



## تحلیل تجربی و عددی ضربه روی ورق‌های فولادی انحنادار

احمد بیدی<sup>1</sup>، غلامحسین لیاقت<sup>2\*</sup>، غلامحسین رحیمی<sup>2</sup>

1- دانشجوی دکتری مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استاده، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\*تهران، صندوق پستی 14115-141 ایمیل ghlia530@modares.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 03 دی 1394

پذیرش: 01 اسفند 1394

ارائه در سایت: 01 اردیبهشت 1395

کلید واژگان:

ورق فولادی

شعاع انحنا

آزمایش سقوط آزاد

تغییر شکل ماندگار

### چکیده

در این تحقیق رفتار ورق فولادی و همچنین اثر انحنای آن در بهبود خواص ضربه ای بصورت تجربی و عددی بررسی شده است. برخورد در سه سطح انرژی مختلف صورت گرفته و در روش تجربی آزمایشات با استفاده از دستگاه سقوط آزاد وزنه انجام شده است. به منظور بررسی اثر انحنای ورق فولادی بر روی تغییر شکل ماندگار و شتاب ضربه زنده در طی فرآیند برخورد؛ نمونه های آزمایشی در سه انحنای مختلف تهیه شده و با استفاده از فیکسچرهای مناسب آزمایش ضربه در سه سطح انرژی مختلف (سه ارتفاع سقوط آزاد) انجام شده است. دو پارامتر مهم، شامل تغییر شکل ماندگار ورق و همچنین شتاب ضربه زنده در لحظه شروع برخورد تا زمان توقف کامل قطعه، با روش عددی محاسبه شده و نتایج عددی با اندازه گیری های تجربی مقایسه گردیده است. نتایج هر دو روش تجربی و عددی، نشان می دهد با افزایش شعاع انحنای ورق، مقدار حداکثر تغییر شکل ماندگار کاهش یافته ولی شتاب برخورد افزایش می یابد. البته با افزایش بیشتر شعاع ورق (نزدیک شدن رفتار قطعه به ورق مسطح) حداکثر شتاب ضربه زنده و همچنین حداکثر تغییر شکل ماندگار، ثابت می ماند.

## Experimental and numerical analysis of impact on steel curved panels

Ahmad Bidi, Gholamhossein Liaghat\*, Gholamhossein Rahimi

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 14115-141 Tehran, Iran, ghlia530@modaress.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 24 December 2015

Accepted 20 February 2016

Available Online 20 April 2016

### Keywords:

Steel panel

Radius of curvature

Drop test

Plastic deformation

### ABSTRACT

The low velocity impact behavior of steel panel with different curvature is investigated experimentally. Numerical analysis is used for test results verification. In experimental method drop impact test apparatus is used so three different heights for falling weight are considered. Also, three different panel curvatures for experiment are used. Two important parameters measured are maximum acceleration and maximum plastic deformation of panel. A high speed accelerometer is used for measuring the impactor acceleration. Also, the permanent plastic deformation is measured with numerical measurement system attached to the drop test apparatus. Experimental analysis with three different radius of curvature is modeled with numerical analysis, the numerical analysis is used for further panel curvatures so the panel behavior is estimated in a wide range of panel curvatures. The results in numerical analysis and test (if available) show good agreement when compared together. the results show that increasing the panel radius of curvature will increase impactor acceleration and will decrease the plastic deformation of panel, but if the radius of curvature is increased more and more, then the impactor acceleration will not increase further and will be nearly constant, on the other hand, plastic deformation of the panel will not be increased further when the panel radius of curvature is increased more.

### 1- مقدمه

آزمایش های ضربه (سقوط آزاد) در سه ارتفاع مختلف انجام و نتایج آزمایشات با مدل سازی عددی صحنه گذاری شده است. البته استفاده از خواص قطعه در آزمایش کشش ساده برای استفاده در تحلیل ضربه دارای مقداری خطا می باشد [1]. عمده کاربرد موضوع مورد تحقیق بهبود استحکام خودرو در تصادف جانبی<sup>1</sup> می باشد که این مهم با انتخاب انحنای بهینه برای ورق درب خودرو عملی می شود. البته مطالعات دیگر در مورد استحکام درب های خودرو توسط یوشیدا به روی جنس فولاد درب و ایجاد تنش پس ماند اولیه برای بهبود استحکام درب های جانبی گزارش شده است [2] ولی در مورد اثر انحنای درب برای بهبود استحکام در تصادف جانبی خودروها این کار جدید می باشد.

مسئله ضربه و نفوذ در ورق های فولادی و آلومینیومی با انحنای مختلف، محور اصلی پژوهش های زیادی در بحث مکانیک می باشد. در بسیاری موارد جسم ضربه زنده و قطعه در سرعت های کم، ولی شتاب برخورد بالا، با یکدیگر برخورد دارند که از جمله این نوع برخورد تصادف در خودرو را می توان نام برد. البته 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 ورق ها با انحنای مختلف در معرض این نوع بارهای وارده را با اهمیت تر می کند. در این پژوهش برای بررسی ضربه سرعت پایین ورق های فولادی استفاده شده در درب های جانبی خودرو بعنوان نمونه مورد آزمایش استفاده شده است. پس از ایجاد انحنای اولیه در ورق با استفاده از فیکسچر مناسب

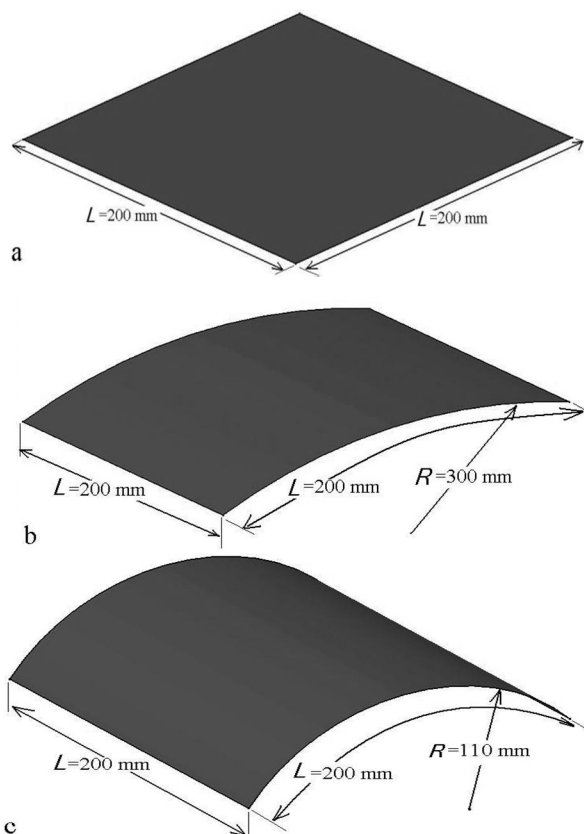
1- Side crash

Please cite this article using:

A. Bidi, Gh. Liaghat, Gh. Rahimi, Experimental and numerical analysis of impact on steel curved panels, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 281-288, 2016 (in Persian)

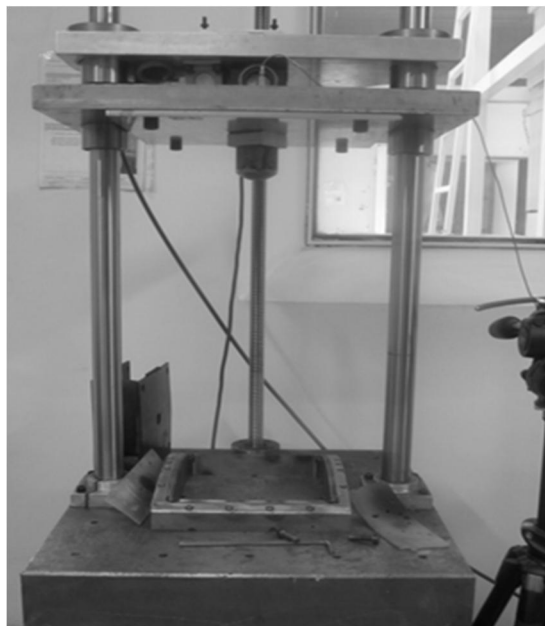
برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Bidi, Gh. Liaghat, Gh. Rahimi, Experimental and numerical analysis of impact on steel curved panels, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 281-288, 2016 (in Persian)



**Fig. 1** Geometry and dimension of ST14 panels with 0.7 mm thickness, (a) Infinite radius plate (flat plate), (b) 300 mm in radius panel and (c) 110 mm in radius panel

**شکل 1** هندسه و ابعاد ورق‌های فولادی از جنس ST14 و ضخامت 0/7 میلی‌متر (a) ورق با شعاع انحنای بینهایت (ورق مسطح)، (b) ورق با شعاع انحنای 300 mm و (c) ورق با شعاع انحنای 110 mm



**Fig. 2** Impact test apparatus

**شکل 2** دستگاه آزمایش ضربه

## 1-1- تاریخچه بررسی رفتار ورق‌های فلزی در مقابل بار ضربه ای

اثر انحنای ورق فلزی بر روی مقاومت ضربه توسط کومار برای ورق آلومینیومی بررسی گردید [3]. ورق مورد بررسی به ضخامت 2 میلی‌متر بوده و ضربه با سرعت بالا (در حد بالستیک) انجام شده است. برای ورق‌های کامپوزیتی این کار توسط دومار انجام پذیرفت [4] 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 [5]. مک‌شان و همکارانش [6] 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 همکارانش [7] خواص ورق فولادی سخت با روکش پلی‌اوریا را در مقابل ضربه بررسی نموده و نتیجه گرفتند حد بالستیک با استفاده از روکش پلی‌اوریا بالا می‌رود. امینی و همکارانش [8] اثر لایه پلی‌اوریا بر روی استحکام در مقابل بار ضربه‌ای صفحات فولادی از جنس دی-اچ 36<sup>1</sup> با ضخامت‌های مختلف را بررسی نموده و نتیجه گرفتند روکش مذکور در پشت قسمتی که ضربه وارد می‌شود استحکام ضربه‌ای را بالا می‌برد.

در این پژوهش اثر انحنا به روی مقاومت ضربه ای ورق فولادی 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 در برخورد و شتاب حاصل از این برخورد مورد بررسی قرار گرفته است و لذا می‌توان از نتایج این بحث در مسائل طراحی (مثلاً انحنای در برخورد) استفاده نمود.

## 2- آزمایش

نمونه‌های فولادی از جنس آر-آر-اس-تی-14 و با ابعاد 210 × 220 با ضخامت 0.7 میلی‌متر و با سه انحنای 110 و 300 و بینهایت (ورق مسطح) تهیه شده و قطعه 46 کیلوگرمی بر اساس آزمایش سقوط آزاد وزنه<sup>3</sup> از سه ارتفاع 20 و 30 و 40 سانتیمتری به روی ورق‌ها رها شده است. برای تهیه نمونه ورق‌ها با توجه به انعطاف مناسب؛ ابتدا ورق‌ها تا حدی به انحنای مورد نظر نزدیک شده و شکل نهایی و دقیقتر با توجه به انعطاف زیاد ورق در این ابعاد؛ داخل فیکسچر ایجاد شده است. شکل 1 ابعاد هندسی و جزئیات سه ورق مورد آزمایش را نشان می‌دهد.

برای نگهداری ورق‌ها در شرایط ثابت و مقید نمودن آن‌ها از فیکسچرهای مناسب استفاده شده است. داده‌های مورد نیاز مانند نمودار شتاب زمان از لحظه شروع تماس و ضربه تا مدت حدود یک ثانیه بعد از ضربه توسط شتاب سنج متصل شده به ضربه زننده ضبط می‌گردد. شتاب سنج برای اندازه‌گیری شتاب در هر لحظه بر روی وزنه بسته و تنظیم شده است که با سیم به دستگاه ثبت‌کننده اطلاعات متصل شده است.

دستگاه سقوط آزاد در شکل شماره 2 نشان داده شده است که از سه قسمت اصلی گایدها؛ بدنه ظاهری؛ سیستم اندازه‌گیری و ضبط اطلاعات و پایه برای نگهداری قطعه تحت آزمایش تشکیل شده است. شکل ضربه زننده و نحوه اتصال به دستگاه آزمایش ضربه در شکل 3 نشان داده شده است.

1- DH-36  
2- RR ST 14  
3- Drop Weight Impact Testing

پلاستیک مورد توجه می‌باشد. همچنین با توجه به محدودیت‌های دستگاه برای استفاده در اندازه‌گیری تغییرشکل پلاستیک لازم است دقت کافی در محاسبات تغییر فرم لحاظ گردد.

### 2-3- 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 شده‌اند که پس از تهیه نقشه‌های اجرایی در نرم افزار اتوکد ساخته شده‌اند لازم به ذکر است برای فیکسچر b و c که لبه‌ها انحنادار است از روش ماشینکاری عددی استفاده شده است. تصویر کلی فیکسچرها در شکل 4 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 بصورت 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 11 میلیمتر در چهار طرف هریک از فیکسچرها تعبیه شده که پس از عبور پیچ به قطر 10 میلیمتر؛ به میز دستگاه متصل و محکم می‌شود. برای ایجاد شرایط مرزی دلخواه در لبه‌های ورق در دو لبه گیردار (لبه‌های انحنادار ورق) لبه‌ها بصورت نری و مادگی ماشین کاری شده‌اند تا با سفت نمودن پیچ‌ها؛ جلوی حرکت ورق گرفته شود. همچنین 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 15 سانتیمتری قطعه آغاز می‌شود. با توجه به تنظیم دستگاه در بازه زمانی دلخواه، نمودار شتاب زمان که در این آزمایش بمدت 0.8 ثانیه مد نظر بوده ثبت شده است. شکل 4 نشان دهنده فیکسچرهای ساخته شده برای انجام آزمایش می‌باشد.

### 2-4- مشخصات ورق مورد استفاده

برای انجام آزمایش ضربه از ورق فولادی با استاندارد آر- آر - اس - تی 14 به ضخامت 0.7 میلیمتر و با نام تجاری دی- سی 04 تولیدی شرکت فولاد مبارکه استفاده شده است. عمده کاربرد این نوع ورق که قابلیت شکل پذیری بسیار خوبی دارد در درب‌های جانبی خودرو می‌باشد. نمونه‌ها به ابعاد 210×220 میلیمتر تهیه شده است که با توجه به قیدهای ایجاد شده روی فیکسچرها طول مفید حدود 200×200 میلیمتر خواهند داشت (طبق شکل 1 تعداد حدود 60 ورق به ابعاد 210×220 بریده شده که از میان آن‌ها نیاز به 9 سری داده آزمایشگاهی می‌باشد. برای اطمینان از خواص ورق فولادی مورد آزمایش سه نمونه طبق استاندارد بی- اس 10002-2001:1 بریده شده و پس از آزمایش کشش ساده؛ خواص زیر را از خود نشان داده‌اند.

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

که  $E$  مدول الاستیک،  $E_f$  مدول مماسی و  $\sigma_y$  تنش تسلیم ورق فولادی می‌باشد. برای اطمینان از تکرار پذیری آزمایشات و خروجی‌ها هر آزمایش سه مرتبه انجام و نتایج حاصله معدل‌گیری شده است. نمونه‌ای از ورق با شعاع انحنای 110 میلیمتر و ارتفاع سقوط آزاد 30 سانتی متر قبل و بعد از ضربه در شکل 5 نشان داده شده است.

### 2-5- نتایج آزمایش سقوط آزاد

#### 2-5-1- نمودار شتاب زمان

سره ضربه زننده<sup>1</sup> به شکل کره به قطر 85 mm می‌باشد (عرقچین 64 درجه ای از کره) که با روش ماشینکاری کنترل عددی<sup>2</sup> از یک شفت توپر فولادی به قطر اولیه 55 میلیمتر ساخته شده است. با توجه به صلیبیت زیاد ضربه زننده نسبت به ورق تحت آزمایش، هیچ گونه عملیات حرارتی روی آن انجام نشده است. در شکل 3 شفت مذکور و نحوه اتصال آن به وزنه‌ها نشان داده شده 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 اصطکاک، بایستی با قرار دادن سنسور سرعت مناسب در نقطه قبل از برخورد ضربه زننده با قطعه مورد آزمایش؛ سرعت برخورد را اندازه‌گیری نمود. البته در این تحقیق سرعت از روی رابطه ارتفاع سقوط محاسبه شده است.

روش تنظیم دستگاه و مونتاژ قطعات بدین صورت است که پس از ماشینکاری سره ضربه زننده انتهای شفت ضربه زننده رزوه شده و توسط پیچ رابط به وزنه 46 کیلوگرمی متصل می‌گردد. وزنه 46 کیلوگرمی از سه ارتفاع 20، 30 و 40 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 سه سرعت رابطه (1) برای لحظه برخورد محاسبه می‌گردد.

$$v = \sqrt{2gh} \rightarrow \begin{cases} h = 20\text{cm} \rightarrow v = 2.0 \text{ m/s} \\ h = 30\text{cm} \rightarrow v = 2.4 \text{ m/s} \\ h = 30\text{cm} \rightarrow v = 2.8 \text{ m/s} \end{cases} \quad (1)$$

#### 2-1- اندازه‌گیری شتاب

شتاب ضربه زننده با یک دستگاه سنسور شتاب سنج مدل 353b02 ساخت شرکت pcb امریکا اندازه‌گیری می‌شود. مبنای محاسبات برای اندازه‌گیری شتاب، حرکت ضربه زننده و وزنه متصل به آن می‌باشد که توسط شتاب سنج متصل به مجموعه وزنه و میز متحرک دستگاه، اندازه‌گیری شده است.

#### 2-2- اندازه‌گیری تغییرشکل پلاستیک

است. این تغییر شکل توسط سیستم اندازه‌گیری متصل به دستگاه مشخص شده و ثبت می‌گردد. لازم به ذکر است در اندازه‌گیری‌ها حداکثر تغییرشکل



Fig. 3 Head of impactor details

شکل 3 جزئیات سره ضربه زننده

1- Impactor head  
2- Computer Numerical Control (CNC)

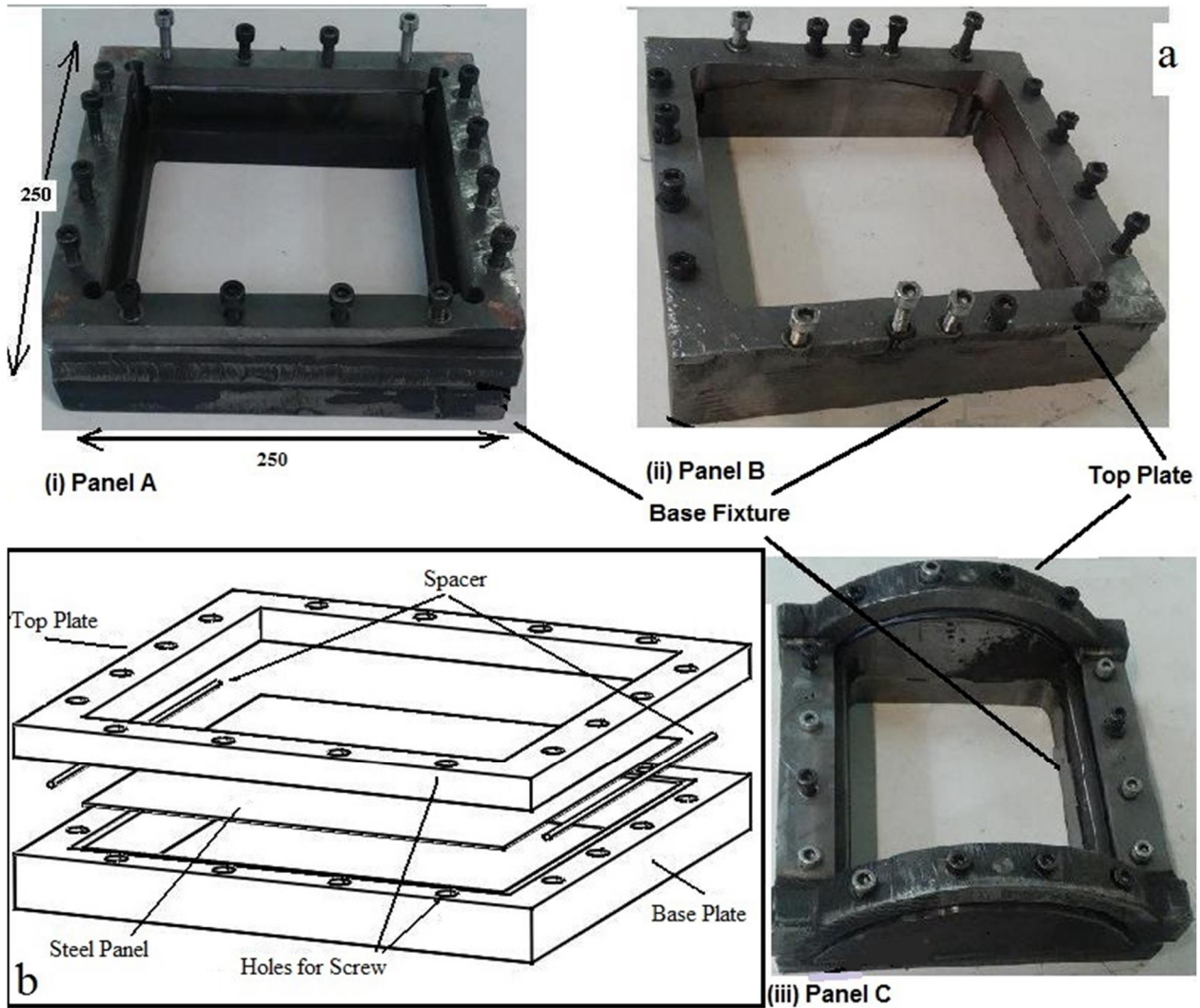


Fig. 4 Loading fixtures, (a) Three fixtures, (b) flat fixture details

شکل 4 فیکسچرهای نگهدارنده (a) سه فیکسچر جداگانه (b) جزئیات فیکسچر مسطح

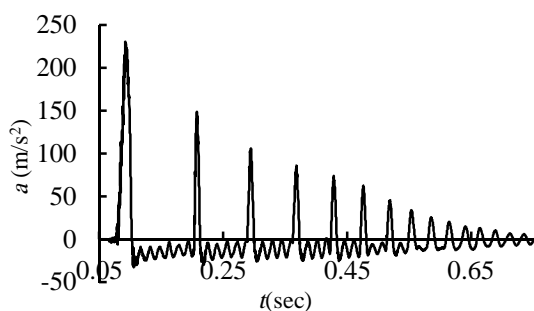


Fig. 6 acceleration-time diagram for flat plate , drop height=30 cm

شکل 6 نمودار شتاب زمان برای ورق صاف و ارتفاع پرتاب 30 سانتی متر

لغزیدن قطعه از زیر فیکسچر، شتاب برخورد عددهای خیلی بالاتری را نشان داده اند که این داده ها قابل استناد نمی‌باشد و لذا حذف گردیده اند. طبق نمودار بدست آمده شکل 6 کل برخورد از زمان شروع تماس تا لحظه برگشت ضربه زنده به سمت بالا در زمان کمتر از 0.01 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.

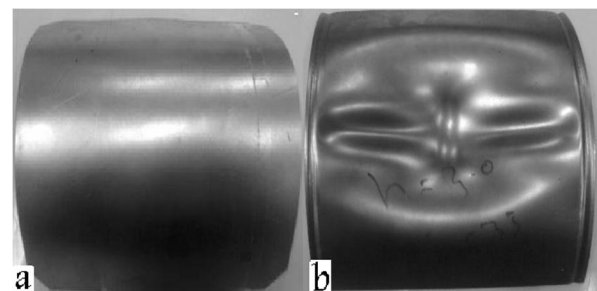


Fig. 5 panel with 110 mm radius of curvature. (a) before impact (b) after impact with  $H=30$  cm

شکل 5 نمونه ورق با شعاع 110 میلی متر (a) قبل از برخورد (b) بعد از برخورد در ارتفاع 30 سانتی متر

برای هر آزمایش، نمودار شتاب - زمان توسط دستگاه ضبط و ترسیم شده است. در شکل 6 نمودار مذکور برای ارتفاع سقوط آزاد برابر 30 سانتی متر و ورق تخت نشان داده شده است. بخاطر اثرات میرایی، ضربه زنده پس از چندین برخورد به حالت سکون رسیده است. پارامتر مهم این آزمایش، حداکثر شتاب ثبت شده در اولین برخورد بین ضربه زنده و ورق فولادی می‌باشد. در موارد متعدد بعثت

## 2-5-2- حداکثر تغییر شکل پلاستیک

با توجه به اهمیت تغییر شکل نهایی و ماندگار در قطعه، این پارامتر برای حالات‌های مختلف آزمایش اندازه‌گیری شده است. نتیجه تغییرات حداکثر تغییر شکل با توجه به ارتفاع سقوط آزاد و شعاع انحنای ورق در شکل 7 نشان داده شده است. طبق نمودار، با افزایش شعاع ورق مقدار حداکثر تغییر شکل پلاستیک کم می‌شود.

## 3- روش عددی

مدل‌سازی عددی برای کلیه حالات انحنای ورق و ارتفاع سقوط آزاد انجام شده است. برای شبیه‌سازی این مسئله از نرم افزارهای مهندسی کتیا<sup>1</sup> و انسیس<sup>2</sup> و برای تحلیل از نرم افزار ال-اس-داینا<sup>3</sup> استفاده شده است.

مدل هندسی برای ضربه زنده با توجه به پیچیدگی ناحیه ضربه زنده که قسمتی از کره به قطر 85 میلی‌متر است توسط نرم افزار کتیا ساخته شده است. همچنین المان‌بندی ضربه زنده نیز توسط نرم‌افزار انسیس انجام شده است. در نهایت المان‌بندی ورق فولادی، شرایط مرزی، تعریف جنس مواد، جزئیات تماس، خواص مواد، بازه زمانی تحلیل و شرایط اولیه در نرم افزار ال-اس-داینا تعریف شده اند. نکات مهم در نرم افزار ال اس داینا که بایستی با دقت تعریف شوند عبارتند از

1- مرحله زمانی<sup>4</sup> که در این مسأله برابر 0.9 بوده و عموماً با توجه به مدل همگرایی مسئله با سعی و خطا تعیین می‌شود.

2- تعریف نوع تماس بین ضربه زنده و هدف که در این حالت تماس گره به سطح سه بعدی تعریف شده است. گره‌ها بر روی هدف و سطح بر روی ضربه زنده انتخاب شده اند.

3- خواص مواد که شامل رفتار المان (فرض تنش ثابت یا تنش صفحه ای و غیره) و ضخامت المان‌های پوسته ای و ضرایب الاستیک و پواسون و تنش تسلیم می‌باشند

4- زمان تحلیل که با توجه به خواسته های مسئله بایستی بازه زمانی مناسب باشد که در برگیرنده شروع تماس تا پایان تماس باشد.

عمده پیچیدگی مسائل عددی ضربه در تحلیل با نرم افزار ال-اس-داینا تعریف الگوی مناسب برای تماس می‌باشد که معمولاً دقت و تجربه زیادی نیاز دارد.

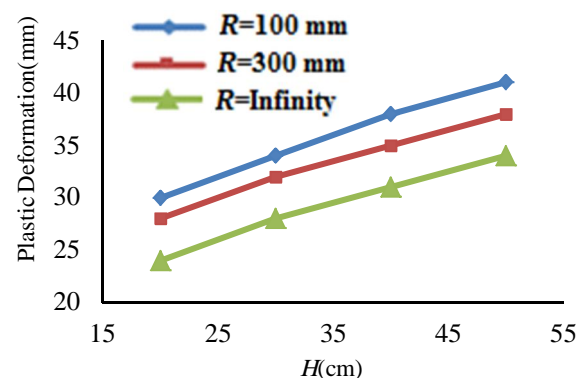


Fig. 7 plastic deformation vs. panel radius in experiment

شکل 7 نمودار تغییرات حداکثر تغییر شکل ماندگار با شعاع انحنای ورق در آزمایش

1- Catia  
2- Ansys  
3- Ls.Dyna  
4- Time step

## 3-1- مدل هندسی و المان بندی

ابتدا مدل سه بعدی ضربه زنده و ورق در نرم افزار کتیا ساخته شده و با انتقال به نرم افزار انسیس، المان بندی انجام شده است برای مدل سازی ورق از تعداد 900 المان صفحه ای چهار گرهی با مشخصه معین که قابلیت‌های غشایی و خمشی را دارا بوده و بارهای داخل صفحه و خارج از صفحه را تحمل می‌کنند، استفاده شده است. مدل‌سازی در پنج شعاع انحنای مختلف برای ورق فولادی انجام و تحلیل انجام شده است که به ترتیب عبارتند از 110-300-700-1200 و بی‌نهایت (ورق مستطیلی تخت). در همه حالت ها بدون توجه به انحنای ورق، المان بندی بصورت 30×30 یعنی تعداد 900 المان پوسته‌ای در نظر گرفته شده است. کلیه ابعاد ورودی بر حسب میلی‌متر و واحدهای جرم، نیرو و زمان به ترتیب تن، نیوتن و ثانیه می‌باشند. [9] خروجی تحلیل شامل تغییرشکل‌ها بر حسب میلی‌متر بوده و همچنین، تنش‌ها بر حسب نیوتن بر میلی‌متر مربع یا مگا پاسکال بدست آورده شده است.

## 3-2- داده‌های ورودی تحلیل عددی

برای المان‌های پوسته‌ای ذکر شده پارامترهای مهم در قسمت خواص وارد می‌شود که مهمترین آن‌ها ضخامت المان می‌باشد که بایستی برای هر گره بصورت جداگانه وارد شود. با توجه به ثابت بودن ضخامت ورق، این پارامتر مشخص بوده و برای هر گره برابر 0.7 میلی‌متر وارد شده است. در حالت کلی، ضخامت از هر گره تا گره مجاور المان بصورت خطی تغییر می‌کند. خواص مکانیکی ماده ورق طبق آزمایش، تطابق خوبی با مدل پلاستیک سینماتیک داشته و پارامترها طبق جدول 1 وارد شده اند.

هر گره از این نوع المان دارای 12 درجه آزادی است که شامل جابجایی و چرخش و سرعت و شتاب می‌باشد. لازم به ذکر است جابجایی و چرخش جزو ورودی های هر گره بوده و سرعت و شتاب بعد از حل مسئله بعنوان خروجی‌های تحلیل محاسبه می‌گردند.

برای مدل‌سازی ضربه زنده از المان های سه بعدی توپر مناسب<sup>5</sup> استفاده شده است. این نوع المان در حالت عمومی مکعبی بوده و هر گره از آن دارای 9 درجه آزادی شامل جابجایی؛ سرعت و شتاب می‌باشد که شتاب هر گره، جزو خروجی های تحلیل می‌باشد. برای مدل سازی ضربه زنده از تعداد 3401 المان استفاده شده است با توجه به عدم حساسیت این قسمت و برای کاهش زمان تحلیل از مدل صلب [11] در این ناحیه استفاده شده که مشخصات مکانیکی آن در جدول 2 نشان داده شده است.

لازم به ذکر است برای جلوگیری از پیچیدگی تحلیل و همچنین کاهش تعداد المان‌ها و زمان تحلیل، جرم 46 کیلو گرمی در داخل ضربه زنده توزیع شده است لذا تغییرات لازم با توجه به ابعاد ضربه زنده و مدل ساخته شده از ضربه زنده در جرم حجمی ماده ضربه زنده لحاظ گردیده است و لذا

جدول 1 خواص مکانیکی ورق فولادی از آزمایش کشش ساده

Table 1 mechanical properties of steel panel from simple tension test

ضریب ضریب	مدول	تنش	ضریب	مدول	ضریب
نمایی	مماسی	تسلیم	پواسون	یابنگ	حجمی
(MPa)	(MPa)	(MPa)		(MPa)	( $\text{tone}/\text{mm}^3$ )
0.25	1100	170	0.3	18E4	7.85E-9

5- SOLID164

شده‌اند. باید توجه داشت که بعلت تقارن هندسی اولین نقطه تماس و شروع برخورد، گره وسط ورق می‌باشد و تماس بصورت متقارن ایجاد شده است. همچنین لازم است مسئله در بازه زمانی برخورد که حدود 0.03 ثانیه است تحلیل شود اما برای بررسی دقیق‌تر و مقایسه بهتر مدل عددی با آزمایش، مسئله تا زمان 0.25 ثانیه و در مواردی تا زمان 1 ثانیه تحلیل شده است.

پارامتر دیگری که در واقعی شدن تحلیل عددی مخصوصا 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 9810 میلی‌متر بر مجذور ثانیه در نظر گرفته شده است. نکته جالب اینکه در صورت عدم تعریف نیروی جاذبه، ضربه زنده بعد از اولین ضربه بخاطر اثرات الاستیک فیکسچرها در اثر ضربه، منعکس شده و از ورق فاصله می‌گیرد و لذا برخوردهای بعدی وجود ندارد.

### 3-5- نتایج تحلیل عددی

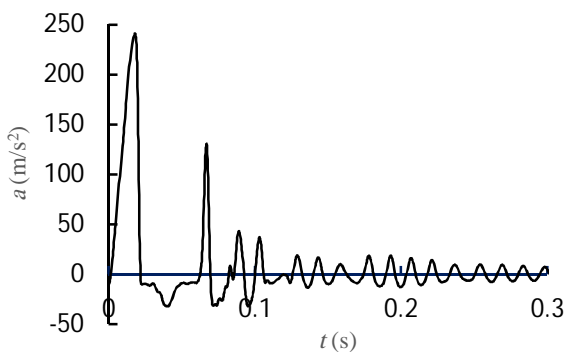
#### 3-5-1- مقایسه نمودار شتاب - زمان

نمودار شتاب- زمان برای هر ارتفاع، 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 0.2 ثانیه، ضربه زنده به حالت سکون می‌رسد بطوری که شتاب آن به حدود  $6 \text{ m/s}^2$  رسیده و نوسان می‌کند.

### 4- نتایج و بحث

#### 4-1- مقایسه نمودار شتاب - زمان در آزمایش و تحلیل عددی

نمودار شتاب زمان آزمایش در شکل 6 نشان می‌دهد که پس از حدود 0.6 ثانیه بعد از برخورد شتاب ضربه زنده به حدود 6 متر بر مجذور ثانیه و کمتر می‌رسد در حالی که در مدل‌سازی عددی شکل 9 نمودار شتاب زمان در حدود 0.12 ثانیه به این مقدار می‌رسد. بعلاوه در آزمایش بعد از اولین ضربه که منجر به حداکثر شتاب می‌شود، در فواصل زمانی کاهشی (نمایی) حداکثر شتاب کاهش یافته و به سمت صفر میل می‌کند اما در مدل عددی کاهش شتاب به سمت صفر خیلی منظم نمی‌باشد. علت اختلاف بخاطر اثرات میرایی می‌باشد؛ از آنجا که ثابت‌های میرایی در حالت عددی مشخص نیست لذا در مدل‌سازی عددی این اثر و ثابت‌های مربوطه لحاظ نشده است.



**Fig. 9** Acceleration history for  $m=46 \text{ kg}$ ,  $H=30 \text{ cm}$  (numerical analysis)

شکل 9 تاریخچه شتاب برای جرم 46 kg و ارتفاع 30 cm (مدل عددی)

نیازی به مدل سازی وزنه های سقوط آزاد نمی باشد. تعداد کل گره‌های استفاده شده در مدل 6375 عدد و تعداد کل المان‌ها 4301 عدد می باشد. مدل المان‌بندی شده در شکل 8 نشان داده شده است.

### 3-3- شرایط مرزی

فرض شده است در لبه‌های انحنادار گره‌ها مقید شده‌اند لذا مطابق شکل 8 مشاهده می‌شود که در لبه‌های انحنادار شرایط مرزی برای گره‌های دو لبه مقابل هم گیردار تعریف شده است و در دو لبه دیگر (لبه‌های صاف ورق) آزاد در نظر گرفته شده‌اند. برای اعمال این شرایط مرزی دسته گره<sup>1</sup> تعریف شده و با انتخاب این دسته از گره‌ها واقع در لبه‌های انحنادار، جایجایی و چرخش در جهت‌های سه‌گانه برابر صفر قرار داده شده است. برای ورق مسطح نیز در دو لبه گره‌ها مقید و در دو لبه دیگر آزاد در نظر گرفته شده است. برای گره‌های لبه‌های صاف هر سه ورق هیچ قیدی در نظر گرفته نشده است.

### 3-4- سایر پارامترهای تحلیل

برای مشخص نمودن سرعت برخورد از اصل بقای انرژی که اشاره شد استفاده شده است. سرعت برخورد ضربه زنده به ورق با تعریف دسته گره 2 که شامل کلیه گره‌های ضربه زنده 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.

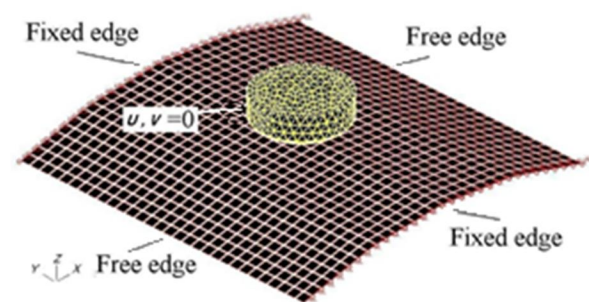
با توجه به سه سطح انرژی سه سرعت برای برخورد محاسبه شده که در شرایط اولیه<sup>2</sup> برای کلیه گره‌های ضربه زنده اعمال شده است. برای مدل سازی شرایط دو قطعه در لحظه برخورد و بعد از آن، مدل تماسی تعریف شده و برای ایجاد شرایط تماسی مناسب از مدل تماس سطح به سطح<sup>3</sup> استفاده شده است.

دو قسمت تماس حساسیت بالایی داشته و سطح تماس بر روی قسمت کروی ضربه زنده و گره‌های تماس بر روی ورق با تعریف دسته گره‌ها تعریف

جدول 2 خواص مکانیکی ضربه زنده از مرجع [10]

**Table 2** mechanical properties of impactor [10]

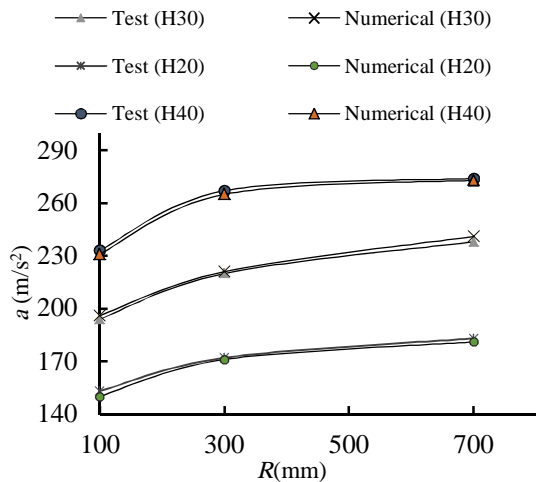
ضریب پواسون	مدول یانگ	جرم حجمی
$\nu$	$E$ (MPa)	$\rho$ (tone/mm <sup>3</sup> )
0.3	200E3	9892E-7



**Fig. 8** Numerical modeling, total model including plate and impactor

شکل 8 مدل عددی شامل ورق و ضربه زنده

- 1- Node Set
- 2- Initial condition
- 3- Automatic surface to surface contactmm



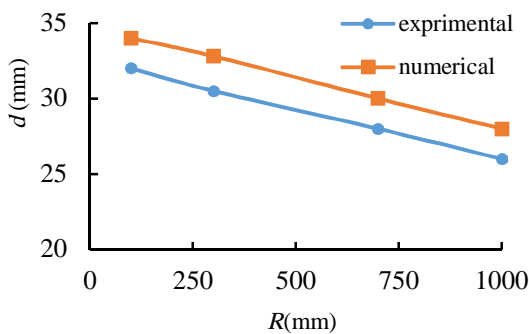
**Fig. 11** Acceleration vs. panel curvature variation comparison at three heights

شکل 11 مقایسه تغییرات شتاب بر حسب انحنای ورق در سه ارتفاع مختلف

آزمایشی اگرچه حداکثر شتاب را یکسان نشان می‌دهند اما نوسانات شتاب تا لحظه توقف ضربه زنده تفاوت زیادی دارد که علت اختلاف عامل میرایی و اصطکاک میله های راهنما در زمان سقوط آزاد می‌باشد.

**4-4- محاسبه اثر انحنای در حداکثر تغییر شکل ماندگار ورق**

تغییرات حداکثر تغییر شکل ماندگار بر حسب شعاع انحنای ورق برای ارتفاع سقوط آزاد 20 سانتی‌متر در نمودار شکل 12 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 7 درصدی بین نتایج عددی و آزمایش 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



**Fig. 12** plastic deformation (*d*) vs. panel radius for *H*=20 cm (Numerical and test comparison)

شکل 12 نمودار تغییر شکل پلاستیک بر حسب شعاع انحنای ورق برای ارتفاع 20 سانتی‌متر (مقایسه مدل عددی و آزمایش)

**2-4- مقایسه اثر انحنای در حداکثر شتاب ایجاد شده در اثر ضربه**

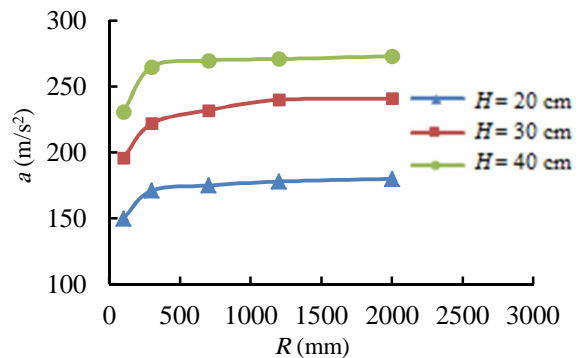
با افزایش شعاع انحنای در یک سطح انرژی معین، شتاب برخورد افزایش می‌یابد اما از نقطه‌ای به بعد ثابت می‌ماند. نمودار شکل 10 نشان دهنده این مطلب می‌باشد. طبق نمودار، با افزایش شعاع انحنای ورق، شتاب ضربه زنده زیاد شده و تغییرات شتاب در شعاع‌های انحنای زیاد، بسیار ناچیز می‌باشد؛ به عبارتی رفتار ورق به ورق صاف (شعاع بی‌نهایت) نزدیک می‌شود.

**3-4- نمودار تغییرات شتاب برای حالات مختلف**

تغییرات حداکثر شتاب در سه سطح انرژی (سه ارتفاع سقوط آزاد) و مقایسه مدل عددی با آزمایش در نمودار شکل 11 نشان داده شده است. با توجه به عدم وجود داده‌های آزمایش برای شعاع انحنای 700 میلی‌متر از روند تغییرات مدل عددی و کمک از داده‌های آزمایش، برای شعاع انحنای 100 و 300 و بی‌نهایت، استفاده شده است (به نوعی درون‌یابی شده است). لذا به جهت مقایسه، نمودار تغییرات شتاب بر حسب شعاع انحنای ورق، برای مدل تجربی نیز مانند مدل عددی بصورت منحنی پیوسته نشان داده شده است. در شکل 10 که تغییرات شتاب ضربه زنده بر حسب شعاع ورق نشان داده شده، تغییرات شتاب در شعاع‌های کم بسیار زیاد می‌باشد که بعد از شعاع حدود 1500 میلی‌متر، تغییرات شتاب کاهش یافته و لذا رفتار ورق، به ورق مسطح بسیار نزدیک می‌شود.

برای ارتفاع سقوط آزاد 30 سانتی‌متری، رفتار ورق با توجه به افزایش مقدار شتاب برخورد، کمی متفاوت با ارتفاع 40 سانتی‌متر می‌باشد، ادقت در نمودارهای شکل 11 نشان می‌دهد که روند تغییرات شتاب بر حسب ارتفاع سقوط آزاد و انحنای ورق تقریباً مشابه می‌باشد.

با تغییرات شعاع انحنای ثابت نگاه داشتن شرایط مرزی آزاد - مقید سخت‌تر می‌شود، لذا برای ایجاد شرایط واقعی و مقایسه دقیق بعد از هر ضربه، نمونه تغییر شکل یافته را بررسی نموده و لغزش یا کشیدگی لبه‌ها بر روی فیکسچر را اندازه‌گیری نموده‌ایم تا تعداد گره‌های مقید در مدل عددی را با دقت مشخص نماییم. در واقع علت دقت بالای نتایج در مقایسه عددی و تجربی این روش می‌باشد که بعد از هر آزمایش با توجه به نحوه تغییر شکل ورق و وضعیت کشیدگی، در ناحیه تکیه‌گاه‌ها شرایط مرزی بررسی شده است. با افزایش شعاع انحنای ورق در یک ارتفاع معین، شتاب نیز افزایش می‌یابد و در شعاع‌های زیاد ورق، شتاب ثابت می‌ماند. مقایسه مدل عددی و آزمایش (در مواردی که داده‌های آزمایشی موجود است) در مورد حداکثر شتاب ایجاد شده خطای حداکثر 2 درصد را نشان می‌دهد (نمودارهای شکل 11) از نمودار شتاب - زمان شکل‌های 6 و 9 مشاهده می‌گردد نمودار مدل عددی و



**Fig. 10** Acceleration vs. panel curvature variation

شکل 10 تغییرات شتاب بر حسب انحنای ورق

موجود و حد ضربه ای مجاز بایستی حالت بهینه انتخاب گردد. برای بررسی دقیق‌تر اینگونه برخوردها لازم است روش آزمایش و تحلیل به سمتی برود که شرایط مرزی واقعی‌تر گردد یعنی تکیه‌گاه‌ها الاستیک در نظر گرفته شوند که این مورد پیچیدگی آزمایش را بیشتر می‌کند اما نتایج دقیق‌تر بدست می‌آید. همچنین ساخت فیکسچر با ابعاد بزرگتر و آزمایش با این دستگاه‌ها که ابعاد واقعی درب خودرو را نشان می‌دهند در تحلیل تصادف، نتایج بسیار بهتری ارائه می‌کند.

## 6- مراجع

- [1] N. Jones, Recent studies in the dynamic plastic behavior of structures. *Applied Mechanics*. Vol.42, No.4, pp. 95–115, 1989.
- [2] H. Yoshida, A. Uenishi, Y. Kuriyama, M. Takahashi, Crashworthiness Improvement of the Side Crash by the Work Hardening Effect of Pre-Strained High Strength Steel, *SAE Technical Paper*, Vol.1, No. 10, pp.3112-3120, 2001.
- [3] P. Kumar, J. LeBlanc, D. Stargel, A. Shukla, Effect of plate curvature on blast response of aluminum panels, *International Journal of impact engineering*, Vol. 46, No.29, pp.74-85, 2012.
- [4] R.D. Ambur, H. J. Starnes, Effect of curvature on the impact damage characteristics and residual strength of composite plates. *NASA Langley Research Center*, No. 98, pp. 1881, 2011.
- [5] T. wierzbiński, *Plastic analysis of plates and shells*, Sec. 4-2, New York: Halsted Press 2009.
- [6] G. J. McShane, C. Stewart, M.T. Aronson, H. N. G. Wadley, N. A. Fleck, V. S. Deshpande, Dynamic rupture of polymer-metal bilayer plates, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 45, No. 16, pp. 4407–4426, 2008.
- [7] M. Irshidat, A. Al-Ostaz, A.H.-D. Cheng, *predicting the response of polyurea coated high hard steel plates to ballistic impact by fragment simulating projectiles*, Accessed on 20 December 2014, <http://www.serri.org/publications/Documents>.
- [8] M.R. Amini, J. Isaacs, S. N. Nasser, *Investigation of effect of polyurea on response of steel plates to impulsive loads in direct pressure-pulse experiments*, Accessed on 24 December 2015, <http://www.ceam.ucsd.edu>.
- [9] *LS-DYNA keyword user's manual*, vol. 1 version 960, Sec. 1 pp. 36, Livermore Software Technology Corporation, 2001.
- [10] European Steel and Alloy Grades/Numbers, Accessed on 23 December 2015, [www.Steelnumber.com](http://www.Steelnumber.com)
- [11] J. O. Hallquist, *Ls-Dyna Theory Manual*, Sec. 18.19, Livermore Software Technology Corporation. Livermore, 2006.

تغییر مکان می‌باشد که این موقعیت در یک ناحیه (بجای یک نقطه) می‌باشد و لذا در هر حالت حدود 2 میلی‌متر خطا داشته و بعبارتی کمتر از مقدار بدست 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 مدل‌سازی عددی اثر اصطکاک میله‌های راهنما لحاظ نشده و تماس بدون اصطکاک فرض شده است.

## 4-5- محاسبه نیروی ضربه

با توجه به محاسبه شتاب ضربه زننده در هر لحظه طبق قانون دوم نیوتن نیروی حاصل از ضربه برابر است با جرم ضربه زننده در شتاب. در کلیه حالت‌ها جرم ضربه زننده ثابت بوده و برابر با 46 کیلوگرم می‌باشد، لذا تغییرات منحنی نیروی تماسی دقیقاً مشابه منحنی 6 در آزمایش و منحنی 9 در تحلیل عددی می‌باشد با این تفاوت که دامنه منحنی‌های نیرو نسبت به منحنی شتاب (شکل 6 و 9) در جرم ضربه زننده (عدد) 46 ضرب شده است.

## 5- نتیجه گیری

با افزایش شعاع انحنا شتاب وارده افزایش می‌یابد که مشخص شده برای ورق صاف (شعاع بی‌نهایت) حداکثر شتاب ایجاد می‌شود؛ لذا در طراحی محصول، برای کاهش شتاب و در نتیجه نیروی ضربه بایستی انحنا اولیه‌ای برای ورق در نظر گرفت که در این حالت شوک و ضربه وارده در اثر برخورد کمتر خواهد شد. همچنین حداکثر تغییر شکل ماندگار با افزایش شعاع ورق برای کلیه سرعت‌های برخورد کاهش می‌یابد. در این مورد معیار طراحی، کاهش تغییر شکل ماندگار می‌باشد که برای طراحی بهینه بایستی این مورد را مد نظر قرار داد.

از نمودارهای مربوط به تغییرات شتاب حداکثر و تغییر شکل ماندگار مشاهده می‌شود این دو پارامتر رفتار معکوس یکدیگر دارند یعنی با افزایش شعاع انحنا 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 اگر شعاع انحنا ورق زیاد شود طبق نتیجه اول، شتاب نیز زیاد می‌شود. از طرف دیگر با کاهش شعاع انحنا ورق حداکثر تغییر فرم ماندگار زیاد می‌شود که همواره محدودیت کاهش شعاع انحنا ورق به خاطر فضای موجود، مهم بوده است. بنابراین با در نظر گرفتن فضای