ماەنامە علمى پژوھشى

مهندسی ساخت و تولید ایران www.smeir.org

## بررسی و مطالعه جذب انرژی فنجانهای کشش عمیق شده سه لایهای آلومینیوم/پلی پروپیلن/فولاد

## على نصيرى<sup>1</sup>، امير عطريان<sup>2\*</sup>

1- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران
 2- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران
 \* نجف آباد، صندوق پستی 8514143131.

اطلاعات مقاله	چکیدہ
مقاله پژوهشی کامل دریافت: 24 تیر 1398 داوری اولیه 22 مهر پذیرش: 5 بهمن 1398	امروزه استفاده از جاذبهای انرژی جدارنازک در کاربردهای صنعتی مختلف گسترش روز افزونی داشته است. مطالعات زیادی نیز برای بهینه سازی رفتار و عملکرد این اجزاء انجام شده است که از جمله میتوان به افزودن محرکـهای <sup>1</sup> هندسی به این سازهها اشاره نمود. در این پژوهش، تأثیر محرکـهای هندسی بر رفتار تغییر شکلی و جذب انرژی نمونههای کشش عمیق شده سه لایهای آلومینیوم/ پلی پروپیلن/ فولاد مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور نخست، ورق ساندویچی از دو ورق فلزی (آلومینیومی و فولادی) به عنوان پوسته و
<b>کلیدواژگان:</b> ورق،های ساندویچی آلومینیوم فولاد کشش عمیق جذب انرژی	یک ورق پلی پروپیلنی به عنوان هسته ساخته شد. این سه لایه به کمک یک چسب گرانولی پلیمری در بین لایهها و با بهره گیری از روش پرس گرم، به هم متصل شده و ورق ساندویچی سه لایهای با دو ضخامت متفاوت برای هسته پلیمری در بین لایهها و با بهره گیری از روش سپس تحت فرایند کشش عمیق قرار گرفت و به فنجانهای کشش عمیق شده سه لایهای با عمق کشش قابل قبول برای انجام آزمونهای لهیدگی جذب انرژی، تبدیل گردید. آزمون لهیدگی شبه استاتیک به منظور تعیین میزان جذب انرژی بر روی نمونهها انجام پذیرفت و تأثیر پارامترهایی نظیر ضخامت لایه پلیمری و محرکهایی مانند حفره و شکاف بر روی بدنه نمونه بر روی میزان انرژی جذب شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تجربی نشان میدهد که افزایش ضخامت لایه پلیمری هسته از 1 به 2 میلیمتر موجب افزایش ظرفیت جذب انرژی در حدود 6% میشود. علاوه بر این، ایجاد محرک به شکل شکاف و با زاویه 45 درجه در دیواره نمونهها، میزان جذب انرژی را تا

# Investigation of the energy absorption in three-layer Al/Polypropylene/Steel deep drawn cups

#### Ali Nassiri, Amir Atrian

Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran \* P.O.B 8514143131 Najafabad, Iran, atrian@pmc.iaun.ac.ir

Article Information	Abstract		
Original Research Paper Received 15 July 2019 First Decision: 14 October 2019 Accepted 25 February 2020	Nowadays, thin-walled energy absorbers have been widely used in different industrial applications. Many studies have also been performed to optimize behavior and application of such elements with geometrical triggers. In this paper, the effect of geometrical triggers on deformation and energy absorption of three-layer Al/Polypropylene/Steel deep drawn samples is investigated. To this end, the sandwich panel from two metal		
Keywords: Sandwich panels Aluminum Steel Deep drawing Energy absorption	sheets of Steel and Aluminum as the skins and a Polypropylene layer as the core was fabricated. These three layers were bonded to each other applying a polymeric granular cohesive and under hot pressing technique to produce three-layer sandwich panels with two different core thicknesses. The sandwich panels were then deep drawn and converted to three-layer cups for crushing energy absorption tests. The quasi-static crushing tests were performed to evaluate the absorbed energy in fabricated samples. These tests were also done in order to studying the effects of core thickness and geometrical triggers (like notch and hole) on the samples body on the absorbed energy. The results show that increasing the core thickness from 1 to 2 mm enhances the capacity of energy absorption by about 6%. In addition, notch triggers with 45 degree in the samples wall could increase the energy absorption up to 8%.		

و نقل و نیاز به طراحی و کاهش وزن این وسایل به منظور مصرف سوخت بهینهتر، عرصه جدیدی در مهندسی مکانیک سازهها به وجود آمده است. از سوی دیگر نیاز به ایمنی بیشتر در وسایل نقلیه، بالاخص حین برخوردهای غیرقابل پیش بینی،

**1- مقدمه** با آلودگی هوا بر اثر مصرف بی رویه سوخت توسط وسایل حمـل

<sup>1</sup> Trigger

#### Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Nassiri, A. Atrian, Investigation of the energy absorption in three-layer Al/Polypropylene/Steel deep drawn cups, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 6, pp. 34-43, 2020 (in Persian)



مهندس استسعاد مهندس استسعاد ساخت و فرید ایران مانخت و مرید ایران منظور از آزمون جذب انرژی یک ورق (یکپارچه یا چندلایه)،

بررسی پارامترهای تأثیر گذار به دست آمده از نمودار نیرو-

جابجایی در فرایند لهیدگی نمونه شامل نیروی لهیدگی، طول

لهیدگی، میزان انرژی جذب شده و ... میباشد. به طور کلی

مهندسان مکانیک با تحلیل مسئله برای سازههایی که در معرض

ضربه و فشارهای خارجی هستند، اقدام به طراحی و ساخت

عاملی برای جذب این نیروها می کنند. در سازههای حمل و نقلی

بەدلىل مشخصەھايى نظير زيبايى سازە، سبكى، استحكام

مناسب و همچنین قابلیت بالقوه ورقی که در ساخت بدنه سازه استفاده می شود، می توان با اعمال فرایندهای مکانیکی نظیر

