



## تحلیل تجربی و عددی ضربه بر روی ورق خمیده دولایه فولاد- پلی اوریا

احمد بیدی<sup>۱</sup>، غلامحسین لیاقت<sup>۲\*</sup>، غلامحسین رحیمی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران  
۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران  
تهران، صندوق پستی ۱۴۱-۱۴۱۱۵، [ghlia530@modares.ac.ir](mailto:ghlia530@modares.ac.ir)

### چکیده

### اطلاعات مقاله

دریافت: ۹۴/۱۰/۱۳  
پذیرش: ۹۴/۱۲/۶

### کلیدواژگان:

کامپوزیت  
پلی اوریا  
آزمایش سقوط آزاد  
تغییر شکل ماندگار  
شتاب ضربه

در این تحقیق اثر انحنای دولایه فولاد- پلی اوریا در مقابل بار ضربه‌ای به صورت عددی و تجربی بررسی شده است. در مدل عددی، ورق تک لایه فولادی و دولایه فولاد- پلی اوریا در ۱۲ شعاع انحنای مختلف تحت اثر بار ضربه‌ای قرار گرفته و تحلیل شده است. برای صحنه‌گذاری روش عددی، از مدل تجربی برای سه انحنا از ۱۲ انحنای مورد نظر استفاده شده است. برخورد به صورت سقوط آزاد وزنه بوده و ارتفاع پرتاب وزنه ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد. نمونه دو لایه از ورق فولادی اس تی ۱۴ و لایه پلیمری از جنس پلی اوریا تشکیل و مورد آزمایش قرار گرفته است. پارامترهای مهمی مانند تغییر شکل ماندگار دولایه و همچنین تغییرات شتاب ضربه زنده در لحظه شروع برخورد تا زمان توقف کامل قطعه اندازه‌گیری شده‌اند. در روش تجربی شتاب ضربه زنده، توسط سنسور شتاب‌سنج اندازه‌گیری شده و تغییر شکل ماندگار ورق دولایه نیز اندازه‌گیری شده است. در مدل عددی، تحلیل با استفاده از نرم افزار ال-اس- داین انجام شده است. نتایج روش تجربی و مدل عددی سازگاری خوبی با یکدیگر داشته‌اند لذا نتایج هر دو روش تجربی و عددی تحقیق نشان می‌دهد با افزایش شعاع انحنای ورق، مقدار حداکثر تغییر شکل ماندگار کاهش یافته ولی شتاب برخورد افزایش می‌یابد. البته با افزایش بیشتر شعاع ورق (نزدیک شدن رفتار قطعه به ورق مسطح) حداکثر شتاب ضربه زنده و همچنین حداکثر تغییر شکل ماندگار، ثابت می‌مانند.

## Experimental and numerical analysis of impact on curved steel- polyurea bi-layer panels

Ahmad Bidi\*, Gholamhossein Liaghat, Gholamhossein Rahimi

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran  
\*P.O.B. 14115-141, Tehran, Iran, [ghlia530@modares.ac.ir](mailto:ghlia530@modares.ac.ir)

### Keywords

Composite  
Polyurea  
Drop impact test  
Plastic deformation  
Impact acceleration

### Abstract

The impact behavior of steel - polyurea bi-layer panel and the effect of curvature is studied numerically and experimental analysis is used for numerical result verification. Numerical analysis for 12 different radius of curvature is performed. On the other hand three radius of curvature is used in experimental analysis. Simple drop weight impact test apparatus is used and the falling weight height is 30 cm. The bi-layer samples in three radius of curvature are fabricated and each sample consisted of steel layer and polyurea coating. Two important parameters measured are the maximum plastic deformation of panel and impactor acceleration history. A high speed accelerometer is used for measuring the impactor acceleration in experimental method. Also the permanent plastic deformation is measured with numerical measurement system attached to the drop test apparatus. LS-DYNA software is used in numerical analysis and explicit solution is done. The results in numerical method and test (if available) are compared together and show good agreement. The results for all cases show that, increasing the panel radius of curvature will increase impactor acceleration and will decrease plastic deformation of bi-layer panel, but if the radius of curvature is increased more and more, then the impactor acceleration will not be increased further and will be nearly constant. On the other hand plastic deformation of the panel will be constant when the panel radius of curvature is increased more.

### ۱- مقدمه

مختلف، محور اصلی پژوهش‌های زیادی در بحث مکانیک ضربه می‌باشد. در بسیاری موارد جسم ضربه زنده و قطعه در سرعت‌های کم، ولی شتاب

مسئله ضربه و نفوذ در مواد مرکب و نانو مرکب دو یا چند لایه با انحنای‌های

### Please cite this article using:

Bidi, A. Liaghat, Gh. and Rahimi, Gh., "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, 2016.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

قرار گرفته است و لذا می‌توان از نتایج این بحث در مسائل طراحی صنعت هوایی و خودرو استفاده نمود.

## ۲- آزمایش

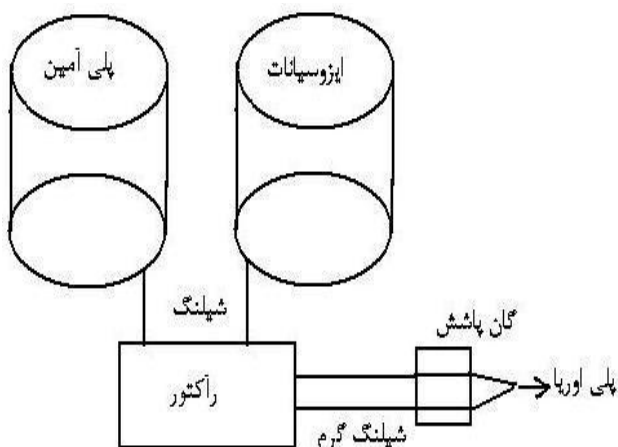
نمونه‌های فولادی از جنس آر- آر- اس- تی- ۱۴ و با ابعاد  $220 \times 210$  با ضخامت ۰.۷ میلی‌متر و با سه انحنای ۱۱۲ و ۳۰۵ و بینهایت (ورق مسطح) تهیه شده است. نمونه‌های پلیمری از جنس پلی اوریا می‌باشند که از واکنش دو جزئی ایزوسیانات و آمین در یک واکنش شیمیایی تولید می‌شوند.

ماده پلی اوریا از پاشش همزمان دو ماده تشکیل دهنده توسط دستگاه دو جزئی شکل ۱ تولید و در مدت زمان ۵ ثانیه شکل گرفته و لایه صلب را تشکیل می‌دهد. برای تهیه نمونه ورق‌ها با توجه به انعطاف مناسب ورق فولادی؛ ابتدا این ورق‌ها تا حدی به انحنای مورد نظر نزدیک شده و شکل نهایی و دقیقتر دولایه با توجه به انعطاف زیاد ورق در این ابعاد؛ داخل فیکسچر ایجاد شده است.

شکل شماره ۲ ابعاد هندسی و جزئیات سه ورق مورد آزمایش را نشان می‌دهد. برای نگهداری ورق‌ها در شرایط با ثبات و مقید نمودن آنها از فیکسچرهای مناسب استفاده شده است. قطعه ۴۶ کیلوگرمی بر اساس آزمایش سقوط آزاد وزنه<sup>۳</sup> از ارتفاع ۳۰ سانتیمتری به روی دولایه رها شده است.

