



## بررسی تأثیر پارامترهای هندسی لایه‌ها بر شکل‌پذیری ورق‌های ساندویچی آلومینیم/پلی‌یورتان/آلومینیم

عبدالحسین جلالی آقچای<sup>۱\*</sup>، غلامحسین پایگانه<sup>۲</sup> و مرتضی تاجیک<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

<sup>۲</sup> دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۵/۲۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۰۸/۰۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۲۰

### چکیده

امروزه ورق‌های ساندویچی با هسته پلیمری، جایگزین بسیاری از کاربردهای ورق‌های تک‌لایه شده‌اند. رفتار پیچیده ورق‌های ساندویچی هنگام تغییر شکل، نیاز به بررسی شکل‌پذیری این ورق‌ها را روزافزون می‌سازد. در این پژوهش، به بررسی تأثیر پارامترهای هندسی لایه‌ها بر شکل‌پذیری ورق‌های ساندویچی آلومینیم/پلی‌یورتان/آلومینیم پرداخته شده است. برای بررسی شکل‌پذیری ورق‌های ساندویچی، آزمایش اتساع با سنبه نیم‌کروی انجام شد و تأثیر پارامترهای هندسی لایه‌ها از جمله ضخامت هسته و نحوه چیدمان لایه‌ها درون قالب فلزی بر شکل‌پذیری ورق ساندویچی، مورد بررسی قرار گرفت. پس از تأیید، مدل المان محدود مشاهده شد که خروجی‌های کرنش در روش المان محدود، بین ۷ تا ۱۵ درصد با نتایج تجربی اختلاف دارند که مناسب به نظر می‌رسد. نتایج حاصل از روش تجربی و شبیه‌سازی المان محدود نشان دادند که با افزایش ضخامت هسته ورق ساندویچی، شکل‌پذیری کاهش پیدا می‌کند. همچنین ثابت شد که چیدمان لایه‌ها درون قالب فلزی، نقش مهمی در شکل‌پذیری ورق‌های ساندویچی ایفا می‌کند.

**کلمات کلیدی:** ورق ساندویچی؛ شکل‌پذیری؛ پارامترهای هندسی؛ آزمایش اتساع؛ المان محدود.

## Analysis of Effects of Geometric Parameters of Layers on Formability of Aluminum/Polyurethane/Aluminum Sandwich Sheets

A. Jalali Aghchai<sup>1\*</sup>, Gh. Payganeh<sup>2</sup>, and M. Tajik<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Assist. Prof., Mech. Eng., Khajeh Nasir Toosi Univ. Tech., Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Assoc. Prof., Mech. Eng., Shahid Rajaee Teacher Training Univ., Tehran, Iran.

<sup>3</sup> MSc. Student, Mech. Eng., Shahid Rajaee Teacher Training Univ., Tehran, Iran.

### Abstract

Nowadays sandwich sheets with a polymer core have replaced many applications of single-layer sheets. The complex behavior of sandwich sheets during deformation shows the need to review their formability. In this work, we study the effects of the geometric parameters of sandwich sheet layers on the formability of the aluminum/polyurethane/aluminum sandwich sheets. To evaluate the formability of the sandwich sheets, the punch stretching test with a hemispherical punch is performed. After verifying the finite element model, it was observed that the difference between the output of the strain on the finite element method and the experimental results was 7-15%, which seems to be appropriate. The results of the experimental method and finite element simulation show that with increase in the core thickness of the sandwich sheet, the formability decreases. It is also proved that arrangement of the layers plays an important role in the formability of sandwich sheets.

**Keywords:** Sandwich Sheet; Formability; Geometric Parameters; Stretch Forming; Finite Element.

## ۱- مقدمه

شکل‌دهی ورق‌های فلزی، یکی از مهم‌ترین روش‌های تولیدی بوده، امروزه در صنایع مختلف از جمله، تولید بدنه اتومبیل و هواپیما و تولید لوازم اداری و خانگی، به دلیل صرفه‌جویی در تولید انبوه، کاربرد وسیعی پیدا کرده است. روش‌های مختلفی چون برشکاری، خمکاری، اتساع، کشش عمیق، چرخکاری و غلتک‌کاری از جمله فرآیندهای شکل‌دهی ورق می‌باشند [۱].

در سال‌های اخیر، استفاده از ورق‌های متنوع ساندویچی متشکل از پوسته با استحکام بالا و هسته با استحکام و وزن پایین مثل پلیمر، به دلیل مزایای بسیار نسبت به ورق‌های تک‌لایه فلزی در صنایع دریایی، فضایی، اتومبیل‌سازی و ساختمانی گسترش یافته است [۲]. نسبت استحکام به دانسیته بالا [۲]، رسانایی الکتریکی و حرارتی بالا [۳]، میرا کردن ارتعاشات سازه‌ها بدون نیاز به تحمل وزن اضافی، مقاومت بالا در برابر خستگی و ضربه [۴] و کاهش چین-خوردگی نسبت به ورق‌های تک‌لایه [۵] را می‌توان مهم‌ترین مزایای ورق‌های ساندویچی، نسبت به ورق‌های تک‌لایه دانست. با توجه به مزایای ذکر شده، کاربرد ورق‌های ساندویچی با هسته پلیمری در صنایع مخالف افزایش یافته است. امروزه از ورق‌های ساندویچی در صنعت خودروسازی برای تولید بدنه خودرو [۵]، سازه‌های دارای استحکام به وزن بالا [۶]، صنایع هوافضا [۷]، صنعت لوازم خانگی [۸]، صنعت ساختمان [۴]، سازه‌های سبک‌تر برای بدنه کشتی‌ها [۹] و در سازه پل‌ها، جهت کاهش وزن پل [۱۰] استفاده زیادی پیدا کرده است. در کنار خواص بسیار مطلوب ورق‌های ساندویچی، شکل‌پذیری این نوع ورق‌ها یکی از عوامل محدودکننده در جایگزینی ورق‌های تک‌لایه در صنایع مختلف است [۱۱].

روش‌های مختلفی برای بررسی شکل‌پذیری وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به روش‌های تجربی و المان محدود اشاره کرد. در روش تجربی، ورق‌های دارای شبکه‌بندی را شکل می‌دهند [۱۲]. برای رسیدن به مسیرهای مختلف کرنش، نوع روانکار و عرض نمونه را تغییر می‌دهند. نمونه‌های با عرض کامل را به حالت کشش دو محوری متقارن و تسمه-های خیلی باریک، تقریباً به حالت کشش تک‌محوری تغییر شکل می‌یابند [۱۳].

با استفاده از روش‌های المان محدود نیز می‌توان حد شکل‌پذیری را پیش‌بینی کرد. مزایای ترسیم منحنی حد شکل‌پذیری به روش المان محدود عبارت‌اند از:

الف) کاهش زمان لازم برای رسیدن به منحنی حد شکل‌پذیری نسبت به فرآیندهای تجربی (ب) سهولت بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند و هندسه ورق ساندویچی و اجزاء آن بر شکل‌پذیری ورق ساندویچی (ج) کاهش هزینه لازم برای دستیابی به منحنی حد شکل‌پذیری، نسبت به فرآیندهای تجربی [۱۴]

برای یافتن منحنی حد شکل‌پذیری ورق ساندویچی به روش المان محدود، می‌توان از روش مدل‌سازی آزمایش‌های تجربی مربوط به یافتن منحنی حد شکل‌پذیری (کشش استاندارد و اتساع) در نرم‌افزار المان محدود استفاده کرد [۱۴].

در سال ۲۰۰۳، کیم<sup>۱</sup> و همکاران [۱۱] شکل‌پذیری ورق-های ساندویچی آلومینیم/پلی‌پروپیلن/آلومینیم را به صورت تجربی و تحلیلی بررسی کردند. در این تحقیق، فرض بر این بوده که ماده همسانگرد است. ضمناً در روش تحلیلی از معیارهای تسلیم هیل ۱۹۴۸ و بارلات ۲۰۰۰ و همچنین از معادلات در حالت تنش صفحه‌ای استفاده شده است. برای به‌دست آوردن منحنی حد شکل‌پذیری تجربی از روش کشش عمیق استفاده شده است. نتیجه این تحقیق نشان می‌دهد که در منحنی حد شکل‌پذیری پیش‌بینی شده توسط مدل مارسینیاک-کوزینسکی برای ورق ساندویچی با ضخامت ۱/۲ میلی‌متر، سمت راست منحنی به‌دست آمده با استفاده از تابع تسلیم بارلات ۲۰۰۰، بالاتر از منحنی به‌دست آمده توسط تابع تسلیم هیل ۱۹۴۸ است. این در حالی است که در سمت چپ منحنی، منحنی‌ها تقریباً بر هم منطبق می‌باشند. این نتیجه برای ورق تک‌لایه آلومینیم ۵۱۸۲ با ضخامت ۰/۲ میلی‌متر نیز صدق می‌کند.

در سال ۲۰۰۶، کونتورنو<sup>۲</sup> و همکاران [۵] رفتار شکل‌دهی یک ورق ساندویچی با هسته فومی را به صورت تجربی و عددی، مورد بررسی قرار دادند [۵]. در این تحقیق، فرض بر این بوده که چگالی هسته فومی هنگام کار متغیر است. در

<sup>1</sup> K.J. Kim

<sup>2</sup> D. Contorno

و هسته از جنس پلی‌پروپیلن آیزوتکتیک تجاری استفاده گردیده است. برای اتصال بین پوسته‌ها و هسته نیز فیلم پلی‌پروپیلن جفت شده با مالئیک انیدرید<sup>۳</sup> بین ورق آلومینیومی و هسته پلی‌پروپیلن قرار داده شده است. این تحقیق، نشان داد که هسته پلیمری دو تأثیر مثبت و منفی روی منحنی حد شکل‌پذیری ورق ساندویچی دارد. تأثیر مثبت آن مربوط به تأثیر مثبت حساسیت به نرخ کرنش بالاتر هسته پلیمری و در نتیجه فاکتور عیب<sup>۴</sup> بالاتر نمونه ساندویچی است. تأثیر منفی آن نیز، مربوط به کرنش-سختی پایین‌تری است که هسته پلیمری به ورق ساندویچی اعمال می‌کند.

در سال ۲۰۱۱، سوکولووا<sup>۵</sup> و همکاران [۶] شکل‌پذیری ورق‌های ساندویچی فلز/پلیمر/فلز دارای تقویت‌کننده فلزی موضعی در هسته را با نتایج حاصل از ورق‌های ساندویچی بدون تقویت‌کننده مقایسه کردند. در این تحقیق، نمونه‌ها به-عنوان کامپوزیت‌های ساندویچی سه‌لایه متقارن ساخته شده‌اند. یک هندسه دایروی در مرکز هسته ورق ساندویچی برای قرار دادن تقویت‌کننده انتخاب شد. این تحقیق نشان داد که برای ورق‌های تقویت شده با تقویت‌کننده دایروی، عمق کشش با افزایش قطر تقویت‌کننده زیاد می‌شود، اما عمق کشش آن‌ها در مقایسه با نوع بدون تقویت‌کننده کمتر است.

در سال ۲۰۱۳، لیو<sup>۶</sup> و همکاران [۱۶]، منحنی حد شکل-پذیری ورق‌های ساندویچی آلومینیوم/پلی‌اتیلن/آلومینیوم را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، از یک شبیه‌سازی عددی بر پایه مدل مکانیک آسیب ماده برای شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی ورق ساندویچی استفاده شده است. برای شبیه‌سازی اتصال بین لایه‌ها، هم از مدل ناحیه چسبنده<sup>۷</sup> استفاده شده است. برای پوسته ورق ساندویچی از ورق آلومینیوم ۵۰۵۲ با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر و برای هسته نیز از پلی‌اتیلن با چگالی بالا استفاده شده است. در این تحقیق، نشان داده شد که با افزایش ضخامت هسته از جنس پلی-اتیلن، شکل‌پذیری ورق ساندویچی افزایش می‌یابد؛ همچنین

این تحقیق، یک پانل با ابعاد ۱۳/۵×۱۰×۴۶ میلی‌متر از جنس پوسته‌های AlMn1Si0.6 مورد بررسی قرار گرفته است. ضخامت پوسته‌ها در این پانل، ۳ میلی‌متر و ضخامت هسته، ۵/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است و برای اتصال پوسته و هسته، از یک رزین اپوکسی استفاده گردیده است. جنس هسته از همان جنس پوسته و به‌صورت فوم با چگالی  $920 \text{ kg/m}^3$  در نظر گرفته شده است؛ در نتیجه این تحقیق مشخص شد که در این پانل‌ها، با افزایش نفوذ سنبه ضخامت هسته پانل کمتر می‌شود که این کاهش ضخامت در قسمت شعاع سنبه، بیشتر از گوشه‌های ورق است.