کشش عمیق یا کشش Vشکل بر روی ورق، عامل جذب کننده

انرژی را نیز در دل همین ورق جای داد. به عنوان بارزترین مثال،

سپر یک خودرو توانایی جذب بخشی از نیروهای خارجی وارد

شده به سازه را دارد [11]. در این راستا، محققان بسیاری [12،

[13] به مطالعه جذب انرژی سازههای مختلف از جمله نمونههای

استوانهای و جدار نازک پرداختهاند.هان و همکاران [12] به

بررسی اثر حفرههای ایجاد شده در سازههای استوانهای شکل

آلومینیومی و فولادی به عنوان محرک در آزمونهای استاتیکی و

دینامیکی محوری و سنجش میزان جذب انرژی این لولهها پرداختند. در پژوهش ایشان اثر محل و موقعیت حفرهها به

عنوان متغیر در نظر گرفته شد. هوانگ و همکاران [14] نیز به

تحلیل پارامترهای جذب انرژی و مدهای فروپاشی بین لایهای

کامپوزیتهای کلاهی شکل پلاستیکی تقویت شده با الیاف کربن تحت بارهای دینامیکی پرداختند. علوینیا و همکاران [15]

ظرفیت جذب انرژی و فروریختگی لولههای آلومینیومی جدار

نازک ترکدار استوانهای و مربعی شکل را تحت فشردهسازی محوری مطالعه کردند. رفتار جذب انرژی در نمونههای استوانهای

توسط محققان دیگری همچون میرمحمدصادقی و همکاران [16] و تسوکاموتو [17] نیز مورد مطالعه قرار گرفت. برای

بررسی رفتار محفظه ضربه<sup>2</sup> حین برخورد نیز مطالعات عددی و

در مبحث لهیدگی استاتیک نمونههای استوانهای جدار نازک، الکساندر [19] با در نظر گرفتن یک مدل تئوری توانست

مقدار نیروی لهیدگی میانگین را از طریق رابطه (1) محاسبه

که t و R به ترتیب ضخامت ورق و شعاع لوله استوانهای هستند

تجربي گوناگوني تا به حال انجام شده است [2، 11، 18].

مهندسان را بر آن داشته است تا علاوه بر کاهش وزن سازهها بر روی مبحث جـذب انـرژی ناشـی از برخـورد نیـز طراحـیهـا و آزمایشهـای مکـانیکی متنـوعی را انجـام دهنـد [1، 2]. عمومـاً ورقهای ساندویچی فلـز/پلاسـتیک از دو لایـه فلـزی بـه عنـوان پوسته و یک ماده پلیمری بـه عنـوان هسـته تشـکیل شـدهانـد. ترکیب سه لایه که به طور کاملاً محسوس کاهش وزن ایـدهآلـی نسبت به یک ورق یکپارچه (فولاد یا آلومینیوم) پیدا کرده است، به دو روش پرس گرم (تحت دما و فشار ثابت و معین) یا اتصـال نوردی<sup>1</sup> به هم چسبانده می شوند. عموماً پوسـته فلـزی از جـس فولاد یا آلیاژ آلومینیوم و هسته پلیمری، پلـی پـروپیلن یـا پلـی اتیلن در نظر گرفته می شود. به منظور ایجاد چسبندگی مطلوب بین لایهها نیز از مادهای چسبنده، همجنس و همگـن بـا جـنس

در دهه هشتاد میلادی دیچلو و میلر [4، 5] به طور جداگانه، اقدام به ساخت اولین نمونه از این ورقها کردند. آنها فولاد را به عنوان پوسته و پلی پروپیلن را به عنوان هسته قرار دادند و به روش پرس گرم، اولین ورق ساندویچی ST/PP/ST را تولید کردند. همان طور که قبلا ذکر شد، نزدیک بودن خواص مکانیکی دو فلز مورد استفاده به عنوان یوسته در ساختار ورق ساندویچی شرط اساسی و لازم برای انجام موفق و کامل فرایندهای مکانیکی از جمله فرایند کشش عمیق در مورد ورقهای ساندویچی میباشد [6]. از آنجایی که این ورقها میتوانند تحت عملیات شکلدهی و پرسکاری قرار بگیرند و تغییر شکل آنها توسط عوامل مختلفی محدود می شود، دانستن قبلی میزان محدودیتهای شکل دهی بسیار مهم است. برای دست یابی به این منظور پارسا و همکاران [7] نمودار حد کشش ورقهای ساندویچی آلومینیوم/پلیمر/آلومینیوم را با استفاده از شبیهسازی و در نظر گرفتن مدل آسیب گرسون - تیورگارد - نیدلمن پیشبینے کردند. مروتے و ھمکاران [8] بـ ہررسے پدیدہ چروکی۔ دگی در ورق دولایہ (آلومینی۔ وم افولاد ضدزنگ) طبی آزمایشهای تجربی، شبیه سازیهای عددی و روشهای تحلیلی يرداختند. عطريان و فرشته-صنيعي [6] نيز فرايند كشش عميق ورقهای دو فلزی برنج -فولاد را مورد بررسی قرار دادنـد و تـأثیر پارامترهایی مانند روان کار، نیروی ورقگیر، ترتیب چیدمان لایهها، قطر ورق و شرایط اتصال دو لایه را مطالعه نمودند. از دیگر تحقیقات انجام گرفته در این زمینه می توان به پژوهشهای رجبي و كدخدايان [9] و ليو و ژو [10] اشاره نمود.

کند:

(1)

<sup>2</sup> Crash Box

 $\mathsf{P}_{\rm m} = 2(\pi t)^{3/2} R^{1/2} \sigma_0 3^{-(1/4)}$ 

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Roll Bonding

و σ<sub>0</sub> تنش تسلیم مواد میباشد. مگی و تورنتون [20] نیز با بسط دادن یک رابطه تجربی بر اساس تعداد مشخصی از آزمونهای تجربی موفق به پیش بینی نیروی لهیدگی میانگین شدند. این رابطه عبارت است از:

$$P_{\rm m} = \eta \sigma_u \varphi A_0 \tag{2}$$

که  $\eta$  اثر ساختاری سطح مقطع،  $\varphi$  نسبت حجم ماده به حجم احاطه شده توسط سطح مقطع،  $\sigma_u$  تنش نهایی ماده و  $A_0$ مساحت کلی احاطه شده توسط محیط خارجی نمونه نامیده می شود. برای نمونه های استوانه ای توخالی مورد نظر به ضخامت دیواره t و شعاع متوسط R مقادیر زیر برقرار است:

 $\eta = 2\varphi^{0.7}$ ,  $\varphi = 2t/R$  (3)  $\sum_{k=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} (j) (2) (2) (3)$ 

$$P_{\rm m} = 4\pi R t \sigma_u \left(\frac{2t}{R}\right)^{0.7} \tag{4}$$

در این پژوهش، به عنوان یک نوآوری در مبحث ورقهای ساندویچی سعی شده است تا بهجای استفاده از یک جنس فلز در پوسته، از دو ورق فلزی با جنسها و خواص گوناگون و البته نزدیک به یکدیگر استفاده شود. بعد از ساخت ورق ساندویچی به کمک پرس گرم، نمونهها تحت فرایند کشش عمیق قرار گرفتند. نمونههای کشش عمیق شده سه لایهای سپس به صورت شبه استاتیکی تحت تغییر شکل محوری قرار گرفته و تأثیر پارامترهایی مانند ضخامت لایه میانی و محرکهای مختلف همچون شکاف و حفره بر روی بدنه نمونهها بر میزان انرژی جذب شده مورد بررسی قرار گرفت. بررسی تأثیر محرکهای هندسی بر نمونههای کامپوزیتی سه لایه که در این تحقیق انجام پذیرفت از دیگر جنبههای نوآوری این مطالعه میباشد.

### 2- اقدامات آزمایشگاهی 2-1- ساخت ورقها

به منظور انجام صحیح فرایند کشش عمیق، لازم است خواص کششی دو ورق فلزی مانند استحکام تسلیم، نمای کرنش سختی و بیشترین مقدار ازدیاد طول نزدیک به هم باشند [21]. بدین منظور پس از انجام آزمون کشش بر اساس استاندارد -ASTM B3 و مقایسه منحنی های رفتار کششی به دست آمده، ورق فولادی با نام تجاری 304 Stainless Steel به ضخامت 5/0 میلی متر و ورق آلومینیومی 1305 All به ضخامت 5/0 میلی متر به عنوان پوسته و ورق پلیمری گرمانرم پلی پروپیلن به ضخامت های 1 و 2 میلی متر (با نقطه ذوب 180 درجه سانتی گراد) به عنوان هسته در نظر گرفته شدند. از بررسی نتایج

نمودارهای تنش-کرنش حقیقی بهدست آمده از آزمونهای کشش اینگونه برآمد که درصد ازدیاد طول ورق آلومینومی Al3105 به حد کافی و متناسب با درصد ازدیاد طول ورق فولادی نیست. لذا برای افزایش این پارامتر و یکسان سازی نسبی، ورقهای آلومینیومی آنیل شدند. لازم به ذکر است که جهت انجام فرایند آنیل، آنها را داخل کوره آنیل به مدت 30 دقیقه در دمای 380 درجه سانتی گراد قرار داده و سپس با خاموش کردن کوره اجازه داده می شود تا ورقها همراه کوره تا دمای محیط به آرامی سرد شوند (شکل 1).

مهمترین عامل در ثبات و استحکام چسبندگی این سه لایه با جنس و خواص گوناگون در کنار هم، استفاده از فاکتور چهارمی به عنوان عامل ایجاد کننده چسبندگی مناسب در بین لایههای این ورق ساندویچی است. این چسب پلیمری، گرانولی است با نام تجاری پلیپروپیلن مالئیک اسید (با نقطه ذوب 140 درجه سانتی گراد) که از مشتقات خود پلیپروپیلن میباشد. شکل 2-الف مراحل آمادهسازی ورق ساندویچی را قبل از اتصال نشان میدهد. جهت اتصال سه لایه، این سه لایه داخل قالبی مربعی شکل گذاشته شده و سپس تحت پرس گرم به مدت زمان بیست دقیقه، تحت دمای 190 درجه سانتیگراد و فشار 16 بیست دقیقه، تحت دمای 190 درجه سانتیگراد و فشار 16 بیست دقیقه، تحت دمای 190 درجه سانتیگراد و فشار ما پرسیدن به دمای 50 درجه سانتی گراد همچنان بر ورق سه مگاپاسکال قرار داده شد. فشار مذکور تا خنک شدن نمونه و لایهای اعمال گردید. پس از تولید ورقهای ساندویچی به دو لایهای اعمال گردید. پس از تولید ورقهای ساندویچی به دو



True Strain Fig.1 The true stress-strain curve of the three sheets شکل 1 منحنی تنش-کرنش حقیقی سه ورق مورد استفاده

**2-2- آزمون کشش عمیق استوانهای** قالب تهیه شده (شامل ورق گیر و ماتریس) از جنس چدن و سنبه از جنس فولاد CK45 میباشد که به کمک فنر، نیروی

ورق گیر آن کنترل می شود. در شکل 3 قالب کشش عمیق ساخته شده، نشان داده شده است. کنترل نیروی ورق گیر که مهم ترین و حساس ترین بخش عملکرد قالب می باشد توسط 8 عدد فنر با سختی 161 N/mm انجام پذیرفت.

