



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۷، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۴، صفحه ۱۱ تا ۲۰

Vol. 47, No. 2, Winter 2015, pp. 11-20



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر (مهندسی مکانیک)

AmirKabir Journal of Science & Research  
(Mechanical Engineering)  
(ASJR-ME)

## مطالعه تجربی - عددی خمش پذیری در کامپوزیت فلز - الیاف شیشه به منظور کاهش عیوب ناشی از فرایند

سعید امیرنژاد<sup>۱\*</sup>، مهران کدخدایان<sup>۲</sup>

۱- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

(دریافت: ۱۳۹۰/۳/۷، پذیرش: ۱۳۹۳/۷/۲۸)

### چکیده

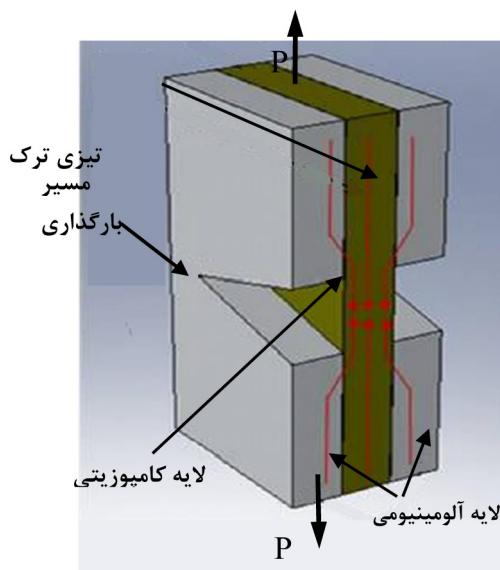
امروزه کامپوزیت‌های لایه‌ای فلز-الیاف به دلیل دارا بودن خواص مکانیکی خوب و وزن کم بسیار مورد توجه طراحان، به ویژه صنایع هوافضا قرار گرفته اند. مواد FML (Fiber Metal Laminate) خواص بهتری نسبت به هر دو آلیاژ آلومینیوم و مواد کامپوزیتی از خود نشان می‌دهند. در این پژوهش، خواص خمشی این کامپوزیت‌ها مورد بررسی عددی-تجربی قرار گرفته است. از آنجایی که این چندلایه‌ها دارای قابلیت فرم‌دهی محدود می‌باشند و تغییر شکل الیاف الاستیک کامل است، در آنها برگشت‌فتری ایجاد می‌گردد که نوعی عیب محسوب می‌شود. در بخش بررسی تجربی مقاله فعلی ۶ مدل نمونه با زاویه‌ی الیاف و ضخامت متفاوت از هم ساخته می‌شود تا مورد آزمایش خمشی قرار گیرد. به علاوه، آزمایش خمش انجام شده به روش طراحی آزمایش تاگوچی بهینه شده تا نتایج بدست آمده مستقل از پارامترهای قالب و پرس باشد. تأثیر پارامترهای طراحی و ساخت بر روی برگشت‌فتری کامپوزیت فلزی - الیافی نیز بررسی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که با کاهش شعاع پانچ و افزایش فشار وارد بر ورق، میزان برگشت‌فتری به دلیل بوجود آمدن تغییر شکل پلاستیک زیاد در ناحیه خم کاهش می‌یابد. از طرفی با افزایش سرعت پانچ میزان برگشت‌فتری افزایش می‌یابد. همچنین اگر الیاف موازی با محور خمش باشند و ضخامت لایه‌ی خارجی افزایش یابد کمترین شعاع خمش و برگشت‌فتری ایجاد می‌گردد. نتایج تجربی این پژوهش با داده‌های عددی بدست آمده از روش المان محدود نیز مقایسه گردیده است.

کلمات کلیدی:

کامپوزیت فلزی - الیافی، خمش، برگشت‌فتری، المان محدود، روش تاگوچی

## ۱- مقدمه

یکی از مواد مرکب پیشرفته امروزی FML (ورق چندلایه‌ی کامپوزیتی فلزی - الیافی) است که شامل لایه‌های به هم چسبیده‌ی الیاف و باند فلزی نازک است. این ماده امروزه به جایگزین مناسبی برای سازه‌های فلزی، به‌خصوص در کاربردهای هوا - فضایی تبدیل شده است زیرا از مقاومت خستگی و تنش شکست بالایی برخوردار است. این مواد هر دو ویژگی خوب فلزات و الیاف را دارند. به عنوان نمونه، می‌توان به داکتیلیته، مقاومت به ضربه و تیرانس آسیب آنها اشاره کرد. از انواع FML های پر کاربرد امروزی می‌توان ARALL بر مبنای Aramid Fiber و GLARE بر مبنای Glass Fiber را نام برد [۱۷]. مزیت اصلی Glass Fiber نسبت به Aramid Fiber این است که در تیرت درچار شکست می‌شود [۹]. در این مواد لایه‌ی چسب بکار برده شده (برای چسباندن لایه‌ها) مانعی در برابر خوردگی محسوب می‌شود. همچنین از مزایای دیگر چندلایه‌ها، مقاومت در برابر سوختگی، خاصیت دمپینگ و عایق‌بندی مناسب می‌باشد. نرخ رشد ترک در کامپوزیت چند لایه الیاف- فلز بسیار کم است و ترک در صورت وقوع با سرعت نسبتاً پایینی رشد می‌کند. از جمله ویژگی‌های دیگر چندلایه‌ها این است که در صورت ایجاد ترک‌های ناشی از خستگی در لایه‌های فلزی، لایه‌های الیاف بی‌عیب می‌مانند.



شکل ۱: FML به عنوان پل ترک

مطابق شکل ۱، الیاف در مقابل تنش‌های موجود در لایه‌های ترک خورده‌ی فلزی اصطلاحاً کنارگذر می‌باشد. به علاوه، استحکام نهایی باقی مانده در الیاف نسبت به فلزات بیشتر است [۹].

خواص کامپوزیت‌های لایه‌ای فلز - الیاف شیشه در برخی از پژوهش‌های انجام شده در مراکز پژوهشی، دانشگاه‌ها و صنایع هوافضا بررسی شده است [۱۴]. پدیده‌ی برگشت‌فتری یکی از مهمترین عیوبها در فرآیند شکل‌دهی محسوب می‌شود که در نتیجه‌ی آن هزینه‌های زیادی به صنایع برای اصلاح این پدیده تحمیل می‌شود، بنابراین،

مطالعات گوناگونی در زمینه کاهش این پدیده صورت گرفته است. نتایج کار پژوهشگران بر روی برگشت‌فتری کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف شیشه - آلومینیوم نشان می‌دهد که با کاهش سرعت خمش، کاهش شعاع خم و افزایش نیروی بارگذاری، میزان برگشت‌فتری به دلیل افزایش تغییرشکل پلاستیک در منطقه خم کاهش می‌یابد [۷].

در مقاله‌ی جاری بهینه‌سازی فرایند خمش به منظور کاهش برگشت‌فتری به روش طراحی آزمایش تاگوچی مورد مطالعه قرار گرفته است. پس از بدست آوردن شرایط بهینه پارامترهای طراحی و ساخت قالب، به بررسی تجربی و تحلیلی تأثیر پارامترهای ورق کامپوزیتی مانند زاویه‌ی الیاف و ضخامت لایه‌ی خارجی بر روی پدیده‌ی برگشت‌فتری کامپوزیت‌های لایه-ای الیاف شیشه - آلومینیوم پرداخته می‌شود. بدین منظور ۶ دسته نمونه با زوایا و ضخامت‌های متفاوت مطابق با استانداردهای موجود ساخته و آماده شده است. ورق‌ها شامل دو لایه آلومینیوم به ضخامت ۰/۸ و ۰/۴ میلی‌متر و یک لایه‌ی میانی کامپوزیت با زوایای ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه به روش لایه-گذاری دستی ساخته می‌شوند. به منظور بررسی دقیق‌تر فرآیند، از روش المان محدود برای تحلیل پارامترهای ذکر شده استفاده می‌گردد. با توجه به نوع فرآیند خمش V شکل از شبیه‌سازی دو بعدی (کرنش صفحه‌ای) استفاده می‌شود و نتایج تحلیل با نتایج آزمایش مقایسه می‌گردد. برای شبیه‌سازی فرآیند از نرم افزار ANSYS V11 استفاده می‌شود.