در سال ۱۳۸۷، اتحاد و همکاران [۲] حد کشش ورق‌های ساندویچی آلومینیوم-پلیمر را در فرآیند کشش عمیق با استفاده از تئوری مکانیک آسیب ماده مورد به‌صورت تجربی و تحلیلی بررسی کردند. در این تحقیق، از مدل مکانیک آسیب ماده<sup>۱</sup> استفاده شده است. مکانیک شکست نرم در فلزات شامل، سه مرحله جوانه‌زنی، رشد و بهم پیوستگی میکروحفره‌ها در محل ناخالصی‌ها و ذرات فاز دوم است. مدل مکانیک آسیب ماده، بیان‌کننده تابع پتانسیل تسلیم ماده با در نظر گرفتن تأثیر حضور میکروحفره‌ها روی رفتار تسلیم ماده است؛ همچنین تنش مؤثر ون-مایسز به تنش میانگین برای کسر حجمی متفاوت میکروحفره‌ها وابسته است. در نتیجه این تحقیق مشخص شد که با افزایش ضخامت هسته پلیمری در ضخامت ثابت پوسته، حد کشش کاهش می‌یابد. دلیل این امر، بالا رفتن تنش لازم برای خمش نمونه به دلیل افزایش اثر تیرک<sup>۲</sup> در ورق‌های ساندویچی با افزایش ضخامت است.

در سال ۲۰۰۹، پارسا و همکاران [۱۵]، به تعیین تجربی و عددی منحنی حد شکل‌پذیری ورق‌های ساندویچی آلومینیوم/پلی‌پروپیلن/آلومینیوم پرداختند. در بخش عددی این تحقیق، مدل مکانیک آسیب ماده به‌صورت کدهای المان محدود برای پیش‌بینی ناپایداری در تغییر شکل پلاستیک ورق‌های ساندویچی با ضخامت هسته متفاوت استفاده شده است. در این تحقیق، از ورق‌های ساندویچی با ضخامت متغیر ۱/۲ و ۲ میلی‌متر متشکل از پوسته از جنس آلومینیوم ۳۱۰۵

<sup>3</sup> PP-g-MAH

<sup>4</sup> Defect Factor

<sup>5</sup> Olga A. Sokolova

<sup>6</sup> Jianguang Liu

<sup>7</sup> Cohesive Zone Model (CZM)

<sup>1</sup> Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN)

<sup>2</sup> Beam effect

لایه آزاد خارجی است. جدول ۱، نحوه طراحی آزمایش‌ها را با استفاده از روش فاکتوریل<sup>۲</sup> نمایش می‌دهد.

برای تولید فیلم پلیمر، ساخت ورق‌های چندلایه و پخت محل اتصال بین لایه‌های ورق ساندویچی، پرس هیدرولیکی گرم مطابق شکل ۱، طراحی و ساخته شد. در این پرس، از یک جک ۲ تنی روغنی برای اعمال نیروی پرس استفاده شده است. این پرس به گونه‌ای طراحی شده که دمای آن طی حداکثر زمان ۱۵ دقیقه به ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. همچنین برای دسترسی به دمای مورد نظر و تنظیم دمای پرس از یک عدد ترموکوپل استفاده شده است.

جدول ۱- شرح پارامترها و طراحی آزمایش

متغیر آزمایش	سطح آزمایش	توضیحات
چیدمان لایه‌ها	۱	چیدمان ۱/۱
	۲	چیدمان ۳/۳
	۳	چیدمان ۱/۳
ضخامت هسته (mm)	۴	چیدمان ۳/۱
	۱	۱
	۲	۱/۵
	۳	۲



شکل ۱- پرس هیدرولیکی گرم ساخته شده

در ابتدا با توجه به پایین بودن درصد ازدیاد طول نمونه‌های آلومینیمی خریداری شده، عملیات حرارتی آنیل کامل برای همه نمونه‌های آلومینیمی در شرایط یکسان انجام شد.

ورق ساندویچی مورد آزمایش شکل‌پذیری بهتری را نسبت به ورق تک‌لایه آلومینیمی دارا است.

در این پژوهش، با توجه به کاربرد روزافزون ورق‌های ساندویچی در صنایع مختلف و همچنین در نظر گرفتن تحقیقات انجام شده درباره شکل‌پذیری این نوع ورق‌ها، به بررسی تأثیر پارامترهای هندسی لایه‌ها بر شکل‌پذیری ورق-های ساندویچی آلومینیم/پلی‌یورتان/آلومینیم پرداخته شده است. منظور از پارامترهای هندسی لایه‌ها، نحوه چیدمان لایه‌ها درون قالب فلزی و ضخامت لایه‌ها است. در این پژوهش، از دو روش تجربی و المان محدود برای بررسی شکل‌پذیری ورق‌های ساندویچی بهره گرفته شده است.

## ۲- روش تجربی

در این تحقیق، با توجه به کاربردهای روزافزون آلومینیم به عنوان پوسته ورق‌های ساندویچی، از آلومینیم‌های ۱۰۵۰ و ۳۱۰۵ با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر برای پوسته ورق ساندویچی استفاده شد. همچنین از پلی‌یورتان<sup>۱</sup> به عنوان جنس هسته ورق ساندویچی استفاده شد. از مهم‌ترین خواص پلی‌یورتان استفاده شده می‌توان به درصد ازدیاد طول بسیار بالا، عدم شکست هسته ورق ساندویچی هنگام تغییر شکل و چگالی پایین اشاره کرد. ضمناً پلی‌یورتان استفاده شده در هسته ورق ساندویچی نقش هسته و لایه اتصال‌دهنده را به تنهایی ایفا می‌کند و نیاز به لایه واسط اتصال‌دهنده را مرتفع می‌سازد.

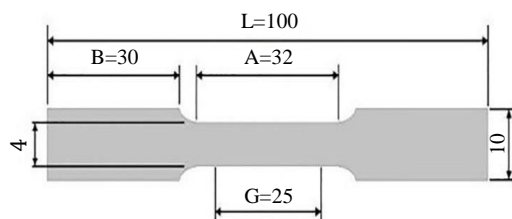
متغیرهای این تحقیق به ترتیب نحوه چیدمان لایه‌ها، درون قالب فلزی در چهار سطح و ضخامت هسته ورق ساندویچی (در ضخامت ثابت پوسته‌ها) در سه سطح تعیین گردیدند که هر دو از پارامترهای هندسی لایه‌ها به‌شمار می‌روند. منظور از چیدمان لایه‌ها، نحوه قرارگیری لایه‌ها درون قالب فلزی است. برای این منظور از دو عدد استفاده شده که عدد سمت چپ، نمایانگر پوسته در تماس با سنبه و عدد سمت راست، نمایانگر لایه آزاد خارجی است. از عدد ۱ به عنوان نماد آلومینیم ۱۰۵۰ و از عدد ۳ به عنوان نماد آلومینیم ۳۱۰۵ استفاده شده است. برای مثال، در چیدمان ۱/۳، آلومینیم ۱۰۵۰ در تماس با سنبه و آلومینیم ۳۱۰۵