استفاده از روان کار مناسب و اعمال نیروی ورق گیر کافی از عوامل مهم و تأثیر گذار در ساخت نمونههای سالم و بدون عیب در این فرایند میباشد. بدین منظور، از نایلون و گریس بهطور همزمان جهت روان کاری سطوح درگیر استفاده گردید. ممچنین، برای تعیین نیروی ورق گیر مناسب، آزمونهای متعددی با نیروهای ورق گیر مختلف انجام پذیرفت که در نهایت مشخص شد نیروی ورق گیر مختلف انجام پذیرفت که در نهایت فنجانهای سه لایه کشش عمیق شده سالم و بدون هیچ گونه چروکیدگی در لبه نمونهها و نیز بدون پارگی در محدوده طوق نمونهها میشود. بررسیهای انجام شده برای تعیین تأثیر نیروی ورق گیر و دیگر پارامترهای فرایند کشش عمیق بر رفتار تغییر شکلی نمونههای سه لایهای در مقاله دیگرِ نویسندگان [22] ارائه شده است.



(الف)



Fig. 2 (a) Placing sheets in the die, (b) three layer sandwich sheet شكل2 (الف) چينش ورق،ها در قالب، (ب) تصوير يک ورق سه لايه دايروي

بنابراین، در گام بعدی نمونه های تولید شده سالم جهت آزمون لهیدگی انتخاب می شوند. از بین نمونه ها، از هر ضخامت هفت نمونه برای انجام آزمون جذب انرژی انتخاب می گردد. در این مرحله جهت دستیابی به بهترین و ایده آل ترین حالت جذب انرژی برای نمونه های فنجانی شکل، لازم است تا لبه های اضافی ایجاده شده در فرایند کشش عمیق به کمک فرایند برش واتر جت حذف گردد تا نمونه ای متقارن و استاندارد برای آزمون لهید گی تولید شود. شکل 4 نمونه ها را پیش و پس از اصلاح و برش لبه (فلنج) در دو ضخامت نشان می دهد.



**شکل3** مجموعه قالب کشش عمیق استوانهای



Fig. 4 The three layer deep drawn samples (a) with edge, (b) without edge (الف) با لبه به ضخامت **4** نمونههای کشش عمیق شده سه لایهای (الف) با لبه به ضخامت 2 mm و mm 2 و mm

#### 3-2- آزمونهای لهیدگی

در گام بعدی پس از اصلاح لبههای اضافی نمونههای فنجانی شکل، آزمون لهیدگی یا همان آزمون جذب انرژی بر روی نمونهها انجام پذیرفت. قبل از انجام آزمونها برای نمونههای فنجانی شکل، به منظور بررسی اثر محرکهای مکانیکی بر میزان جذب انرژی نمونههای ساندویچی که هدف اصلی این

مقاله نیز میباشد، ابتدا یک دسته شکاف و حفره با هندسه مشخص (طول، زاویه و موقعیتهای متفاوت) بر روی بدنه یا لبه فنجانها ایجاد شد (جدول1). نوع و تعداد محرکهای هندسی با ایده گرفتن از بقیه مقالات [11, 12, 15] و امکان پذیر بودن اعمال آنها طراحی و اجراء شد. نمودار نیرو-جابجایی که از فرایند لهیدگی ورق سه لایه کشش عمیق شده بهدست آمد، اصلی ترین ابزار کار برای بحث و بررسی در مورد جذب انرژی این سازهها است. پارامترهای خروجی از این نمودار که عامل سنجش توانایی جذب انرژی سازه است به شرح زیر می باشد [23]:

 ا. نیروی لهیدگی بیشینه (P<sub>max</sub>): این کمیت بیشترین نیرو حین فرایند لهیدگی است و معمولا در مرحله اول بارگذاری زمانی که اولین تاشدگی ایجاد میشود، رخ میدهد.

2. انرژی جذب شده کلی (*Eabsorbed*): این پارامتر نشان دهنده انرژی کل مصرف شده حین تغییر شکل سازه است و برابر است با مساحت زیر منحنی نمودار نیرو- جابجایی که از معادله زیر بهدست میآید:

$$E_{absorbed} = \int P \ d\delta$$
 (5)  
که در اینجا  $P$  و  $\delta$  به ترتیب نیرو و طول لهیدگی میباشند.

د نیروی لهیدگی میانگین ( $P_m$ ): این پارامتر از تقسیم انرژی. جذب شده اندازه گیری شده بر کل طول لهیدگی بهدست میآید:  $P_m = \frac{E}{\delta} = \frac{\int P \, d\delta}{\delta}$  (6)

4. راندمان نیروی لهیدگی (CFE): این پارامتر برای مقایسـه راندمانهای انرژیهای جذب شده بـهکـار مـیرود و بـه صـورت نسبت نیروی لهیدگی متوسط به بیشینه تعریف میشود:  $CFE = \frac{P_m}{P_{max}}$ (7)

5. انرژی جذب شده ویژه (SAE): این پارامتر به صورت نسبت انرژی جذب شده بر واحد جرم (M) بهدست میآید: SAE =  $\frac{E_{absorbed}}{M}$  (8)

جدول 1 طراحی آزمایشهای تجربی جذب انرژی را نشان می دهد. شکل 5 به عنوان نمونه، تصویر محرکهای حفرهای ایجاد شده روی نمونهها و شکل 6 تصویر نمونههای فنجانی شکل با محرک شکاف را نشان می دهد. پس از ایجاد محرکهای هندسی بر روی نمونههای فنجانی شکل، به کمک دستگاه آزمون فشار سنتام هر نمونه به صورت مجزا و با سرعت 10 میلی متر بر دقیقه طی آزمون شبه استاتیک محوری لهیده شد و منحنی نیرو - جابجایی ثبت گردید. سطح زیر منحنی نیرو جابجایی سپس به عنوان انرژی جذب شده هر نمونه گزارش

جدول 1 کدبندی نمونههای فنجانی شکل با و بدون محرک. Table 1 Encoding deep drawn samples with & without trigger

Tuble T Encouning deep drawn samples with the without digger			
توضيحات	كد نمونه	رديف	
ضخامت mm 2، بدون محرک	S2	1	
ضخامت mm 3، بدون محرک	<b>S</b> 3	2	
ضخامت 2 mm، دو شکاف روبروی هم با زاویه صفر درجه	S2-2N-0	3	
ی ضخامت mm 2، دو شکاف روبروی هم با زاویه 45 درجه	S2-2N-45	4	
ی ضخامت mm 2، دو شکاف روبروی هم با زاویه 90 درجه	52-2N-90	5	
: ضخامت 2 mm، چهار شکاف متقارن در لبه بالایی	S2-4N-E	6	
S ضخامت mm 2،، دو حفره دایره ای به قطر mm	S2-2C-D7	7	
s ضخامت mm 2، چهار حفره دایره ای به قطر 5 mm	S2-4C-D5	8	



Fig. 5 The three layer cup samples with cutout trigger شکل 5 نمونههای فنجانی سه لایهای دارای محرک حفره در دیواره با قطر حفره متفاوت



Fig. 6 The three layer samples with notch trigger

**شکل 6** نمونههای فنجانی سه لایهای دارای محرک شکاف با زوایای مختلف در دیواره

#### 3- نتايج و بحث

به طور کلی 8 آزمون لهیدگی بر روی نمونههای فنجانی شکل انجام شد و نتایج حاصل از این آزمونهای تجربی به صورت

نمودارهای نیرو- جابجایی استخراج شد. شکل 7 به طور نمونه، تصویر یک فنجان سه لایه پس از آزمون لهیدگی را نشان میدهد. در شکل 8 نمودارهای نیرو- جابجایی برای نمونههای فنجانی شکل کشش عمیق شده بدون محرک به ترتیب برای ضخامتهای دو و سه میلیمتری ترسیم شده است. با استفاده از همین دو نمودار میتوان پارامترهای جذب انرژی که در بالا ذکر شد را استخراج کرد [11]. همچنین شکلهای 9 و 10 میکشد. لازم به ذکر است که تمامی نمونهها با سرعت لهیدگی محاسبات طول لهیدگی موثر 20 میلیمتر در نظر گرفته شد. همان گونه که در نمودارهای فوق قابل مشاهده است، مقدار اولین بیشینه نیروی لهیدگی که متناظر با وقوع نخستین لولای پلاستیک در نمونه است [16]، با افزایش ضخامت لایه پلیمری هسته افزایش یافته است.



**Fig. 7** The crushed cup sample (S3-2N-45) **شکل 7** نمونه لهیده شده فنجانی شکل (S3-2N-45)



**شکل 8** نمودار نیرو - جابجایی نمونههای 22 و S3

دلیل این امر افزایش ظرفیت جذب انرژی ورق ساندویچی باتوجه

مهندسی ساخت و تولید ایران، شهریور 1399، دوره 7 شماره 6

با افزایش ضخامت لایه هسته است چرا که در نمونههای ساندویچی فلز/پلیمر بخشی از تحمل بار وارده بر نمونه و جذب انرژی ناشی از آن بر عهده لایه پلیمری است[24].



Fig. 9 Load-displacement curve for samples having cutouts triggers of S2-2C-D7 and S2-4C-D5

**شکل9** نمودار نیرو- جابجایی نمونههای دارای محرک حفره S2-2C-D7 و S2-4C-D5



Fig. 10 Load-displacement curve for samples having notch triggers of 0, 45, 90 degree

**شکل10** نمودار نیرو - جابجایی نمونههای دارای محرک شکاف با زوایای صفر و 45 و 90 درجه

لازم به ذکر است که در تحقیق حاضر بر خلاف برخی مقالات مانند پژوهش تسوکاموتو [17] که لهیدگی ضربهای نمونههای چندلایهای آلومینیوم/دورالومین کشش عمیق شده را مورد بررسی قرار داد، قله دوم در منحنی نیرو- جابجایی در شکل نمیدهد (به انتهای صعودی منحنیهای نیرو- جابجایی در شکل 10 توجه نمایید). دلیل این اتفاق نیز طول کمتر نمونههای حاضر به دلیل محدودیتهای ساخت بوده که در نتیجه جابجایی زیاد سنبه را حین فرایند لهیدگی مقدور نساخت. همچنین، افزایش ضخامت نمونه ساندویچی باعث افزایش 24% طول لهیدگی نمونه در اولین بیشینه نیروی لهیدگی شد. مدهای میلیمتر، بیشترین نیروی لهیدگی مربوط به نمونه فنجانی با محرک هندسی شکاف با زاویه 90 درجه (S2-2N-90) و برابر 26/9 کیلونیوتن و کمترین مقدار، مربوط به نمونه (S2-4N) که برابر 25/2 کیلونیوتن است که شکافهایی در لبه نمونه داراست.



Thickness (2mm)

Fig. 11 Max. crushing force of notch and cutout triggered samples شکل 11 بیشینه نیروی لهیدگی برای نمونههای با محرک هندسی شکاف و حفره



Fig. 12 Energy absorption of notch and cutout triggered samples  $\mathbf{\hat{H}}$  and  $\mathbf{\hat{H}$  and  $\mathbf{\hat{H}}$  and  $\mathbf{\hat{H}}$  and  $\mathbf{\hat{H}}$  and  $\mathbf{\hat{H}$  and  $\mathbf{\hat{H}}$  and  $\mathbf{\hat{H}$  and  $\mathbf{\hat{H}}$  and  $\mathbf{\hat{H}$  and  $\mathbf{\hat{H}}$  and  $\mathbf{\hat{H}}$  and  $\mathbf{\hat{H}$  and  $\mathbf{\hat{H}$  and  $\mathbf{\hat{H}}$  and  $\mathbf{\hat{H}$  and  $\mathbf{\hat{$ 



Fig. 13 Specific energy absorption of notch and cutout triggered samples شكل 14 مقدار جذب انرژى ويژه نمونههاى فنجانى شكل با محرك هندسى

شکاف و حفره

مهندسی ساخت و تولید ایران، شهریور 1399، دوره 7 شماره 6

تاشدگی این نمونهها (یک نمونه تصویر نمونه تغییر شکل یافته در شکل 7 نمایش داده شد) نیز موید رفتار ذکر شده در منحنی شکل 8 میباشد. از ارزیابی نمودارهای بالا اینگونه بر میآید که برای نمونه فنجانی شکل با ضخامت 2 میلی متر (S2)، اولین بیشینه نیروی لهیدگی در جابهجایی 7/4 میلیمتری سنبه رخ داده است و مقدار آن برابر با 23/8 كيلونيوتن است. همين یارامتر اما برای نمونه (S3) در طول جابجایی 9/8 میلیمتر و مقدار 29/2 كيلونيوتن به ثبت رسيده است. با استفاده از رابطه (5) و انجام محاسبات، میزان انرژی جذب شده شبه استاتیک نمونههای (S2) و (S3) به ترتیب برابر با 337/8 و 358/6 ژول محاسبه شد. همچنین، نیروهای لهیدگی میانگین برای این دو نمونه با طول کل جابجایی 20 میلیمتر، برابر با 16/89 کیلونیوتن برای نمونه (S2) و 17/92 کیلونیوتن برای (S3) اندازه گیری شدند. با بهره گیری از رابطه (6) و انجام محاسبات عددی، نيروى لهيدگى ميانگين براى نمونه فنجان سه لايه اى به ضخامت 2 میلیمتر مقدار 24/7 کیلونیوتن و برای نمونه با ضخامت 3 میلیمتر مقدار 27/8 کیلونیوتن پیش بینی شد. با توجه به مقادیر بهدست آمده از نمودارهای تجربی برای این یارامتر (نیروی لھیدگی میانگین)، ھماھنگی نسبی بین مقادیر پیش بینی شده و مقادیر بهدست آمده از نمودارهای تجربی (با وجود خطای ناچیز) صحت آزمایشهای تجربی را تبیین نمود.

اکنون می توان راندمان جذب انرژی هر نمونه را با توجه به دادههای قبلی و با استفاده از رابطه (7) بهدست آورد که بدین صورت راندمان جذب انرژی نمونه (S2) برابر 0/67 و نمونه (S3) برابر 0/71 میباشد. افزایش 5/6 درصدی راندمان جذب انرژی از نمونه با ضخامت 2 میلیمتر به نمونه 3 میلیمتری نیز گویای تأثیر افزایش ضخامت لایه پلیمری هسته در افزایش میزان جذب انرژی نمونههای فنجانی شکل سه لایهای میباشد. با توجه به اینکه وزن نمونههای فنجانی شکل پس از لهیدگی به ترتیب برابر 46 و 52 گرم برای نمونه (S2) و (S3) می باشد، به کمک رابطه (8) مقدار پارامتر تأثیر گذار و مهم انرژی جذب شده ویژه [11] برای این دو نمونه به ترتیب برابر با 7/34 و 8/17 ژول بر گرم محاسبه گردید. برای نمونههای فنجانی شکل کشش عمیق شده که دارای محرکهای هندسی شکاف و حفره هستند، ارزیابی پارامترهای آزمون جذب انرژی با استفاده از نمودارهای تجربی نیرو- جابجایی در قالب نمودارهای میلهای در شکلهای 11 تا 13 ارائه شده است.

همان طور که از نمودارهای میلهای شکلهای 11-13 قابل مشاهده است، در نمونههای فنجانی شکل با ضخامت 2

نصير حسين و همكاران [11] وهان و همكاران [12] نيز کاهش بیشترین نیروی لهیدگی (قله نمودار نیرو- جابجایی) را با وجود محرکهای هندسی مختلف در نمونههای استوانهای خود گزارش کردند. در حالیکه بیشترین مقدار انرژی جذب شده با عدد 374/1 ژول و بیشترین میزان جذب انرژی ویژه با مقدار 8/1 ژول بر گرم در نمونهای رخ داد که دارای شکاف با زاویه 45 درجه (S2-2N-45) می باشد و کمترین مقدار جذب انرژی نیز برابر با 302/9 ژول بوده که متعلق به نمونه (S2-2C-D7) می باشد. این مطلب گویای این امر است که اولاً با ایجاد محرک هندسی شکاف بر روی دیواره نمونه ها، افزایش جذب انرژی و همچنین افزایش راندمان جذب انرژی در نمونهها رخ میده. ثانیا افزایش زاویه شکاف از صفر تا 45 درجه در مرحله اول باعث افزایش روند جذب انرژی و افزایش زاویه از 45 تـا 90 درجـه در مرحله دوم به طور عکس باعث کاهش روند جذب انرژی می گردد. علوینیا و همکاران[15] در بررسی اثر طول و موقعیت شکاف موجود بر دیواره استوانههای آلومینیومی بر میزان جذب انرژی نیز به نتایج تقریباً مشابهی دست یافتند.

همان گونه که بیان شد هدف از استفاده از محر کهای هندسی، بهبود راندمان جذب انرژی سازهها از طریق کاهش بیشینه نیروی لهیدگی و همچنین کاهش طول لهیدگی در اولین پیک نیرو میباشد که منجر به افزایش مساحت زیر منحنی نمودار نیرو-جابجایی میشود و باعث افزایش در میزان جذب انرژی می گردد. لذا با استناد به نتایج بهدست آمده از آزمونهای لهیدگی برای نمونههای دارای محرک هندسی، میتوان نتیجه گرفت که محرک شکاف بر روی بدنه با زاویه 45 درجه، همزمان با ارضا کردن 2 شرط مذکور (کاهش بیشینه نیرو و طول اولین لهیدگی در پیک نیرو) مقدار جذب انرژی بیشتری را نسبت به سایر محرکهای هندسی استفاده شده، داراست. پس مشخص میشود که موقعیت و راستای این شکاف بر روی بدنه فنجانهای سه لایه دقیقا در منطقه تحریک نمونه واقع شده است تا راندمان جذب انرژی را (نسبت به نمونه بدون

