



# Experimental and Numerical Investigation of Formability in the Deep Drawing Process of Aluminum Sheets Reinforced with Stainless Steel 304 Mesh

Elyas Haddadi<sup>1\*</sup>, Hossein Jafarzadeh<sup>2</sup>, Moharram Shameli<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Ta C., Islamic Azad University, Tabriz branch, Tabriz, Iran.

<sup>3</sup> Space Thrusters Research Institute, Iranian Space Research Center, Tabriz, Iran.

## ARTICLE INFO

### Article Type:

Original Research

**Received:** 27.09.2025

**Revised:** 27.10.2025

**Accepted:** 16.02.2026

### Keyword:

Deep drawing  
Multi-layer sheet  
Stainless steel 304  
Limiting draw ratio  
Annealing

### Corresponding Author:

Elyas Haddadi

**Email:** [ehadadi@tvu.ac.ir](mailto:ehadadi@tvu.ac.ir)

## ABSTRACT

This study aimed to investigate the formability of multilayer sheets in deep drawing. The three-layer sheets comprised a sandwich of aluminum 1050, a 304 stainless steel mesh, and another aluminum 1050 layer, produced by roll bonding. This configuration was examined to increase the limiting draw ratio and enhance formability. Experimental tests were performed under lubricated conditions on sheets annealed at 250°C and 350°C to assess the influence of temperature and lubrication on final drawing depth and part quality. Alongside experiments, numerical simulation of the deep drawing process was conducted using ABAQUS 6.14 to predict final cup depth and analyze stress and strain distributions. Simulation results were compared with experimental data to evaluate modeling accuracy. The results showed that the steel mesh in the core layer markedly increased composite strength without substantially impairing formability. An annealing temperature of 350°C was determined as optimal for maximizing drawing depth. The maximum cup depth achievable without failure was 10.1 mm, corresponding to a limiting draw ratio of 1.53. These findings demonstrate that multilayer sheets reinforced with stainless steel mesh, with proper annealing and lubrication, can significantly improve formability in deep drawing.



---

**EXTENDED ABSTRACT**


---

### Introduction

The desirable mechanical and physical properties of metallic and non-metallic sheets, including higher strength, improved formability of low-formability sheets, enhanced corrosion and wear resistance, high electrical conductivity, and reduced weight, can be achieved in multilayer sheets. These properties have led to the widespread application of multilayer sheets in industries such as automotive, marine, aerospace, and chemical engineering.

Currently, the forming process of metallic sheets is one of the most critical aspects of manufacturing industrial components, household appliances, automotive bodies, aircraft structures, and similar applications. Among various forming methods, the deep drawing process holds a significant position.

More importantly, formability is a key factor in the deep drawing process. Equation (1) represents the Limiting Draw Ratio (LDR), which serves as a criterion for evaluating the formability of sheets in the production of cylindrical components.

$$LDR = \frac{D_{max}}{d}, \quad D_{max} = \sqrt{d^2 + 4dh} \quad (1)$$

In the deep drawing process, where  $D_{max}$  represents the largest diameter of the blank (initial workpiece) that can be drawn without failure,  $d$  denotes the punch diameter (final workpiece), and  $h$  indicates the height of the component after the drawing operation, the limiting draw ratio serves as a criterion for evaluating the formability of sheets in the production of cylindrical components.

The novelty of this research lies in the fact that, in addition to utilizing the findings of other researchers, the drawability of aluminum sheets reinforced with 304 stainless steel mesh is investigated, and the optimal conditions for deep drawing and annealing processes for these sheets are determined.

### Methodology

In this study, pure 1050 aluminum sheets and 304 stainless steel mesh were utilized. The aluminum sheets, with a thickness of 1 mm, were cut into dimensions of 60×60 mm, and the stainless steel mesh, with a thickness of 0.1 mm, was similarly cut to 60×60 mm (Figure 1).

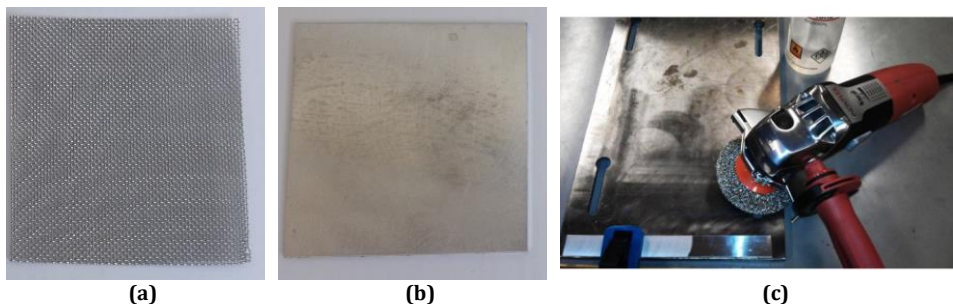


Figure 1. a) 304 stainless steel mesh, b) pure aluminum 1050, and c) sample preparation for the drawing process

This research focused on the use of a practical metal, namely 1050 aluminum, reinforced with 304 stainless steel mesh. The test specimen consisted of a three-layer composite: aluminum/stainless steel mesh/aluminum, with the initial thickness of the aluminum layers being 1 mm and the stainless steel mesh 0.1 mm. To enhance the bonding process prior to layer joining, the aluminum sheet surfaces in contact with the stainless steel mesh underwent surface preparation.

## Results and discussion

The parameters influencing formability in the deep drawing process include workpiece lubrication conditions, punch and die radii, clearance between the punch and die, and blank holder force. In this study, two factors—lubrication and blank holder force—were investigated through both experimental and simulation models. The limiting draw ratio was calculated from the experimental and simulation results and compared.

Based on the recorded thickness values at the thinning locations of the components, a value of approximately 30% was adopted as the failure criterion.

Figure 2 illustrates the failed cups. Figure 2 (a) corresponds to a composite sheet without annealing, drawn to a depth of 3.9 mm without lubricant and with a blank holder force of approximately 23,400 kN. Figure 2 (b) pertains to a composite sheet annealed at 250°C, drawn to a depth of 4.4 mm without lubricant and with a blank holder force of approximately 26,400 kN. Finally, Figure 2(c) relates to a composite sheet annealed at 350°C, drawn to a depth of 5.2 mm without lubricant and with a blank holder force of approximately 31,200 kN.

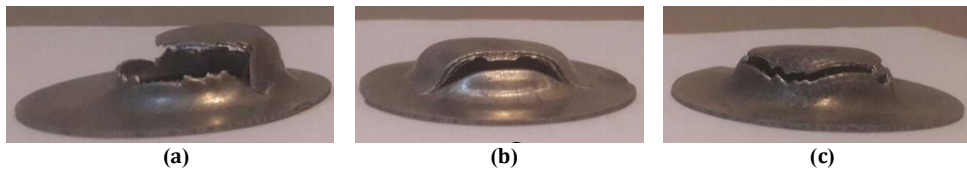


Figure 2. a) without annealing, b) annealed at 250°C, and c) annealed at 350°C.

The depth of the samples in different states is shown in Figure 3.

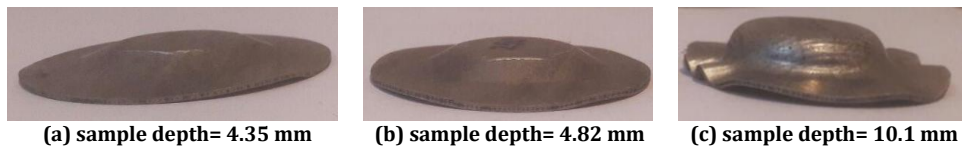


Figure 3. Depth of experimental samples under conditions: a) without annealing, b) annealed at 250°C, and c) annealed at 350°C.

The limiting draw ratio was calculated using Equation (1). The LDR results are presented in Table (1).

Table 1. Results Obtained for the limiting draw ratio from Experimental and Simulation Methods

	without annealing	annealed at 250°C	annealed at 350°C
experimental	1.25	1.28	1.53
numerical	1.24	1.27	1.49

The criterion for sheet failure in this study is thickness reduction, which was determined to be 30% by measuring samples from the tensile test under an optical profile projector. This value indicates that a 30% reduction in sheet thickness is permissible. For instance, if the sheet has an initial thickness of 1 mm, a reduction to 0.7 mm is allowable; exceeding this reduction will result in blank rupture. The unannealed composite sheet was drawn to a depth of 4.9 mm, with the sheet thickness at this depth reaching 0.936 mm. The composite sheet annealed at 250°C was drawn to a depth of 4.61 mm, with the sheet thickness at this depth reaching 0.703 mm. Finally, the composite sheet annealed at 350°C was drawn to a depth of 9.18 mm, with the sheet thickness at this depth reaching 0.710 mm.

## **Conclusion**

The objective of this research was to investigate the drawability of three-layer sheets and to evaluate the effects of annealing, blank holder force, and lubrication on the limiting draw ratio. Experimental tests were conducted to determine the LDR. The optimal three-layer sheet was achieved under conditions involving the use of lubricant, annealing at a temperature of 350°C, and a spring with a stiffness of 3000 N/mm. The maximum cup depth drawable without failure was reported as 10.1 mm, with an LDR of 1.53. The findings of this study indicate that annealing enhances the mechanical properties of three-layer sheets, improving formability and reducing hardness induced by the accumulative roll bonding process. Furthermore, appropriate lubrication reduces friction between the sheet and the die, facilitating more uniform material flow during the drawing process, which leads to improved surface quality and a reduction in defects such as wrinkling and tearing.



## بررسی تجربی و عددی شکل‌پذیری فرآیند کشش عمیق ورق‌های آلومینیومی تقویت‌شده با توری فولاد ضدزنگ ۳۰۴

الیاس حدادی<sup>۱\*</sup>، حسین جعفرزاده<sup>۲</sup>، محرم شاملی<sup>۳</sup>

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.

۲- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز، تبریز، ایران.

۳- پژوهشکده رانشگرهای فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تبریز، ایران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

هدف از این پژوهش، بررسی شکل‌پذیری ورق‌های چندلایه در فرآیند کشش عمیق می‌باشد. ورق‌های سه‌لایه شامل ترکیب آلومینیوم ۱۰۵۰، توری فولاد ضدزنگ ۳۰۴ و مجدداً آلومینیوم ۱۰۵۰ بودند که به روش نورد تولید شدند. این ساختار سه‌لایه با هدف افزایش حد نسبت کشش و بهبود قابلیت شکل‌دهی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌های تجربی در شرایط استفاده از روانکار و بر روی ورق‌های بازپخت‌شده در دماهای ۲۵۰ و ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت تا تأثیر دما و روانکاری بر عمق نهایی کشش و کیفیت قطعه بررسی شود. در کنار آزمایش‌های تجربی، شبیه‌سازی عددی فرآیند کشش عمیق نیز با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS 6.14 انجام شد. هدف از شبیه‌سازی، پیش‌بینی عمق نهایی فنجان‌شکل و تحلیل توزیع تنش و تغییر شکل در حین فرآیند بود. نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی مقایسه گردید تا دقت مدل‌سازی مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج نشان داد که وجود توری فولادی در لایه میانی، موجب افزایش استحکام ترکیبی ورق بدون افت محسوس در شکل‌پذیری آن می‌شود. همچنین، دمای بازپخت ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد به‌عنوان شرایط بهینه برای دستیابی به عمق کشش بیشتر به دست آمد. بیشینه عمق فنجان‌شکل که بدون ایجاد شکست قابل کشش بود برابر با ۱۰/۱ میلی‌متر و حد نسبت کشش برابر با ۱/۵۳ به دست آمد. این نتایج نشان داد که استفاده از ورق‌های چندلایه تقویت‌شده با توری فولادی در کنار بازپخت و روانکاری مناسب، می‌تواند تأثیر به‌سزایی در بهبود شکل‌پذیری در فرآیند کشش عمیق داشته باشد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۰۵

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۰۵

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۱۱/۲۷

### کلید واژگان:

کشش عمیق  
ورق چندلایه  
فولاد ضد زنگ ۳۰۴  
حد نسبت کشش  
بازپخت

### نویسنده مسئول:

الیاس حدادی

پست الکترونیکی:

[ehadadi@tvu.ac.ir](mailto:ehadadi@tvu.ac.ir)



## مقدمه

ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی مطلوب در ورق‌های فلزی و غیرفلزی از جمله استحکام بالاتر، بهبود شکل‌دهی ورق‌هایی با شکل‌پذیری پایین، افزایش مقاومت به خوردگی و سایش، رسانایی الکتریکی بالا و کاهش وزن، در ورق‌های چندلایه قابل دستیابی است. این ویژگی‌ها موجب شده‌اند که ورق‌های چندلایه به‌طور گسترده‌ای در صنایع خودروسازی، دریایی، هوافضا و صنایع شیمیایی مورد استفاده قرار گیرند [۱، ۲]. در حال حاضر، فرآیند شکل‌دهی ورق‌های فلزی یکی از مهم‌ترین بخش‌های تولید قطعات صنعتی، لوازم خانگی، بدنه خودروها، بدنه هواپیما و غیره به‌شمار می‌رود. در میان روش‌های مختلف شکل‌دهی، فرآیند کشش عمیق<sup>۱</sup> از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است [۳، ۴].

نکته مهم‌تر این است که شکل‌پذیری، یکی از عوامل مهم در فرآیند کشش عمیق محسوب می‌شود. رابطه (۱)، حد نسبت کشش<sup>۲</sup> را نشان می‌دهد که به‌عنوان معیاری برای ارزیابی شکل‌پذیری ورق‌ها در تولید قطعات استوانه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد [۵].

$$LDR = \frac{D_{max}}{d}, \quad D_{max} = \sqrt{d^2 + 4dh} \quad (1)$$

که در آن  $D_{max}$  بزرگترین قطر قطعه اولیه<sup>۳</sup> است که بدون شکست قابل کشش می‌باشد،  $d$  قطر سنبه (قطر قطعه بعد از کشش) و  $h$  ارتفاع قطعه بعد از عملیات کشش است. حد نسبت کشش معیاری برای ارزیابی شکل‌پذیری ورق‌ها در قطعات استوانه‌ای است.

با وجود کاربردهای متنوع کامپوزیت‌های زمینه فلزی، مطالعات اندکی در زمینه بررسی شکل‌پذیری ورق‌های چندلایه صورت گرفته است. در ادامه به برخی از پژوهش‌هایی که تاکنون در مورد ورق‌های تک‌لایه و چندلایه انجام شده، اشاره می‌شود.

کراجی‌بانی و همکاران [۶] شکل‌پذیری ورق‌های دولایه آلومینیوم-فولاد St12 را در فرآیند کشش عمیق بررسی کردند و نتایجی را در مورد حد نسبت کشش ورق دولایه، اثر افزایش درصد ضخامت لایه‌ای، اثر افزایش شعاع قوس قالب و اثر آرایش لایه‌ها<sup>۴</sup> ارائه نمودند.

تسینگ و همکاران [۷] امکان استفاده از نمودارهای حد شکل‌دهی را برای تعیین شکل‌پذیری و شکست در ورق‌های لایه‌ای آلومینیوم-مس بررسی کردند. آن‌ها تأثیر نسبت ضخامت اولیه و نرخ کاهش ضخامت بر شکل‌پذیری این ورق‌ها را تحلیل کردند و نتیجه پژوهش آن‌ها نشان داد که نرخ کاهش ضخامت در شرایط ضخامت ثابت، عامل مهمی در شکل‌پذیری ورق‌های لایه‌ای است.

دهقانی و همکاران [۸] به بررسی حد نسبت کشش و تغییرات ضخامت در ورق دولایه مس-فولاد ضدزنگ L ۳۰۴ پرداختند. آن‌ها از شبیه‌سازی اجزای محدود برای پیش‌بینی محل شکست استفاده کردند و دریافتند که

<sup>۱</sup> Deep Drawing

<sup>۲</sup> Limiting Draw Ratio (LDR)

<sup>۳</sup> Blank

<sup>۴</sup> Lay-up

توزیع ضخامت در ماده قوی‌تر (فولاد ضدزنگ) یکنواخت‌تر از ماده ضعیف‌تر است. همچنین توزیع کرنش در فنجان‌های کشیده‌شده با روش عددی، مکان شکست را به‌درستی پیش‌بینی کرد.

مصطفی‌پور و همکاران [۹] تأثیر استفاده از یک سیستم ورق‌گیر پالسی جدید<sup>۱</sup> را بر بهبود شکل‌پذیری ورق آلومینیوم ۱۰۵۰ به صورت عددی و تجربی بررسی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از این سیستم همراه با فرکانس و فاصله مناسب، موجب افزایش عمق فنجان و بهبود توزیع ضخامت می‌شود.

مروتی و همکاران [۱۰] پدیده چین‌خوردگی<sup>۲</sup> ورق‌های دولایه آلومینیوم-فولاد ضدزنگ را به روش‌های عددی و تجربی بررسی کردند. هدف آن‌ها تعیین حداقل نیروی نگهدارنده قطعه اولیه<sup>۳</sup> برای جلوگیری از چین‌خوردگی بود. آن‌ها اثر پارامترهایی نظیر خواص ماده‌ای لایه آلومینیوم و آرایش لایه‌ها را بر نیروی شکل‌دهی و نیروی نگهدارنده قطعه اولیه تحلیل کردند و دریافتند که مقدار بهینه نیروی نگهدارنده قطعه اولیه به هندسه قطعه اولیه، خواص مواد و آرایش لایه‌ها بستگی دارد. هم‌چنین تحقیقاتی بر روی نیروی نگهدارنده قطعه اولیه به صورت عددی و تجربی انجام شده است [۱۱، ۱۲].

فضلی و همکاران [۱۳] روش تحلیلی بهبودیافته را برای تخمین حد نسبت کشش فولاد ضدزنگ<sup>۴</sup> در مرحله اول کشش ارائه دادند. آن‌ها تأثیر پارامترهایی مانند هندسه و خواص مکانیکی در ناحیه قوس قالب، ضریب اصطکاک، ضریب سخت‌شوندگی، نسبت ناهمسانگردی پلاستیک و نسبت ضخامت قطعه اولیه به قطر را بر حد نسبت کشش بررسی کردند.

کدخداییان و همکاران [۱۴] شرایط بحرانی برای ایجاد چین‌خوردگی الاستیک و پلاستیک در لبه قطعه اولیه دایره‌ای فولاد و آلومینیوم را در فرآیند کشش عمیق بررسی کردند. آن‌ها بر مبنای نظریه دو بُعدی تنش صفحه‌ای و تابع دو شاخه‌سازی<sup>۵</sup> در مختصات قطبی، راه‌حل تحلیلی بسته‌ای برای تنش بحرانی کشش بر پایه معیار تسکا ارائه دادند و نشان دادند که نتایج نظریه خمش بزرگ با صرف‌نظر از جمله‌های غیرخطی، با نظریه خمش کوچک مشابه است.

سوکووا و همکاران [۱۵] شکل‌پذیری کامپوزیت‌های ساندویچی سه‌لایه 316L / PP-PE / 316L را در فرآیند کشش عمیق با استفاده از سنبه‌های مسطح با اشکال و اندازه‌های مختلف بررسی کردند. آن‌ها گزارش دادند که رفتار شکل‌دهی این ساختارها به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر هندسه سنبه و ضخامت هسته قرار دارد. بهرنس و همکاران [۱۶] تأثیر هندسه ابزار را بر حد نسبت کشش در فرآیند کشش عمیق در مقیاس میکرون بررسی کردند. آن‌ها ورق‌های نازک A199.5 و ECu58 با ضخامت ۲۰ میکرون و فولاد ضدزنگ آستنیتی نیکل-کروم ((1.4301 (X5CrNi 18-10)) با ضخامت ۲۵ میکرون را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش شعاع قالب، حد نسبت کشش در این ورق‌های نازک افزایش می‌یابد.

<sup>۱</sup> pulsating blankholder

<sup>۲</sup> Wrinkling

<sup>۳</sup> Blankholder Force (BHF)

<sup>۴</sup> CA-DDQ steel

<sup>۵</sup> Bifurcation

نوآوری این پژوهش در این است که علاوه بر به کارگیری نتایج سایر محققان، قابلیت کشش ورق‌های آلومینیوم تقویت شده با توری فولادی ضدزنگ ۳۰۴ بر روی و بهترین شرایط عملیات کشش عمیق با بهترین شرایط بازپخت برای ورق‌های فوق به دست آمده است. با وجود کاربردهای متنوع کامپوزیت‌های زمینه فلزی، مطالعات اندکی در زمینه بررسی شکل‌پذیری ورق‌های چندلایه صورت گرفته است.

### روش انجام آزمایش

در این تحقیق از ورق آلومینیوم خالص ۱۰۵۰ و توری فولادی ضدزنگ ۳۰۴ استفاده شده است. مطابق شکل ۱، ورق آلومینیومی به ضخامت ۱ میلی‌متر به ابعاد ۶۰×۶۰ میلی‌متر و توری فولادی به ضخامت ۰/۱ میلی‌متر به ابعاد ۶۰×۶۰ میلی‌متر بریده شده است.

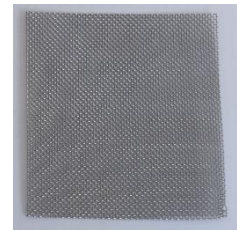
این مطالعه با استفاده از یکی از فلزات کاربردی، یعنی آلومینیوم ۱۰۵۰ و توری فولاد ضدزنگ ۳۰۴ به‌عنوان تقویت‌کننده می‌باشد. نمونه مورد مطالعه شامل سه لایه ورق است. ورق توری فولاد ضدزنگ ۳۰۴ بین دو لایه ورق آلومینیومی قرار گرفته است. ضخامت اولیه ورق آلومینیوم یک میلی‌متر و ورق توری فولاد ضدزنگ ۳۰۴ به ضخامت ۰/۱ میلی‌متر است. به منظور بهبود فرآیند قبل از اتصال لایه‌ها، برای تهیه کامپوزیت یک سطح از ورق‌های آلومینیومی که در تماس با توری ضدزنگ است، تحت عملیات آماده‌سازی سطحی قرار گرفتند. سطوح اتصال این ورق‌ها ابتدا توسط آب و صابون تمیز گردید سپس همراه با توری ضدزنگ به مدت نیم ساعت در محلول استون قرار داده شدند تا اکسید زدایی شوند (این روش‌ها به دو طریق شیمیایی و مکانیکی و یا ترکیبی از هر دو صورت می‌گیرند. انجام عملیات چربی زدایی و برسکاری سطحی ضروری به نظر می‌رسد چرا که تأثیر قابل توجهی بر استحکام پیوند به وجود آمده خواهد داشت تا پیوند متالورژیکی مناسبی حاصل شود. از طرف دیگر برسکاری علاوه بر تمیز کردن سطح به ایجاد یک لایه ترد بر سطح فلز کمک می‌کند).



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۱. الف) توری فولادی ضدزنگ ۳۰۴، ب) آلومینیوم خالص ۱۰۵۰ و ج) آماده‌سازی نمونه برای عملیات کشش

نمونه‌ها پس از آماده‌سازی سطحی، به منظور جلوگیری از لغزش ورق‌ها حین نورد، از چهارگوش توسط دریل سوراخ‌کاری شدند و سپس توسط سیم‌های فولادی به هم محکم بسته شدند و مجموعه حاصل بدون عملیات پیش‌گرم و در حالت سرد، حدود ۵۰٪ کاهش ضخامت پیدا کردند. شکل ۲ دستگاه نورد را نشان می‌دهد و مشخصات این دستگاه در جدول (۱) ارائه شده است. فاصله غلطک‌ها در حین آزمایش ۱/۰۳ میلی‌متر در نظر گرفته شد. این مقدار با در نظر گرفتن کاهش ۵۰ درصدی ضخامت ورق‌های کامپوزیتی و نیز ۰/۰۲ میلی‌متر

جبران تغییر شکل الاستیک غلطک‌های نورد محاسبه شده است. لایه‌ها با فرآیند نورد تجمعی<sup>۱</sup> به یکدیگر متصل شدند. پس از انجام نورد، ورق‌ها به مدت یک ساعت در دماهای ۲۵۰ و ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد در کوره الکتریکی بازپخت شدند تا تنش‌های پسماند کاهش یافته و شکل‌پذیری بهبود یابد.

انتخاب دماهای فوق بر اساس رفتار حرارتی اجزای ورق سه‌لایه آلومینیوم خالص ۱۰۵۰ و توری فولادی ضدزنگ ۳۰۴ صورت گرفت. با توجه به اینکه دمای تبلور مجدد<sup>۲</sup> آلومینیوم در محدوده ۳۰۰-۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و در فولاد ضدزنگ در حدود ۵۵۰-۷۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد، این دو دما در ناحیه زیر تبلور مجدد آلومینیوم و بدون تغییر ساختاری در فاز فولادی قرار می‌گیرند. در نتیجه، در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد آغاز تبلور مجدد جزئی<sup>۳</sup> در لایه آلومینیومی اتفاق می‌افتد. هدف از این عملیات، بهبود شکل‌پذیری، کاهش تنش‌های پسماند و بهبود چسبندگی بین لایه‌ها در حین فرآیند کشش عمیق بوده است.

برای انجام آزمون‌های کشش عمیق، قطعه اولیه‌های دایره‌ای با قطر ۶۰ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر از ورق‌های سه‌لایه بریده شدند. آزمایش‌های کشش عمیق با استفاده از یک پرس هیدرولیکی مجهز به قالب<sup>۴</sup> استوانه‌ای انجام گرفت. نیروی نگهدارنده قطعه اولیه به صورت ثابت اعمال شد و به‌منظور کاهش اصطکاک بین ورق و ابزار، از روانکار مولیکوت<sup>۴</sup> استفاده شد.



شکل ۲. دستگاه نورد

جدول ۱. مشخصات دستگاه نورد

سرعت موتور	ظرفیت موتور	سرعت غلطک	قطر غلتک	طول غلتک	فاصله غلتک
(rpm)	(Kw)	(rpm)	(mm)	(mm)	(mm)
۴۵۰	۷۵	۱۰-۳۰	۳۵۰	۴۵۰	۱۰۰۳

<sup>۱</sup> Accumulative Roll Bond (ARB)

<sup>۲</sup> Recrystallization

<sup>۳</sup> Partial recrystallization

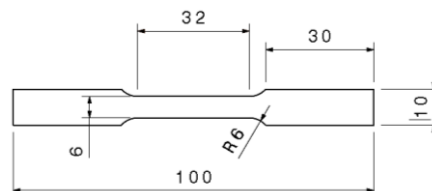
<sup>۴</sup> Molykote

در هر شرایط، عمق نهایی فنجان و حد نسبت کشش اندازه‌گیری شد. به‌طور موازی، شبیه‌سازی عددی فرآیند کشش عمیق با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS 6.14 انجام شد. در این شبیه‌سازی، ورق‌ها به صورت ساختار چندلایه مدل‌سازی شدند و تماس بین سنبه و قالب با در نظر گرفتن خواص مواد و شرایط اصطکاکی مناسب تعریف گردید.

در نهایت، نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی با یکدیگر مقایسه شدند تا دقت مدل‌سازی بررسی و تأثیر دمای بازپخت بر شکل‌پذیری ارزیابی شود.

### آزمایش کشش

آزمایش کشش به منظور تعیین نقطه تسلیم، مقاومت نهایی و میزان افزایش طول آلومینیوم ۱۰۵۰ و ورق‌های کامپوزیتی انجام گرفت. نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM-E8 ساخته شدند [۱۷]. نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش کشش در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. علاوه بر این، خواص مکانیکی آلومینیوم ۱۰۵۰ و ورق‌های کامپوزیتی در جدول (۲) و شکل ۴ ارائه شده است.

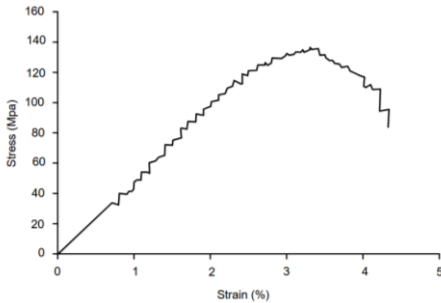


شکل ۳. نمونه تست کشش طبق استاندارد ASTM-E8

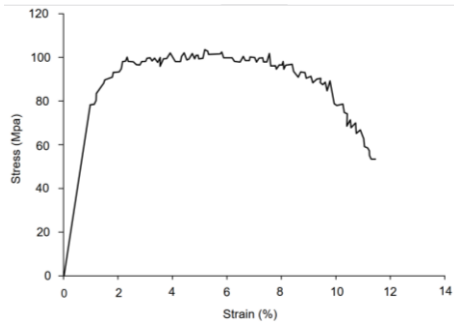
جدول ۲. خواص مکانیکی آلومینیوم ۱۰۵۰ و ورق‌های کامپوزیتی

ماده	طول اولیه (mm)	ازدیاد طولی (%)	استحکام نهایی (MPa)	نقطه تسلیم (MPa)
آلومینیوم ۱۰۵۰	۳۴	۱۱	۱۰۴	۹۱

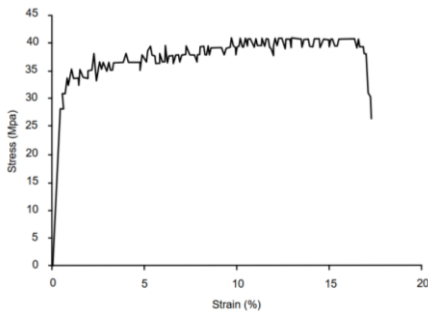
۱۱۷	۱۳۵	۳٫۵	۳۴	کامپوزیت بدون آنیل
۶۸	۸۹	۷	۳۴	کامپوزیت با آنیل ۲۵۰°C
۳۰	۴۰	۱۶	۳۴	کامپوزیت با آنیل ۳۵۰°C



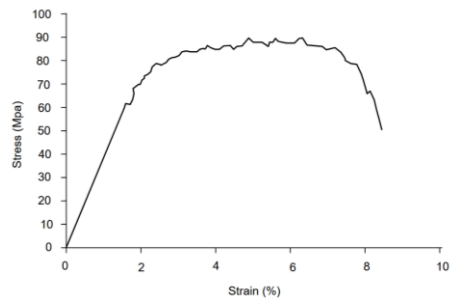
(ب)



(الف)



(د)

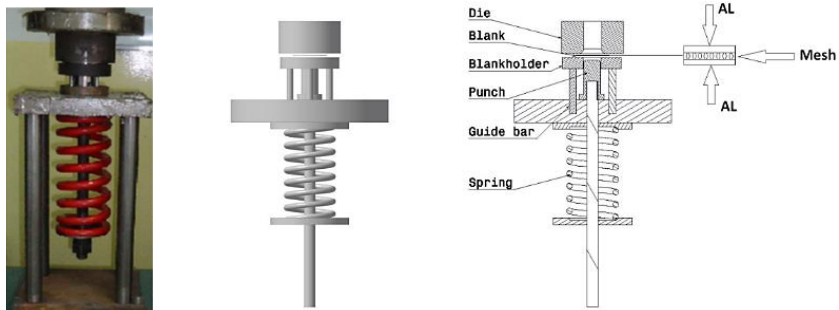


(ج)

شکل ۴. نمودارهای تنش- کرنش به‌دست آمده از تست کشش نمونه‌ها، الف) آلومینیوم خالص، ب) کامپوزیت بدون آنیل، ج) کامپوزیت با آنیل کردن در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و د) کامپوزیت با آنیل کردن در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد

### قالب کشش عمیق

قالب کشش عمیق بر اساس ضخامت نهایی ورق سه‌لایه طراحی شد. ابعاد هندسی قطر سنبه، شعاع لبه سنبه، قطر ماتریس و شعاع لبه ماتریس به ترتیب برابر با ۳۰ میلی‌متر، ۴ میلی‌متر، ۳۲/۲ میلی‌متر و ۸ میلی‌متر طراحی و ساخته شدند. شکل شماتیک قالب در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. قالب کشش عمیق

### عملیات حرارتی

استفاده از فرآیند نورد تجمعی برای اتصال لایه‌ها منجر به سخت کاری می‌شود که مقاومت نهایی را افزایش می‌دهد. آنیل کردن ۱ به عنوان یک عملیات حرارتی که، خواص فیزیکی و گاهی شیمیایی ماده را تغییر داده تا شکل‌پذیری آن افزایش و سختی آن کاهش پیدا کند، بر روی ورق‌های سه‌لایه اعمال شد. آنیل کردن در دماهای ۲۵۰ و ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت انجام شد و سپس ورق‌ها به مدت ۲۴ ساعت داخل کوره به آرامی سرد شدند.

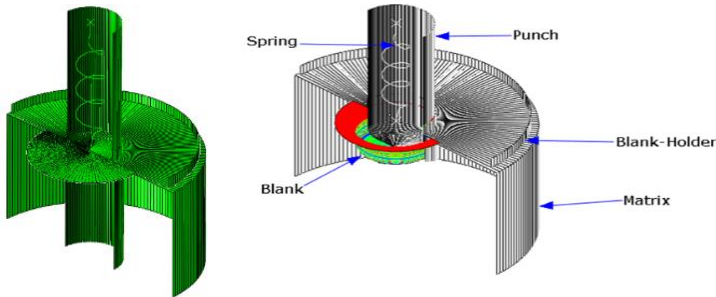
### شبیه‌سازی المان محدود (FEM)

برای مطالعه قابلیت شکل‌پذیری ورق‌های چندلایه، فرآیند کشش عمیق با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS 6.14 که نرم‌افزاری با توانمندی بالا در تحلیل‌های غیرخطی است، شبیه‌سازی شد. به دلیل یکنواخت بودن ماده و وجود شرایط تقارن محوری، فضای مدل‌سازی AXISYMMETRIC برای تحلیل مسئله به کار گرفته شد. سنبه، ماتریس و نگهدارنده ورق به صورت جسم سخت و از نوع تحلیلی مدل شدند و ورق چندلایه به صورت قابل تغییر شکل مدل‌سازی شده و با استفاده از المان‌های SAX1 مش‌بندی شد. در این شبیه‌سازی، ماتریس در حالت ثابت قرار داشت و نگهدارنده ورق آزاد بود و به فنر وابسته بود که با سنبه در تماس بود. حرکت سنبه در جهت محور Z با سرعت ۵ میلی‌متر بر ثانیه مطابق با سرعت پرس هیدرولیکی در نظر گرفته شد. برای در نظر گرفتن تأثیر اینرسی فنر به عنوان عامل مهم در پاسخ فنر، شتاب گرانش برای مدل تعریف شد. برای مش‌بندی، ورق چندلایه به ۳۰۰ المان محدود تقسیم شد. ضریب اصطکاک بین سطوح در شبیه‌سازی در جدول (۳) داده شده است. ضریب اصطکاک حدود ۰/۱۵ نمایانگر شرایط تماس خشک بود که در آزمایش‌ها وجود داشت، در حالی که ضریب اصطکاک حدود ۰/۰۵ نمایانگر شرایط تماس لغزنده بین ماتریس و ورق چندلایه با استفاده از روانکار Gardolube-VP 10052/2 است [۸]. شبیه‌سازی مدل المان محدود در شکل ۶ نشان داده شده است.

### جدول ۳. ضریب اصطکاک بین سطوح در شبیه‌سازی

<sup>۱</sup> Annealing

ضریب اصطکاک	سطح مشترک
۰/۱۵	سنبه - ورق
۰/۱۵	ورق گیر - ورق
۰/۰۵	ماتریس - ورق



شکل ۶. مدل المان محدود قالب کشش عمیق

### انجام آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی تأثیر نیروی نگهدارنده ورق بر حد نسبت کشش

نیروی نگهدارنده ورق به منظور جلوگیری از چین خوردگی در فلنج ۱ و همچنین دیواره فنجان کشیده شده اعمال می‌شود. نیروی بیش از حد نیروی نگهدارنده قطعه اولیه منجر به شکست در دیواره فنجان می‌شود. نیروی نگهدارنده ورق لازم برای جلوگیری از چین خوردگی بستگی به نسبت کشش، جنس ورق و ضخامت نسبی ورق دارد. با کاهش ضخامت نسبی ورق، تمایل به چین خوردگی افزایش می‌یابد که نیازمند نیروی نگهدارنده ورق بیشتری برای کنترل جریان و جلوگیری از چین خوردگی است [۵]. برای کشش نمونه‌ها از پرس هیدرولیکی ۱۰۰ تنی با سرعت ثابت ۵ میلی‌متر بر ثانیه استفاده شد. به منظور مقایسه اختلاف شرایط با و بدون استفاده از روانکار بر حد نسبت کشش، آزمایش‌ها ابتدا بدون استفاده از روانکار انجام گرفتند. سختی اولیه فنر در قالب برابر با ۶۰۰۰ نیوتن بر میلی‌متر بود که نیروی نگهدارنده ورق بیشتری بر ورق اعمال می‌کرد و منجر به پارگی نمونه‌ها شد.

شکل ۷ فنجان‌های شکسته شده را نشان می‌دهد. شکل ۷ (الف) مربوط به ورق کامپوزیتی بدون آنیل است که در حالتی بدون روانکار و با اعمال نیروی ورق‌گیری در حدود ۲۳۴۰۰ کیلونیوتن، تا عمق ۳/۹ میلی‌متر کشیده شده است. شکل ۷ (ب) مربوط به ورق کامپوزیتی با دمای آنیل  $250^{\circ}\text{C}$  است که در نبود روانکار و با اعمال نیروی ورق‌گیری در حدود ۲۶۴۰۰ کیلونیوتن، تا عمق ۴/۴ میلی‌متر کشیده شده است و نهایتاً شکل ۷ (ج) مربوط به ورق کامپوزیتی با دمای آنیل  $350^{\circ}\text{C}$  است که در نبود روانکار و با اعمال نیروی ورق‌گیری در حدود ۳۱۲۰۰ کیلونیوتن، تا عمق ۵/۲ میلی‌متر کشیده شده است.

<sup>1</sup> Flange



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۷. الف) کامپوزیت بدون آنیل، ب) کامپوزیت با آنیل کردن در دمای ۲۵۰ درجه و ج) کامپوزیت با آنیل کردن در دمای ۳۵۰ درجه

### تأثیر روانکاری

روانکاری یکی از پارامترهای مهمی است که روی کیفیت و قابلیت شکل‌گیری ورق‌های فلزی، تأثیر گذار است. استفاده از روانکارهای مناسب، به‌طور قابل توجهی اصطکاک و سایش ابزار را کاهش می‌دهد و جریان فلزی بهتری را داخل حفره ماتریس به منظور دستیابی به سطح نهایی بهتر محصول فراهم می‌کند. با استناد به نتایج به‌دست آمده از آزمایش کشش، (ازدیاد طولی ۳/۵ درصد برای ورق کامپوزیتی بدون آنیل، ازدیاد طولی ۷ درصد برای ورق کامپوزیتی با دمای آنیل ۲۵۰°C و ازدیاد طولی ۱۶ درصد برای ورق کامپوزیتی با دمای آنیل ۳۵۰°C) قبل از انجام تست‌های اولیه انتظار می‌رفت ورق کامپوزیتی با دمای آنیل ۳۵۰°C نسبت به دو نمونه دیگر به‌دلیل افزایش انعطاف‌پذیری، ورق بیشتر داخل حفره ماتریس جریان یابد. پس از انجام تست‌های اولیه و مشاهده پارگی در هر سه حالت، با بررسی علل شکست که یکی از علت‌های آن بیشتر بودن نیروی ورق‌گیر می‌باشد، (نیروی ورق‌گیر بیشتر جریان یافتن بلانک به داخل ماتریس را محدود می‌کند) برای نمونه‌های بعدی، به‌جای فنر با سختی ۶۰۰۰ نیوتن بر میلی‌متر از فنر دیگری با سختی ۳۰۰۰ نیوتن بر میلی‌متر استفاده شد تا فنجان‌ها بتوانند بدون گسیختگی داخل ماتریس کشیده شوند. همچنین در این مرحله روانکار پودری Gardolube-VP 10052/2 (غوطه‌ور کردن ورق داخل روانکار) نیز اعمال شد که تأثیر قابل ملاحظه‌ای در افزایش جریان یافتن بلانک داشت و دیگر پارامترها مانند ابعاد هندسی قالب و سرعت کاری پرس ثابت نگه داشته شد. نیروی ورق‌گیر محاسبه شده در نمونه‌های بدون شکست برای حالت بدون آنیل، آنیل ۲۵۰°C و آنیل ۳۵۰°C به ترتیب KN ۱۲۵۷۰، KN ۱۴۴۶۰ و KN ۳۰۳۰۰ به‌دست آمد. برای اعتبار سنجی نتایج عددی، آزمایش‌های تجربی صورت گرفت. بدین منظور خصوصیات به‌دست آمده ماده از آزمایش کشش و شرایط مرزی در شبیه‌سازی اعمال شد. نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی با المان محدود، اختلاف قابل اغمازی با نتایج تجربی داشت. برای محاسبه حد نسبت کشش از رابطه (۱) استفاده شده است [۵]. نتایج حد نسبت کشش در جدول (۴) نشان داده شده است. عمق نمونه‌ها در دو شرایط تجربی و شبیه‌سازی و در حالت‌های مختلف در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده‌اند. شکل ۸ فنجان‌هایی را که با موفقیت کشیده شده‌اند نشان می‌دهد. شکل ۹ نتایج شبیه‌سازی را برای حالت استفاده از روانکار و فنر با سختی ۳۰۰۰ نیوتن بر میلی‌متر نشان می‌دهد. در این شکل ماکزیمم عمق قابل کشش و توزیع ضخامت در طول مسیر، نشان داده شده است.

جدول ۴. نتایج به‌دست آمده از حد نسبت کشش به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی

	کامپوزیت بدون آنیل	کامپوزیت با آنیل ۲۵۰°C	کامپوزیت با آنیل ۳۵۰°C
تجربی	۱,۲۵	۱,۲۸	۱,۵۳

شبییه سازی	۱,۲۴	۱,۲۷	۱,۴۹
------------	------	------	------



(ج) عمق نمونه = ۱,۰۱mm

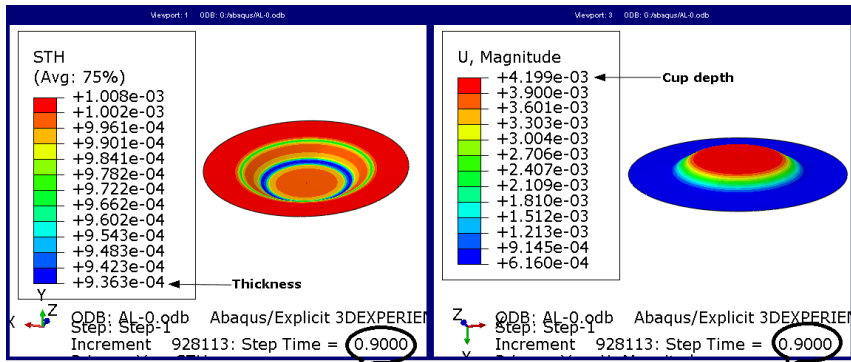


(ب) عمق نمونه = ۴,۸۲mm

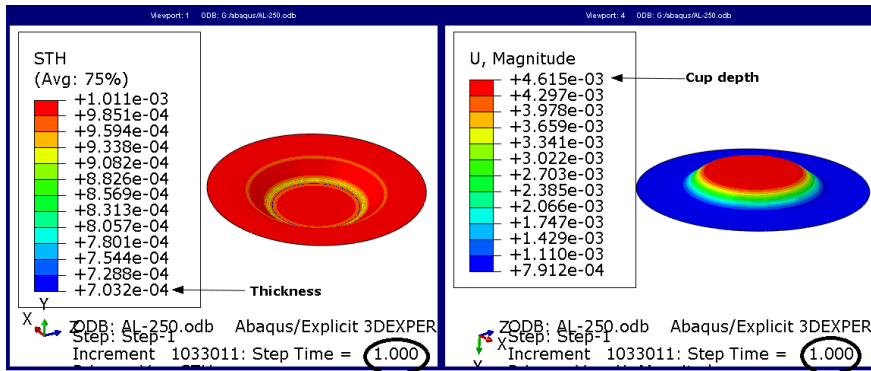


(الف) عمق نمونه = ۴,۳۵mm

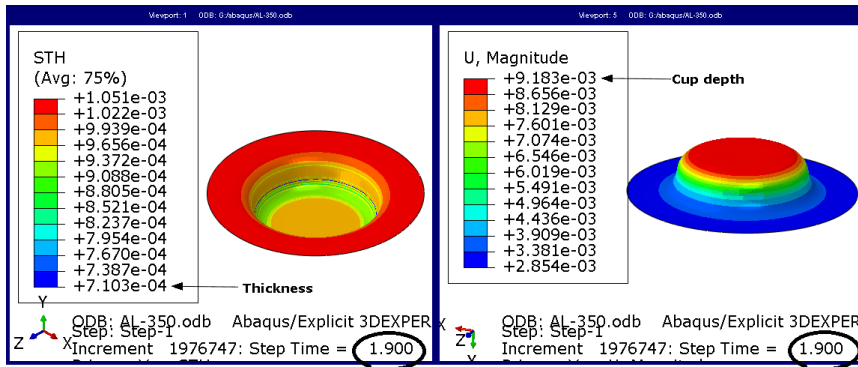
شکل ۸. عمق نمونه‌های تجربی در حالت‌های، الف) کامپوزیت بدون آنیل، ب) کامپوزیت با آنیل کردن در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و ج) کامپوزیت با آنیل کردن در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد



(الف)



(ب)

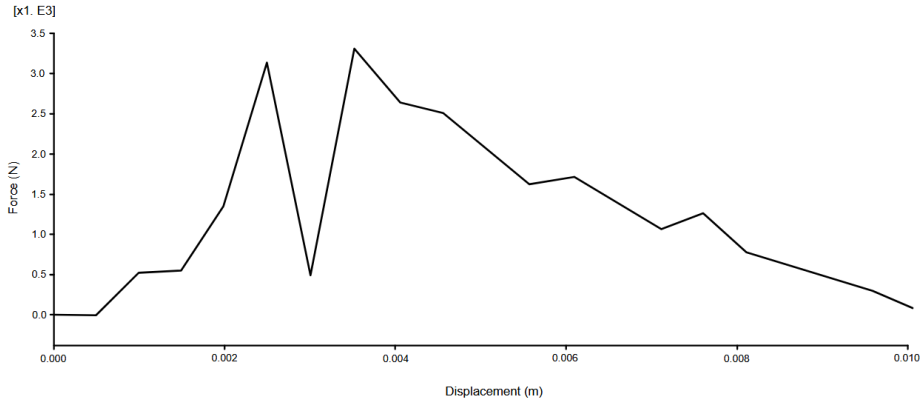


(ج)

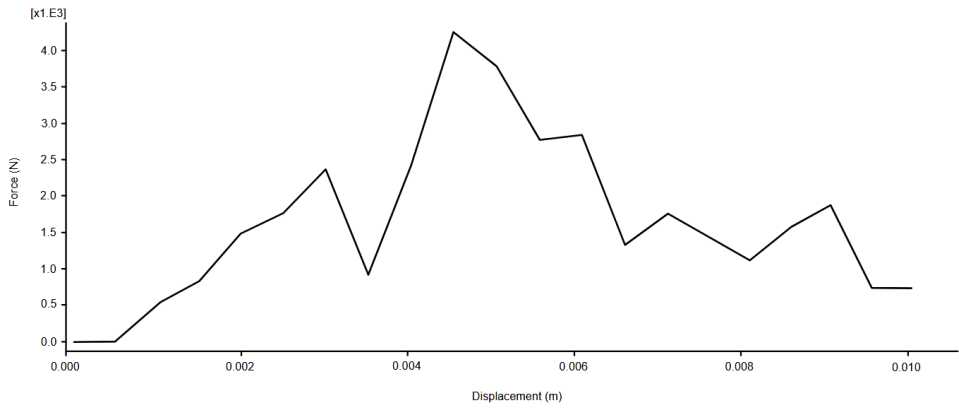
شکل ۹. بیشترین عمق فنجان قبل از شکست، الف) کامپوزیت بدون آنیل، ب) کامپوزیت با آنیل کردن در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و ج) کامپوزیت با آنیل کردن در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد

معیار پارگی ورق‌ها در این تحقیق کاهش ضخامت است که این مقدار با اندازه‌گیری نمونه‌های حاصل از تست کشش، زیر دستگاه پروفایل پروژکتور نوری، مقدار ۳۰ درصد به‌دست آمد. این مقدار بیانگر این است که ما مجاز به کاهش ۳۰ درصد از ضخامت ورق هستیم. یعنی اگر ورق ۱ میلی‌متر ضخامت داشته باشد، تا ۰/۷ میلی‌متر مجاز به کاهش ضخامت هستیم که کاهش ضخامت بیش از این مقدار منجر به پارگی بلانک خواهد شد. در شبیه‌سازی نیز با استفاده از این معیار تحلیل انجام گرفت و به همین منظور خروجی (Section Thickness) یا همان ضخامت مقطع انتخاب شد. با پیشروی فریم به فریم در نرم‌افزار، فریم قبل پارگی به عنوان معیار مجاز در صد کاهش ضخامت انتخاب می‌شود. یعنی در این فریم ضخامت ورق ۰/۷ و یا ۰/۷ به بالا است. در این فریم با انتخاب خروجی (U (Displacement) یا همان جابجایی، ماکزیمم عمقی که می‌توان فنجان را بدون شکست کشید، به‌دست می‌آید. با توجه به شکل ۹ ورق کامپوزیتی بدون آنیل تا عمق ۴/۱۹ میلی‌متر کشیده شده که ضخامت ورق در این عمق به ۰/۹۳۶ میلی‌متر می‌رسد. ورق کامپوزیتی با دمای آنیل ۲۵۰°C تا عمق ۴/۶۱ میلی‌متر کشیده شده که ضخامت ورق در این عمق به ۰/۷۰۳ میلی‌متر می‌رسد و نهایتاً ورق کامپوزیتی با دمای آنیل ۳۵۰°C تا عمق ۹/۱۸ میلی‌متر کشیده شده که ضخامت ورق در این عمق به ۰/۷۱۰ میلی‌متر می‌رسد.

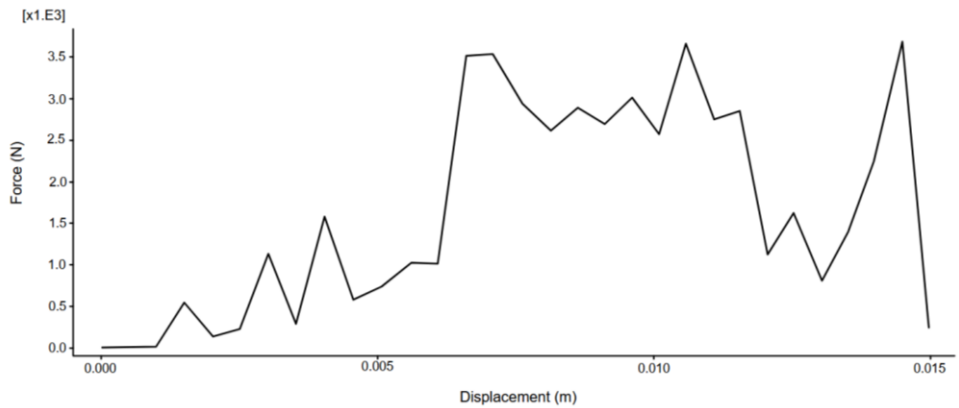
نمودارهای نیرو-جابجایی و توزیع ضخامت از شبیه‌سازی استخراج شده‌اند. در نمودار نیرو-جابجایی، نقطه اوج نشان‌دهنده بیشترین نیروی اعمال شده در فرآیند کشش بدون شکست است و نوسانات قبل از این نقطه ناشی از حرکت لحظه‌ای ورق هنگام جریان یافتن داخل قالب می‌باشد. محور عمودی نمودار توزیع ضخامت از مقدار ۰/۷ میلی‌متر شروع شده که مربوط به مقدار مجاز کاهش ضخامت ۳۰ است، به طوری که کاهش ضخامت کم‌تر از این مقدار منجر به شکست می‌شود. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب نمودارهای نیرو-جابجایی و توزیع ضخامت را در حالت‌های مختلف نشان می‌دهند.



(الف)

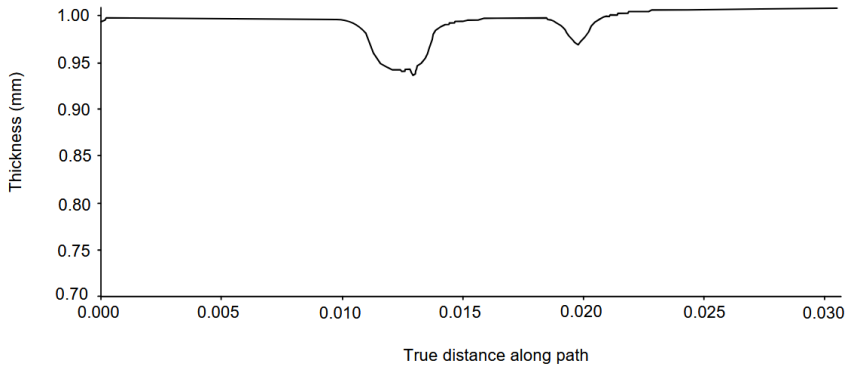


(ب)

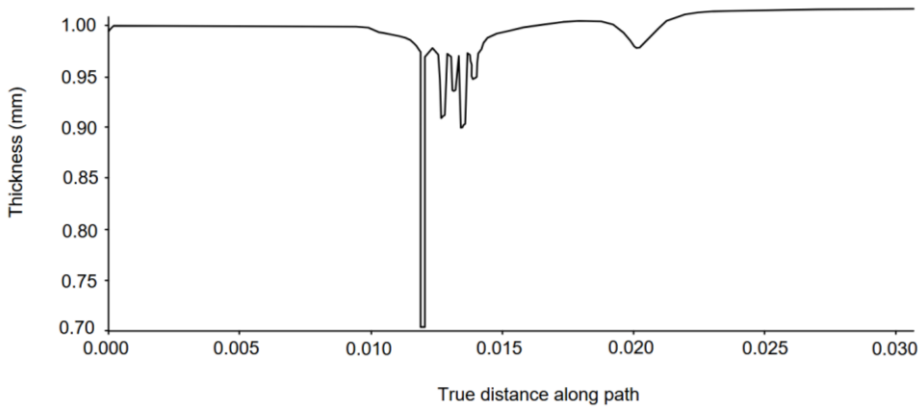


(ج)

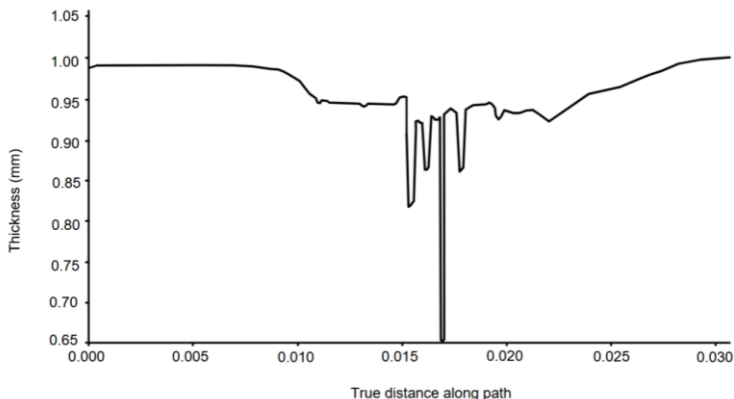
شکل ۱۰. نمودار نیرو-جابجایی فرآیند کشش عمیق، الف) کامپوزیت بدون آنیل، ب) کامپوزیت با آنیل کردن در دمای ۲۵۰ درجه و ج) کامپوزیت با آنیل کردن در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۱. توزیع ضخامت برحسب میلی‌متر از مرکز نمونه تا فلنج در حالت‌های، الف) کامپوزیت بدون آنیل، ب) کامپوزیت با آنیل کردن در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و ج) کامپوزیت با آنیل کردن در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد

## نتایج و بحث

کشش عمیق یکی از مهم‌ترین روش‌های شکل‌دهی ورق می‌باشد که در آن یک ورق مسطح توسط سنبه به درون حفره ماتریس کشیده شده و شکل سنبه را به خود می‌گیرد. سپس سنبه به عقب برمی‌گردد و قطعه آزاد می‌شود. پارامترهای مؤثر در شکل‌پذیری فرآیند کشش عمیق شامل شرایط روانکاری قطعه‌کار، شعاع سنبه و ماتریس، لقی بین سنبه و ماتریس و نیروی ورق‌گیر می‌باشد. در این تحقیق دو عامل روانکاری و نیروی ورق‌گیر در دو مدل تجربی و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته و پارامتر حد نسبت کشش در نتایج تجربی و شبیه‌سازی محاسبه شده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

عامل رایج برای پیش‌بینی شکست، در صد نازک شدگی دیواره قطعه نسبت به ضخامت اولیه آن است [۱۶]. در این مطالعه چندین آزمایش انجام شد تا درصد نازک‌شدگی تعیین شود. سپس، بر اساس مقادیر ضخامت ثبت شده در محل نازک‌شدگی قطعات، مقدار حدود ۳۰٪ به‌عنوان عامل شکست در نظر گرفته شده است. در این تحقیق برای نخستین بار از کامپوزیت آلومینیوم-توری فولاد ضدزنگ به عنوان ساختار سه‌لایه و تقویت شده استفاده شده و قابلیت انجام فرآیند کشش عمیق برای این نوع ساختار مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهش‌های پیشین چنین ترکیبی مورد استفاده قرار نگرفته بود و نیز بررسی رفتار مکانیکی و شکل‌پذیری آن برای نخستین بار در این مطالعه گزارش می‌شود.

با ارزیابی نوآوری پژوهش حاضر و همچنین مقایسه آن با پژوهش‌های پیشین، نتایج حاصل از این تحقیق، با مطالعات مشابه گزارش شده در مراجع ۶، ۸، ۱۰ و ۱۵ مقایسه گردید. در پژوهش‌های مذکور، حداکثر حد نسبت کشش برای ورق‌های دولایه آلومینیوم-فولاد در محدوده ۱/۳۵ تا ۱/۴۵ گزارش شده است، در حالی که در این مطالعه مقدار ۱/۵۳ به‌دست آمد. این افزایش بیانگر تأثیر قابل توجه استفاده از توری فولاد ضدزنگ به عنوان

تقویت‌کننده است. همچنین اعمال عملیات بازپخت در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد باعث بهبود شکل‌پذیری ورق شد.

در مقایسه با نتایج دهقانی و همکاران [۸] که ماکزیمم عمق قابل کشش برای ساختارهای دولایه را حدود ۷/۵ میلی‌متر گزارش کرده‌اند، در تحقیق حاضر عمق ۱۰/۱ میلی‌متر بدون شکست به دست آمد. این تفاوت را می‌توان ناشی از ساختار سه‌لایه، افزایش همگنی تغییرشکل و کاهش تمرکز تنش در فصل مشترک لایه‌ها دانست.

از نظر هم‌خوانی مدل المان محدود و آزمایش تجربی، اختلاف بین نتایج عددی و تجربی کمتر از ۵٪ برای عمق نهایی و کمتر از ۴٪ برای توزیع ضخامت ثبت شد که نشان دهنده دقت مناسب مدل المان محدود است. به منظور کنترل آماری صحت نتایج، هر آزمون کشش سه‌بار تکرار شد و میانگین داده‌ها با انحراف معیار کمتر از ۳٪ گزارش گردید.

بنابراین، نتایج نشان می‌دهد که استفاده از توری فلزی در ساختار سه‌لایه، همراه بازپخت در دمای بهینه و روانکاری مناسب، نسبت به پژوهش‌های پیشین، منجر به بهبود حدود ۶ تا ۱۰ درصدی در حد نسبت کشش شده است.

## نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش بررسی قابلیت کشش عمیق ورق‌های سه‌لایه و مطالعه تأثیر عملیات آنیل کردن، نیروی ورق‌گیر و روانکاری بر حد نسبت کشش می‌باشد. آزمایش‌های تجربی برای تعیین حد نسبت کشش انجام شد و شبیه‌سازی عددی نیز روی فرآیند کشش عمیق صورت گرفت و نتایج زیر حاصل گردید:

۱- اختلاف بین نتایج عددی و تجربی کمتر از ۵ درصد برای عمق نهایی و کمتر از ۴ درصد برای توزیع ضخامت ثبت شد.

۲- هر آزمون کشش سه‌بار تکرار گردید و میانگین داده‌ها با انحراف معیار کمتر از ۳ درصد گزارش شد.

۳- بهترین عملکرد ورق سه‌لایه در شرایط استفاده از روانکار، آنیل کردن در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشر با سختی ۳۰۰۰ به دست آمد.

۴- بیشینه عمق فنجان قابل کشش بدون ایجاد شکست برابر با ۱۰/۱ میلی‌متر و حد نسبت کشش برابر با ۱/۵۳ گزارش شد.

۵- عملیات آنیل کردن خواص مکانیکی ورق‌های سه‌لایه را بهبود بخشیده، شکل‌پذیری را افزایش داده و سختی ناشی از نورد تجمعی را کاهش می‌دهد.

۶- روانکاری مناسب، اصطکاک بین ورق و قالب را کاهش داده، جریان یکنواخت‌تر ماده را در فرآیند کشش تسهیل کرده و در نتیجه کیفیت سطح را بهبود بخشیده و عیوبی نظیر چین‌خوردگی و پارگی را کاهش می‌دهد.

۷- انتخاب بهینه سختی فشر نگهدارنده ورق، نیروی نگهدارنده را کنترل کرده، از شکست زودرس جلوگیری می‌کند و عملکرد فرآیند کشش را بهبود می‌بخشد.

۸- شبیه‌سازی‌های المان محدود ارائه شده، ابزار مفیدی برای پیش‌بینی رفتار ورق‌های چندلایه در فرآیند کشش فراهم کرده و می‌توانند در بهینه‌سازی پارامترها به کار گرفته شوند تا هزینه‌های آزمایشگاهی کاهش یابد و زمان توسعه محصول کوتاه‌تر شود.

## References

- [1] Amanollahi, A., Raeissi, M., Saeidi, N., & Ebrahimzadeh, I. (2023). Evaluation of the Effect of Heat Treatment Parameters on Mechanical Properties of Architected Steel Incorporated Low Carbon Steel and Aluminum 6061. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 20(1), 279-300. <https://doi.org/10.48301/kssa.2022.326385.1973>. (In Persian)
- [2] Derogar, J., Seyedkashi, S. M. H., Sajed, M. (2022). Experimental Study of Friction Stir Spot Welding of a Non-alloyed Aluminium Sheet with Stationary Shoulder. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 19(3), 141-161. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.283937.1504>. (In Persian)
- [3] Deilami Azodi, Seyedkashi, S. M. H., Sajed, M. (2022). Experimental Study of Friction Stir Spot Welding of a Non-alloyed Aluminium Sheet with Stationary Shoulder. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 19(3), 141-161. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.283937.1504>. (In Persian)
- [4] Modanloo, V., B. Akhoundi, B., & Dadgar Asl, Y. (2023). Minimizing the required forming force in the sheet hydroforming process using a fractional factorial design. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, 9(12), 1-9. <https://doi.org/10.22034/ijme.2023.400065.1788>, (In Persian)
- [5] Altan, T. and Tekkaya, A. E. (2012). *Sheet Metal Forming: Fundamentals*. ASM International. <https://books.google.com/books?id=rbTxcQNw IMC>
- [6] Karajibani, E., Fazli, A., & Hashemi, R. (2015). Numerical and experimental study of formability in deep drawing of two-layer metallic sheets. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80(1), 113-121. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-6978-5>
- [7] Tseng, H.-C., Hung, C., & Huang, C.-C. (2010). An analysis of the formability of aluminum/copper clad metals with different thicknesses by the finite element method and experiment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49(9), 1029-1036. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2446-4>
- [8] Dehghani, F. and Salimi, M. (2016). Analytical and experimental analysis of the formability of copper-stainless-steel 304L clad metal sheets in deep drawing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82(1), 163-177. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7359-9>
- [9] Mostafapur, A., Ahangar, S., & Dadkhah, R. (2013). Numerical and experimental investigation of pulsating blankholder effect on drawing of cylindrical part of aluminum alloy in deep drawing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(5), 1113-1121. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5115-6>
- [10] Morovvati, M.R., Mollaei-Dariani, B., & Asadian-Ardakani, M. H. (2010). 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(13), 1738-1747. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.06.004>

- [11] Aguado, C., Iglesias, M., de-Juan, A. Garcia, P. (2025). Effect of Blank-Holder Force in Springback of a Gas Cooktop Component Made from Non-Stable Austenitic 1.4301 Steel. *Applied Sciences*, 15, 4934. <https://doi.org/10.3390/app15094934>
- [12] Sugiyanto, D., Asbanu, H., Siahaan, F. S. (2020) The effect of blank holder on the deep drawing process on plates using software based with a Finite Element Method (FEM). 1469, 012038. [doi:10.1088/1742-6596/1469/1/012038](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1469/1/012038)
- [13] Fazli, A. and Arezoo, B. (2012). Prediction of limiting drawing ratio considering the effective parameters of die arc region. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(4), 745-751. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.10.025>
- [14] Kadkhodayan, M. and Moayyedean, F. (2011). Analytical elastic-plastic study on flange wrinkling in deep drawing process. *Scientia Iranica*, 18(2), 250-260. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scient.2011.03.020>
- [15] Sokolova, O.A., Kühn, M., & Palkowski, H. (2012). Deep drawing properties of lightweight steel/polymer/steel sandwich composites. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 12(2), 105-112. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.acme.2012.05.001>
- [16] Behrens, G., Trier, F. O., Tetzl, H., & Vollertsen, F. (2016). Influence of tool geometry variations on the limiting drawing ratio in micro deep drawing. *International Journal of Material Forming*, 9(2), 253-258. <https://doi.org/10.1007/s12289-015-1228-9>
- [17] Sokolova, O.A., Carradò, A., & Palkowski, H. (2011). Metal-polymer-metal sandwiches with local metal reinforcements: A study on formability by deep drawing and bending. *Composite Structures*, 94(1), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.08.013>
- [18] Isik, K., Silva, M. B., Tekkaya, A. E., & Martins, P. A. F. (2014). Formability limits by fracture in sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(8), 1557-565. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.02.026>