<sup>2</sup> Full Factorial

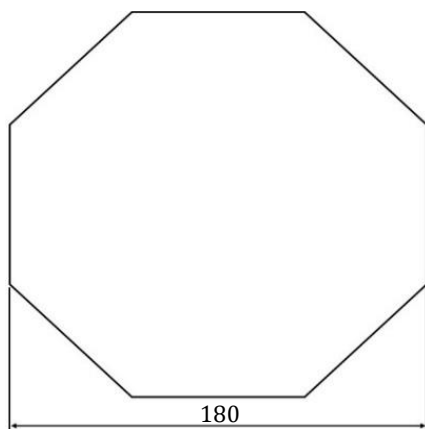
<sup>1</sup> Polyurethane Grade 65-Shore A

از آزمایش کشش استاندارد استفاده شد. آزمایش کشش استاندارد با استفاده از یک نمونه ساده مستطیلی پلی‌یورتان با ابعاد  $۱۲ \times ۱۲ \times ۲/۵$  میلی‌متر و با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد.

دسته دوم، آزمایش‌هایی هستند که برای تعیین حد شکل‌پذیری در مسیر بارگذاری کشش دو محوری متقارن انجام می‌شوند. پس از ساخت ورق‌های ساندویچی توسط پرس گرم به شکل مربع با ابعاد  $۲۰ \times ۲۰$  سانتی‌متر، نمونه‌ها در ابعاد نهایی مطابق شکل ۳، در سه ضخامت کل ۲،  $۲/۵$  و ۳ میلی‌متر آماده شدند. با توجه به ابعاد ورق‌گیر، نمونه‌های آزمایش در همه جهات از لحاظ قطری به اندازه ۵ سانتی‌متر بزرگتر از قطر آویزه ساخته شدند تا شرایط کشش دو محوری متقارن مهیا شود.



شکل ۲- ابعاد نمونه آزمایش کشش استاندارد بر حسب میلی‌متر [۱۹]



شکل ۳- ابعاد نمونه آزمایش اتساع به میلی‌متر

برای اندازه‌گیری کرنش‌های سطحی پس از انجام آزمایش، شبکه‌های دایره‌ای در لایه خارجی ورق ساندویچی چاپ شد. شبکه‌های دایره‌ای توسط یک مهر ژلاتینی و با

عملیات حرارتی آنیل کامل مطابق با استاندارد ASM [۱۷] به شرح زیر انجام شد:

الف) قرار دادن نمونه‌های آلومینیمی در کوره خشک با دمای  $۳۴۵$  درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه (ب) سرد شدن نمونه‌ها در کوره تا دمای  $۱۰۰$  درجه سانتی‌گراد در زمان تقریبی دو ساعت (ج) سرد شدن نمونه‌ها از دمای  $۱۰۰$  درجه سانتی‌گراد تا دمای محیط، بیرون از کوره در زمان تقریبی یک ساعت

در مرحله بعد، برای بهبود خواص اتصال بین پلی‌یورتان و آلومینیم، آماده‌سازی سطح فلز آلومینیم انجام شد. مراحل آماده‌سازی سطح ورق مطابق با استاندارد ISO 4588 [۱۸] و به ترتیب زیر انجام شد:

الف) پلیسه‌گیری نمونه‌ها (ب) تمیزکاری با محلول استون (ج) گریس و روغن‌زدایی نمونه‌ها با شست‌وشو در محلول ۲٪ سود سوزآور (د) سایش سطح اتصال نمونه‌ها با سنباده ریز ۵ شست‌وشو با آب و خشک کردن نمونه‌ها

پس از آماده‌سازی سطح اتصال آلومینیم، ورق‌های ساندویچی به ترتیب زیر تهیه شدند:

الف) قرار دادن گرانول پلی‌یورتان داخل پرس گرم جهت تهیه فیلم پلی‌یورتان با ضخامت معین (ب) قرار دادن فیلم پلی‌یورتان تهیه شده بین لایه‌های آلومینیم و قرار دادن مجموعه حاصل داخل پرس گرم در دمای  $۱۹۰$  درجه سانتی‌گراد و زمان ۳ دقیقه (ج) باز کردن فک‌های پرس گرم و در آوردن ورق ساندویچی ساخته شده و جدا کردن اضافات بیرون زده پلی‌یورتان از ورق ساندویچی

در این پژوهش، آزمایش‌های تجربی به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول، آزمایش‌هایی هستند که با انجام آن‌ها، خواص مکانیکی مواد اولیه مورد استفاده در ساخت ورق‌های ساندویچی و خواص مکانیکی ورق‌های ساندویچی ساخته شده تعیین می‌شوند. با انجام این آزمایش‌ها، اطلاعات مورد نیاز برای تحلیل المان محدود حد شکل‌پذیری، جهت ورود به نرم‌افزار المان محدود تعیین می‌شوند.

برای تعیین خواص مکانیکی پوسته آلومینیمی از آزمایش کشش استاندارد مطابق ASTM-E8M استفاده شد. برای انجام آزمایش کشش استاندارد، نمونه‌های آنیل شده از جنس آلومینیم  $۱۰۵۰$  و  $۳۱۰۵$  مطابق ابعاد شکل ۲ ساخته شدند. جهت تعیین خواص مکانیکی هسته از جنس پلی‌یورتان هم

ساندویچی شکل‌دهی شده تا زمان گلوبی موضعی را نمایش می‌دهد.

برای اندازه‌گیری کرنش‌ها، ابتدا در هر نمونه نزدیک‌ترین بیضی‌های سالم در نزدیکی ناحیه گلوبی شده با فاصله حداکثر ۵ میلی‌متر نسبت به محل گلوبی موضعی انتخاب شدند و سپس قطر بزرگ و کوچک آن‌ها اندازه گرفته شد. سپس برای بیضی‌های انتخابی با استفاده از قطر بزرگ و قطر کوچک بیضی‌ها و قطر اولیه دایره مربوط به هر بیضی، کرنش‌های اصلی مهندسی ماکزیمم و مینیمم  $\epsilon_1$  و  $\epsilon_2$  تعیین گردیدند. در نهایت با استفاده از رابطه (۱)، کرنش‌های اصلی حقیقی  $\epsilon_1$  و  $\epsilon_2$  تعیین گردیدند و برای هر آزمایش، کرنش مؤثر میسنز<sup>۲</sup> به عنوان نتیجه آزمایش، مورد نظر قرار گرفت.

$$\epsilon = \ln(1 + e) \quad (1)$$



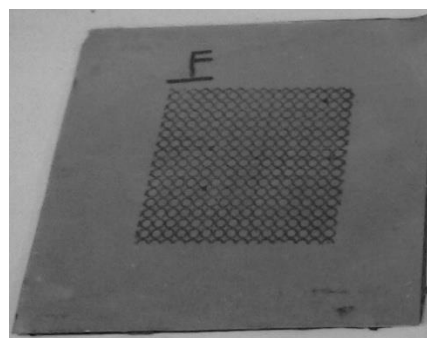
شکل ۶- نمونه ساندویچی پس از انجام آزمایش اتساع

### ۳- روش المان محدود

جهت بررسی المان محدود شکل‌پذیری، از روش مدل‌سازی فرآیندهای تجربی استفاده شد. برای شبیه‌سازی و تحلیل المان محدود، از حل‌گر صریح<sup>۳</sup> در نرم‌افزار آباکوس<sup>۴</sup> استفاده شد. در بخش مدل‌سازی هندسی قطعات مطابق آزمایش‌های تجربی ۴ قطعه قالب، ورق‌گیر، سنبه و ورق ساندویچی مدل شدند. شکل ۷، مدل‌سازی انجام شده را به صورت شماتیک نمایش می‌دهد.

جوهر ضد آب روی لایه خارجی ورق ساندویچی مهر شد و از سمت مهر شده ورق عکس دیجیتال تهیه شد. در شکل ۴ ورق ساندویچی ساخته شده پس از چاپ دایره‌ها مشاهده می‌شود. سپس با استفاده از نرم‌افزار دیجیمایزر<sup>۱</sup> و عکس دیجیتال تهیه شده، قطر اولیه دایره‌های چاپ شده تعیین شدند.

از آزمایش اتساع با سنبه نیم‌کروی جهت تعیین حد شکل‌پذیری استفاده شد. در تمامی آزمایش‌ها سرعت حرکت سنبه برابر ۵ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. در شکل ۵، تجهیزات آزمایش اتساع شامل ورق‌گیر، سنبه و قالب مشاهده می‌شود.



شکل ۴- ورق ساندویچی پس از چاپ دایره‌ها



شکل ۵- تجهیزات آزمایش اتساع

لازم به ذکر است، برای دسترسی بهینه به شرایط کشش دومحوری متقارن، در همه آزمایش‌ها از روانکار پلی‌اتیلن بین سنبه و لایه داخلی ورق ساندویچی استفاده شد. آزمایش اتساع تا لحظه اولین گلوبی موضعی ادامه داده شد و در لحظه اولین افت نیرو آزمایش متوقف شد. شکل ۶، نمونه

<sup>2</sup> Von Mises

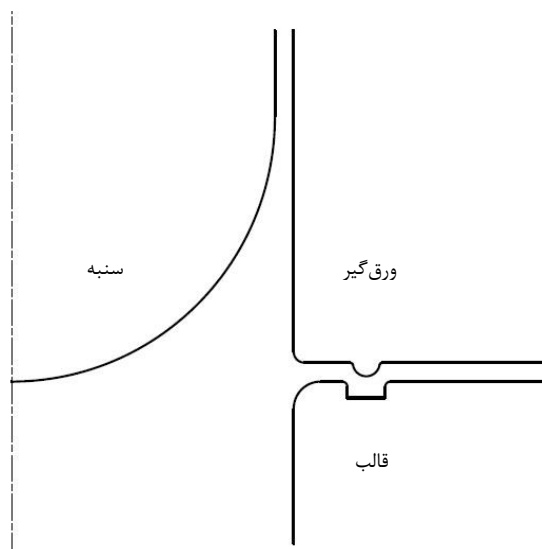
<sup>3</sup> Explicit

<sup>4</sup> Abaqus

<sup>1</sup> Digimazer

بسیار کم باشد. در این تحلیل، دو گام<sup>۳</sup> از نوع دینامیکی صریح<sup>۴</sup> برای تحلیل تعریف شد. گام اول با زمان ۰/۱ ثانیه برای اعمال نیروی ورق‌گیر و گام دوم با زمان ۰/۵ ثانیه برای اعمال بارگذاری نهایی سنبه در نرم‌افزار تعریف شدند. در این تحلیل، با کاهش میزان مقیاس‌دهی جرم در هر دو گام حل و بررسی نسبت انرژی جنبشی به انرژی داخلی مدل، میزان بهینه پارامتر مقیاس‌دهی جرم برابر با ۱۰ در نظر گرفته شد. در پایان بخش تعیین نوع تحلیل، برای حل مسأله قابلیت مش‌زنی تطبیقی<sup>۵</sup> فعال شد. در بخش تعریف شرایط تماس سطوح، برهم‌کنش‌های موجود بین اجزای فرآیند و شرایط تماس بین سطوح تعریف شدند.

در بخش مش‌بندی، به تعیین نوع المان‌ها و اندازه بهینه آن‌ها پرداخته شد و برای تعیین نوع و اندازه المان‌ها مراحل زیر انجام شد. برای ورق ساندویچی مدل شده به صورت پوسته<sup>۶</sup>، از المان مربعی متقارن محوری چهارگره‌ای<sup>۷</sup> استفاده استفاده شد. برای تعیین اندازه بهینه المان آنالیز حساسیت المان<sup>۸</sup> انجام شد. در این قسمت، برای ایجاد شرایط تنش-صفحه‌ای و برای یک طول المان ثابت ۴ میلی‌متر، نسبت طول به عرض المان از ۲۰ تا ۱۰ تغییر داده شد و خروجی کرنش‌ها بررسی گردید. مشاهده شد که از نسبت طول به عرض المان ۲۰ تا نسبت ۱۶، کرنش‌ها تقریباً نزدیک به هم و مطابق نتایج روش تجربی بودند؛ در حالی که پس از نسبت طول به عرض المان ۱۵ تا نسبت ۱۰، خروجی کرنش‌ها نوسانی و متغیر مشاهده شدند؛ بنابراین نسبت طول به عرض بهینه المان برابر ۱۶ در نظر گرفته شد. برای اندازه‌گیری اندازه بهینه المان، تغییر نیروی حداکثر سنبه در اندازه‌های مختلف المان برای یک بارگذاری مشخص بررسی گردید. در آنالیز حساسیت المان، اندازه طول المان از ۲۰ تا ۰/۵ میلی-متر با نسبت ثابت طول به عرض المان ۱۶ تغییر داده شد و خروجی نیروی بیشینه سنبه، مورد بررسی قرار گرفت. شکل



شکل ۷- شماتیک مدل‌سازی هندسی انجام شده در نرم-افزار آباکوس برای قالب، سنبه و ورق‌گیر

در بخش تعیین خواص مواد، ۳ ماده تعریف شد. پوسته-های آلومینیومی ۱۰۵۰ و ۳۱۰۵ به عنوان دو ماده همسانگرد در نظر گرفته شدند. برای تعیین خواص هسته از جنس پلی-یورتان، مطابق نتایج آزمایش کشش استاندارد این ماده به عنوان یک ماده هایپروالاستیک تعریف شد. در قسمت مونتاژ، قطعات به صورت وابسته<sup>۱</sup> مونتاژ شدند. در این حالت مونتاژ، شبکه‌بندی مدل اصلی روی قطعات صورت می‌گیرد. برای تعیین مراحل و نوع تحلیل، ۲ مرحله برای حل تعریف شد. مرحله اول، برای اعمال نیروی ورق‌گیر و مرحله دوم، برای اعمال بارگذاری سنبه. برای تعیین نوع حل از تحلیل دینامیکی در شبه‌سازی المان محدود بهره گرفته شد. در صورتی که یک فرآیند شبه‌استاتیکی را با زمان واقعی در حل گر صریح تحلیل کنیم، زمان و هزینه محاسباتی حل بسیار بالا خواهد بود. برای شتاب‌دهی به تحلیل، از زمان غیر واقعی و پارامتر مقیاس‌دهی جرم<sup>۲</sup> در نرم‌افزار آباکوس شد. لازم به ذکر است که در صورت استفاده از مقیاس‌دهی جرم در یک تحلیل شبه‌استاتیکی، باید میزان این پارامتر به حدی انتخاب شود که نسبت انرژی جنبشی به انرژی داخلی مدل

<sup>3</sup> Step

<sup>4</sup> Dynamic/Explicit

<sup>5</sup> Adaptive Mesh

<sup>6</sup> Shell

<sup>7</sup> 4-node Bilinear Axisymmetric Quadrilateral, Reduced Integration, Hourglass Control (CAX4R)

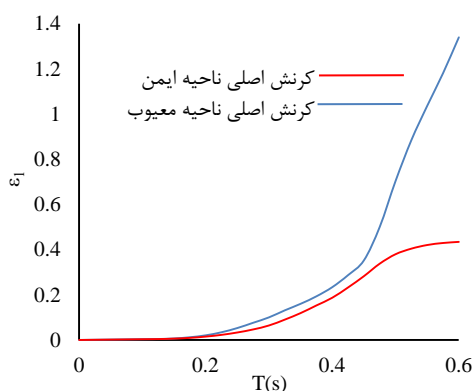
<sup>8</sup> Mesh Sensitivity Analysis

<sup>1</sup> Dependent

<sup>2</sup> Mass Scaling

کرنش، گره دارای بیشترین کرنش به عنوان نقطه معیوب و گره با فاصله ۵ میلی‌متر از آن به عنوان نقطه سالم انتخاب شد. مطابق شکل ۹، مشاهده می‌شود که کرنش‌های نواحی سالم و معیوب تا بخشی از آزمایش با هم برابر هستند. در یک لحظه اختلاف جزء کرنش‌ها در مناطق سالم و معیوب افزایش می‌یابد و به حدی می‌رسد که گلوبی موضعی رخ می‌دهد.

برای تعیین لحظه گلوبی موضعی، به این صورت عمل شد. با در نظر گرفتن جزء کرنش‌های ناحیه معیوب در فواصل زمانی مختلف به عنوان  $\Delta \varepsilon_a$  و جزء کرنش‌های ناحیه سالم در فواصل زمانی مختلف به عنوان  $\Delta \varepsilon_b$  و محاسبه نسبت  $A = \Delta \varepsilon_a / \Delta \varepsilon_b$ ، در هر بازه زمانی که نسبت  $A$  بزرگتر یا مساوی ۷ بود، آن بازه زمانی به عنوان بازه زمانی شروع گلوبی موضعی در نظر گرفته شد و کرنش‌های اصلی ابتدای آن بازه در ناحیه سالم مشخص شدند و به عنوان حد شکل-پذیری ورق تعیین شدند. در نهایت برای هر آزمایش، کرنش مؤثر میسر برای تحلیل آزمایش‌ها انتخاب شد.



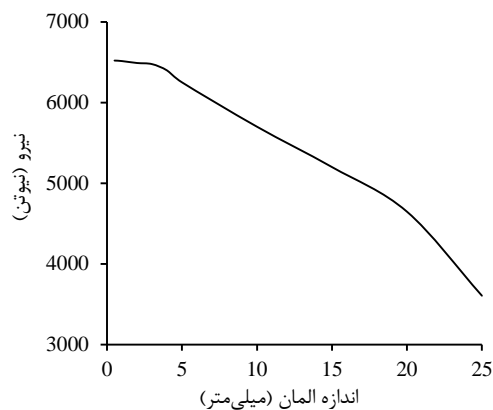
شکل ۹- تغییرات کرنش در نواحی سالم و معیوب

#### ۴- نتایج و بحث

شکل ۱۰ نشان می‌دهد که خروجی‌های نیرو در تحلیل دینامیکی با زمان واقعی در مقایسه با نتایج تجربی از تطابق خوبی برخوردار هستند.

در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که خروجی‌های نیرو در تحلیل دینامیکی با زمان واقعی در مقایسه با نتایج تجربی تطابق خوبی را نمایش می‌دهند. پس از تأیید مدل المان محدود، مشاهده شد که نیروی بیشینه شبیه‌سازی در لحظه

۸، تغییرات نیروی بیشینه سنبه برحسب اندازه طول المان نمایش می‌دهد.



شکل ۸- نمودار تغییرات نیروی بیشینه سنبه بر حسب اندازه طول المان

همانطور که مشاهده می‌شود، با کوچکتر کردن اندازه المان، نیروی بیشینه سنبه افزایش می‌یابد. پس از انجام آنالیز حساسیت المان مشاهده شد که از اندازه طول المان ۵ میلی-متر به پایین‌تر، شیب افزایش نیروی حداکثر سنبه کاهش می‌یابد و در نهایت به سمت ثابت شدن نیروی حداکثر سنبه میل می‌کند. با توجه به ثابت شدن تقریبی نیروی بیشینه در المان‌های با طول کمتر از ۳ میلی‌متر و همچنین با در نظر گرفتن زمان حل، میزان طول بهینه المان برابر ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

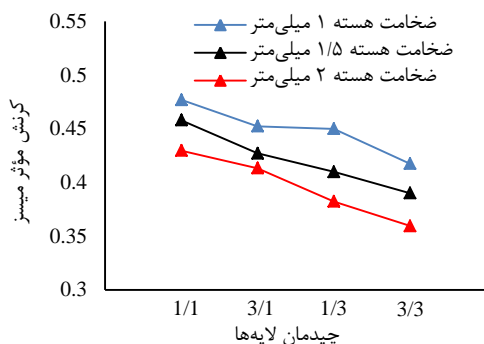
پس از اتمام تحلیل، برای تعیین نتایج شبیه‌سازی به این صورت عمل شد. در تحلیل المان محدود، برای تعیین لحظه شروع گلوبی مراحل زیر انجام شد:

الف) تعیین کرنش در دو ناحیه سالم و معیوب در صورتی که ناحیه سالم، با فاصله تقریبی ۵ میلی‌متر نسبت به ناحیه معیوب انتخاب شد (ب) رسم نمودار تغییرات کرنش‌های اصلی در دو ناحیه سالم و معیوب (ج) تعیین لحظه گلوبی شدن (د) انتخاب کرنش‌های اصلی در لحظه گلوبی شدن در ناحیه سالم به عنوان حد شکل‌پذیری نمونه

روش کار به این صورت است که پس از تعیین خروجی تغییرات کرنش در ناحیه سالم و معیوب، نمودار کرنش‌های اصلی در منطقه سالم و معیوب رسم شد. برای انتخاب ناحیه معیوب، پس از قرار دادن خروجی‌های آزمایش به صورت

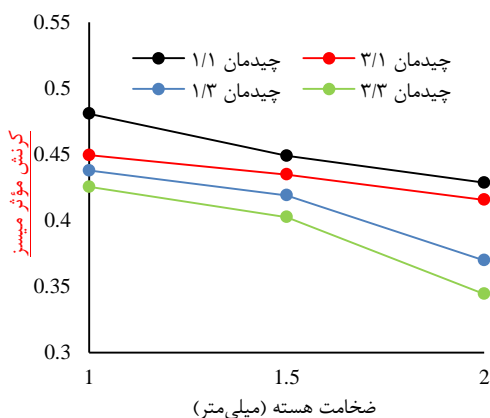


مناسب، با افزایش شکل‌پذیری لایه خارجی، شکل‌پذیری ورق ساندویچی افزایش می‌یابد.

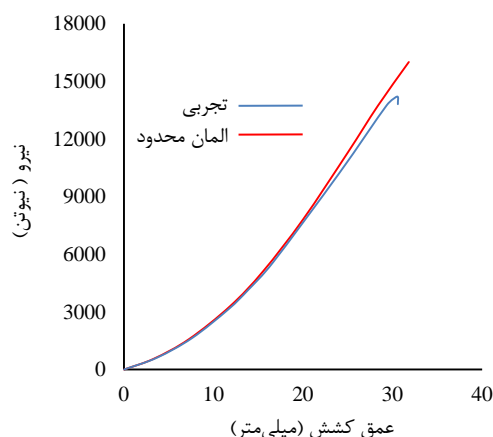


شکل ۱۱- تأثیر چیدمان لایه‌ها بر شکل‌پذیری ورق‌های ساندویچی

شکل ۱۲، نتایج تجربی و شکل ۱۳، نتایج المان محدود تأثیر ضخامت هسته بر شکل‌پذیری ورق ساندویچی را برای چیدمان‌های متفاوت نمایش می‌دهد. با توجه به نتایج تجربی و المان محدود مشخص است که بیشترین شکل‌پذیری مربوط به ورق ساندویچی با ضخامت هسته ۱ میلی‌متر و کمترین شکل‌پذیری هم، مربوط به ورق ساندویچی با ضخامت هسته ۲ میلی‌متر است و شکل‌پذیری ورق ساندویچی با ضخامت هسته ۱/۵ میلی‌متر، بین شکل‌پذیری این دو ورق قرار دارد؛ در نتیجه مشخص شد که در صورت ثابت بودن چیدمان لایه‌ها و نوع روانکار، با افزایش ضخامت هسته در صورت ثابت بودن ضخامت پوسته آلومینیم و در نتیجه افزایش نسبت ضخامت‌ها، پلیمری به پوسته آلومینیمی، شکل‌پذیری ورق ساندویچی کاهش می‌یابد.



گلوبی موضعی به‌طور میانگین، کمتر از ۸ درصد با نیروی بیشینه شکل‌دهی در فرآیندهای تجربی اختلاف دارد. همچنین، با بررسی‌های انجام شده مشخص شد که خروجی-های کرنش شبیه‌سازی، اختلافی بین ۷ تا ۱۵ درصد با نتایج تجربی دارند که مناسب به نظر می‌رسد.



شکل ۱۰- تطابق نیروی شکل‌دهی فرآیند تجربی اتساع و شبیه‌سازی المان محدود برای ورق ساندویچی با ضخامت هسته ۱ میلی‌متر و جنس پوسته‌های آلومینیم ۱۰۵۰

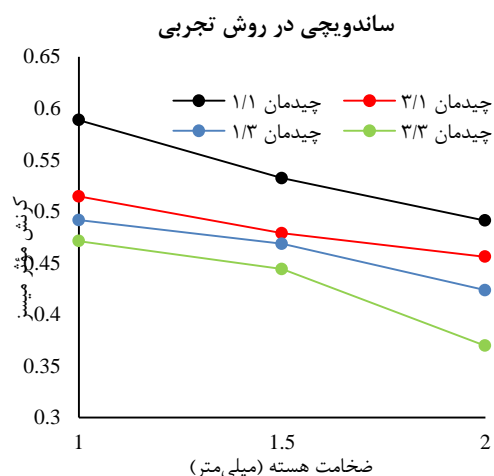
شکل ۱۱، تأثیر چیدمان لایه‌ها بر شکل‌پذیری ورق‌های ساندویچی نمایش می‌دهد. با توجه به شکل ۱۱ مشخص می‌شود که شکل‌پذیری ورق ساندویچی در چیدمان حالت ۱/۱ مسیر بارگذاری کشش دوماحوری متقارن، بیشتر از شکل‌پذیری چیدمان‌های دیگر است. پس از چیدمان ۱/۱، شکل‌پذیری چیدمان ۳/۱ بالاتر از چیدمان ۱/۳ قرار دارد. در فرآیند اتساع، تنش مؤثر در لایه آزاد خارجی ورق، همواره بیشتر از تنش مؤثر در لایه داخلی در تماس با سنبه است و به همین دلیل، در شرایط روانکاری مناسب بین سنبه و لایه داخلی، همواره کرنش لایه خارجی بیشتر است. به دلیل درصد ازدیاد طول پایین‌تر آلومینیم ۳۱۰۵ نسبت به آلومینیم ۱۰۵۰، کرنش پارگی در چیدمان حالت ۱/۳، کمتر از حالت ۳/۱ است و در نتیجه، شکل‌پذیری در چیدمان حالت ۱/۳، کمتر از شکل‌پذیری در چیدمان حالت ۳/۱ است. چیدمان حالت ۳/۳، هم کمترین شکل‌پذیری را نسبت به حالات دیگر دارا است. شکل‌پذیری ورق‌های ساندویچی، به سمت شکل-پذیری پوسته خارجی کشیده می‌شود و در حالت روانکاری

۴- در ضخامت‌های ثابت پوسته، شکل‌پذیری ورق‌های ساندویچی آلومینیوم/پلی‌یورتان/آلومینیوم با افزایش ضخامت هسته کاهش پیدا می‌کند. از دلایل کاهش شکل‌پذیری ورق ساندویچی با افزایش ضخامت هسته، می‌توان به افزایش تنش مؤثر در لایه خارجی ورق ساندویچی با افزایش ضخامت هسته اشاره کرد.

### مراجع

- [1] Jalali Aghchai A, Shakeri M, Mollaei-Dariani B (2008) Theoretical and experimental formability study of two-layer metallic sheet (Al1100/St12). Proc IMechE Part B: J Engineering Manufacture 222(9): 1131-1138.
- [2] Han TS, Billington SL (2003) Delamination buckling and propagation analysis of honeycomb using a cohesive element approach. Int J Fracture 115(2): 101-123.
- [۳] بیگلری فر، میرزالی و (۱۳۸۶) بررسی فرآیند نورد ورق ساندویچی با روش المان محدود و مقایسه آن با نتایج روش قاچی. دومین کنگره بین‌المللی مهندسی ساخت و تولید ایران. دانشگاه علم و صنعت ایران.
- [۴] رجبی ع، کدخدایان م (۱۳۸۹) تحلیل المان محدود ورق‌های فلز-کامپوزیتی در فرآیند کشش عمیق و مقایسه آن با نتایج تجربی. یازدهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران. دانشگاه تبریز.
- [5] Contorno D, Filice L, Fratini L, Micari F (2006) Forming of aluminum foam sandwich panels: Numerical simulations. J Mater Process Tech 177: 364-367.
- [6] Sokolova OA, Carradò A, Palkowski H (2011) Metal-polymer-metal sandwiches with local metal reinforcements: a study on formability by deep drawing and bending. Compos Struct 94: 1-7.
- [7] Jalali Aghchai A, Shakeri M, Mollaei Dariani B (2013) Influences of material properties of components on formability of two-layer metallic sheets. Int J Adv Manuf Technol 66: 809-823.
- [۸] جلالی ع، شاکری م، ملایی داریانی ب (۱۳۸۷) بررسی و تحلیل تئوری و تجربی شکل‌پذیری ورق دولایه فلزی Al1100-St12 با استفاده از مدل لایه معادل. نهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران. دانشگاه تبریز.
- [9] Momčilović N, Motok M (2009) Estimation of Ship Lightweight Reduction by Means of Application of Sandwich Plate System. FME Transactions 37: 123-128.

شکل ۱۲- تأثیر ضخامت هسته بر شکل‌پذیری ورق



شکل ۱۳- تأثیر ضخامت هسته بر شکل‌پذیری ورق

ساندویچی در روش المان محدود

### ۵- نتیجه‌گیری

پس از انجام آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی المان محدود و تحلیل نتایج حاصل از آن‌ها، نتایج زیر حاصل شد:

۱- نتایج شبیه‌سازی المان محدود از تطابق خوبی با نتایج آزمایش‌های تجربی برخوردار است. خروجی‌های کرنش در روش المان محدود بین ۷ تا ۱۵ درصد با روش تجربی اختلاف دارد. نیروی بیشینه شکل‌دهی در شبیه‌سازی المان محدود هم، حدود ۸ درصد با نیروی بیشینه تجربی اختلاف دارد که مناسب به نظر می‌رسد.

۲- چیدمان لایه‌ها نقش مهمی در شکل‌پذیری ورق‌های ساندویچی ایفا می‌کند. شکل‌پذیری ورق‌های ساندویچی، به سمت شکل‌پذیری لایه خارجی ورق ساندویچی کشیده می‌شود و در حالت روانکاری مناسب با افزایش شکل‌پذیری لایه خارجی، شکل‌پذیری ورق ساندویچی هم افزایش می‌یابد.

۳- با استفاده از ورق‌های ساندویچی، در صورت انتخاب مناسب چیدمان لایه‌ها، می‌توان شکل‌پذیری ورق ساندویچی را افزایش داد. در این تحقیق مشاهده شد که شکل‌پذیری ورق ساندویچی در چیدمان ۱/۱، بیشترین میزان و در چیدمان ۳/۳، کمترین میزان خود را دارد. شکل‌پذیری چیدمان‌های ۳/۱ و ۱/۳ هم به ترتیب، بین شکل‌پذیری چیدمان‌های ۱/۱ و ۳/۳ قرار دارد.

- [15] Habibi Parsa M, Ettehad M, Nasher Al Ahkami S (2009) FLD Determination of AL3105/Polypropylene/AL3105 Sandwich Sheet using numerical calculation and experimental investigations. *Int J Mater Form* 2(1): 407-410.
- [16] Liu J, Liu W, Xue W (2013) Forming limit diagram prediction of AA5052 / polyethylene / AA5052 sandwich sheets. *Mater Design* 46: 112-120.
- [17] ASM Handbook (1991) Vol 04, Heat Treating. 10th edn.
- [18] ISO 4588:1989, Adhesives - Preparation of metal surfaces for adhesive bonding, 1995.
- [19] ASTM International (2008) ASTM E8M, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Material.
- [10] Kennedy DJL, Dorton RA, Alexander SDB (2002) The sandwich plate system for bridge decks. International Bridge Conference, Pittsburgh, USA.
- [11] Kim KJ, Kim D, Cohi SH, Chung K, Shin KS, Barlat F, Oh KH, Youn JR (2003) Formability of AA5182/polypropylene/AA5182 sandwich sheets. *J Mater Process Tech* 193: 1-7.
- [12] Hosford WF (2005) Mechanical Behavior of Materials. Cambridge University Press, New York.
- [13] Hosford WF, Caddel RM (2011) Metal forming mechanics and metallurgy. 4th edn. Cambridge University Press.
- [۱۴] جلالی آقچای ع (۱۳۸۷) بررسی و تحلیل تئوری و تجربی شکل‌پذیری ورق‌های دولایه. رساله دکتری. دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران.