



بررسی رفتار بازگشت‌فتری کامپوزیت‌های الیاف-فلز با استفاده از تئوری‌های لایه معادل و لایه مجزا

امیرعلی ابوالقاسمی^۱، عبدالحسین جلالی افچای^{۲*}، بهروز مرادخانی^۳ و سید علی فاطمی^۱

^۱ کارشناسی‌ارشد، دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

^۲ استادیار، دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

^۳ دانشجوی کارشناسی‌ارشد، دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۸/۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۲۹

چکیده

در فرایندهای خم‌کاری، ورق بین ابزار و قالب دچار تغییر شکل پلاستیک شده، شکل نهایی موردنظر را به خود می‌گیرد. مهم‌ترین نقصی که در خم‌کاری ورق‌ها رخ می‌دهد، تغییر زاویه خم پس از باربرداری است. این پدیده که بازگشت‌فتری نامیده می‌شود، ناشی از رفتار الاستیک ورق در مرحله باربرداری است. به‌منظور افزایش دقت ابعادی محصول، باید متغیرهای خم‌کاری به شکلی انتخاب گردند که زاویه خم پس از بازگشت‌فتری به مقدار مورد نظر برسد. ورق‌های چندلایه الیاف-فلز به دلیل ویژگی‌هایی نظیر، نسبت استحکام به وزن بالا، هزینه ساخت مناسب، مقاومت شیمیایی مناسب، استحکام مکانیکی بالا، میرایی صوت و ارتعاش و عایق حرارتی بودن مورد توجه صنایع قرار گرفته‌اند. در این پژوهش، رفتار بازگشت‌فتری ورق چندلایه الیاف-فلز با روش تئوری بررسی شده، نتایج با آزمایش‌های تجربی صحه‌گذاری شده است. نتایج این پژوهش نشان داد، روش تئوری ارائه شده با خطای میانگین حدود ۱۷٪ توان پیش‌بینی رفتار بازگشت‌فتری ورق چندلایه الیاف-فلز را دارا است.

کلمات کلیدی: بازگشت‌فتری؛ ورق الیاف-فلز؛ روش تحلیلی؛ روش تجربی.

Investigation of Springback Behavior of Fibre-Metal Laminates using Equivalent-Layer and Separate-Layer Theories

A. Abolghasemi¹, A. Jalali Aghchai^{2,*}, B. Moradkhani³, S. A. Fatemi¹

¹ M.Sc., Mech. Eng., K. N. Toosi Univ., Tehran, Iran.

² Assit. Prof., Mech. Eng., K. N. Toosi Univ., Tehran, Iran.

³ M.Sc. Student, Mech. Eng., Sharif Univ., Tehran, Iran.

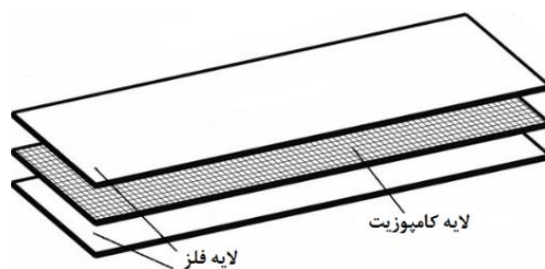
Abstract

At the bending process, sheet deforms plastically between tool and die to take its final shape. Deviation of final bending angle from intended angle after removing load is the most important defect which occurs in sheet metal forming processes. This phenomenon which is called springback, occurs because of elastic behavior of sheet after unloading. In order to increasing geometrical accuracy of products, the bending parameters should be chosen in such a way that the intended bending angle be obtained after unloading. In the recent years, due to fuel crisis; aerospace and automotive industries trends to use lightweight materials to decrease fuel consumption. Fiber Metal Laminates are attractive materials for industries due to their suitable specifications such as high strength to weight ratio, low cost, high chemical resistance and high acoustic and vibration damping. In the present study, the springback behavior of Fiber metal laminates has been investigated by using theoretical and experimental procedures. The results of this study shows that the developed theoretical model can predict springback with mean error of 17%.

Keywords: Springback; Fiber Metal Laminate; Separate-Layer; Equivalent-Layer; Theoretical.

۱- مقدمه

طی سه دهه اخیر، افزایش نیاز صنایع هوایی، دریایی و خودروسازی به سازه‌هایی با مقاومت بالا و وزن سبک، منجر به شکل‌گیری ایده ساخت کامپوزیت‌های الیاف-فلز شد [۱]. یک سازه بهینه دارای ویژگی‌هایی نظیر، استحکام بالا، چگالی پایین، مدول الاستیسیته بالا، چقرمگی بالا، مقاومت به خوردگی و خستگی بالا است. در سال ۱۹۷۸، محققان دانشگاه دلفت در هلند به جهت افزایش مقاومت به خستگی آلومینیوم، ایده اصلی ساخت کامپوزیت‌های الیاف-فلز را مطرح کردند. ایده اصلی ساخت کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف-فلز، ساخت ورق‌های چندلایه به منظور ترکیب ویژگی‌های مثبت فلزات (آلومینیوم، فولاد، تیتانیوم و...) و کامپوزیت‌ها بود که مزایای بیشتری نسبت به فلزات مرسوم در صنایع دنیا را فراهم کند [۲]. کامپوزیت‌های الیاف-فلز، سازه‌هایی متشکل از لایه‌های متوالی نازک فلز و پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف هستند که به یکدیگر متصل شده‌اند. این کامپوزیت‌ها به دلیل استفاده از لایه فلزی، دارای مقاومت سایشی و مقاومت به ضربه مناسبی هستند. علاوه بر این وجود لایه کامپوزیتی، منجر به افزایش مقاومت به خستگی سازه می‌شود. همچنین ترمیم این دسته از کامپوزیت‌ها، بسیار ساده و کم‌هزینه است. در شکل ۱، نمونه‌ای از کامپوزیت الیاف-فلز نشان داده شده است.



