



## مطالعه تجربی شکل دهی غلتکی ورق‌های FML پی‌وی‌سی / آلومینیوم / ایاف شیشه به مقطع کانالی شکل

وحید زال<sup>1</sup>، حسن مسلمی نائینی<sup>2\*</sup>، احمد رضا بهرامیان<sup>3</sup>، جواد شهبازی کرمی<sup>4</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- دانشیار، مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

4- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* صندوق پستی 143-14115، moslemi@modares.ac.ir، تهران

### چکیده

با توجه به گروه‌های عاملی قطبی گرمانرم پی‌وی‌سی و خاصیت چسبندگی بسیار خوب آن برای اتصال به فلزات، در این پژوهش به بررسی تولید و شکل‌دهی غلتکی ورق‌های FML پی‌وی‌سی / آلومینیوم / ایاف شیشه پرداخته شده است. برای این منظور، در ابتدا با استفاده از آزمون خمش سه نقطه‌ای مطابق استاندارد ASTM D790، به بررسی استحکام خمشی و کیفیت اتصال زمینه گرمانرم پی‌وی‌سی به لایه آلومینیومی در ورق‌های FML پرداخته شد. در ادامه ورق‌های FML با ابعاد 80×12 cm و با دو چیدمان [0/90, 0/90, Al]s و [45/-45, 45/-45, Al]s با استفاده از فرایند انباشت لایه‌ها و فشار گرم تولید شدند. ورق‌های حاصل به شکل تک ایستگاه و در دمای 160 °C به پروفیل کانالی با سه زاویه شامل 30، 45 و 60° شکل‌دهی غلتکی شده و سه عیب هندسی شامل کماتی شدن پروفیل، موج لبه و برگشت فتری و همچنین جدایش بین لایه آلومینیومی و کامپوزیتی در پروفیل‌های حاصل بررسی شد. در ادامه با توجه به نتایج شکل‌دهی تک ایستگاه، شکل‌دهی غلتکی پروفیل کانالی با زاویه 86° به صورت چند ایستگاه انجام گرفت و به بررسی اثر شکل‌دهی چند ایستگاه بر روی تجمع عیوب ایستگاه‌های مختلف شکل‌دهی پرداخته شد. در انتها نتیجه گرفته شده که افزایش بیش از 45° زاویه خم در هر ایستگاه موجب جدایش بین لایه‌های کامپوزیتی و آلومینیومی می‌شود و هرچقدر ایاف تقویتی در جهت طولی ورق‌های FML قرار گیرند، عیوب موج لبه و کماتی شدن کمتری در پروفیل‌های حاصل روی می‌دهد.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 30 خرداد 1395

پذیرش: 24 مرداد 1395

ارائه در سایت: 24 شهریور 1395

کلید واژگان:

چندلایه پی‌وی‌سی / آلومینیوم / ایاف شیشه

شکل‌دهی غلتکی

جدایش بین لایه‌ای

عیوب هندسی

## Experimental investigation on the roll forming of PVC /aluminum/glass fabric FMLs into channel section profiles

Vahid Zal<sup>1</sup>, Hassan Moslemi Naeni<sup>1\*</sup>, Ahmad Reza Bahramian<sup>2</sup>, Javad Shahbazi Karami<sup>3</sup>

1- Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3- Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran, moslemi@modares.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 19 June 2016

Accepted 04 August 2016

Available Online 14 September 2016

### Keywords:

PVC/aluminum/fiberglass FMLs

Roll Forming, Delamination

Geometrical defects

### ABSTRACT

Due to the polar functional groups of PVC thermoplastic and its good adhesiveness to the metals, production and roll forming of PVC/ aluminum/ glass fiber FMLs were investigated in this research. First, flexural strength and bonding quality between PVC matrix and aluminum layer in the FMLs were studied by doing three point bending tests according to ASTM D790 standard. In the following, FMLs with dimension of 12×80 cm and two layups including [0/90, 0/90, Al]<sub>s</sub> and [45/-45, 45/-45, Al]<sub>s</sub> were produced using film stacking and hot pressing procedure. The FMLs were rollformed into 30, 45 and 60° channel section profiles at 160°C using a single stand roll forming process and geometrical defects including profile bowing, edge wrinkling, spring back and also aluminum/composite layers delamination of the resulted profiles were evaluated. The FMLs also were roll formed into 86° channel section profiles using a multi stand roll forming process and the effects of multi stand roll forming on the defects stacking were evaluated. Finally, it was concluded that more than 45° bend angle increase in a roll forming stand results in composite/ aluminum delamination. Also, placement of the reinforcing fibers in the longitudinal direction of the profiles reduces the profile bowing and edge wrinkling defects significantly.

Please cite this article using:

V. Zal, H. Moslemi Naeni, A. R. Bahramian, J. Shahbazi Karami, Experimental investigation on the roll forming of PVC /aluminum/glass fabric FMLs into channel section profiles, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 9, pp. 207-215, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

V. Zal, H. Moslemi Naeni, A. R. Bahramian, J. Shahbazi Karami, Experimental investigation on the roll forming of PVC /aluminum/glass fabric FMLs into channel section profiles, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 9, pp. 207-215, 2016 (in Persian)

## 1- مقدمه

مواد ترکیبی نسل جدیدی از مواد صنعتی هستند که از چندین ماده با خواص مکانیکی مختلف تشکیل شده‌اند. در واقع هدف اصلی از تولید مواد ترکیبی، فراهم آوردن خواص چند ماده مختلف در یک ماده واحد است. FMLs<sup>1</sup> زیر مجموعه‌ای از محصولات ترکیبی هستند که با اتصال یک درمیان لایه‌های فلزی نازک و همچنین لایه‌های کامپوزیتی پلیمری حاصل می‌شوند. این محصولات مزایای هر دو لایه فلزی و کامپوزیتی را به صورت یکجا دارند، محصولات فلزی دارای صلیبت و مقاومت به ضربه بالاتری هستند در حالی که محصولات کامپوزیتی دارای استحکام خستگی و نسبت استحکام به چگالی بالاتری هستند. این محصولات از لایه‌های مختلفی تشکیل شده‌اند که معمولاً با اتصال چسبی به همدیگر چسبیده‌اند، بنابراین در صورت ایجاد ترک در یک لایه، رشد ترک با رسیدن به لایه بعدی متوقف شده و سرعت رشد ترک کمتر می‌شود و در نتیجه شکست ناشی از خستگی در محصولات FML دیرتر روی می‌دهد [2,1]. همچنین حضور لایه فلز نسبتاً ضربه پذیر در مجاورت لایه‌های کامپوزیتی مستحکم و نسبتاً ترد و همچنین اتصالات بین این لایه‌ها موجب افزایش ضربه پذیری و جذب انرژی توسط این محصولات در مقایسه با محصولات کامپوزیتی می‌شود [4,3]. با توجه به مزایای مطرح شده، کاربرد این محصولات در صنایع مختلفی نظیر هوافضا که مقاومت به رشد ترک، استحکام خستگی و مقاومت به صدمه دارای اهمیت بالایی است، مطلوب شده است [5].

کارهای تحقیقی مختلفی بر روی ارزیابی خواص FML ها و کارکرد آنها انجام گرفته است. بامباچ [6] افزایش زیاد ضربه‌پذیری و جذب انرژی اجزا خودرویی فولادی تقویت شده با چندلایه‌های کامپوزیتی اپوکسی الیاف کربن را گزارش کرده است که بدون افزایش چشمگیر وزن سازه حاصل شده است، با این وجود وی استحکام اتصال بین کامپوزیت/فلز را مهمترین عامل کارکرد این سازه‌ها معرفی کرده است که باید مورد مطالعه قرار گیرند [7]. عبدالهی چاخذ و همکاران [8] افزایش زیاد استحکام پیچشی مقاطع فولادی توخالی تقویت شده با اپوکسی/الیاف کربن را گزارش کرده‌اند که می‌تواند در کاربردهای سازه‌ای جایگزین مقاطع فلزی شوند. کارکردها و خواص مکانیکی گزارش شده مبتنی بر اتصال کامل و ایده‌آل بین لایه‌های فلزی و کامپوزیتی می‌باشد، در واقع استحکام اتصال بین لایه فلزی و کامپوزیتی تعیین کننده عملکرد و خواص این محصولات می‌باشد [9]. مشکل اصلی در تولید این محصولات اتصال بین لایه‌های کامپوزیتی و لایه فلزی است که در اثر تنش‌های برشی وارده (و در مواردی در اثر تنش‌های پسماند ناشی از فرایند تولید) دچار جدایش می‌شوند. بنابراین در پژوهش‌های مختلف، استحکام اتصال بین لایه‌های FML ها با استفاده از آزمون خمش (تنش‌های استاتیکی) و یا آزمون ضربه (تنش‌های دینامیکی) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

با وجود مزایای بسیار گسترده این محصولات و اهمیت آنها در صنایع پیشرو، تولید این محصولات با مشکلات فراوانی همراه است. برای تولید یک محصول FML نیاز به آغشته سازی الیاف تقویتی با پلیمر زمینه و همچنین اتصال مناسب لایه کامپوزیتی حاصل با لایه فلزی است. آغشته سازی و تولید لایه‌های کامپوزیتی فرایندی زمان‌بر است که موجب افزایش هزینه محصول و در نتیجه کاهش و محدود شدن کاربردهای این محصولات برای صنایع خاص می‌شود. علاوه بر مشکلات تولید لایه‌های کامپوزیتی، تولید FML ها نیز به دلیل حضور فلز و کامپوزیت در کنار هم، و خواص مکانیکی و گرمایی متفاوت

این دو، فرایند بسیار سخت و پیچیده‌ای دارد. برای غلبه بر مشکلات اشاره شده و کاهش هزینه و افزایش سرعت تولید محصولات FML، فرایندهای مختلف شکل‌دهی به عنوان روش بسیار مناسبی برای تولید این محصولات معرفی شده است [10]. در واقع مطابق این روند، به جای تولید محصول نهایی FML، ورق‌های تخت FML تولید شده و در ادامه با شکل‌دهی این ورق‌ها در شرایط مناسب، محصول نهایی تولید می‌شود.

برای شکل پذیر ساختن FMLها، نیاز به زمینه‌ای گرمانرم<sup>2</sup> است تا در اثر گرمادهی نرم شده و امکان شکل پذیری پیدا کنند. با توجه به اینکه الیاف تقویتی در FMLها الاستیک بوده و رفتار پلاستیک از خود نشان نمی‌دهند، بنابراین با افزایش دما، زمینه گرمانرم خمیری شده و امکان لغزش الیاف تقویتی از میان زمینه ایجاد می‌شود که این اندازه‌گیری موجب جابجایی الیاف (به جای کرنش پلاستیک الیاف) شده و ایجاد تغییر شکل‌های مختلف را ممکن می‌سازد. همچنین تغییر شکل FMLهای زمینه گرمانرم بسیار وابسته به استحکام اتصال بین لایه‌های کامپوزیتی و فلزی می‌باشد که این اندازه‌گیری تغییر شکل این ورق‌ها را محدود می‌سازد [11].

شکل‌دهی از فرایندهای متعارف تولید است که برای تولید بسیاری از قطعات فلزی ورقی به شکل اقتصادی به کار می‌رود. با توجه به سرعت بالای تولید و قابلیت تولید قطعات پیچیده با شکل‌دهی، اخیراً فرایندهای مختلف شکل‌دهی برای تولید محصولات FML مورد توجه محققان قرار گرفته و بررسی شده است.

کالیاناسوندرام و همکاران [12]، به بررسی اثر پارامترهای نیروی ورق گیر و دما بر روی شکل‌دهی اتساعی FML های پلی‌پروپیلنی خود تقویتی پرداختند و نتیجه گرفتند که تبلور مجدد زمینه، محدود کننده شکل‌دهی این FMLها هستند. گرشام و همکاران [13]، به بررسی شکل‌دهی کشش عمیق FMLهای زمینه پلی‌پروپیلن پرداختند و عیب پارگی در دماهای پایین و عیب چروکیدگی لبه در دماهای بالا را مشاهده کردند. ریز و همکاران [14]، به بررسی شکل‌دهی اتساعی FML های زمینه پلی‌پروپیلنی پرداختند و جدایشی بین لایه‌ها در حین شکل‌دهی را مهمترین عیب این فرایند معرفی کردند. لوک موس و همکاران [15]، به بررسی تاثیر پارامترهای دما و سرعت شکل‌دهی بر روی شکل پذیری FMLهای زمینه پلی‌پروپیلنی پرداختند و نتیجه گرفتند که برای بدست آوردن شکل هندسی مطلوب و جلوگیری از جدایش لایه‌ها، شکل‌دهی باید در یک بازه دمایی محدود 15 درجه سلسیوس انجام گیرد.

با وجود اینکه تولید پروفیل‌های FML اهمیت ویژه‌ای برای کاربردهای مختلف دارد، تا به حال پژوهشی راجع به شکل‌دهی پروفیل‌های FML انجام نگرفته است. مهمترین فرایند جهت شکل‌دهی انواع پروفیل‌های ساده و پیچیده به صورت پیوسته و اقتصادی، فرایند شکل‌دهی غلتکی است. بنابراین با توجه به خلاء موجود در این زمینه، در این پژوهش به بررسی شکل‌دهی غلتکی ورق‌های FML پرداخته شده است. نکته با اهمیت دیگری که وجود دارد، بسیاری از پژوهشگران از گرمانرم‌های نیمه بلوری نظیر پلی‌پروپیلن در بررسی شکل‌دهی FMLها استفاده کرده‌اند که قابلیت اتصال ضعیفی به فلزات دارد. این در حالی است که پلیمر گرمانرم قطبی و بی‌شکل<sup>3</sup> پی‌وی‌سی دارای خاصیت چسبندگی خوبی با فلزات و به ویژه به آلومینیوم (که اصلی‌ترین فلز مورد استفاده برای تولید FMLها است) دارد [16]. قابلیت

<sup>2</sup> Thermoplastic  
<sup>3</sup> Amorphous

<sup>1</sup> Fiber Metal Laminates

جدول 1. خواص مکانیکی ورق آلومینیوم Al3550 استفاده شده (بدست آمده از طریق آزمون کشش)

Table 1. Mechanical properties of the used Al3550 sheet (achieved using tensile test)

E (GPa)	استحکام		نسبت افزایش		K (MPa)	n
	تسلیم (MPa)	استحکام شکست (MPa)	طول در نقطه شکست	طول در نقطه شکست		
71	117	174	0.04	259	0.09	



Fig. 1 Three point bending test setup, mounted on a computer controlled universal compression testing machine.

شکل 1 مجموعه انجام آزمون خمش سه نقطه‌ای بر روی دستگاه تست فشار یونیورسال

استفاده از میکروسکوپ نوری بررسی شده است تا مکانیزم شکست و اتصال استحکام بین کامپوزیت و آلومینیوم بررسی شود.

### 3- جزئیات آزمایش‌های تجربی

#### 1-3- روند شکل‌دهی غلتکی

بعد از تعیین کیفیت اتصال لایه‌های کامپوزیتی و آلومینیومی در شرایط تولید ذکر شده، نمونه‌های FML با ابعاد 12×80 cm و با دو چیدمان [0/90, Al]s و [45/-45, 45/-45, Al]s تولید شد تا تحت شکل‌دهی غلتکی قرار گیرند.

مکانیزم تغییر شکل FMLها مبتنی بر تغییر موقعیت الیاف در داخل زمینه گرم‌نرم (با توجه به عدم امکان تغییر شکل پلاستیک الیاف تقویتی) و همچنین تغییر شکل پلاستیک لایه آلومینیومی است. با توجه به این اندازه‌گیری، افزایش دما شرط لازم برای شکل پذیر ساختن این ورق‌ها است. مطابق تحقیقات زال و همکاران [21]، دمای 160 °C حداقل دمای مناسب برای ممکن ساختن شکل پذیری این محصولات است. در دماهای کمتر از 160 °C، به دلیل سفتی بالای زمینه پی‌وی‌سی، الیاف امکان لغزش در درون زمینه پی‌وی‌سی را نمی‌یابند و لذا پارگی و شکست الیاف روی می‌دهد. افزایش دما تا 220 °C موجب بهبود شکل پذیری می‌شود ولی افزایش بیشتر دما موجب تخریب زمینه پی‌وی‌سی حساس به تخریب گرمایی شده و عملاً تولید محصول با کیفیت و سالم غیر ممکن می‌شود.

از طرف دیگر برای فرایند شکل‌دهی غلتکی که در آن کنترل بسیار کمی بر روی ورق وجود دارد، افزایش زیاد دمای شکل‌دهی به دلیل نرم شدن بسیار زیاد زمینه پی‌وی‌سی موجب عدم پایداری ورق در طول فرایند شده و کنترل شرایط تولید را سخت می‌کند. بنابراین حداقل دمای ممکن برای شکل‌دهی

پی‌وی‌سی برای ایجاد آغشته‌سازی خوب و با کیفیت با الیاف شیشه و تولید کامپوزیت های زمینه پی‌وی‌سی توسط زال و همکاران [18,17] بررسی و تایید شده است. با توجه به این اندازه‌گیری، در این پژوهش پی‌وی‌سی به عنوان زمینه برای تولید ورق‌های FML با تقویت‌کننده الیاف شیشه بافته و با لایه فلزی آلومینیومی به کار رفته است تا در کنار تولید FMLهای مستحکم و یک‌پارچه، احتمال جدایش بین لایه آلومینیومی و کامپوزیتی در حین شکل‌دهی کاهش یابد.

## 2- ساخت ورق‌های FML

### 1-2- مواد و روش تولید ورق‌های FML

برای فاز زمینه از گرم‌نرم پی‌وی‌سی نیمه سخت (با نرم کننده دی اکتیل فتالات<sup>1</sup>) با دمای انتقال شیشه‌ای 74 °C و دمای تخریب 296 °C، به شکل فیلم با ضخامت 0.2 mm استفاده شده است. برای فاز تقویت کننده نیز الیاف شیشه بافت مسطح گرید E با چگالی سطحی 200 g/m<sup>2</sup> استفاده شده است. برای لایه فلزی نیز از ورق آلومینیوم Al 3550 با ضخامت 0.5 mm و خواص مطابق جدول 1 استفاده شده است.

برای تولید نمونه‌ها از فرایند انباشت لایه‌ها<sup>2</sup>، به همراه فشار گرم استفاده شده است. برای این منظور چهار لایه الیاف شیشه با چیدمان مورد نظر به همراه یک لایه ورق آلومینیومی در میان 6 لایه فیلم پی‌وی‌سی قرار گرفته و با اعمال گرمای 230 °C و فشار 1.5 MPa در طول 5 دقیقه (شرایط بهینه برای تولید کامپوزیت‌های زمینه پی‌وی‌سی [19])، ورق‌های FML به شکل یکپارچه و همگن و با ضخامت 2.25 mm تولید شده‌اند. همچنین به منظور افزایش استحکام اتصال بین لایه آلومینیومی و کامپوزیتی، سطح ورق‌های آلومینیومی تحت خشن کاری مکانیکی قرار گرفتند.

### 2-2- روند اندازه‌گیری استحکام ورق‌های FML تولید شده

بعد از تولید ورق‌ها، به منظور بررسی کیفیت اتصال و استحکام بین لایه‌های کامپوزیتی و آلومینیومی، از آزمون خمش سه نقطه‌ای مطابق استاندارد ASTM D790 استفاده شده است. برای این منظور نمونه‌هایی با مقطع مستطیلی و با ابعاد 2.25×12.5 mm آماده شده و با استفاده از دستگاه آزمون فشار یونیورسال (UTM Gotech) تحت خمش قرار گرفتند. نسبت طول به ضخامت نمونه‌ها 16 بوده و آزمون با سرعت اعمال بار 5 mm/min انجام گرفته است (الیاف در جهت طول نمونه‌ها قرار دارند). در شکل 1 مجموعه انجام آزمون خمش سه نقطه‌ای ارائه شده است.

آزمون خمش سه نقطه‌ای مطابق استاندارد ASTM D790 انجام گرفته است که این استاندارد بر اساس تئوری شناخته شده تیموشنکو برای تیرهای همگن بوده و روابط خواص مکانیکی ارائه شده در آن برای نمونه‌های کامپوزیتی همگن است. با این وجود، کندی و همکاران [20]، این تئوری را اصلاح کرده و برای مواد لایه‌ای اورتوئوپیک نیز قابل استفاده ساختند. روابط لازم برای اندازه‌گیری استحکام و مدول خمشی و همچنین تنش‌های برشی در بین لایه‌های مختلف را بدست آوردند. بنابراین در این پژوهش با استفاده از دیاگرام‌های نیرو - جابجایی حاصل از آزمون خمش، استحکام خمشی و همچنین استحکام بین لایه‌های آلومینیوم/کامپوزیت نمونه‌ها مطابق تئوری کندی محاسبه شده است.

همچنین بعد از آزمون خمش سه نقطه‌ای، مقطع شکست نمونه‌ها با

1 Diethyl Phthalate (DOP)  
2 Film Stacking

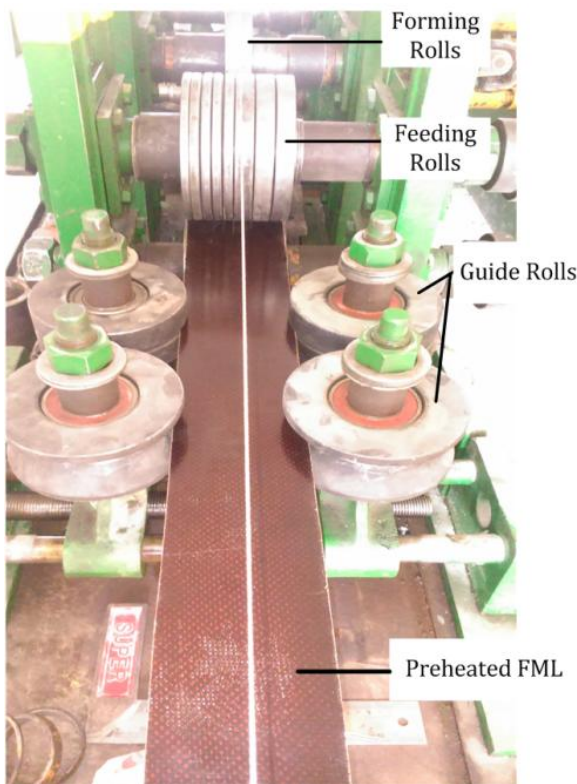


Fig. 2 Roll forming experimental setup, and guide system of the strips  
شکل 2 ماشین شکل‌دهی غلتکی به همراه سیستم هدایت ورق

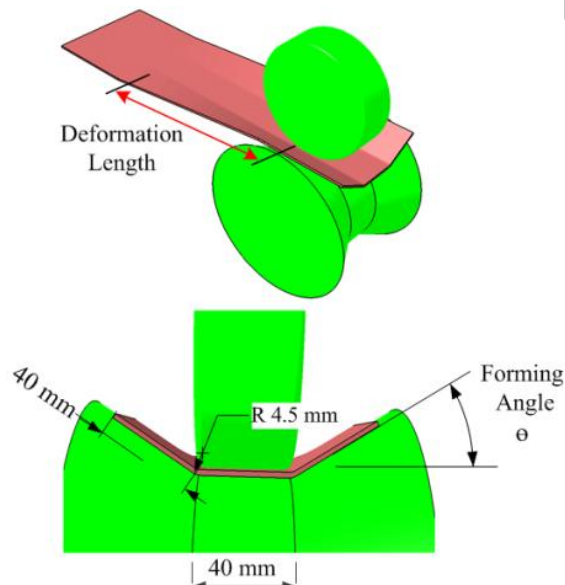


Fig. 3 Geometrical characteristics of roll formed section in a single stand roll forming line  
شکل 3 ابعاد و مشخصات پروفیل‌های حاصل از شکل‌دهی غلتکی تک ایستگاه

FML شکل‌دهی غلتکی شده است.

### 3-3- اندازه گیری عیوب هندسی شکل‌دهی غلتکی ورق‌ها

برای ایجاد پروفیل از ورق تخت اولیه نیاز به کرنش‌های عرضی دائمی در

چند لایه‌های کامپوزیتی موجب کمترین عیوب هندسی فرایند شکل‌دهی غلتکی خواهد شد. با این وجود برای جبران افت دمای ناشی از سرد شدن نمونه در طول فرایند شکل‌دهی، دمای شکل‌دهی غلتکی نمونه‌ها  $170^{\circ}\text{C}$  ( $10^{\circ}\text{C}$  بیشتر از حداقل دمای مناسب) لحاظ شد. بنابراین در ابتدای ماشین شکل‌دهی غلتکی مورد استفاده، کوره‌ای تعبیه شده است که نمونه‌ها به مدت 10 دقیقه توسط این کوره تا دمای  $170^{\circ}\text{C}$  گرم و به شکل همگن همدمای می‌شوند و سپس ورق گرم شده به میان یک جفت غلتک هدایت کننده منتقل می‌شوند تا نمونه را به میان غلتک‌های شکل‌دهی هدایت و تغذیه کند (شکل 2). بعد از عبور نمونه از میان غلتک‌های شکل‌دهی و ایجاد شکل مورد نظر، نمونه باید به سرعت تا زیر دمای انتقال شیشه‌ای زمینه پی‌وی‌سی سرد شود تا تغییر ابعاد و برگشت فزونی پروفیل نهایی کنترل شود. بنابراین در انتهای غلتک‌های شکل‌دهی، سیستم سردکننده افشانه آب تعبیه شده است که با پاشش سریع آب بر روی پروفیل‌های خروجی از میان غلتک‌ها، فرایند سرد کردن نمونه‌ها را انجام می‌دهد.

برای شکل‌دهی غلتکی نمونه‌های تولید شده از یک ماشین شکل‌دهی غلتکی 7 ایستگاه متعارف برای شکل‌دهی فلزات و با اعمال تغییرات اشاره شده، استفاده شده است. شکل‌دهی با سرعت خطی  $40\text{ mm/sec}$  قطر غلتک‌های شکل‌دهی  $185\text{ mm}$  و با فاصله بین ایستگاهی  $375\text{ mm}$  انجام گرفته است.

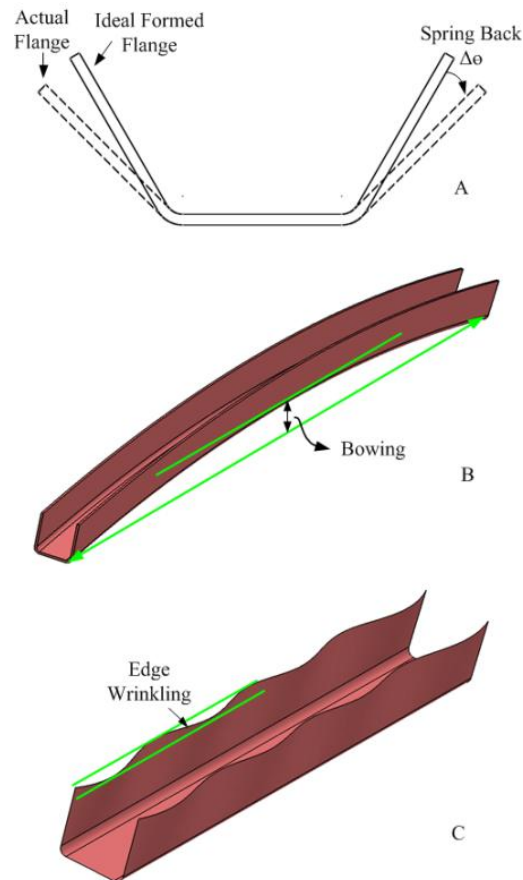
### 3-2- پارامترهای مورد بررسی و طراحی آزمایش

برای تغییر شکل ورق‌های FML جهت الیاف اهمیت بالایی دارد. در واقع زاویه قرار گیری الیاف نسبت به جهت خم تعیین کننده قابلیت تغییر شکل این ورق‌ها است. با توجه به اینکه دو مکانیزم اصلی تغییر شکل کامپوزیت‌ها شامل لغزش لایه‌ها بر روی یکدیگر و کرنش داخل صفحه‌های لایه‌ها است، دو چیدمان الیاف  $[0/90, 0/90, \text{Al}]_s$  و  $[45/-45, 45/-45, \text{Al}]_s$  که هر کدام از این دو مکانیزم را فعال می‌کنند مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در چیدمان الیاف  $[0/90]$  به دلیل اینکه کرنش داخل صفحه‌های لایه‌ها در طول الیاف بسیار کم است، لغزش لایه‌ها بر روی یکدیگر تعیین کننده تغییر شکل نهایی خواهد بود. در حالی که در چیدمان  $[45/-45]$  لایه‌ها می‌توانند به سهولت در جهت خم دچار برش داخل صفحه‌های شده و تغییر شکل‌های مورد نظر را ایجاد کنند.

در کنار دو چیدمان مورد بررسی، پارامتر فرایندی زاویه شکل‌دهی نیز به منظور تعیین الگوی گل شکل‌دهی مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا، فرایند شکل‌دهی به صورت تک ایستگاه و با سه زاویه شکل‌دهی مختلف مطابق جدول 2 انجام گرفته است تا حداکثر زاویه خمکاری در هر ایستگاه و یا به عبارت دیگر الگوی گل شکل‌دهی غلتکی هر کدام از نمونه‌ها بدست آید. در شکل 3 ابعاد پروفیل‌های حاصل نشان داده شده است.

در ادامه به منظور ایجاد پروفیل کانالی شکل، از شکل‌دهی غلتکی چهار ایستگاه با زوایای 0، 30، 60 و  $86^{\circ}$  برای هر کدام از چیدمان‌های الیاف استفاده شد تا پروفیل‌های کانالی با زاویه  $86^{\circ}$  و ابعاد وب و فلنج  $40\text{ mm}$  ایجاد شده و ایجاد عیوب در شکل‌دهی غلتکی چند ایستگاه پروفیل کانالی شکل بررسی شود.

سه زاویه شکل‌دهی تک ایستگاه در کنار یک حالت شکل‌دهی چند ایستگاه برای هر کدام از چیدمان‌ها، موجب ایجاد 8 حالت شکل‌دهی مطابق جدول 2 می‌شود که با توجه به دو تکرار هر حالت، در مجموع 16 نمونه



**Fig. 4** Common defects in roll forming process of channel sections, A) Spring back, B) Bowing and C) edge wrinkling  
 شکل 4 عیوب هندسی متداول در شکل‌دهی غلتکی، (A) عیب برگشت فنی، (B) عیب کمائی شده و (C) عیب موج لبه

برای یک نمونه کاملاً کامپوزیتی در شرایط تولید مشابه نیز حدوداً همین استحکام بدست می‌آید. این اندازه‌گیری بیان می‌کند که لایه آلومینیومی با وجود اینکه استحکام کششی پایین‌تری نسبت به لایه‌های کامپوزیتی دارد، به دلیل قرار گیری در تار خنثی، تنش کمتری تحمل کرده و اثر کاهش بر روی استحکام خمشی محصولات FML ندارد. با بررسی تصاویر میکروسکوپ نوری ناحیه شکست ملاحظه می‌شود که لایه‌های کامپوزیتی و لایه آلومینیومی نمونه‌های FML تولید شده تحت بارگذاری خمشی، هر دو دچار شکست شده‌اند و هیچ‌گونه جدایشی بین این لایه‌ها روی نداده است. در شکل 5 تصویر میکروسکوپ نوری مقطع شکست نمونه FML نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، اتصال بین لایه آلومینیوم و کامپوزیت به قدری مستحکم است که تحت بارگذاری خمشی که مطابق روابط تئوری کندی [20] تنش‌های برشی در حدود 7 MPa ایجاد می‌شود، هیچ‌گونه جدایشی روی نداده است. در ادامه به منظور تعیین دقیق‌تر استحکام برشی بین لایه آلومینیومی و کامپوزیتی، آزمون خمش سه نقطه‌ای با نسبت طول به ضخامت 8، انجام شد که در شرایط آزمون جدید نیز استحکام خمشی در حدود 230 MPa بدست آمد درحالی که تنش برشی در حدود 14 MPa بین لایه‌های کامپوزیتی و آلومینیومی ایجاد شد که باز هم جدایش بین لایه‌های روی نداد. به دلیل محدودیت تنظیمات دستگاه، امکان انجام آزمون در نسبت طول به ضخامت پایین‌تر وجود نداشت. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که

جدول 2 حالت‌های مختلف شکل‌دهی غلتکی اعمال شده بر روی نمونه‌های FML

**Table 2** Different combinations of parameters in the roll forming of the FMLs

چیدمان الیاف	[45/-45, 45/-45, Al]s	[0/90, 0/90, Al]s
زاویه شکل‌دهی تک ایستگاه	0 به 30 0 به 45 0 به 60	0 به 30 0 به 45 0 به 60
زوایای شکل‌دهی چند ایستگاهه پروفیل	0, 30, 60, 86	0, 30, 60, 86

ناحیه خم است تا شکل مطلوب ایجاد شود. برخلاف فرایندهای خمکاری ساده که در آنها فقط این کرنش‌های عرضی ایجاد می‌شود، در فرایند شکل‌دهی غلتکی به منظور ایجاد خم مورد نظر، در کنار کرنش عرضی، کرنش طولی در طول ورق نیز ایجاد می‌شود که در واقع عامل بسیاری از عیوب هندسی در این فرایند است.

