



بررسی اثر افزودن نانو رس بر قابلیت جذب انرژی فولاد- پلی اوریا

احمد بیدی^۱، غلامحسین لیاقت^{۲*}، غلامحسین رحیمی^۲

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

اطلاعات مقاله

دریافت: ۹۴/۱۱/۱

پذیرش: ۹۴/۱۲/۱۴

کلیدواژگان:

نانو رس

پلی اوریا

آزمایش سقوط آزاد

جذب انرژی

چکیده

در این تحقیق رفتار ورق دولایه فولاد - پلی اوریا در مقابل بار ضربه ای و همچنین اثر افزودن نانو رس به پلی اوریا مورد بررسی قرار گرفته است. برای انجام این تحقیق از روش تجربی و مدل سازی عددی استفاده شده است. نمونه‌های دولایه فولاد- پلی اوریا و فولاد-نانوپلی اوریا تهیه و آزمایش کشش ساده و ضربه سقوط آزاد بر روی آنها انجام شده است. شتاب برخورد در هر حالت ثبت و نتیجه با مدل عددی مقایسه شده است. نتایج آزمایش نشان می دهد استفاده از پر کننده نانو رس در بهبود قابلیت جذب انرژی و کاهش تغییر شکل ماندگار موثر می‌باشد. نانو رس با درصد وزنی ۱٪ در داخل جزء نرم تر (پلی آمین) مخلوط شده و برای توزیع بهتر ذرات نانو در پلی آمین از همزن مکانیکی و سیستم اولتراسونیک استفاده شده است. آزمایش کشش نشان می دهد که با افزودن ذرات نانو مدول الاستیک حدود ۶۰ درصد افزایش و ازدیاد طول قبل از شکست نیز حدود ۷ درصد کاهش یافته است. همچنین برای مشاهده تاثیر ماده افزودنی بر روی عملکرد قطعه دولایه، آزمایش ضربه انجام و نتایج آزمایش با مدل سازی عددی صحت گذاری شده است. مشاهده شده است که افزودن نانو رس 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 داده است. مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایش نشان دهنده تطابق بالای نتایج دو مدل می‌باشد.

Effect of nano clay addition to energy absorption capacity of steel-polyurea bi-layer

Ahmad Bidi, Gholamhossein Liaghat*, Gholamhossein Rahimi

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

*P.O.B. 14115-141, Tehran, Iran, a.bidi@modares.ac.ir

Keywords

Nano clay
Polyurea
Drop impact test
Energy absorption

Abstract

The impact behavior of steel - polyurea bi-layer panel is studied and the effect of nano clay addition to polyurea is investigated. Experimental and numerical analysis is used. Polymeric and nano polymeric bi-layer specimens are fabricated and Simple tension test and drop impact test are carried out. Impactor acceleration for each test is recorded and compared with numerical one. Experimental results show that adding nano clay to polyurea will improve impact energy absorption and plastic deformation of bi-layer panel. nano clay with 1% weighting is added to soft part of the polyurea i.e. polyamine. Mechanical mixing and ultrasonic dispersion system is used for good dispersion of nano particles before mixing in polyamine. Experimental results show that elastic modulus is increased about 60% and elongation at break is decreased about 7% with nano clay addition. Also nano clay effects on bi-layer panel is studied with drop impact test and the results is verified with numerical analysis. It is shown that adding nano clay to polyurea as a reinforcement filler has increased the impact energy absorption about 3% and has decreased the maximum plastic deformation about 7%. The experimental results show a good agreement with the numerical ones when compared together.

۱- مقدمه

می‌باشد. با توجه به نوع ماده زمینه و قابلیت پذیرش ذرات نانو در ماده اصلی و همچنین بهبود خواص مکانیکی مورد نظر شامل فرسایش یا خوردگی یا ضربه، مواد مناسب را بایستی بعنوان پر کننده انتخاب نمود. مثلاً برای بهبود

برای بهبود خواص مکانیکی مواد پیشرفته علاوه بر توسعه روش‌های ساخت و تولید و تنوع مواد مورد استفاده، استفاده از مواد افزودنی نانو نیز مورد توجه

Please cite this article using:

Bidi, A. Liaghat, Gh. and Rahimi, Gh., "Effect of nano clay addition to energy absorption capacity of steel-polyurea bi-layer", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 2, pp. 157-164, 2016.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

حساب می آید؛ یکی جنس هدف که ماده پلی اوریا ماده ای نسبتاً جدید بوده و پژوهش‌های زیادی در مورد آن موجود نیست و دوم افزودن نانو ذرات رسی به این ماده است که تاکنون بندرت گزارش شده است. همچنین سرعت برخورد در نظر گرفته شده پایین می‌باشد که در بسیاری پژوهش‌ها ضربه با سرعت بالا و ضربه‌های با لستیک مورد بررسی قرار گرفته است. از نتایج این پژوهش در صنایع هوایی و خودروها می‌توان استفاده نمود.

۲- آزمایش

برای تهیه ورق‌های دولاپه ابتدا ورق فولادی از جنس آر- آر- اس- تی- ۱۴^۱ و با ابعاد ۲۲۰×۲۱۰ با ضخامت ۰/۷ میلی‌متر تهیه شده است. برای تهیه نمونه‌های دولاپه با استفاده از دستگاه پاشش دو جزئی و واکنش دو ماده ایزوسیانات و پلی آمین محصول پلی اوریا تولید خواهد شد.

پس از تهیه نمونه‌های فولادی برای چسبندگی بهتر سطح فلزی به روکش پلیمری؛ شستشو و چربی گیری سطح ورق انجام شده و استر زنی شده است. و سپس دو جزء تشکیل دهنده پلی اوریا، همزمان با پاشش توسط دستگاه دو جزئی به روی سطح فلزی قرار گرفته و در مدت زمان ۵ ثانیه سفت شده و لایه صلب پلی اوریا را تشکیل می‌دهند.