اما راجع به نمونه فنجانی شکل دارای شکاف در لبه باید گفت که ایجاد اینگونه شکافها باعث کههش حدوداً 14/5 ظرفیت جذب انرژی نمونه ناشی از کهش پتانسیل ظرفیت تحمل بار نمونه به دلیل ایجاد شکاف در نقاط حساس منتهی به دیواره فنجان که نقش اصلی در مهار نیروهای لهیدگی را داراست، گردید. این نتیجه خلاف نتایج به دست آمده در پژوهش نصیر حسین و همکاران [11] میباشد که طی تحقیق

مهندسی ساخت و تولید ایران، شهریور 1399، دوره 7 شماره 6

ایشان مشخص شد محرک شکاف لبه در نمونه های کامپوزیتی استوانه ای موجب افزایش جذب انرژی تا 13 درصد می شود. دلیل تفاوت اثر محرک شکاف در تحقیق حاضر با نتایج نصیر حسین و همکاران [11] را می توان در موقعیت این شکافها جستجو کرد، گو این که در پژوهش هان و همکاران [12] نیز با افزودن محرک هندسی حفره مربعی به میان طول لوله های فولادی و آلومینیومی میزان جذب انرژی کاهش چشمگیری را نشان داد.

در نمونههای فنجانی شکل دارای محرکهای هندسی حفره نیز کاهشی در ظرفیت جذب انرژی نمونههای 2 میلیمتری رخ مشاهده شد. در نمونه دارای 2 حفره با قطر 7 میلیمتر ظرفیت جذب انرژی نمونه نسبت به حالت بدون محرک در حدود 34/3 ژول افت کرده است، در حالی که با افزایش تعداد حفرهها از 2 به 4 و کاهش قطرشان از 7 به 5 میلیمتر، جذب انرژی به میزان کمتری نسبت به نمونه دارای 2 حفره کاهش یافت. در این نمونه میزان جذب انرژی در حدود 11 ژول (نسبت به نمونه بدون محرک) کاهش یافت. مشابه حالتی که 4 شکاف متقارن در لبه نمونهها وجود داشت، دلیل این کاهش ظرفیت جذب انرژی، کاهش ظرفیت تحمل بار دیواره نمونه و همچنین افزایش تمرکز تنش در این منطقه با ایجاد حفرهای با سایز و ابعاد غیر استاندارد است. پیش بینی می شود که اگر محل حفرهها به یکی از دو سر نمونه، مثلاً به انتهای باز فنجان نزدیکتر بود، افزایش میزان جذب انرژی اتفاق میافتاد. مثلا در پژوهشهان و همکاران [12] در بررسی اثر محرکهای گشودگی مربعی بر روی نمونههای استوانهای آلومینیومی و فولادی، مشخص شد که ایجاد حفره در نزدیکی یکی از 2 سر انتهایی لوله سبب افزایش ظرفیت جذب انرژی نمونه می شود. دلیل این امر با توجه به هندسه محرک و قرار گرفتن محرک در منطقه تحریک سازه مىباشد.

#### 4- نتايج

با توجه به مطالب ارائه شده در ایـن پـژوهش، نتـایج زیـر ارائـه میشود:

- در نمونههای فنجانی شکل بدون محرک با افزایش ضخامت لایه پلیمری هسته از 1 به 2 میلیمتر، میزان اولین بیشینه نیروی لهیدگی از مقدار 29/2 کیلونیوتن در نمونه S2 به مقدار 33/8 کیلونیوتن در نمونه S3 رسیده است، یعنی به میزان 15/7 درصد افزایش داشته است. افزایش ضخامت لایه پلیمری همچنین، باعث افزایش میزان انرژی جذب شده در حدود 24/2

#### بررسی و مطالعه جذب انرژی فنجانهای کشش عمیق شده سه لایهای آلومینیوم/پلی پروپیلن/فولاد

علی نصیری، امیر عطریان

حجم مادہ به حجم احاطه شده  $\phi$ 

طول لهيدگی  $\delta$ 

#### 6- مراجع

- [1] GC Jacob, JF Fellers, S Simunovic, JM Starbuck. Energy Absorption in Polymer Composite Materials for Automotive Crashworthiness. Journal of composite materials 36. 2002:830-850.
- [2] F Ince, HS Turkmen, Z Mecitoglu, N Uludağ, İ Durgun, E Altınok, H.Örenel. A numerical and Experimental study on the impact behavior of box structures. procedia Engineering 10. 2011:1736-1741.
- [3] M Weiss, <u>ME Dingle</u>, BF Rolfe, PD Hodgson. The Influence of Temperature on the Forming Behavior of Metal/Polymer Laminates in Sheet Metal Forming. Journal of Engineering Materials and Technology 129. 2007:530-537.
- [4] JA DiCello. Steel-polypropylene-steel laminate-A new weight reduction material. SAE Transactions 89. 1980:491-505.
- [5] WK Miller. Metal-plastic laminates for vehicle weight reduction. SAE Transactions 89. 1980:481-490.
- [6] A Atrian, F Fereshteh-Saniee. Deep drawing process of steel/brass laminated sheets. Composites Part B: Engineering 47. 2013:75-81.
- [7] M Habibi-Parsa M Ettehad, PH Matin, S Nasher Al Ahkami. Experimental and Numerical Determination of Limiting Drawing Ratio of Al3105-Polypropylene-Al3105 Sandwich Sheets. Engineering Materials and Technology 132. 2010:031004.
- [8] MR Morovvati, B Mollaei-Dariani, MH Asadian-Ardakani. A theoretical, numerical, and experimental investigation of plastic wrinkling of circular two-layer sheet metal in the deep drawing. Journal of Materials Processing Technology 210. 2010:1738-1747.
- [9] A Rajabi, Kadkhodayan M. An experimental and numerical investigation of wrinkling in deepdrawing of fiber-metal laminates. Proceedings of 10th International Conference on Technology of Plasticity (ICTP). 2011:438-443.
- [10] JG LIU, W Xue. Formability of AA5052/polyethylene/AA5052 sandwich sheets. Trans Nonferrous Met Soc China 23. 2013:964-969.
- [11]N Nasir Hussain SP Regalla, YVD Rao. Comparative Study of Trigger Configuration for Enhancement of Crashworthiness of Automobile Crash Box Subjected to Axial Impact Loading. Procedia Engineering 173. 2017:1390-1398.
- [12] H Han, F Taheri, N Pegg. Quasi-static and dynamic crushing behaviors of aluminum and steel tubes with a cutout. Thin-Walled Structures 45. 2007:283-300.
- [13] M Akay, R Hanna. A comparison of honeycombcore and foam-core carbon fiber/ epoxy sandwich panels. Composites 1990:325-331.
- [14] WC Hwang, KS Lee, YJ Yang, IY Yang. An