همان‌طور که در شکل 3 مشاهده می‌شود، از یک فاصله‌ای قبل از غلتک‌ها، ورق شروع به خم شدن تدریجی کرده و در زیر غلتک‌ها به بیشترین زاویه خم می‌رسد. به این ناحیه شروع خم ورق در پشت ایستگاه، ناحیه تغییر شکل می‌گویند. تغییر شکل تدریجی در این ناحیه موجب ایجاد کرنش‌های کششی طولی در لبه پروفیل (علاوه بر کرنش عرضی در ناحیه خم که در واقع تعیین کننده زاویه خم و شکل پروفیل است) می‌شود. اگر این کرنش‌های طولی در ناحیه الاستیک ورق باشد، بعد از عبور ورق از زیر غلتک‌ها و دریافت تغییر شکل مورد نظر، کرنش‌های طولی ایجاد شده به حالت اولیه خود برمی‌گردد. در حالتیکه که کرنش‌های طولی ایجاد شده در ناحیه تغییر شکل دائمی باشند، بعد از عبور ورق از میان غلتک‌ها، طول لبه پروفیل ایجاد شده از طول کف پروفیل بیشتر می‌شود که این اندازه‌گیری منشاء بسیاری از عیوب هندسی در فرایند شکل‌دهی غلتکی است.

دو عیب اصلی ناشی از این کرنش‌های کششی طولی در ناحیه تغییر شکل، کمائی شدن و موجدار شدن لبه پروفیل است. کمائی شدن به مفهوم خارج شدن پروفیل از حالت مستقیم است که در شکل 4-B نشان داده شده است، بیشترین تغییر ارتفاع کف پروفیل به عنوان شاخص این عیب تعریف شده و با استفاده از ساعت اندازه‌گیری با دقت 0.01 میلی‌متر اندازه گرفته شده است. بیشترین دامنه موج‌های ایجاد شده در لبه پروفیل‌ها (شکل 4-C) نیز به عنوان عیب موج لبه تعریف شده و این نیز با استفاده از ساعت اندازه‌گیری و در طول کلی پروفیل برای هر دو لبه پروفیل اندازه گرفته شده است. همچنین کرنش‌های الاستیک در ناحیه خم (کرنش در جهت مماس بر ناحیه خم) موجب ایجاد برگشت فنی می‌شود که این عیب نیز دقت ابعادی محصول نهایی را به هم می‌زند. برای اندازه‌گیری برگشت فنی پروفیل‌ها از گونیا با دقت 5 دقیقه استفاده شده است. برای جلوگیری از اثر موج لبه بر نتایج برگشت فنی، اندازه‌گیری برگشت فنی در 8 نقطه مختلف از هر کدام از لبه‌های پروفیل‌ها انجام گرفته و میانگین 16 اندازه‌گیری به عنوان برگشت فنی آن پروفیل لحاظ شده است. در شکل 4-A تعریف و نحوه اندازه‌گیری برگشت فنی پروفیل‌های شکل‌دهی شده ارائه شده است.

#### 4-نتایج و بحث

##### 4-1- نتایج استحکامی ورق‌های FML تولید شده

مطابق نتایج حاصل از آزمون خمش سه نقطه‌ای، استحکام خمشی نمونه‌های FML تولید شده حدود 230 MPa بدست آمد. این در شرایطی است که

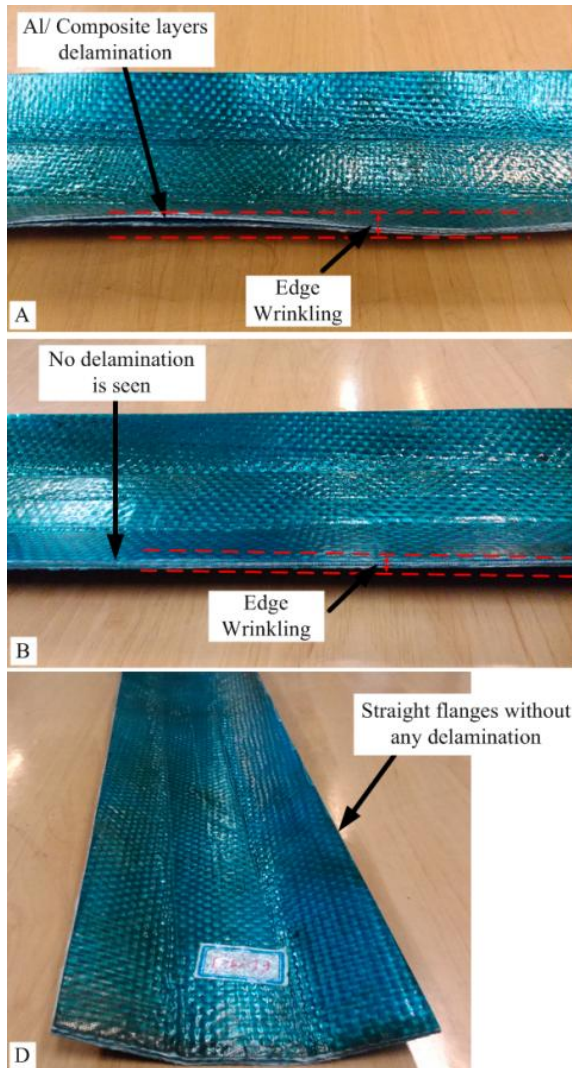


Fig. 6 Single stand roll forming of the [0/90, 0/90, Al]s FMLs into: A: 60°, B: 45° and C: 30° channel section profiles

شکل 6 پروفیل‌های FML با چیدمان [0/90, 0/90, Al]s. حاصل از شکل‌دهی غلتکی تک ایستگاه به 60° (A)، 45° (B) و 30° (D)

همان‌طور که در شکل 6 ملاحظه می‌شود، شکل‌دهی غلتکی تک ایستگاه به زاویه 30° آسیبی به اتصال بین لایه‌های کامپوزیتی و آلومینیومی نرزه و همچنین موج لبه بسیار کمی روی داده است. درحالی که زاویه شکل‌دهی 45° موج لبه را اندکی تشدید کرده است ولی همچنان اتصال بین لایه آلومینیوم و کامپوزیت سالم است. برای زاویه شکل‌دهی 60°، جدایش بین لایه آلومینیومی و کامپوزیتی کاملاً مشهود است (شکل 6-A) و همین اندازه‌گیری باعث شده است که به دلیل تغییر شکل مستقل از هم لایه‌ها، عیب موج لبه بسیار شدیدی نیز روی دهد. با توجه به جدایش و فاصله گرفتن لایه‌ها از هم در این حالت، عملاً امکان اندازه‌گیری عیوب برای پروفیل‌های شکل‌دهی تک ایستگاه به 60° وجود ندارد. ولی برای دو حالت دیگر، عیوب مورد بحث اندازه‌گیری شده و در ادامه ارائه می‌شود.

3-4- برگشت فزنی پروفیل‌های شکل‌دهی غلتکی شده  
عواملی نظیر رفتار الاستیک و پلاستیک لایه آلومینیومی و همچنین



Fig. 5 Optical microscope image of the failed FMLs in the three point bending test

شکل 5 تصویر میکروسکوپ نوری از مقطع شکست نمونه FML در اثر آزمون خمش سه نقطه‌ای

استحکام خمشی نمونه‌های FML تولید شده 230 MPa بوده و استحکام برشی بین لایه آلومینیومی و کامپوزیتی بیشتر از 14 MPa است. بعد از اینکه اتصال بسیار مناسب بین لایه‌های آلومینیوم و کامپوزیت در ورق‌های FML تولید شده تأیید شد، این ورق‌ها در ادامه پژوهش تحت شکل‌دهی غلتکی در دمای بالا (160 °C) قرار گرفتند. نتایج حاصل در ادامه ارائه شده است.

#### 4-2- جدایش بین لایه های آلومینیوم و کامپوزیت در طول شکل‌دهی

اگرچه در دمای محیط استحکام اتصال بسیار خوبی بین لایه‌های FML مشاهده شد، این اتصال مستحکم در شرایط دما بالا تضعیف شده و مشاهده می‌شود که در بعضی از شرایط شکل‌دهی جدایش بین لایه‌های آلومینیومی و کامپوزیتی روی می‌دهد. برای شکل‌دهی‌های تک ایستگاه، شکل‌دهی ورق تخت اولیه به زوایای 30° و 45° موجب تولید پروفیل‌های یک‌پارچه می‌شد که عملاً هیچ گونه جدایشی بین لایه‌های آلومینیومی و کامپوزیتی روی نداده است. با این حال شکل‌دهی تک ایستگاه ورق تخت به زاویه 60° موجب جدایش بین لایه‌های آلومینیومی و کامپوزیتی می‌شود. این جدایش برای هر دو چیدمان الیاف مشاهده می‌شود.

در واقع افزایش زاویه شکل‌دهی موجب افزایش تنش‌های برشی در بین لایه‌ها می‌شود و از طرف دیگر در دمای شکل‌دهی (160 °C) الیاف و لایه آلومینیومی تقریباً خواص اولیه خود را حفظ کرده‌اند ولی گرم‌ترم پی‌وی‌سی بسیار نرم شده و نمی‌تواند تنش چندانی را تحمل کند. بنابراین تحت شرایط شکل‌دهی، به جای اینکه همه لایه‌ها دچار کرنش همزمان شوند، لایه آلومینیومی و الیاف در مجاورت پی‌وی‌سی بسیار نرم دچار لغزش بر روی همدیگر شده (بدون کرنش چشمگیر) و تغییر شکل مورد نظر را فراهم می‌آورند. حال برای زوایای 30° و 45° این لغزش کم بوده و توسط پی‌وی‌سی تحمل شده است ولی با افزایش زاویه شکل‌دهی، این لغزش نیز بیشتر شده و لایه پی‌وی‌سی دچار واماندگی شده و در نتیجه جدایش آلومینیوم/کامپوزیت روی داده است. در شکل 6 تصویر نمونه‌های FML با چیدمان [0/90, Al]s که به صورت تک ایستگاه شکل‌دهی غلتکی شده‌اند، ارائه شده است.

غلتکی هستند که معمولاً محدود کننده اصلی حداکثر زاویه خم در هر ایستگاه بوده و نیاز به بررسی دارند. در شکل 8 مقادیر این دو عیب برای پروفیل‌های FML شکل‌دهی تک ایستگاه ارائه شده است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، افزایش زاویه شکل‌دهی موجب افزایش هر دو عیب موج لبه و کمائی شدن می‌شود. در ناحیه تغییر شکل هر ایستگاه، لبه ورق کرنش‌های کششی طولی دریافت می‌کند و این اندازه‌گیری باعث می‌شود که طول لبه پروفیل شکل‌دهی شده از طول کف آن بیشتر شود. در شرایطی که این کرنش‌های طولی دائمی باشند، بعد از اتمام تغییر شکل به حالت اولیه بر نگشته و در نتیجه لبه پروفیل تحت فشار قرار می‌گیرد که این اندازه‌گیری موجب بروز دو عیب کمائی شدن پروفیل و موج لبه می‌شود تا این افزایش طول جبران شود.

هرچقدر زاویه شکل‌دهی در یک ایستگاه بیشتر باشد، کرنش‌های طولی دائمی ایجاد شده در لبه پروفیل نیز بیشتر شده [23] و در نتیجه این دو عیب نیز تشدید می‌شود.

ملاحظه می‌شود که این دو عیب به موازات هم عمل می‌کنند، بدین معنی که افزایش کرنش‌های طولی هر دو عیب را تقریباً به یک میزان تشدید می‌کند، در حالی که با بررسی کیفی نمونه FML شکل‌دهی غلتکی شده به زاویه  $60^\circ$  ملاحظه می‌شود که در این پروفیل موجدار شدن لبه بسیار تشدید شده است، ولی عیب کمائی شدن چندان بیشتر نشده است (به دلیل جدایش لایه‌های در پروفیل‌های  $60^\circ$ ، داده‌های کمی قابل گزارش نبود). وقتی ورق FML در طول شکل‌دهی دچار جدایش می‌شود، هر کدام از لایه‌های

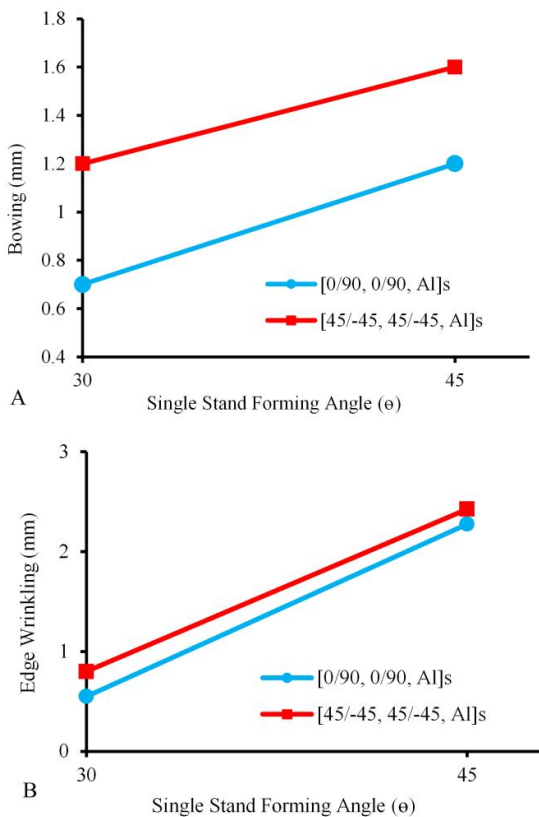


Fig. 8 Bowing (A) and edge wrinkling (B) of the single stand roll formed FML profiles

شکل 8 نتایج کمائی شده پروفیل (A) و موج لبه (B) در نمونه‌های FML شکل‌دهی غلتکی شده به صورت تک ایستگاهی

ناهمسانگردی خواص حرارتی لایه‌های کامپوزیتی و رفتار ویسکوالاستیک آن موجب ایجاد تغییر ابعاد و زاویه در یک محصول FML شکل‌دهی شده می‌شوند.

رفتار الاستیک مواد موجب ذخیره انرژی الاستیک می‌شود که این انرژی الاستیک تمایل دارد حالت اولیه محصول شکل‌دهی شده را بازیابی کند که در نتیجه موجب برگشت فنری می‌شود. برای لایه‌های فلزی هرچقدر نسبت کرنش‌های الاستیک به کرنش‌های دائمی (کرنش پلاستیک) در اثر شکل‌دهی بیشتر باشد، میزان برگشت فنری نیز بیشتر می‌شود.

از طرف دیگر در لایه‌های کامپوزیتی به دلیل ضریب انبساط حرارتی بیشتر لایه‌ها در جهت ضخامت، بنا به تئوری اونیل [22]، پروفیل‌های کامپوزیتی بعد از شکل‌دهی تمایل به افزایش زاویه<sup>1</sup> دارند. هرچقدر دمائی شکل‌دهی بالاتر باشد و یا زاویه شکل‌دهی بیشتر شود، این افزایش زاویه نیز بیشتر می‌شود. همچنین رفتار ویسکوالاستیک لایه‌های کامپوزیتی نیز در جهت افزایش برگشت فنری عمل می‌کنند. با توجه به اثرات متقابل پارامترها بر روی تغییر زاویه شکل‌دهی، برای پروفیل‌های FML شکل‌دهی شده اثر برگشت فنری غالب بوده و مشاهده می‌شود که در همه پروفیل‌ها برگشت فنری روی داده است هرچند این اثر با افزایش زاویه شکل‌دهی کمتر شده و اثر افزایش زاویه حرارتی بیشتر شده است. در شکل 7 برگشت فنری هر کدام از ورق‌های FML شکل‌دهی غلتکی تک ایستگاه نشان داده شده است.

نکته دیگری که از این نتایج مشاهده می‌شود، اثر چیدمان الیاف است. برای چیدمان الیاف [0/90]، برگشت فنری بیشتری روی داده است. این اندازه‌گیری به دلیل مدول الاستیک بالاتر لایه‌های کامپوزیتی در راستای الیاف (راستای خم در چیدمان [0/90]) است که موجب ذخیره انرژی بالاتر در فرایند شکل‌دهی شده و در نتیجه برگشت فنری بیشتری روی می‌دهد. پس می‌توان نتیجه گرفت اگرچه برگشت فنری در شکل‌دهی ورق‌های FML بیشتر تابع لایه فلزی است، ولی چیدمان الیاف نیز به دلیل ایجاد خواص الاستیک و خواص حرارتی متفاوت در جهت‌های مختلف، بر اندازه برگشت فنری اثر می‌گذارد. این اثر برای چیدمان [0/90] و همچنین زوایای تغییر شکل بالاتر، بیشتر است.

#### 4-4- کمائی و موجدار شدن لبه پروفیل‌های شکل‌دهی غلتکی شده کمائی شدن پروفیل و موج لبه نیز از دیگر عیوب متعارف فرایند شکل‌دهی

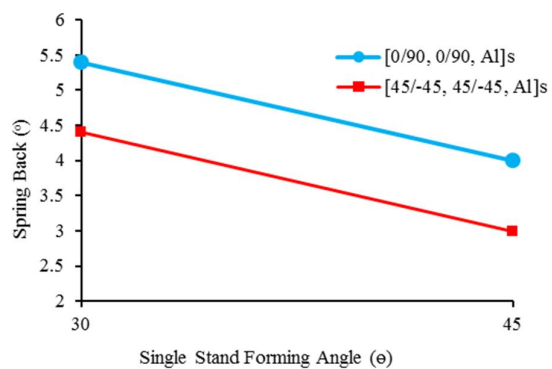


Fig. 7 spring back of single stand roll formed FML profiles

شکل 7 نتایج برگشت فنری نمونه‌های FML شکل‌دهی غلتکی شده به صورت تک ایستگاهی

<sup>1</sup> Spring forward

1.25 mm است که این مقادیر تقریباً برابر با میزان کمائی شدن شکل‌دهی تک ایستگاه به زاویه 30° است. عیب موج لبه نیز به ترتیب 0.9 و 1 mm برای دو چیدمان مذکور روی داده است که این عیب نیز تقریباً برابر با مقادیر شکل‌دهی غلتکی تک ایستگاه به زاویه 30° است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد این دو عیب به علت کرنش‌های دائمی در ناحیه تغییر شکل اتفاق می‌افتند. وقتی که ورق از ایستگاه اول شکل‌دهی خارج می‌شود، کرنش‌های دائمی در لبه پروفیل ایجاد شده و طول لبه پروفیل بیشتر می‌شود. این کرنش‌های دائمی به ایستگاه دوم نیز انتقال یافته و در نتیجه در ناحیه تغییر شکل ایستگاه دوم، کرنش‌های بیشتری در لبه پروفیل ایجاد نمی‌شود. با توجه به این روند، این دو عیب در ایستگاه‌های مختلف بر روی هم انباشته نشده و می‌توان نتیجه گرفت که در شکل‌دهی غلتکی چند ایستگاه FMLها، عیب موج لبه و کمائی شدن پروفیل برابر با عیب ایجاد شده در ایستگاه با بیشترین تغییر زاویه است.

اگر چه برای پروفیل‌های کانالی تولید شده جدایش بین لایه‌های آلومینیومی و کامپوزیتی روی نداده است، ولی با بررسی‌های کیفی مشاهده می‌شود که لغزش لایه‌های کامپوزیتی بر روی لایه آلومینیومی اتفاق افتاده است که این اندازه‌گیری می‌تواند بر خواص مکانیکی محصول نهایی اثرگذار باشد. دلیل این لغزش بدون جدایش، مربوط به رفتار ویسکوز زمینه پی‌وی‌سی مابین لایه کامپوزیتی و آلومینیومی است. در واقع در هر ایستگاه که تغییر شکل انجام می‌گیرد، تنش و کرنش‌های برشی بسیار بالایی بین لایه‌های آلومینیوم و کامپوزیت روی می‌دهد ولی بلافاصله بعد از عبور ورق از زیر غلتک‌ها، به دلیل رفتار ویسکوز بسار زیاد پی‌وی‌سی در دمای شکل‌دهی، تنش‌های ایجاد شده آزاد شده و کرنش‌ها باقی می‌مانند (مطابق اندازه‌گیری‌های انجام شده، در دمای 160 °C، 50 درصد تنش ایجاد شده در پی‌وی‌سی در کمتر از 1 ثانیه آزاد می‌شود). در نتیجه در هر ایستگاه کرنش‌های برشی مابین لایه آلومینیومی و کامپوزیتی انباشته شده و در انتهای فرایند همانند یک لغزش بین این دو لایه مشاهده می‌شود. اگر پی‌وی‌سی دچار استراحت تنش نمی‌شد، بعد از هر ایستگاه شکل‌دهی، بخشی از کرنش‌های برشی ایجاد شده را به حالت اولیه بر می‌گرداند و کرنش‌های برشی بر روی هم انباشته نمی‌شدند.

#### 5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای اولین بار شکل‌دهی غلتکی ورق‌های FML مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، ورق‌های FML پی‌وی‌سی/آلومینیوم/الیاف شیشه با دو چیدمان  $[0/90, 0/90, Al]_s$  و  $[45/-45, 45/-45, Al]_s$  به روش انباشت لایه‌ها تولید شده و با موفقیت شکل‌دهی غلتکی تک ایستگاه و چند ایستگاه شدند. نتایج زیر از این پژوهش بدست آمدند:

- در شکل‌دهی ورق‌های FML هرچقدر الیاف تقویتی در جهت خم قرار گیرند، به دلیل افزایش رفتار الاستیک عرضی ورق، برگشت فنری را تشدید می‌کنند.
- هرچقدر الیاف تقویتی در جهت طول ورق‌های FML قرار گیرند، به دلیل افزایش رفتار الاستیک طولی ورق، دو عیب موج لبه و کمائی شدن پروفیل کمتر روی می‌دهد.
- شکل‌دهی غلتکی ورق‌های FML زمینه پی‌وی‌سی به 60° در یک ایستگاه، موجب ایجاد عیب جدایش بین لایه‌های آلومینیومی و کامپوزیتی می‌شود.
- در شکل‌دهی غلتکی چند ایستگاه ورق‌های FML، عیوب در

کامپوزیتی و آلومینیومی به صورت مستقل از هم شکل‌دهی شوند و در نتیجه ضخامت عملی ورق کاهش یابد که همین اندازه‌گیری موجب تغییر شرایط ایجاد عیب می‌شود.

بسته به میزان ضخامت ورق، نقش هرکدام از دو عیب کمائی شدن و موج لبه در جبران کرنش‌های دائمی لبه پروفیل تغییر می‌کند. اگر ضخامت ورق کم باشد، در اثر تنش‌های فشاری به سرعت کمائش کرده و لذا بخش عمده‌ای از کرنش‌های دائمی ایجاد شده از طریق موج لبه جبران می‌شود و کمائی شدن بسیار کم روی می‌دهد. در مقابل اگر ضخامت ورق بالا باشد سفتی خمشی فلنج متناسب با توان دوم ضخامت افزایش می‌یابد در حالی که سفتی خمشی پروفیل به شکل خطی با ضخامت افزایش می‌یابد. در نتیجه در مقابل کرنش‌های دائمی فشاری، موج لبه به راحتی افزایش نمی‌یابد زیرا نیروی مقاوم در برابر موج لبه به شکل تعادلی بیشتر شده و در نتیجه نیروهای مؤثر برای کمائی سازی پروفیل بیشتر شده و نقش کمائی شدن برای جبران کرنش‌های دائمی بیشتر می‌شود [24].

همچنین مشاهده می‌شود که عیوب مذکور برای چیدمان  $[45/-45]$  بیشتر از چیدمان  $[0/90]$  است. این اندازه‌گیری به دلیل خواص ویسکوالاستیک بسیار بالای لایه‌های کامپوزیتی با چیدمان  $[45/-45]$  در جهت طول ورق است که موجب می‌شود کرنش‌های طولی ایجاد شده در ناحیه تغییر شکل با تاخیر زمانی به حالت اولیه برگردند (و بخشی از کرنش‌های الاستیک به دلیل استراحت تنش، تبدیل به کرنش دائمی شوند) و در نتیجه کرنش‌های دائمی در لبه پروفیل بیشتر شود که موجب ایجاد عیب بیشتر می‌شود.

با توجه به روند تشریح شده، می‌توان نتیجه گرفت که هرچقدر الیاف در جهت طولی ورق قرار گیرند و یا به عبارت دیگر هرچقدر مدول الاستیک لایه کامپوزیتی در جهت طولی ورق افزایش یابد (مثلاً با افزایش درصد الیاف و یا استفاده از الیاف صلب‌تر) هر دو عیب کمائی شدن و موج لبه کمتر ایجاد خواهد شد.

البته باید در نظر گرفت که افزایش مدول الاستیک در ورق موجب بیشتر شدن عیب برگشت فنری پروفیل می‌شود ولی با توجه به اینکه عیب برگشت فنری قابل جبران است ولی ایجاد دو عیب موج لبه و کمائی شدن موجب کاهش کیفیت پروفیل می‌شود، بنابراین می‌توان گفت که چیدمان الیاف  $[0/90]$  برای شکل‌دهی غلتکی ورق‌های FML مناسبتر از چیدمان الیاف  $[45/-45]$  است.

#### 4-5- شکل‌دهی چند ایستگاه پروفیل کانالی شکل

بعد از انجام شکل‌دهی غلتکی تک ایستگاه، مشاهده شد که شکل‌دهی به زاویه 30° در هر ایستگاه موجب محصولات سالم و کم عیب می‌شود. بنابراین در ادامه شکل‌دهی غلتکی چهار ایستگاه به منظور تولید پروفیل کانالی شکل با زاویه نهایی 86° انجام گرفت. برای پروفیل‌های تولید شده مشاهده شد که برگشت فنری دو چیدمان  $[0/90, 0/90, Al]_s$  و  $[45/-45, 45/-45, Al]_s$  به ترتیب 4.25 و 3.4° است. مقادیر بدست آمده از برگشت فنری تک ایستگاه کمتر است که نشان می‌دهد همانند شکل‌دهی غلتکی فلزات، هرچقدر زاویه تغییر شکل محصول نهایی بیشتر باشد برگشت فنری کمتری اتفاق می‌افتد. بالاتر بودن برگشت فنری چیدمان الیاف با زاویه 90 درجه نیز به دلیل رفتار الاستیک بالای الیاف در جهت خم است.

عیب کمائی شدن پروفیل در شکل‌دهی غلتکی چند ایستگاه برای دو چیدمان  $[0/90, 0/90, Al]_s$  و  $[45/-45, 45/-45, Al]_s$  به ترتیب 0.8 و



- [12] S. Kalyanasundaram, S. DharMalingam, S. Venkatesan, A. Sexton, Effect of process parameters during forming of self-reinforced – PP based Fiber Metal Laminate, *Composite Structures*, Vol. 97, pp. 332–337, 2013.
- [13] J. Gresham, W. Cantwell, M. J. Cardew-Hall, P. Compston, S. Kalyanasundaram, Drawing behaviour of metal–composite sandwich structures, *Composite Structures*, Vol. 75, No. 2, pp. 305–312, 2012.
- [14] G. Reyes, H. Kang, Mechanical behavior of lightweight thermoplastic fibermetal laminates, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 186, No. 1, pp. 284–290, 2007.
- [15] L. Mosse, P. Compston, W. J. Cantwell, M. Cardew-Hall, S. Kalyanasundaram, The effect of process temperature on the formability of polypropylene based fibre–metal laminates, *Composites: Part A*, Vol. 36, No. 8, pp. 1158–1166, 2005.
- [16] V. Zal, H. Moslemi Naeini, A. R. Bahramian, H. Abdollahi, Evaluation of the effect of aluminum surface treatment on mechanical and dynamic properties of PVC/aluminum/fiber glass fiber metal laminates, *Journal of Process Mechanical Engineering*, 2016, 0954408916657371
- [17] V. Zal, H. Moslemi Naeini, A. R. Bahramian, H. Abdollahi, A. H. Behravesh, Investigation of the effect of processing temperature on the elastic and viscoelastic properties of PVC/fiberglass composite laminates, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 11, pp. 9–16, 2016. (in Persian فارسی)
- [18] V. Zal, H. Moslemi Naeini, A.R. Bahramian, B. Abbaszadeh, H. Abdollahi, Analysis and optimization of tensile strength of PVC/fiberglass composite laminates, *4th international conference on composites (CCFA4)*, Tehran, Iran, December 16–17, 2014.
- [19] V. Zal, H. Moslemi Naeini, A.R. Bahramian, A.H. Behravesh, H. Abdollahi, Investigation of the effect of processing time and temperature on the strength of PVC/fiberglass thermoplastic composites, *the 23th. Annual (International) Conference on Mechanical Engineering*, Tehran, Iran, 2015. (in Persian فارسی)
- [20] G. J. Kennedy, J. S. Hansen, J. R. R. A. Martins, A Timoshenko beam theory with pressure corrections for layered orthotropic beams. *International Journal of Solids Structures*, Vol. 48, No. 16, pp. 2373–2382, 2011.
- [21] V. Zal, H. Moslemi Naeini, A.R. Bahramian, J. Sinke, Investigation of the effect of temperature and layup on the press forming of PVC based composite laminates and FMLs, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1–11, 2016.
- [22] J. M. O' Neill, T. G. Rogers, A. J. M. Spencer, Thermally induced distortions in the moulding of laminated channel sections. *Mathematical Engineering in Industry*, Vol. 2, No. 1, pp. 65–72, 1988.
- [23] R. Safdarian, H. Moslemi Naeini, The effects of forming parameters on the cold rollforming of channelsection, *Thin-Walled Structures*, Vol. 92, pp. 130–136, 2015.
- [24] R. Azizi, *Theoretical, numerical and experimental analysis of flange wrinkling in the roll forming of symmetrical channel section profiles*, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, 2013. (in Persian فارسی)

ایستگاه‌های مختلف انباشته نشده و بیشتر تابع ایستگاه با بیشترین تغییر زاویه هستند.

## 6- سپاس‌گزاری

از شرکت پایا پروفیل واقع در شهرک صنعتی مورچه خورت اصفهان، بابت همکاری‌های لازم جهت تامین و اعمال تغییرات بر روی ماشین شکل‌دهی غلتکی مورد استفاده، کمال سپاس‌گزاری اعلام می‌شود.

## 7- مراجع

- [1] T. Yamaguchi, T. Okabe, S. Yashiro, Fatigue simulation for titanium/CFRP hybrid laminates using cohesive elements, *Composites Science and Technology*, Vol. 69, No. 11, pp. 1968–1973, 2009.
- [2] S. U. Khan, R. C. Alderliesten, C. D. Rans, R. Benedictus, Application of a modified Wheeler model to predict fatigue crack growth in Fibre Metal Laminates under variable amplitude loading, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 77, No. 9, pp. 1400–1416, 2010.
- [3] R. C. Alderliesten, Designing for damage tolerance in aerospace: A hybrid material technology, *Materials and Design*, Vol. 66, pp. 421–428, 2015.
- [4] A. Seyed Yaghoubi, B. Liaw, Effect of lay-up orientation on ballistic impact behaviors of GLARE 5 FML beams, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 54, pp. 138–148, 2013.
- [5] S. Sugiman, A. D. Crocombe, The static and fatigue response of metal laminate and hybrid fibre-metal laminate doublers joints under tension loading, *Composite Structures*, Vol. 94, No. 9, pp. 2937–2951, 2012.
- [6] M. R. Bambach, Fibre composite strengthening of thin steel passenger vehicle roof structures, *Thin-Walled Structures* Vol. 74, pp. 1–11, 2014.
- [7] M. R. Bambach, Fibre composite strengthening of thin-walled steel vehicle crush tubes for frontal collision energy absorption, *Thin-Walled Structures*, Vol. 66, pp. 15–22, 2013.
- [8] N. Abdollahi Chahkand, M. Zamin Jumaat, N. H. Ramli Sulong, X. L. Zhao, M. R. Mohammadzadeh, Experimental and theoretical investigation on torsional behavior of CFRP strengthened square hollow steel section, *Thin-Walled Structures*, Vol. 68, pp. 135–140, 2013.
- [9] T. Sinmazçelik, E. Avcu, M. Özgür Bora, O. Çoban, A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods, *Materials and Design*, Vol. 32, No. 7, pp. 3671–3685, 2011.
- [10] A. Sexton, W. Cantwell, S. Kalyanasundaram, Stretch forming studies on a fibre metal laminate based on a self-reinforcing polypropylene composite, *Composite Structures*, Vol. 94, No. 2, pp. 431–437, 2012.
- [11] J. Sinke, *Forming technology for composite/metal hybrids*, *Composites forming technologies*, A.C. Long (Ed.), pp. 197–219, Cambridge, Woodhead publishing limited, 2007.