۲-۱- مراحل تولید دولاپه فولاد- نانو پلی اوریا

ابتدا بایستی به اندازه مناسب پودر نانو رس تهیه و آماده اختلاط در جزء نرمتر ماده پلی اوریا (پلی آمین) شود.

۲-۱-۱- تهیه و آماده سازی نانو رس

ماده انتخاب شده بعنوان پر کننده نانو رس با نام تجاری کلوزیت ۳۰ بی می‌باشد که برای اطمینان از عدم وجود رطوبت در آن بمدت ۶ ساعت داخل کوره با دمای ۷۰ درجه سانتیگراد قرار گرفته سپس مجدداً وزن کشی شده است (شکل ۱). همچنین برای توزیع بهتر و یکنواخت تر ذرات نانو رس و جلوگیری از لخته شدن؛ این ذرات را در مقدار مناسبی از محلول استن وارد نموده و با دستگاه همزن برقی مطابق شکل ۲ قرار می‌دهیم تا مدتی هم زده شده و ذرات نانو تا حد امکان از یکدیگر جدا شوند. همزمان مخلوط را در اندازه‌های ۲۰۰ میلی لیتر داخل دستگاه اولتراسونیک نموده و برای جداسازی و توزیع بهتر مخلوط را بمدت ۲۰ دقیقه در معرض امواج التراسونیک قرار داده و سپس مخلوط جدا سازی شده داخل شیشه مناسب قرار داده شده است تا برای ترکیب با جزء اول ماده پلیمری آماده شود. عملیات مراحل جدا سازی داخل استن با همزن و توسط دستگاه اولترا سونیک در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱ مرحله رطوبت زدایی از ذرات نانو رس

خواص فرسایش از ذرات نقره استفاده می‌شود همچنین برای بهبود خواص ضربه از ذرات رس یا سیلیسیم یا کربن استفاده می‌شود. مسئله ضربه در مواد مرکب و نانو مرکب دو یا چند لایه، محور اصلی پژوهش‌های زیادی در مهندسی مکانیک می‌باشد. در بسیاری موارد جسم ضربه زننده و قطعه در سرعت‌های کم، ولی شتاب برخورد بالا، با یکدیگر برخورد دارند. 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 [۱].

در این پژوهش اثر افزودن ذرات نانو رس بر روی قابلیت جذب انرژی دولاپه 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 نانو پلیمری در صنایع هوافضا و همچنین ضربه‌های بالستیک قابل استفاده می‌باشند. در مدل تجربی بعد از ساخت نمونه‌ها با استفاده از دستگاه آزمایش کشش ساده خواص مکانیکی پلیمر و نانو پلیمر (پلی اوریا) اندازه گیری شده و سپس با استفاده از فیکسچر مناسب آزمایش‌های ضربه سقوط آزاد انجام و نتایج آزمایشات با مدل سازی عددی صحنه گذاری شده است. برای محاسبه پاسخ سیستم به ضربه (در مدل عددی) از خواص مکانیکی بدست آمده از آزمایش کشش ساده استفاده شده است.

۱-۱- تاریخچه استفاده مواد پلیمری و نانو پلیمری در مقابل ضربه

بررسی اثر ضربه بالستیک به روی ورق‌های کامپوزیتی توسط دومار انجام پذیرفت [۲]. مک شان و همکاران [۳] گسیختگی دینامیک صفحات دولاپه 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 [۴] 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 [۵] اثر لایه پلی اوریا بر روی استحکام در مقابل بارضربه ای صفحات فولادی از جنس دی - اچ ۳۶ با ضخامت‌های مختلف را بررسی نموده و نتیجه گرفتند روکش مذکور در پشت قسمتی که ضربه وارد می‌شود استحکام ضربه ای را بالا می‌برد.

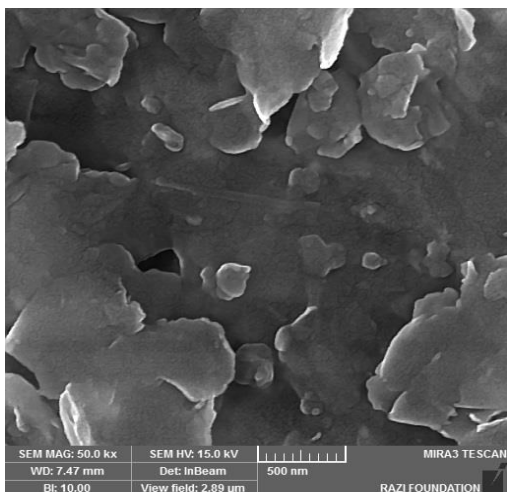
لیاقت و همکاران [۶] اثر درصد وزنی ذرات نانو رس را بر استحکام ضربه چند لایه‌ها بررسی نمودند و درصد وزنی بهینه را برای مقابله با ضربه و نفوذ بدست آوردند. ایسیک و همکاران [۷]، استفاده از ذرات نانو رس در اپوکسی را بررسی نموده و نتیجه گرفتند هر دو خواص سفتی و چقرمگی بوسیله نانو ذرات افزایش می‌یابد و دریافتند که، حداکثر مقاومت ضربه در درصد وزنی ۱۷٪ از مونت موری لونیت^۲ حاصل شده است.

سزار گانسینگ و همکاران [۸] به این نتیجه رسیدند که افزایش درصد وزنی ذرات نانو اثر خوبی در استحکام کششی و مدول کششی دارد ولی کشیدگی تا شکست کم می‌شود همچنین درمورد درصد نانوی بهینه اعلام نمودند ذرات نانورس از جنس کلوزیت^۳ بی ۳۰ با درصد وزنی ۱٪ بیشترین تاثیر را در افزایش استحکام ضربه ای دارد.

در این پژوهش اثر افزودن ذرات نانو رس به روی مقاومت ضربه ای دو لایه فولاد- پلی اوریا بررسی شده است و لذا از دو دیدگاه کاری جدید به

1. DH-36
2. Montmorillonite
3. Cloisite 30B

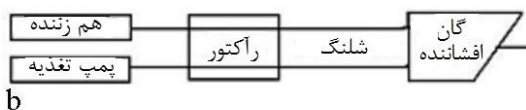
پلیمری اندازه ذرات نانو توسط دستگاه اس ای ام^۱ کنترل شده تا از ابعاد ذرات نانو مطمئن شویم (ممکن است نانو ذرات بخاطر نیروی چسبندگی بینشان به یکدیگر چسبیده و تشکیل ذرات میکرو داده باشند که در این حالت نمی توان به بهبود عملکرد ذرات نانو استناد نمود) نمونه اس ای ام شده در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴ نمونه عکس برداری شده از ذرات نانو در نانوپلی اوریا

۲-۱-۴- تولید دولایه فولاد- پلی اوریا

برای تولید دولایه فولاد- پلی اوریا بعد از تهیه نمونه‌های فولادی و شستشوی آنها و آستر زنی بصورت چهار تایی در کنار هم قرار گرفته و با دستگاه پاشش دوجزئی و از فاصله ۸۰ سانتیمتری ماده پلیمری به روی نمونه‌ها پاشیده شده است. نمونه‌ها بعد از حدود ۵ ثانیه شکل گرفته و آماده استفاده می باشند. فرآیند تولید نمونه‌های پلیمری و نانو پلیمری توسط دستگاه پاشش دو جزئی در شکل ۵ نشان داده شده است.



b



a

شکل ۵ دستگاه پاشش دو جزئی (a) شکل کلی دستگاه؛ (b) فرآیند تولید

۲-۲- انجام آزمایش

برای بررسی اثرات افزودنی نانو در پلی اوریا بر خواص مکانیکی پلیمر از روش‌های آزمایشگاهی استفاده شده است که شامل دو مرحله آزمایش کشش ساده و آزمایش ضربه سقوط آزاد وزنه می باشد.



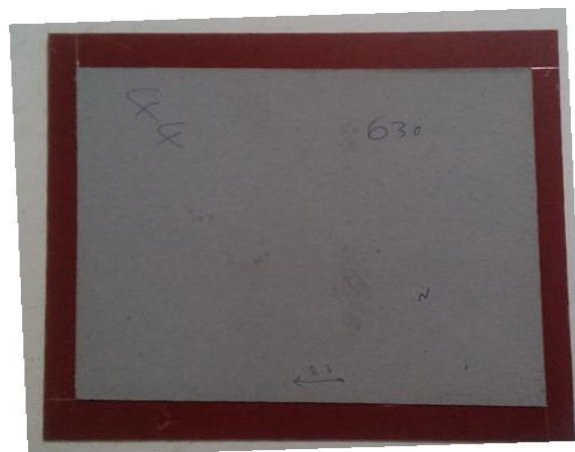
a

b

شکل ۲ مراحل جدا سازی ذرات نانو رس از یکدیگر؛ (a) همزن برقی؛ (b) دستگاه جدا کننده اولتراسونیک

۲-۱-۲- تولید دولایه فولاد- نانو پلی اوریا

پس از تهیه محلول استن با مقدار ۲۰۰ گرم پودر نانو رس که داخل استن توزیع شده است لازم است این محلول تبخیر شده و پودر نانو به داخل پلی امید وارد شود که پس از ترکیب پودر نانورس با پلی امید مقدار ۱۰ کیلوگرم محلول موجود است که داخل مخزن دستگاه پاشش دو جزئی وارد می شود. از طرف دیگر مقدار ۱۰ کیلوگرم از ج زء دوم که همان ایزوسیانات است داخل مخزن دوم می گردد. لذا با روشن نمودن دستگاه پاشش دو جزئی از فاصله ۸۰ سانتیمتری می توان ماده پلیمری را به روی نمونه‌های فولادی توزیع نمود که با توجه به ضخامت مورد نظر که حدود ۰/۸ میلیمتر تا ۱ میلیمتر است چهار تا پنج مرتبه پاشش پیوسته انجام شده و ماده پلیمری بصورت یکنواخت به روی ورق فولادی قرار می گیرد؛ لذا دولایه فولاد- نانو پلی اوریا تولید شده است. پس از حدود ۵ ثانیه این لایه شکل گرفته و بعد از یک ساعت خصوصیات مکانیکی معقول و متناسب با کاربرد مورد نظر ایجاد می گردد. نمونه دولایه تولید شده در شکل ۳ نشان داده شده است. نکته مهم اینکه دولایه فولاد- پلی اوریا نیز از نظر شکل ظاهری دقیقاً مشابه نمونه فولاد- نانو پلی اوریا می باشد.



شکل ۳ نمونه ورق دولایه فولاد- نانو پلی اوریا

۲-۱-۳- کنترل ابعاد ذرات نانو طی فرآیند

با توجه به تمایل بسیار زیاد ذرات نانو برای لخته شدن و تشکیل ذرات میکرو بجای نانو، بعد از تولید ورق دولایه با جدا کردن نمونه کوچکی از ماده نانو

1. Scanning Electron Microscope

۲-۲-۱- آزمایش کشش ساده

بعد از تهیه نمونه‌ها برای آزمایش کشش؛ به تعداد ۴ عدد طبق استاندارد بریده و در دستگاه تست کشش قرار گرفته اند. شکل ۶ دستگاه کشش نمونه‌های پلیمری را نشان می دهد. نمونه‌ها طبق شکل ۶ آماده شده و توسط دستگاه کشش تحت نیرو قرار گرفته اند که برای هر ماده پلی اوریا و نانو پلی اوریا چهار نمونه کششی تهیه و تست شده است.



شکل ۷ دستگاه آزمایش سقوط آزاد وزنه

معمولا سرعت برخورد را از روی ارتفاع سقوط آزاد و براساس اصل بقای انرژی محاسبه می‌کنند لذا سرعت از روی رابطه ساده انرژی و ارتفاع سقوط آزاد محاسبه شده است. وزنه ۴۶ کیلوگرمی از سه ارتفاع ۲۰ و ۳۰ و ۴۰ 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 برای لحظه برخورد طبق رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

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

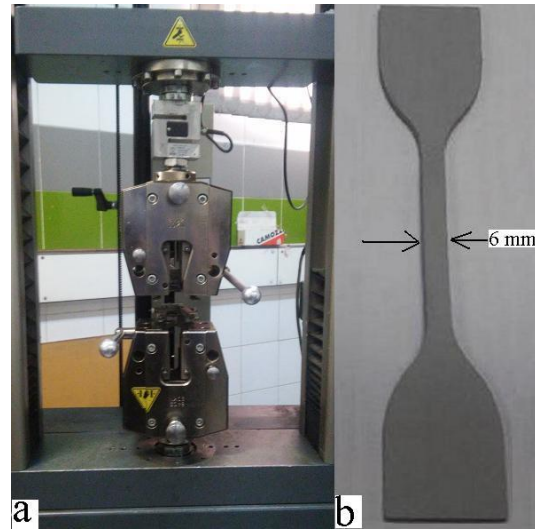
۲-۲-۲-۱- اندازه گیری شتاب

شتاب ضربه زننده با یک دستگاه سنسور شتاب سنج مدل 353b02 ساخت شرکت pcb آمریکا (با حساسیت ۰/۰۰۳g و دامنه اندازه گیری ۲۵۰g) اندازه گیری می‌شود.

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.

۲-۲-۲-۲- اندازه گیری تغییر شکل ماندگار

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 می‌شود. لازم به ذکر است در اندازه گیری‌ها حداکثر تغییر شکل ماندگار مورد توجه می‌باشد.



شکل ۶ دستگاه آزمایش کشش استاندارد (a) شکل کلی دستگاه (b) نمونه آماده تست

برای اطمینان از نتایج آزمایش کشش مواد پلیمری این کار با دو استاندارد مختلف انجام شده و گزارش شده است؛ لذا مشاهده شده که استاندارد مناسب برای آزمایش ورق‌های پلیمری و نانو پلیمری بر اساس استاندارد بی-اس-۹۰۳^۱ می‌باشد.

۲-۲-۲-۲- آزمایش ضربه

برای بررسی مقاومت ضربه ای ورق دولایه در مقابل ضربه از دستگاه سقوط آزاد وزنه^۲ استفاده شده است. وزنه ۴۶ کیلوگرمی بر اساس آزمایش سقوط آزاد وزنه از ارتفاع ۲۰ و ۳۰ و ۴۰ سانتیمتری به روی دو لایه به ابعاد ۲۱۰ در ۲۲۰ میلیمتر رها شده است. این سه ارتفاع بر اساس محدودیت‌های دستگاه برای ایجاد سطح انرژی‌های متفاوت انتخاب شده‌اند. دستگاه قابلیت اتصال وزنه‌هایی با جرم‌های ۳۶ تا ۱۳۰ کیلوگرم را دارد ولی علت انتخاب این وزنه؛ تامین انرژی جنبشی مناسب می‌باشد. اطلاعات 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. همچنین با ثبت موقعیت اولیه ضربه زننده می توان مقدار تغییر شکل ماندگار^۳ ورق دو لایه را محاسبه نمود. نمای کلی دستگاه آزمایش سقوط آزاد در شکل ۷ نشان داده شده است؛ دستگاه از چهار قسمت اصلی گایدها، بدنه ظاهری، سیستم اندازه گیری و ضبط اطلاعات، پایه برای نگهداری قطعه تحت آزمایش تشکیل شده است. سره ضربه زننده^۴ به شکل کروی می‌باشد که با روش ماشینکاری کنترل

1. BS 903
2. Drop Weight Impact Testing
3. Plastic Deformation
4. Impactor head

۳- روش عددی

برای صحنه گذاری به آزمایش ضربه از روش مدل سازی عددی استفاده شده است ورق دو لایه با ابعاد مفید ۲۰۰ در ۲۰۰ میلیمتر در نظر گرفته شده و وزنه ۴۶ کیلو گرمی با سه سرعت متفاوت به مرکز ورق برخورد نموده است. (در مدل تجربی ابعاد ورق ۲۱۰ در ۲۲۰ میلیمتر می باشد که اختلاف اندازه ها برای مقید نمودن ورق در آزمایش می باشد) برای شبیه سازی و تحلیل این مسئله از نرم افزار ال-اس-دایناس 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. المان بندی ضربه زننده و ورق دولایه، شرایط مرزی، تعریف جنس مواد، جزئیات تماس، خواص مواد، بازه زمانی تحلیل و شرایط اولیه در نرم افزار ال-اس-دایناس تعریف شده اند. پارامترهای مهم در این تحلیل شامل مرحله زمانی^۱، نوع تماس، جنس و خواص مواد و زمان تحلیل می باشند که تعریف شده اند. همچنین خواص ماده ضربه زننده در جدول ۱ اشاره شده است.