داده‌های مورد نیاز مانند نمودار شتاب زمان از لحظه شروع تماس و ضربه تا مدت حدود ۰/۳ ثانیه بعد از ضربه توسط شتاب سنج متصل شده به ضربه زننده ضبط می‌گردد. شتاب سنج برای اندازه گیری شتاب بر روی وزنه تنظیم و محکم شده است که با سیم به دستگاه ثبت کننده اطلاعات متصل شده است.

کلیات دستگاه سقوط آزاد در شکل شماره ۳ نشان داده شده است که از سه قسمت اصلی گایدها؛ بدنه ظاهری، سیستم اندازه گیری و ضبط اطلاعات، پایه برای نگهداری قطعه تحت آزمایش تشکیل شده است. وضعیت ضربه زننده و نحوه اتصال به دستگاه آزمایش ضربه نیز در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۱ اجزای دستگاه پاشش و فرآیند تولید پلی اوریا

برخورد بالا، با یکدیگر برخورد دارند. در مواردی اثرات شکل دهی ورق‌ها در تغییر شکل بعد از ضربه مانند تصادف خودروها بررسی شده است [۱]. دامنه وسیع برخورد و سرعت پایین سقوط آزاد ابزار بر روی قطعات حساس و مهم در صنایع نظامی و هوافضا لزوم آزمایش و تحلیل انواع ورق‌های فولادی و کامپوزیتی در ساعت‌های پایین را نشان می‌دهد [۲، ۳]. مسئله برخورد و ضربه بر روی قطعات فلزی و مواد مرکب [۴] و اثرات تغییر شکل ماندگار ورق در استحکام مکانیکی آن و همچنین اثر انحنای ورق فلزی و ورق چند لایه مورد توجه بسیاری محققان بوده است [۵].

در این پژوهش اثر ضربه بر روی ورق‌های دولایه فولاد- پلیمر مورد بررسی قرار گرفته است. این ورق‌ها می‌توانند در درب‌های جانبی خودرو جهت بهبود استحکام مورد استفاده قرار گیرند همچنین با تغییر جنس لایه فولادی به آلومینیوم و تغییر ضخامت روکش نانوپلی اوریا در صنایع هوافضا قابل استفاده می‌باشد. در مدل ۳۳ تجربی با استفاده از فیکسچر مناسب آزمایش‌های ضربه (سقوط آزاد) در سه ارتفاع مختلف انجام و نتایج آزمایشات با مدل سازی عددی که در ۱۲ انحنای مختلف انجام شده است صحنه گذاری شده است. برای محاسبه پاسخ سیستم به ضربه؛ خواص قطعات از آزمایش کشش ساده محاسبه شده است. البته استفاده از خواص در آزمایش کشش ساده برای تحلیل ضربه دارای مقداری خطا می‌باشد [۶] که بایستی توجه داشت. مطالعات دیگر در مورد استحکام درب‌های خودرو توسط یوشیدا به روی جنس فولاد درب و ایجاد تنش پس ماند اولیه برای بهبود استحکام درب‌های جانبی گزارش شده است [۷] نکته مهم اینکه بررسی اثر انحنای ورق با این شرایط کاری و جنس بکار رفته؛ در این مقاله جدید می‌باشد.

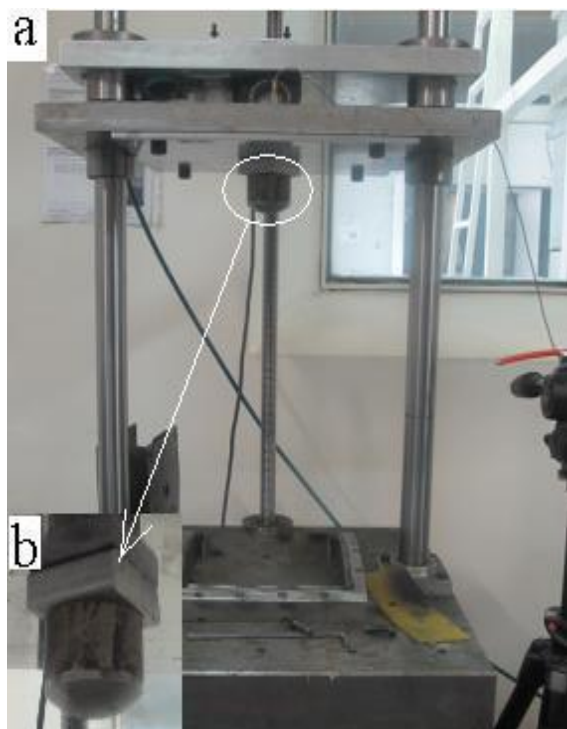
## ۱-۱- تاریخچه بررسی رفتار ورق‌های انحنادار در مقابل بار ضربه ای

اثر انحنای ورق فلزی بر روی مقاومت ضربه توسط کومار برای ورق آلومینیومی بررسی شد [۸] ورق مورد بررسی به ضخامت ۲ میلی‌متر بوده و ضربه با سرعت بالا (در حد بالستیک) انجام شده است. برای ورق‌های کامپوزیتی این کار توسط دومار انجام پذیرفت [۹] که در این حالت هم ضربه بالستیک بوده است. البته تحلیل پلاستیک ضربه مشکلات و دقت‌هایی لازم دارد که بررسی ضربه را دچار چالش‌هایی نموده است [۱۰] مک شان و همکاران [۱۱] گسیختگی دینامیک صفحات دولایه فلز- پلیمر را بررسی نموده و نتیجه گرفتند افزایش جرم صفحه در اثر لایه پلیمری اثر خوبی در مقاومت ضربه ای دارد. ایرشیدات و همکاران [۱۲] خواص ورق فولادی سخت با روکش پلی اوریا را در مقابل ضربه بررسی نموده و نتیجه گرفتند حد بالستیک با استفاده از روکش پلی اوریا بالا می‌رود. امینی و همکاران [۱۳] اثر لایه پلی اوریا بر روی استحکام در مقابل بار ضربه ای صفحات فولادی از جنس دی - اچ ۳۶<sup>۱</sup> با ضخامت‌های مختلف را بررسی نموده و نتیجه گرفتند روکش مذکور در پشت قسمتی که ضربه وارد می‌شود استحکام ضربه ای را بالا می‌برد.

در این پژوهش اثر انحنای ورق به روی مقاومت ضربه ای دو لایه فولاد- پلی اوریا بررسی شده است و لذا از دو دیدگاه کاری جدید به حساب می‌آید؛ یکی جنس هدف و دوم سرعت برخورد که تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. مسئله برخورد سرعت پایین در مسائلی مانند برخورد اجسام به تجهیزات هوافضا و تصادف وسایل نقلیه کاربرد دارد که در این مقاله اثر برخورد با سرعت پایین در تغییر شکل ورق و شتاب حاصل از این برخورد؛ مورد بررسی

2. RR ST 14  
3. Drop Weight Impact Testing  
4. Impactor head

1. DH-36



شکل ۳ دستگاه آزمایش ضربه سقوط آزاد (a) کل دستگاه، (b) ضربه زننده

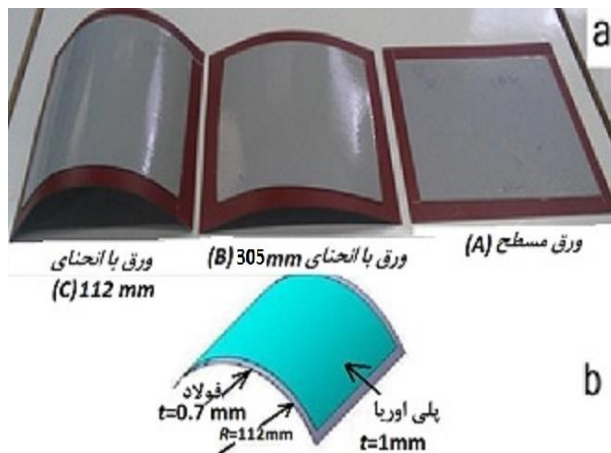
#### ۲-۲- اندازه گیری تغییر شکل پلاستیک

با توجه به ابعاد جرم ضربه زننده و ارتفاع برخورد، تغییر شکل ایجاد شده از حد الاستیک خارج شده و لذا تغییر شکل ورق وارد محدوده پلاستیک شده است. این تغییر شکل توسط سیستم اندازه گیری متصل به دستگاه مشخص شده و ثبت می‌گردد. لازم به ذکر است در اندازه گیریه‌ها حداکثر تغییر شکل پلاستیک مورد توجه می‌باشد. همچنین با توجه به محدودیت‌های دستگاه برای استفاده در اندازه گیری تغییر شکل پلاستیک لازم است دقت کافی در اندازه گیری این پارامتر لحاظ گردد چرا که این دستگاه برای اندازه گیری تغییر شکل قطعه با دقت بالا ساخته نشده است ولی مقدار ارتفاع را با دقت بالایی نشان می‌دهد.

#### ۲-۳- تنظیمات دستگاه و فیکسچرهای نگهدارنده

برای محکم نمودن موقعیت قطعات مورد آزمایش از فیکسچرهای نگهدارنده مناسب استفاده شده است. این فیکسچرها با توجه به شکل هندسی و انحنای قطعات مورد آزمایش؛ طراحی شده اند که پس از طراحی و تهیه نقشه‌های اجرایی در نرم افزار اتوکد؛ ساخته شده اند. لازم به ذکر است برای فیکسچر b و c که لبه‌ها انحنا دار است؛ از روش ماشینکاری عددی استفاده شده است. تصویر کلی فیکسچرها در شکل ۴ نشان داده شده است.

پس از ساخت و آب بندی مجموعه، قطعات با توجه به انحنای داده شده در فیکسچر قرار داده شده و پس از محکم نمودن پیچ‌های نگهدارنده تست ضربه انجام شده است. این فیکسچرها می‌توانند به صورت یک جسم صلب همراه با پایه ثابت دستگاه، ورق را در بر گرفته و ضربه مستقیماً به ورق منتقل می‌گردد. همچنین برای مهار نمودن این مجموعه بر روی میز دستگاه تعداد چهار سوراخ به قطر ۱۱ میلی‌متر در چهار طرف هریک از فیکسچرها تعبیه شده که پس از عبور پیچ به قطر ۱۰ میلی‌متر، به میز دستگاه متصل و محکم می‌شود.



شکل ۲ هندسه و ابعاد ورق‌های دولایه (a) ورق‌های سه گانه شامل A (ورق مسطح)، B (ورق با شعاع انحنای ۳۰۵ mm و C (ورق با شعاع انحنای ۱۱۲ mm) جزئیات ورق دولایه با شعاع انحنای ۱۱۲ میلی متر

سره ضربه زننده به شکل کره به قطر ۸۵ mm می‌باشد (عرقچین ۶۴ درجه ای از کره) که با روش ماشینکاری کنترل عددی از یک شفت توپر فولادی به است. معمولاً سرعت برخورد را از روی ارتفاع سقوط آزاد و براساس اصل بقای انرژی محاسبه می‌کنند ولی در صورت نیاز به دقت بیشتر و برای حذف اثرات قطر اولیه ۵۵ میلی‌متر ساخته شده است. با توجه به صلبیت زیاد ضربه زننده نسبت به ورق تحت آزمایش، هیچ گونه عملیات حرارتی روی آن انجام نشده اصطکاک، بایستی با قرار دادن سنسور سرعت مناسب در نقطه قبل از برخورد ضربه زننده با قطعه مورد آزمایش؛ سرعت برخورد را اندازه گیری نمود. البته در این تحقیق سرعت از روی رابطه ساده انرژی و ارتفاع سقوط آزاد محاسبه شده است.

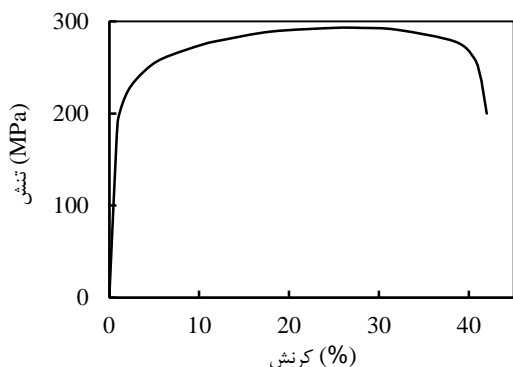
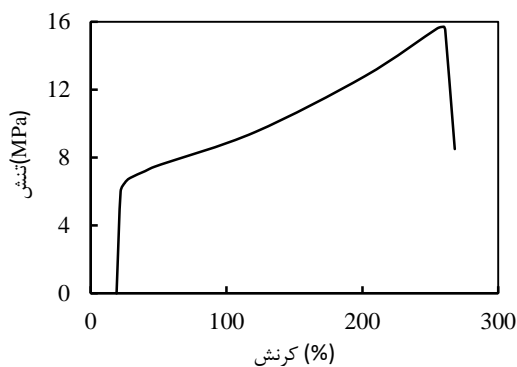
روش تنظیم دستگاه و مونتاژ قطعات بدین صورت است که پس از ماشینکاری سره ضربه زننده<sup>۱</sup> انتهای شفت مربوطه رزوه شده و توسط پیچ رابط به وزنه ۴۶ کیلوگرمی متصل می‌گردد. وزنه ۴۶ کیلوگرمی از ارتفاع ۳۰ سانتیمتری رها شده است. در لحظه برخورد وزنه به هدف حداکثر سرعت با فرض عدم وجود اصطکاک و با استفاده از اصل بقای انرژی قابل محاسبه می‌باشد لذا سرعت زیر برای لحظه برخورد محاسبه می‌شود.

$$v = \sqrt{2gh} \rightarrow h = 30 \text{ cm} \rightarrow v = 2.4 \text{ m/s} \quad (1)$$

#### ۲-۱- اندازه گیری شتاب

شتاب ضربه زننده با یک دستگاه سنسور شتاب سنج مدل 353b02 ساخت شرکت pcb امریکا اندازه گیری می‌شود. دامنه عملکرد این نوع سنسور از ۱ تا ۷۰۰۰ هرتز می‌باشد. همچنین قابلیت اندازه گیری شتاب تا ۲۴۵۳ متر بر مجذور ثانیه با دقت اندازه گیری ۰/۰۳ متر بر مجذور ثانیه دارد. مبنای محاسبات برای اندازه گیری شتاب، حرکت ضربه زننده و وزنه متصل به آن می‌باشد که توسط شتاب سنج متصل به مجموعه وزنه و میز متحرک دستگاه، اندازه گیری شده است. شتاب سنج توسط پیچ یا چسب به میز متحرک دستگاه متصل می‌شود که در این مدل شتاب سنج توسط پیچ به دستگاه متصل شده است.

1. Impactor Head

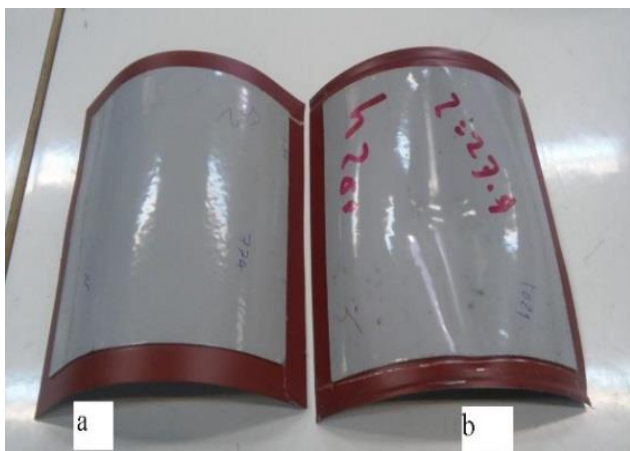


شکل ۵ نمودار تنش کرنش (a) پلی اوریا (b) فولاد اس تی ۱۴

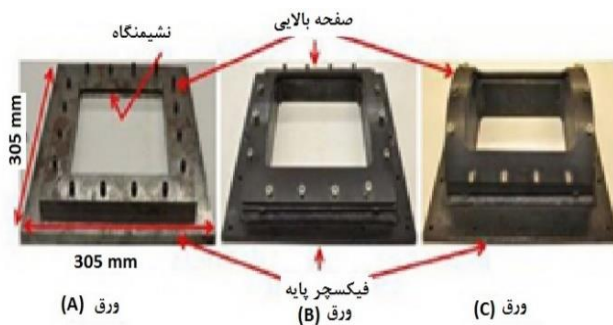
طبق نمودار به دست آمده شکل ۷ کل برخورد از زمان شروع تماس تا لحظه برگشت ضربه زننده به سمت بالا در زمان کمتر از ۰/۰۱ ثانیه انجام می‌شود و ضربات بعدی بخاطر اثرات الاستیک می‌باشد که شتاب سنج پس از هر بار برخورد، شتاب کمتری ثبت می‌نماید تا قطعه به سکون برسد.

#### ۲-۵-۲- حداکثر تغییر شکل ماندگار

با توجه به اهمیت تغییر شکل نهایی و ماندگار در قطعه، این پارامتر برای حالات‌های مختلف آزمایش اندازه گیری شده است. نتیجه تغییرات حداکثر تغییر شکل در آزمایش، با توجه به ارتفاع سقوط آزاد و شعاع انحنای ورق در شکل ۸ نشان داده شده است. طبق نمودار، با افزایش شعاع ورق، مقدار حداکثر تغییر شکل ماندگار (محور عمودی) کم می‌شود.



شکل ۶ نمونه دولایه با شعاع انحنای ۱۱۲ میلی متر (a) قبل از ضربه (b) بعد از ضربه



شکل ۴ فیکسچرهای نگهدارنده (بدون ورق آزمایشی)

برای ایجاد شرایط مرزی دلخواه در لبه‌های ورق علاوه بر انتخاب طول و عرض مناسب برای ورق، مقدار گشتاور پیچ‌ها نیز مورد توجه بوده است تا شرایط مرزی گیردار یا آزاد را تا حد امکان ایجاد نمایند. زمان ثبت شتاب از لحظه عبور وزنه در ارتفاع حدود ۱۵ سانتیمتری میز دستگاه آغاز می‌شود. با توجه به تنظیم دستگاه در بازه زمانی دلخواه، نمودار شتاب زمان که در این آزمایش بمدت ۰/۸ ثانیه مد نظر بوده، ثبت شده است.

#### ۲-۴- مشخصات ورق دولایه مورد استفاده

برای انجام آزمایش ضربه از دولایه فولاد- پلی اوریا استفاده شده است که ورق فولادی با استاندارد آر- آر - اس- تی ۱۴ به ضخامت ۰/۷ میلی‌متر و با نام تجاری دی- سی ۰۴ تولیدی شرکت فولاد مبارکه می‌باشد. این ورق قابلیت شکل پذیری بسیار خوبی دارد. نمونه‌ها به ابعاد ۲۱۰×۲۲۰ میلی‌متر تهیه شده است که با توجه به قیدهای ایجاد شده روی فیکسچرها طول مفید حدود ۲۰۰×۲۰۰ میلی‌متر خواهند داشت (طبق شکل ۲) تعداد حدود ۱۰۰ ورق به ابعاد ۲۱۰×۲۲۰ بریده شده که از میان آنها نیاز به ۱۸ سری داده آزمایشگاهی می‌باشد. برای اطمینان از خواص ورق فولادی مورد آزمایش، سه نمونه طبق استاندارد بی- اس ۱۰۰۰۲-۱:۲۰۰۱ بریده شده و مورد آزمایش کشش ساده قرار گرفته که پس از انجام آزمایش کشش، خواص زیر را از خود نشان داده اند.

$$E = 180 \text{GPa}, E_f = 1100 \text{MPa}, \sigma_y = 170 \text{MPa}$$

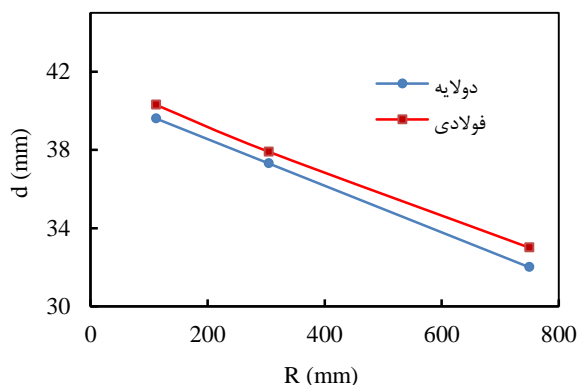
که  $E$  مدول الاستیک،  $E_f$  مدول مماسی و  $\sigma_y$  تنش تسلیم ورق فولادی می‌باشد. همچنین نمودار تنش کرنش نشان دهنده رفتار ورق فولادی و لایه پلی اوریا به صورت جداگانه در شکل ۵ نشان داده شده است. برای اطمینان از تکرار پذیری آزمایشات و خروجهای مسئله هر حالت آزمایش دو مرتبه تکرار شده و نتایج حاصله معدل گیری شده است. وضعیت ورق با شعاع انحنای ۱۱۰ میلی‌متر و ارتفاع سقوط آزاد ۲۰ سانتی متر قبل و بعد از ضربه در شکل ۶ نشان داده شده است.

#### ۲-۵-۲- نتایج آزمایش سقوط آزاد

##### ۲-۵-۱- نمودار شتاب - زمان

برای هر آزمایش، نمودار شتاب - زمان توسط دستگاه ضبط و ترسیم شده است. در شکل ۷ نمودار مذکور برای ارتفاع سقوط آزاد برابر با ۳۰ سانتی متر و ورق دولایه تخت نشان داده شده است. بخاطر اثرات میرایی، ضربه زننده پس از چندین برخورد به حالت سکون رسیده است.

پارامتر مهم این آزمایش، حداکثر شتاب ثبت شده در اولین برخورد بین ضربه زننده و دو لایه می‌باشد.



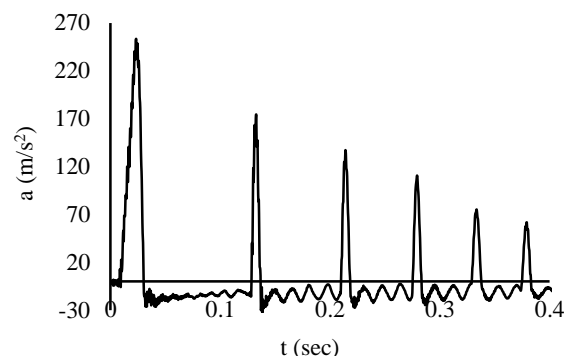
شکل ۸ نمودار تغییر شکل ماندگار و مقایسه اثر لایه پلیمری (تجربی)

مدل سازی در ۱۲ شعاع انحنای مختلف برای ورق دولایه انجام شده است. شعاع انحنا از ۶۵ میلی متر شروع و تا ۲۰۰۰ میلی متر انتخاب شده اند. لازم به ذکر است با توجه به تغییرات ناچیز نتایج شتاب و تغییر شکل در شعاع انحنای بالا، فواصل انتخابی با افزایش شعاع انحنا زیاد شده اند که در نمودارها نشان داده شده است. به عبارت دیگر شعاع انحنای انتخابی عبارتند از ۶۵-۸۵-۱۰۰-۱۱۲-۱۴۰-۱۶۰-۲۳۰-۳۰۵-۴۵۰-۷۰۰-۱۲۰۰-۲۰۰۰ و شعاع بینهایت (ورق صاف). در همه حالتها بدون توجه به انحنای ورق، المان بندی به صورت ۴۰×۴۰ یعنی تعداد ۱۶۰۰ المان پوسته ای در نظر گرفته شده است. کلیه ابعاد ورودی بر حسب میلی متر و واحدهای جرم، نیرو و زمان به ترتیب تن، نیوتن و ثانیه می باشند [۱۴] در نهایت خروجی تحلیل شامل تغییر شکلها بر حسب میلی متر بوده و لذا، تنشها بر حسب نیوتن بر میلی متر مربع یا مگا پاسکال به دست آورده شده است.

#### ۲-۲- داده های ورودی تحلیل عددی

ورق دولایه فولاد- پلی اوریا به صورت دو تک لایه فولادی و پلیمری تعریف شده است. هر یک از تک لایهها جداگانه المان بندی شده و خواص ماده برای هر یک تعریف شده است. مهمترین پارامتر آنها ضخامت المان می باشد که بایستی برای هر گره به صورت جداگانه وارد شود. با توجه به ثابت بودن ضخامت ورق، این پارامتر مشخص بوده و برای هر گره در لایه فولادی برابر ۰/۷ میلی متر و برای لایه پلیمری برابر با ۱ میلی متر وارد شده است. در حالت کلی، ضخامت از هر گره تا گره مجاور المان به صورت خطی تغییر می کند. خواص مکانیکی ماده ورق طبق آزمایش، تطابق خوبی با مدل پلاستیک سینماتیک داشته و پارامترها طبق جدول ۱ وارد شده اند. خواص مکانیکی لایه پلیمری طبق استاندارد بی-اس ۹۰۳ و با توجه به نمودار شکل ۵ طبق جدول شماره ۲ می باشد.

برای مدل سازی ضربه زننده از المانهای سه بعدی توپر مناسب<sup>۴</sup> استفاده شده است این نوع المان در حالت عمومی مکعبی بوده و هر گره از آن دارای ۹ درجه آزادی شامل جابجایی، سرعت و شتاب می باشد که شتاب هر گره، جزو خروجیهای تحلیل می باشد [۱۵]. برای مدل سازی ضربه زننده از تعداد ۳۴۰۱ المان استفاده شده است با توجه به عدم حساسیت این ناحیه و برای کاهش زمان تحلیل از مدل صلب [۱۶] در این ناحیه استفاده شده و مشخصات ماده در جدول ۳ اشاره شده است.



شکل ۷ نمودار شتاب زمان برای ورق دو لایه مسطح (فولاد- پلی اوریا)

#### ۳- روش عددی

مدل سازی عددی برای ۱۲ حالت انحنای ورق و ارتفاع سقوط آزاد برابر ۳۰ سانتی متر انجام شده است. برای شبیه سازی و تحلیل این مسئله از نرم افزار ال-اس-داینا استفاده شده است. مدل هندسی برای ضربه زننده با توجه به پیچیدگی ناحیه ضربه زننده که قسمتی از کره به قطر ۸۵ میلی متر است توسط نرم افزار کتیا ساخته شده است. همچنین المان بندی ضربه زننده نیز توسط نرم افزار ال-اس-داینا<sup>۱</sup> انجام شده است. در نهایت المان بندی ورق دولایه، شرایط مرزی، تعریف جنس مواد، جزئیات تماس، خواص مواد، بازه زمانی تحلیل و شرایط اولیه در نرم افزار ال-اس-داینا تعریف شده اند. موارد مهم در این نرم افزار که بایستی با دقت تعریف شوند عبارتند از:

- ۱- مرحله زمانی<sup>۲</sup> که عموماً عددی کوچکتر از ۱ انتخاب می گردد که با توجه به مدل همگرایی مسئله و با سعی و خطا تعیین شده است.
- ۲- تعریف نوع تماس بین ضربه زننده و هدف که در این حالت تماس گره به سطح سه بعدی تعریف شده است. گرهها بر روی هدف و سطح بر روی ضربه زننده انتخاب شده اند.
- ۳- خواص مواد که شامل رفتار المان (فرض تنش ثابت یا تنش صفحه ای و ...) و ضخامت المانهای پوسته ای و ضرایب الاستیک و پواسون و تنش تسلیم می باشند.
- ۴- زمان تحلیل که با توجه به خواسته های مسئله بایستی بازه زمانی مناسب باشد که در برگزیده شروع تماس تا پایان تماس باشد.
- ۵- عمده پیچیدگی مسائل عددی ضربه در تحلیل با نرم افزار ال-اس-داینا تعریف الگوی مناسب برای تماس می باشد که معمولاً دقت و تجربه زیادی نیاز دارد. شکل ۹ نشان دهنده هندسه مسئله و نحوه انتخاب اجزای تماس می باشد.

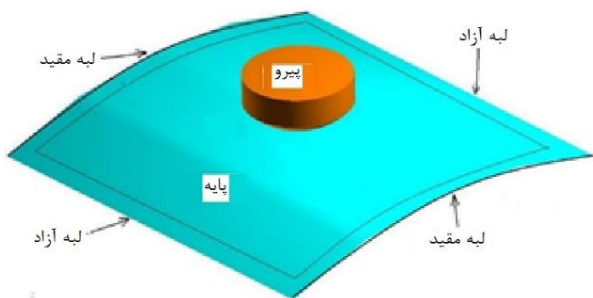
#### ۳-۱- مدل هندسی و المان بندی

ابتدا مدل سه بعدی ضربه زننده و ورق در نرم افزار کتیا ساخته شده و با انتقال به نرم افزار ال-اس-داینا، المان بندی انجام شده است برای مدل سازی ورق با توجه به شرایط همگرایی از تعداد ۳۲۰۰ المان صفحه ای چهار گرهی با مشخصه معین<sup>۳</sup> که قابلیت های غشایی و خمشی را دارا بوده و بارهای داخل صفحه و خارج از صفحه را تحمل می کنند، استفاده شده است. حالت های بهینه تعداد المان برای همگرایی ۱۸۰۰ و ۲۵۰۰ و ۳۲۰۰ می باشد که تعداد ۳۲۰۰ المان انتخاب شده است.

1. LS DYNA  
2. Time step  
3. SHELL163

1. SOLID164





شکل ۹ مدل عددی مولفه‌های تماس و شرایط مرزی

جدول ۱ خواص مکانیکی ورق فولادی از آزمایش کشش ساده

ضرب نمایی	مدول مماسی	تنش تسلیم	ضرب پوآسون	مدول یانگ	جرم حجمی (ton/mm <sup>3</sup> )
(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(ton/mm <sup>3</sup> )
۰/۲۵	۱۱۰۰	۱۷۰	۰/۳	۱۸۰۰۰۰	۷/۸۵E-۹

جدول ۲ خواص مکانیکی پلی اوریا از آزمایش کشش طبق استاندارد BS ۹۰۳

تنش تسلیم (MPa)	مدول یانگ (MPa)	جرم حجمی (tone/mm <sup>3</sup> )	material
۹/۶۵	۱۷۱/۵	۱/۱E-۹	Polyurea

جدول ۳ خواص مکانیکی ضربه زننده

جرم حجمی (tone/mm <sup>3</sup> )	مدول یانگ (MPa)	ضرب پوآسون
RO	E	PR
۹۸۹۲E-۷	۲۰۰۰۰۰	۰/۳

#### ۳-۵- نتایج تحلیل عددی

##### ۳-۵-۱- مقایسه نمودار شتاب- زمان

نمودار شتاب- زمان در شکل ۱۱ ثبت شده و نشان می‌دهد که حداکثر شتاب در اولین برخورد، ایجاد شده و با گذشت زمان برخوردهای بعدی با شتاب‌های کمتری صورت می‌گیرد. در این حالت نیز پس از گذشت زمان حدود ۰/۴ ثانیه، حداکثر شتاب ضربه زننده به حدود ۱۷۰ متر بر مجذور ثانیه می‌رسد اما توقف کامل ضربه زننده حدود ۲ ثانیه زمان نیاز دارد.

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- مقایسه نمودار شتاب- زمان در آزمایش و تحلیل عددی

نمودار شتاب زمان آزمایش در شکل ۷ نشان می‌دهد که پس از حدود ۰/۴ ثانیه بعد از برخورد؛ حداکثر شتاب ضربه زننده به حدود ۷۰ متر بر مجذور ثانیه می‌رسد در حالی که در مدل سازی عددی طبق نمودار شکل ۱۱ حداکثر شتاب در این زمان به مقدار ۱۷۰ متر بر مجذور ثانیه می‌رسد. بعلاوه در آزمایش؛ بعد از اولین ضربه که منجر به حداکثر شتاب می‌شود، در فواصل زمانی کاهشی (نمایی) حداکثر شتاب، کاهش یافته و با نرخ نسبتاً زیادی به سمت صفر میل می‌کند اما در مدل عددی کاهش شتاب به سمت صفر سریع نبوده و مدت بیشتری طول می‌کشد تا قطعه به سکون برسد. علت اختلاف،

لازم به ذکر است برای جلوگیری از پیچیدگی تحلیل و کاهش تعداد المان‌ها و همچنین زمان تحلیل، جرم ۴۶ کیلو گرمی در داخل ضربه زننده توزیع شده است لذا تغییرات لازم با توجه به ابعاد ضربه زننده و مدل ساخته شده از ضربه زننده در جرم حجمی ماده ضربه زننده لحاظ گردیده و لذا نیازی به مدل سازی وزنه‌های سقوط آزاد نمی‌باشد. تعداد کل گره‌های استفاده شده در مدل ۵۸۵۵ عدد و تعداد کل المانها ۶۶۰۱ عدد می‌باشد. مدل المان بندی شده در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

#### ۳-۳- شرایط مرزی

فرض شده است در لبه‌های انحن دار گره‌ها مقید شده اند لذا مطابق شکل ۹ مشاهده می‌شود که در لبه‌های انحن دار شرایط مرزی برای گره‌های دو لبه مقابل هم گیردار تعریف شده است و در دو لبه دیگر (لبه‌های صاف ورق) آزاد در نظر گرفته شده اند. برای اعمال این شرایط مرزی دسته گره<sup>۱</sup> تعریف شده و با انتخاب این دسته از گره‌ها، جابجایی و چرخش گره‌ها در جهت‌های سه گانه برابر صفر قرار داده شده است.

#### ۳-۴- سایر پارامترهای تحلیل

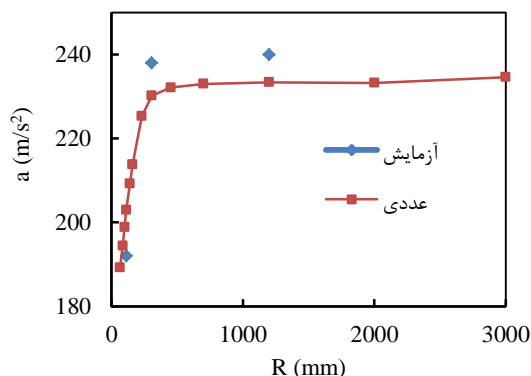
برای مشخص نمودن سرعت برخورد از اصل بقای انرژی که اشاره شد استفاده شده است. سرعت برخورد ضربه زننده به ورق با تعریف دسته گره ۲ که شامل کلیه گره‌های ضربه زننده است برای این گره‌ها تعریف شده است. سرعت برخورد در راستای سقوط آزاد جسم می‌باشد( که در اینجا جهت منفی محور Z می باشد) و با علامت منفی تعیین شده است.

با توجه به سرعت برخورد، سطح انرژی(اولین برخورد) براحتی محاسبه شده است. شرایط اولیه همان سرعت برخورد ضربه زننده می‌باشد که برای کلیه گره‌های روی ضربه زننده اعمال شده است. برای مدل سازی شرایط دو قطعه در لحظه برخورد و بعد از آن، مدل تماسی تعریف شده و برای ایجاد شرایط تماسی مناسب از مدل تماس سطح به سطح<sup>۲</sup> استفاده شده است. تعریف دو ناحیه تماس حساسیت بالایی داشته و سطح اول تماس بر روی قسمت کروی ضربه زننده و سطح دوم تماس ورق دولایه می‌باشد. باید توجه داشت که بعلاوه تقارن هندسی اولین نقطه تماس و شروع برخورد، گره وسط ورق می‌باشد و تماس به صورت متقارن ایجاد شده است. لازم است مسئله در بازه زمانی برخورد و شروع برگشت قطعه که حدود ۰/۳ ثانیه است تحلیل شود اما برای بررسی دقیقتر و مقایسه بهتر مدل عددی با آزمایش تا زمان ۰/۲۵ ثانیه و در مواردی تا زمان ۱ ثانیه تحلیل انجام شده است. برای زمان ۰/۰۳ ثانیه از شروع برخورد و با تعداد ۳۲۰۰ المان برای ورق دو لایه؛ زمان حل توسط نرم افزار حدود ۲۰۰ ثانیه می باشد. حل انجام شده به صورت صریح<sup>۳</sup> می باشد

پارامتر دیگری که در واقعی شدن تحلیل عددی مخصوصاً بعد از برخورد اول مهم می‌باشد اثر وزن و نیروی جاذبه است که بایستی بعنوان نیروی حجمی و به سمت مرکز زمین تعریف شود در این حالت شتاب جاذبه زمین برابر با ۹۸۱۰ میلی متر بر مجذور ثانیه در نظر گرفته شده است. نکته جالب اینکه در صورت عدم تعریف نیروی جاذبه، ضربه زننده بعد از اولین ضربه بخاطر اثرات الاستیک فیکسچرها در اثر ضربه، منعکس شده و از ورق فاصله می‌گیرد و لذا برخوردهای بعدی وجود ندارد.

1. Node Set  
3. Automatic surface to surface contact  
3. Explicit

تغییرات شتاب کاهش یافته و لذا رفتار ورق، به ورق مسطح بسیار نزدیک می‌شود.



شکل ۱۲ نمودار تغییرات شتاب با انحنا در ارتفاع سقوط آزاد ۳۰ cm مقایسه داده‌های عددی با نتایج آزمایش

مشاهده می‌شود که با افزایش شعاع انحنای ورق دو لایه؛ شتاب نیز زیاد شده بطوری که تا مقدار معینی افزایش یافته و پس از آن ثابت می‌ماند. بعبارت دیگر می‌توان گفت نمودار مربوطه در هر حالت دارای مجانب افقی می‌باشد. همچنین شتاب برخورد با افزایش سطح انرژی (ارتفاع سقوط آزاد) افزایش می‌یابد. البته داده‌های آزمایشی هم رفتار مشابه را نشان می‌دهند.

#### ۴-۳- مقایسه مدل عددی و آزمایش

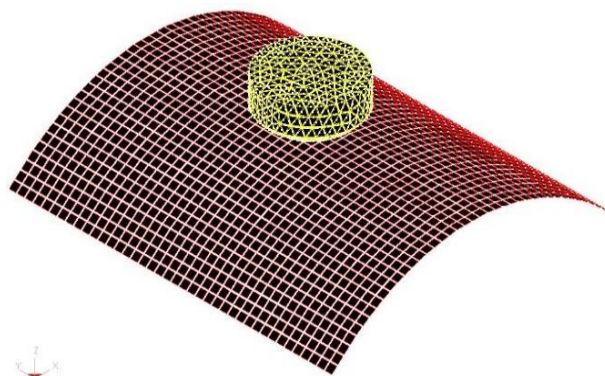
مقایسه دو مدل تجربی و عددی برای حداکثر شتاب ایجاد شده خطای حداکثر ۵ درصد را نشان می‌دهد (نمودار شکل ۱۲). از نمودار شتاب - زمان شکل‌های ۷ و ۱۱ مشاهده می‌گردد (در مواردی که داده‌های آزمایشی موجود است) نمودار مدل عددی و آزمایشی اگرچه حداکثر شتاب را یکسان نشان می‌دهند اما نوسانات شتاب تا لحظه توقف ضربه زنده تفاوت دارد که علت اختلاف عامل میرایی و اصطکاک میله‌های راهنما در مدل تجربی می‌باشد.

#### ۴-۴- محاسبه اثر انحنا در حداکثر تغییر شکل ماندگار ورق

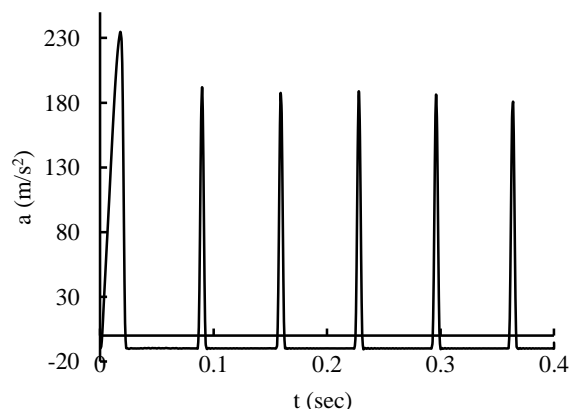
تغییرات حداکثر تغییر شکل پلاستیک بر حسب شعاع انحنای ورق برای ارتفاع سقوط آزاد ۳۰ سانتیمتر در نمودار شماره ۱۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش شعاع انحنای ورق، تغییر شکل پلاستیک کاهش می‌یابد. یعنی هر چه ورق به سمت ورق مسطح می‌رود تغییر شکل پلاستیک، کمتر می‌شود که یکی از علل آن شرایط مرزی و اثر بیشتر تکیه گاه‌های مقید در حالت ورق مسطح می‌باشد. علت اصلی اختلاف حدود ۷ درصدی بین نتایج عددی و آزمایشی بخاطر محدودیت‌های اندازه‌گیری با آزمایش می‌باشد بدین معنی که در حالت عددی اندازه‌گیری، برای نقطه دارای حداکثر تغییر مکان انجام شده و تغییر مکان این گره از مدل عددی محاسبه و گزارش شده است در حالی که در مدل تجربی اندازه‌گیری موقعیت ضربه زنده مبنای محاسبه تغییر مکان می‌باشد که این موقعیت در یک ناحیه (بجای یک نقطه) می‌باشد و لذا در هر حالت حدود ۲ میلی‌متر خطا داشته و به عبارتی کمتر از مقدار به‌دست آمده در حالت عددی است. البته حذف اثرات اصطکاک و لذا کاهش سرعت برخورد در لحظه تماس اولیه نیز در ایجاد اختلاف مدل عددی و آزمایشی اثر دارد چرا که در مدل سازی عددی اثر اصطکاک میله‌های راهنما لحاظ نشده و تماس بدون اصطکاک فرض شده است.

بخاطر اثرات میرایی می‌باشد؛ از آنجا که ثابت‌های میرایی در حالت عددی مشخص نیست لذا در مدل سازی عددی این اثر و ثابت‌های مربوطه لحاظ نشده است.

با افزایش شعاع انحنا در یک سطح انرژی معین، شتاب برخورد افزایش می‌یابد اما از نقطه‌ای به بعد ثابت می‌ماند. نمودار شکل ۱۲ نشان دهنده این مطلب می‌باشد. طبق نمودار، با افزایش شعاع انحنای ورق، شتاب ضربه زنده زیاد شده و تغییرات شتاب در شعاع‌های انحنای زیاد، بسیار ناچیز می‌باشد؛ به عبارتی رفتار ورق به ورق صاف (شعاع بینهایت) نزدیک می‌شود.



شکل ۱۰ مدل المان بندی شامل ورق و ضربه زنده



شکل ۱۱ تاریخچه شتاب برای جرم ۴۶ کیلوگرم و ارتفاع سقوط آزاد ۳۰ cm و ورق تخت (نتیجه تحلیل عددی)

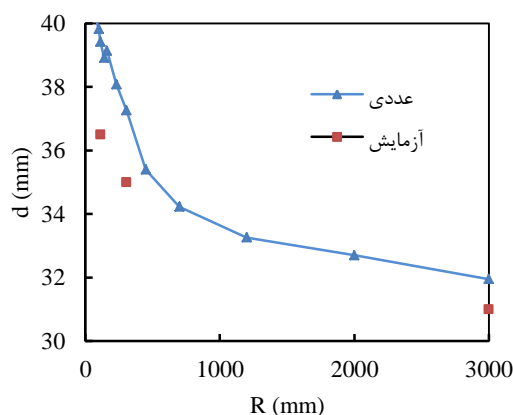
#### ۴-۲- مقایسه تغییرات شتاب در مدل عددی و تجربی

تغییرات حداکثر شتاب برای دو لایه فولاد- پلی اوریا در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به عدم وجود داده‌های آزمایشی برای تعداد زیادی از شعاع‌های انحنا از روند تغییرات مدل عددی و کمک از داده‌های آزمایشی برای شعاع انحنای ۱۰۰ و ۳۰۰ و بینهایت، استفاده شده است (به نوعی درون یابی شده است).

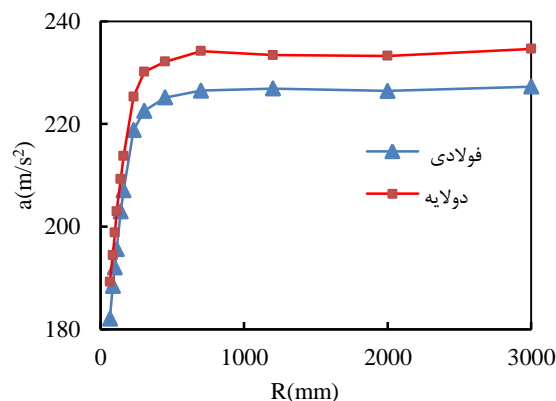
لذا به جهت مقایسه، نمودار تغییرات شتاب بر حسب شعاع انحنای ورق برای مدل تجربی نیز مانند مدل عددی به صورت منحنی پیوسته نشان داده شده است. در شکل شماره ۱۲ تغییرات شتاب ضربه زنده بر حسب شعاع ورق در دو حالت تجربی و عددی مقایسه شده است. تغییرات شتاب در شعاع انحنای کم؛ بسیار زیاد می‌باشد که بعد از شعاع حدود ۱۵۰۰ میلی متر،

## ۴-۵- محاسبه نیروی ضربه

با توجه به محاسبه شتاب ضربه زنده در هر لحظه طبق قانون دوم نیوتن نیروی حاصل از ضربه برابر است با جرم ضربه زنده در شتاب در کلیه حالت‌ها جرم ضربه زنده ثابت بوده و برابر با ۴۶ کیلوگرم می‌باشد، لذا تغییرات منحنی نیروی تماسی دقیقا مشابه منحنی ۷ در آزمایش و منحنی ۱۱ در تحلیل عددی می‌باشد با این تفاوت که دامنه منحنی‌های نیرو نسبت به منحنی شتاب (شکل ۷ و ۱۱) در جرم ضربه زنده (عدد) ۴۶ ضرب شده است. اثر لایه پلیمری روی فولاد در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۳ نمودار تغییر شکل پلاستیک بر حسب شعاع انحناى ورق برای ارتفاع ۲۰ سانتی متر (مقایسه مدل عددی و آزمایش)



شکل ۱۴ تغییرات شتاب بر حسب انحناى ورق برای دو حالت ورق فولادی و دولایه پلیمر- فولاد

## ۵- نتیجه گیری

با افزایش شعاع انحنا شتاب وارده افزایش می‌یابد که مشخص شد برای ورق صاف (شعاع بینهایت) حداکثر شتاب ایجاد می‌شود؛ لذا در طراحی محصول، برای کاهش شتاب و در نتیجه نیروی ضربه بایستی انحناى اولیه ای برای ورق در نظر گرفت که در این حالت اثر شوک و ضربه وارده در اثر برخورد کمتر خواهد شد. همچنین حداکثر تغییر شکل پلاستیک با افزایش شعاع ورق کاهش می‌یابد. در این مورد معیار طراحی، کاهش تغییر شکل پلاستیک می‌باشد که برای طراحی بهینه بایستی این مورد را مدنظر قرار داد. مشاهده می‌شود این دو پارامتر رفتار معکوس یکدیگر دارند یعنی با افزایش شعاع انحناى ورق شتاب برخورد زیاد شده و حداکثر تغییر شکل پلاستیک کم می‌شود. لذا برای ایمنی مناسب در بحث تصادف خودروها بایستی حالت

بهینه انتخاب گردد چرا که همواره محدودیت کاهش شعاع انحناى ورق به خاطر فضای موجود، مهم بوده است. بنابراین با در نظر گرفتن فضای موجود و شتاب ضربه ای مجاز بایستی حالت بهینه انتخاب گردد. نمودارهای مقایسه روش عددی و آزمایش در حالت‌هایی که داده‌های تجربی موجود است نشان می‌دهند نتایج منحنی شتاب- زمان در بدترین حالت کمتر از ۵ درصد خطا داشته‌اند. همچنین خطای نتایج تغییر شکل پلاستیک حداکثر ۸ درصد است که با توجه به اختلاف منظم و ثابت داده‌ها در این حالت می‌توان آنرا به علت خطای اندازه گیری دستگاه سقوط آزاد دانست. استفاده از روکش پلیمری پلی اوریا اثر خوبی بر روی استحکام ضربه‌ای و جذب انرژی دارد اگرچه باعث افزایش شتاب برخورد می‌شود ولی مقدار تغییر فرم پلاستیک را کاهش می‌دهد و لذا یکی از پارامترهای مهم طراحی را بهبود می‌دهد. پلی اوریا علاوه بر خواص جذب انرژی در صنعت در بهبود استحکام خودروهای ضد گلوله و همچنین در هوافضا قابل استفاده است که در این موارد، لازم است نوع ماده مورد تحلیل؛ ضخامت لایه پلیمری و احتمالا سرعت برخورد بازبینی شود اما روش تحلیل و آزمایش دقیقا مشابه می‌باشد.

## ۶- مراجع

- [1] Kim, H. Hong, S. and Huh, H., "The Evaluation of Crashworthiness of Vehicles with Forming Effect," 4th European LS-DYNA Users Conference, Crash/Automotive Application, 2006.
- [2] Mamalis, A. G. Robinson, M. and Manolakos, D.E., "Crashworthy Capability of Composite Material Structures," Department of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens, Advanced Railway Research Centre Sheffield, UK. Vol. 37, pp. 109-134, 1997.
- [3] Chongdu, C. and Guiping, Z., "Dynamic Response and Damage of Composite Shell under Impact," KSME International, Vol. 13, No. 9, pp. 956-608, 1999.
- [4] Bidi, A. Liaghat, Gh. and Rahimi, Gh., "Experimental and Numerical Analysis of Impact on Steel Curved Panels," In Persian, Journal of Modares Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, In Press.
- [5] Stargel, D.S., "Experimental and Numerical Investigation into the Effects of Panel Curvature on the High Velocity Ballistic Impact Response of Aluminum and Composite Panels," Doctor of philosophy dissertation, University of Maryland. College Park; 2005.
- [6] Norman, J., "Recent Studies in the Dynamic Plastic Behavior of Structures. Appl. Mech. Rev. Vol. 42, No. 4, pp. 95-115, 1989.
- [7] Yoshida, H. Uenishi, A. Kuriyama, Y. and Takahashi, M., "Crashworthiness Improvement of the Side Crash by the Work Hardening Effect of Pre-Strained High Strength Steel," SAE Technical Paper, 10.4271-01-3112, 2001.
- [8] Puneet, K. James L. David, S. and Arun, S., "Effect of Plate Curvature on Blast Response of Aluminum Panels," International Journal of Impact Engineering, Vol. 46, pp. 74-85, 2012.
- [9] Ambur, R.D. and Starnes, H. J., "Effect on the Impact Damage Characteristics and Residual Strength of Composite Plates," NASA Langley Research Center, AIAA Paper, No. 98, pp. 1881, 2011.
- [10] Wierzbicki, T., "Plastic Analysis of Plates and Shells," <http://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering>, available in 23, February 2015.
- [11] McShane, G.J. Stewart, C. and Aronson, M.T., Wadley, H.N.G. Fleck, B.N. and Deshpande, V.S., "Dynamic Rupture of Polymer- Metal Bilayer Plates," International Journal of Solids and Structures, Vol. 45, No. 16, pp.4407-4426, 2008.
- [12] Irshidat, M. Al-Ostaz, A. and Cheng, A.H.D., "Predicting the Response of Polyurea Coated High Hard Steel to Ballistic Impact by Fragment Simulating projectiles," Submitted to Computational Mechanics, 2008.
- [13] 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," Mechanics of Materials, Vol. 42, pp. 628-639, 2010.
- [14] LS-DYNA keyword user's manual, Vol. 1 version 960, Livermore Software Technology Corporation, Sec. 1 pp. 36, 2001.
- [15] AUTODYN, EKM, Engineering Knowledge Manager, <http://orange.engr.ucdavis.edu>, available in 24 December 2015.
- [16] Hallquist, O., Ls-Dyna Theory Manual, Sec. 18.19, 2006.