شکل ۱- شماتیک کامپوزیت الیاف-فلز

فرایند خم‌کاری، جزو فرایندهای شکل‌دهی ورق است. از فرایند خم‌کاری، می‌توان برای ساخت بازه بزرگی از قطعات صنعتی مانند، قطعات خودرو، هواپیما و تجهیزات ساختمانی استفاده کرد. در این فرایند، ورق بین ابزار و قالب دچار تغییر شکل پلاستیک شده، شکل موردنظر را به خود می‌گیرد. یکی از مهم‌ترین مشکلات در حوزه خم‌کاری، بدست آوردن زاویه

خم دقیق و تکرارپذیر است. پدیده بازگشت فنری، پدیده مرسوم است که سبب کاهش دقت خم‌کاری می‌شود. بازگشت‌فنری، به معنای تغییر شکل هندسی ورق در مرحله باربرداری است. این پدیده، ناشی از رفتار الاستیک ورق پس از باربرداری است که سبب تغییر شکل قطعه می‌شود [۳]. تحقیقات تجربی اخیر نشان داده است که بازگشت‌فنری علاوه بر اثرات الاستیک، شامل اثرات کوچک پلاستیک نیز هست [۴، ۵]. این پدیده، وابستگی زیادی به تنش‌های موجود در انتهای تغییر شکل دارد [۶].

وانگ^۱ و همکاران در سال ۱۹۹۳، یک مدل تحلیلی برای خم‌کاری کرنش صفحه‌ای ورق ارائه کردند و اثر خواص و هندسه ورق (ناهمسانگردی، مدول الاستیک، ضریب پواسون، ضخامت و ابعاد ورق)، شعاع سنبه و ماتریس و پارامترهای فرایند نظیر، اصطکاک و کورس سنبه را در مدل تحلیلی خود در نظر گرفتند. ایشان اثرات پارامترهای یاد شده بر بازگشت-فنری، توانایی خم‌کاری و نیروی خم‌کاری را بررسی کردند. نتایج این روش نشان داد با افزایش کورس سنبه، بازگشت-فنری افزایش و نیرو ابتدا افزایش سپس کاهش پیدا می‌کند [۷]. هینو^۲ و همکاران در سال ۲۰۰۳، خم‌کاری کششی ورق دولایه AA1100-SS430 را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان اثر نیروی کششی، استحکام اتصال و نسبت ضخامت لایه‌ها روی بازگشت‌فنری ورق دولایه را بررسی کردند. ایشان دریافتند در صورتیکه لایه با استحکام بیشتر ضخیم باشد، ورق دولایه مانند یک تک لایه رفتار می‌کند. ایشان همچنین مقادیر بهینه این متغیرها را برای کاهش بازگشت‌فنری ارائه کردند [۸]. وایز^۳ و همکاران در سال ۲۰۰۴، اثر ضخامت و خواص مکانیکی لایه میانی را روی بازگشت‌فنری ورق‌های Steel/Polymer/Steel به روش تجربی و عددی مطالعه کردند. آنها بیان کردند، با افزایش ضخامت، بازگشت‌فنری کاهش پیدا می‌کند، ولی استحکام لایه میانی تأثیری بر بازگشت‌فنری ندارد [۹]. موس^۴ و همکاران در سال ۲۰۰۵، اثر دما و سرعت فرایند روی شکل‌پذیری ورق‌های FML را بررسی کردند و دریافتند با پیش‌گرم کردن ورق تا ۱۶۰°C و

1 Wang

2 Hino

3 Weiss

4 Mosse

از جنس پلی‌یورتان و فاز تقویت‌کننده‌ای از جنس شیشه ساخته شد. برای ساخت ورق ساندویچی، ابتدا یک لایه از کامپوزیت ساخته‌شده بین دو ورق آلومینیوم قرار داده شد. سپس این سه لایه در پرس گرم به مدت ۵ دقیقه و در دمای 190°C تحت فشار قرار گرفتند.

برای بدست آوردن مقدار بازگشت‌فنی ورق چندلایه با هسته کامپوزیتی، از آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای استفاده شد. در شکل ۲، روش اجرای آزمایش خم‌کاری سه‌نقطه نشان داده شده است.

پس از خمش نمونه‌ها تا زاویه 90° درجه و بالا رفتن سنبه، توسط دوربین کاملاً تراز شده از نمونه‌ها عکس‌برداری انجام گردید و زاویه پس از باربرداری توسط نرم‌افزار CATIA اندازه‌گیری شد (شکل ۳).

آلومینیوم طبق استاندارد ASTM E08 M و لایه کامپوزیتی مطابق با استاندارد ASTM D638 M برش داده شدند. آزمایش‌های کشش تک‌محوری با استفاده از Zwick/Roell 100 در سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه و در سه زاویه 0° ، 45° و 90° درجه انجام شدند.



شکل ۲- روش اجرایی آزمایش خم‌کاری سه‌نقطه



شکل ۳- اندازه‌گیری مقدار زاویه بازگشت فنی ورق

قالب و ورق‌گیر تا 80°C ، خطای شکل‌دهی کاهش پیدا کرده است. مطالعات آنها نشان داد، سرعت شکل‌دهی در دمای محیط تأثیری بر عیوب هندسی نداشته، ولی در دماهای بالا افزایش سرعت شکل‌دهی، باعث کاهش عیوب هندسی شده است [۱۰]. محمدی و همکاران در سال ۲۰۱۱، طی پژوهش خود مسئله خمش چهارنقطه را به روش عددی و تحلیلی مورد مطالعه قرار داده‌اند و بیان کرده‌اند که ضخامت و خواص لایه روی بازگشت‌فنی تأثیر زیادی داشته است [۱۱]. همچنین آنها با استفاده از الگوریتم ژنتیک، بازگشت-فنی در ورق‌های دولایه و سه‌لایه ساندویچی را بهینه کرده‌اند.

پارسا و همکاران طی پژوهشی در سال ۲۰۱۴، اثر شعاع سنبه و ماتریس را بر بازگشت فنی ورق سه‌لایه Al3105/polypropylene/Al3105 در فرایند خم‌کاری V به روش عددی و تجربی بررسی کردند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد، با افزایش شعاع خم‌کاری مقدار بازگشت فنی ورق سه‌لایه افزایش پیدا کرد، همچنین با افزایش ضخامت ورق، مقدار زاویه بازگشت فنی کاهش پیدا کرد. آنها دریافته‌اند در روش عددی، نتایج حل مسئله به روش Implicit در نرم‌افزار ABAQUS، جواب دقیق‌تری نسبت به روش Explicit فراهم کرده است [۱۲].

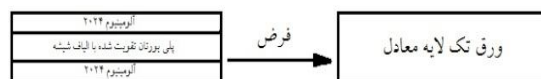
در این پژوهش، رفتار بازگشت‌فنی ورق الیاف-فلز سه لایه آلومینیوم ۲۰۲۴/پلی‌یورتان تقویت شده با الیاف شیشه/آلومینیوم ۲۰۲۴، به روش تئوری بررسی و نتایج با آزمایش‌های تجربی مقایسه می‌شود.

۲- روش تجربی

به‌منظور بررسی بازگشت فنی ورق چندلایه با هسته کامپوزیتی با الیاف شیشه متقاطع، از ورق سه‌لایه متشکل از دو لایه آلومینیوم ۲۰۲۴ در کنارها و یک لایه کامپوزیت (پلی‌یورتان به‌عنوان ماتریس و الیاف شیشه متقاطع به‌عنوان فاز تقویت‌کننده) در وسط استفاده شده است. برای اتصال لایه‌ها به یکدیگر، ابتدا آماده‌سازی سطوح مطابق با استاندارد ASTM D2651، انجام شد. برای آماده‌سازی هسته، ابتدا گرانول پلی‌یورتان با استفاده از پرس گرم به لایه پلی‌یورتان تبدیل شد. سپس با قرار دادن لایه پلی‌یورتان در طرفین پارچه شیشه و قرار دادن در پرس گرم، کامپوزیت با ماتریسی

۳- حل تئوری لایه معادل

به منظور حل تحلیلی بازگشت فنی ورق چندلایه با هسته کامپوزیتی با فرض روش لایه معادل، کل ورق به عنوان یک تک لایه در نظر گرفته شد (شکل ۴) و خواص مکانیکی آن از آزمایش کشش تک محوری بدست آمد.



شکل ۴- فرض لایه معادل

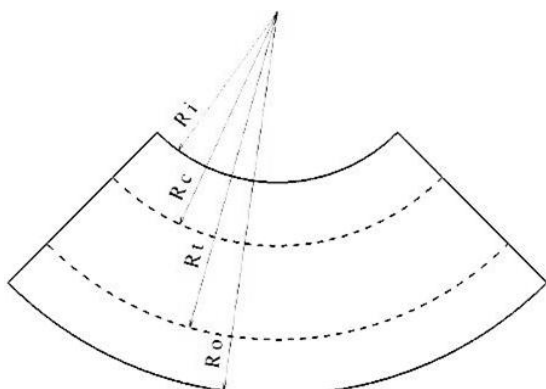
$$\sigma_{\theta} = \begin{cases} E' \left(\frac{y}{R_n} \right) & \text{ناحیه الاستیک} \\ \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{n+1} K' \left(\frac{y}{R_n} \right)^n & \text{ناحیه پلاستیک} \end{cases} \quad (2)$$

که E' و K' مدول الاستیک و ضریب سختی در حالت کرنش صفحه‌ای هستند که توسط (۳) و (۴) تعریف می‌گردند [۴۱].

$$E' = \frac{E}{(1 - \nu^2)} \quad (3)$$

$$K' = K \left(\frac{4}{3} \right)^{\frac{n+1}{2}} \quad (4)$$

در فرایند خمش خالص، ورق در راستای ضخامت به سه ناحیه تقسیم می‌شود. ناحیه فشاری ($R_t - R_c$)، هسته الاستیک ($R_c - R_t$) و ناحیه کششی ($R_t - R_o$) که این نواحی در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. R_t و R_c از (۵) و (۶) بدست می‌آیند [۱۱].