جدول ۱ خواص مکانیکی ضربه زننده

ضریب پواسون PR	مدول یانگ E (MPa)	جرم حجمی RO (tone/mm ³)
۰/۳	۲۰۰۰۰۰	۹۸۹۲ E-۷

* کل جرم وزنه داخل ضربه زننده توزیع شده است

۳-۱- مدل هندسی و المان بندی

ابتدا مدل سه بعدی ضربه زننده ساخته شده و المان بندی شده است برای مدل سازی ورق از تعداد ۳۲۰۰ المان صفحه ای چهار گرهی با مشخصه معین^۲ که قابلیت های غشایی و خمشی را دارا بوده و بارهای داخل صفحه و خارج از صفحه را تحمل می کنند، استفاده شده است. المان بندی بصورت ۴۰×۴۰ یعنی تعداد ۱۶۰۰ المان پوسته ای برای لایه فولادی و ۱۶۰۰ المان پوسته ای برای لایه پلیمری در نظر گرفته شده است. برای مدل سازی ضربه زننده از تعداد ۳۴۰۱ المان سه بعدی توپر مناسب^۳ 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 خروجی های تحلیل می باشد [۹].

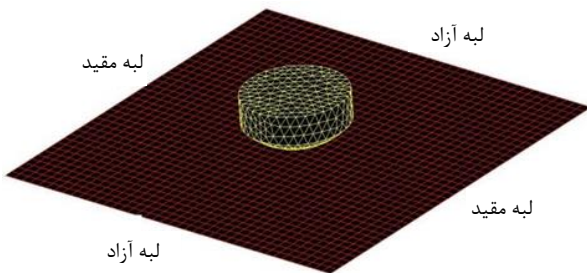
با توجه به عدم حساسیت ضربه زننده و برای کاهش زمان تحلیل از مدل صلب [۱۰] در این ناحیه استفاده شده و مشخصات ماده ضربه زننده در جدول ۱ اشاره شده است کلیه ابعاد ورودی بر حسب میلی متر و واحد های جرم، نیرو و زمان به ترتیب تن، نیوتن و ثانیه می باشند. [۱۱] در نهایت خروجی تحلیل شامل تغییر شکل ها بر حسب میلی متر بوده و همچنین، تنش ها بر حسب نیوتن بر میلی متر مربع یا مگا پاسکال بدست آورده شده است. تعداد کل گره های استفاده شده در مدل ۵۸۵۵ عدد و تعداد کل المانها ۶۶۰۱ عدد می باشد. مدل المان بندی شده در شکل ۸ نشان داده شده است.

۳-۲- داده های ورودی تحلیل عددی

ورق دولایه فولاد- پلیمر بصورت دو تک لایه فولادی و پلیمری تعریف شده است و دو لایه با استفاده از الگوی تماسی مناسب به یکدیگر متصل شده اند. با توجه به ثابت بودن ضخامت ورق، این پارامتر مشخص بوده و در لایه

1. Time step
2. SHELL163
3. SOLID164

فولادی برابر ۰/۷ میلیمتر و برای لایه پلیمری برابر با ۱ میلی متر اعمال شده است. خواص مکانیکی ماده ورق طبق آزمایش، تطابق خوبی با مدل پلاستیک سینماتیک داشته و پارامترها طبق جدول ۲ وارد شده اند.



شکل ۸ مدل المان بندی شده و شرایط مرزی

لازم به ذکر است برای جلوگیری از پیچیدگی تحلیل و کاهش تعداد المان ها 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 شده و لذا نیازی به مدل سازی وزنه های سقوط آزاد نمی باشد. مدل تماسی مناسب برای ایجاد شرایط تماسی واقعی مدل تماس سطح به سطح^۴ می باشد. لازم به ذکر است تعریف دو ناحیه تماس حساسیت بالایی داشته و بهترین حالت مدل سازی یکپارچه سازی دولایه فولاد و پلیمری باشد. به علت تقارن هندسی اولین نقطه تماس و شروع برخورد، گره وسط ورق می باشد. سطح اول تماس بر روی قسمت کروی ضربه زننده و سطح دوم تماس رویه فلزی ورق دولایه می باشد.

۳-۲- شرایط مرزی و بارگذاری

لبه های روبروی یکدیگر مطابق شکل ۸ مقید شده و دولبه دیگر کاملاً آزاد فرض شده اند. این شرایط در مدل تجربی نیز با استفاده از ماشینکاری عددی دقیق و قیدهای مناسب ایجاد شده است. همچنین جرم ضربه زننده به صورت متمرکز، اعمال شده است که اثر آن در جرم حجمی ضربه زننده لحاظ شده است.

۴- نتایج آزمایش

۴-۱- نتایج آزمایش کشش

رفتار ورق فولادی مطابق با پیش بینی رفتاری الاستیک - پلاستیک می باشد که به جزئیات آن در جدول ۲ اشاره شده است.

جدول ۲ خواص مکانیکی ورق فولادی از آزمایش کشش ساده

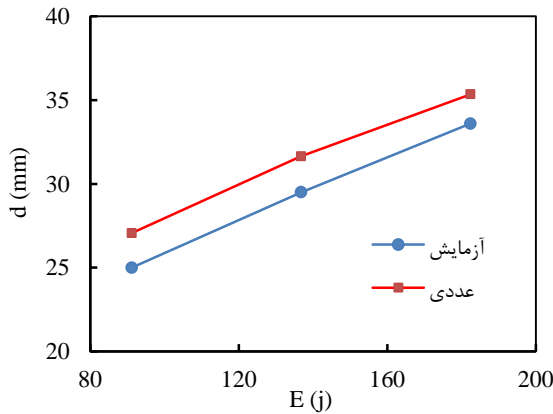
ضریب مدول مماسی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	ضریب پواسون	مدول یانگ (MPa)	جرم حجمی (to/mm ³)
۱۱۰۰	۱۷۰	۰/۳	۱۸۰۰۰۰	۷/۸۵ E-۹

نتیجه آزمایشات کشش برای نمونه های پلیمری و نانو پلیمری در جدول ۳ نشان داده شده است. مشاهده می شود که بهبود مقادیر تنش نهایی و مدول الاستیک در این جدول نشان داده شده است. همچنین نمودار تنش - کرنش برای هر سه نمونه (نمونه های پلیمری و نانو پلیمری و فولادی) پس از آزمایش کشش رسم شده است.

4. Automatic surface to surface contact

۴-۲-۲- تغییر شکل ماندگار ورق دولایه

نتیجه تغییرات حداکثر تغییر شکل ورق با توجه به سطح انرژی برخورد در شکل ۱۱ نشان داده شده است. طبق این نمودار، با افزایش سطح انرژی برخورد، مقدار حداکثر تغییر شکل بیشتر می‌شود.



شکل ۱۱ مقایسه مدل عددی و تجربی تغییر شکل ماندگار ورق نانو پلیمری

۴-۳-۳- نتایج تحلیل عددی

۴-۳-۱- مقایسه نمودار شتاب- زمان

نمودار شتاب- زمان در شکل ۱۰ ثبت شده و نشان می‌دهد که حداکثر شتاب در اولین برخورد، ایجاد شده و با گذشت زمان برخوردهای بعدی با شتاب‌های کمتری صورت می‌گیرد. طبق نمودار مشاهده شده که مقدار شتاب برای ورق نانو پلیمری از ورق پلیمری در حدود ۵ درصد بیشتر است. علت اختلاف ناچیز دو ماده در شتاب (یا نیروی) ایجاد شده اختلاف زیاد خواص لایه فولادی با لایه پلیمری (نانو پلیمری) می‌باشد؛ لذا پارامتر موثرتر در عملکرد دو لایه، رفتار ماده فولادی می‌باشد.

۴-۳-۲- مقایسه نتایج تغییر شکل ماندگار

نمودار تغییر شکل ماندگار ورق دولایه نانو پلیمری بر حسب انرژی برخورد (مقایسه مدل عددی و آزمایش) در شکل ۱۱ نشان داده شده است. طبق شکل ۱۱ نمودار مقایسه‌ای خطای همواره مثبت را نشان می‌دهد که مقدار تغییر شکل ماندگار در آزمایش همواره حدود ۲ میلی‌متر کمتر از مقدار بدست آمده در مدل عددی می‌باشد. نمودار برای ورق دولایه پلیمری نیز مشابه همین شکل می‌باشد اما مقادیر برای ماده پلیمری حدود ۵ درصد بیشتر می‌باشد.

۴-۴- بررسی اثرات ذرات نانو

مقایسه دولایه فولاد- پلیمر با دولایه فولاد- نانوپلیمر برای حداکثر شتاب ایجاد شده مطابق شکل ۱۲ افزایش حدود ۳ درصدی در شتاب را نشان می‌دهد همچنین تغییر شکل دائمی ورق نیز با افزودن ذرات نانو رس به پلیمر کاهش یافته است که نشان می‌دهد افزودن ذرات نانو؛ سختی (استحکام) ورق دولایه را بالا برده است.

به نظر می‌رسد استفاده از ذرات نانو برای بهبود مقاومت ضربه ای در ضخامت‌های زیاد تر و همچنین برای حالت‌هایی که ضربه با نفوذ همراه است مناسب می‌باشد که در این حالت مقدار زیادی از انرژی ضربه صرف تغییر شکل الاستیک شده و سپس گسیختگی ایجاد می‌شود.

جدول ۳ خواص مکانیکی پلی اوریا از آزمایش کشش استاندارد BS ۹۰۳

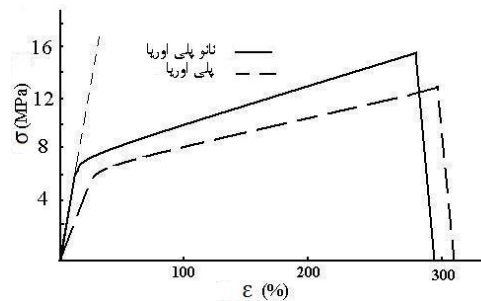
ماده	تنش تسلیم (MPa)	مدول یانگ (MPa)	جرم حجمی (tone/mm ³)
Polyurea	۹/۶۵	۱۷۱/۵	۱/۱ E-۹
Nano Polyurea	۱۵/۷	۲۷۲/۹	۱/۱ E-۹

نمودار تنش - کرنش پلی اوریا و نانو پلی اوریا در شکل ۹ نشان داده شده است. طبق نمودار شکل ۹ مشاهده می‌شود که تنش تسلیم و مدول الاستیک هر دو حدود ۶۰ درصد افزایش یافته اند در حالی که کشیدگی تا شکست^۱ با افزودن ذرات نانو رس، حدود ۴ درصد کاهش یافته است. نمودار تنش- کرنش پلی اوریا و نانو پلی اوریا در شکل ۹ نشان داده شده است. طبق نمودار شکل ۹ مشاهده می‌شود که تنش تسلیم و مدول الاستیک هر دو حدود ۶۰ درصد افزایش یافته اند در حالی که کشیدگی تا شکست^۲ با افزودن ذرات نانو رس، حدود ۴ درصد کاهش یافته است.

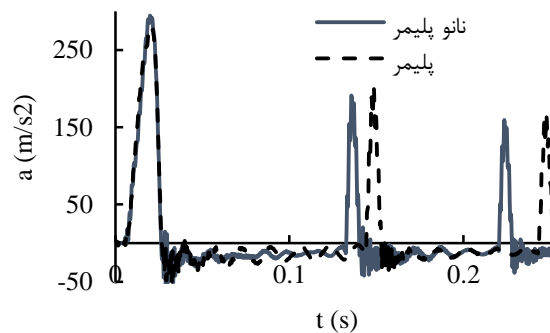
۴-۲-۲- نتایج آزمایش ضربه

۴-۲-۱- اندازه گیری شتاب

برای هر آزمایش، نمودار شتاب - زمان توسط دستگاه ضبط و ترسیم شده است. در شکل ۱۰ نمودار مذکور برای ارتفاع سقوط آزاد برابر با ۴۰ سانتی متر و ورق دولایه پلیمری و نانو پلیمری نشان داده شده است. پارامتر مهم این آزمایش، حداکثر شتاب ثبت شده در اولین برخورد بین ضربه زننده و دو لایه می‌باشد. طبق نمودار بدست آمده شکل ۱۰ کل برخورد از زمان شروع تماس تا لحظه برگشت ضربه زننده به سمت بالا در زمان کمتر از ۰/۰۳ 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.

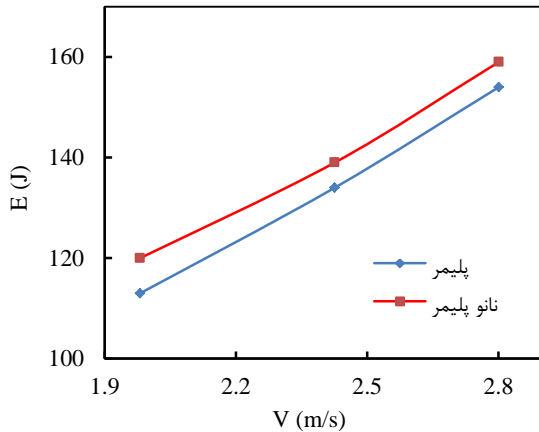


شکل ۹ نمودار تنش کرنش برای پلی اوریا و نانو پلی اوریا

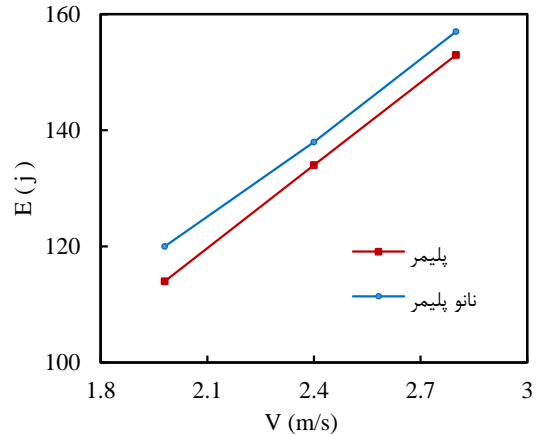


شکل ۱۰ مقایسه تغییرات شتاب برای دولایه پلیمری و نانو پلیمری

1. Elongation
2. Elongation



شکل ۱۴ مقایسه انرژی جذب شده بر حسب سرعت برخورد برای ورق دولایه پلیمری و نانو پلیمری



شکل ۱۲ مقایسه شتاب ضربه زنده بر حسب سرعت برخورد برای ورق دولایه پلیمری و نانو پلیمری

مطابق شکل مشاهده می‌شود که جذب انرژی در سرعت‌های برخورد کم؛ بیشتر می‌باشد همچنین مقایسه ماده پلیمری و نانو پلیمری نشان می‌دهد که افزودن ذرات نانو حدود ۵ درصد قابلیت جذب انرژی را بهبود داده است. مقدار انرژی جذب شده برابر است با انتگرال زیر منحنی نیرو - تغییر مکان لذا در صورتی که در بازه معین مقدار نیرو افزایش داشته باشد می‌توان گفت انرژی برخورد نیز زیاد می‌شود که این موضوع در مقایسه نمودارهای ۱۲ و ۱۴ نشان داده شده است.

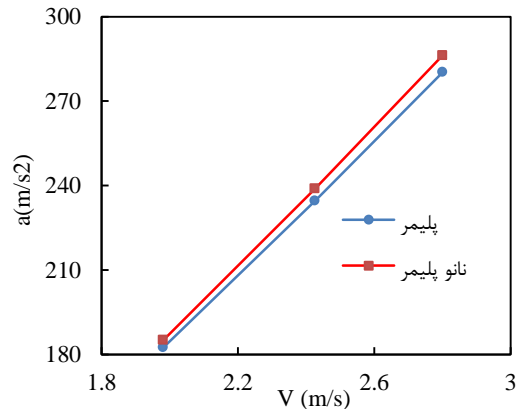
۵- نتیجه‌گیری

در محاسبه تغییر شکل ماندگار ورق دولایه پلیمری و نانو پلیمری علت اصلی اختلاف حدود ۷ درصدی بین نتایج عددی و آزمایش انجام بخاطر محدودیت‌های اندازه‌گیری با آزمایش می‌باشد بدین معنی که در حالت عددی اندازه‌گیری، برای نقطه دارای حداکثر تغییر مکان 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 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 مدل سازی عددی اثر اصطکاک میله‌های راهنما لحاظ نشده و تماس بدون اصطکاک فرض شده است.

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 ۷ درصد است که با توجه به اختلاف منظم و ثابت داده‌ها در این حالت می‌توان آنرا به علت خطای اندازه‌گیری دستگاه سقوط آزاد دانست چرا که این سیستم؛ دستگاه مناسبی برای اندازه‌گیری دقیق نیست. استفاده از روش پلیمری پلی اوریا اثر خوبی بر روی استحکام ضربه ای و جذب انرژی دارد اگرچه باعث افزایش شتاب برخورد می‌شود ولی مقدار تغییر شکل ماندگار را کاهش می‌دهد و لذا یکی از پارامترهای مهم طراحی را بهبود می‌دهد. این بهبود استحکام و جذب انرژی در نمودار شکل ۱۱ و ۱۴ نشان داده شده است. این رفتار افزایشی برای سطوح انرژی بالاتر (افزایش ارتفاع پرتاب یا جرم وزنه‌ها) نیز صادق می‌باشد؛ اما هزینه‌های جانبی و

۴-۵- مقایسه تغییرات شتاب در مدل عددی و تجربی

تغییرات شتاب برای دو حالت تجربی و عددی در شکل ۱۳ نشان داده شده است با دقت در نتایج این شکل مشاهده می‌شود که شتاب برخورد با افزایش سرعت ضربه زنده (یا با افزایش ارتفاع سقوط آزاد) افزایش می‌یابد که نمودار داده‌های آزمایشی هم رفتار مشابه را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است انتخاب حالت‌های مختلف تماس در مدل عددی منجر به جواب‌های مشابه می‌شود که مقدار حداکثر شتاب را با دقت بالایی برآورد می‌کنند اما تغییرات نمودار شتاب- زمان متفاوت می‌باشد که مدل تماس سطح به سطح نمودار مشابه را در آزمایش و عددی نشان می‌دهد.



شکل ۱۳ تغییرات شتاب دولایه پلیمری بر حسب ارتفاع سقوط آزاد

۴-۶- 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 دقیقاً مشابه منحنی ۱۰ می‌باشد با این تفاوت که دامنه منحنی‌های نیرو نسبت به منحنی شتاب در جرم ضربه زنده (عدد ۴۶) ضرب می‌شود.

۴-۷- مقایسه انرژی جذب شده در اثر ضربه

مقدار انرژی جذب شده در اثر ضربه برای ورق پلیمری و نانو پلیمری در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

پیچیدگی فرآیند تولید این نانو پلیمر استفاده از آن را برای بهبود استحکام ورق درب خودرو غیر منطقی نشان می دهد لذا با تغییر ضخامت لایه پلیمری از ۱ میلیمتر به مقادیر بالاتر و حدود ۳۰ میلی متر می توان از این ماده برای بهبود استحکام در مقابل نفوذ گلوله در سرعت‌های بالا استفاده نمود که این کاربرد با توجه به وزن کم لایه پلیمری در خودروهای ضد گلوله کاملاً توجیه پذیر می‌باشد.

نتایج این تحلیل جدا از موارد استفاده در خودروها در طراحی بدنه موشک‌ها قابل استناد است که در این موارد، لازم است جنس ماده مورد تحلیل و سرعت برخورد بازمینی شود اما روش تحلیل و آزمایش دقیقاً مشابه می باشد.

با توجه به هزینه زیاد و فرآیند خاص افزودن ذرات نانو به ماده پلیمری بنظر می‌رسد این روش امتیاز ویژه ای برای حالت‌های سرعت پایین نداشته است ولی برای حالت‌های سرعت بالا و برخوردهای بالستیک استفاده از ذرات نانو با بهبود بیشتر مقاومت ضربه ای همراه خواهد بود چرا که در این حالت تنش تسلیم و مدول الاستیک اثر مستقیم در جذب انرژی داشته و استفاده از این ذرات در مواد پلیمری با ضخامت‌های بالاتر و در سرعت‌های برخورد زیاد و ضربه‌های بالستیک مقرون به صرفه می‌باشد. استفاده از تکنولوژی تولید ماده پلی اوریا و نانو پلی اوریا در مقایسه با مواد مشابه مانند پلی اورتان امتیاز ویژه ای در زمان تولید و بهره برداری دارد بطوری که ماده پلی اوریا در مدت زمان حدود ۵ ثانیه به حالت لاستیکی و صلب رسیده و قابل استفاده می‌باشد اما پلی اورتان چندین ساعت زمان لازم دارد تا به خواص مطلوب رسیده و قابل بهره برداری باشد.

۶- مراجع

- [1] Chongdu, C. and Guiping, Z., "Dynamic Response and Damage of Composite Shell under Impact," KSME International, Vol. 13, No. 9, pp. 956-608, 1999.
- [2] Damodar, R. A. and James, H. S., "Effect of Curvature on the Impact Damage Characteristic and Residual Strength of Composite Plates," Nasa Langley Research Center. AIAA Paper No. 98 -1881.
- [3] McShane, G.J. Stewart, C. 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Pole, M. H., and Liaghat, Gh., "Experimental and Analytical Penetration Analysis in Nano Composites". In Persian, PhD Thesis Mechanical Engineering, TMU. Tehran, Iran 2012.
- [7] Isik, I. Yilmazer, U. and Bayram, G., "Impact modified epoxy/montmorillonite nanocomposites, synthesis and characterization," Polymer, Vol. 44, No. 20, pp. 25-44, 2003.
- [8] GunaSingh, C. Soundararajanand, S. and Palanivelu, K., "Studies on Mechanical, Thermal properties and Characterization of Nanocomposites of Nylon-6 -Thermoplastics Poly Urethane Rubber [TPUR] blend," Journal of Applied Chemistry, Vol. 4, pp. 65-75, 2013.
- [9] AUTODYN, EKM, Engineering Knowledge Manager, <http://orange.engr.ucdavis.edu>, available in 24 December 2015.
- [10] Hallquist, O., Ls-Dyna Theory Manual, Sec. 18.19, 2006.
- [11] LS-DYNA keyword user's manual, Vol. 1 version 960, Livermore Software Technology Corporation, Sec. 1 pp. 36, 2001.