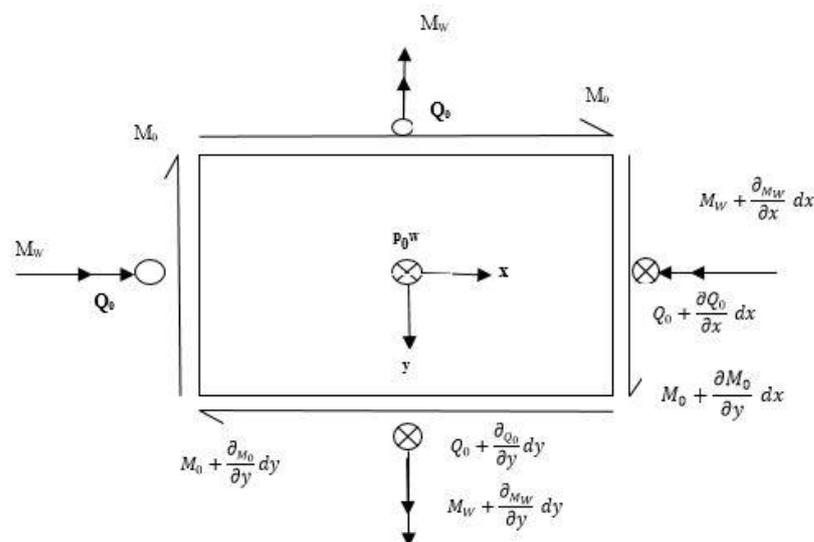
$$\partial Q_x / \partial x + \partial M_{xy} / \partial y - Q_x = 0 \quad (۲)$$

$$\partial M_y / \partial y + \partial M_{xy} / \partial x - Q_y = 0 \quad (۳)$$

$$K_x = -\partial^2 w / \partial x^2 \quad (۴)$$

$$K_y = -\partial^2 w / \partial y^2 \quad (۵)$$

$$K_{xy} = -\partial^2 w / \partial x \partial y \quad (۶)$$



شکل ۱۲: روابط دینامیکی روی یک المان مستطیلی شکل از ورق [۳۳]

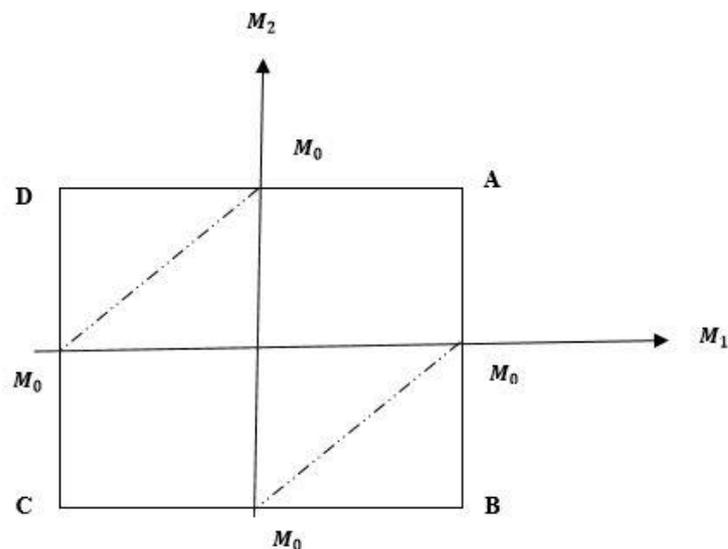
در رابطه (۱) اثر لختی اضافه شده است. در این رابطه  $\mu$  جرم واحد سطح می باشد. به جای ممان خمشی  $M_x$ ،  $M_y$  و  $M_{xy}$  در شکل

(۱۲)، ممان های اصلی در ورق مستطیل شکل جایگزین می شود. این ممان های اصلی برابرند با

$$M_x = (M_x + M_y)/2 + [(M_x - M_y)^2 + 4 M_{xy}^2]^{1/2}/2 \quad (۷)$$

$$M_2 = (M_x + M_y)/2 - [(M_x - M_y)^2 + 4 M_{xy}^2]^{1/2}/2 \quad (۸)$$

فرض می شود که ورق مستطیل شکل از جنس صلب - کامل پلاستیک است، و جریان پلاستیکی توسط تنش های تعمیم یافته  $M_x$ ،  $M_y$  و  $M_{xy}$  کنترل می شود، در حالی که نیروهای برشی  $Q_x$  و  $Q_y$  به عنوان عکس العمل در نظر گرفته می شود. بنابراین جریان پلاستیک یک ورق مستطیل شکل، یک سطح سه محوری  $M_x - M_y - M_{xy}$  را برآورد می نماید. اگر تنشهای تعمیم یافته بر مبنای روابط (۷) و (۸) به تنش های اصلی تبدیل شود، معیار تسلیم دو محوری طبق شکل (۱۳) بر جریان پلاستیک حاکم خواهد بود.



شکل ۱۳: معیار تسلیم برای یک ورق مستطیل شکل از جنس صلب - کامل پلاستیک [۳۳]

کاکس و مورلند (Cox and Morland) حل دقیق تئوری برای رفتار دینامیکی ورق مستطیل شکل بدست آورند. آنها از روند تئوری کلی ورق گرد، استفاده کرده، رفتار دینامیکی ورق مستطیل شکل روی تکیه گاه ساده تحت بار دینامیکی پله ای را تحلیل نمودن [۳۳].

### ۲-۳ ورق مربع شکل با تکیه گاه ساده تحت بار دینامیکی، $P_c \leq P_0 \leq 2P_c$

#### ۱-۲-۳ مقدمه

به طوری که در مقدمه گفته شد، رفتار ورق مستطیل شکل تحت بار دینامیکی توسط کاکس و مورلند ارائه گردیده است. آنها یک ورق مستطیل شکل روی تکیه گاه ساده مطابق شکل (۱۴) تحت بار دینامیکی پله ای را تحلیل نمودند. کاکس و مورلند دریافتند که برای تحلیل ورق لازم است معیار تسلیم ساده مربع شکل، معیار زوهانسون، طبق شکل (۱۳) در نظر گرفته شود. پاسخ دینامیکی ورق شامل دو نمود حرکت  $0 \leq t \leq \tau$  و  $\tau \leq t \leq T$  خواهد بود [۳۳].

#### ۲-۲-۳ نمود اول حرکت، $0 \leq t \leq \tau$

فشاراستاتیکی فروریزش ورق مربع شکل برابر است با؛

$$P_c = 6M_0/L^2 \quad (9)$$

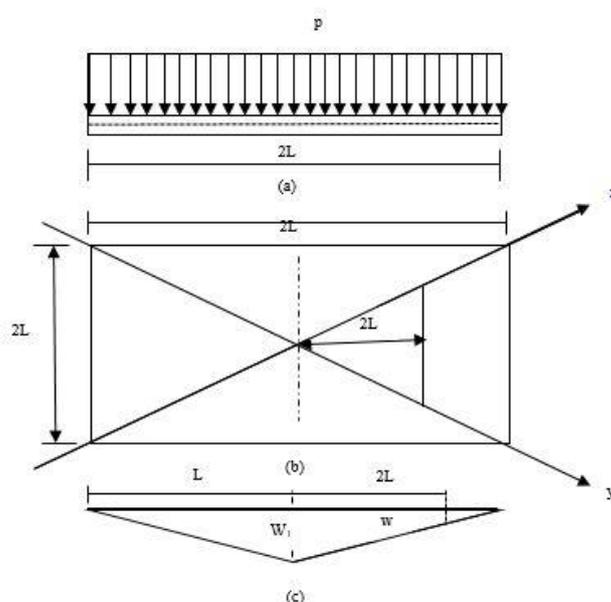
این رابطه برای یک ورق مربع شکل به طول ضلع  $L$  می باشد. حرکت عرضی ورق وقتی  $P_0 \geq P_c$  است شروع می شود و فرض می گردد نمایه سرعت عرضی مشابه نمایه فروریزش الاستیکی ورق، شکل (۱۴ - c) می باشد. بدین ترتیب نمایه سرعت به گونه زیر است:

$$\dot{w} = \dot{W}_1(1 - z) \quad 0 \leq z \leq L \quad (10)$$

که در آن  $z$  بر مبنای شکل (۱۴ - b) برابر است با

$$z = (x + y)/\sqrt{2}L \quad (11)$$

محور های  $x$  و  $y$  در امتداد قطر های ورق که در آنها لولای پلاستیکی تشکیل می شود، انتخاب شده اند. با توجه به تقارن ورق نسبت به محور های  $x - y$ ، لازم است یک چهارم ورق تحلیل گردد.



شکل ۱۴: ورق مربع شکل با تکیه گاه ساده تحت بار دینامیکی گسترده یکنواخت. (a) نمای کناری ورق مربع شکل، (b) نمای سطحی ورق، (c) نمای سرعت عرضی [۳۳].

اگر با استفاده از روابط (۲) و (۳) نیرو های برشی در رابطه (۱) حذف شوند، رابطه حاکم بر ورق بر مبنای ممانهای  $M_x$ ،  $M_y$  و

$M_{xy}$  به گونه زیر در می آید

$$\partial^2 M_x / \partial x^2 + 2 \partial M_{xy} / \partial x \partial y + \partial^2 M_y / \partial y^2 = \mu \ddot{w} - p \quad (12)$$

از طرفی در نمود اول حرکت؛

$$p = p_0 \quad 0 \leq t \leq \tau \quad (13)$$

در نتیجه رابطه (۱۲) به صورت زیر خواهد بود

$$\partial^2 M_x / \partial x^2 + 2 \partial^2 M_{xy} / \partial x \partial y + \partial^2 M_y / \partial y^2 = \mu \ddot{w}_1 (1 - z) - p_0 \quad (14)$$

که در آن از رابطه (۱۰) استفاده شده است.

با توجه به تقارن، در مرکز ورق رابطه زیر برقرار است؛

$$M_{xy} = 0 \quad \text{و} \quad M_x = M_y = M_0 \quad (15)$$

بر مبنای این رابطه، گوشه A معیار تسلیم ژوهانسون، شکل (۱۳)، برای جریان پلاستیکی مرکز ورق حاکم است. برای پیشروی

لولای خطی پلاستیک به ترتیب در امتداد محورهای  $x$  و  $y$ ، شکل (۱۴)، لازم است شرایط زیر برقرار باشد؛

$$0 \leq x \leq \sqrt{2}L \quad \text{و} \quad y = 0 \quad \text{وقتی} \quad M_y = M_0 \quad (16)$$

$$0 \leq y \leq \sqrt{2}L \quad \text{و} \quad x = 0 \quad \text{وقتی} \quad M_x = M_0 \quad (17)$$

بنابراین جریان پلاستیک جسم در لولاها با روند AB معیار تسلیم ژوهانسون، شکل (۱۳)، کنترل می شود. در این صورت با استفاده از

روابط (۱۶) و (۱۷) نتیجه می شود؛

$$M_1 = (M_x + M_y) / 2 + [(M_x - M_y)^2 + 4M_{xy}^2]^{1/2} / 2 = M_0 \quad (18)$$

$$-M_0 \leq M_2 = (M_x + M_y) / 2 - [(M_x - M_y)^2 + 4M_{xy}^2]^{1/2} / 2 \leq M_0 \quad (19)$$

کاکس و مورلند تحلیل تئوری را با انتخاب سری های ساده زیر، دنبال نمودند [۳۳]؛

$$M_x = M_0 + x^2 f_1(z) \quad (20)$$

$$M_y = M_0 + y^2 f_1(z) \quad (21)$$

$$M_{xy} = xy f_1(z) \quad (22)$$

این انتخاب روابط (۱۵) تا (۱۷) را برآورده می نمایند، و در آن  $f_1(z)$  تابع دلخواهی است که باید بدست آید. با استفاده از روابط (۲۰) تا

(۲۲)، رابطه حاکم (۱۴) را می توان به گونه زیر تقسیم نمود؛

$$z^2 \partial^2 f_1 / \partial z^2 + 6z \partial f_1 / \partial z + 6f_1 = \mu \ddot{W}_1 (1 - z) - p_0 \quad (23)$$

حل کلی این رابطه به صورت زیر است

$$f_1 = (\mu \ddot{W}_1 - p_0)/6 - \mu \ddot{W}_1 z/12 + C_1/z^2 + C_2/z^3 \quad (24)$$

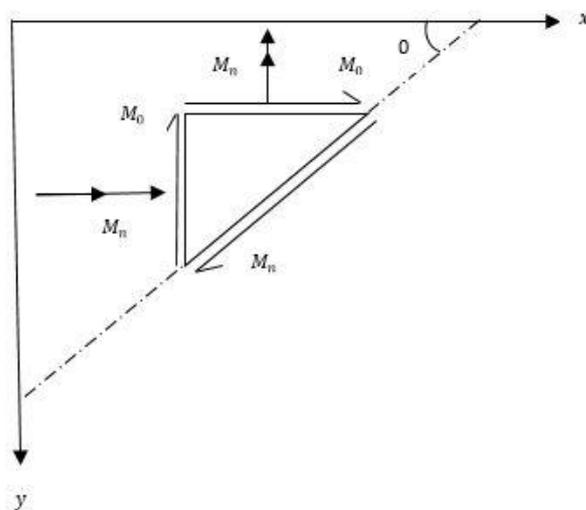
که در آن  $C_1$  و  $C_2$  ثابت‌های انتگرال هستند. به هر حال، با توجه به اینکه ممانهای خمشی بر مبنای روابط (۲۰) و (۲۱) باید

رابطه (۱۵) را برآورده نمایند، نتیجه می‌شود

$$C_1 = C_2 = 0 \quad (25)$$

ممان خمشی  $M_n$

$$M_n = M_x \sin^2 \alpha + 2M_{xy} \sin \alpha \cos \alpha + M_y \cos^2 \alpha \quad (26)$$



شکل ۱۵: ممان خمشی  $M_n$  بر واحد طول برای یک سطح مایل با زاویه  $\alpha$  نسبت به محور  $x$  [۳۳]

بنابراین شرط تکیه گاه ساده در  $z = 1$ ، با قرار دادن  $\alpha = 45^\circ$  در رابطه (۲۶)، به گونه زیر

$$(M_x + M_y)/2 + M_{xy} = 0 \quad z = 1 \quad (27)$$

با قرار دادن روابط (۲۰) تا (۲۲) و روابط (۲۴) و (۲۵) با  $z = 1$  در رابطه (۲۷) نتیجه می‌شود؛

$$\mu \dot{W}_1 = 2(p_0 - p_c) \quad (28)$$

این رابطه نشان می دهد که در نمود اول حرکت،  $0 \leq t \leq \tau$ ، وقتی  $p_0 > p_c$  است، ورق دارای شتاب می باشد. برای حل استاتیک  $\dot{W}_1 = 0$  است و  $p_0 = p_c$  خواهد شد. برای بدست آوردن رابطه (28) از روابط (9) و (11) نیز استفاده شده است. با دو بار انتگرال گرفتن از رابطه (28) و با استفاده از رابطه (10)، تغییر مکان عرضی برابر می شود با؛

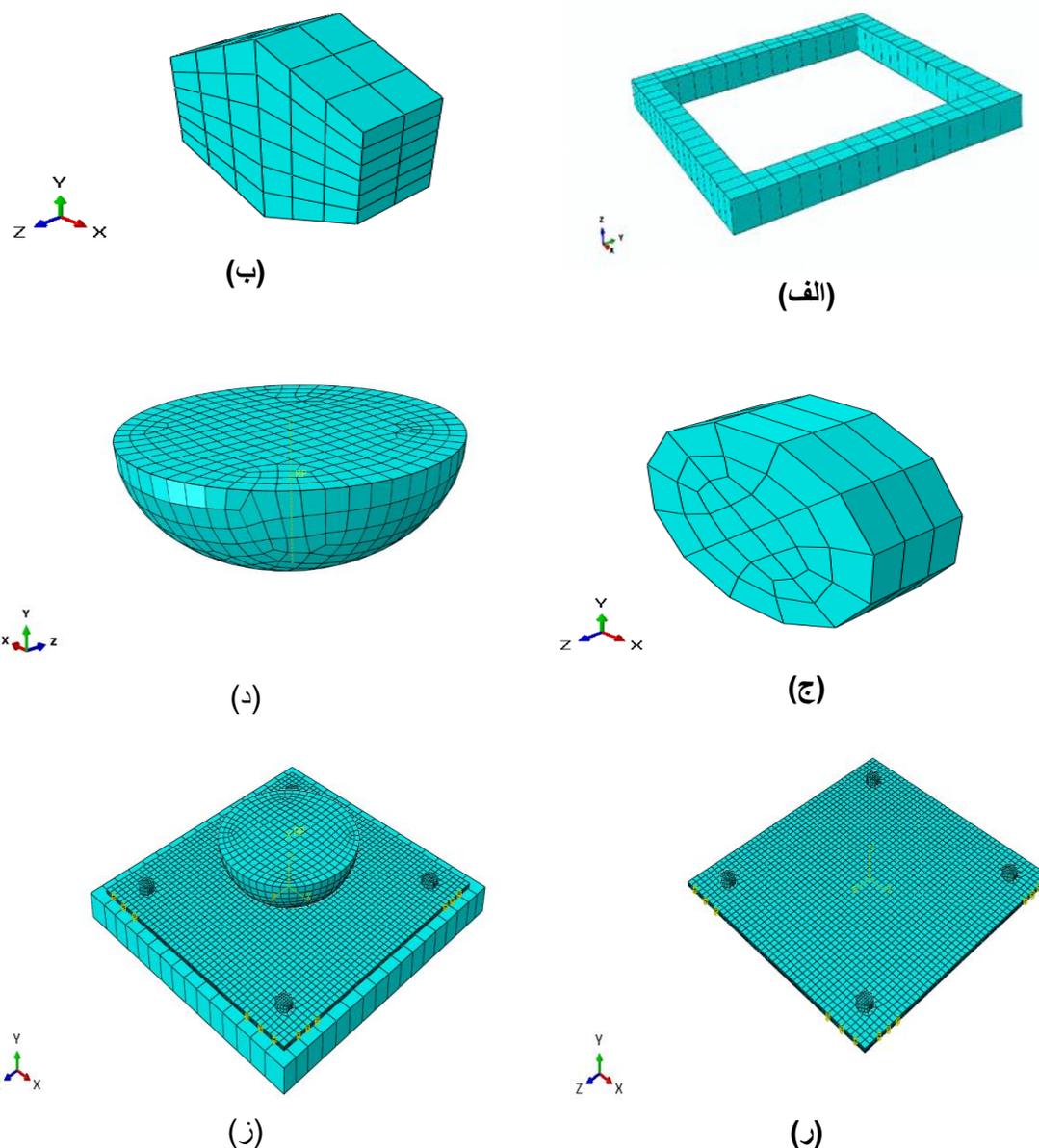
$$0 \leq z \leq 1 \quad w = (p_0 - p_c) t^2 (1 - z)/\mu \quad (29)$$

ثابت‌های انتگرال با توجه به شرایط اولیه  $w = \dot{w} = 0$  در  $t = 0$  بدست آمده اند. بنابراین سرعت عرضی در پایان نمود اول حرکت برابر خواهد شد با؛

$$\dot{w} = 2(p_0 - p_c) \tau (1 - z)/\mu \quad 0 \leq z \leq 1 \quad (30)$$

#### ۴-مدلسازی عددی

به منظور بررسی عددی رفتار ورق‌های مسطح تحت ضربه ناشی از سقوط آزاد و مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی، مدل‌سازی المان محدودی با استفاده نرم‌افزار ABAQUS برای هر شش نمونه آزمایشگاهی انجام شده است. برای فراهم کردن قید فیکسچر برای ورق‌ها و با توجه به نوع تکیه‌گاه‌ها از قیود مربوطه در نرم افزار استفاده شده است. مدلسازی این فیکسچر به صورت مدل جامد (Solid) سه بعدی که از ۸۶ عدد المان سه بعدی ۸ گرهی با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته با نام C3D8R استفاده شده است. ابعاد هندسی ورق‌ها در مدل عددی به صورت مربع  $22 \times 22$  سانتی‌متر مربع با ضخامت ۱ میلی‌متر می‌باشد. برای مدل‌سازی این عناصر از مدل جامد (Solid) سه بعدی و از نوع تغییرشکل‌پذیر (Deformable) استفاده شده است. برای مش‌بندی ورق‌ها از تعداد ۹۰۰ عدد المان سه بعدی ۸ گرهی با انتگرال-گیری کاهش‌یافته با نام C3D8R استفاده شد. برای اتصال ورق‌ها بر روی هم از پیچ و مهره استفاده شده است، که از سه قسمت سرپیچ، تنه پیچ و مهره تشکیل شده است. همچنین نحوه تماس پیچ‌ها با ورق‌ها به صورت اتکایی می‌باشد. سرپیچ و مهره از ۷۲ المان و تنه پیچ از ۹۶ المان سه بعدی ۸ گرهی با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته با نام C3D8R استفاده شده است. که این سه قسمت با استفاده از قابلیت Tie به یکدیگر متصل شده است. در این قابلیت اتصال کامل و بدون لغزشی بین سطوح در تماس با هم ایجاد می‌کند و ضریب اصطکاک بین لایه‌ها و فیکسچر برابر با ۰/۲ می‌باشد. برای شبیه‌سازی ضربه زنده، تنها سره ضربه‌زننده که در تماس با ورق قرار می‌گیرد، مدل شده است. این المان نیمی از کره بیضوی شکل می‌باشد. به علت سختی بسیار زیاد آن نسبت به ورق‌های فولادی آزمایش، از نوع صلب، Discrete rigid، در نظر گرفته شده است. این عضو در ابتدا بصورت 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. در شکل ۱۶ تصاویر مربوط به مش‌بندی نمایش داده شده است.



شکل ۱۶) مدل المان محدود، (الف) فیکسچر، (ب) سری پیچ، (ج) تنه پیچ، (د) ضربه زننده، (ر) ورق سه لایه، (ز) مدل نهایی مش بندی شده

#### ۴-۱ مدل سازی رفتار ورق ها

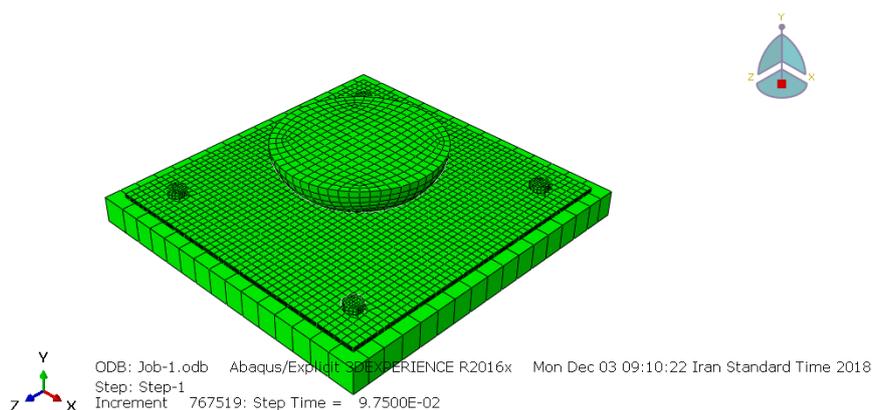
نمودارهای تنش- کرنش بدست آمده در آزمون کشش تک محوری (شکل ۳) به عنوان مشخصه اصلی رفتار این نمونه ها در نظر گرفته شده است. محدوده رفتار خطی به صورت الاستیک ایزوتروپیک با شیبی برابر با مدول یانگ تا نقطه تنش تسلیم و ضریب پواسون  $0.33/0$  و  $0.27/0$  لحاظ شده است. در تغییر شکل های بزرگتر، ورق های فولادی وارد محدوده رفتار با تغییر شکل ماندگار 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.

## ۴-۲ بارگذاری و شرایط مرزی

با توجه به اینکه ورق‌های فولادی به پهنای ۱ سانتی متر بر روی فیکسچر قرار می‌گیرند، در مدل‌سازی برای سادگی و ثابت نگه داشتن فیکسچر فقط سه درجه آزادی انتقالی در چهار لبه بسته شده است. برای شبیه‌سازی برخورد ضربه‌زننده از سرعت معادل در لحظه شروع ضربه استفاده شده است 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 ارتفاع سقوط خواهیم داشت:

$$v = \sqrt{2gh} = \{h = 120\text{cm} \rightarrow v = 1320\text{mm/s}\} \quad (31)$$

برای اعمال سرعت اولیه به ضربه‌زننده، از قابلیت پیش‌تعریف بارگذاری (Predefined field) در نرم‌افزار ABAQUS استفاده شده است. بر اساس این قابلیت سرعت اولیه به نقطه مرجع (Reference point) وارد می‌شود و برای ایجاد شرایط واقعی نیروی ثقل ۹۸۱۰ میلی‌متر بر مجذور ثانیه و جرم ضربه‌زننده برابر با ۱۸۰ کیلوگرم در نرم‌افزار ثبت شده است. برای تعریف اندرکنش ضربه‌زننده با ورق‌های فولادی نیز از قابلیت تماس عمومی، General contact explicit، استفاده شده است، که یک تماس کلی بین همه عناصر موجود در مدل ایجاد می‌کند که در آن خصوصیت کلی اختصاص یافته برای تماس بین اجزاء از نوع تماس نرمال و تماس مماسی استفاده شده است. در شکل ۱۷ مدل نهایی المان محدود یکی از نمونه‌ها نشان داده شده است.



شکل ۱۷) مدل المان محدود تست ضربه سقوط آزاد

## ۵- بحث و نتایج

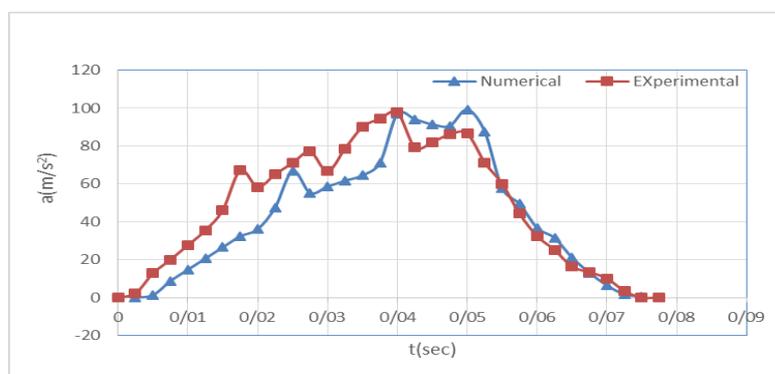
## ۵-۱ مقایسه نمودارهای شتاب-زمان، جابجایی زمان و نیرو-جابجایی در تحلیل عددی و تجربی

پس از تعیین مش مناسب و بهینه، نمونه‌های آزمایشگاهی مختلف موجود در این تحقیق به وسیله روش مدل‌سازی ذکر شده شبیه‌سازی گردیدند. نتایج حاصل از این مدل‌سازی در جدول شماره ۸ نمایش داده شده است. همچنین برای مقایسه نتایج حاصل از دو تحقیق عددی و آزمایشگاهی در شکل ۱۸ نتایج شتاب-زمان برای (الف) نمونه با لایه چینی ck45-st12-ck45 و (ب) st12-ck45-st12 نشان داده شده است. با دو بار انتگرال گیری عددی از نمودار شتاب-زمان به نمودار جابجایی زمان می‌رسیم، با داشتن جابجایی در هر مدل و محاسبه شتاب ضربه‌زننده در هر لحظه، طبق قانون دوم نیوتن نیروی حاصل از ضربه رابدست می‌آوریم که برابر است با جرم ضربه‌زننده در شتاب، در کلیه حالات جرم ضربه‌زننده ثابت بوده و برابر با ۱۸۰ کیلوگرم می‌باشد. با توجه به انجام این محاسبات، نمودار نیرو-جابجایی

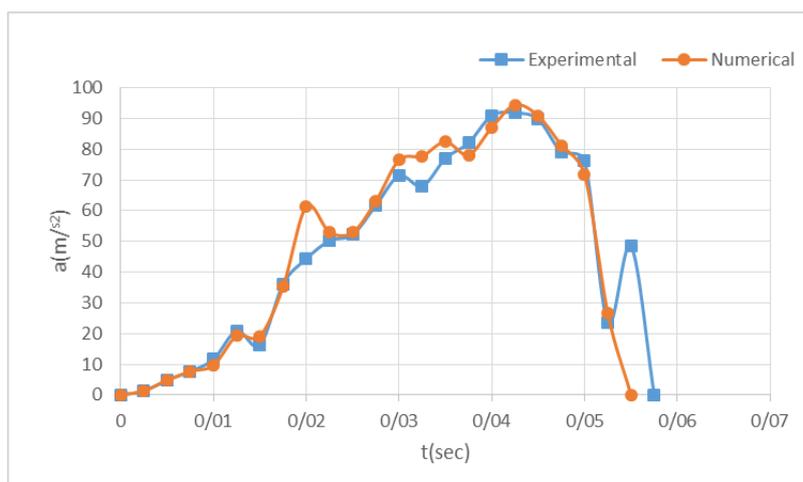
بدست می آید، که در شکل ۱۹ نتایج نمودار نیرو-جابجایی برای مدل های ck45-st12-ck45، st12-ck45-st12 نشان داده شده است. با محاسبه سطح زیر نمودار نیرو جابجایی مقدار جذب انرژی برای هر مدل هم در روش تجربی و عددی به دست آورده شده است که جدول ۹ ارائه داده شده است. نتایج عددی نیز همانند نمونه های آزمایشگاهی نشان می دهند که نمونه با لایه چینی ck45-st12-ck45 مقدار شتاب برخورد بیشتری نسبت به دیگر نمونه ها دارد، اما تغییر شکل به نسبت کمتری و همچنین انرژی کمتری جذب می کند. تفاوت بین مدل-های آزمایشگاهی با شبیه سازی عددی بسیار کم و زیر ۵ درصد می باشد که این مقدار به دلایلی همچون وجود اصطکاک بین یاتاقان های ضربه زننده و میله های نگهدارنده وزنه، همچنین وجود میرایی می باشد، که در مدل عددی اعمال نشده است. البته باید در نظر داشت که شرایط تکیه گاهی و طریقه متصل کردن ورق ها و خطای ساخت عامل مهمی در مقدار نتایج می باشد. در شکل ۲۰ الگوی تغییر شکل تمام نمونه ها نمایش داده شده است. در شکل ۲۱ نمودارهای جابجایی-زمان ورق ها نشان داده شده است. همانطور که دیده می شود، شکل نمودارها از الگوی یکسانی برخوردار هستند و نشان می دهد در لحظه برخورد جابجایی افزایش پیدا می کند اما در یک زمان متوقف می شود.

جدول ۸) نتایج حاصل از تست تجربی

AL-st12-AL	st12-AL-st12	ck45-AL-ck45	AL-ck45-AL	st12-ck45-st12	ck45-st12-ck45	نمونه
۸۲/۱	۸۵/۹۲	۹۶/۲	۸۵/۱۱	۹۱/۱۳	۱۰۰/۰۳	شتاب حداکثر ( $m/s^2$ )
۰/۰۲۳۵	۰/۰۱۷۶	۰/۰۱۴	۰/۰۲۱	۰/۰۱۹۵	۰/۰۱۳	تغییر شکل پلاستیک حداکثر (m)



(الف)



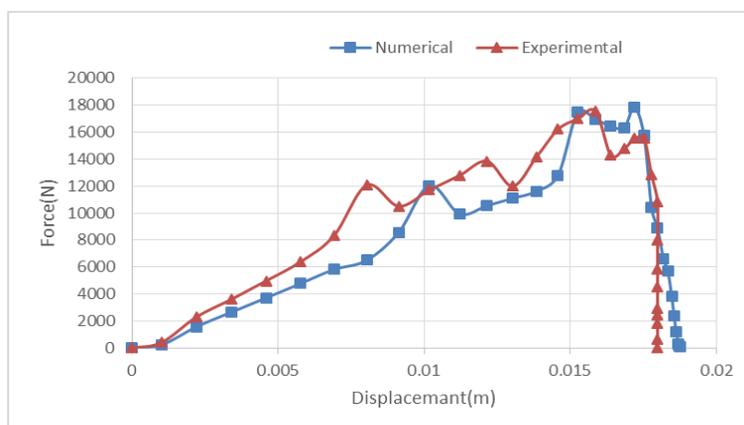
(ب)

شکل ۱۸) مقایسه نتایج شتاب تست تجربی و مدل المان محدود. (الف) نمونه با لایه چینی ck45-st12-ck45 و

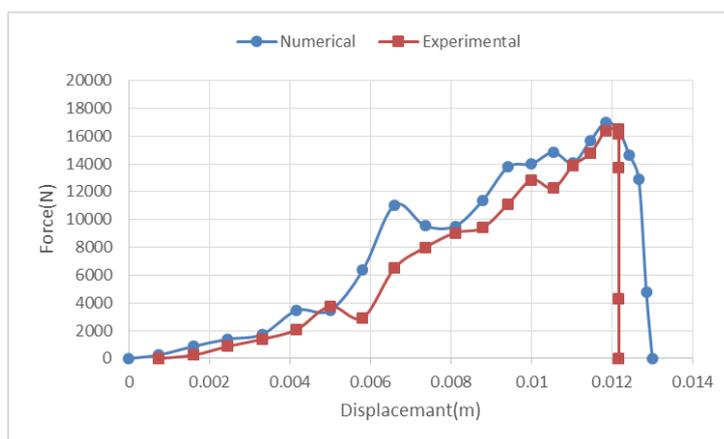
(ب) نمونه با لایه چینی st12-ck45-st12).

مشاهده می شود کل برخورد از زمان شروع تماس تا لحظه توقف ضربه زننده برای دوتا نمونه در زمان کمتر از 0.08 ثانیه انجام

می شود. به خاطر وزن زیاد ضربه زننده ضربات بعدی بخاطر اثرات الاستیک در همان محدوده 0.08 ثانیه باقی می ماند.



(الف)

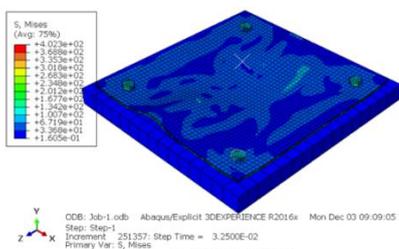


(ب)

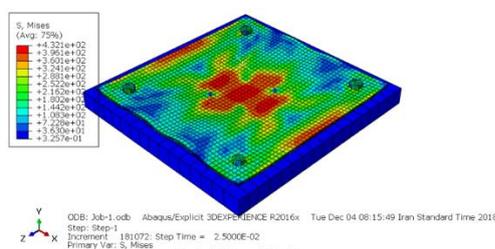
شکل ۱۹) مقایسه نتایج نتایج نیرو-جابجایی تست تجربی و مدل المان محدود. (الف) نمونه با لایه چینی ck45-st12 و

(ب) نمونه با لایه چینی st12-ck45-st12).

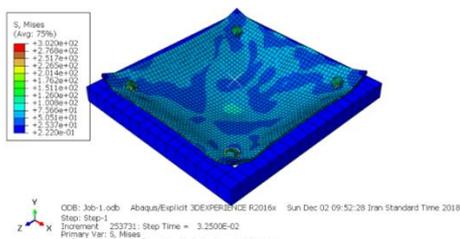
مشاهده می شود که نمودارها قبل از رسیدن نیرو به نقطه اوج خود برای هر دو روش تجربی و عددی یک رفتار خطی به سمت غیرخطی از خود نشان می دهد بعد از رسیدن نیرو به نقطه اوج خود نمونه ها دچار گسیختگی در درون خود می شوند که نشان دهنده کاهش استحکام نمونه ها در اثر ضربه وارده می شود در این مرحله به حداکثر تغییر شکل پلاستیک نمونه ها در اثر ضربه مشاهده می گردد.



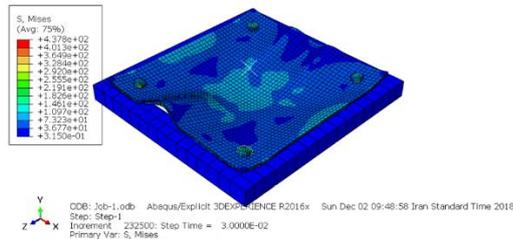
(ب)



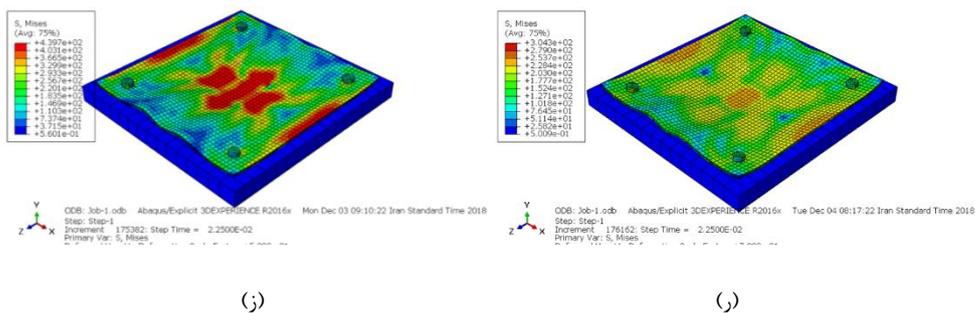
الف



(د)



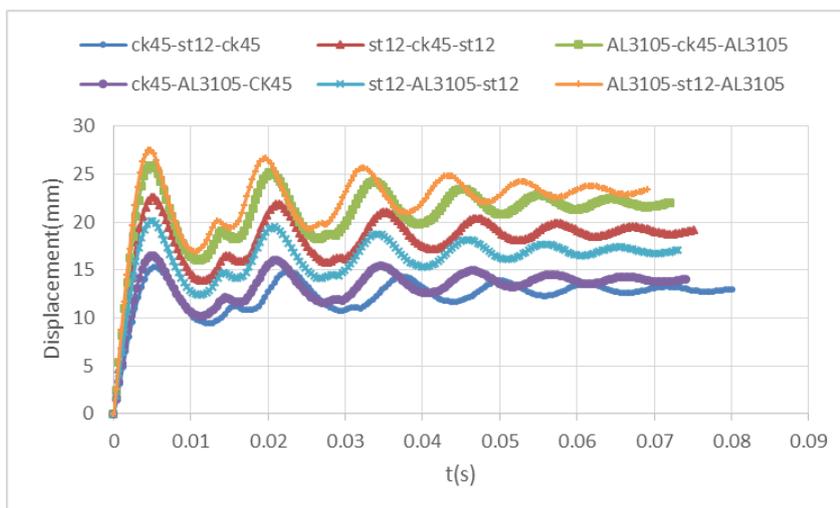
(ج)



شکل (۲۰) الگوی تغییر شکل ورق ها. (الف) ورق با لایه چینی ck45-st12-ck45. (ب) ورق با لایه چینی st12-ck45-st12. (ج) ورق با لایه چینی ck45-AL. (د) AL. (ه) ورق با لایه چینی AL-st12-AL. (و) ورق با لایه چینی st12-AL-st12. (ز) ورق با لایه چینی AL-st12-AL.

جدول (۹) نتایج مقدار جذب انرژی

AL-st12-AL	st12-AL-st12	ck45-AL-ck45	AL-ck45-AL	st12-ck45-st12	ck45-st12-ck45	نمونه
۱۴۸	۱۲۷	۱۱۷	۱۳۹	۱۳۲	۱۱۱	جذب انرژی (ز) تست عددی
۱۴۳	۱۲۳	۱۱۴	۱۳۶	۱۲۸	۱۰۸	جذب انرژی (و) تست تجربی
۳/۵	۳/۱۴	۲/۶۳	۲/۱۵	۳/۰۳	۲/۷	درصد اختلاف



شکل (۲۱) نمودار جابجایی - زمان .

مشاهده می شود در لحظه برخورد جابجایی افزایش پیدامی کند اما در یک زمان متوقف می شود که برای نمونه ی با لایه چینی -ck45-AL3105-AL3105 این جابجایی بیشتر از سایر نمونه ها است .

## ۶- نتیجه گیری

- ۱- در این پژوهش بررسی تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی روی رفتار ورق های ck45،AL3105 و st12 که با لایه چینی متقابل توسط پیچ بهم متصل شدند و تحت ضربه با سرعت پایین ناشی از سقوط آزاد وزنه انجام شد.
- ۲- بر اساس نتایج بدست آمده از این تحقیق، ورق های با لایه چینی ck45-st12-ck45 و ck45-AL-ck45 نسبت به ورق های با لایه چینی st12-ck45، ck45-AL-ck45، st12-AL-st12 و AL-st12-AL دارای شتاب برخورد و نیروی ضربه بیشتری می باشند.
- ۳- اثر شوک و ضربه وارده در اثر برخورد در ورق های بالایه چینی ck45-st12-ck45 و ck45-AL-ck45 بیشتر از ورق های بالایه چینی st12-AL-st12، AL-st12-AL است.
- ۴- جابجایی و تغییر شکل در ورق های بالایه چینی ck45-st12-ck45، ck45-AL-ck45 کمتر از ورق های بالایه چینی AL-st12-AL است.
- ۵- جذب انرژی در ورق های بالایه چینی ck45-st12-ck45، ck45-AL-ck45 کمتر از ورق های بالایه چینی AL-st12-AL، AL-st12-AL است.
- ۶- مقایسه نمودارهای حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی نشان می دهند که اختلاف ماکزیمم شتاب وارد بر نمونه ها کمتر از ۵ درصد می باشند.
- ۷- تفاوت نتایج تغییر شکل ماندگار کمتر از ۵ درصد می باشد که نشان از دقت مناسب و نزدیک بهم این دو روش تحلیل دارد.

## منابع

- [1] Qian Y., Swanson S.R., "A Comparison of Solution Techniques for *Impact Response of Composite Plates*", *Composite Structures*, Vol. 14, 1990, pp. 177-192.
- [2] Her S.C., Liang Y.C., "The Finite Element Analysis of Composite Laminates and Shell Structures Subjected to Low Velocity Impact", *Composite*.
- [3] Caprino G., Spataro G., Del Luongo S., "Low- Velocity Impact Behavior of Fiberglass-Aluminum Laminates", *Composites: Part A*, Vol.35, 2004, pp.
- [4] Zarei, Hamed, Mojtaba Sadighi, and Giangiacomo Minak. "Ballistic analysis of fiber metal laminates impacted by flat and conical impactors." *Composite Structures* 161 (2017): 65-72.
- [5] Sabouri H., Ahmadi H., Liaghat G.H., "Ballistic, Impact Perforation Into Glare Target: Experiment Numerical Modeling and Investigation of Aluminium Stacking Sequence", *International Journal Vehicle Structures & Systems*, Vol. 3, No. 1, 2011, pp. 178-183.
- [6] T. Kitada, 1998, "Ultimate strength and ductility of concrete-filled steel bridge piers", *Engineering Structures*, Vol. 20, Nos 4~i, pp. 347-354.
- [7] Malekzadeh, P., and Setoodeh, A.R., Large Deformation Analysis of Moderately Thick Laminated Plates., *Composite Structures*., 2006; no.4, 80: 569-579.
- [8] F. Ustaa, F. Mullaoglu, H. S. Türkmen, D. Balkan, Z. Mecitoglu, H. Kurtaran, E. Akay, 2016, "Effects of Thickness and Curvature on Impact Behaviour of Composite Panels", *Journal of Procedia Engineering*, No.167, pp 216-222.
- [9] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M (2015) Experimental study and analytical modeling for inelastic response of rectangular plates under hydrodynamic loads. *Journal of Modares Mechanical Engineering* 15(4): 361-368. (In Persian)

- [10] M. Choubini, Gh. H. Liaghat, M. Hossein Pol, 2015, "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, (In Persian).
- [11] Hedayatian, M. Liaghat, GH. Rahimi, G. Pol, MH. Hadavinia, H and Zamani, R., "Investigation of the high velocity impact behavior of grid cylindrical composite structures," *Polymer Composites*, Vol. 38, No. 11, pp. 2603 -8, 2017.
- [12] A.Bidi, A. Liaghat, Gh. and Rahimi, Gh., 2016, "Experimental and numerical analysis of impact on curved steel-polyurea bi-layer panels", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 3, pp. 207-214 (In Persian).
- [13] Olsson, R. 1996. Improved Theory for Contact Indentation of Sandwich Panels. *Journal of AIAA* Vol.34n6:1238-1244.
- [14] Choi, I.H., and C.S. Hong. 1994. New Approach for Simple Prediction of Impact Force History on Composite laminates. *Journal of AIAA* Vol.132n10:2072-272
- [15] Mittal, R., " A simplified analysis of the effect of transverse shear on the response of elastic plates to impact loading", 1987, *International Journal of Solids Structures*, Vol. 23, No. 8, pp. 1191-1203.
- [16] Segletes, B., "The erosion transition of tungsten-alloy long rods into aluminum targets", 2006, *International Journal of Solids Structures*, Vol. 44, pp. 2168-2191.
- [17] H. J. Xue, Preliminary assessment of sandwich plates subject to blast loads, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 45, No. 1, pp. 687-705., 2003.
- [18] Smetankina, N., Shupikov, A., Sotrikhin, S., Yareschenko, V., "Dynamic response of an elliptic plate to impact loading Theory and experiment", 2007, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 34, pp. 264-276.
- [19] Gupta, N., Iqbal, M., Sekhon, G., " Effect of projectile nose shape, impact velocity and target thickness on deformation behavior of aluminum plates", 2007, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 44, pp. 3411-3439.
- [20] Katnam, K. B., et al.: The Static Failure of Adhesively Bonded Metal Laminate Structures: A Cohesive Zone Approach. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2011, 25(10), p. 1131-1157.
- [21] Miranda V, Teixeira-Dias F, Pinho-da-Cruz J, Novo F (2010) The role of plastic deformation on the impact behaviour of high aspect ratio aluminium foam-filled sections. *Int J Nonlinear Mech* 45(5): 550-561
- [22] Rajendran R, Moorthi A, Basu S (2009) Numerical simulation of drop weight impact behaviour of closed cell aluminium foam. *Mater Design* 30(8): 2823-2830.
- [23] D. V. Fleck, The resistance of clamped sandwich beams to shock loading, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 71, No. 1, pp. 386-401, 2004.
- [24] Sinke, J. and Johansson, S.A.H.: Fatigue and Damage Tolerance Aspects of Metal Laminates. in ICAF 2009, Bridging the Gap between Theory and Operational Practice, Bos, M.J. Editor, 2009 Springer Netherlands, p. 585-599
- [25] Crouch, I.: Adhesively-bonded Aluminium Laminates - Their Future as Energy-absorbing, Structural Materials. in Conference on New Materials and Processes for Mechanical Design (1988 : Brisbane, Qld.), Barton, ACT, 1988, pp. 21-26. English.
- [26] Hazizan, M. A. C., W.J., "The Low Velocity Impact Response of Foam-Based Sandwich Structures" *Composites: Part B* Vol. 33, No. 1, pp. 193-204, 2002.
- [27] Pacchione, M. and Hombergsmeier, E.: Hybrid Metal Laminates for Low Weight Fuselage Structures. in: S. Pantelakis, C. Rodopoulos, Engineering Against Fracture, Eds., pp. 41-57: Springer Netherlands, 2009
- [28] Apalak, M. K. and Yildirim, M.: Effect of Adhesive Thickness on Transverse Low-Speed Impact Behavior of Adhesively Bonded Similar and Dissimilar Clamped Plates. *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 25, No. 19, pp. 2587-2613, 2011/01/01, 201
- [29] Lanciotti, A. and Polese, C.: Fatigue Properties of Monolithic and Metal-laminated Aluminium Open-hole Specimens. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2008, 31(10), p. 911-917.
- [30] Chengjun Liu a, Y. X. Z., L. YebHigh, "Velocity Impact Responses of Sandwich Panels with Metal fibre Laminate Skins and Aluminum Foam Core" *International Journal of Impact Engineering* Vol. 100, No. 1, pp. 139-153, 2017.
- [31] Cao, J. and Grenestedt, J.L., "Design and Testing of Joints for Composite Sandwich/Steel Hybrid Ship Hulls" *Composites: Part A*, Vol. 35, Issue 9, pp. 1091-1105, 2004
- [32] Tekyeh-Marouf, B. Bagheri, R. and Mahmudi, R.: Effects of number of layers and adhesive ductility on impact behavior of laminates. *Materials Letters*, Vol. 58, No. 22-23, pp. 2721-2724, 2004.
- [33] Impact Mechanics, Shakeri M., Darvizeh A., ISBN:978-600-153-000-5, 2th, 1390