شکل ۶- شعاع‌های داخلی، تسلیم فشاری، تسلیم کششی و خارجی لایه

$$R_c = R_n \left(1 - \frac{\left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right) Y}{E'} \right) \quad (5)$$

$$R_t = R_n \left(1 + \frac{\left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right) Y}{E'} \right) \quad (6)$$

با انتگرال‌گیری از تنش محیطی در ضخامت ورق ممان خمشی مطابق (۷) حاصل می‌شود.

$$M = M_p + M_e = \int_{R_i}^{R_o} \sigma_{\theta} (r - R_n) dr = \int_{R_i}^{R_c} \sigma_p (r - R_n) dr + \int_{R_c}^{R_t} \sigma_e (r - R_n) dr + \int_{R_t}^{R_o} \sigma_p (r - R_n) dr \quad (7)$$

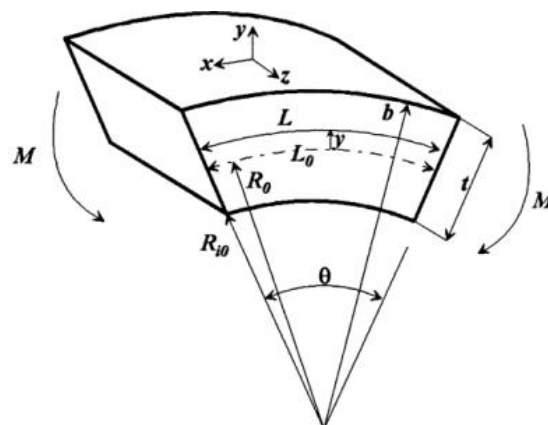
علاوه بر این، فرضیات تئوری کلاسیک خمش ورق‌ها نیز به شرح ذیل در نظر گرفته شدند:

- (۱) لایه خنثی لایه وسط در نظر گرفته شده است.
- (۲) تنش عرضی ناچیز فرض شده است.
- (۳) توزیع کرنش در مقطع به صورت خطی است.
- (۴) فرایند خمکاری کرنش صفحه‌ای در نظر گرفته شده است $\epsilon_z = \sigma_y = 0$ [۱۳].

دستگاه مختصات مورد استفاده برای تحلیل مطابق شکل ۵ در نظر گرفته شده است. توزیع کرنش در ضخامت ورق با استفاده از رابطه (۱) بدست می‌آید.

$$\epsilon_x = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{(R_n + y)\theta - R_n\theta}{R_n\theta} = \frac{y}{R_n} \quad (1)$$

که در آن y فاصله از محور خنثی است. با استفاده از قانون هوک، معیار تسلیم ون میسر و مدل سخت‌شوندگی هولومن، تنش محیطی در قسمت الاستیک و پلاستیک در راستای ضخامت مطابق با (۲) بدست می‌آید.



شکل ۵- دستگاه مختصات

۵- نسبت خمش (نسبت شعاع خم به ضخامت ورق) بزرگ است، بنابراین از تنش شعاعی صرف‌نظر شده است.

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{\theta z} = 0 \quad (12)$$

در نقطه‌ای با شعاع r کرنش محیطی از (۱۳) محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon_\theta = \frac{r - R_n}{R_n} \quad (13)$$

که در این رابطه r شعاع دلخواه و R_n شعاع تار خنثی است. برای لایه فلزی که در دو طرف انتهایی ورق قرار دارد، دو ناحیه الاستیک و پلاستیک وجود دارد، برای ناحیه الاستیک از روابط کرنش صفحه‌ای استفاده می‌شود. برای محاسبه تنش در ناحیه پلاستیک، از رابطه سوئیفت بهره‌گیری شده است و معیار موردنظر در این ناحیه، معیار تسلیم فون میسر است [۱۴]؛ بنابراین تنش در این لایه به صورت (۱۴) محاسبه می‌شود.

$$\sigma_\theta = \begin{cases} \frac{E(r - R_n)}{R_n(1 - \nu^2)} & \text{ناحیه الاستیک} \\ \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^n k \left(\frac{r - R_n}{R_n}\right)^n & \text{ناحیه پلاستیک} \end{cases} \quad (14)$$

برای ناحیه الیافی که در وسط قرار دارد، خواص ارتروپیک در نظر گرفته شده‌است. به دلیل کرنش‌های بسیار کوچک این ناحیه، فقط تنش‌های الاستیک به وجود می‌آید. با توجه به ماتریس سختی این مواد و اینکه تنش در جهت شعاعی صرف‌نظر شده‌است، می‌توان از (۱۵) استفاده کرد [۱۵، ۱۶]:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_\theta \\ \sigma_z \\ \sigma_{\theta z} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_{\theta z} \end{Bmatrix} \quad (15)$$

حال برای لایه‌های صفر و نود درجه الیاف، با توجه به اینکه کرنش صفحه‌ای در نظر گرفته شده‌است، تنش محیطی از (۱۶) و (۱۷) بدست می‌آید:

$$\sigma_\theta = \frac{E_1(r - R_n)}{(1 - \nu_{12}\nu_{21})(R_n)} \quad (16)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E_2(r - R_n)}{(1 - \nu_{12}\nu_{21})(R_n)} \quad (17)$$

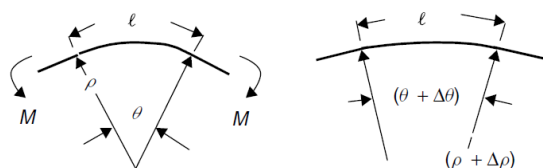
که (۱۶) برای لایه صفر درجه و (۱۷) برای لایه نود درجه است.

برای بدست آوردن ممان، ابتدا باید ناحیه الاستیک و پلاستیک در لایه فلزی مشخص شود. با توجه به این مسئله در دو شعاع فلز از منطقه الاستیک وارد منطقه پلاستیک

که σ_p و σ_e به ترتیب، تنش الاستیک و پلاستیک هستند که از (۲) بدست می‌آیند. با فرض اینکه مقدار شعاع داخلی R_i برابر با شعاع نوک سنبه باشد:

$$\begin{cases} R_i = R_p \\ R_n = R_p + \frac{t}{2} \\ R_o = R_i + t \end{cases} \quad (8)$$

با حذف ممان خمشی، به دلیل بازیافت کرنش‌های الاستیک تغییرات انحنا و زاویه مطابق شکل ۷ در ورق اتفاق می‌افتند.



شکل ۷- تغییرات انحنا و زاویه خم پس از باربرداری [۱۳]

تغییرات انحنا از (۹) قابل محاسبه است.

$$\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_f} = \frac{M_{max}}{\delta M_e / \delta(1/R)} \quad (9)$$

M_e با توجه به تئوری کلاسیک ورق، از (۱۰) بدست می‌آید.

$$M_e = \frac{E t^3}{12(1 - \nu^2)R} \quad (10)$$

در نتیجه بازگشت فتری از (۱۱) حاصل می‌شود.

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = \frac{\Delta(1/R)}{1/R_0} \quad (11)$$

۴- تئوری لایه مجزا

به منظور حل تحلیلی بازگشت فتری ورق چندلایه با هسته کامپوزیتی با در نظر گرفتن خواص هر لایه به صورت مجزا، فرض‌های ذیل در نظر گرفته شدند:

- ۱- کرنش در راستای ضخامت ورق به صورت خطی در نظر گرفته شده‌است.
- ۲- خواص لایه کامپوزیتی به صورت ارتوتروپیک فرض شده‌است.
- ۳- تار خنثی در وسط ورق در نظر گرفته شده، از جابجایی آن حین خم‌کاری صرف نظر شده است.
- ۴- خم‌کاری مطابق رابطه (۱۲) کرنش صفحه‌ای فرض شده است.

ماتریس سختی خمشی - محوری برابر صفر است، همچنین انحنا در راستای عرضی وجود ندارد؛ بنابراین رابطه ممان در این دو لایه از (۲۱) بدست می‌آید:

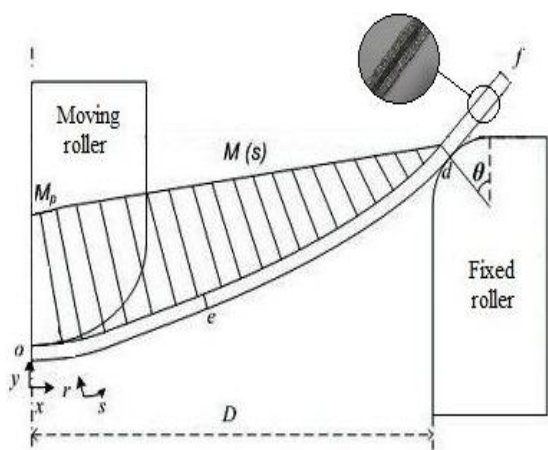
$$M_x = \int Q k_x (r - R_n)^2 dr \quad (21)$$

در (۲۱)، k_x انحناى ورق در راستای طولی است. برای لایه صفر درجه مقدار Q برابر $\frac{E1}{1-\nu_{12}\nu_{21}}$ و برای لایه ۹۰ درجه از رابطه $\frac{E2}{1-\nu_{12}\nu_{21}}$ محاسبه می‌شود.

پس برای بدست آوردن ممان در کل لایه از (۲۲) استفاده می‌شود:

$$M = \sum_{i=1}^2 \int_{R_{i1}}^{c_i} \sigma_p (r - R_n) dr + \int_{c_i}^{t_i} \sigma_e (r - R_n) dr + \int_{t_i}^{R_{oi}} \sigma_p (r - R_n) dr + \int Q_i k_x (r - R_n)^2 dr \quad (22)$$

در ناحیه تماس پانچ با ورق می‌توان شعاع تار خنثی را از رابطه $R_n = R_p + t_T/2$ می‌توان بدست آورد؛ بنابراین می‌توان آن را در (۲۲) جایگزین کرد. ممان بدست آمده از این رابطه، بزرگترین مقدار آن است، این مقدار M_p نامیده شده‌است. برای بدست آوردن ممان در طول ورق، توزیع این کمیت در طول ورق خطی فرض شده است. همچنین ناحیه تماس با پانچ به صورت تماس نقطه‌ای فرض شده و کل ورق به ۲ ناحیه الاستیک و الاستوپلاستیک تقسیم شده است. با توجه به شکل ۹، قسمت oe ناحیه الاستوپلاستیک و قسمت ed ناحیه الاستیک و قسمت df ناحیه آزاد ورق است که در آن تنش و کرنش به وجود نمی‌آید.



شکل ۹- توزیع ممان به صورت خطی در دو ناحیه الاستیک و الاستوپلاستیک

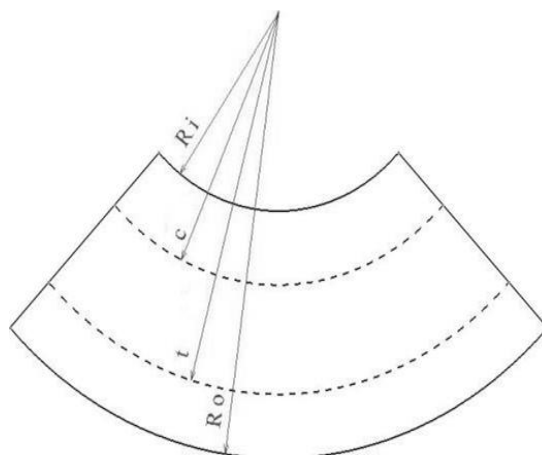
می‌شود، بنابراین سه ناحیه الاستیک، پلاستیک فشاری و پلاستیک کششی وجود دارد که به صورت (۱۸) مشخص می‌شود:

$$\begin{cases} R_c = R_n(1 - \frac{2Y}{\sqrt{3}E'}) \\ R_t = R_n(1 + \frac{2Y}{\sqrt{3}E'}) \end{cases} \quad (18-f)$$

$$c = \begin{cases} R_i & \text{if } R_c < R_i \\ R_c & \text{if } R_i < R_c < R_o \\ R_o & \text{if } R_c > R_o \end{cases} \quad (18-b)$$

$$t = \begin{cases} R_i & \text{if } R_t < R_i \\ R_t & \text{if } R_i < R_t < R_o \\ R_o & \text{if } R_t > R_o \end{cases} \quad (18-g)$$

بنابراین ناحیه (R_i, c) ، منطقه پلاستیک فشاری، (c, t) منطقه الاستیک و (t, R_o) ، منطقه پلاستیک کششی است. در شکل ۸، ناحیه‌های مختلف در یک لایه مشاهده می‌شود.



شکل ۸- شعاع داخلی، فشاری، کششی و بیرونی هر لایه

برای بدست آوردن ممان در لایه ییافی، با توجه به تئوری کلاسیک لایه‌ای [۱۶] به صورت (۱۹) محاسبه می‌شود:

$$M = [Q] \left[\int \{\epsilon^0\} z dz + \int \{K\} z^2 dz \right] \quad (19)$$

که در آن ϵ^0 کرنش مربوط به لایه میانی است و K بردار مربوط به انحناى ورق است. با انتگرال‌گیری در راستای ضخامت به (۲۰) حاصل می‌شود.

$$M = [B] \{\epsilon^0\} + [D] \{K\} \quad (20)$$

که در آن $[B]$ ، ماتریس سختی خمشی - محوری و $[D]$ ماتریس سختی خمشی است. با توجه به اینکه خواص ییاف به صورت ارتروپیک فرض شده‌است؛ بنابراین درایه‌های

$$\theta = \int_0^{S_E} \frac{ds}{R_n} + \int_{S_E}^{S_{max}} \frac{ds}{R_n} \quad (28)$$

در فرایند خمکاری در مرحله باربرداری، ممان از روی ورق برداشته می‌شود بدین ترتیب، ورق تمایل به بازگشت به حالت اولیه دارد. می‌توان باربرداری را معادل با اعمال ممان معکوس ($-M_p$) روی ورق دانست. در باربرداری رفتار ماده به صورت الاستیک فرض می‌شود؛ بنابراین با توجه به روابط الاستیک مقدار زاویه برگشت‌فتری از (۲۹) محاسبه می‌شود:

$$\theta' = \frac{(S_{max}) * M_p}{\left(\frac{2E'}{3}((t_M + t_F)^3 - t_F^3) + \frac{1}{3}(E'_{90} + E'_0)t_F^3\right)} \quad (29)$$

با بدست آمدن پارامترهای هندسی مساله، می‌توان آنها را با (۳۰) به هم مرتبط کرد؛ زیرا در این مساله S_{max} به عنوان یک پارامتر مجهول است؛ بنابراین با یک حدس برای این پارامتر فرایند تکرار شروع می‌شود، سپس با استفاده از (۲۶) و (۲۷)، یک S_{max} جدید بدست می‌آید. این روند تا وقتی که به یک همگرایی دلخواه برسد ادامه می‌یابد.

$$\frac{D}{2} = (R_d + t_T/2)\sin\theta + \int_0^{S_{max}} \cos\theta ds \quad (30)$$

در این رابطه D دهانه قالب و R_d شعاع لبه قالب است.

۵- نتایج و بحث

خواص مکانیکی بدست آمده از آزمایش کشش تک‌محوری پلی‌پورتان تقویت‌شده با الیاف شیشه متقاطع و آلومینیوم ۲۰۲۴ در سه جهت نسبت به جهت نورد به ترتیب، در جدول ۱ و جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱- خواص مکانیکی پلی‌پورتان تقویت‌شده

E_2	E_1	ν_{12}
۳/۷	۱/۷	۰/۲۷

جدول ۲- خواص مکانیکی آلومینیوم ۲۰۲۴ در سه جهت

جهت نورد	E (MPa)	K (MPa)	n	Y (MPa)	ν
موازی	۷۳/۸	۲۷۰	۰/۱۵۶	۷۰	۰/۳۳
مایل	۷۳/۸	۲۶۰	۰/۱۷	۷۰	۰/۳۳
عمود	۷۳/۸	۲۶۱	۰/۱۵۹	۷۰	۰/۳۳

در شکل ۱۰، اثر تغییر ضخامت هسته کامپوزیتی بر زاویه بازگشت‌فتری با حل تجربی، تئوری لایه معادل و تئوری لایه مجزاء آورده شده است.

بنابراین توزیع ممان در طول ورق به صورت (۲۳) است و در شکل ۹، نحوه توزیع آن دیده می‌شود.

$$M(s) = \begin{cases} M_p \frac{S_{max}-s}{S_{max}} & 0 < s < S_E \\ M_E \frac{S_{max}-s}{S_{max}-S_E} & S_E < s < S_{max} \end{cases} \quad (23)$$

در (۲۳)، S_E مقدار طولی از ورق است که حالت الاستوپلاستیک دارد و برابر طول oe است. برای بدست آوردن آن کافی است، ۲ معادله این رابطه در نقطه پیوستگی برابر هم قرار داده شود؛ بنابراین از (۲۴) محاسبه می‌شود:

$$S_E = S_{max} \left(1 - \frac{M_E}{M_p}\right) \quad (24)$$

برای بدست آوردن M_E معیار تسلیم شدن چند لایه، به تسلیم رسیدن لایه بیرونی فلز فرض شده است. به دلیل این که هنوز در منطقه الاستیک قرار دارد، می‌توان از روابط الاستیک استفاده کرد؛ بنابراین از روش مقطع معادل برای بدست آوردن ممان بهره‌گیری شده است؛ در نتیجه بعد از ساده‌سازی معادله به صورت (۲۵) بدست می‌آید:

$$M_E = \frac{4Y}{3\sqrt{3}t_T} \left[2((t_M + t_F)^3 - t_F^3) + \left(\frac{E'_{90}}{E'} + \frac{E'_0}{E'}\right)t_F^3 \right] \quad (25)$$

با تساوی قرار دادن مقدار ممان خمشی داخلی با مقدار ممان بدست‌آمده از تنش محیطی که در راستای طولی به طور خطی فرض شده‌است، می‌توان انحنای ورق در هر قسمت آن را بدست آورد. با توجه به (۲۳) که توزیع ممان را در طول ورق مشخص می‌کند، انحنای در منطقه الاستوپلاستیک از (۲۶) محاسبه می‌شود:

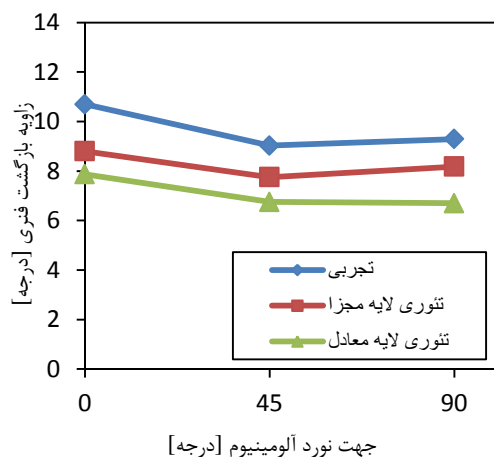
$$M_p \frac{S_{max}-S}{S_{max}} = \sum_{i=1}^2 \int_{R_i}^{c_i} \sigma_p(rRn)dr + \int_{c_i}^{t_i} \sigma_e(r - Rn)dr + \int_{t_i}^{R_{oi}} \sigma_p(r - Rn)dr + \int Q_i k_x (r - Rn)^2 dr \quad (26)$$

بنابراین انحنای در این ناحیه، از حل معادله غیرخطی (۲۶) بدست می‌آید.

برای ناحیه الاستیک، با بهره‌گیری از روابط الاستیک ($M/EI=1/\rho$) انحنای ورق از (۲۷) قابل محاسبه است:

$$M_p \frac{S_{max}-S}{S_{max}} = \frac{1}{Rn} \left(\frac{2E'}{3}((t_M + t_F)^3 - t_F^3) + \frac{1}{3}(E'_{90} + E'_0)t_F^3 \right) \quad (27)$$

در نتیجه با مشخص شدن انحنای در طول ورق می‌توان با رابطه انتگرالی (۲۸)، مقدار زاویه مشخص شده در شکل ۹ را بدست آورد:



شکل ۱۱- اثر جهت نورد آلومینیوم ۲۰۲۴ بر زاویه بازگشت فنی

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رفتار بازگشت فنی ورق کامپوزیتی الیاف-فلز در فرایند خمکاری سه نقطه با استفاده از روش‌های تجربی، مدل تئوری لایه معادل و مدل تئوری لایه مجزا بررسی شد که نتایج آن به شرح ذیل است:

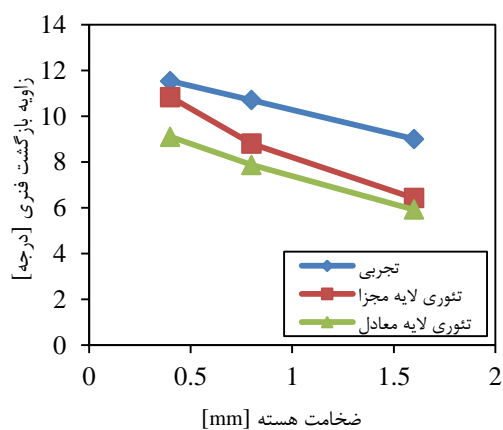
- (۱) تحلیل تئوری با فرض یک تک لایه معادل با خطای میانگین حدود ۲۷٪ توان پیش‌بینی رفتار بازگشت فنی ورق کامپوزیتی الیاف-فلز را دارا است.
- (۲) تحلیل تئوری با فرض خواص هرلایه به صورت مجزا با خطای میانگین حدود ۱۷٪، توان پیش‌بینی رفتار بازگشت فنی ورق کامپوزیتی الیاف-فلز را دارا است.
- (۳) افزایش ضخامت هسته از ۰/۴ mm به ۱/۶ mm باعث ۲۱٪ کاهش در زاویه بازگشت فنی شد.
- (۴) بازگشت فنی زمانیکه نوع لایه‌چینی به گونه‌ای باشد که جهت نورد ورق آلومینیوم موازی با طول نمونه آزمایش باشد، حدود ۱۶٪ بیشتر از سایر جهت‌ها است.

۶- مراجع

- [1] Zhong Y, Joshi SC (2015) Response of hydrothermally aged GLARE 4A laminates under static and cyclic loadings. Mater Des 87: 138-148.

همانگونه که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، افزایش ضخامت هسته از ۰/۴ mm به ۱/۶ mm، باعث ۲۱٪ کاهش در زاویه بازگشت فنی شد. مطابق شکل ۱۰، تئوری ارائه شده با فرض خواص هر لایه به صورت مجزا، توانایی پیش‌بینی بازگشت فنی با میانگین خطای ۱۷٪ را دارا است. لازم به ذکر است، خطای پیش‌بینی در ضخامت هسته پایین حدود ۶٪ است که با افزایش ضخامت هسته، این خطا افزایش پیدا می‌کند. علت این اتفاق، فرض ثابت ماندن تار خنثی حین خم‌کاری است که با افزایش ضخامت هسته، منجر به افزایش خطا می‌شود. مطابق شکل ۱۰، با فرض واحد بودن خواص ورق چندلایه با یک تک لایه مشابه، خطای پیش‌بینی مدل به صورت میانگین حدود ۲۷٪ است. در شکل ۱۱، اثر نوع لایه‌چینی ورق آلومینیومی بر زاویه بازگشت فنی با حل تجربی، تئوری لایه معادل و تئوری لایه مجزا آورده شده است.

مطابق شکل ۱۱، بازگشت فنی زمانیکه نوع لایه‌چینی به گونه‌ای باشد که جهت نورد ورق آلومینیوم موازی با طول نمونه آزمایش باشد، حدود ۱۰/۶۹ درجه و در جهت مایل و عمود نسبت به جهت نورد حدود ۹ درجه است. با توجه به نمودارهای آزمایش کشش ورق در سه راستای متفاوت استحکام تسلیم ورق در جهت نورد، بالاتر از دو راستای دیگر بود؛ لذا بدلیل بالاتر بودن بازه الاستیک ماده در جهت نورد، بازگشت فنی در این نوع لایه‌چینی بالاتر بود.



شکل ۱۰- اثر تغییر ضخامت هسته کامپوزیتی بر زاویه بازگشت فنی

- on spring-back of SPS-(steel/polymer/steel) laminates. *Steel Grips 2*(Supplement): 445-449.
- [10] Mosse L, Compston P, Cantwell WJ, Cardew-Hall M, Kalyanasundaram S (2005) The effect of process temperature on the formability of polypropylene based fibre-metal laminates. *Comp Part A: Appl Sci Manuf* 36(8): 1158-1166.
- [11] Mohammadi S, Parsa M, Aghchai AJ (2011) Effect of the thickness distribution and setting condition on springback in multi-layer sheet bending. *Int J Eng Sci Tech* 3(4).
- [12] Parsa M, Mohammadi S, Aghchai A J (2014) Al3105/polypropylene/Al3105 laminates springback in V-die bending. *Int J Adv Manuf Tech* 75(5-8): 849-860.
- [13] Hu J, Marciniak Z, Duncan J (2002) *Mechanics of sheet metal forming* Butterworth-Heinemann.
- [14] Larsson L (2005) Warm sheet metal forming with localized in-tool induction heating.
- [15] Jones RM (1975) *Mechanics of composite materials* Scripta Book Company Washington, DC.
- [16] Reddy JN (2004) *Mechanics of laminated composite plates and shells: theory and analysis* CRC press.
- [2] Sinmazçelik T, Avcu E, Bora M Ö, Çoban O (2011) A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods. *Mater Des* 32(7): 3671-3685.
- [3] Ján S, Miroslav J (2012) Springback prediction in sheet metal forming processes. *J Tech Plasticity* 37(1).
- [4] Teodosiu C (2005) Some basic aspect of the constitutive modelling in sheet metal forming. 239-243.
- [5] Cleveland RM, Ghosh AK (2002) Inelastic effects on springback in metals. *Int J Plasticity* 18(5-6): 769-785.
- [6] Burchitz IA (2008) *Improvement of springback prediction in sheet metal forming* University of Twente.
- [7] Wang C, Kinzel G, Altan T (1993) Mathematical modeling of plane-strain bending of sheet and plate. *J Mater Process Tech* 39(3): 279-304.
- [8] Hino R, Goto Y, Yoshida F (2003) Springback of sheet metal laminates in draw-bending. *J Mater Process Tech* 139(1): 341-347.
- [9] Weiss M, Rolfe BF, Dingle ME, Hodgson P (2004) The influence of interlayer thickness and properties