



## مطالعه تجربی پرس کاری ورق‌های چندلایه فلز/کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف شیشه و ذرات نانو رس

فرزاد برومند قهنویه<sup>1</sup>، سیدمحمدحسین سیدکاشی<sup>2\*</sup>، محمدحسین پل<sup>3</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش

\* بیرجند، صندوق پستی 97175-376، seyedkashi@birjand.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

اضافه شدن ذرات نانو به ورق چندلایه، باعث بهبود هر چه بیشتر خواص و کارایی این چندلایه‌ها می‌شود. در این پژوهش، فرایند تغییر شکل در ورق‌های چندلایه فلز-نانوکامپوزیت شامل زمینه پلی‌پروپیلن تقویت شده با ذرات نانو رس و الیاف شیشه به‌عنوان لایه هسته و آلومینیوم 1050 آنیل شده به‌عنوان لایه‌های پوسته، با استفاده از آزمایش‌های تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، اثر درصدهای وزنی مختلف ذرات نانو رس نسبت به فاز زمینه شامل 1، 3، 5 و 7 درصد وزنی بر مقادیر عمق کشش و نیروی بیشینه تغییر شکل در فرایند شکل‌دهی پرس اندازه‌گیری شده است. به‌منظور تعیین اثر اضافه شدن ذرات نانو رس، نتایج حاصل از تغییر شکل ورق‌های چندلایه فلز/نانوکامپوزیت با ورق چندلایه فلز/کامپوزیت شامل فاز زمینه پلی‌پروپیلن خالص تقویت شده با الیاف شیشه بدون ذرات نانو رس مقایسه شده است. نتایج حاصل نشان‌دهنده قابلیت اجرای فرایند پرس کاری در ورق‌های چندلایه فلز/نانوکامپوزیت می‌باشد. همچنین مشاهده شد که به‌طور کلی با اضافه شدن درصدهای مختلف ذرات نانو رس، پارامترهای کشش شامل نیروی بیشینه و عمق کشش تغییر یافته است. همچنین مکانیزم‌های آسیب غالب در تمامی نمونه‌ها، ترک‌خوردگی لایه‌ها و جدایش بین لایه‌ها می‌باشد. اضافه شدن ذرات نانو رس تأثیری بر اصول مکانیزم شکست در فرایند شکل‌دهی پرس ورق‌های چندلایه فلز/کامپوزیت ندارد و تنها بر مقادیر پارامترهای فرایند کشش تأثیرگذار می‌باشد.

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 17 اسفند 1399  
داوری اولیه: 26 اسفند 1399  
پذیرش: 29 اسفند 1399

### کلیدواژگان:

ورق چندلایه فلز/نانوکامپوزیت  
ذرات نانو رس  
مکانیزم تغییر شکل  
فرایند پرس کاری

## Experimental study on stamping of metal/composite laminates reinforced with glass fibers and nanoclay particles

Farzad Boroumand Ghahnave<sup>1</sup>, Seyed Mohammad Hossein Seyedkashi<sup>1\*</sup>, Mohammad Hossein Pol<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran.

\*P.O.B. 9717434765, Birjand, iran, seyedkashi@birjand.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received: 8 March 2021  
First Decision: 17 March 2021  
Accepted: 20 March 2021

### Keywords:

Metal-Nanocomposite Laminates  
Nanoclay Particles  
Deformation Mechanism  
Stamping Process

### Abstract

The addition of nanoparticles to the multilayer sheets improves the properties and performance of these laminates. In this research, the deformation process in metal-nanocomposite laminates including polypropylene matrix reinforced with nanoclay and glass fibers as core layer and annealed aluminum 1050A as the skin layer has been investigated using experimental method. In this regard, the effect of different weight percentages of nanoclay relative to the base phase, including 1, 3, 5 and 7 wt% on the values of drawing depth and maximum drawing force in the stamping process has been measured. In order to determine the effects of adding nanoclay particles, the results of deformation of metal/nanocomposite laminates are compared with metal/composite laminate including pure polypropylene reinforced with glass fibers. The results show the ability to perform stamping process of metal/nanocomposite laminates. It was observed that in general, with the addition of different percentages of nanoclay particles, drawing parameters including the maximum drawing force and the drawing depth have changed. Also, the failure mechanisms in all samples are crack growth in layers and delamination of layers. Addition of nanoclay particles has no effect on the principle of failure mechanism in the stamping process of metal/composite laminates and only affects the values of the process parameters.

مشکلات فراوانی همراه است [1]. علاوه بر مشکلات تولید

لایه‌های کامپوزیتی، تولید چندلایه‌ها نیز به دلیل حضور فلز و کامپوزیت در کنار هم و خواص مکانیکی و گرمایی متفاوت این

### 1- مقدمه

باوجود مزایای بسیار گسترده ورق‌های چندلایه فلز/کامپوزیت و اهمیت این مواد در صنایع پیشرو، تولید این محصولات با

Please cite this article using:

F. Boroumand Ghahnave, S. M. H. Seyedkashi, M. H. Pol, Experimental study on stamping of metal/composite laminates reinforced with glass fibers and nanoclay particles, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 2, pp. 1- 10, 2021 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

کلوئید سی‌بی بر روی رفتار بالستیکی و خواص مکانیکی کامپوزیت لایه‌ای الیاف شیشه/اپوکسی با بافت دوبعدی را با استفاده از آزمایشات بالستیک و تست کشش بررسی نموده و با استفاده از عکس‌برداری از سطح شکست توسط میکروسکوپ الکترونی، نانو کامپوزیت اپوکسی/نانو رس را مورد ارزیابی قرار دادند. بررسی نتایج نشان می‌دهد که در سرعت‌های نزدیک حد بالستیک، بیشترین افزایش در مقدار جذب انرژی به مقدار 4/5 درصد مربوط به افزودن 5 درصد وزنی نانو رس می‌باشد. در حالی که با افزایش سرعت برخورد، جهت افزایش توانایی جذب انرژی ممکن است احتیاج به درصدهای وزنی بالاتری از نانو رس یعنی در حدود 7 درصد وزنی باشد.

اضافه شدن ذرات نانو رس به لایه کامپوزیتی می‌تواند بر خواص کل ورق چندلایه نیز تأثیرگذار باشد. برومند و همکاران [10] به بررسی تأثیر افزودن ذرات نانو رس بر عمق کشش و نیروی شکل‌دهی در فرایند کشش عمیق فلز نانو کامپوزیت‌های تقویت‌شده با ذرات نانو رس پرداختند. بهاری سامبران و همکاران [11] به بررسی رفتار ورق‌های چندلایه تحت خمش و ضربه پرداختند. آن‌ها اثر ذرات نانو رس بر خواص ورق‌های چندلایه فلز-کامپوزیت را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان‌دهنده تأثیر ذرات نانو رس بر خواص خمشی و مقاومت به ضربه در این ورق‌ها بود.

باتوجه به اثر مطلوب ذرات نانو رس بر خواص لایه کامپوزیتی و ورق‌های چندلایه و لزوم تولید محصولات مختلف از این ورق‌های چندلایه، در این مقاله فرایند تغییر شکل کششی با پرس به‌عنوان یکی از روش‌های شکل‌دهی پرکاربرد در ورق‌های تک‌لایه بر روی ورق‌های چندلایه ساخته شده از رویه آلومینیومی و لایه داخلی پلیمری از جنس پلی‌پروپیلن تقویت شده با الیاف شیشه و ذرات نانو رس انجام شده است تا امکان ایجاد تغییر شکل در ورق‌های چندلایه فلز/نانو کامپوزیت بررسی شود. زیرا اضافه شدن ذرات نانو به ورق‌های چندلایه علی‌رغم بهبود برخی خواص مکانیکی ممکن است موجب کاهش و تضعیف قابلیت تغییر شکل آن‌ها شود و این موضوع کمتر مورد توجه محققین قرار گرفته است. در اینجا از پلی‌پروپیلن به علت اینکه یک پلیمر گرمانرم پرکاربرد و شکل‌پذیر است، استفاده شده است. در ضمن ترکیب پلی‌پروپیلن و الیاف شیشه بسیار پرکاربرد و رایج بوده و به همین دلیل برای لایه کامپوزیتی ورق‌های چندلایه در این تحقیق استفاده شده است. در ادامه برای مطالعه نحوه و میزان تأثیر اضافه نمودن ذرات نانو رس بر فرایند، مقادیر نیروی بیشینه کشش و عمق کشش در فرایند

دو، فرایند بسیار سخت و پیچیده‌ای دارد [2]. بنابراین برای تولید محصولات و به خصوص تولید انبوه می‌توان از فرایند های شکل‌دهی ورق‌های چندلایه فلز/کامپوزیت استفاده نمود.

موسه و همکاران در سال 2005 [3] به بررسی شکل‌دهی ورق‌های چندلایه با زمینه پلی‌پروپیلن تقویت شده با الیاف شیشه پرداختند. آن‌ها جدایش بین لایه‌ها را مهم‌ترین عیب فرایند یافتند به طوری که شکل‌دهی در دمای اتاق منجر به جدایش بین لایه‌ها می‌شود. گرشام و همکاران در سال 2006 [4] به شکل‌دهی پرسی ورق‌های چندلایه با رویه آلومینیومی و لایه داخلی کامپوزیتی زمینه پلی‌پروپیلن پرداختند. آن‌ها تأثیر پارامترهایی نظیر نیروی ورق گیر و دمای شکل‌دهی را بر عیوب فرایند بررسی نمودند. ریس و کانگ [5] در سال 2007 به بررسی رفتار مکانیکی ورق فلز/کامپوزیت گرمانرم سبک‌وزن پلی‌پروپیلن خودتقویتی و پلی‌پروپیلن تقویت‌شده با فیبر شیشه پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که جدایش بین لایه‌ها در حین فرایند شکل‌دهی مهم‌ترین عیب این فرایند می‌باشد. سکستون و همکاران [6] در سال 2012 بر روی شکل‌دهی اتساعی ورق‌های چندلایه آلومینیوم/پلی‌پروپیلن کارکردند. آن‌ها از این پژوهش نتیجه گرفتند که امکان به‌کارگیری روش مرسوم شکل‌دهی اتساعی فلزات بر روی این ورق‌ها و شکل‌دهی انبوه آنها وجود دارد. کالیاناسوندرام و همکاران [7] نیز در سال 2013 به بررسی اثر پارامترهای فرایند در طول شکل‌دهی ورق فلز/کامپوزیت بر پایه پلی‌پروپیلن خودتقویتی پرداختند. آن‌ها از یک قالب باز به‌منظور پرس کاری استفاده نمودند. آن‌ها اثر پارامترهای نیروی ورق گیر و دما را بر کرنش اصلی و نرخ کرنش بررسی نمودند.

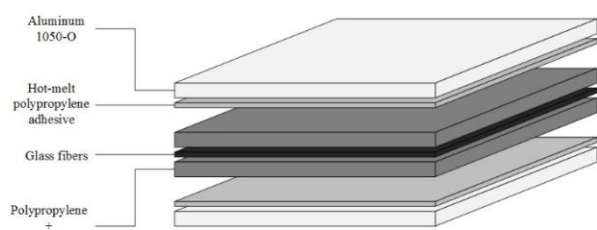
حضور ذرات نانو در لایه کامپوزیتی ورق‌های چندلایه فلز/کامپوزیت با تأثیر بر خواص لایه کامپوزیتی و یا وضعیت اتصال آن با لایه‌های فلزی می‌تواند موجب تأثیر بر کل ورق چندلایه شود. اخیراً نوعی از نانو ذرات که در ورق‌های چندلایه فلز/نانو کامپوزیت مورد توجه قرار گرفته و توسعه یافته‌اند، نانو ذرات رس می‌باشند. اضافه شدن ذرات نانو رس به کامپوزیت می‌تواند باعث بهبود برخی خواص از جمله افزایش در مدول، استحکام، مقاومت در برابر حرارت و کاهش در نفوذپذیری گاز و اشتعال‌پذیری شود. پل و همکاران [8] اثر نانو رس را بر خواص مکانیکی کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه بافته شده بررسی نمودند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که ذرات نانو رس پتانسیل افزایش خواص کششی، خمشی و پانچ را دارد.

پل و همکاران [9] به بررسی خواص بالستیک در نانو کامپوزیت‌ها پرداختند. آن‌ها در این تحقیق تأثیر نانو رس

پلیمر توسط ذرات نانو پوشش‌دهی شده‌اند. پوشش‌دهی با این روش موجب دستیابی به درصد‌های وزنی کاملاً دقیق از ذرات نانو و گرانول‌های پلیمر می‌گردد و از خطای احتمالی به‌هم‌خوردن نسبت‌های وزنی مواد در حین ریخته شدن در دستگاه اکسترودر می‌کاهد. به‌منظور دستیابی به خواص مناسب، باید از خشک بودن کامل مواد به‌خصوص با توجه به آب‌دوست بودن ذرات نانو رس، اطمینان حاصل شود. در نتیجه برای خشک نمودن کامل گرانول‌های پوشش‌دهی شده با ذرات نانو رس، مواد به مدت 24 ساعت درون آن در دمای 80 درجه سانتیگراد قرار گرفته‌اند. در انتها مواد توسط اکسترودر در دمای 200 درجه سانتیگراد ترکیب شده و به‌صورت گرانول‌های نانو کامپوزیتی درآمده‌اند. از این نانو کامپوزیت‌ها در مرحله بعد و برای ساخت ورق چندلایه استفاده شده است.

برای ساخت ورق‌های چندلایه از روش لایه چینی دستی و پخت، توسط پرس گرم استفاده شده است. الیاف شیشه بافته در بین دولایه از نانو کامپوزیت پلی پروپیلن/نانو رس به همراه چسب گرما ذوب پلی پروپیلن قرار گرفته و کل لایه کامپوزیتی بین دولایه آلومینیومی ساندویچ شده است. شکل 1 چیدمان لایه‌ها برای ساخت ورق‌های چندلایه در این تحقیق را نشان می‌دهد.

پس از لایه چینی دستی، مواد درون یک قالب مکعبی با عمق 2 میلی‌متر قرار گرفته و سپس توسط پرس داغ، تحت فشار 1.5 مگاپاسکال و دمای 220 درجه قرار گرفته و مجدداً تا دمای اتاق سرد شده است. نرخ افزایش دما 5 درجه سانتیگراد بر دقیقه و نرخ سرد شدن 3 درجه سانتیگراد بر دقیقه در نظر گرفته شده است. نکته مهم در ساخت این ورق‌ها این است که فشار تا سرد شدن نمونه‌ها نباید از روی آن برداشته شود وگرنه اتصال لایه‌ها به‌خوبی انجام نخواهد شد. در ضمن پیش گرمی ورق‌ها قبل از اعمال فشار انجام شده است. در نهایت ورق‌های چندلایه آلومینیوم/نانو کامپوزیت با ضخامت نهایی 2 میلی‌متر (با دقت 0/05 میلی‌متر) و با ابعاد طول و عرض کافی به‌منظور برش تمامی نمونه‌های مورد نیاز آزمایش تجربی از این ورق‌های اولیه که در قسمت‌های بعدی توضیح داده شده است، ساخته شدند.



شکل 1 چیدمان لایه‌های ورق‌های چندلایه فلز/نانو کامپوزیت

Fig. 1 Lay-up of metal-nanocomposite laminates

پرس کاری نمونه‌ها با درصد‌های وزنی مختلف ذرات نانو رس نسبت به فاز زمینه پلیمری اندازه‌گیری و با مقادیر شکل‌دهی پرس ورق چندلایه آلومینیوم/کامپوزیت تقویت شده با الیاف شیشه (بدون ذرات نانو رس)، مقایسه شده است.

## 2- روش تحقیق

### 2-1- ساخت نمونه‌ها

برای ساخت نمونه‌های چندلایه در این تحقیق از ورق آلومینیوم 1050 آنیل شده به‌عنوان لایه‌های پوسته استفاده و از لایه نانو کامپوزیتی به‌عنوان لایه هسته استفاده شده است. پلیمر گرمانرم پلی پروپیلن به‌عنوان ماتریس لایه کامپوزیتی به‌کاررفته است. پلی پروپیلن توسط الیاف شیشه بافته شده گرید E دارای خواص یکسان در هر دو جهت 0 و 90 درجه و با چگالی سطحی 200 گرم بر مترمربع تقویت شده است. از ذرات نانو رس کلوسید سی بی (Closide 30B) برای تقویت ماتریس استفاده شده است. همچنین نوعی چسب گرما ذوب پلی پروپیلن به‌عنوان عامل اتصال پلیمر به فلز در نظر گرفته شده است.

پیش از ساخت ورق‌های چندلایه، نانو کامپوزیت مورد استفاده در هسته آماده شده است. در این تحقیق به‌منظور مطالعه امکان ایجاد تغییر شکل در ورق‌های چندلایه فلز/نانو کامپوزیت و بررسی تأثیر اضافه شدن ذرات نانو بر فرایند تغییر شکل از درصد‌های وزنی مختلف ذرات نانو رس نسبت به فاز زمینه استفاده شده است. در نتیجه مقادیر 1، 3، 5 و 7 درصد وزنی ذرات نانو رس نسبت به فاز زمینه که همان پلی پروپیلن می‌باشد، تهیه شده است. به‌منظور ساخت نانو کامپوزیت، از روش اختلاط مذاب توسط اکسترودر استفاده شده است. ابتدا ذرات آب‌دوست نانو رس در کوره قرار گرفته و به مدت 24 ساعت تحت دمای 70-80 درجه سانتیگراد قرار گرفته تا خشک شود. سپس ذرات نانو رس درون حلال TPU ریخته شده و تحت عملیات جداسازی قرار گرفته است. جداسازی مناسب ذرات نانو باعث کاهش کلوخه‌ای شدن آن‌ها در حین ترکیب با پلیمرها می‌شود. هرچه جداسازی بهتر انجام گیرد، احتمال خواص مکانیکی نامطلوب و ناخواسته کمتر می‌شود. پس از جداسازی، مقدار مشخصی از گرانول پلی پروپیلن برای دستیابی به نسبت وزنی تعریف شده پلی پروپیلن/نانو رس (1، 3، 5 و 7 درصد وزنی)، به آن اضافه گردیده و توسط همزن مکانیکی، هم زده شده است. در ادامه کل ترکیب داخل دستگاه پوشش‌دهی خلاً ریخته شده و با روشن شدن پمپ مکش دستگاه، حلال مایع TPU از فیلتر نانو عبور کرده و گرانول‌های

## 2-2- بررسی کیفیت ساخت نمونه‌ها

پس از ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیتی و ورق‌های چندلایه و قبل از اجرای فرایند تغییر شکل می‌بایست از کیفیت ساخت نمونه‌ها، اطمینان حاصل شود.

نخستین مشخصه برای هر نانومواد، ساختار کریستالی آن است. پخش مناسب ذرات نانو در زمینه و عدم کلوخه‌ای شدن موجب خواص مکانیکی مطلوب‌تر در نانوکامپوزیت خواهد شد. به‌منظور بررسی نحوه پخش ذرات نانو رس در زمینه پلیمری که عامل تعیین‌کننده در خواص نانوکامپوزیت دارد، از پراش اشعه ایکس XRD استفاده شده است. الگوهای پراش اشعه ایکس از نانو رس خالص و نانوکامپوزیت‌ها با درصد‌های وزنی مختلف توسط دستگاه Bruker با طول موج  $1/540598$  آنگستروم ( $\text{Cu K}\alpha$ ) مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) برای بررسی ساختار نانوکامپوزیت‌های تولیدی استفاده شده است.

جدایش بین لایه‌ها یکی از مکانیزم‌های اصلی شکست ورق‌های چندلایه در اثر ایجاد تنش‌های برشی بین لایه‌ها در حین آزمون خمش سه‌نقطه می‌باشد؛ بنابراین بعد از تولید ورق‌ها، به‌منظور بررسی کیفیت اتصال و استحکام بین لایه‌های نانوکامپوزیتی و آلومینیومی، از آزمون خمش سه‌نقطه‌ای مطابق استاندارد ASTM D790 استفاده شده است. برای این منظور نمونه‌هایی با مقطع مستطیلی و با ابعاد  $76/8 \times 12/4$  از نمونه‌های بزرگ‌تر، توسط واترجت بریده شدند و با استفاده از دستگاه آزمون فشار یونیورسال تحت خمش قرار گرفتند. نسبت طول مؤثر به ضخامت نمونه‌ها 16 و 32 بوده و آزمون با سرعت اعمال بار 5 میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفته است. در شکل 2 مجموعه انجام آزمون خمش سه‌نقطه ای ارائه شده است. آزمون با 3 بار تکرار بر روی هر نمونه با درصد وزنی مشخص از ذرات نانو رس انجام شده و مقادیر میانگین به‌عنوان نتیجه گزارش شده است.



شکل 2 آزمون خمش سه‌نقطه  
Fig. 2 Three-point flexural test

## 2-3- فرایند شکل‌دهی

فرایند شکل‌دهی پرس کاری ورق‌های چندلایه توسط دستگاه فشار یونیورسال با ظرفیت 5 تن انجام شده است که دستگاه مورد استفاده قابلیت اندازه‌گیری نیروی تغییر شکل و جابه‌جایی پانچ و ترسیم نمودار نیرو-جابه‌جایی در حین فرایند را دارد. برای اجرای فرایند از قالب پرس کاری باز با ورق‌گیر مطابق شکل 3 استفاده شده است.

ماتریس و پانچ استوانه‌ای قالب به‌ترتیب با قطر 70 میلی‌متر و  $64/5$  میلی‌متر از جنس فولاد SPK و ورق‌گیر از جنس فولاد MO40 ساخته شده‌اند و برای سایر قطعات قالب از فولاد CK45 استفاده شده است. ابعاد قالب در جدول 1 آورده شده است.

جدول 1 ابعاد قالب

Table 1 Die dimensions

قطر قطر خارجی قطر داخلی شعاع گوشه شعاع گوشه	ماتریس سنبه	ورق‌گیر	ورق‌گیر	ماتریس سنبه	مقدار (mm)
6	9	75	160	64/5	70



شکل 3 مجموعه قالب کشش با پرس

Fig. 3 Stamping die setup

به‌منظور مهار تنش فشاری محیطی و جلوگیری از به‌وجود آمدن چروک در حین فرایند پرس‌کاری، نیروی ورق‌گیر توسط 8 فنر با اندازه‌های یکسان دارای طول 64 میلی‌متر و قطر 32 میلی‌متر و ثابت فنر  $99 \text{ N/mm}$  فراهم شده است. فنرها با فواصل مساوی روی محیط دایره‌ای شکل بر روی ورق‌گیر نصب شده‌اند تا توزیع نیروی ورق‌گیر در تمام قسمت‌های ورق‌ها یکسان باشد. همه آزمایش‌ها با سرعت  $20 \text{ mm/min}$  و در دمای اتاق انجام گرفته است. از هیچ‌گونه روان‌کاری در حین آزمایش‌ها استفاده نشده است. برای اجرای آزمون، نمونه‌های دایره‌ای شکل با قطر 110 میلی‌متر از نمونه بزرگ‌تر مستطیلی ساخته شده

مطالعه و بازدید قرار گرفت.

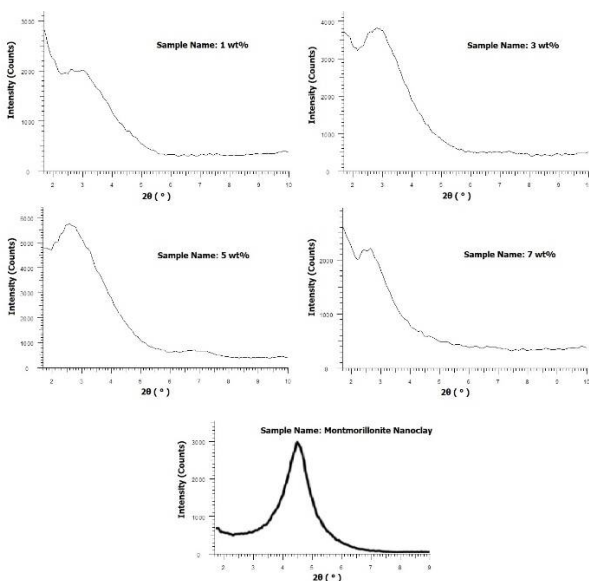
نکته مهم در بررسی هرچه دقیق‌تر اثر نانوذرات بر تغییر شکل ورق‌های چندلایه، یکسان بودن تمامی شرایط از جمله میزان نیروی ورق‌گیر، سرعت پانچ، دما و سایر شرایط در حین فرایند می‌باشد. اگرچه ممکن است شرایط در نظر گرفته شده بهینه‌ترین حالت نباشد، اما با توجه به هدف تحقیق حاضر که مطالعه اثر ذرات نانو رس بر مکانیزم‌های تغییر شکل و مقایسه بین اثر درصدهای وزنی مختلف این ذرات بر میزان تغییر شکل می‌باشد، یکسان بودن شرایط برای صحت نتایج اکتفا می‌کند.

### 3- ارائه نتایج و بحث

#### 3-1- ارزیابی کیفیت نانوکامپوزیت

نمودارهای پراش اشعه ایکس نمونه‌ها به همراه نمودار نانو رس خالص در شکل 4 نشان داده شده است.

فاصله اساسی (d) بین لایه‌های سیلیکاتی و میزان پراکندگی نانوذرات در پلیمر با استفاده از اطلاعات نمودارهای شکل 4 و قانون براگ ( $n\lambda = 2d\sin\theta$ ) محاسبه شده است که در آن n یک عدد صحیح از طول موج،  $\theta$  زاویه پراش بر حسب درجه و  $\lambda$  طول موج پرتو تابشی است.



شکل 4 نمودارهای xrd نمونه‌های نانوکامپوزیتی با درصدهای وزنی مختلف ذرات نانو رس به همراه نانو رس خالص

**Fig. 4** XRD graphs of nanocomposite specimens with different wt% of nanoclay particles along with pure nanoclay

خلاصه نتایج به دست آمده از پراش اشعه ایکس و فواصل بین لایه‌ای نمونه‌های نانوکامپوزیتی مختلف، در جدول 2 ارائه شده است. اعداد نشان می‌دهد که در تمامی حالات، نانو رس بدون رسیدن به حالت ورقه‌ای کامل، یک ساختار بین لایه‌ای در زمینه

توسط قالب و پرس داغ که در قسمت قبل توضیح داده شد و نمونه‌های آزمون خمش که از همین نمونه‌های بزرگ‌تر تهیه شده بود، توسط واترجت بریده شده است. لازم به ذکر است که تمامی نمونه‌های فرایند پرس کاری و آزمون خمش برای هر درصد وزنی مشخص (3 نمونه برای هر حالت) از یک ورق بزرگ بریده شده‌اند تا با کاهش خطاهای احتمالی، دقت نتایج افزایش یابد. کشش نمونه‌ها تا لحظه خرابی (خرابی بر اساس تمامی مکانیزم‌های شکست محتمل) که توسط افت بیش از 5 درصد نیرو در نمودار نیرو-جابجایی در این تحقیق مشخص می‌شود، ادامه داشته است. آزمایش‌ها با 3 بار تکرار بر روی هر نمونه با درصد وزنی مشخص انجام گرفت و برای بررسی هر پارامتر خروجی، مقادیر میانگین در نظر گرفته شد.

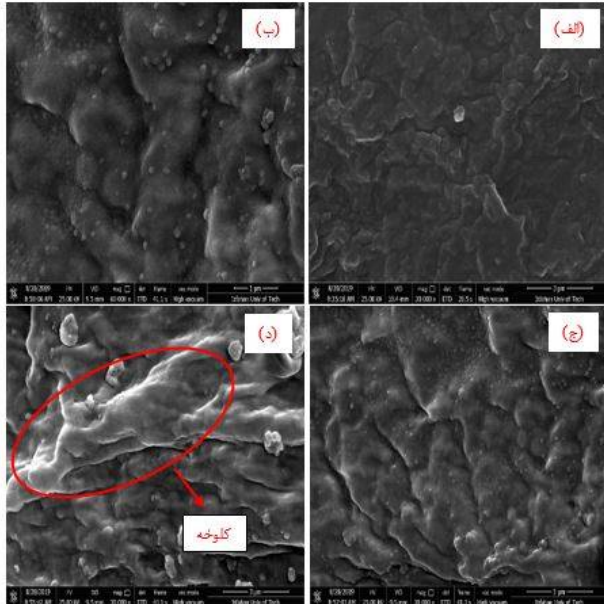
#### 2-4- ارزیابی تغییر شکل

برای ارزیابی تغییر شکل در آزمایش‌ها، مقادیر حداکثر نیروی کشش و عمق کشش به عنوان اندازه‌گیری‌هایی برای بررسی اثر اضافه شدن ذرات نانو رس بر رفتار تغییر شکل ورق‌های چندلایه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. منظور از بیشترین عمق کشش در این تحقیق همان بیشترین جابه‌جایی پانچ قابل‌دسترس تا پیش از خرابی نمونه‌ها (میزان 5 درصد افت نیرو در نمودار نیرو-جابجایی) می‌باشد. پارامتر نیروی کشش با استخراج بیشترین نیروی موجود در نمودار نیرو-جابجایی هر نمونه تعیین می‌شود. در واقع نیروی کشش معرف نیروی بیشینه لازم برای ایجاد تغییر شکل در نمونه‌ها می‌باشد. افت ناگهانی نیرو در نمودار نیرو-جابجایی می‌تواند بیان‌کننده فعال شدن مکانیزم‌های شکست و در نتیجه توقف مکانیزم تغییر شکل باشد. ذرات نانو رس با تأثیرات بر خواص مکانیکی زمینه کامپوزیتی، اتصال الیاف با زمینه و اتصال لایه کامپوزیتی با لایه فلزی می‌تواند موجب تغییرات احتمالی در مکانیزم‌های تغییر شکل و در نتیجه تغییرات نیروی کشش شود. هرچه فعالیت مکانیزم‌های تغییر شکل سخت‌تر شود، این نیرو افزایش می‌یابد؛ بنابراین تغییرات این پارامتر گزینه مناسبی برای تحلیل اثر نانو رس بر تغییر شکل و مکانیزم‌های حاکم بر فرایند کشش در ورق‌های چندلایه می‌باشد.

همچنین نمونه‌ها پس از تغییر شکل بررسی شده تا مکانیزم‌های آسیب نمونه‌ها تعیین گردند. برای درک بهتر وضعیت لایه‌های داخلی و مکانیزم‌های شکست، نمونه‌های تغییر شکل داده شده از وسط به صورت قطری برش خورده و بررسی گردیدند. در ادامه، لایه‌ها از یکدیگر جدا شده و وضعیت لایه کامپوزیتی داخلی و سطح داخلی لایه‌های آلومینیوم مورد



نمونه‌های آزمون خمش با نسبت ضخامت به طول موثر 1:16 و شکل 6- ب نمونه‌های آزمون خمش با نسبت 1:32 را نشان می‌دهد. ابتدا آزمون خمش با نسبت 1:16 انجام شده است. مطابق با شکل 6- الف در تمامی نمونه‌ها جدایش بین لایه‌های رخ داده است.



شکل 5 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (FESEM) از نانوکامپوزیت پلی پروپیلن/نانورس شامل الف) 1 درصد وزنی نانورس ب) 3 درصد وزنی نانورس ج) 5 درصد وزنی نانورس د) 7 درصد وزنی نانورس

Fig. 5 Field emission scanning electron microscopy (FESEM) images of polypropylene/nanoclay composite including a) 1 wt% , b) 3 wt% , c) 5 wt% , and d) 7 wt% of nanoclay



شکل 6 نمونه‌های آزمون خمش سه‌نقطه

Fig. 6 Specimens in three-point flexural test

مطابق شکل 7 ملاحظه می‌شود که جدایش بین لایه‌ها بدون تخریب لایه کامپوزیتی میانی بوده است. در نتیجه جدایش بین لایه‌ها در اثر تنش برشی اعمالی به مرز لایه‌ها صورت گرفته است؛ بنابراین با کاهش تنش برشی اعمالی، از جدایش بین لایه‌ها جلوگیری نموده تا مقادیر استحکام نهایی خمشی و برشی نمونه‌ها قابل اندازه‌گیری شود.

پلیمری تشکیل داده است. در واقع نانوذرات رس پیش از اینکه به‌صورت کیفیت اکسفولیت باشند به شکل اینترکلت هستند. کیفیت اکسفولیت نانوذرات درون زمینه با معیار فاصله پایه بین صفحات (d) بیش از 10 نانومتر تعریف می‌شود [12].

تهیه نانوکامپوزیت‌هایی با مورفولوژی بین لایه‌ای به معنای قرار گرفتن زنجیره‌های پلیمری بین لایه‌های نانوذرات رسی و در نتیجه افزایش فاصله صفحات نانوذرات رسی نسبت به حالت بدون پلیمر می‌باشد که سبب افزایش سطح تماس و بهبود خواص می‌شود و بهره‌برداری از مزایای فاز نانو را فراهم می‌سازد [13]. مطابق جدول ملاحظه می‌شود که فاصله لایه‌ها حدوداً بیش از 1/5 برابر نانورس خالص است.

جدول 2 فاصله پایه اساسی نمونه‌های نانوکامپوزیتی و نانورس خالص

فاصله بین لایه (nm)	زاویه پراش (درجه)	درصد وزنی نمونه
1/8	4/7	نانورس خالص
3/3	2/7	1%
3/2	2/8	3%
3/4	2/6	5%
2/8	3/2	7%

همچنین از جدول 2 مشاهده می‌شود که فاصله بین لایه‌ای در نمونه 7 درصد وزنی برابر با 2.8 نانومتر است و نسبت به فاصله پایه نمونه‌ها با 1 تا 5 درصد وزنی، نسبتاً مقدار کمتری دارد. به‌عنوان یک قاعده کلی، باتوجه به افزایش لزجت در درصد‌های بالاتر نانوذرات و احتمال بروز کلوخیدگی، فواصل بین لایه‌ای ممکن است کمتر از نمونه‌ها با درصد‌های پایین‌تر باشد. در نتیجه فاصله بین لایه‌ای کمتر نمونه 7 درصد در این تحقیق نمایانگر اختلاط نامناسب‌تر نانورس در زمینه پلی پروپیلن است که به جدایش کمتر ذرات نانو از یکدیگر و احتمالاً کلوخیدگی آن‌ها منجر شده است.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی از نمونه‌های نانوکامپوزیتی با درصد‌های وزنی مختلف در شکل 5 نشان داده شده است. مطابق با شکل 5 کلوخه شدن ذرات نانو رس در نمونه 7 درصد وزنی مشاهده می‌گردد. اما در سایر نمونه‌ها نحوه پخش‌شوندگی ذرات نانو رس درون زمینه پلیمری مناسب بوده و اثری از کلوخه به چشم نمی‌خورد. بروز کلوخه در نمونه می‌تواند منجر به تضعیف خواص نمونه گردد.

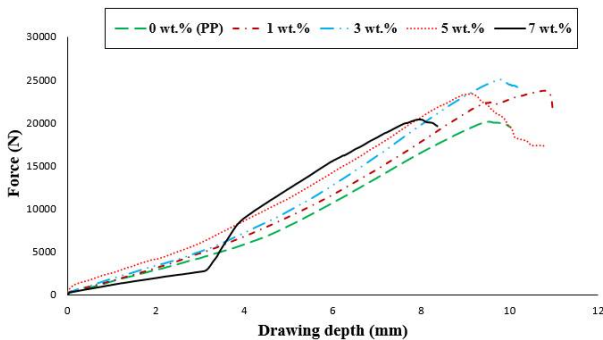
### 3-2- نتایج آزمون خمش سه‌نقطه‌ای

شکل 6 نمونه‌های ورق‌های چندلایه با درصد‌های وزنی مختلف پس از آزمون خمش سه‌نقطه‌ای را نشان می‌دهد. شکل 6- الف

پژوهش تحت فرایند تغییر شکل کششی با پرس قرار گرفتند.

### 3-3- نتایج فرایند پرس کاری

تغییر شکل در ورق‌های چندلایه آلومینیوم/نانوکامپوزیت با درصد‌های وزنی مختلف نانو رس انجام شده است و نمودارهای نیرو - جابه‌جایی ترسیم شده است. نمودارهای نیرو - جابه‌جایی حاصل از کشش پرسی ورق‌های چندلایه با مقادیر مختلف ذرات نانو رس در شکل 8 نشان داده شده است.



شکل 8 نمودار نیرو-جابه‌جایی حاصل از فرایند تغییر شکل کششی با پرس نمونه‌های ورق چندلایه فلز-نانوکامپوزیت با مقادیر مختلف ذرات نانو رس.

Fig. 8 Force-displacement diagram of the tensile deformation in stamping of metal-nanocomposite laminates with different amounts of nanoclay particles

تغییر شکل تا لحظه افت نمودار تا 5% نیروی بیشینه انجام شده و پس از آن متوقف شده است. مطابق با شکل 8 مشاهده می‌شود که رفتار تمامی نمونه‌ها شبیه به هم می‌باشد. در نتیجه باتوجه به این که رفتار موجود در منحنی‌ها متأثر از مکانیزم‌های تغییر شکل و شکست می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که این مکانیزم‌ها در تمامی نمونه‌ها یکسان می‌باشد. اما منحنی‌ها از نظر کمیت با یکدیگر متفاوت بوده و مقادیر متفاوت نیرو و عمق کشش را در نمونه‌های مختلف نشان می‌دهند. این موضوع نشان‌دهنده اثر ذرات نانو رس بر پارامترهای فرایند شکل‌دهی با پرس ورق‌های چندلایه فلز/کامپوزیت می‌باشد. مقادیر نیروی بیشینه کشش از نمودار نیرو-جابه‌جایی استخراج شده و در جدول 4 آورده شده است. مقادیر برای هر حالت، میانگینی از سه بار تکرار آزمون می‌باشد.

مطابق جدول 4 بیشترین مقدار نیروی بیشینه مربوط به نمونه با 3 درصد وزنی ذرات نانو رس با مقدار 24000 نیوتن می‌باشد که در مقایسه با نمونه خالص بدون ذرات نانو رس در حدود 19 درصد افزایش داشته است. کمترین مقدار این پارامتر نیز مربوط نمونه با 7 درصد وزنی ذرات نانو رس با مقدار 19800 نیوتن می‌باشد که حتی از نمونه خالص نیز کمتر می‌باشد؛

بنابراین آزمون خمش سه‌نقطه‌ای با نسبت 1:32 بر روی نمونه‌ها انجام گردید. افزایش طول مؤثر نمونه‌ها منجر به اعمال تنش‌های برشی کمتر در مرز بین لایه‌ها می‌گردد. مطابق با شکل 6-ب جدایش بین لایه‌ها رخ نداده است و نمونه‌ها در این نسبت چسبندگی خوبی از خود نشان دادند؛ بنابراین مقادیر محاسبه شده برای استحکام خمشی و برشی برای نمونه‌ها در نسبت 1:32 می‌تواند بیانگر میزان چسبندگی بین لایه‌ها باشد. مقادیر استحکام‌های محاسبه شده در جدول 3 آورده شده است.



شکل 7 تصویر میکروسکوپ نوری از مقطع نمونه آزمون خمش سه‌نقطه‌ای  
Fig. 7 Optical microscope image of the cross section of a three-point bending test specimen

جدول 3 مقادیر استحکام خمشی و برشی نمونه‌های ورق چندلایه فلز -

نانوکامپوزیت با درصد‌های مختلف ذرات نانو رس

Table 3 Flexural and shear strength values of metal-nanocomposite laminates with different percentages of nanoclay particles

نمونه	استحکام خمشی (MPa)	استحکام برشی (MPa)
0%	77	1/6
1%	87	1/8
3%	140	3/1
5%	130	2/6
7%	74	1/5

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، کمترین میزان استحکام خمشی معادل 74 مگاپاسکال است که رقم قابل قبولی برای ورق‌های چندلایه فلز/کامپوزیت می‌باشد. سایر نمونه‌ها هم که دارای استحکام بیشتر از 74 مگاپاسکال می‌باشند. این نکته موید کیفیت اتصال خوب نمونه‌های ساخته شده می‌باشد. بعد از این که اتصال مناسب بین لایه‌های آلومینیوم و نانوکامپوزیت در ورق‌های چندلایه تولید شده تأیید شد، این ورق‌ها در ادامه

درصد‌های وزنی مختلف صرف‌نظر از میزان افزایش و کاهش آن، باتوجه به ضخامت و قطر اولیه نمونه‌ها مقدار قابل قبولی برای فرایند کشش پرسی می‌باشد و نشان‌دهنده قابلیت شکل‌پذیری مناسب ورق‌های چندلایه فلز/نانوکامپوزیت به روش شکل‌دهی پرسی می‌باشد.

نمونه‌های تغییر شکل داده شده (تا لحظه افت نمودار) در شکل 9 نشان داده شده است. برای ایجاد تغییر شکل در ورق چندلایه می‌بایست لایه‌های آن به طور هم‌زمان تغییر شکل دهند. مکانیزم تغییر شکل در اجزای ورق چندلایه شامل مکانیزم تغییر شکل ورق آلومینیوم و لایه کامپوزیتی می‌باشد. لایه آلومینیومی به راحتی تحت کرنش پلاستیک قرار گرفته و تغییر شکل می‌دهد. برای لایه کامپوزیتی علاوه بر کرنش پلاستیک زمینه پلیمری، لغزش لایه‌ها و جابه‌جایی الیاف در زمینه نیز جزئی از مکانیزم تغییر شکل می‌باشد. هر آن چه که مکانیزم‌های تغییر شکل را متوقف نماید باعث بروز آسیب در حین فرایند تغییر شکل و در نتیجه توقف فرایند می‌گردد و از آن به‌عنوان مکانیزم‌های آسیب یاد می‌شود. مکانیزم آسیب غالب در لایه آلومینیومی ترک‌خوردگی و گسیختگی آلومینیوم و در لایه کامپوزیتی جدایش الیاف از زمینه و یا ترک‌خوردگی و گسیختگی پلیمر در اثر رشد ترک می‌باشد که خود می‌تواند ناشی از پارگی الیاف باشد. آن چه مکانیزم تغییر شکل ورق چندلایه را پیچیده‌تر از مکانیزم‌های تغییر شکل اجزای آن می‌کند، هم‌زمانی تغییر شکل اجزا تحت یک جزء واحد می‌باشد. باتوجه به تفاوت در میزان کرنش و استحکام لایه آلومینیومی و کامپوزیتی، تغییر شکل هم‌زمان اجزا یا همان لایه‌ها دشوار و تعیین‌کننده تغییر شکل کل ورق چندلایه می‌باشد. بروز مکانیزم‌های آسیب هر یک از اجزا که در بالا اشاره شد می‌تواند منجر به آسیب کل چندلایه و توقف فرایند تغییر شکل شود. اما مهم‌ترین مکانیزم آسیب در حین تغییر شکل ورق‌های چندلایه باتوجه به ماهیت اتصالی آن‌ها، جدایش بین لایه‌ها می‌باشد که همان‌طور که گفته شد عامل اصلی آن، تفاوت در میزان کرنش‌ها و استحکام لایه‌ها می‌باشد. این تفاوت باعث به‌وجود آمدن تنش‌های برشی در فصل مشترک لایه‌ها شده و در صورت غلبه بر استحکام برشی ورق چندلایه، باعث بروز عیب جدایش بین لایه‌ها و تخریب کامل ورق چندلایه می‌گردد. البته لازم به ذکر است که مکانیزم‌های آسیب هر یک از اجزا نیز نهایتاً می‌توانند منجر به جدایش بین لایه‌ها شوند. به‌طوری‌که در صورت ایجاد ترک در هر یک از لایه‌ها، رشد ترک ممکن است به فصل مشترک اتصال برسد و باعث جدایش لایه‌ها شود.

بنابراین با افزایش میزان ذرات نانو رس در فاز زمینه ورق چندلایه، ابتدا نیروی بیشینه مورد نیاز برای ایجاد تغییر شکل در نمونه‌ها افزایش و سپس کاهش یافته است.

مقادیر میانگین عمق کشش قابل‌دسترس (بیشترین جابه‌جایی تا قبل از افت نمودار نشان‌دهنده وقوع آسیب در نمونه) نمونه‌ها با درصد‌های وزنی مختلف در جدول 5 آورده شده است.

#### جدول 4 مقادیر نیروی بیشینه فرایند تغییر شکل ورق‌های چندلایه فلز-

نانوکامپوزیت با درصد‌های وزنی مختلف ذرات نانو رس

**Table 4** Maximum force in deformation of metal-nanocomposite laminates with different weight percentages of nanoclay particles

نانو رس (%)	نیروی کشش بیشینه (N)	تغییرات (%)	انحراف معیار میانگین
0	20100	0	140
1	23200	+15	100
3	24000	+19	150
5	23300	+16	70
7	19800	-2	90

#### جدول 5 مقادیر عمق کشش فرایند تغییر شکل ورق‌های چندلایه فلز-

نانوکامپوزیت با درصد‌های وزنی مختلف ذرات نانو رس

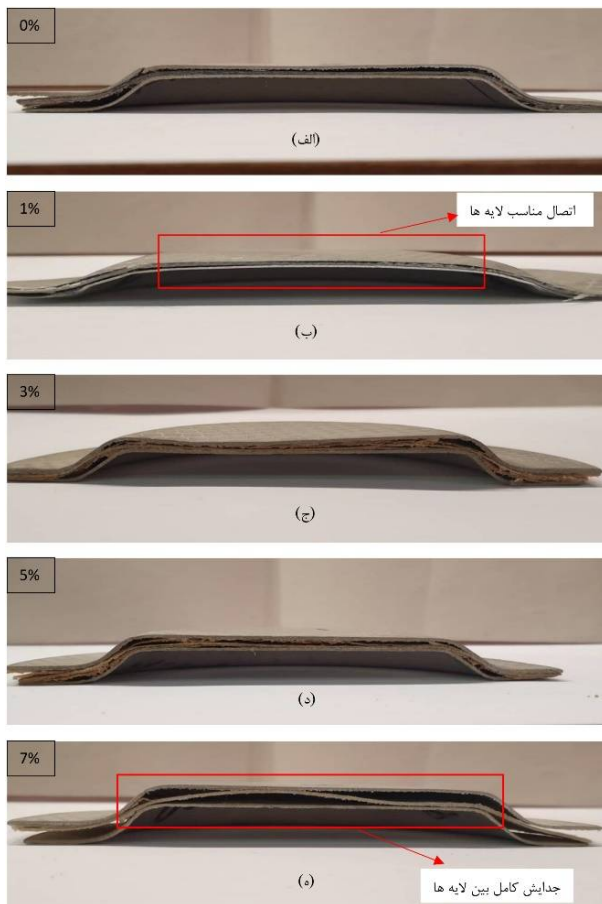
**Table 5** Drawing depth in deformation of metal-nanocomposite laminates with different weight percentages of nanoclay particles

نانو رس (%)	عمق کشش (mm)	تغییرات (%)	انحراف معیار میانگین
0	9/5	0	0/1
1	10/9	+15	0/15
3	9/9	+4	0/09
5	9/1	-4	0/2
7	8	-16	0/13

از مقادیر جدول 5 دریافت می‌شود که بیشترین میزان جابه‌جایی یا عمق کشش مربوط به نمونه 1 درصد وزنی ذرات نانو رس با مقدار 10.9 میلی‌متر می‌باشد که در حدود 15 درصد نسبت به نمونه خالص افزایش داشته است. کمترین مقدار این پارامتر هم مربوط به نمونه 7 درصد وزنی ذرات نانو رس با مقدار 8 میلی‌متر است که نسبت به نمونه خالص کاهشی در حدود 16 درصد داشته است؛ بنابراین ابتدا با افزایش میزان ذرات تا 1 درصد وزنی، افزایش قابل‌توجهی در مقدار عمق کشش مشاهده می‌گردد. پس از آن با افزایش مقادیر ذرات نانو رس، میزان عمق کشش کاهش یافته به‌طوری‌که عمق کشش در درصد‌های بالاتر حتی از میزان عمق کشش در نمونه خالص نیز کمتر شده است. میزان عمق کشش به‌دست‌آمده در تمامی نمونه‌ها با



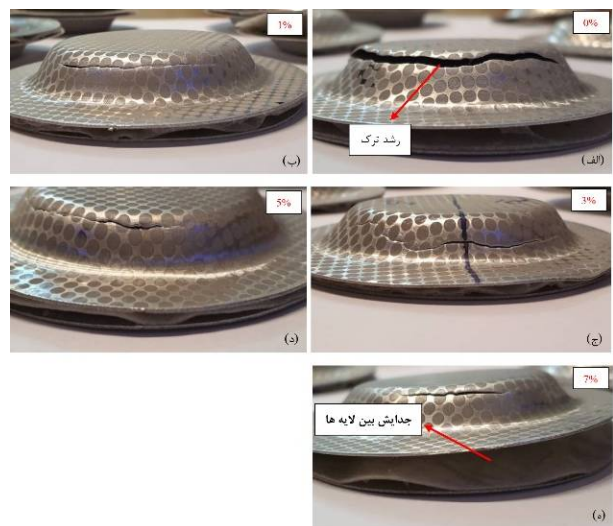
شده است. شکل‌های 11 و 12 تصاویر لایه میانی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



**شکل 10** مقطع برش خورده نمونه‌های شکل داده شده برای بررسی جدایش بین لایه‌ها با درصد وزنی نانورس الف) 0٪، ب) 1٪، ج) 3٪، د) 5٪، ه) 7٪

**Fig. 10** Cut section of formed specimens to investigate the layers debonding with a) 0 wt%, b) 1 wt%, c) 3 wt%, d) 5 wt% and e) 7 wt% of nanoclay

مطابق تصاویر شکل 9 جدایش بین لایه‌ها در تمامی نمونه‌ها مشاهده می‌گردد. همچنین ترک خوردگی بر روی لایه آلومینیومی زیرین در تمامی نمونه‌ها ایجاد شده است. در نتیجه مطابق با مشاهدات صورت گرفته ترک خوردگی در لایه آلومینیومی و جدایش بین لایه‌ها به‌عنوان مکانیزم‌های اصلی شکست در تمامی نمونه‌ها می‌باشد و مکانیزم شکست در نمونه‌های چندلایه فلز/نانوکامپوزیت مشابه با نمونه چندلایه فلز/کامپوزیت (بدون ذرات نانو) می‌باشد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اضافه شدن ذرات نانورس منجر به تغییر در اصل مکانیزم شکست نمی‌گردد. این موضوع تأییدکننده رفتار مشابه منحنی‌های نمودار نیرو-جابه‌جایی حاصل از پرس کاری نمونه‌ها می‌باشد که در بالا توضیح داده شد.



**شکل 9** نمونه‌های ورق چندلایه فلز-نانوکامپوزیت پس از فرایند تغییر شکل کششی با پرس در نمونه‌های الف) 0٪، ب) 1٪، ج) 3٪، د) 5٪، ه) 7٪ درصد وزنی نانورس

**Fig. 9** Metal-nanocomposite specimens after tensile deformation in stamping process of samples with a) 0 wt%, b) 1 wt%, c) 3 wt%, d) 5 wt% and e) 7 wt% of nanoclay

مقطع برش خورده نمونه‌ها در شکل 10 نشان داده شده است. مطابق تصاویر شکل 10، چسبندگی بین لایه‌ها پس از تغییر شکل در نمونه حاوی 1 درصد وزنی (شکل 10-ب) بهتر از باقی نمونه‌ها می‌باشد و جدایش بین لایه‌ها در این نمونه کمتر اتفاق افتاده است. این مطلب با اعداد جدول 5 که نشان‌دهنده بیشترین عمق کشش برای نمونه 1 درصد وزنی نانورس می‌باشد، مطابقت دارد. در واقع بیشترین عمق کشش به دلیل اتصال بهتر بین لایه‌ها و جدایش بین لایه‌ای کمتر در این نمونه بوده است. با جدا نمودن کامل لایه‌ها، لایه‌های داخلی بررسی

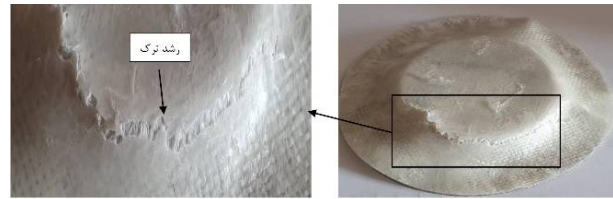


**شکل 11** آسیب لایه نانوکامپوزیتی میانی پس از تغییر شکل کل ورق

**Fig. 11** Damage of the middle nanocomposite layer after deformation of the sheet

on the press forming of polyvinyl chloride-based composite laminates and fiber metal laminates, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 89, pp. 207-217, 2017.

- [3] L. Mosse, P. Compston, W.J. Cantwell, M. Cardew-Hall, S. Kalyanasundaram, The effect of process temperature on the formability of polypropylene based fibre-metal laminates, *Composites Part A*, Vol. 36, No. 8, pp. 1158-1166, 2005.
- [4] J. Gresham, W. Cantwell, M. Cardew-Hall, P. Compston, S. Kalyanasundaram, Drawing behaviour of metal-composite sandwich structures, *Composite Structures*, Vol. 75, No. 1, pp. 305-312, 2006.
- [5] G. Reyes, H. Kang, Mechanical behavior of lightweight thermoplastic fiber-metal laminates, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 186, No. 1, pp. 284-290, 2007.
- [6] A. Sexton, W. Cantwell, S. Kalyanasundaram, Stretch forming studies on a fibre metal laminate based on self-reinforcing polypropylene composite, *Composite Structures*, Vol. 94, No. 2, pp. 431-437, 2012.
- [7] A. Rajabi, M. Kadkhodayan, M. Manoochehri, R. Farjadfar, Deep-drawing of thermoplastic metal-composite structures: Experimental investigations, statistical analyses and finite element modeling, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 215, pp. 159-170, 2015.
- [8] S. Kalyanasundaram, S. DharMalingam, S. Venkatesan, A. Sexton, Effect of process parameters during forming of self-reinforced-PP based fiber metal laminate, *Composite Structures*, Vol. 97, pp. 332-337, 2013.
- [9] M.H. Pol, G.H. Liaghat, Studies on the mechanical properties of composites reinforced with nanoparticles, *Polymer Composites*, Vol. 38, No. 1, pp. 205-212, 2017.
- [10] M. Pol, G. Liaght, F. Hajiarazi, Experimental investigation of effect of nanoclay on ballistics properties of composites, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 1, pp. 11-20, 2012.
- [11] F. Boroumad, S.M.H. Seyedkashi, M.H. Pol, Experimental study on forming of nanoclay-reinforced metal-composite laminates using deep drawing process, *Journal of Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 42, No. 10, p. 54, 2020.
- [12] F. Bahari-Sambran, R. Eslami-Farsani, S. Arbab Chirani, The flexural and impact behavior of the laminated aluminum-epoxy/basalt fibers composites containing nanoclay: an experimental investigation, *Journal of Sandwich Structures & Materials*, Vol. 22, No. 6, pp. 1931-1951, 2020.
- [13] M. Alexandre, P. Dubois, Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, Vol. 28, No. 1, pp. 1-63, 2000.
- [14] T.B. Tolle, D.P. Anderson, Morphology Development in Layered Silicate Thermoset Nanocomposites, *Composites Science and Technology*, Vol. 62, pp. 1033-1041, 2002.



شکل 12 رشد ترک در لایه نانو کامپوزیتی میانی پس از تغییر شکل کل ورق  
Fig. 12 Crack growth in the middle nanocomposite layer after deformation of the sheet

دقیقاً در محل ایجاد ترک در لایه آلومینیومی، لایه داخلی نیز دچار ترک شده است. علاوه بر بروز ترک در لایه‌های کامپوزیتی میانی، کشیدگی الیاف و جدایش بین پلیمر و الیاف نیز در لایه‌های میانی تمامی نمونه‌ها مشاهده گردید. همان‌طور که گفته شد تخریب لایه کامپوزیتی داخلی منجر به جدایش بین لایه‌ها و تخریب ورق چندلایه می‌گردد.

#### 4- نتیجه‌گیری

پس از اجرای فرایند پرس کاری و تحلیل نتایج به‌دست آمده از شکل‌دهی ورق‌های چندلایه فلز/نانوکامپوزیت با درصد‌های وزنی مختلف ذرات نانو رس موجود در فاز زمینه در این تحقیق نتایج کلی زیر حاصل گشت:

- امکان ایجاد تغییر شکل در ورق‌های چندلایه فلز/نانوکامپوزیت توسط فرایند پرس کاری تأیید گردید.
- بیشترین عمق کشش در نمونه شامل 1% وزنی ذرات نانو رس نسبت به پلیمر زمینه و معادل با 10/9 میلی‌متر و بیشترین نیرو در نمونه 3% وزنی با مقدار 24000 نیوتن رخ داده است.
- مکانیزم آسیب جدایش بین لایه و ترک خوردگی در همه نمونه‌های ورق چندلایه فلز/کامپوزیت تقویت شده با ذرات نانو رس مشاهده و به‌عنوان مکانیزم‌های آسیب اصلی معرفی شد.
- اضافه شدن ذرات نانو رس به ورق‌های چندلایه فلز/کامپوزیت تغییری در اصل مکانیزم شکست این ورق‌ها در فرایند پرس کاری ایجاد نمی‌کند.
- کلوخه‌ای شدن ذرات نانو رس درون زمینه پلیمری نمونه‌ها منجر به تضعیف قابلیت شکل‌دهی (عمق کشش قابل دسترس کمتر) ورق‌های چندلایه فلز/نانوکامپوزیت می‌گردد.

#### 5- مراجع

- [1] A. Hashemi, M. Hoseinpour Gollo, S.M.H. Seyedkashi, Bimetal cup hydroforming of Al/St and Cu/St composites: adaptive finite element analysis and experimental study, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 30, No. 5, pp. 2217-2224, 2016.
- [2] V. Zal, H.M. Naeini, A.R. Bahramian, J. Sinke, Investigation of the effect of temperature and layup