## ۲- بررسی فرایند شکل‌دهی

## ۲-۱- قابلیت فرم دهی در کامپوزیت فلزی - الیافی

الیاف‌های فلزی می‌توانند به صورت الاستیک - پلاستیک تغییرشکل دهند و کرنش شکست در آنها معمولاً در محدوده ۱۰ تا ۵۰ درصد قرار دارد [۹]. از طرفی الیاف‌های فلزی به دلیل بخش الاستیک تغییرشکل‌ها دچار پدیده برگشت‌فتری و تنش‌های باقی‌مانده (یا ترکیبی از این دو) می‌شوند. اندازه تغییرات ناشی از کرنش بزرگ است و به کرنش‌های کششی سطحی، کرنش‌های فشاری سطحی، کرنش‌های برشی سطحی و تغییر-شکل خمشی تجزیه می‌شود. این در حالی است که اندازه کرنش شکست در الیاف کوچک می‌باشد (حدود ۱ درصد برای Carbon Fibers، ۲ تا ۲/۵ درصد برای Aramid Fiber و ۴ تا ۵ درصد برای Glass Fiber). از این رو، لایه‌های کامپوزیتی دارای قابلیت فرم‌دهی محدودی می‌باشند و چون تغییرشکل الیاف از نوع الاستیک کامل است در آنها برگشت‌فتری ایجاد می‌گردد [۱۷]، [۱]. چندلایه‌ها می‌توانند دسته‌بندی دیگری نیز داشته باشند مانند چندلایه‌های یک جهته (UD) که تمام الیاف در یک جهت می‌باشند و چند لایه‌هایی که در آنها الیاف در دو مسیر عمودی قرار دارند (که به آنها چندلایه‌های متقاطع یا چندعرضی گفته می‌شود (CP)) [۹].

## ۲-۲- خمش پذیری در کامپوزیت فلزی - الیافی

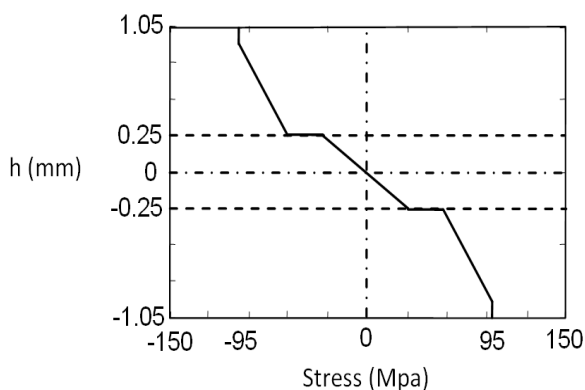
تغییرشکل در کامپوزیت چند لایه الیاف- فلز اغلب از چیدمان چند لایه‌ها

همچنین مطابق شکل ۳ با بررسی توزیع تنش خمشی (که به کمک روش المان محدود به دست آمده است) مشاهده می‌شود که با شروع خمش چندلایه در انحنای کمتر از انحنای حدالاستیک، توزیع تنش الاستیک خواهیم داشت و با افزایش انحنای از حد انحنای الاستیک تغییر شکل پلاستیک از لایه‌های خارجی آغاز می‌شود. ناحیه پلاستیک با افزایش انحنای گسترش یافته، تا اینکه لایه‌های خارجی کاملاً پلاستیک شده و تغییر شکل پلاستیک هسته آغاز می‌شود. با افزایش انحنای در هر حالت، یک هسته الاستیک در ورق بوجود می‌آید که همین امر، پدیده برگشت‌فنی را تشدید می‌کند [۱۶].

### ۳- مطالعه تجربی

#### ۳-۱- آماده سازی و ساخت نمونه

مواد مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها، ورق آلومینیوم ۱۱۰۰ با ضخامت ۰/۸ و ۰/۴ میلی‌متر، الیاف شیشه تک جهتی و رزین اپوکسی EP-cy219 هستند. اپوکسی مورد استفاده با چگالی ۲/۱-۱/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب و گرانشی ۱۰۰۰-۱۲۰۰ MPa.S با نسبت ۱:۲ با سخت‌کننده CYDHD مخلوط می‌گردد و در دمای محیط و زیر فشار ۰/۶ MPa پخت می‌شود. الیاف شیشه مورد استفاده از جنس E-Glass تک جهتی با وزن واحد سطح ۳۰۰ گرم بر مترمربع، مدول کشسان ۴۱GPa و مدول برشی ۲۴,۵ GPa می‌باشند. نمونه‌های ۲/۱ شامل دولایه آلومینیوم است که یک لایه کامپوزیت شیشه - اپوکسی در بین آنها قرار دارد. به منظور بررسی اثر زاویه‌ی الیاف و ضخامت لایه‌ی خارجی بر میزان برگشت‌پذیری این دسته از کامپوزیت‌ها، نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM ساخته می‌شوند. بدین منظور ۶ مدل نمونه با سه زاویه‌ی مختلف (۰، ۹۰ و ۴۵) و ضخامت ۰/۸ و ۰/۴ میلی‌متر تهیه می‌شوند و مورد آزمایش قرار می‌گیرند. ابعاد نمونه  $110 \times 25 \times 1.95$  mm<sup>3</sup> می‌باشد. نتایج خارج از محدوده‌ی منطقی از بین نتایج حذف و میانگین سایر نتایج به عنوان نتیجه آزمایش برای هر نمونه حفظ می‌شوند. گفتنی است که سطوح ورق‌های آلومینیوم به وسیله چربی‌زدایی اولیه، ایجاد خراش به وسیله سمباده نرم و سپس پاک‌کردن بوسیله حلالی قوی مانند استون آماده می‌شوند [۱۲]، [۱۰].

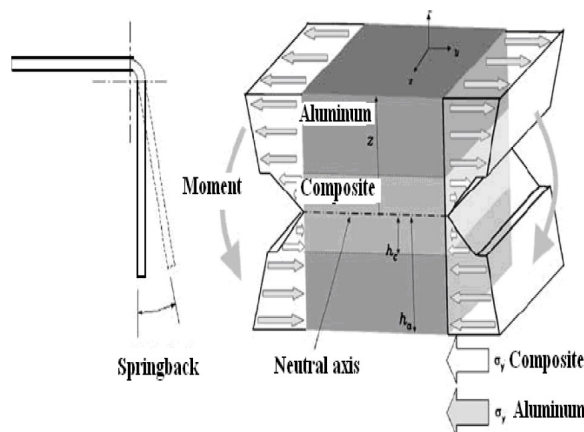


شکل ۳: منحنی توزیع تنش در ورق کامپوزیت چند لایه الیاف - فلز ۲/۱ پیش‌بینی شده توسط نرم افزار ANSYS

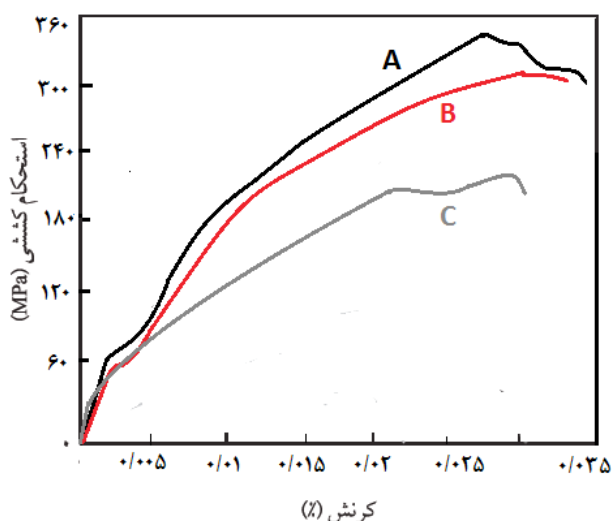
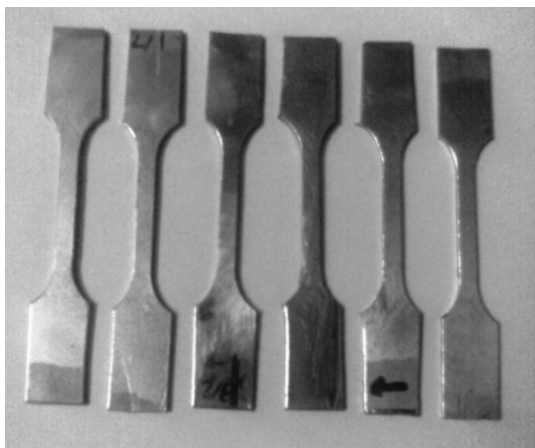
تأثیر می‌پذیرد. چند لایه‌های نازک به سادگی خم می‌شوند و فاصله الیاف تغییرشکل یافته با محور خنثی کوچک است. برحسب جهت نصب الیاف و با توجه به اینکه چند لایه‌ی یک جهته برای خم کاری مطلوب است، کمترین شعاع خم با افزایش ضخامت افزایش می‌یابد [۹]. زمانی که الیاف در زمان خم کاری تحت بارگذاری قرار می‌گیرند، کمترین شعاع خم کاری که تابعی از کوچک‌ترین کرنش شکست الیاف می‌باشد، افزایش می‌یابد. در کامپوزیت‌های چند لایه الیاف-فلز، محدوده‌ی کشسان در منطقه‌ی فایبر و گستره‌ی پلاستیک در منطقه‌ی فلزی می‌باشند، بنابراین محدوده‌ی کشسان منجر به برگشت‌فنی بیشتری (نسبت به حالت یکپارچه فلزی) پس از شکل‌دهی می‌شود [۷]، [۸]. از این رو می‌بایست تأثیر پارامترهای مختلف را بر روی برگشت‌فنی این ورق‌ها بررسی نمود تا منجر به کمینه شدن این پدیده گردد. در این تحقیق تأثیر زاویه‌ی الیاف و تعداد لایه‌ها در برگشت‌فنی چند لایه کامپوزیتی مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است. برای مطالعه‌ی پارامترهای ذکر شده از شبیه‌سازی المان محدود دو بعدی (کرنش صفحه‌ای) فرآیند خمکاری استفاده می‌شود. در پایان نتایج شبیه سازی با نتایج آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش مقایسه خواهند شد.

#### ۳-۲- برگشت‌فنی در کامپوزیت چندلایه

چنانکه گفته شد برگشت‌فنی یکی از عوامل مؤثر بر تغییرشکل محصول است که می‌تواند در کیفیت خمش قطعات نقش مهمی ایفا کند. بنابراین برای بهینه کردن فرآیند تولید و بالا بردن دقت ابعادی قطعات تولید شده، می‌بایست عوامل مؤثر بر این پدیده مطالعه شوند تا فرآیند خمکاری تحت کنترل درآید. ورق چند لایه‌ای که در این تحقیق به کار برده شده است، GLARE است که شامل لایه‌های به هم چسبیده شده‌ی آلومینیوم در دو طرف و ورق کامپوزیتی در بین این دو لایه می‌باشد. مطابق شکل ۲ هنگامیکه کامپوزیت چند لایه الیاف-فلز تحت خمش قرار می‌گیرد مقداری از کار انجام شده به صورت کشسان ذخیره می‌شود و این انرژی کشسان سبب ایجاد برگشت‌فنی می‌شود. در این مواد مقدار برگشت‌فنی نسبت به آلیاژهای فلزی بیشتر است و دلیل اصلی آن تغییر شکل الاستیکی می‌باشد که توسط الیاف جذب می‌شود.



شکل ۲: برگشت‌فنی در GLARE



شکل ۵: (الف) نمونه‌های استاندارد و (ب) نمودار تنش-کرنش کامپوزیت فلزی الیافی

### ۳-۳- طراحی آزمایش و بهینه‌سازی برگشت‌فتری به روش تاگوچی

یکی از اهداف مقاله‌ی حاضر کاهش برگشت‌فتری در فرآیند خمش ورق‌های چند لایه‌ی کامپوزیتی فلز - الیاف به روش طراحی آزمایش‌ها است. لازم است تا پارامترهای قالب و پرس برای آزمایش خمش بهینه شوند تا بتوان تأثیر پارامترهای ورق چند لایه‌ی کامپوزیتی را روی برگشت‌فتری بررسی کرد. یکی از روش‌های طراحی آزمایش‌ها، روش فاکتوریل کامل است ( $۴^۳ = ۶۴ = \text{فاکتور(سطح)} = L_m = \text{تعداد آزمایش‌ها}$ ). طراحی به این روش سبب حجم زیاد آزمایش‌ها و در نتیجه نداشتن صرفه اقتصادی برنامه می‌شود. بنابراین روش مرسوم در کاهش تعداد ترکیبات آزمایش، استفاده از آزمایش فاکتوریلی جزئی است. تاگوچی مجموعه‌ی ویژه‌ای از طرح‌های کلی برای آزمایش‌های فاکتوریلی ایجاد کرده است که اغلب کاربردها را پوشش می‌دهد. آرایه‌های ارتوگونال، جزئی از این مجموعه طراحی‌ها می‌باشد. استفاده از این آرایه‌ها ما را در تعیین کمترین تعداد آزمایش‌های موردنیاز برای مجموعه‌ای از فاکتورها یاری می‌کند. در واقع آرایه‌های ارتوگونال برای آزمایش‌های فاکتوریلی جزئی دستورالعملی

استفاده از روش‌های آماده‌سازی سطح، قدرت اتصال بین لایه‌ی فلز و رزین را به شدت افزایش می‌دهد [۱۵]. طبق محاسبات انجام شده درصد حجمی الیاف برای صفحات کامپوزیتی ساخته شده‌ی مختلف بطور میانگین ۵۷ درصد بوده است.

### ۳-۲- بررسی تجربی خواص مکانیکی (کششی) کامپوزیت فلزی الیافی

به دلیل کاربرد زیاد کامپوزیت چند لایه‌ای فلز - الیاف در مقایسه با فلزات خالص و به منظور به دست آوردن خواص آن‌ها برای تحلیل المان محدود آزمون خمش، تمامی نمونه‌ها مطابق جدول ۱ با زوایا و ضخامت‌های مختلف ساخته می‌شوند و تحت آزمایش کشش (با دستگاه Zwick نشان داده شده در شکل ۴) قرار می‌گیرند. مطابق شکل ۵ ساخت نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM A638m انجام می‌شود و با سرعت ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه کشیده می‌شوند [۱۳]. نتایج به دست آمده بیانگر این است که ورق‌های ساخته شده با زاویه‌ی الیاف صفر درجه بیشترین مقاومت کششی را از خود نشان می‌دهند زیرا در لایه‌ی کامپوزیتی با زاویه‌ی الیاف صفر درجه، بار بوسیله الیاف تحمل می‌شود و شکست آنها موجب شکست لایه می‌شود [۴]، [۱۱].

جدول ۱: نام گذاری نمونه‌ها، نحوه لایه گذاری و زاویه‌ی الیاف

کد نمونه	نحوه لایه گذاری و زاویه‌ی الیاف
A	Al/GE(0)/Al/GE(0)/Al
B	Al/GE(0)/Al/GE(90)/Al
C	Al/GE(90)/Al/GE(90)/Al
D	Al/GE(0)/Al
E	Al/GE(90)/Al
F	Al/GE(45)/Al



شکل ۴: دستگاه کشش Zwick

جدول ۳: عوامل مؤثر بر برگشت فنری در فرآیند خمش و مقادیر انتخابی برای آزمایش

				فاکتور سطح آزمایش
D	C	B	A	
۱	۱	۱	۱	۱
۲	۲	۲	۱	۲
۳	۳	۳	۱	۳
۳	۲	۱	۲	۴
۱	۳	۲	۲	۵
۲	۱	۳	۲	۶
۲	۳	۱	۳	۷
۳	۱	۲	۳	۸
۱	۲	۳	۳	۹

نمونه‌ها با حرکت پانچ به سمت پایین خمیده می‌شوند. نوع سیستم کنترل این دستگاه امکان دسترسی به سرعت‌های مختلف پانچ (تا ۳ in/s) را فراهم می‌سازد.

### ۳-۵- تحلیل نتایج طراحی تاگوچی

نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری برگشت‌فنری حاصل از انجام ۹ آزمایش بهینه‌سازی در جدول ۴ ارائه شده است. ورق‌ها با ابعاد  $25 \times 115 \text{ mm}^2$  ساخته می‌شوند و توسط دستگاه پرس مورد آزمایش خمش قرار می‌گیرند. در آزمایش خمش از قالب V شکل با زاویه‌ی ۱۰۰ درجه استفاده می‌گردد. اندازه‌گیری برگشت‌فنری برای هر نمونه کامپوزیتی فلز - الیاف شیشه با دو لایه آلومینیوم به ضخامت ۰/۸ میلی‌متر و یک لایه کامپوزیت با زاویه‌ی الیاف صفر درجه ۳ بار تکرار می‌شود و مقدار میانگین محاسبه می‌گردد. نتایج حاصل توسط روش تاگوچی با استفاده از نرم افزار Minitab بررسی می‌شود و درصد اثر هر عامل بر روی برگشت‌فنری میانگین رسم می‌گردد. این نمودار در شکل ۷ نشان داده شده است.

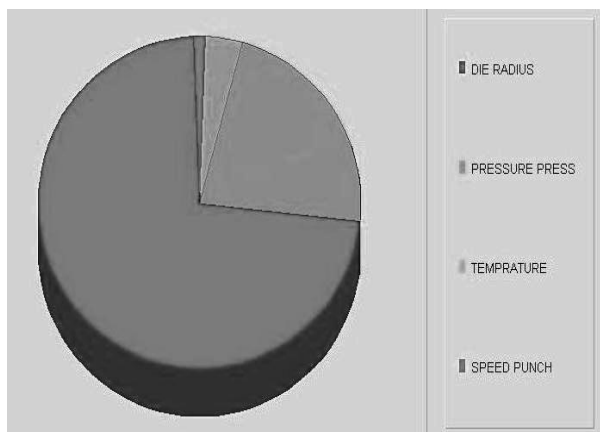
فراهم می‌کند که شامل تعدادی از ترکیبات آزمایش‌ها است. بنابراین طراحی تاگوچی را می‌توان در بهینه کردن اکثر طراحی‌ها استفاده کرد. در طراحی آزمایش‌ها دو هدف تعداد و شرایط آزمایش را باید در نظر گرفت. آرایه‌های تاگوچی دستورالعمل‌های مشخصی هستند که در شرایط آزمایشگاهی مختلفی بکار می‌روند. به علاوه، از طریق تحلیل تاگوچی می‌توان مقادیر برگشت‌فنری را برای آن دسته از آزمایش‌های انجام نشده نیز بدون انجام آزمایش پیش‌بینی نمود [۲]. بدین منظور لازم است تا ابتدا عوامل مؤثر بر برگشت‌فنری را تعیین نمود. سپس برای هر کدام از این عوامل، با توجه به تأثیر و اهمیت آن، تعدادی مقادیر آزمایشی در نظر گرفت. با مشخص شدن تعداد فاکتورها و مقادیر آن‌ها می‌توان آزمایش‌های لازم را به روش تاگوچی طراحی کرد. پس از انجام این آزمایش‌ها و تحلیل نتایج بدست آمده، شرایط بهینه‌ی فرآیند خمش تعیین می‌گردد. به منظور دستیابی به حداقل تعداد آزمایش‌های لازم و در عین حال کافی برای طراحی آزمایش‌های برگشت‌فنری به روش تاگوچی، برای عوامل شعاع قالب، سرعت پانچ، فشار وارده به ورق در حین خمش و درجه حرارت ۳ سطح در نظر گرفته می‌شود. این عوامل در جدول ۲ به همراه مقادیرشان ذکر شده اند. شرایط ذکر شده مطابق جدول ۳ در آرایه L9 طراحی تاگوچی با سطوح مختلف گنجانده شده که از نرم افزار Minitab بدست آمده است. بنابراین مطابق جدول ۳، ۹ آزمایش لازم برای بهینه‌سازی مشخص می‌گردد.

### ۳-۴- آزمایش شکل‌دهی (خمش) و مشخصات دستگاه آزمون

به منظور انجام آزمایش خمش و بررسی برگشت فنری، یک قالب خمش V شکل مطابق شکل ۶ طراحی و ساخته شده است و مجموعه قالب در یک پرس سروو- هیدرولیکی Zwick با ظرفیت ۲۰ تن و ابعاد  $40 \times 100 \times 210$  سانتی متر مطابق شکل ۶-ب نصب گردیده است. طرح کلی اجزا قالب به صورت شماتیک در شکل ۶-الف نشان داده شده است که در آن شعاع قالب ۸ میلی‌متر و زاویه‌ی سنبه و ماتریس برابر ۱۰۰ درجه می‌باشند.

جدول ۴: عوامل مؤثر بر برگشت فنری در فرآیند خمش و مقادیر انتخابی برای آزمایش

			سطح فاکتور سطح
۳	۲	۱	
۱۲	۱۰	۸	شعاع قالب = (A) R (mm)
۸۵	۶۵	۵۰	فشار پرس = (B) P (bar)
۴۵	۲۵	۲۰	درجه حرارت = (C) T (°C)
۵۰	۴۰	۳۰	شعاع قالب = (D) V (mm/s)



شکل ۷: نمایی از تأثیر مستقل هر پارامتر روی برگشت فنری FML

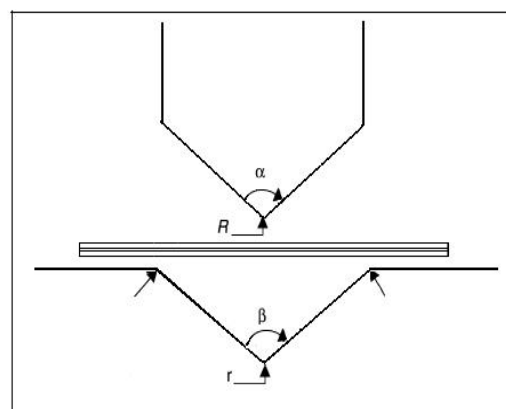
این نمودار در شکل ۷ نشان داده شده است.

#### ۴- تحلیل المان محدود برگشت فنری

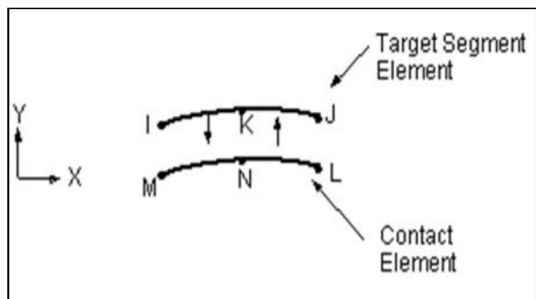
کاهش برگشت فنری در صنایع براساس تجربه و سعی و خطا بسیار پرهزینه و زمانبر است، لذا روش‌های جایگزینی همچون روش المان محدود (FEM) در پیش‌بینی مقدار برگشت فنری و کم کردن مقدار آن مورد توجه محققان قرار گرفته است. در این بخش فرآیند خمش با استفاده از روش المان محدود با فرض کرنش صفحه‌ای مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۶ قالب خمکاری مورد استفاده در این تحقیق و شبیه سازی را نشان می‌دهد. در اینجا، یک مدل کرنش صفحه ای با هشت گره و المان (Plane 82) Solid (۸۲) و غیرخطی برای ورق در نظر گرفته می‌شود، شکل ۸ المان در نظر گرفته شده برای لایه‌ی کامپوزیتی نیز (Plane 82) مطابق با خواص ماده در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۹ تصویر کلی از مدل، همراه با قطعه‌ای در شرایط اولیه نشان داده شده است. قالب و سنبه و ورق گیر به دلیل جنس سفت‌تر نسبت به ورق به صورت صلب مدل شده‌اند. شرایط تماس بین قطعه، قالب و ورق گیر با اصطکاک کولمب و ضریب اصطکاک ۰/۱۷ مدل شده است [۶]، [۵]. دانسیته‌ی المان‌ها در جهت عرضی در ضخامت نمونه ثابت است. اندازه‌ی بهینه‌ی المان و حساسیت تحلیل به اندازه یا تعداد المان‌ها، با مطالعه‌ی پارامتری تأثیر مش روی مقدار پیش‌بینی شده‌ی زاویه برگشت فنری پس از شبیه‌سازی‌های متعدد فرآیند خمش تعیین می‌گردد. مطالعات نشان می‌دهد که مقدار زاویه‌ی برگشت فنری محاسبه شده با استفاده از مش مناسب در محدوده‌ی  $\pm 0/5$  درجه همگراست. مطابق نمودار حساسیت مش رسم شده در شکل ۱۰، در محدوده‌ی تعداد المان ۲۰۰ تا ۵۰۰ در جهت طولی ورق، برگشت فنری تغییرات چندانی ندارد. بنابراین برای کاهش محاسبات و زمان حل، تعداد ۲۰۰ المان در جهت طول ورق در نظر گرفته می‌شود. اندازه‌ی المان بهینه برای ورق  $0/4 \times 0/55$  میلی‌متر مربع است و اندازه‌ی المان‌ها یکسان فرض می‌شود. مدل سخت‌شوندگی از نوع ایزوتروپیک غیرخطی در نظر گرفته می‌شود. به منظور شبیه‌سازی

جدول ۴: مقادیر برگشت فنری بدست آمده مطابق با آرایه پیشنهاد شده تاگوچی

	A=R	B=P	C=T	D=V	S.B1	S.B2	S. Ba
1	۸	۵۰	۲۰	۳۰	۱۳	۱۴/۵	۱۳/۷۵
2	۸	۶۵	۲۵	۴۰	۱۰	۱۱/۵	۱۰/۷۵
3	۸	۸۵	۴۵	۵۰	۹/۷۵	۹/۲۵	۹/۵
4	۱۰	۵۰	۲۵	۵۰	۱۷	۱۵	۱۶
5	۱۰	۶۵	۴۵	۳۰	۱۳	۱۲/۷۵	۱۲/۸۷۵
6	۱۰	۸۵	۲۰	۴۰	۱۳	۱۳/۲۵	۱۳/۱۲۵
7	۱۲	۵۰	۴۵	۴۰	۱۹	۲۰	۱۹/۵
8	۱۲	۶۵	۲۰	۵۰	۲۰	۲۰/۲۵	۲۰/۱۲۵
9	۱۲	۸۵	۲۵	۳۰	۱۸	۱۶	۱۷



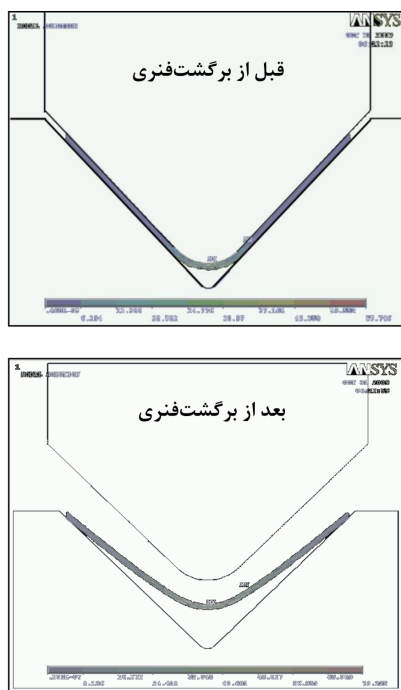
شکل ۶: (بالا) شماتیک و (پایین) تصویری از قالب ساخته شده جهت تست خمش



شکل ۱۱: مشخصات المان‌های تماس استفاده شده برای شبیه‌سازی المان محدود

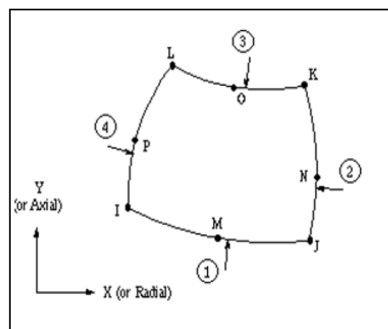
نیروی اعمالی به شکل گسترده و بر روی سطح سنبه اعمال می‌شود. مشخصات مکانیکی ورق در ناحیه الاستیک و پلاستیک به صورت مدول یانگ  $41 \text{ GPa}$  و ضریب پواسون  $0.3$  برای لایه‌ی کامپوزیتی و مدول یانگ  $80 \text{ GPa}$  و ضریب پواسون برابر  $0.33$  برای ورق آلومینیومی می‌باشند. برای ناحیه‌ی پلاستیک لایه‌ی آلومینیومی نیز مدل ترکیبی براساس تئوری پلاستیسیته‌ی سیلان با سخت‌شوندگی ایزوتروپیک غیرخطی و به کمک رابطه سوئیفت در نظر گرفته می‌شود.

پس از انجام مدل‌سازی و تعریف خواص مواد، هر قسمت از مدل (سنبه و ماتریس) توسط المان‌های خاص آن مش‌بندی می‌شود. نیروی لازم برای خمش به صورت جابجایی سنبه در ۱۳ مرحله اعمال می‌گردد و پس از اعمال بارگذاری و باربرداری (مطابق شکل ۱۲)، در انتها از طریق اندازه‌گیری کمیت‌های هندسی مربوطه مقدار برگشت فنری محاسبه می‌گردد [۳].

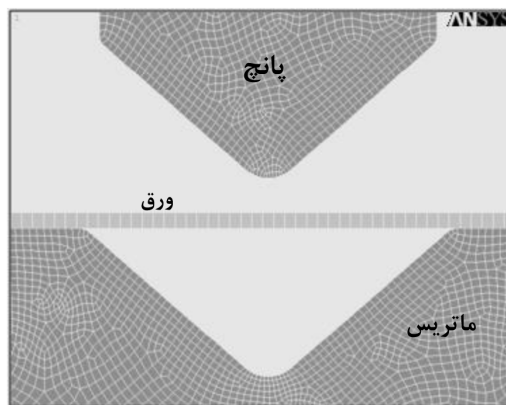


شکل ۱۲: شبیه‌سازی فرآیند خمکاری ورق سه لایه و میزان برگشت فنری آن

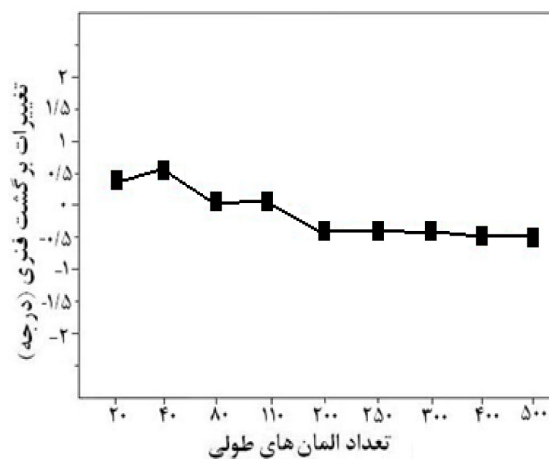
فرآیند مطابق با آزمایش انجام شده توسط قالب، باید ماتریس ثابت نگه داشته شود و سنبه قابلیت جابجایی در راستای ماتریس را داشته باشد. لازم است که المان‌های تماسی بین سنبه و سطح بالایی ورق و ماتریس با سطح پایینی ورق تعریف شوند. نوع المان‌های انتخاب شده برای مدل کردن نواحی تماسی، المان‌های تماس ۱۷۸ و هدف ۱۶۹ می‌باشد، شکل ۱۱، تکیه‌گاه‌ها با ایجاد محدودیت درجات آزادی در گره‌های گوشه بوجود آمده‌اند.



شکل ۸: مشخصات المان ۸۲ Plane استفاده شده جهت شبیه‌سازی المان محدود



شکل ۹: شبیه‌سازی فرآیند خمش V شکل



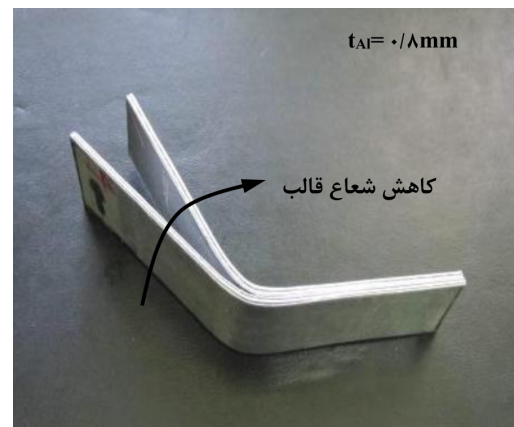
شکل ۱۰: نمودار حساسیت مش

۵- نتایج و بحث

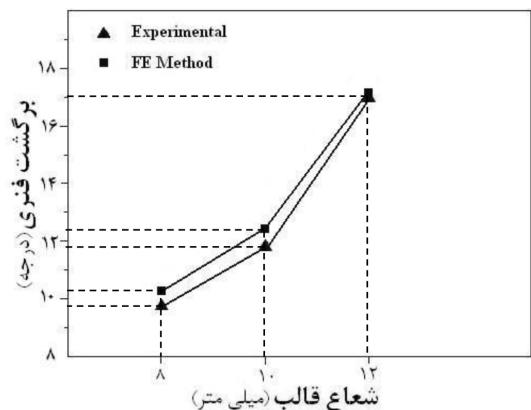
۱- تأثیر شعاع خم روی برگشت فنری

همانگونه که در قسمت‌های قبل گفته شد، در این تحقیق تأثیر عوامل طراحی و ساخت قالب همچون شعاع قالب، سرعت پانچ، فشار وارد بر ورق بر روی برگشت فنری ورق کامپوزیتی فلزی-الیافی مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور از قابلیت روش تاگوچی استفاده می‌شود و سایر داده‌های آزمایشی انجام نشده با استفاده از نرم افزار Minitab بدست می‌آیند و یک جمع‌بندی کلی در رابطه با تأثیر پارامترهای قالب روی برگشت فنری ورق‌های چندلایه حاصل می‌گردد. ورق مورد آزمایش چندلایه ۲/۱ GLARE می‌باشد که لایه‌های خارجی آن از جنس ۱۱۰۰ Al و ضخامت هر کدام ۰/۸ میلی‌متر و لایه‌ی مرکزی کامپوزیت الیاف شیشه با زاویه‌ی الیاف صفر درجه می‌باشد.

مطابق شکل‌های ۱۳ و ۱۴ بررسی تأثیر شعاع پانچ روی برگشت فنری کامپوزیت فلزی-الیافی نشان می‌دهد که برگشت فنری به میزان قابل توجهی تحت تأثیر شعاع پانچ است و با کاهش شعاع پانچ برگشت فنری کاهش می‌یابد. در واقع شعاع کوچک‌تر پانچ سبب تغییر شکل زیاد پلاستیک در ورق‌های آلومینیومی می‌شوند، بنابراین میزان برگشت فنری کاهش می‌یابد. در قسمت خم شده، آلومینیوم تغییر شکل الاستیک-پلاستیک می‌دهد ولی کامپوزیت به صورت الاستیک تغییر شکل می‌دهد.



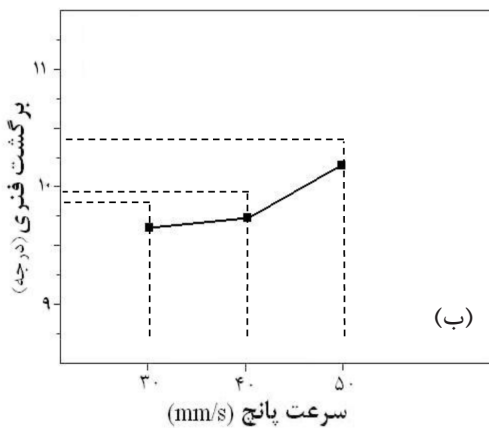
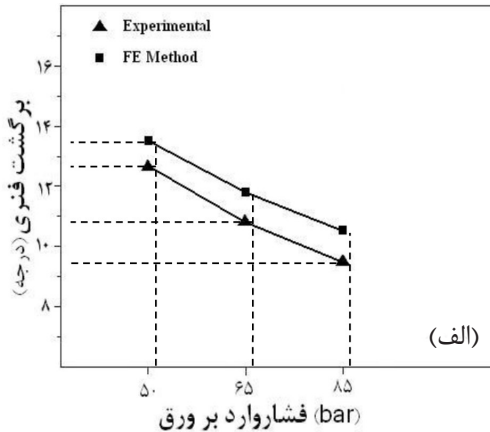
شکل ۱۳: تأثیر شعاع قالب روی برگشت فنری FML ۱/۲



شکل ۱۴: مقایسه نتایج تجربی و المان محدود تأثیر شعاع قالب روی برگشت فنری

۲- تأثیر فشار وارد بر ورق روی برگشت فنری

زمانی که فشار وارد بر ورق در حدود ۱۰ bar می‌باشد، قطعه مورد آزمایش فقط بین قالب و پانچ قرار دارد و بعد از آن فشار تا ۸۵ bar اعمال می‌شود. افزایش در مقدار فشار وارد بر ورق کامپوزیتی، باعث افزایش تغییر شکل پلاستیک در بخش خمیده شده و در مقایسه با ورق با فشار وارده‌ی کمتر میزان برگشت فنری کمتری را باعث می‌شود. میزان برگشت فنری مطابق شکل ۱۵- الف با افزایش فشار وارد بر ورق کاهش می‌یابد.



شکل ۱۵: نتایج تجربی تأثیر (الف) فشار وارد بر ورق و مقایسه با نتایج المان محدود، (ب) سرعت پانچ بر روی برگشت فنری

۳- تأثیر سرعت پانچ روی برگشت فنری

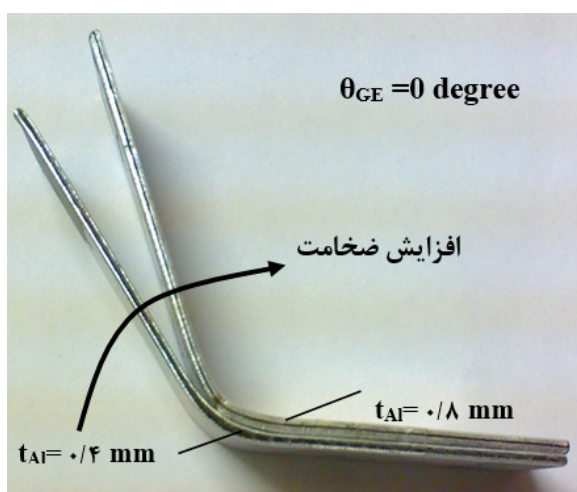
شکل ۱۵- ب نشان می‌دهد که با افزایش سرعت پانچ میزان برگشت فنری به صورت جزئی افزایش می‌یابد. تفاوت در میزان برگشت فنری از طریق مدت زمان اعمال فشار ایجاد می‌شود. پانچ‌های با سرعت بالا باعث افزایش برگشت الاستیک در ورق‌های آلومینیومی شده و خاصیت برگشت فنری آن را افزایش می‌دهند [۷].

۴- تأثیر زاویه‌ی الیاف روی برگشت فنری

از دیگر عواملی که بر روی برگشت فنری کامپوزیت‌های فلزی - الیافی تأثیرگذار می‌باشد، چگونگی ساخت ورق‌های کامپوزیتی فلز - الیاف و قرارگیری زاویه‌ی الیاف شیشه است. بدین منظور، نمونه‌ها با ابعاد  $25 \times 115 \text{ mm}^2$  و زوایای مختلف ساخته می‌شوند و مورد آزمایش خمش

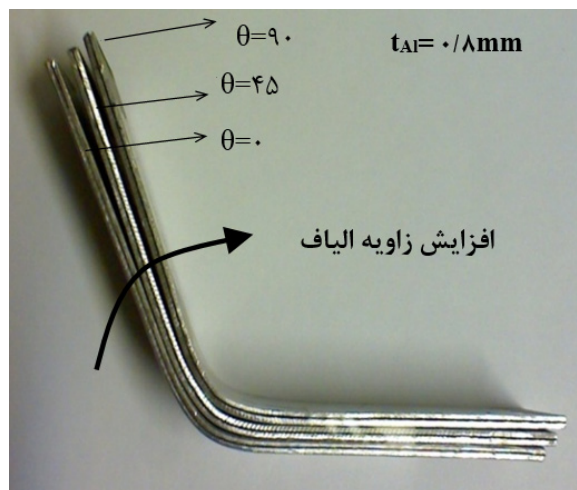


۵-۵- تأثیر افزایش ضخامت لایه‌ی خارجی روی برگشت‌فتری برای بررسی تأثیر ضخامت لایه‌ها روی برگشت‌فتری چند لایه‌ی ۲/۱، آلومینیوم به ضخامت ۰/۸ و ۰/۴ میلی‌متر و زاویه‌ی الیاف صفر درجه ساخته می‌شود و آزمایش خمش مطابق با پارامترهای تعیین شده در آزمایش قبلی و شعاع ۸ میلی‌متر، بر روی آن انجام می‌شود. شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نشان می‌دهند که با افزایش ضخامت لایه‌ی خارجی، میزان برگشت‌فتری کاهش می‌یابد زیرا منطقه‌ی پلاستیک در منطقه خم گسترش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که با افزایش ضخامت لایه خارجی قابلیت خمش‌پذیری به دلیل افزایش گسترش منطقه‌ی پلاستیک افزایش چشم‌گیری می‌یابد که این نتایج در مقایسه با تأثیر زاویه‌ی الیاف، نمود بارزتری دارد.

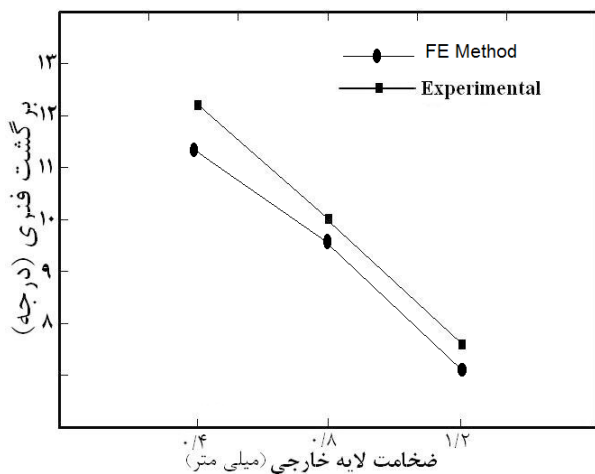


شکل ۱۸: تأثیر افزایش ضخامت لایه‌ی خارجی بر روی برگشت‌فتری کامپوزیت چند لایه الیاف-آلومینیوم ۲/۱

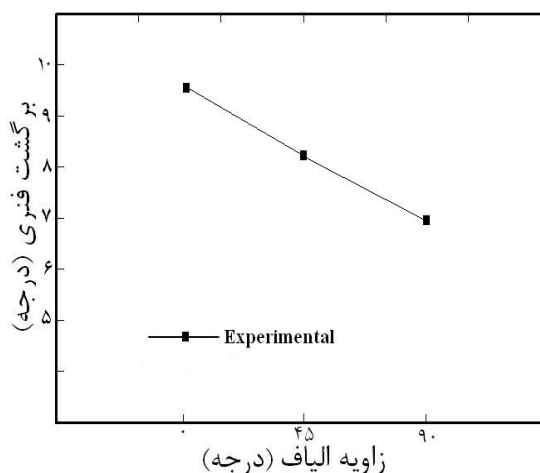
قرار می‌گیرند. برای بررسی تأثیر زاویه‌ی الیاف روی تغییرات برگشت‌فتری، مطابق با پارامترهای بهینه بدست آمده از طراحی آزمایش تاگوچی عمل می‌شود. زاویه‌ی خم ۱۰۰ درجه، ضخامت آلومینیوم بکار رفته ۰/۸ میلی-متر، ضخامت ورق کامپوزیتی (از نوع Al/Composite/Al) ۱/۹۵ میلی‌متر، سرعت پرس ۳۰ mm/s و درجه‌حرارت ۲۵ درجه سانتی‌گراد انتخاب می‌شوند. مطالعه تجربی فرآیند برای زوایای ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه (برای هر نمونه ۸ آزمایش) بروی دستگاه Zwick تکرار و در هر مرحله میزان برگشت‌فتری ثبت و میانگین آنها به عنوان پاسخ در نظر گرفته می‌شود. میزان برگشت‌فتری در نمونه‌های کامپوزیتی فلزی-الیافی بوسیله عکس‌برداری و مقایسه با زاویه‌ی اولیه، محاسبه می‌شود. شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نشان می‌دهند که میزان برگشت‌فتری در حالتی که زاویه‌ی الیاف موازی با محور خمش است (۹۰ درجه) کمتر می‌شود. لایه‌های کامپوزیتی با زاویه‌ی الیاف ۹۰ درجه مقاومت الاستیکی کمتری در مقایسه با سایر زوایا نشان می‌دهند و در نتیجه برگشت‌فتری کاهش می‌یابد.



شکل ۱۶: نتایج تجربی تأثیر (الف) فشار وارد بر ورق و مقایسه با نتایج المان محدود، (ب) سرعت پانچ بر روی برگشت‌فتری



شکل ۱۹: نمودار تأثیر افزایش ضخامت لایه‌ی خارجی بر روی برگشت‌فتری کامپوزیت چند لایه الیاف-آلومینیوم ۲/۱ با زاویه‌ی الیاف صفر درجه



شکل ۱۷: نمودار تأثیر زاویه‌ی الیاف بر روی برگشت‌فتری کامپوزیت چند لایه الیاف-آلومینیوم ۲/۱ با ضخامت ۰/۸ میلی‌متر لایه‌ی خارجی

## ۶- نتیجه گیری

در این پژوهش فرآیند خمش V شکل به منظور بهینه کردن پارامترهای فرآیند به روش طراحی آزمایش تاگوچی بررسی شد و تأثیر عواملی همچون شعاع قالب، سرعت پانچ و فشار وارد بر ورق روی برگشت فنری کامپوزیت فلزی - الیافی مورد مطالعه قرار گرفت. روش طراحی آزمایش تاگوچی نشان داد که تأثیر شعاع قالب بر قابلیت خمش پذیری در فرآیند خمش V نسبت به سایر پارامترها بیشتر است و بنابراین می‌تواند بیشترین تأثیر را در کاهش برگشت فنری داشته باشد. نتایج نشان داد که با کاهش شعاع پانچ و افزایش فشار وارد بر ورق، میزان برگشت فنری به دلیل بوجود آمدن تغییر شکل پلاستیک زیاد در ناحیه خم کاهش می‌یابد. از طرفی با افزایش سرعت پانچ میزان برگشت فنری افزایش می‌یابد زیرا سرعت بالا باعث افزایش برگشت الاستیک در ورق‌های آلومینیومی می‌شود و برگشت فنری آن را افزایش می‌دهد. در این پژوهش اثر زاویه‌ی الیاف و افزایش ضخامت لایه‌ی خارجی بر روی برگشت فنری به وجود آمده در فرآیند خمش کامپوزیت لایه‌ای فلز - الیاف نیز بررسی گردید. به منظور مطالعه‌ی این پارامترها ۶ دسته نمونه با زوایای الیاف متفاوت از هم و به صورت ۲/۱ و زوایای ۰، ۹۰ و ۴۵ درجه و ضخامت‌های ۰/۸ و ۰/۴ میلی‌متر ساخته شد و مورد آزمایش خمش قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش نشان می‌دهند که لایه‌های کامپوزیتی با زاویه‌ی الیاف ۹۰ درجه مقاومت الاستیک کمتری در مقایسه با سایر زوایا نشان می‌دهند و در نتیجه برگشت فنری آنها کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش ضخامت لایه‌ی خارجی میزان برگشت فنری به میزان چشم‌گیری کاهش می‌یابد که دلیل آن افزایش منطقه‌ی پلاستیک در لایه‌ی خارجی است. مقایسه‌ی نتایج نشان داد که از میان پارامترهای قالب و پرس، شعاع قالب و از میان پارامترهای ورق، افزایش ضخامت لایه‌ی خارجی در ورق‌های کامپوزیتی فلزی - الیافی بیشترین تأثیر را در کاهش برگشت فنری پس از فرآیند خمش V شکل دارند. به منظور بررسی درستی نتایج، داده‌های حاصل از آزمایش و روش المان محدود مقایسه و برابری خوبی بین نتایج حاصل شد.

## ۷- مراجع

- [5] Chan, W.M.; Chew, H.I.; Lee, H.P.; Cheok, B.T.; "Finite element analysis of spring-back of V-bending sheet metal forming processes", Journal of Materials Processing Technology, vol. 148, pp. 15-24, 2004.
- [6] Huang, M.; Leu, D., "Finite-element simulation of the bending process of steel/polymer/steel laminate sheets", Journal of Materials Processing Technology, vol. 52, pp. 319-337, 1995.
- [7] Kim, S.Y.; Choi, W.J.; Park, S.Y.; "Spring-back characteristics of fiber metal laminate (GLARE) in brake forming process", Journal of Manufacturing Technology, vol. 32, pp. 445-451, 2007.
- [8] Liu, Li.; Wang, Jyhwen.; "Modeling spring-back of metal-polymer-metal laminates", Journal of manufacturing Science and Engineering, vol. 604, pp. 599-604, 2004.
- [9] Long, A.C.; "HANDBOOK Composites forming technologies", First Edition, Woodhead Publishing, 2007.
- [10] Sadighi, M.; Dariushi, S.; "An experimental study on impact behavior of fiber metal laminates", Iranian Journal of Polymer Science and Technology, vol. 21, pp. 315-327, 2008.
- [11] Sadighi, M.; Tajdari, M.; Dariushi, S.; "An investigation on tensile properties of glass fiber /aluminium laminates", Iranian Journal of Polymer Science and Technology, vol. 22, pp. 31-39, 2009.
- [12] Sinke, J.; "Manufacturing of GLARE Parts and Structures, Applied Composite Materials", 4th Edition, Springer, 2003.
- [13] Standard Test Method for Tensile Properties of sheets, Annual book of ASTM Standard, D638, 2000.
- [14] Volt, A.; Vogelesang, L.B.; De Vries, T.J.; "Towards application of fiber metal laminates in larger aircraft", Aircraft Engineering and Aerospace Technology, vol. 71, pp. 558-570, 1999.
- [15] Wegman, R.F.; "Surface preparation techniques for adhesive bonding", William Andrew Publishing. Noyes, 1989.
- [16] Weiss, M.; Rolfe, B.; Dingle, M.; Hodgson, P.; "The influence of interlayer thickness and properties on springback of sps- (steel/polymer/steel) laminates", Steel Grips. Journal of Steel and Related Materials, vol. 2, pp. 445-449, 2004.
- [17] Wu, G.; Yang, J.M.; "The mechanical behavior of glare laminates for aircraft structures", JOM. Journal in the Minerals, Metals and Materials, vol. 57, pp. 72-79, 2005.
- [1] Borgonje, B.; Ypma, M.S.; "Long term behavior of GLARE", Application Composite Material, vol. 10, pp. 243-255, 2003.
- [2] Burgman, Patrik. M.; "Design of experiments- The Taguchi Way", 2nd Edition, Manufacturing Engineering, 1990.
- [3] Carden, W.D.; Geng, L.M.; Matlock, D.K.; Wangnor, R.H.; "Measurement of spring back", International Journal of Mechanical Sciences, vol. 44, pp. 79-101, 2002.
- [4] Carrillo, J.G.; Cantwell, W.J.; "Scaling effects in the tensile behavior of fiber metal laminate", International Journal of Mechanical Sciences, vol. 44, pp. 79-101, 2002.