درصد شده است.

- طول لهیدگی در اولین بیشینه نیروی لهیدگی با تغییر ضخامت نمونههای فنجانی شکل از 2 به 3 میلیمتر از 11/2 میلیمتر به 12/6 میلیمتر افزایش یافته است.

- راندمان جذب انرژی نمونهها با افزایش ضخامت نمونهها در کل به میزان 5/9 درصد افزایش داشته است.

- در نمونههای فنجانی شکل با ضخامت 2 میلیمتر، ایجاد محرک هندسی شکاف در بدنه نمونهها (در بهترین حالت یعنی با زاویه 45 درجه)، میزان جذب انرژی نمونهها را تا 10/73 درصد افزایش داده است.

- ایجاد شکاف با زاویه صفر درجه بر روی دیواره نمونهها مقدار جذب انرژی را به میزان 3/5 درصد کاهش میدهد. با افزایش زاویه شکاف از صفر به 45 درجه مقدار جذب انرژی به میزان 8 درصد (نسبت به نمونه بدون محرک) افزایش مییابد و پس از آن با افزایش زاویه ترک از 45 به 90 درجه این مقدار 1/6 درصد (نسبت به نمونه بدون محرک) کاهش مییابد.

- در نمونه فنجانی 2 میلیمتری دارای شکاف در لبه، میزان ظرفیت جذب انرژی به مقدار 11/4 درصد کاهش پیدا کرده است.

- در نمونه فنجانی شکل دارای دو محرک هندسی حفره به قطر 7 میلیمتر، مقدار جذب انرژی تا حدود 12/5 درصد کاهش داشته است. همچنین، افزایش تعداد حفرهها در دیواره فنجانها از 2 به 4 و کاهش همزمان قطر این حفرهها از 7 به 5 میلیمتر نیز باعث کاهش ظرفیت ضربه پذیری نمونهها تا 3/2 درصد نسبت به نمونه بدون محرک می شود.

#### 5- فهرست علايم

- A
   مساحت احاطه شده (mm²)

   A
   (J)

   انرژی جذب شده (J)

   نیروی فنر (kN)

   سختی فنر (N/mm)

   سختی فنر (g)

   M

   جرم سازه (g)

   سختی فنر (kN)

   نیروی لهیدگی میانگین (kN)

   سنازه (kN)

   نیروی لهیدگی میانگین (kN)

   شعاع لوله استوانه (mm)

   ضخامت ورق (mm)

   مطول فشردگی فنر (mm)
  - - علايم يونانى
  - تنش تسليم مواد  $\sigma$
  - اثر ساختاری سطح مقطع  $\eta$

loading. The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics 13. 1960:10-15.

- [20] CL Magee, PH Thornton. Design Considerations in Energy Absorption by Structural Collapse. SAE Transactions 87. 1978: 2041-2055.
- [21] MH Parsa, M Ettehad, S Nasher Al Ahkami. FLD Determination of AL 3105/Polypropylene/AL3105 sandwich sheet using numerical calculation and experimental investigations. International journal of Material Forming 407. 2009:112-115.
- [22] A Atrian, H Panahi. Experimental and finite element investigation on wrinkling behaviour in deep drawing process of Al3105/Polypropylene/Steel304 sandwich sheets. Procedia Manufacturing 15. 2018:984-991.
- [23] F Tarlochan, F Samer, AMS Hamouda, S Ramesh, K Khalid. Design of thin wall structures for energy absorption applications: Enhancement of crashworthiness due to axial and oblique impact forces. Thin-Walled Structures 71. 2013:7-17.
- [24] A Alavi Nia, MZ Sadeghi. The effects of foam filling on compressive response of hexagonal cell aluminum honeycombs under axial loadingexperimental study. Materials and Design 31. 2010:1216-1230.

Experimental Study on the Optimum Collapse Characteristics of Composite Structural Member under Impact Loading. International Journal of PRECISION Engineering and Manufacturing 12. 2011:521-526.

- [15] A Alavi Nia, H Badnava, Kh Fallah Nejad. An experimental investigation on crack effect on the mechanical behavior and energy absorption of thinwalled tubes. Materials and Design 32. 2011:3594-3607.
- [16] SE Mirmohammadsadeghi Kh Khalili, SY Ahmadi, SJ Hosseinipour. Experimental and finite element simulation investigation of axial crushing of grooved thin-walled tubes. Int J Adv Manuf Technol 77. 2014:1627-1643.
- [17] H Tsukamoto. Impact compressive behavior of deep-drawn cups consisting of aluminum/duralumin multi-layered graded structures. Materials Science and Engineering B 198. 2015:25-34.
- [18] S. Santosa, T Wierzbicki. Crash behavior of box columns filled with aluminum honeycomb or foam. Computers & Structures 68. 1998:343-367.
- [19] JM Alexander. An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial