

## تعیین نمودار حد شکل دهی ورق دولایه فولاد-مس به صورت تجربی و عددی با در نظر گرفتن اتصال بین لایه ها

سید محمدرضا حسینی<sup>1</sup>، مصطفی حبیبی<sup>2</sup>، احمد عاصم پور<sup>3\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

2- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

\* تهران، صندوق پستی 11365-9567، assem@sharif.edu

### چکیده

آنچه که در این تحقیق بیشتر مورد توجه قرار گرفته نحوه مدل سازی محل اتصال در ورق های دو لایه به منظور تعیین نمودار حد شکل دهی است. در این تحقیق از ورق دولایه ای استفاده شده که مشتمل از یک لایه فولاد به ضخامت 1.35 میلی متر و یک لایه مس به ضخامت 0.45 میلی متر است. ورق دولایه به کار رفته در تحقیق حاضر به روش جوش انفجاری ساخته شده است. به منظور تعیین نمودار حد شکل دهی از روش عددی با به کارگیری نرم افزار المان محدود آباکوس استفاده شده است. در این رابطه تست های ناکازیمای شبیه سازی شدند. معیار استفاده شده برای تعیین پارگی در لایه های فولادی و مسی مدل GTN بود. همچنین قانون کشش-جدایش برای تعیین خرابی در محل اتصال ورق ها به کار برده شد. برای مدل سازی لایه میانی از المان های چسبیده استفاده شد. به منظور صحت گذاری بر نتایج به دست آمده به انجام آزمایش تجربی ناکازیمای پرداخته گردید. تمامی شبیه سازی ها و کارهای تجربی برای هر دو حالت قرارگیری ورق ها به صورت پشت و رو انجام گرفت. نتایج نشان می دهد که نمودارهای حد شکل دهی به دست آمده با استفاده از روش مدل سازی یاد شده مطابقت خوبی با نتایج تجربی دارند.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 16 اسفند 1396  
پذیرش: 07 فروردین 1397  
ارائه در سایت: 30 فروردین 1397  
کلید واژگان:  
ورق دولایه  
نمودار حد شکل دهی  
تست ناکازیمای  
قانون کشش-جدایش  
المان چسبیده

## Experimental and numerical determination of forming limit diagram of steel-copper two-layer sheet considering the interface between the layers

Seyyed Mohammad Reza Hosseini<sup>1</sup>, Mostafa Habibi<sup>1</sup>, Ahmad Assempour<sup>\*1</sup>

1- Faculty of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

\* P.O.B. 11365-9567, Tehran, Iran, assem@sharif.edu

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 07 March 2018  
Accepted 27 March 2018  
Available Online 19 April 2018

### Keywords:

Two-layer sheets  
Forming Limit Diagram  
Traction-Separation Law  
Cohesive Element

### ABSTRACT

In this study, special attention has been paid to modeling of the interface between the sheet metals in prediction of forming limit diagram (FLD) of two-layer sheets. In the present work, a two-layer sheet consists of 1.35 mm steel sheet and 0.45 mm copper sheet has been used. This two-layer sheet has been made by explosive welding method. To determine the FLD, numerical method has been used by applying ABAQUS finite element software. For this purpose, the so called Nakazima method has been simulated. The criteria used for determining the failure in steel and copper layers was GTN model. Also, in order to determine the failure in interface between the layers, the traction-separation law was used. For modeling the interface, cohesive elements were used. In order to verify the results, Nakazima tests were performed. The simulations and experimental works were done for both side directions of the sheets. The results indicate that the FLDs obtained by the numerical modeling are in good agreement with the experimental results.

فلزی در ساخت لوازم خانگی و همچنین ساخت مبدل های حرارتی نیز کاربردهای فراوانی دارد [1]. علاوه بر رسیدن به موادی با خواص ترکیب شده از مواد مختلف می توان به امکان بهبود شکل پذیری موادی که شکل پذیری کمتری دارند، افزایش مقاومت سایشی، افزایش مقاومت در برابر خوردگی و همچنین کاهش برگشت فنری به عنوان بعضی دیگر از مزایای حاصل از به کارگیری ورق های دولایه فلزی اشاره کرد [4]. استفاده از ورق های دولایه فلزی می تواند باعث افزایش میرایی صوتی و ارتعاش و کاهش چین خوردگی در ورق شود [5].

### 1- مقدمه

در سالیان گذشته ورق های دولایه فلزی با توجه به مزیت ها و کاربردهای فراوانشان در صنایع مختلف همواره مورد توجه بوده و بسیار مورد استفاده قرار گرفته اند. این ورق ها می توانند محدوده وسیعی از خواص های گوناگون مورد نیاز در کاربردهای مختلف را دربر بگیرند و در نتیجه ورق های دولایه بخش قابل توجهی از مواد به کار رفته در صنعت را تشکیل می دهند [1]. ورق های دولایه به طور گسترده در صنایع خودروسازی، هوافضا، الکترونیک، دریایی، شیمیایی و غیره [3،2] مورد استفاده قرار می گیرند. ورق های دولایه

آزمایش ناکازیمایا از یک سنبه نیم‌کروی برای شکل‌دهی ورق فلزی استفاده می‌گردد و به منظور این‌که مسیرهای مختلف کرنش و در نتیجه نقاط مختلفی در نمودار حد شکل‌دهی به دست آید، از نمونه‌هایی با ابعاد مختلف استفاده می‌گردد. در نتیجه انجام تست با هر یک از این نمونه‌ها یک نقطه از نمودار حد شکل‌دهی تعیین می‌گردد. با کاهش عرض نمونه نقاط سمت چپ نمودار حد شکل‌دهی تعیین می‌شود و با افزایش عرض نمونه نیز می‌توان به حالت تغییر شکل دو محوره متوازن دست یافت. استفاده از روش‌های تئوری به دلیل زمان‌بر بودن و هزینه به نسبت بالای تعیین تجربی نمودارهای حد شکل‌دهی همواره مورد توجه بوده است. اولین تلاش‌ها برای پیش‌بینی نمودار حد شکل‌دهی به صورت تئوری توسط مارشینیاک و کوزینسکی انجام گرفت [14,13]. در مدل مارشینیاک و کوزینسکی فرض بر این است که تمرکز کرنش و گلوپی شدن به دلیل وجود عیب ضخامت به صورت شیاری روی سطح ورق است. چوی و همکاران [15] از یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی نمودار حد شکل‌دهی استفاده کردند که در آن ایجاد کرنش در ورق به سه مرحله کرنش همگن تا رسیدن به بار نهایی تمرکز کرنش تحت یک بار ثابت و ایجاد گلوپی همراه با کاهش ناگهانی بار تقسیم شده بود. کمپوس و همکاران [16] از مدل مارشینیاک- کوزینسکی برای تعیین نمودار حد شکل‌دهی استفاده کردند. ژنگ و همکاران [17] یک معیار مناسب برای تعیین گلوپی شده در حین شکل‌دهی ورق برای تعیین نمودار حد شکل‌دهی معرفی کردند. بوتوک و همکاران [18] ضمن استفاده از مدل مارشینیاک- کوزینسکی برای تعیین نمودار حد شکل‌دهی قوانین سخت‌شوندگی، معیار تسلیم و معادلات ساختاری متفاوتی استفاده و به مقایسه نتایج حاصل شده در هر یک از حالت‌ها با نمودار حد شکل‌دهی به دست آمده به صورت تجربی پرداختند. ژو و نیل [19] به منظور تعیین نمودار حد شکل‌دهی ضمن استفاده از مدل مارشینیاک کوزینسکی، مدل پلاستیسیته کریستالی حساس به نرخ کرنش را به کار بردند. حبیبی و همکاران [20] به منظور تعیین تئوری نمودار حد شکل‌دهی به مدل‌سازی المان محدود کشش دو محوره ورق فولادی پرداختند. آن‌ها در تحقیق خود از معیار پارگی شتاب گرفتن کاهش ضخامت استفاده کرده و با انجام کار تجربی بر نتایج تئوری به دست آمده از مدل‌سازی المان محدود صحت گذاشتند.

نمودار حد شکل‌دهی ورق‌های دولایه با توجه به کاربردهای فراوان آن همواره موضوع تحقیق پژوهشگران بسیاری بوده است. کرجیبانی و همکاران [21] در تحقیقی به تعیین نمودار حد شکل‌دهی ورق‌های دو لایه پرداختند. آن‌ها برای این کار به مدل‌سازی عددی شکل‌دهی ورقی تشکیل شده از دو لایه فولاد و آلومینیوم پرداختند. آن‌ها در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که نمودار حد شکل‌دهی ورق دولایه بین نمودار حد شکل‌دهی هر یک از اجزای تشکیل‌دهنده قرار می‌گیرد و محل دقیق آن به نسبت ضخامت هر یک از اجزای آن بستگی دارد. کرجیبانی و همکاران [22] در تحقیق دیگری نمودار حد شکل‌دهی ورق دولایه مس- آلومینیوم را به دست آوردند. آن‌ها برای تعیین زمان شروع پدیده گلوپی شدن از معیار مشتق دوم کرنش نسبت به زمان استفاده کردند و موفق شدند منحنی حد شکل‌دهی را با دقت قابل قبولی تعیین کنند. سان و همکاران [23] با در نظر گرفتن لایه‌های مس و آلومینیوم به تعیین نمودار حد شکل‌دهی ورق دولایه به صورت تجربی پرداختند. آن‌ها در تحقیق خود برای پیش‌بینی محل پارگی به مدل‌سازی المان محدود فرآیند شکل‌دهی پرداختند. جلالی آقچای و همکاران [4] به منظور تعیین نمودار حد شکل‌دهی ورق دولایه از روش مارشینیاک-

با توجه به مزایای متعدد حاصل از به کارگیری ورق‌های دولایه فلزی و در نتیجه کاربرد فراوان آن‌ها در صنایع مختلف، بررسی شکل‌پذیری این ورق‌ها، امکان پارگی، کیفیت قطعات تولیدی و... همواره از اهمیت بسیاری برخوردار بوده و پژوهشگران متعددی به تحقیق در زمینه شکل‌دهی ورق‌های دولایه فلزی پرداخته‌اند. در این تحقیقات سعی شده است با استفاده از کارهای آزمایشگاهی و همچنین با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی به بررسی اثر پارامترهای تأثیرگذار و همچنین عملکرد فرآیندهای مختلف در شکل‌دهی ورق‌های دولایه پرداخته شود. کرجیبانی و همکاران [6] در تحقیقی به مطالعه عددی و تجربی شکل‌پذیری ورق دولایه‌ای ساخته شده از جنس‌های آلومینیوم و فولاد پرداخته و اثر پارامترهایی از جمله ضخامت هر یک از لایه‌ها و ترتیب قرارگیری لایه‌ها پرداختند. آن‌ها برای تعیین میزان شکل‌پذیری ورق دولایه از پارامتری به نام نسبت حد کشیدگی<sup>1</sup> استفاده کردند. این پارامتر به صورت نسبت حداکثر قطری از ورق که امکان شکل‌دهی آن وجود دارد به قطر نهایی ورق تعریف می‌شود. کرجیبانی و همکاران به این نتیجه رسیدند که مقدار پارامتر حد کشیدگی برای ورق دولایه عددی بین مقادیر آن برای هر یک از اجزای آن در حالی است که به تنهایی تحت شکل‌دهی قرار می‌گیرند، همچنین آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که با افزایش ضخامت جز شکل‌پذیرتر به طوری که ضخامت مجموع ورق‌ها ثابت بماند، افزایش می‌یابد. عطریان و صنیعی [7] در پژوهشی به مطالعه فرآیند شکل‌دهی کشش عمیق ورق دولایه‌ای از جنس فولاد و برنج پرداختند. عطریان و صنیعی با مدل‌سازی المان محدود فرآیند شکل‌دهی و همین‌طور انجام کار آزمایشگاهی به بررسی اثر ترتیب قرارگیری لایه‌ها، شرایط روان‌کاری، نیروی ورق‌گیر و قطر اولیه قطعه کار در نمودار نیرو جابه‌جایی و شکل نهایی قطعه پرداختند. باقرزاده و همکاران [8] در تحقیقی به بررسی فرآیند شکل‌دهی ورق دولایه‌ای ساخته شده از آلومینیوم و فولاد با استفاده از روش کشش عمیق هیدرومکانیکی پرداختند و شکل‌پذیری بهتر این ورق را در مقایسه با حالتی نتیجه گرفتند که شکل‌دهی آن به وسیله روش کشش عمیق سنتی انجام گرفته بود. مروتی و همکاران [9] در مطالعه خود به بررسی اثر پارامترهای مختلف بر چین‌خوردگی ورق‌های دولایه پرداختند. آن‌ها در تحقیق خود تأثیرگذاری نوع ماده و همین‌طور ترتیب قرارگیری لایه‌ها بر مقدار بهینه نیروی ورق‌گیر برای کنترل چین‌خوردگی را نتیجه گرفتند.

یکی از روش‌های کارآمد جهت پیش‌بینی پارگی و به عبارت دیگر بررسی شکل‌پذیری ورق‌های فلزی استفاده از نمودار حد شکل‌دهی<sup>2</sup> است. نمودار حد شکل‌دهی مشخص‌کننده محدوده‌ای از کرنش‌های اصلی است که ورق می‌تواند بدون پارگی تحمل کند. نمودار حد شکل‌دهی برای نخستین بار توسط کیلر [10] به دست آورده شد. نمودار کیلر کرنش‌های حدی منفی یعنی سمت چپ نمودار حد شکل‌دهی را شامل نمی‌شد. گودوین [11] نمودار حد شکل‌دهی را با در نظر گرفتن کرنش‌های حدی منفی به دست آورد و پس از آن نمودارهای حد شکل‌دهی به یک ابزار مهم برای تعیین میزان شکل‌پذیری ورق‌های فلزی تبدیل گردید.

برای تعیین نمودارهای حد شکل‌دهی روش‌های گوناگون تجربی و تئوری وجود دارد. به عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌های تجربی می‌توان به آزمایش ناکازیمایا اشاره کرد که به صورت استاندارد ارائه شده است [12]. در

<sup>1</sup> limiting draw ratio

<sup>2</sup> Forming Limit Diagram

<sup>3</sup> Nakazima Test



Fig. 1 Tensile test samples

شکل 1 نمونه‌های تست کشش



Fig. 2 Peel test sample

شکل 2 نمونه تست جدایش



Fig. 3 Shear test sample

شکل 3 نمونه تست برش

### 2-3- تست ناکازیمما

برای تعیین نمودار حد شکل‌دهی به صورت تجربی به انجام تست ناکازیمما پرداخته شد. در این روش لازم است نمونه‌های ورق فلزی تا لحظه ایجاد پارگی تحت کشش دو محوره قرار گرفته و با خواندن کرنش‌ها در لحظه شکست، نمودار حد شکل‌دهی در صفحه کرنش‌های اصلی تعیین شود. دلیل استفاده از نمونه‌های با ابعاد مختلف، دستیابی به مسیرهای مختلف کرنش و در نتیجه نقاط متمایز از نمودار حد شکل‌دهی است. ابعاد نمونه‌های به کار رفته در تست ناکازیمما در شکل 4 مشخص شده است. برای تهیه نمونه‌های آزمایش ناکازیمما از روش وایرکات استفاده گردید. پس از ایجاد نمونه‌ها، گریدهای دایره‌ای به وسیله روش حک الکتروشیمیایی با استفاده از دستگاه حک الکتروشیمیایی موجود در آزمایشگاه فرآیندهای ساخت دانشکده مهندسی مکانیک در دانشگاه صنعتی شریف بر نمونه‌های ورق حک گردید (شکل 5). برای انجام آزمایش ناکازیمما از دستگاه پرس هیدرولیک نمایش داده شده در شکل 6 استفاده گردید. نمونه‌های تهیه شده بر ماتریس قرار داده شد. پس از آن با حرکت ورق‌گیر نمونه‌ها از لبه خارجی مقید شدند، سپس سنبه را حرکت داده تا ورق دچار پارگی شود. پس از ایجاد پارگی در ورق مقادیر کرنش‌های اصلی با توجه به تغییر شکل ایجاد شده بر دایره‌های از پیش ایجاد شده اندازه‌گیری شدند.

کوزینسکی استفاده کرده و تأثیر خواص هر یک از لایه‌های ورق دولایه از جمله توان کرنش سختی، توان حساسیت به نرخ کرنش، ضریب استحکام ماده و اندازه دانه را بر این منحنی بررسی کردند.

براساس اطلاعات نگارندگان این مقاله، در تلاش‌هایی که برای تعیین نمودار حد شکل‌دهی ورق‌های دولایه انجام گرفته تاکنون توجهی به اتصال لایه‌ها و امکان جدایش آن‌ها نشده است. در این تحقیق در تعیین نمودار حد شکل‌دهی ورق دولایه اتصال بین لایه‌ها نیز در نظر گرفته شده است.

ورق در نظر گرفته شده برای این تحقیق یک ورق دولایه تشکیل شده از جنس‌های فولاد ST12 به ضخامت 1.35 میلی‌متر و مس C10100 به ضخامت 0.45 میلی‌متر است که هر دو به صورت آنیل شده<sup>1</sup> هستند. ورق به کار رفته در این تحقیق با استفاده از روش جوش انفجاری<sup>2</sup> ساخته شده است. جوش‌کاری انفجاری یک فرایند اتصال حالت جامد است که در آن انفجار کنترل شده‌ای روی سطح ورق فوقانی صورت می‌گیرد و در نتیجه آن ورق فوقانی با سرعت بسیار بالا به ورق پایه برخورد می‌کند و تحت فشار بالای ناشی از برخورد ورق‌ها، پیوندی قوی در نقاط برخورد ایجاد می‌شود. تست ناکازیمما در نرم‌افزار المان محدود آباکوس<sup>3</sup> برای تعیین نمودار حد شکل‌دهی ورق دولایه فولاد- مس شبیه‌سازی گردید. از معیار خرابی گورسون، تورگارد، نیدلمن (GTN) برای تعیین پارگی در هر یک از لایه‌های فولاد و مس استفاده شد. شبیه‌سازی لایه میانی نیز با استفاده از المان‌های چسبیده<sup>4</sup> انجام گرفت و قانون کشش- جدایش برای تعیین خرابی در آن به کار برده شد. برای اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از مدل‌سازی المان محدود به کار تجربی پرداخته شد. آزمایش‌ها جهت بررسی اثر ترتیب قرارگیری لایه‌ها بر نمودار حد شکل‌دهی در هر دو حالت قرارگیری لایه‌ها انجام گرفتند. یعنی در یک حالت فولاد لایه بیرونی و مس لایه داخلی و در حالت دیگر مس لایه بیرونی و فولاد لایه داخلی است.

### 2- کار تجربی

#### 2-1- تست کشش

آزمایش کشش برای هر یک از لایه‌ها به منظور تعیین منحنی تنش-کرنش برای هر یک از لایه‌های فولادی و مسی به طور جداگانه انجام گرفت. بدین منظور از مرجع [24] استفاده گردید. نمونه‌های مورد نظر با دقت کافی در ابعاد با استفاده از روش وایرکات ایجاد گردیدند. نمونه‌های فولادی و مسی ایجاد شده در شکل 1 به نمایش درآمده‌اند.

#### 2-2- تست‌های جدایش و برش

برای تعیین خواص لایه میانی یا به عبارت دیگر میزان استحکام اتصال بین لایه‌ها تحت بارگذاری‌های کششی و برشی تست‌های جدایش و برش بر نمونه‌های تهیه شده از ورق دولایه انجام گرفت. به منظور انجام تست جدایش نمونه‌ای مستطیلی به طول 10 سانتی‌متر و عرض 1 سانتی‌متر از ورق ایجاد گردید (شکل 2). همچنین برای تست برش از ورقی استفاده شد که اتصال لایه‌ها تنها در ناحیه‌ای مستطیلی به طول 2 سانتی‌متر و عرض 1 سانتی‌متر برقرار است (شکل 3). بدین ترتیب می‌توان با کشیدن نمونه از دو سمت در لایه میانی برش ایجاد نمود. برای هر یک از تست‌های جدایش و برش دو نمونه در جهت‌های عمود بر هم تهیه و تحت آزمایش قرار گرفتند.

<sup>1</sup> annealed

<sup>2</sup> Explosive Welding

<sup>3</sup> ABAQUS

<sup>4</sup> Cohesive Elements

3- شبیه‌سازی المان محدود

تست ناکازیم در نرم‌افزار المان محدود آباکوس به منظور تعیین نمودار حد شکل‌دهی ورق دولایه فولاد- مس شبیه‌سازی گردید. مدل ایجاد شده در نرم‌افزار در شکل 7 به نمایش در آمده است. مدل ایجاد شده شامل چهار بخش ورق، ورق‌گیر، قالب و پانچ است. در شبیه‌سازی انجام گرفته ورق به صورت شکل‌پذیر و ورق‌گیر، قالب و پانچ به صورت صلب مدل شده‌اند. تحلیل به صورت دینامیکی بوده و فرآیند در دو مرحله انجام می‌گیرد. در مرحله اول ورق‌گیر پایین آمده و ورق را از کناره‌ها به طور کامل مقید می‌کند. در مرحله دوم پانچ پایین آمده و در نتیجه ورق شکل پانچ را به خود می‌گیرد. این فرآیند تا زمانی که ورق دچار پارگی شود ادامه پیدا می‌کند. برای تعیین پارگی در لایه‌های فولادی و مسی از معیار خرابی GTN استفاده گردید. همچنین از قانون کشش- جدایش<sup>1</sup> برای تعیین خرابی در لایه میانی استفاده شد.

برای مدل‌سازی لایه‌های فولادی و مسی از المان‌های سه بعدی هشت‌گره‌ای استفاده شده است. المان‌های به کار رفته به صورت درجه اول (خطی) در نظر گرفته شده‌اند. یعنی تنها در نقاط گوشه‌های المان‌ها گره وجود دارد و لبه‌های المان‌ها به صورت خط در نظر گرفته شده‌اند. در انتگرال‌گیری عددی از المان‌ها از فرمول انتگرال‌گیری کاهش یافته<sup>2</sup> استفاده شده است، یعنی همه نقاط گوسی مربوط به یک المان در انتگرال‌گیری عددی شرکت نمی‌کنند. از المان‌های سه‌بعدی و هشت‌گره‌ای چسبنده که در بین لایه‌های فولادی و مسی قرار می‌گیرند برای مدل‌سازی لایه میانی استفاده شده است. ضخامت در نظر گرفته شده برای المان‌های چسبنده در لایه میانی برابر 0.01 میلی‌متر است. ضخامت این لایه تأثیری بر نتایج ندارد و در نظر گرفتن ضخامت برای این لایه فقط به منظور ایجاد هندسه مورد نظر است [25]. تنها یک چهارم از ورق برای کاهش حجم محاسبات مدل شده است. با تغییر اندازه المان‌ها و بررسی میزان حساسیت نتایج به دست آمده به آن، مقدار بهینه اندازه المان‌ها برای لایه‌های فولادی و مسی و همین‌طور لایه میانی تعیین شد. شبیه‌سازی فرآیند برای هر دو حالت قرارگیری لایه‌ها (پشت و رو) انجام گرفته است.

3-1- به کارگیری معیار GTN

در این تحقیق برای تعیین پارگی در لایه‌های فولادی و مسی از مدل GTN

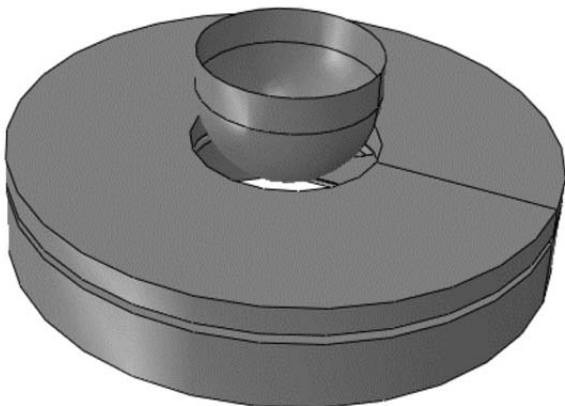


Fig. 7 Created model in ABAQUS software for simulation of Nakazima test

شکل 7 مدل ایجاد شده در نرم‌افزار آباکوس برای شبیه‌سازی تست ناکازیم

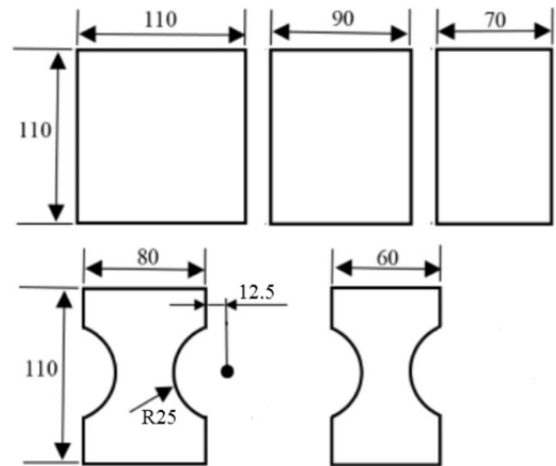


Fig. 4 Nakazima test samples (All dimensions are in mm)

شکل 4 نمونه‌های تست ناکازیم (تمامی ابعاد به میلی‌متر هستند)

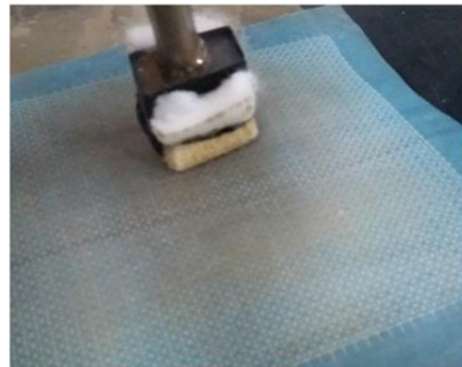


Fig. 5 Grid marking on the sheet metal blank

شکل 5 ایجاد گرید بر ورق فلزی



Fig. 6 The hydraulic press used to perform the Nakazima test

شکل 6 پرس هیدرولیکی استفاده شده برای انجام تست ناکازیم

<sup>1</sup> Traction-Separation Law

<sup>2</sup> Reduced Integration

برای شبیه‌سازی تست کشش در نرم‌افزار آباکوس در شکل 8 به نمایش درآمده است.

### 3-2- به کارگیری قانون کشش- جدایش

از قانون کشش- جدایش برای مدل‌سازی لایه میانی در ورق دولایه به کار رفته در تحقیق استفاده شده است. براساس این مدل جدایش در سه مرحله شامل رفتار خطی الاستیک، شروع خرابی و گسترش آن رخ می‌دهد [25]. در این مدل فرض بر این است که ماده در بارگذاری کششی و همین‌طور در دو جهت برشی چنین رفتاری از خود نشان می‌دهد. برای ناحیه خطی باید سه ثابت  $E_t$ ،  $E_s$  و  $E_n$  تعیین شوند.  $E_n$  شیب ناحیه خطی در نمودار تنش- جابه‌جایی است هنگامی که لایه میانی تحت کشش خالص قرار گیرد.  $E_s$  و  $E_t$  نیز بیانگر شیب ناحیه خطی در منحنی تنش- جابه‌جایی در بارگذاری برشی در دو جهت برشی هستند. با توجه به این‌که در حالت کلی لایه میانی تحت ترکیبی از بارگذاری‌های کشش و برشی قرار دارد، لازم است یک معیار برای شروع خرابی تعیین شود. معیار استفاده شده در این تحقیق برای تعیین شروع خرابی معیار مجموع مربعات تنش‌های اسمی است. براساس این معیار خرابی زمانی شروع می‌دهد که مجموع مربعات نسبت تنش‌ها به مقادیر استحکام مربوطه برابر با عدد یک، به صورت رابطه (7) شود [25].

$$\left(\frac{t_n}{t_n^0}\right)^2 + \left(\frac{t_s}{t_s^0}\right)^2 + \left(\frac{t_t}{t_t^0}\right)^2 = 1 \quad (7)$$

در رابطه (7) مقدار تنش در لایه میانی در لحظه شروع خرابی در بارگذاری کششی است.  $t_n^0$  و  $t_s^0$  نیز مقادیر تنش در لحظه شروع خرابی در دو جهت بارگذاری برشی است.

برای تعیین پارامترهای لایه میانی تست‌های جدایش و برش انجام شده در نرم‌افزار المان محدود آباکوس مدل شده و پارامترهای ورودی به گونه‌ای تغییر داده شدند که نتایج حاصل از تست آزمایشگاهی با نتایج به دست آمده از مدل‌سازی یکسان شود. در شکل 9 مدل‌های ایجاد شده برای تست‌های جدایش و برش در نرم‌افزار آباکوس برای تعیین خواص لایه میانی به نمایش درآمده است.

### 4- نتایج

#### 4-1- تعیین پارامترهای مدل GTN

با ایجاد تغییر در سه پارامتر  $f_c$ ،  $f_N$  و  $f_f$ ، شبیه‌سازی تست کشش در نرم‌افزار المان محدود آباکوس و مقایسه نتایج تئوری به دست آمده برای نمودار

جدول 1 پارامترهای مدل GTN در نظر گرفته شده براساس مراجع [31,30]

پارامتر	$f_0$	$\epsilon_N$	$S_N$	$q_3$	$q_2$	$q_1$
مقدار	0.0005	0.3	0.1	2.25	1	1.5

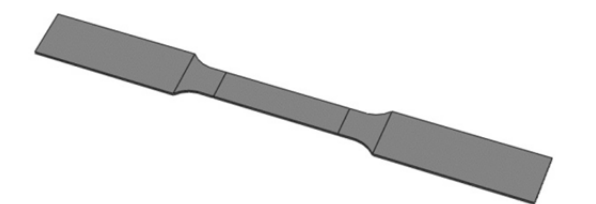


Fig. 8 Created model in ABAQUS software for simulation of tensile test

شکل 8 مدل ایجاد شده در نرم‌افزار آباکوس برای شبیه‌سازی تست کشش

استفاده شده است. در مدل GTN به بررسی میکروساختاری فلزات در حین تغییر شکل پلاستیک پرداخته می‌شود. شکست براساس این مدل شامل جوانه‌زنی میکروحفره‌های جدید، رشد میکروحفره‌ها و به هم پیوستگی میکروحفره‌هاست [26]. تابع تسلیم در این مدل به صورت رابطه (1) است [27].

$$\left(\frac{\bar{\sigma}}{Y}\right)^2 + 2q_1 f^* \cosh\left(q_2 \frac{3p}{2Y}\right) - (1 + q_3 f^{*2}) = 0 \quad (1)$$

در رابطه (1)  $\bar{\sigma}$  تنش معادل وون مایسز،  $Y$  تنش تسلیم و  $p$  تنش هیدرواستاتیک است، همچنین  $q_1$ ،  $q_2$  و  $q_3$  پارامترهای تنظیم<sup>1</sup> نامیده می‌شوند.  $f^*$  پارامتر اصلاح شده تخلخل بوده و به صورت تابعی از پارامتر تخلخل ( $f$ ) به صورت رابطه (2) نوشته می‌شود [27].

$$f^* = f + \left(1 - \frac{q_3 + \sqrt{q_1^2 - q_3}}{f_F - f_c}\right) (f_c - f) h[f_c - f] \quad (2)$$

در رابطه (2) پارامتر  $f_c$  مقداری از کسر حجمی حفره (پارامتر تخلخل) است که در آن ظرفیت تحمل بار ماده به شدت کاهش می‌یابد.  $f_F$  نیز کسر حجمی حفره‌ها در لحظه شکست است.  $h(x)$  بیانگر تابع پله‌ای هوی ساید<sup>2</sup> است.

در مدل GTN تغییرات پارامتر تخلخل از دو عامل ناشی می‌شود، یکی رشد حفره‌های موجود و دیگری هسته‌گذاری حفره‌های جدید [28] به صورت رابطه (3) است.

$$df = df_{Growth} + df_{Nucleation} \quad (3)$$

$df_{Growth}$  بیانگر اثر رشد حفره‌های موجود بوده و به وسیله رابطه (4) تعیین می‌شود [28].

$$df_{Growth} = (1 - f)(d\epsilon_{11}^p + d\epsilon_{22}^p + d\epsilon_{33}^p) \quad (4)$$

در رابطه (4)  $d\epsilon_{11}^p$ ،  $d\epsilon_{22}^p$  و  $d\epsilon_{33}^p$  بیانگر کرنش‌های پلاستیک در جهت‌های اصلی هستند.

$df_{Nucleation}$  بیانگر اثر هسته‌گذاری حفره‌های جدید بوده و به وسیله رابطه (5) تعیین می‌شود [28].

$$df_{Nucleation} = A d\bar{\epsilon}^p \quad (5)$$

که در آن  $\bar{\epsilon}^p$  کرنش پلاستیک معادل،  $A$  نیز نرخ هسته‌گذاری نامیده شده و به صورت رابطه (6) است.

$$A = \left(\frac{f_N}{S_N \sqrt{2\pi}}\right) \exp\left(-\frac{(\bar{\epsilon}^p - \epsilon_N)^2}{2S_N^2}\right) \quad (6)$$

در رابطه (6)  $\epsilon_N$  برابر مقداری از کرنش است که بیشترین مقدار حفره‌ها به ازای آن جوانه می‌زنند.  $f_N$  و  $S_N$  نیز ثوابت ماده هستند.

در معیار GTN به طور کلی 9 پارامتر وجود دارد که باید به عنوان ورودی برای خواص مواد تعیین شوند. تعیین مقادیر همه این پارامترها فرآیندی بسیار زمان‌گیر، غیرمنطقی و پرهزینه است. از طرف دیگر برای هر ماده یک ترکیب یکتا از این پارامترها وجود ندارد [30,29]. به این ترتیب از میان این 9 پارامتر، 6 پارامتر براساس پیشنهاد مراجع [32,31] انتخاب و تنها سه پارامتر دیگر شناسایی می‌شوند. شش پارامتر انتخاب شده براساس مراجع در جدول 1 مشخص شده‌اند. برای تعیین پارامترهای  $f_c$ ،  $f_N$  و  $f_f$  تست کشش در نرم‌افزار آباکوس مدل شد. مقادیر سه پارامتر یادشده آن قدر تغییر داده شدند تا نتیجه حاصل برای نمودار تنش- کرنش به دست آمده از شبیه‌سازی به نتایج به دست آمده از تست آزمایشگاهی تا حد ممکن نزدیک شود. این عمل برای هر دو ورق از جنس فولاد و مس جداگانه انجام گرفت. مدل ایجاد شده

<sup>1</sup> Adjustment Parameters

<sup>2</sup> Heaviside Step Function

جدول 2 پارامترهای مدل GTN به دست آمده برای لایه‌های فولادی و مسی  
Table 2 GTN model Parameters obtained for steel and copper layers

پارامتر	$f_F$	$f_N$	$f_c$	مقدار
	0.01	0.0022	0.002	فولاد
	0.10	0.052	0.001	مس

4-2- تعیین پارامترهای مدل کشش- جدایش

با تغییر پارامترهای لایه میانی و مدل‌سازی تست‌های جدایش و برش در نرم‌افزار المان محدود آباکوس و مقایسه نتایج به دست آمده برای نمودار نیرو- جابه‌جایی با نتایج حاصل از کار تجربی پارامترهای مدل کشش- جدایش تعیین شدند. با توجه به مشاهده نشدن اختلاف قابل توجه در نتایج در دو جهت برشی، خواص لایه میانی در این دو جهت یکسان در نظر گرفته شد. در جدول 3 پارامترهای مدل کشش- جدایش برای لایه میانی بیان شده‌اند. در شکل‌های 12 و 13 نمودارهای نیرو- جابه‌جایی به ترتیب در دو تست جدایش و برش نشان داده شده‌اند. با توجه به نتایج به دست آمده برای نمودار نیرو- جابه‌جایی برای تست‌های جدایش و برش و نحوه تغییرات نیرو بر حسب جابه‌جایی، ناحیه گسترش خرابی به صورت نمایی در نظر گرفته شد.

4-3- تعیین نمودار حد شکل‌دهی

برای تعیین نمودار حد شکل‌دهی ورق دولایه فولاد-مس تست ناکازیمیا در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شد. فرآیند تا لحظه رسیدن پارامتر تخلخل در

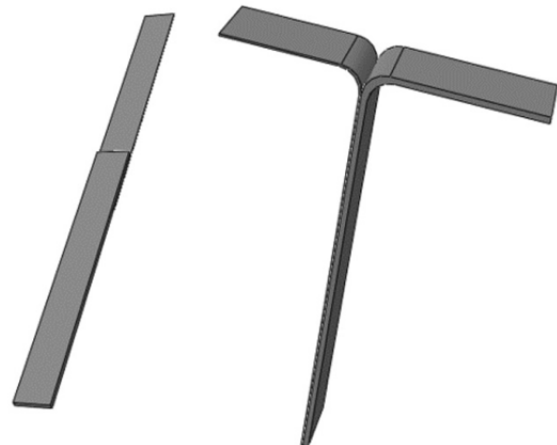


Fig. 9 Created models in ABAQUS software for simulation of peel and shear test

شکل 9 مدل ایجاد شده در نرم‌افزار آباکوس برای شبیه‌سازی تست ناکازیمیا

تنش- کرنش و مقایسه آن با نتایج تجربی تست کشش، این پارامترها برای هر دو لایه فولادی و مسی تعیین شدند. پارامترهای  $f_F$ ،  $f_N$  و  $f_c$  برای هر دولایه فولادی و مسی در جدول 2 بیان شده‌اند، همچنین در شکل‌های 10 و 11 نتایج تست کشش به دست آمده حاصل از آزمایش تجربی و شبیه‌سازی المان محدود به ترتیب برای لایه‌های فولادی و مسی نشان داده شده‌اند.

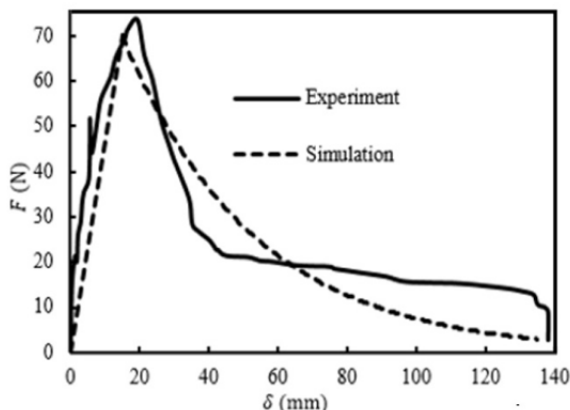


Fig. 12 Force-displacement curve obtained in peel test

شکل 12 نمودار نیرو-جابه‌جایی به دست آمده در تست جدایش

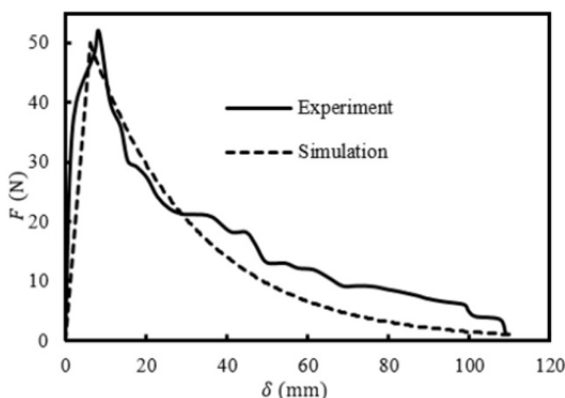


Fig. 13 Force-displacement curve obtained in shear test

شکل 13 نمودار نیرو-جابه‌جایی به دست آمده در تست برش

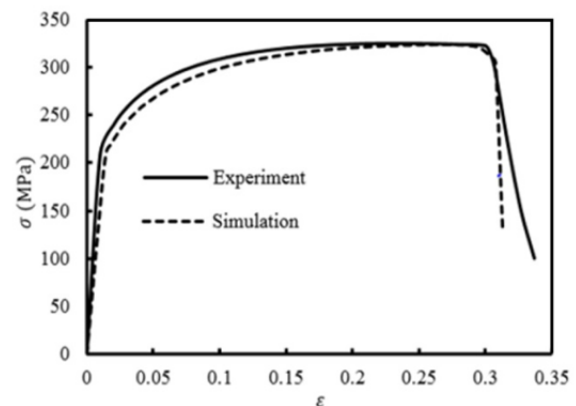


Fig. 10 Stress-strain curve for steel

شکل 10 نمودار تنش-کرنش برای فولاد

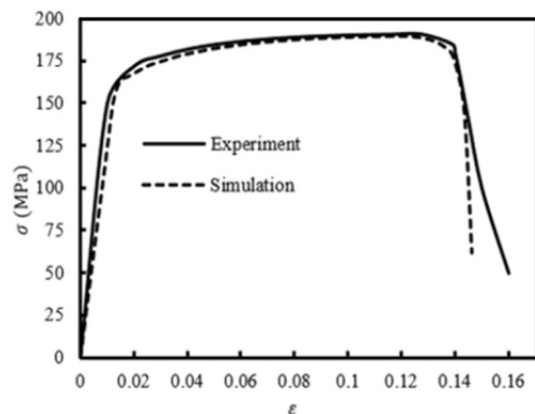


Fig. 11 Stress-strain curve for copper

شکل 11 نمودار تنش-کرنش برای مس



Fig. 14 The interface layer in ABAQUS software

شکل 14 لایه میانی در نرم‌افزار آباکوس

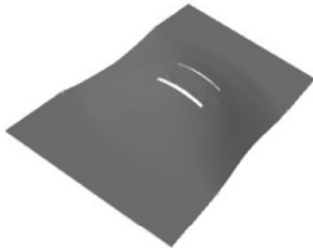


Fig. 15 The two-layer sheet in ABAQUS software

شکل 15 ورق دولایه در نرم‌افزار آباکوس



Fig. 16 Nakazima test sample

شکل 16 نمونه تست ناکازیما

جدول 3 پارامترهای مدل کشش- جدایش

Table 3 Traction-separation model parameters

$E_n$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	$t_n^0$ (MPa)	$t_s^0$ (MPa)	$t_t^0$ (MPa)	$\delta_F$ (mm)	پارامتر
3.2	2.4	2.4	31.0	23.6	23.6	0.001	مقدار

یک نقطه از ورق به مقدار خود در لحظه شکست ادامه پیدا کرد. سپس با خواندن مقادیر کرنش‌های اصلی در لحظه شکست نمودار حد شکل‌دهی تعیین شد. بر اساس شبیه‌سازی انجام گرفته مشاهده شد که پس از بین رفتن اتصال بین لایه‌ها در یک ناحیه از ورق، در ناحیه‌ای بسیار نزدیک به آن، هر دو لایه فولادی و مسی به طور همزمان دچار پارگی می‌گردند. به عبارت دیگر پارامتر تخلخل در هر دو لایه همزمان به مقادیر خود در لحظه شکست می‌رسد. در شکل 14 حذف المان‌ها با نمایش لایه میانی نشان داده شده است. در شکل 15 نیز ورق دولایه در لحظه پارگی نشان داده شده است. در آزمایش تجربی ناکازیما نیز هر دو لایه به طور همزمان دچار پارگی شدند. در شکل 16 یکی از نمونه‌های تست ناکازیما پس از ایجاد پارگی در آن نشان داده شده است. در شکل 17 نیز منحنی‌های حد شکل‌دهی به دست آمده در حالت‌های مختلف نشان داده شده‌اند.

با توجه به نتایج به دست آمده مقدار خطا در مقدار پارامتر  $FLD_0$  (مقدار کرنش شکست در حالت کرنش صفحه‌ای) در حالتی که مس لایه بیرونی است برابر با 4.1% و در حالتی که فولاد لایه بیرونی است برابر با 3.5% است، همچنین با توجه به نتایج به دست آمده نمودار حد شکل‌دهی در حالتی که مس لایه بیرونی و فولاد لایه داخلی است، پایین‌تر از حالتی قرار دارد که فولاد لایه بیرونی و مس لایه داخلی باشد. این نتیجه هم از شبیه‌سازی و هم از کار تجربی حاصل گردید. نازک بودن لایه مس و ایجاد کرنش‌های بیشتر در لایه بیرونی می‌تواند دلیل این موضوع باشد.

### 5- جمع‌بندی

در این تحقیق به پیش‌بینی نمودار حد شکل‌دهی ورق دولایه تشکیل شده از لایه‌های از جنس فولاد و مس پرداخته شد. برای تعیین پارگی در لایه‌های

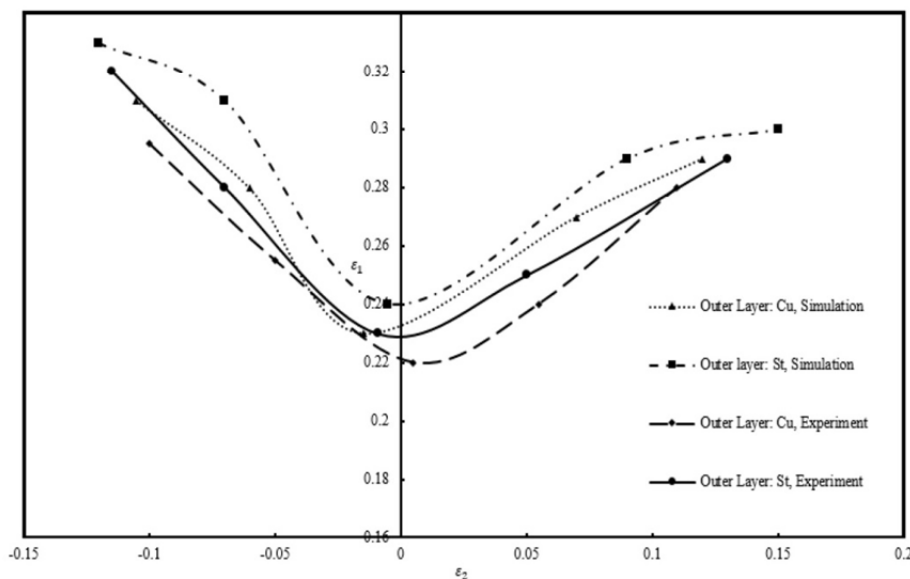


Fig. 17 Forming limit diagrams obtained for steel-copper two-layer sheet

شکل 17 منحنی‌های حد شکل‌دهی به دست آمده برای ورق دولایه فولاد- مس

- [12] M. Habibi, A. Ghazanfari, A. Assempour, R. Naghdabadi, R. Hashemi, Determination of Forming Limit Diagram Using Two Modified Finite Element Models, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 48, No. 4, pp. 379-388, 2017.
- [13] A. Ghazanfari, A. Assempour, M. Habibi, R. Hashemi, Investigation on the effective range of the through thickness shear stress on forming limit diagram using modified Marciniak-Kuczynski model, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 137-143, 2016. (in Persian فارسی)
- [14] A. Fazaeli, M. Habibi, A.A. Ekrami, Experimental and finite element comparison of mechanical properties and formability of dual phase steel and ferrite - pearlite steel with the same chemical composition, *Metallurgical Engineering*, Vol. 19, No. 2, pp. 84-93, 2016. (in Persian فارسی)
- [15] W. Choi, P. Gillis, S. E. Jones, Calculations of the forming limit diagram, *Metallurgical Transactions A*, Vol. 20, No. 10, pp. 1-13, 1975.
- [16] H. B. Campos, M. C. Butuc, J. J. Gracio, J. E. Rocha, J. M. F. Duarte, Theoretical and experimental determination of the forming limit diagram for the AISI 304 stainless steel, *Materials Processing Technology*, Vol. 179, No. 1, pp. 56-60, 2006.
- [17] C. Zhang, L. Leotoing, G. Zhao, D. Guines, E. Ragneau, Comparative study of different necking criteria for numerical and experimental prediction of FLCs, *Materials Engineering and Performance*, Vol. 20, No. 6, pp. 1036-1042, 2011.
- [18] M. C. Butuc, J. J. Gracio, A. B. Rocha, A theoretical study on forming limit diagrams prediction, *Materials Processing Technology*, Vol. 142, No. 3, pp. 714-724, 2003.
- [19] Y. Zhou, K. W. Neale, Predictions of forming limit diagrams using a rate-sensitive crystal plasticity model, *Mechanical Sciences*, Vol. 37, No. 1, pp. 1-20, 1995.
- [20] M. Habibi, R. Hashemi, E. Sadeghi, A. Fazaeli, A. Ghazanfari, H. Lashini, Enhancing the mechanical properties and formability of low carbon steel with dual-phase microstructures, *Materials Engineering and Performance*, Vol. 25, No. 2, pp. 382-389, 2016.
- [21] E. Karajibani, R. Hashemi, M. Sedighi, Determination of forming limit curve in two-layer metallic sheets using the finite element simulation, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Materials Design and Applications*, Vol. 230, No. 6, pp. 1018-1029.
- [22] E. Karajibani, R. Hashemi, M. Sedighi, Forming limit diagram of aluminum-copper two-layer sheets: numerical simulations and experimental verifications, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 90, No. 9, pp. 2713-2722, 2017.
- [23] T. Sun, J. Liang, X. Guo, M. Ren, L. Wang, Optical measurement of forming limit and formability of Cu/Al Clad Metals, *Materials Engineering and Performances*, Vol. 24, No. 4, pp. 1426-1433, 2015.
- [24] M. Habibi, R. Hashemi, M.F. Tafti, A. Assempour, Experimental investigation of mechanical properties, formability and forming limit diagrams for tailor-welded blanks produced by friction stir welding, *Manufacturing Processes*, Vol. 31, No. 1, pp. 310-323, 2018.
- [25] *Abaqus 2016 documentation*, Accessed on 10 March 2018; <http://abaqus.software.polimi.it/v2016/index.html>.
- [26] Y. Lou, H. Huh, S. Lim, K. Pack, New ductile fracture criterion for prediction of fracture forming limit diagrams of sheet metals, *Solids and structures*, Vol. 49, No. 25, pp. 3605-3615, 2012.
- [27] V. Tvergaard, A. Needleman, Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar, *Acta Metallurgica*, Vol. 32, No. 1, pp. 157-169, 1984.
- [28] C. Zhiying, D. Xianghui, The GTN model based on Hill'48 anisotropic yield criterion and its application in sheet metal forming, *Computational Materials Science*, Vol. 44, No. 3, pp. 1013-1021, 2009.
- [29] Z. H. Li, B. A. Bilby, I. C. Howard, A study of the internal parameters of ductile damage theory, *Fatigue and fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 17, No. 9, pp. 1075-1087, 1994.
- [30] Z. L. Zhang, A sensitivity analysis of material parameters for the Gurson constitutive model, *Fatigue and fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 19, No. 5, pp. 561-570, 1996.
- [31] R. Kiran, K. Khandelwal, Gurson model parameters for ductile fracture simulation in ASTM A992 steels, *Fatigue and fracture of Engineering Materials and structures*, Vol. 37, No. 2, pp. 1-13, 2013.
- [32] N. Bendeddiq, A. Imad, A ductile fracture analysis using a local damage model, *Pressure Vessels and Piping*, Vol. 85, No. 4, pp. 219-227, 2008.
- فولادی و مسی از مدل GTN و برای تعیین جدایش بین لایه‌ها از قانون کشش- جدایش استفاده گردید. پارامترهای مدل GTN و همین‌طور مدل کشش- جدایش تعیین و برای تعیین نمودار حد شکل‌دهی ورق دولایه تست ناکازیم در نرم‌افزار المان محدود آباکوس برای هر دو حالت قرارگیری ورق‌ها شبیه‌سازی شد. برای اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی نیز آزمایش تجربی ناکازیم انجام گرفت. به طور خلاصه نتایج زیر از این تحقیق حاصل گردید.
- با به‌کارگیری مدل GTN برای لایه‌ها و مدل کشش- جدایش برای ناحیه اتصال ورق‌ها نمودار حد شکل‌دهی با دقت قابل قبولی پیش‌بینی می‌شود.
- پیش از پارگی در لایه‌های فولاد و مسی بین آن‌ها جدایش رخ می‌دهد.
- پارگی در هر دولایه به صورت هم‌زمان و در محلی بسیار نزدیک به محل جدایش لایه‌ها رخ دهد.
- نمودار حد شکل‌دهی ورق دولایه در حالتی که مس لایه بیرونی و فولاد لایه داخلی باشد، پایین‌تر از حالتی است که فولاد لایه بیرونی و مس لایه داخلی باشد. نتایج تجربی نیز گواه این ادعاست.

## 6- مراجع

- [1] A. A. Bykov, Bimetal Production and application, *Steel in Translation*, Vol. 41, No. 9, pp. 778-786, 2011.
- [2] M. H. Parsa, K. Yamaqushi, N. Takakura, Redrawing analysis of aluminum-stainless laminated sheet using FEM simulation and experiments, *Mechanical Science*, Vol. 43, No. 10, pp. 2331-2347, 2001.
- [3] H.C. Tseng, C. Hung, C. C. Huang, An analysis of the formability of aluminum/copper clad metals with different thickness by the finite element method and experiment, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 49, No. 9, pp. 1029-1036, 2010.
- [4] A. J. Aghchai, M. Shakeri, B. M. Dariani, Influences of material properties of components on formability of two-layer metallic sheets, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 66, No. 5, pp. 809-823, 2013.
- [5] M. R. Morovvati, B. M. Dariani, M. H. A. Ardakani, A theoretical, numerical, and experimental investigation of plastic wrinkling of circular two-layer sheet metal in the deep drawing, *Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 13 pp. 1738-1747, 2010.
- [6] E. Karajibani, A. Fazli, R. Hashemi, Numerical and experimental study of formability in deep drawing of two-layer metallic sheets, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 80, No. 1, pp. 113-121, 2015.
- [7] A. Atrian, F. Fereshte-Saniee, Deep drawing process of steel/brass laminated sheets, *Composites: Part B*, Vol. 47, pp. 75-81, 2013.
- [8] S. Bagherzadeh, M. J. Mirnia, B. M. Dariani, Numerical and experimental investigations of hydro-mechanical deep drawing process of laminated aluminum/steel sheets, *Manufacturing Processes*, Vol. 18, pp.131-140, 2015.
- [9] M. R. Morovvati, A. Fatemi, M. Sadighi, Experimental and finite element investigation on wrinkling of circular single layer and two-layer sheets metals in deep drawing process, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 54, No. 1, pp. 113-121, 2011.
- [10] M. Habibi, R. Hashemi, A. Ghazanfari, R. Naghdabadi, A. Assempour, Forming limit diagrams by including the M-K model in finite element simulation considering the effect of bending, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Materials: Design and Applications*, Vol. 230, pp. 1-12, 2016.
- [11] G. M. Goodwin, Application of strain analysis of sheet metal forming problems in the press shop, *Society of Automotive Engineers*, No. 680093, 1968.